DOI: 10.5281/zenodo.23455750

ZİRAAT, ORMAN VE SU ÜRÜNLERİ
GÜNCEL GELİŞMELER VE TEMATİK İNCELEMELER

Editörler
Prof. Dr. İsmet Daşdemir
Prof. Dr. Nilda Ersoy

Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Alanında Güncel Gelişmeler ve Tematik İncelemeler

Editörler

Prof. Dr. İsmet Daşdemir

Prof. Dr. Nilda Ersoy

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. İsmet Daşdemir & Prof. Dr. Nilda Ersoy

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Ekim, 2026

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN

978-625-6517-39-4

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

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

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



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1..... 7

Dijital Tarımda Yapay Zekâ ve Akıllı Teknolojilerin Entomolojik Uygulamaları ve Entegre Zararlı Yönetimindeki Rolü

Furkan Harun Baş

İslam Saruhan

BÖLÜM 2..... 31

Balıkçılıkta Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi Uygulamaları: R ile Kavramlar, Yöntemler ve Örnekler

Tevfik Ceyhan

BÖLÜM 3..... 67

Yapay Resiflerde Malzeme Teknolojileri: Tasarım, Performans ve Ekolojik Etkiler

F. Ozan Düzbastılar

BÖLÜM 4.....103

Koyun *(Ovis aries)* Taksonomisi ve Evcilleştirilmesi

Cemalettin Sefa Aykaç

Selahaddin Kiraz

BÖLÜM 5.....115

Karadeniz Bölgesi'nde Önemli İstilacı Böcek Türleri ve Biyolojik Mücadele İmkanları

Kibar Ak

BÖLÜM 6.....145

Türkiye'de Fındık Bahçelerinde Bulunan Yazıcıböcekler (Coleoptera: Curculıonıdae: Scolytınae)'in Tür Çeşitliliği Ekonomik Önemi ve Entegre Yönetimi

Kibar Ak

Furkan Harun Baş

BÖLÜM 7.....183

Narenciye Ekosistemlerinde Yünlü Beyazsinek (Aleurothrixus floccosus Maskell)'in Biyo-Ekolojik Özellikleri, Zarar Mekanizmaları Ve Entegre Mücadele Yaklaşımları

Murat Helvacı

BÖLÜM 8 199

Kivide Virüs Hastalıklarının Epidemiyolojisi ve Yayılım Dinamikleri
Yağmur Türkmen

BÖLÜM 9 217

Balıkçılıkta Mekânsal, Zamansal ve Bayesçi Modelleme: R ile Kavramlar, Yöntemler ve Örnekler
Tevfik Ceyhan

BÖLÜM 10 245

Kurakçıl Peyzaj Yaklaşımı ve Kentsel Isı Adası Etkisi: İklim Dirençli Kentsel Yeşil Alanlar için Güncel Yaklaşımlar
Handan Çakar
Hülya Akat

BÖLÜM 11 267

Kivilerde (*Actinidia* spp.) Fitoplazma Hastalıkları: Mevcut Bilgiler ve Araştırma Gereksinimleri
Yağmur Türkmen

BÖLÜM 12 277

Türkiye'nin Köpük Böcekleri
Mehmet Zahid Karahalilöz
Emine Demir Özden

BÖLÜM 13 293

Glifosat İzopropilamin Tuzunun Ergin Zebra Balığı (*Danio rerio*) Üzerindeki Akut Davranışsal ve Morfolojik Yanıtlar Üzerine Etkisi
Özge Zencir Tanır
Nalan Yıldırım Doğan

BÖLÜM 14 307

Tritikalenin Evrimsel Gelişimi ve Gelecek Potansiyeli
Birol Taş

BÖLÜM 15 321

Tarım Alet ve Makinalarında Görülen Ergonomik Sorunlar ve İnsan Sağlığına Etkileri
Birol Taş

BÖLÜM 16.....335

Toprak ve Toprak İlişkili Doğal Hammaddelerin Terapi ve Rehabilitasyon Alanındaki Potansiyel Kullanımları

Serdar Sarı

BÖLÜM 17.....367

Balık Çiftlikleri ve Avcılık Balıkçılığı Arasındaki Ekolojik Bağlantılar ve Etkileşim Mekanizmaları

Adnan Tokaç

BÖLÜM 18.....375

Sürdürülebilir Kırsal Kalkınma: Konya-Karaman İllerinde Mısır Tarımının Değerlendirilmesi

Mustafa Belen
Ahmet Bayrac
Ali Kahraman

BÖLÜM 19.....385

Türkiye'de Tahılların Depolama Şekli ve Bazı Önemli Depo Zararlıları

Merve Yıldız
Asuman Kaplan Evlice

BÖLÜM 20.....409

Ekmeklik Buğdayda Başak Fertilitesi ve Çiçekçik Kayıpları: Tane Sayısının Oluşumu, Genetik Kontrolü ve Islah Stratejileri

Yavuz Balmuk
Cemal Şermet

BÖLÜM 21.....421

Bıldırcın Ürünlerinin Fonksiyonel Gıda Potansiyeli ve Endüstriyel İşlenmesi

Muhlis Macit

BÖLÜM 22.....435

Yem Kalitesi, Hijyeni ve Olası Tehlikeler

Ezgi Şenses
Berkay Erdoğmuş
Arda Çelik

BÖLÜM 23 477

Manda Yetiştiriciliğinde Termal Stres (Sıcaklık ve Soğuk Stresi): Besleme, Fizyolojik Yanıtlar ve Azaltma Stratejileri

Ayşe Şen
Fisun Koç

BÖLÜM 24 505

Düşük Kaliteli Kaba Yemlerin (Saman) Besin Değerinin Artırılması: Geleneksel ve Yenilikçi Yaklaşımlar

Fisun Koç

BÖLÜM 25 533

Kentsel Yeşil Alanların Ekosistem Hizmetleri ve Sürdürülebilir Peyzaj Planlamasındaki Rolü

Handan Çakar
Özlem Akat Saraçoğlu

BÖLÜM 1

Dijital Tarımda Yapay Zekâ ve Akıllı Teknolojilerin Entomolojik Uygulamaları ve Entegre Zararlı Yönetimindeki Rolü

Furkan Harun Baş[1]
İslam Saruhan[2]

[1] Ondokuzmayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü
[2] Ondokuzmayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü

1. GİRİŞ

Tarımsal üretimde verim ve kaliteyi sınırlandıran en önemli biyotik faktörlerden biri zararlı böceklerdir. Dünya genelinde böcekler, bitki hastalıkları ve yabancı otların neden olduğu ürün kayıpları, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından önemli ekonomik ve ekolojik sorunlar oluşturmaktadır. Özellikle küresel ticaretin artması, iklim değişikliği, tarımsal üretim sistemlerinin yoğunlaşması ve istilacı türlerin yayılışı, zararlı böcek popülasyonlarının dinamiklerini değiştirmekte ve geleneksel mücadele yöntemlerinin etkinliğini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle zararlı yönetiminde yalnızca kimyasal mücadeleye dayanan yaklaşımlardan uzaklaşılması ve sürdürülebilir yönetim stratejilerinin geliştirilmesi zorunlu hâle gelmiştir (Oerke, 2006; Ehler, 2006).

Sentetik insektisitlerin özellikle II. Dünya Savaşı sonrasında yaygın olarak kullanılmaya başlanması, kısa vadede zararlı popülasyonlarının baskılanmasında önemli başarılar sağlamıştır. Ancak uzun süreli ve yoğun pestisit kullanımı sonucunda insektisit direnci, doğal düşman popülasyonlarının azalması, ikincil zararlıların ortaya çıkması, çevresel kirlilik ve gıda güvenliğiyle ilişkili kalıntı sorunları gibi çok sayıda olumsuzluk meydana gelmiştir. Bu gelişmeler, yalnızca kimyasal mücadeleye dayanan stratejilerin uzun vadede sürdürülebilir olmadığını ortaya koymuş ve ekolojik temelli yönetim yaklaşımlarının geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Deguine ve ark., 2021).

Bu anlayışın sonucu olarak geliştirilen Entegre Zararlı Yönetimi (Integrated Pest Management, IPM), zararlı popülasyonlarını tamamen ortadan kaldırmayı değil, ekonomik zarar eşiğinin altında tutmayı amaçlayan; kültürel, biyolojik, biyoteknik, mekanik ve kimyasal mücadele yöntemlerini ekolojik prensipler doğrultusunda bir araya getiren bütüncül bir yönetim sistemidir. IPM'nin temelinde zararlı popülasyonlarının düzenli olarak izlenmesi, ekonomik zarar eşiğine dayalı karar verilmesi, doğal düşmanların korunması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi yer almaktadır. Günümüzde IPM, sürdürülebilir tarımın temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Son yıllarda dijital teknolojilerde yaşanan hızlı gelişmeler, IPM uygulamalarında yeni bir dönemin başlamasına öncülük etmiştir. Hassas tarım uygulamaları, yapay zekâ, makine öğrenmesi, bilgisayarlı görme, insansız hava araçları (İHA), uzaktan algılama, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve karar destek sistemleri gibi teknolojiler, zararlı popülasyonlarının gerçek zamanlı izlenmesini ve mücadele kararlarının daha doğru verilmesini mümkün hâle getirmektedir. Özellikle otomatik böcek tanılama sistemleri, akıllı feromon tuzakları ve drone tabanlı görüntüleme teknolojileri sayesinde IPM'nin temel bileşenlerinden biri olan izleme (monitoring) süreçleri daha hızlı, objektif ve ekonomik olarak gerçekleştirilebilmektedir.

Dijital tarım, yalnızca mevcut mücadele yöntemlerini destekleyen teknolojik araçlar sunmakla kalmamakta; aynı zamanda IPM'nin temel kavramlarının yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir. Gerçek zamanlı veri akışı, yerel uygulamalar, değişken oranlı ilaçlama, otonom sistemler ve yapay zekâ destekli

tahmin modelleri sayesinde ekonomik zarar eşiği, örnekleme stratejileri ve mücadele zamanlaması gibi klasik IPM bileşenleri daha hassas biçimde uygulanabilmektedir. Böylece pestisit kullanımının azaltılması, doğal düşmanların korunması ve çevresel sürdürülebilirliğin artırılması yönünde önemli ilerlemeler sağlanmaktadır.

Bununla birlikte, dijital teknolojilerin tarımsal entomolojiye başarılı biçimde entegre edilmesi yalnızca teknolojik altyapıya bağlı değildir. Yüksek kaliteli veri kümelerinin oluşturulması, algoritmaların farklı agroekolojik koşullarda doğrulanması, ekonomik uygulanabilirlik, üreticilerin teknolojiye erişimi ve disiplinler arası iş birliği gibi konular, bu dönüşümün başarısını belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle dijital IPM yaklaşımı, yalnızca teknolojik yeniliklerin değil, aynı zamanda entomoloji, bitki koruma, bilgisayar mühendisliği, veri bilimi ve tarım ekonomisi gibi farklı disiplinlerin ortak çalışmasını gerektiren bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

Entomoloji alanında yapay zekâ önemli bir araç haline gelmiş ve kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Entomologlar, yapay zekanın sunduğu olanaklardan pek çok alanda faydalanmışlardır. Yapay zekâ entomolojide; böcek türlerinin tahmininde, böcek popülasyonlarının takibinde, zararlı böceklerin belirlenmesinde ve böcek davranışlarının modellemesine kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle tarım alanlarında yapılan gözlemler ve ölçümler sonucunda elde edilen büyük veri kümelerinin hızlı ve hassas bir şekilde analiz edilmesi, böceklerle mücadele stratejilerinin geliştirilmesinde entomologlara önemli bir katkılar sağlamaktadır (Küçüktopcu ve ark., 2023)

Bu kitap bölümünün amacı; Entegre Zararlı Yönetimi'nin temel ilkelerini dijital tarım perspektifinden değerlendirmek, yapay zekâ ve görüntü işleme teknolojilerinin tarımsal entomolojideki güncel uygulamalarını incelemek, drone sistemleri, uzaktan algılama, akıllı tuzaklar ve karar destek sistemlerinin IPM programlarına katkılarını ortaya koymak ve gelecekteki araştırma alanlarına ilişkin kapsamlı bir değerlendirme sunmaktır. Böylece klasik IPM yaklaşımı ile yeni nesil dijital teknolojiler arasındaki ilişkinin bilimsel temelleri bütüncül bir bakış açısıyla ele alınacaktır.

2. Entegre Zararlı Yönetiminin (IPM) Temel İlkeleri

2.1. IPM Kavramının Ortaya Çıkışı ve Gelişimi

Entegre Zararlı Yönetimi (Integrated Pest Management, IPM), tarımsal üretimde zararlı organizmaların ekonomik zarar oluşturmayacak seviyelerde tutulmasını amaçlayan ekolojik temelli bir yaklaşımdır. IPM kavramı, özellikle 20. yüzyılın ortalarında kimyasal pestisitlerin yoğun kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan çevresel ve agronomik sorunlara bir yanıt olarak gelişmiştir. 1950'li yıllarda Stern ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar, modern IPM yaklaşımının teorik temelini oluşturmuştur. Bu çalışmalarda "ekonomik zarar eşiği" ve "ekonomik mücadele eşiği" kavramları ilk kez sistematik biçimde tanımlanmıştır (Stern et al., 1959). Bu yaklaşım, zararlıların tamamen yok edilmesini değil, ekonomik kayıplara neden olmayacak seviyede tutulmasını

hedeflemiştir. 1970'li yıllardan itibaren IPM, yalnızca entomolojik bir yaklaşım olmaktan çıkarak bitki hastalıkları ve yabancı ot yönetimini de kapsayan bütüncül bir sistem hâline gelmiştir. Bu süreçte Kogan (1998), IPM'i "ekosistem temelli, çok bileşenli ve bilgi yoğun bir karar verme süreci" olarak tanımlamış ve modern IPM anlayışının çerçevesini genişletmiştir. Günümüzde IPM, FAO tarafından "zararlı popülasyonlarını ekonomik eşiklerin altında tutmak için tüm uygun yöntemlerin uyumlu biçimde kullanıldığı ekosistem temelli bir yaklaşım" olarak tanımlanmaktadır (FAO, 2022).

2.2. IPM'nin Temel Felsefesi

IPM'nin temel felsefesi, zararlıların tamamen ortadan kaldırılması değil, ekosistem dengesi içinde kabul edilebilir seviyelerde tutulmasıdır. Bu yaklaşım, agroekosistemlerdeki biyolojik çeşitliliğin korunmasını ve doğal düşmanların etkinliğinin sürdürülmesini esas alır.

IPM'nin temel varsayımları şunlardır:

- Tarımsal ekosistemler dinamik ve karmaşık yapılardır.
- Zararlı türler ekosistemin doğal bir parçasıdır.
- Tüm böcek türleri zararlı değildir; bazıları faydalıdır.
- Kimyasal mücadele tek başına sürdürülebilir değildir.
- Ekonomik zarar eşiği karar vermede temel kriterdir.

Bu felsefe, pestisit kullanımını azaltmayı, çevresel riskleri minimize etmeyi ve üretim sistemlerinin uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamayı hedefler (Pedigo & Rice, 2014).

2.3. Ekonomik Zarar Eşiği ve Karar Verme Süreci

IPM'nin en kritik bileşenlerinden biri ekonomik zarar eşiği (Economic Injury Level, EIL) ve ekonomik mücadele eşiği (Economic Threshold, ET) kavramlarıdır. Ekonomik zarar eşiği, zararlı yoğunluğunun ürün kaybının ekonomik maliyet oluşturduğu en düşük popülasyon seviyesidir. Ekonomik mücadele eşiği ise bu seviyeye ulaşılmadan önce müdahale edilmesi gereken popülasyon düzeyini ifade eder. Bu iki kavram, IPM'nin karar verme sürecinin bilimsel temelini oluşturur. Üreticiler veya teknik uzmanlar, zararlı yoğunluğu, doğal düşman varlığı ve çevresel koşulları birlikte değerlendirerek müdahale gerekip gerekmediğine karar verir (Stern et al., 1959).

2.4. IPM'nin Bileşenleri

IPM, tek bir mücadele yöntemine dayanmayan çok bileşenli bir sistemdir. Bu bileşenler aşağıdaki şekilde sınıflandırılır: Kültürel mücadele, zararlı popülasyonlarını azaltmaya yönelik agronomik uygulamaları içerir. Ekim nöbeti, dayanıklı çeşit kullanımı, uygun sulama ve gübreleme, hasat sonrası artıkların uzaklaştırılması gibi uygulamalar bu gruba girer. Doğal düşmanlar (predatörler, parazitoitler ve entomopatojenler) kullanılarak zararlı popülasyonlarının baskılanmasıdır. Bu yöntem, ekosistem dengesinin korunması açısından IPM'nin

temel bileşenlerinden biridir. Elle toplama, tuzak kullanımı, bariyer sistemleri ve fiziksel yok etme yöntemlerini kapsar. Feromonlar, cezbediciler ve davranış düzenleyiciler kullanılarak zararlıların kontrol edilmesini içerir. IPM'de kimyasal mücadele son seçenek olarak değerlendirilir. Seçici pestisit kullanımı, doğru zamanlama ve direnç yönetimi bu yaklaşımın temelini oluşturur (Dent, 2000).

2.5. IPM'de İzleme (Monitoring) ve Örnekleme

Zararlı popülasyonlarının düzenli olarak izlenmesi IPM'nin temel şartıdır. İzleme çalışmaları; feromon tuzakları, sarı yapışkan tuzaklar, arazi gözlemleri ve dijital sensörler aracılığıyla yapılır. Doğru örnekleme stratejisi, ekonomik mücadele kararlarının doğruluğunu doğrudan etkiler. Yetersiz izleme, gereksiz pestisit kullanımına; aşırı gecikmiş izleme ise ekonomik kayıplara neden olabilir (Pedigo & Rice, 2014).

2.6. IPM'nin Avantajları ve Sınırlılıkları

IPM'nin en önemli avantajı, çevresel sürdürülebilirlik ile ekonomik üretim arasında denge kurmasıdır. Pestisit kullanımının azalması, doğal düşmanların korunması ve direnç gelişiminin yavaşlatılması bu sistemin temel faydalarıdır.

Bununla birlikte IPM'nin bazı sınırlılıkları da vardır:

- Yüksek bilgi gereksinimi
- Sürekli izleme ihtiyacı
- Teknik personel eksikliği
- Uygulama maliyetleri
- Üretici adaptasyon sorunları

Bu sınırlılıklar, IPM'nin yaygınlaşmasında önemli engeller oluşturmaktadır (Kogan, 1998). IPM, modern tarımsal üretim sistemlerinde sürdürülebilir zararlı yönetiminin temel yaklaşımıdır. Ekonomik zarar eşiği, biyolojik kontrol, kültürel uygulamalar ve kimyasal mücadelenin entegre edilmesi, bu sistemin temelini oluşturur. Günümüzde dijital teknolojilerin gelişmesiyle birlikte IPM, veri temelli karar verme süreçlerine evrilmekte ve daha hassas, hızlı ve çevre dostu bir yapıya dönüşmektedir.

3. Dijital Tarım ve Tarımsal Entomoloji

3.1. Dijital Tarım Kavramı ve Gelişimi

Dijital tarım, tarımsal üretim süreçlerinin veri temelli teknolojiler aracılığıyla izlenmesi, analiz edilmesi ve yönetilmesi yaklaşımını ifade etmektedir. Bu kavram; sensör teknolojileri, uydu görüntüleme, coğrafi bilgi sistemleri (GIS), insansız hava araçları (İHA), büyük veri analitiği ve yapay zekâ gibi çok sayıda teknolojinin entegre kullanımına dayanmaktadır (Wolfert et al., 2017). Son yıllarda tarım sektöründe yaşanan dijital dönüşüm, "hassas tarım" ve "akıllı tarım" kavramlarını da beraberinde getirmiştir. Bu sistemlerde temel amaç,

tarımsal üretimde mekânsal ve zamansal değişkenliği dikkate alarak girdilerin optimize edilmesidir. Böylece hem verimlilik artırılmakta hem de çevresel etkiler azaltılmaktadır (Gebbers & Adamchuk, 2010).

3.2. Dijital Tarımın Entomolojiye Katkısı

Tarımsal entomoloji açısından dijital tarım, zararlı popülasyonlarının daha hassas ve sürekli izlenmesine olanak tanımaktadır. Geleneksel yöntemlerde arazi gözlemleri ve tuzak kontrolleri belirli aralıklarla yapılırken, dijital sistemler sayesinde sürekli veri akışı sağlanabilmektedir. Bu durum özellikle zararlıların erken teşhisi açısından kritik öneme sahiptir. Çünkü birçok böcek türü, ekonomik zarar oluşturmadan önce belirli bir eşik seviyesine ulaşır ve bu sürecin zamanında tespit edilmesi mücadele başarısını doğrudan etkiler. Dijital sistemler, zararlı yoğunluğu ile çevresel faktörler (sıcaklık, nem, yağış) arasındaki ilişkileri analiz ederek popülasyon dinamiklerinin daha doğru anlaşılmasını mümkün kılmaktadır (Pedigo & Rice, 2014). Dijital entomoloji uygulama alanlarından olan böcek taksonomisinde yapay zekâ kullanılabilmesi için her şeyden önce, doğru bir şekilde oluşturulmuş ve doğrulanmış bir veri setine ihtiyaç duyulmasıdır. Bilinmeyen türlerin tanımlanması için yapay zekanın kullanımı yaygınlaşmaktadır. Yapılmış çalışmalar birçok türün yapay zekâ yoluyla tanımlamanın oldukça doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir (Küçüktopcu ve ark., 2023). Dijital entomolojinin kullanıldığı diğer bir alan ise ürünlerde zarar yapan böceklerin belirlenmesi ve popülasyon dalgalanmalarının izlenmesidir. Yapılan bir çalışmada pirinçte zararlı yapan *Scirpophaga incertula*'nın meteorolojik veriler ile arasındaki ilişkiyi kullanarak, zararlının popülasyon yoğunluğu hakkındaki verileri analiz etmek için yapay zekayı kullanarak tahmin modeli oluşturmuştur (Yang ve ark., 2009). Oluşturulan yapay zekâ (Yapay sinir ağı) *Aphis fabae*'nin nimf evrelerini tahmin etmede yüksek performans sergileyerek %99 oranında doğrulukla tespit edilmiştir (Saruhan ve ark., 2015). Yapılan başka bir çalışmada *Palomena prasina'*nın bazı vücut ölçümleri yapay zekâ kullanılarak oluşturulan bir model ile bu böceğin beş nimf dönemi ve cinsiyet ayrımı %98 doğruluk oranı ile belirlenmiştir (Saruhan, 2012). Bu tür çalışmalar entomoloji bilimi için önemli çalışmalardır.

3.3. Hassas Tarım ve Zararlı Yönetimi

Hassas tarım (Precision Agriculture), tarımsal üretimde değişken oranlı yönetim prensibine dayanan bir yaklaşımdır. Bu sistemde tarlanın her noktası aynı şekilde değil, farklı özelliklerine göre değerlendirilir. Zararlı yönetimi açısından hassas tarımın en önemli katkısı, "alan bazlı mücadele" yerine "noktasal mücadele" yaklaşımını mümkün kılmasıdır. Böylece pestisit uygulamaları yalnızca gerekli alanlarda yapılır ve kimyasal kullanım miktarı önemli ölçüde azaltılır (Zhang et al., 2002).

3.4. Uzaktan Algılama Teknolojileri

Uzaktan algılama, tarımsal alanların fiziksel temas olmadan sensörler aracılığıyla izlenmesini sağlayan bir teknolojidir. Uydu görüntüleri ve drone verileri, bitki sağlığının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bitki örtüsü indeksleri (özellikle NDVI), bitkilerin fotosentetik aktivitesi hakkında bilgi sağlayarak zararlı kaynaklı streslerin dolaylı olarak tespit edilmesine olanak tanır (Rouse et al., 1974). Zararlı böcek yoğunluğu arttıkça bitkilerde meydana gelen yaprak kaybı ve fizyolojik stres, bu indekslerde düşüş olarak gözlemlenebilir.

3.5. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Akıllı Sensörler

Nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT), fiziksel cihazların internet üzerinden birbirine bağlanarak veri paylaşmasını sağlayan sistemler bütünüdür. Tarımsal entomolojide IoT sistemleri; sıcaklık, nem, ışık yoğunluğu ve zararlı aktivitesi gibi verileri gerçek zamanlı olarak toplamaktadır. Akıllı feromon tuzakları bu teknolojinin en önemli uygulamalarından biridir. Bu sistemler, yakalanan böcekleri otomatik olarak sayabilir ve verileri merkezi bir sunucuya aktarabilir. Böylece manuel kontrol ihtiyacı azalır ve veri doğruluğu artar (Ayaz et al., 2019).

3.6. Büyük Veri ve Karar Destek Sistemleri

Dijital tarım uygulamalarında farklı kaynaklardan elde edilen veriler büyük veri (big data) analitiği ile işlenmektedir. Bu veriler arasında meteorolojik kayıtlar, uydu görüntüleri, sensör verileri ve zararlı popülasyon kayıtları yer almaktadır. Karar destek sistemleri (Decision Support Systems, DSS), bu verileri analiz ederek üreticilere mücadele zamanlaması, pestisit uygulama gerekliliği ve risk düzeyi hakkında öneriler sunmaktadır (Basso & Antle, 2020). Bu sistemler IPM'nin temel ilkelerinden biri olan "doğru zamanda müdahale" prensibini güçlendirmektedir.

3.7. Dijital Tarımın IPM'ye Entegrasyonu

Dijital tarım teknolojileri, IPM uygulamalarını üç temel şekilde desteklemektedir:

1. **İzleme (Monitoring):** Zararlı popülasyonlarının sürekli ve otomatik takibi
2. **Tahmin (Forecasting):** Popülasyon gelişiminin model tabanlı öngörülmesi
3. **Karar verme (Decision making):** Müdahale zamanının optimize edilmesi

Bu üç bileşen, IPM'nin temel yapısını güçlendirerek daha hassas ve sürdürülebilir bir zararlı yönetim sistemi oluşturulmasını sağlar.

3.8. Sınırlılıklar ve Zorluklar

Dijital tarım teknolojilerinin IPM'ye entegrasyonunda bazı önemli sınırlılıklar bulunmaktadır:

- Yüksek başlangıç maliyetleri
- Teknik altyapı gereksinimi

- Veri standardizasyonu eksikliği
- Model genellenebilirlik sorunları
- Üretici adaptasyon zorlukları

Bu sorunlar, özellikle küçük ölçekli üreticilerde teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır.

Dijital tarım, tarımsal entomolojide zararlı yönetimini veri temelli bir yapıya dönüştürmektedir. Sensör sistemleri, uzaktan algılama, IoT ve karar destek sistemleri sayesinde zararlı popülasyonlarının izlenmesi daha hassas, hızlı ve ekonomik hâle gelmiştir. Bu gelişmeler, IPM'nin temel prensipleriyle uyumlu olarak pestisit kullanımını azaltmakta ve sürdürülebilir tarım hedeflerine katkı sağlamaktadır.

4. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesinin Tarımsal Entomolojide Kullanımı

4.1. Yapay Zekâ Kavramı ve Tarım Bilimlerine Entegrasyonu

Yapay zekâ (Artificial Intelligence, AI), insan bilişsel süreçlerini taklit eden ve öğrenme, akıl yürütme, sınıflandırma ve karar verme gibi görevleri gerçekleştirebilen bilgisayar sistemlerini ifade etmektedir. Son yıllarda özellikle hesaplama gücündeki artış ve büyük veri kümelerinin erişilebilir hâle gelmesi, yapay zekânın tarımsal bilimlerde yaygın biçimde kullanılmasına olanak sağlamıştır (Russell & Norvig, 2021). Tarımsal entomoloji açısından yapay zekâ, zararlı böceklerin tanılanması, popülasyon dinamiklerinin izlenmesi, salgın tahmini ve mücadele kararlarının optimize edilmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerde uzman gözlemine dayalı olan bu süreçler, yapay zekâ destekli sistemlerle daha hızlı, standart ve tekrarlanabilir hâle gelmiştir (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

4.2. Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Makine öğrenmesi (Machine Learning, ML), sistemlerin açıkça programlanmadan verilerden öğrenmesini sağlayan algoritmalar bütünüdür. Tarımsal entomolojide en yaygın kullanılan klasik makine öğrenmesi algoritmaları şunlardır:

- Support Vector Machine (SVM)
- Random Forest (RF)
- K-Nearest Neighbors (KNN)
- Decision Tree
- Naive Bayes

Bu algoritmalar özellikle küçük ve orta ölçekli veri setlerinde başarılı sonuçlar vermektedir. Özellikle zararlı türlerinin morfolojik özelliklerine dayalı sınıflandırmada sıkça kullanılmaktadır (Mohanty et al., 2016). Ancak görüntü

verisinin artmasıyla birlikte, geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri yerini daha güçlü olan derin öğrenme yaklaşımlarına bırakmıştır.

4.3. Derin Öğrenme ve Görüntü Tabanlı Tanılama

Derin öğrenme (Deep Learning), çok katmanlı yapay sinir ağları kullanarak veriden otomatik özellik çıkarımı yapan makine öğrenmesi alt dalıdır. Tarımsal entomolojide özellikle görüntü tabanlı zararlı tanılamada yaygın olarak kullanılmaktadır (LeCun et al., 2015).

Derin öğrenme modelleri, böceklerin:

- Kanat yapısı
- Vücut segmentasyonu
- Renk desenleri
- Anten morfolojisi

gibi özelliklerini otomatik olarak öğrenebilmektedir. Bu durum, insan hatasını azaltmakta ve tanı doğruluğunu artırmaktadır.

4.4. Evrişimsel Sinir Ağları (CNN)

Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks, CNN), görüntü işleme alanında en yaygın kullanılan derin öğrenme mimarisidir. CNN modelleri, görüntü içerisindeki kenar, doku ve şekil özelliklerini otomatik olarak öğrenerek sınıflandırma yapabilmektedir (LeCun et al., 2015).

Tarımsal entomolojide CNN modelleri şu amaçlarla kullanılmaktadır:

- Böcek türlerinin tanılanması
- Larva–ergin ayrımı
- Tuzak görüntülerindeki birey sayımı
- Zararlı ve faydalı böcek ayrımı

Son yıllarda yapılan çalışmalar, CNN tabanlı sistemlerin %90–98 arasında değişen doğruluk oranlarına ulaşabildiğini göstermektedir (Ferentinos, 2018). Ancak sahadaki değişken ışık, arka plan karmaşıklığı ve tür benzerliği gibi faktörler performansı etkileyebilmektedir.

4.5. Gerçek Zamanlı Nesne Tespiti: YOLO ve Yeni Nesil Modeller

YOLO (You Only Look Once) algoritmaları, görüntü içerisindeki nesneleri gerçek zamanlı olarak tespit edebilen derin öğrenme modelleridir. YOLO'nun temel avantajı hem nesne konumunu hem de sınıfını aynı anda belirleyebilmesidir (Redmon et al., 2016).

Tarımsal entomolojide YOLO tabanlı sistemler özellikle:

- Feromon tuzak görüntü analizi

- Drone görüntülerinde zararlı tespiti
- Saha koşullarında hızlı sayım

gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

4.6. Vision Transformer (ViT) ve Yeni Nesil Yaklaşımlar

Transformer tabanlı modeller, özellikle doğal dil işleme alanında geliştirilmiş olsa da son yıllarda görüntü işleme alanında da kullanılmaya başlanmıştır. Vision Transformer (ViT), görüntüleri parçalara bölerek dikkat mekanizması (attention mechanism) ile analiz eder (Dosovitskiy et al., 2021). ViT modelleri, özellikle büyük veri setlerinde CNN'lere kıyasla daha yüksek performans gösterebilmektedir. Ancak yüksek veri ihtiyacı ve hesaplama maliyeti nedeniyle tarımsal uygulamalarda henüz sınırlı kullanıma sahiptir.

4.7. Yapay Zekâ Destekli Akıllı Tuzak Sistemleri

Yapay zekâ sistemlerinin en önemli uygulama alanlarından biri akıllı feromon tuzaklarıdır. Bu sistemlerde kamera, sensör ve yapay zekâ algoritmaları entegre şekilde çalışmaktadır.

Bu tuzaklar:

- Yakalanan böcekleri otomatik sayar
- Tür ayrımı yapabilir
- Verileri bulut sistemine aktarır
- Popülasyon değişimini zaman serisi olarak izler

Bu sayede manuel sayım ihtiyacı azalmakta ve veri doğruluğu artmaktadır (Potamitis et al., 2017).

4.8. IPM ile Entegrasyon

Yapay zekâ sistemleri IPM programlarına üç temel katkı sağlamaktadır:

1. **Erken uyarı sistemleri:** Zararlı artışlarını önceden tespit eder
2. **Doğru zamanlama:** Mücadele zamanını optimize eder
3. **Hedefli uygulama:** Gereksiz pestisit kullanımını azaltır

Bu özellikler, IPM'nin temel prensibi olan ekonomik zarar eşiğine dayalı karar verme sürecini daha hassas hâle getirmektedir.

4.9. Sınırlılıklar

Yapay zekâ uygulamalarının tarımsal entomolojideki kullanımında bazı önemli sınırlılıklar bulunmaktadır:

- Yetersiz etiketlenmiş veri setleri
- Türler arası morfolojik benzerlik
- Saha koşullarındaki değişkenlik

- Yüksek donanım maliyetleri
- Model genellenebilirlik problemleri

Bu nedenle yapay zekâ sistemleri, insan uzmanlığının yerini alan değil, onu destekleyen araçlar olarak değerlendirilmelidir. Gelecekte yapay zekâ tabanlı sistemlerin:

- Otonom drone sistemleri
- Gerçek zamanlı IPM karar destek platformları
- Dijital ikiz tarım sistemleri
- Mobil entomoloji uygulamaları

ile entegre çalışması beklenmektedir. Bu gelişmeler, tarımsal zararlı yönetiminde tamamen veri odaklı bir döneme geçişi hızlandıracaktır (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

5. Görüntü İşleme ve Bilgisayarlı Görme Sistemleri

5.1. Görüntü İşleme Kavramı ve Tarımsal Uygulamalar

Görüntü işleme (image processing), dijital görüntülerden anlamlı bilgi elde edilmesini sağlayan yöntemler bütünüdür. Bu süreç; görüntülerin iyileştirilmesi, analiz edilmesi ve yorumlanmasını kapsar. Bilgisayarlı görme (computer vision) ise görüntü işleme tekniklerini kullanarak makinelerin "görme ve anlama" yeteneği kazanmasını hedefler (Szeliski, 2010). Tarımsal entomoloji açısından görüntü işleme, özellikle zararlı böceklerin tanılanması, sayımı ve popülasyon dinamiklerinin izlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Geleneksel gözleme dayalı yöntemlere kıyasla görüntü tabanlı analizler daha objektif, hızlı ve tekrarlanabilir sonuçlar üretmektedir (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

5.2. Görüntü İşleme Aşamaları

Tarımsal sistemlerde görüntü işleme genellikle aşağıdaki aşamalardan oluşur:

- Görüntü elde etme
- Ön işleme (noise reduction, contrast enhancement)
- Segmentasyon
- Özellik çıkarımı
- Sınıflandırma veya nesne tespiti

Bu aşamalar, özellikle feromon tuzakları ve saha kameralarından elde edilen görüntülerin analizinde kullanılmaktadır.

5.3. Ön İşleme Teknikleri

Ön işleme, görüntü kalitesini artırarak analiz doğruluğunu yükseltmeyi amaçlar. Tarımsal uygulamalarda sık kullanılan yöntemler şunlardır:

- Gürültü azaltma (Gaussian blur, median filter)

- Kontrast artırma
- Histogram eşitleme
- Arka plan temizleme

Bu işlemler, özellikle böceklerin karmaşık arka planlardan ayrılmasında kritik rol oynar (Gonzalez & Woods, 2018).

5.4. Segmentasyon Yöntemleri

Segmentasyon, görüntü içerisindeki nesnelerin arka plandan ayrılması işlemidir. Tarımsal entomolojide böceklerin yaprak, toprak veya tuzak yüzeyinden ayrılması için kullanılır.

Yaygın segmentasyon yöntemleri:

- Eşikleme (thresholding)
- Kenar tabanlı yöntemler (edge detection)
- Bölge tabanlı segmentasyon
- Derin öğrenme tabanlı segmentasyon (U-Net vb.)

Özellikle U-Net mimarisi, biyolojik görüntülerin segmentasyonunda yüksek başarı göstermektedir (Ronneberger et al., 2015).

5.5. Özellik Çıkarımı (Feature Extraction)

Makine öğrenmesi ve klasik görüntü işleme sistemlerinde özellik çıkarımı kritik bir aşamadır. Bu süreçte görüntüden şu özellikler elde edilir:

- Renk özellikleri
- Doku (texture)
- Şekil (shape descriptors)
- Kenar yapıları

Tarımsal entomolojide bu özellikler, böcek türlerinin ayırt edilmesinde kullanılır. Örneğin kanat desenleri veya vücut segment oranları sınıflandırmada belirleyici olabilir.

5.6. Nesne Tespiti ve Sayım Sistemleri

Nesne tespiti (object detection), görüntü içerisindeki belirli nesnelerin yerini ve sınıfını belirleme işlemidir. Bu yöntem, özellikle feromon tuzaklarında yakalanan böceklerin sayımı için kullanılmaktadır. Modern sistemlerde YOLO, Faster R-CNN ve SSD gibi derin öğrenme tabanlı algoritmalar yaygın olarak kullanılmaktadır (Ren et al., 2016).

Bu sistemler sayesinde:

- Tuzaktaki böcek sayısı otomatik belirlenir
- Tür bazlı sınıflandırma yapılabilir

- Popülasyon değişimi zaman serisi olarak izlenebilir

5.7. Akıllı Feromon Tuzaklarında Görüntü İşleme

Akıllı feromon tuzakları, görüntü işleme teknolojilerinin tarımsal entomolojideki en önemli uygulamalarından biridir. Bu sistemlerde kamera ile alınan görüntüler yapay zekâ algoritmalarıyla analiz edilerek böcek sayımı otomatik yapılır.

Sistemin temel bileşenleri:

- Yüksek çözünürlüklü kamera
- Mikrodenetleyici
- Görüntü işleme algoritması
- Veri aktarım modülü

Bu yapılar sayesinde manuel sayım ihtiyacı azalmakta ve veri doğruluğu artmaktadır (Potamitis et al., 2017).

5.8. Drone ve Saha Görüntülerinin Analizi

Drone görüntülerinden elde edilen veriler, görüntü işleme teknikleri ile analiz edilerek tarla bazlı zararlı yoğunluğu hakkında bilgi sağlar. Özellikle bitki stres bölgelerinin belirlenmesi, dolaylı olarak zararlı varlığının tespit edilmesine yardımcı olur. Multispektral görüntülerde yapılan analizler sayesinde NDVI gibi indeksler hesaplanarak bitki sağlığı değerlendirilebilir (Rouse et al., 1974).

5.9. Görüntü İşlemenin IPM'ye Katkıları

Görüntü işleme teknolojileri IPM uygulamalarına şu katkıları sağlar:

- Zararlıların erken ve doğru tanılanması
- Popülasyon yoğunluğunun otomatik izlenmesi
- Alan bazlı mücadele imkânı
- Pestisit kullanımının azaltılması
- Veri temelli karar verme süreçleri

Bu katkılar, IPM'nin temel hedefi olan ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir.

5.10. Sınırlılıklar

Görüntü işleme sistemlerinin tarımsal entomolojide bazı sınırlılıkları bulunmaktadır:

- Düşük ışık koşullarında performans düşüşü
- Türler arası morfolojik benzerlik
- Veri seti eksikliği
- Karmaşık saha koşulları

- Gerçek zamanlı işlem maliyeti

Bu sorunlar, daha gelişmiş algoritmalar ve daha büyük veri setleri ile azaltılmaya çalışılmaktadır. Görüntü işleme ve bilgisayarlı görme teknolojileri, tarımsal entomolojide veri toplama ve analiz süreçlerini kökten değiştirmiştir. Özellikle yapay zekâ ile entegre sistemler, zararlı yönetiminde insan bağımlılığını azaltarak daha hızlı ve objektif karar alma süreçleri oluşturmuştur. Bu gelişmeler, IPM'nin dijital dönüşümünün temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

6. Drone Teknolojileri ve Uzaktan Algılama Sistemleri

6.1. Uzaktan Algılamanın Tarımsal Sistemlerdeki Yeri

Uzaktan algılama (remote sensing), bir nesne veya alan hakkında fiziksel temas olmadan elektromanyetik radyasyon aracılığıyla veri elde edilmesini sağlayan teknolojiler bütünüdür. Tarımsal sistemlerde bu teknoloji, bitki sağlığının izlenmesi, stres faktörlerinin belirlenmesi ve üretim alanlarının haritalanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Jones & Vaughan, 2010). Tarımsal entomoloji açısından uzaktan algılama, zararlı böceklerin doğrudan değil, bitkiler üzerinde oluşturduğu fizyolojik değişiklikler üzerinden dolaylı olarak tespit edilmesine olanak tanır. Bu yaklaşım, özellikle geniş tarım alanlarında erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir.

6.2. Drone (İnsansız Hava Araçları) Teknolojisi

İnsansız hava araçları (İHA), düşük irtifadan yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmesini sağlayan platformlardır. Tarımsal uygulamalarda drone'lar; RGB, multispektral ve termal sensörlerle donatılarak bitki gelişimi ve stres durumunun analizinde kullanılmaktadır (Zhang & Kovacs, 2012).

Drone teknolojisinin IPM'ye katkısı özellikle şu alanlarda ortaya çıkmaktadır:

- Zararlı yoğunluğunun mekânsal dağılımının belirlenmesi
- Erken stres tespiti
- Hassas ilaçlama uygulamaları
- Ürün gelişiminin izlenmesi

6.3. Multispektral ve Hiperspektral Görüntüleme

Multispektral görüntüleme, elektromanyetik spektrumun belirli bantlarında veri toplayarak bitki sağlığını analiz etmeyi sağlar. Hiperspektral görüntüleme ise daha geniş ve sürekli bant aralıklarında veri toplayarak çok daha detaylı analiz imkânı sunar.

Bu sistemler, özellikle zararlı böceklerin neden olduğu:

- Yaprak sararması
- Fotosentetik aktivite azalması
- Doku bozulmaları

gibi değişimleri tespit etmede kullanılır (Mahlein, 2016).

6.4. Bitki Örtüsü İndeksleri (NDVI, NDRE vb.)

Uzaktan algılama çalışmalarında en yaygın kullanılan göstergelerden biri Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)'dır. NDVI, bitkilerin fotosentetik aktivitesi ve sağlığı hakkında bilgi verir (Rouse et al., 1974).

NDVI dışında kullanılan bazı indeksler:

- NDRE (Normalized Difference Red Edge)
- SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)
- EVI (Enhanced Vegetation Index)

Bu indeksler, zararlı kaynaklı stresin erken dönemde belirlenmesini mümkün kılar.

6.5. Zararlı Böceklerin Dolaylı Tespiti

Zararlı böcekler çoğu zaman doğrudan görüntüleme ile tespit edilemez. Bunun yerine bitkide oluşturdukları stres belirtileri analiz edilir.

Örneğin:

- Yaprak kaybı → NDVI düşüşü
- Klorofil azalması → spektral değişim
- Su stresi → termal farklılık

Bu dolaylı yaklaşım, özellikle geniş tarım alanlarında erken müdahale imkânı sağlar (Candiago et al., 2015).

6.6. Hassas İlaçlama ve Değişken Oranlı Uygulamalar

Drone ve uzaktan algılama verileri kullanılarak geliştirilen değişken oranlı uygulamalar (Variable Rate Application, VRA), pestisitlerin yalnızca gerekli alanlara uygulanmasını sağlar.

Bu yaklaşımın avantajları:

- Kimyasal kullanımının azalması
- Maliyet düşüşü
- Çevresel etkilerin azaltılması
- Doğal düşmanların korunması

Bu sistemler IPM'nin "minimum kimyasal müdahale" prensibi ile doğrudan uyumludur (Gebbers & Adamchuk, 2010).

6.7. Drone ile Biyolojik Mücadele Etmenlerinin Salımı

Son yıllarda drone teknolojisinin biyolojik mücadelede kullanımı artmıştır. Özellikle parazitoit ve predatör böceklerin geniş alanlara eşit dağılımı drone sistemleri ile mümkün hâle gelmiştir.

Bu yöntem:

- İş gücünü azaltır
- Uygulama hızını artırır
- Biyolojik ajanların etkinliğini yükseltir

Bu yaklaşım, IPM'nin biyolojik kontrol bileşenini modern teknoloji ile birleştirmektedir.

6.8 Veri İşleme ve Yapay Zekâ Entegrasyonu

Drone sistemlerinden elde edilen büyük veri setleri, yapay zekâ algoritmaları ile analiz edilerek anlamlı bilgilere dönüştürülür. Bu süreçte:

- Görüntü segmentasyonu
- Nesne tespiti
- Zaman serisi analizi
- Risk modelleme

gibi yöntemler kullanılır. Bu entegrasyon, IPM karar destek sistemlerinin temelini oluşturur.

6.9 Sınırlılıklar ve Zorluklar

Drone ve uzaktan algılama teknolojilerinin IPM'ye entegrasyonunda bazı sınırlılıklar bulunmaktadır:

- Yüksek ekipman maliyeti
- Hava koşullarına bağımlılık
- Veri işleme zorluğu
- Uzmanlık gereksinimi
- Veri yorumlama hataları

Bu sınırlılıklar, teknolojinin yaygınlaşmasını kısmen kısıtlamaktadır.

Drone teknolojileri ve uzaktan algılama sistemleri, tarımsal entomolojide zararlı yönetimini mekânsal ve zamansal olarak daha hassas hâle getirmiştir. Özellikle multispektral analiz, NDVI tabanlı stres tespiti ve değişken oranlı uygulamalar sayesinde IPM uygulamaları daha verimli ve çevre dostu bir yapıya dönüşmektedir. Bu teknolojiler, gelecekte otonom tarım sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olacaktır.

7. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Akıllı Tuzak Sistemleri

7.1 Nesnelerin İnterneti Kavramı ve Tarımsal Uygulamalar

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT), fiziksel nesnelerin sensörler, yazılımlar ve ağ bağlantıları aracılığıyla veri toplayıp paylaşabildiği sistemleri ifade eder. Tarım sektöründe IoT, çevresel koşulların sürekli izlenmesi ve üretim

süreçlerinin otomatikleştirilmesi açısından önemli bir dönüşüm sağlamıştır (Atzori et al., 2010). Tarımsal entomoloji bağlamında IoT sistemleri; sıcaklık, nem, ışık yoğunluğu ve zararlı aktivitesine ilişkin verilerin gerçek zamanlı olarak toplanmasını ve analiz edilmesini mümkün kılar. Bu durum, IPM uygulamalarında karar verme süreçlerinin daha dinamik ve veri temelli hale gelmesini sağlamaktadır.

7.2 IoT Tabanlı Tarımsal İzleme Sistemleri

IoT tabanlı tarımsal sistemler genellikle üç temel bileşenden oluşur:

- Sensör katmanı (veri toplama)
- İletişim katmanı (veri aktarımı)
- Analitik katman (veri işleme ve karar verme)

Bu yapı sayesinde çevresel veriler ve biyotik göstergeler sürekli olarak izlenebilir. Özellikle zararlı böcek popülasyonlarının gelişimi, çevresel faktörlerle birlikte değerlendirildiğinde daha doğru tahmin modelleri oluşturulabilir (Ayaz et al., 2019).

7.3 Akıllı Feromon Tuzakları

Akıllı feromon tuzakları, IoT ve yapay zekâ teknolojilerinin tarımsal entomolojideki en önemli uygulamalarından biridir. Bu sistemler, klasik feromon tuzaklarının dijitalleştirilmiş versiyonudur.

Bir akıllı tuzak sistemi genellikle şu bileşenleri içerir:

- Feromon kapsülü
- Görüntüleme kamerası
- Mikrodenetleyici
- Kablosuz veri aktarım modülü
- Güç kaynağı (çoğunlukla güneş paneli)

Bu sistemler, yakalanan böcekleri otomatik olarak sayabilir, tür ayrımı yapabilir ve verileri bulut tabanlı sistemlere aktarabilir (Potamitis et al., 2017).

7.4 Gerçek Zamanlı Veri Akışı ve Bulut Sistemleri

IoT tabanlı tuzaklardan elde edilen veriler genellikle bulut sistemlerinde depolanır. Bu veriler:

- Zaman serisi analizleri
- Popülasyon dinamik modelleri
- Erken uyarı algoritmaları

için kullanılır. Gerçek zamanlı veri akışı, IPM'nin en kritik bileşenlerinden biri olan "zamanında müdahale" prensibini güçlendirmektedir.

7.5 Erken Uyarı Sistemleri

Erken uyarı sistemleri, zararlı popülasyonlarının ekonomik zarar eşiğine ulaşmadan önce tespit edilmesini sağlar. Bu sistemler; sensör verileri, meteorolojik bilgiler ve geçmiş popülasyon verilerini birlikte değerlendirir. Özellikle sıcaklık ve nem gibi faktörler, birçok böcek türünün gelişim hızını doğrudan etkilediğinden, bu veriler tahmin modellerinde kritik rol oynar (Pedigo & Rice, 2014).

7.6 IoT ve Yapay Zekâ Entegrasyonu

IoT sistemlerinden gelen veriler tek başına yeterli değildir; bu verilerin anlamlı hale getirilmesi için yapay zekâ algoritmaları kullanılır. Makine öğrenmesi modelleri, zararlı popülasyonlarının gelecekteki gelişimini tahmin edebilir.

Bu entegrasyon sayesinde:

- Risk haritaları oluşturulur
- Mücadele zamanlaması optimize edilir
- Gereksiz pestisit uygulamaları azaltılır

7.7 IPM Karar Destek Sistemleri

Karar destek sistemleri (Decision Support Systems, DSS), farklı veri kaynaklarını birleştirerek üreticiye öneriler sunan yazılım tabanlı sistemlerdir. IoT verileri bu sistemlerin temel girdilerinden biridir.

DSS sistemleri:

- Zararlı yoğunluğu
- Çevresel koşullar
- Ekonomik zarar eşiği

gibi parametreleri birlikte değerlendirerek müdahale gerekliliğini belirler (Basso & Antle, 2020).

7.8 Avantajlar

IoT tabanlı sistemlerin IPM'ye sağladığı başlıca avantajlar:

- Sürekli ve otomatik veri toplama
- İnsan hatasının azalması
- Gerçek zamanlı izleme
- Daha doğru tahmin modelleri
- Pestisit kullanımında azalma

Bu avantajlar, IPM'nin sürdürülebilirlik hedeflerini doğrudan desteklemektedir.

7.9 Sınırlılıklar ve Zorluklar

IoT sistemlerinin tarımsal entomolojide yaygınlaşmasını sınırlayan bazı faktörler vardır:

- Yüksek kurulum maliyetleri
- Ağ bağlantı sorunları
- Sensör kalibrasyon problemleri
- Veri güvenliği riskleri
- Teknik bilgi eksikliği

Bu sorunlar özellikle küçük ölçekli üreticiler için önemli engeller oluşturmaktadır.

7.10 Genel Değerlendirme

Nesnelerin İnterneti ve akıllı tuzak sistemleri, tarımsal entomolojide veri toplama ve analiz süreçlerini kökten değiştirmiştir. Gerçek zamanlı veri akışı, IPM uygulamalarını daha hassas, hızlı ve etkili hale getirmiştir. Bu sistemler, gelecekte otonom tarım ve yapay zekâ destekli karar mekanizmalarının temelini oluşturacaktır.

8. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Tarımsal üretimde zararlı böceklerin yönetimi, sürdürülebilir gıda üretiminin en kritik bileşenlerinden biridir. Geleneksel mücadele yöntemleri uzun yıllar boyunca kimyasal pestisitlere dayalı olarak yürütülmüş olsa da, bu yaklaşım zamanla çevresel bozulma, pestisit direnci ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi önemli sorunlara yol açmıştır (Ehler, 2006; Deguine et al., 2021). Bu nedenle Entegre Zararlı Yönetimi (IPM), zararlıların tamamen yok edilmesini değil, ekonomik zarar eşiğinin altında tutulmasını hedefleyen ekosistem temelli bir yaklaşım olarak geliştirilmiş ve günümüzde sürdürülebilir tarımın temel stratejilerinden biri haline gelmiştir (Kogan, 1998). Son yıllarda yapay zekâ, makine öğrenmesi, bilgisayarlı görme, nesnelerin interneti (IoT), uzaktan algılama ve insansız hava araçları gibi dijital teknolojilerin tarımsal sistemlere entegrasyonu, IPM uygulamalarında köklü bir dönüşüm yaratmıştır.

Bu teknolojiler sayesinde:

- Zararlı popülasyonları gerçek zamanlı izlenebilmekte
- Tür teşhisi otomatik hale gelmekte
- Erken uyarı sistemleri geliştirilebilmekte
- Pestisit uygulamaları optimize edilebilmekte
- Çevresel etkiler azaltılabilmektedir (Wolfert et al., 2017; Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018)

Bu dönüşüm, IPM'nin klasik yapısını veri temelli ve algoritmik karar verme süreçlerine doğru evrilmesine neden olmuştur.

Günümüzde IPM artık yalnızca biyolojik veya ekolojik bir strateji değil, aynı zamanda dijital teknolojilerle desteklenen çok katmanlı bir sistemdir. Bu yeni yaklaşım aşağıdaki bileşenlerin entegrasyonuna dayanır:

- Yapay zekâ tabanlı görüntü analizi
- IoT destekli sürekli izleme sistemleri
- Drone ve uydu tabanlı uzaktan algılama
- Karar destek sistemleri
- Akıllı feromon tuzakları

Bu entegrasyon, zararlı yönetiminde hem zaman hem de mekân açısından çok daha hassas müdahaleler yapılmasına olanak tanımaktadır.

Gelecekte tarımsal entomoloji ve IPM uygulamalarının aşağıdaki yönlerde gelişmesi beklenmektedir: Otonom drone sistemleri ve robotik platformlar, zararlı tespiti ve mücadeleyi insan müdahalesine ihtiyaç duymadan gerçekleştirebilecektir. Tarım alanlarının dijital modelleri (digital twin) oluşturularak zararlı popülasyonlarının simülasyonu yapılabilecektir. IoT ve uydu teknolojilerinin entegrasyonu ile küresel ölçekte zararlı hareketleri izlenebilecektir. Makine öğrenmesi algoritmaları ile zararlı salgınları önceden tahmin edilebilecektir.

Her ne kadar büyük ilerlemeler kaydedilmiş olsa da, bu alanda hâlen çözülmesi gereken önemli araştırma boşlukları bulunmaktadır:

- Standart veri setlerinin eksikliği
- Model genellenebilirliği sorunları
- Düşük gelirli bölgelerde teknoloji erişimi
- Veri güvenliği ve gizlilik problemleri
- Çok türlü ekosistemlerde model doğruluğu

Bu alanlar, gelecekteki araştırmaların odak noktası olacaktır. Entegre Zararlı Yönetimi, modern tarımsal üretim sistemlerinde sürdürülebilirliğin temel taşlarından biridir. Dijital teknolojilerin hızlı gelişimi ile birlikte IPM, klasik bir entomolojik yaklaşım olmaktan çıkarak veri bilimi, yapay zekâ ve mühendislik disiplinleriyle entegre bir yapıya dönüşmüştür.

Bu dönüşüm sayesinde zararlı yönetimi: daha hızlı, daha hassas, daha ekonomik ve daha çevre dostu bir hale gelmiştir. Ancak bu teknolojilerin etkin kullanımı, yalnızca teknik altyapıya değil aynı zamanda eğitim, veri standardizasyonu ve disiplinler arası iş birliğine de bağlıdır. Bu nedenle gelecekte IPM'nin başarısı, biyoloji ile dijital teknolojiler arasındaki entegrasyonun ne kadar güçlü kurulduğuna bağlı olacaktır.

Kaynaklar

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks, 54*(15), 2787–2805.

Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E. H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access, 7*, 129551–129583.

Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability, 3*(4), 254–256.

Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating UAV multispectral data for crop analysis. *Remote Sensing, 7*(5), 4026–4047.

Deguine, J.-P., Aubertot, J.-N., Flor, R. J., Lescourret, F., Wyckhuys, K. A. G., & Ratnadass, A. (2021). Integrated pest management: Good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 41*, 38.

Dent, D. (2000). Host plant resistance. In D. Dent (Ed.), *Insect pest management*. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom.

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., et al. (2020). An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint*, arXiv:2010.11929.

Ehler, L. E. (2006). Integrated pest management (IPM): Definition, historical development and implementation. *Pest Management Science, 62*(9), 787–789.

FAO. (2022). *Integrated pest management guidelines*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ferentinos, K. P. (2018). Deep learning models for plant disease detection. *Computers and Electronics in Agriculture, 145*, 311–318.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science, 327*(5967), 828–831.

Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing*. Pearson.

Iost Filho, F. H., Pazini, J. B., Alves, T. M., Koch, R. L., & Yamamoto, P. T. (2022). How does the digital transformation of agriculture affect the implementation of Integrated Pest Management? *Frontiers in Sustainable Food Systems, 6*, 972213.

Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation*. Oxford University Press.

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture, 147*, 70–90.

Kogan, M. (1998). Integrated pest management: Historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology, 43*(1), 243–270.

Küçüktopcu, Y., Saruhan, İ., Tuncer, C., & Akça, İ. (2023). Entomolojide yapay sinir ağlarının kullanımı. Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 13(2), 131-145.

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature, 521*, 436–444.

Mahlein, A. K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors–parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease, 100*(2), 241–251.

Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science, 7*, 215232.

Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science, 144*(1), 31–43.

Pedigo, L. P., & Rice, M. E. (2014). *Entomology and pest management* (6th ed.). Waveland Press.

Potamitis, I., Rigakis, I., & Vidakis, N. (2017). Automated insect monitoring. *Sensors, 17*(2), 405.

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, Y. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 779–788).

Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. (2016). Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 39*(6), 1137–1149.

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention* (pp. 234–241). Springer International Publishing.

Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974, January). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *NASA Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symposium* (Vol. 1, Sect. A, Paper A20).

Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson.

Saruhan, I. (2012). Discrimination of the *Palomena prasina* L.(Heteroptera: Pentatomidae) nymph stages and sex using some morphological parameters by the multiple regression analysis. *African Journal of Biotechnology, 11*(9), 2365-2370. https://doi.org/10.5897/AJB11.3338

Saruhan, I., Senyer, N., Ayvaz, T., Kayhan, G., Ergun, E., Odabas, M. S. ve Akca, İ. (2015). The estimation of adult and nymph stages of *Aphis fabae* (Hemiptera: Aphididae) using artificial neural network. *Entomological Newss, 125*(1), 12-20. https://doi.org/10.3157/021.125.0104

Stern, V. M., Smith, R. F., van den Bosch, R., & Hagen, K. S. (1959). The integrated control concept. *Hilgardia, 29*(2), 81–101.

Szeliski, R. (2011). *Computer vision: Algorithms and applications* (Vol. 1). Springer.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming. *Agricultural Systems, 153*, 69–80.

Yang, L. N., Peng, L., Zhang, L. M., Zhang, L. L., & Yang, S. S. (2009). A prediction model for population occurrence of paddy stem borer (Scirpophaga incertulas), based on Back Propagation Artificial Neural Network and Principal Components Analysis. Computers and Electronics in Agriculture, 68(2), 200-206.

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture, 13*(6), 693–712.

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture, 36*(2–3), 113–132.

BÖLÜM 2

Balıkçılıkta Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi Uygulamaları: R ile Kavramlar, Yöntemler ve Örnekler

***Tevfik Ceyhan*[1]**

[1] Prof. Dr., Ege Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Bornova, İzmir
ORCID: 0000-0002-4799-5709

1. Giriş

Balıkçılık bilimi, son yıllarda gözlem ve kayıt teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak giderek artan hacimde veriyle karşı karşıyadır. Seyir kayıt defterleri (logbook), gemi izleme sistemleri (VMS), gözlemci programları, uzaktan algılama ürünleri ve gemi üstü ya da su altı kamera sistemleri, bir zamanlar sınırlı örneklemelerle elde edilen bilgiyi bugün süreklilik arz eden veri akışlarına dönüştürmüştür. Bu veri bolluğu, stok durumunun izlenmesinden av çabasının mekânsal dağılımının çözümlenmesine kadar pek çok yönetim sorusuna daha ayrıntılı yanıt verme olanağı sunmakta; ancak aynı zamanda geleneksel çözümleme araçlarının kapasitesini zorlayan bir karmaşıklık da getirmektedir.

Balıkçılık verilerinin çözümlenmesinde uzun yıllardır genelleştirilmiş doğrusal modeller (Generalized Linear Models, GLM) ve genelleştirilmiş toplamsal modeller (Generalized Additive Models, GAM) gibi istatistiksel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yöntemler, özellikle birim çabaya düşen av (Catch Per Unit Effort, CPUE) verilerinin standardizasyonunda, av oranlarını etkileyen çevresel ve işlemsel değişkenlerin ayrıştırılmasında güçlü ve yorumlanabilir bir çerçeve sağlamıştır (Hoyle vd., 2024). Bununla birlikte, değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiler, yüksek boyutlu etkileşimler ve eksik ya da düzensiz veri yapıları söz konusu olduğunda, klasik modellerin önceden tanımlanmış işlevsel biçim ve dağılım varsayımları sınırlayıcı olabilmektedir. Bu noktada makine öğrenmesi yöntemleri, belirli bir işlevsel biçim varsayımı gerektirmeden veriden örüntü öğrenebilme özellikleriyle tamamlayıcı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Makine öğrenmesi, balıkçılık biliminde genomik ölçekten ekosistem ölçeğine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Avcılık öğelerinin sınıflandırılmasından tür topluluklarının belirlenmesine, stok ve popülasyon dinamiklerinin değerlendirilmesinden avcılık faaliyetlerinin mekânsal haritalanmasına uzanan bu uygulamalar, deniz ekosistemlerinin farklı bileşenlerinin anlaşılmasında önemli bir potansiyel taşımaktadır (Kühn vd., 2025). Türkçe literatürde de balıkçılıkta yapay zekâ uygulamalarını derleyen çalışmalar giderek artmaktadır (Aksu & Altınterim, 2024). Bu derlemelerin ortak vurgusu, makine öğrenmesinin geleneksel yaklaşımların yerini alan değil, onları belirli koşullarda tamamlayan bir araç olarak değerlendirilmesi gerektiğidir.

Ağaç tabanlı yöntemler bu tamamlayıcılığın en görünür örneklerindendir. Rastgele orman (random forest) ve artırmalı regresyon ağaçları (boosted regression trees, BRT) gibi yöntemler, balıkçılık verilerinde av çabasının dağılımının ve hedef dışı av (bycatch) oranlarının tahmininde kullanılmaya başlanmıştır (Soykan, Eguchi, Kohin ve Dewar, 2014). Benzer biçimde, CPUE standardizasyonunda ağaç tabanlı yöntemlerin klasik GAM yaklaşımlarıyla karşılaştırılması, bu araçların hangi koşullarda üstünlük sağladığını anlamaya yönelik güncel bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bilgisayarlı görü (computer

vision) ve derin öğrenme yöntemleri ise tür tanıma, otomatik sayım ve av kompozisyonunun görüntüden belirlenmesi gibi görevlerde giderek daha yüksek başarım düzeylerine ulaşmaktadır.

Son dönemde bu tabloya büyük dil modelleri (Large Language Models, LLM) ve ajan tabanlı yapay zekâ (agentic AI) sistemleri de eklenmiştir. Bu sistemler, bilimsel programlama iş akışlarının otomasyonundan yapılandırılmamış raporlardan veri çıkarımına kadar uzanan görevlerde kullanılmaya başlanmış; modelleme sürecinin teknik eşiğini düşürerek uzman olmayan kullanıcıların da çözümleme yapabilmesinin önünü açabileceği öne sürülmüştür (Spillias, 2026). Ancak bu araçların sözdizimsel olarak doğru fakat mantıksal olarak hatalı sonuçlar üretebilmesi, olmayan bilgileri gerçekmiş gibi sunması (halüsinasyon; uydurma) ve aynı soruya her seferinde tutarlı yanıt vermemesi, güvenilirlik ve insan denetimi konularını ön plana çıkarmaktadır. Brown, Aitken, Takyi ve Tisseaux-Navarro (2026), genel amaçlı bir yapay zekâ ajanına von Bertalanffy büyüme eğrisinin verilere oturtulması, bolluk-habitat ilişkisi için genelleştirilmiş doğrusal model kurulması ve stoğa katılan birey başına düşen ürün (yield per recruit) çözümlemesi şeklinde üç adet balıkçılık biliminde sıklıkla kullanılan modelleme görevi vermiştir. Ajan bu görevleri bazı denemelerde doğru biçimde tamamlamış, ancak sonuçlar denemeler arasında değişkenlik göstermiştir. Bu bulgular, yapay zekânın balıkçılık biliminde umut verici olmakla birlikte, analizin özünü bilen bir uzmanın denetiminde güvenilir biçimde kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Bu bölümün amacı, balıkçılıkta yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamalarını, kavramsal temellerinden başlayarak somut örnekler ve R yazılımı ortamındaki uygulamalarıyla birlikte ele almaktır. Aşağıda sırası ile önce makine öğrenmesinin temel kavramları ve R ekosistemi tanıtılmış, ardından CPUE standardizasyonu, tür dağılımı ve av tahmini, istilacı türlerin izlenmesi ile bilgisayarlı görü uygulamaları örnekler üzerinden işlenmiştir. Son olarak büyük dil modelleri ve ajan tabanlı yapay zekânın açtığı yeni olanaklar ile bu araçların sınırlılıkları, etik boyutları ve yönetim kararlarında insan denetiminin gerekliliği tartışılmaktadır. Verilen örneklerde ise olanaklar ölçüsünde Ege Denizi ve Türkiye balıkçılığına ilişkin çalışmalardan yararlanılarak yöntemlerin yerel bağlamdaki uygulanabilirliğinin vurgulanması amaçlanmıştır.

2. Temel Kavramlar

2.1. Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme

Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme kavramları günlük kullanımda çoğu zaman birbirinin yerine kullanılsa da aralarında iç içe geçmiş bir kapsam ilişkisi vardır. En geniş kavram yapay zekâdır ve makinelerin insan zekâsını gerektiren görevleri yerine getirmesini konu almaktadır. Makine öğrenmesi, yapay zekânın bir alt kümesidir; açık kurallar programlanmadan, örüntülerin doğrudan veriden öğrenildiği yöntemleri kapsamaktadır. Kühn ve

diğerleri (2025), makine öğrenmesini *belirli bir görevi açık talimatlar olmaksızın yerine getirebilen matematiksel modeller* olarak tanımlamaktadır. Derin öğrenme ise makine öğrenmesinin, çok katmanlı yapay sinir ağlarını (neural network) kullanan ve büyük hacimli, yapılandırılmamış verilerden karmaşık örüntüler öğrenebilen bir alt dalıdır (Kühn vd., 2025).

Bu ayrımın balıkçılık açısından pratik bir karşılığı vardır. CPUE verisinin çevresel değişkenlerle ilişkisini çözümlemek gibi görevlerde, sınırlı sayıda değişken ve orta ölçekli veriyle çalışan makine öğrenmesi yöntemleri genellikle yeterli olmaktadır. Buna karşılık, su altı ya da gemi üstü kameralardan elde edilen görüntülerden tür tanımak gibi görevlerde, ham görüntüden öğrenebilen derin öğrenme yöntemleri öne çıkmaktadır. Kühn ve diğerleri (2025), makine öğrenmesi sistemlerinin kurulmasının başlangıçta önemli bir yatırım gerektirdiğini, ancak uzun vadede veri çözümlemesindeki kaynak sınırlılıklarını azaltabildiğini vurgulamaktadır.

2.2. Denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme

Makine öğrenmesi görevleri, verinin niteliğine ve öğrenmenin biçimine göre üç temel gruba ayrılır (Kühn vd., 2025).

Denetimli öğrenme (supervised learning), girdi verisinin etiketli olduğu, yani her gözlem için doğru çıktının önceden bilindiği durumları kapsamaktadır. Model, girdiler ile çıktılar arasındaki eşlemeyi öğrenmektedir. Fotoğraflardan tür tanımlama tipik bir denetimli öğrenme örneğidir; burada model, doğru tanımı yapılmış başka fotoğraflardan yola çıkarak yeni bir fotoğraftaki türü belirler (Kühn vd., 2025). Balıkçılıkta CPUE tahmini (regresyon) ve hedef dışı av varlığının sınıflandırılması gibi görevlerin çoğu bu gruba girmektedir.

Denetimsiz öğrenme (unsupervised learning), etiketsiz veride örüntü aramaya, örneğin birbirine benzeyen gözlemlerden kümeler (kümeleme) oluşturmaya odaklanır (Kühn vd., 2025). Av bileşimine göre farklı avlanma yöntemlerinin ya da filo davranışlarının önceden tanımlanmış etiketler olmaksızın gruplanması bu yaklaşıma örnek olarak gösterilebilir.

Pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning), bir ajanın (agent) açık talimatlar almadan, geri bildirim mekanizmaları aracılığıyla bir strateji öğrenmesini konu almaktadır; bir robotun bir labirentte yolunu bulması bu türden bir öğrenmedir (Kühn vd., 2025). Bu yaklaşım balıkçılık biliminde henüz görece sınırlı kullanılsa da, avcılık stratejisi ya da yönetim kuralı eniyilemesi gibi alanlarda potansiyel taşımaktadır.

Bu bölümün ilerleyen uygulama örneklerinde ağırlıklı olarak denetimli öğrenme yöntemleri ele alınacaktır; çünkü balıkçılık verilerinde en sık karşılaşılan sorular, yani bir stok miktarının tahmini ya da bir durumun sınıflandırılması, doğrudan denetimli öğrenme çerçevesine oturmaktadır.

2.3. Eğitim, doğrulama ve test kümeleri; çapraz doğrulama

Denetimli bir modelin başarısı, yalnızca üzerinde eğitildiği veriyle değil, daha önce görmediği veriyle ne kadar iyi çalıştığıyla ölçülmektedir. Bu nedenle veri kümesi genellikle üç parçaya ayrılır: modelin öğrenmesi için kullanılan **eğitim** kümesi (training set), model kurulumu sırasında ayarları düzenlemek için kullanılan doğrulama kümesi (validation set) ve yalnızca en sonda, modelin genelleme başarısını tarafsız biçimde ölçmek için kullanılan test kümesidir (test set).

Balıkçılık verilerinde örneklem sıklıkla küçük, kısa ya da eksik olduğundan, veriyi katı biçimde üçe bölmek her zaman uygun değildir. Bu gibi durumlarda çapraz doğrulama (cross-validation) tercih edilir: veri birden çok parçaya bölünmektedir, model her seferinde bir parça dışarıda tutularak eğitilir ve dışarıda tutulan parça üzerinde sınanmaktadır; bu işlem tüm parçalar için tekrarlanarak başarım ölçütlerinin ortalaması alınmaktadır. Allen Akselrud (2024), ekolojik ve balıkçılık verilerinde rastgele orman modelleri kurarken çapraz doğrulama ve hiperparametre ayarı (hyperparameter tuning) tekniklerinin, güvenilir tahmin üretmenin ayrılmaz bir parçası olduğunu ifade etmektedir. Aynı çalışma, zamansal ilişkili (autocorrelated), seyrek ve kısa verilerle çalışırken bu tekniklerin özenle uygulanması gerektiğini vurgulamaktadır.

2.4. Aşırı öğrenme ve yanlılık–varyans dengesi

Makine öğrenmesinin en temel tuzağı aşırı öğrenmedir (overfitting): modelin eğitim verisindeki rastlantısal dalgalanmaları da ezberleyerek bu veriye gereğinden fazla uyum sağlaması ve bunun sonucunda yeni veride başarımının düşmesidir. Allen Akselrud (2024), ekolojik veri kümelerine özgü niteliklerin (seyreklik, azlık, eksik gözlem ve zamansal ilişki vb.) makine öğrenmesi modellerinde aşırı öğrenmeye ya da belirsiz tahminlere yol açabildiğini belirtmekte ve bu sorunları denetim altına almaya yönelik yöntemler önermektedir. Söz konusu çalışmada geliştirilen yöntemler, Kaliforniya'da bir kalamar (*Doryteuthis opalescens*) türü için için sezon öncesi toplam avcılık tahminlerinin belirsizlikle birlikte üretilmesinde kullanılmıştır (Allen Akselrud, 2024).

Aşırı öğrenmenin karşıtı ise yetersiz öğrenmedir (underfitting); bu durumda model, verideki gerçek yapıyı yakalayacak kadar esnek değildir. İki uç arasındaki denge, yanlılık–varyans dengesi (bias–variance tradeoff) olarak adlandırılmaktadır. Çok basit modeller yüksek yanlılık (sistematik hata), çok esnek modeller ise yüksek varyans (veriye aşırı duyarlılık) gösterme eğilimindedir. İyi bir modelin amacı, bu iki hata kaynağını birlikte en aza indirerek görülmemiş veride en yüksek genelleme başarısını sağlamaktır.

2.5. Model başarım ölçütleri

Bir modelin ne ölçüde başarılı olduğu, çözülen soruna uygun ölçütlerle değerlendirilmektedir. Bu ölçütlerin doğru seçilmesi, modelin balıkçılık yönetimi kararlarına sağlıklı biçimde aktarılabilmesi açısından belirleyicidir.

CPUE ya da toplam av tahmini gibi regresyon hesaplamalarında kullanılan en yaygın başarı ölçütleri, tahmin hatalarının büyüklüğünü özetleyen kök ortalama kare hata (Root Mean Square Error, RMSE) ve modelin açıkladığı değişkenlik oranını veren belirlilik katsayısıdır (R^2). Temel olarak RMSE gözlemle aynı birimde olduğundan yorumlanması kolaydır; R^2 ise 0 ile 1 arasında değer alarak modelin veriye uyum düzeyini özetlemektedir.

Bir av operasyonunda hedef dışı av bulunup bulunmadığının tahmini gibi sınıflandırma (kategorik çıktı) temelli işlemlerde başarım genellikle karışıklık matrisi (confusion matrix) üzerinden değerlendirilmektedir. Bu matris, doğru ve yanlış sınıflandırmaları (doğru pozitif, yanlış pozitif, doğru negatif, yanlış negatif) bir arada gösterir ve buradan doğruluk (accuracy), kesinlik (precision) ve duyarlılık (recall) gibi ölçütler türetilmektedir. Model çıktısının bir olasılık olduğu durumlarda, farklı eşik değerleri boyunca genel ayırt etme gücünü özetleyen ROC eğrisi altındaki alan (Area Under the Curve, AUC) yaygın olarak kullanılmaktadır. AUC'nin 1'e yaklaşması güçlü bir ayırt etme gücüne, 0,5 dolayında olması ise rastgele tahminden farksız bir başarıma işaret etmektedir.

Ölçüt seçiminde dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, sınıf dengesizliğidir. Hedef dışı av gibi süreklilik içermeyen olaylarda, yalnızca doğruluk ölçütüne bakmak yanıltıcı olabilir; bu tür durumlarda kesinlik–duyarlılık dengesi ve AUC gibi ölçütler daha bilgilendiricidir. İzleyen bölümlerdeki uygulama örneklerinde, her yöntem için uygun başarım ölçütü ayrıca belirtilmiştir.

3. R ile Makine Öğrenmesi Ekosistemi

3.1. Neden R? Genel görünüm

R, istatistiksel çözümleme ve veri görselleştirme için geliştirilmiş, balıkçılık biliminde yaygın olarak kullanılan açık kaynaklı bir ortamdır. Birim çabaya düşen av standardizasyonunda uzun yıllardır kullanılan genelleştirilmiş toplamsal modeller için `mgcv` paketi bu kullanımın bilinen bir örneğidir. Aynı ortam, son yıllarda makine öğrenmesi yöntemleri için de geniş bir kütüphaneye kavuşmuştur.

Veri işleme ve görselleştirmede `tidyverse` paket ailesi (`dplyr`, `ggplot2`, `tidyr` vb.) fiili bir standart hâline gelmiştir. Makine öğrenmesi iş akışları içinse iki temel çatı öne çıkmaktadır: görece eski ve tek bir işlevle çok sayıda modeli saran `caret` paketi ile onun modern ardılı sayılan `tidymodels` paket ailesidir. Bu bölümde, güncel olması ve modüler yapısı nedeniyle `tidymodels` esas

alınmıştır ancak yayınlanmış pek çok balıkçılık çalışmasında `caret` ile karşılaşılabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

3.2. tidymodels iş akışının bileşenleri

`tidymodels`, makine öğrenmesi sürecinin her aşamasını ayrı ama birbiriyle uyumlu paketlere bölen bir tasarıma sahiptir. Temel bileşenler şunlardır:

- **rsample**: veriyi eğitim/test kümelerine ayırma ve çapraz doğrulama katları oluşturma.
- **recipes**: kategorik değişkenlerin sayısala çevrilmesi (kukla değişken), ölçekleme, eksik veri doldurma gibi adımların, veri sızıntısını önleyecek biçimde tanımlanması şeklindeki veri ön işleme tarifleri.
- **parsnip**: model türünü, altında çalışan motordan (engine) bağımsız, ortak bir dille tanımlama (ör. rastgele orman için `ranger` ya da `randomForest` motorlarının aynı sözdizimiyle çağrılması vb.).
- **workflows**: ön işleme tarifi ile modeli tek bir nesnede birleştirme.
- **tune ve dials**: hiperparametre ayarı için arama ızgarası tanımlama ve çapraz doğrulama üzerinden en iyi değerleri seçme.
- **yardstick**: başarım ölçütlerinin (RMSE, R^2, AUC vb.) hesaplanması.

Bu modüler yapı, aşağıdaki uçtan uca örnekte adım adım görülebilir.

3.3. Uçtan uca iskelet örnek

Aşağıdaki kod, veri ayrımı, ön işleme, model tanımı, çapraz doğrulamayla hiperparametre ayarı ve test kümesinde başarım ölçümü şeklindeki bir CPUE tahmini görevinin makine öğrenmesi iş akışını baştan sona göstermektedir. Kullanılan veri **yapaydır**; sıcaklık ve derinlik değişkenlerinden basit bir ilişki ve rastgele gürültüyle üretilmiştir. Buradaki amaç iş akışının yapısını göstermek olup, ortaya çıkan sayısal sonucun kendisi değildir

```
# --- Paketler ---
suppressPackageStartupMessages({
  library(dplyr);     library(rsample);  library(recipes)
  library(parsnip);   library(workflows); library(tune)
  library(yardstick); library(dials);    library(ranger)
})

# --- Örnek amaçlı benzetim (simülasyon) verisi ---
set.seed(123)
```

```
n <- 500

veri <- tibble(

  sicaklik = runif(n, 14, 26),                        # deniz suyu
sıcaklığı (°C)

  derinlik = runif(n, 10, 120),                       # avlanma
derinliği (m)

  ay       = factor(sample(1:12, n, replace = TRUE)) # ay
(kategorik)

) |>

  mutate(cpue = 2 + 0.3 * sicaklik - 0.02 * derinlik + rnorm(n,
0, 1))



# --- 1) Eğitim / test ayrımı ---

set.seed(123)

bolme  <- initial_split(veri, prop = 0.8)

egitim <- training(bolme)

test   <- testing(bolme)



# --- 2) Ön işleme tarifi ---

tarif <- recipe(cpue ~ sicaklik + derinlik + ay, data = egitim)
|>

  step_dummy(all_nominal_predictors()) |>      # 'ay' -> kukla
değişkenler

  step_normalize(all_numeric_predictors())     # sayısal
değişkenleri ölçekle



# --- 3) Model tanımı: rastgele orman (ranger motoru) ---

rf_spec <- rand_forest(trees = 500, mtry = tune(), min_n =
tune()) |>

  set_engine("ranger", importance = "permutation") |>

  set_mode("regression")



# --- 4) İş akışı: tarif + model ---

akis <- workflow() |>
```

```
  add_recipe(tarif) |>
  add_model(rf_spec)


# --- 5) Çapraz doğrulama + hiperparametre ayarı ---
set.seed(123)
katlar <- vfold_cv(egitim, v = 5)                    # 5 katlı
çapraz doğrulama
izgara <- grid_regular(mtry(range = c(2, 8)),
                       min_n(range = c(2, 10)), levels = 3)
ayar <- tune_grid(akis, resamples = katlar, grid = izgara,
                  metrics = metric_set(rmse, rsq))


# --- 6) En iyi parametrelerle son model ve test başarımı ---
en_iyi   <- select_best(ayar, metric = "rmse")
son_akis <- finalize_workflow(akis, en_iyi)
son_fit  <- last_fit(son_akis, bolme)


en_iyi
collect_metrics(son_fit)
```

Bu betiğin ürettiği çıktı şöyledir:

```
# En iyi hiperparametreler
   mtry min_n
      5    10


# Test kümesi başarımı
  .metric  .estimate
  rmse         1.11
  rsq          0.484
```

Buradaki `mtry`, her ağaç düğümünde rastgele seçilen aday değişken sayısını; `min_n` ise bir düğümün daha fazla bölünmesi için gereken en az gözlem sayısını belirtir. Çapraz doğrulama, bu iki hiperparametrenin farklı bileşimlerini eğitim

verisi üzerinde denemekte ve en düşük RMSE'yi veren bileşimi seçmektedir. Test kümesindeki başarım ise yalnızca en sonda, tarafsız bir ölçüm olarak hesaplanmaktadır. Bu ayrımın korunması, 2. kısımda değinilen aşırı öğrenme riskine karşı temel güvencedir.

Örnekte R^2'nin (0,48) yüksek çıkmaması, verinin bilerek yüksek gürültüyle üretilmiş olmasından kaynaklanmaktadır; gerçek bir çalışmada bu değer, verinin kalitesine ve değişkenlerin açıklayıcı gücüne göre değişir. Kısaca Allen Akselrud (2024), balıkçılık ve ekolojik verilerle rastgele orman modelleri kurarken çapraz doğrulama ve hiperparametre ayarının güvenilir tahminin ayrılmaz bir parçası olduğunu vurgulamaktadır.

3.4. Sonraki adımlar

Yukarıdaki iskelet, izleyen uygulama bölümlerinin ortak çatısını oluşturmaktadır. 4. kısımda bu akış, CPUE standardizasyonu bağlamında klasik genelleştirilmiş doğrusal modellerle (GLM); 5. kısımda ise tür dağılımı ve av/efor tahmininde artırmalı regresyon ağaçları ile ele alınmıştır. Bir modeli yalnızca tahmin başarısıyla değil, yorumlanabilirliğiyle de değerlendirmek gerekmektedir ki bu nedenle değişken önemi (feature importance) ve model-bağımsız açıklama (`DALEX`) gibi yorumlama yaklaşımlarına da ileride yer verilmiştir.

4. Uygulama I: CPUE Standardizasyonunda Klasik Modellerden Makine Öğrenmesine

4.1. Sorun: CPUE neden standardize edilir?

Birim çaba başına av miktarı, belirli bir avcılık faaliyeti başına yakalanan ortalama av miktarını ifade eden temel bir göstergedir. Stok büyüklüğünün mutlak tahminlerinin maliyetli ve zor olduğu ticari ve küçük ölçekli balıkçılıklarda uzun yıllardır bağıl bolluk indeksi olarak da kullanılmaktadır (Ceyhan, 2025). Ancak ham CPUE, yalnızca stok bolluğunu değil; avcılığın yapıldığı çevresel koşulları, mevsimi, operasyonel etkenleri ve av aracına özgü yanlılıkları da yansıtmaktadır. Ceyhan (2025), balıkçılık bağımlı verilerin stok izlemenin belkemiğini oluşturduğunu, ancak farklı av araçlarının yakalama mekanizması ve verimliliği bakımından farklı dinamikler sergilediğini ve bu nedenle CPUE'nin yorumu ile standardizasyonunun her av türü için ayrı zorluklar taşıdığını vurgulamaktadır.

Standardizasyonun amacı, bu yan etkileri istatistiksel olarak ayıklayarak CPUE'nin daha güvenilir biçimde olmasını sağlamaktır. Bu amaçla en yaygın kullanılan yöntemler genelleştirilmiş doğrusal modeller ve genelleştirilmiş toplamsal modeller olmuş; son yıllarda Delta modelleri ve uzay-zamansal modeller (ör. VAST) gibi yaklaşımlar da öne çıkmıştır (Ceyhan, 2025). Hoyle ve diğerleri (2024) ise stok değerlendirmesi için CPUE standardizasyonunda bu klasik yöntemlerin yanı sıra makine öğrenmesi yaklaşımlarını da kapsayan bir *iyi uygulamalar* çerçevesi sunmaktadır. Aşağıdaki kısımda, bu alandaki bir çalışma

(Balkı, Ceyhan, Tosunoğlu ve Ulaş, 2025) örnek alınarak, klasik GLM ile makine öğrenmesi yöntemleri, benzetim (simülasyon) yoluyla üretilmiş örnek bir veri üzerinde karşılaştırılmaktadır.

4.2. Çalışma ve veri

Balkı ve diğerleri (2025), İzmir'de faaliyet gösteren bir gırgır teknesinin yıllara dayalı verisinde deniz yüzeyi sıcaklığı (SST), deniz yüzeyi tuzluluğu, klorofil-a derişimi ve ay evrelerinin CPUE üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada CPUE dağılımı belirgin biçimde çarpık olduğundan, hedef tür CPUE'si önce bir normalleştirme dönüşümüne (Yeo–Johnson) tabi tutulmuş; ardından bu normalleştirilmiş CPUE, açıklayıcı değişkenlerin bir işlevi olarak genelleştirilmiş doğrusal modelle modellenmiş ve modeller Akaike bilgi ölçütü (AIC) ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel bulgusu, klorofil-a derişiminin CPUE üzerindeki en belirleyici çevresel etken olmasıdır.

Aşağıdaki örnekte, bu tür bir standardizasyon analizinin adımları, benzetim yoluyla üretilmiş örnek bir veri kümesi üzerinde gösterilmiştir. Örnek veri, gırgır CPUE verilerinde tipik olarak gözlenen değişken dağılımlarını ve ilişkileri (özellikle klorofil-a ile deniz yüzeyi sıcaklığı arasındaki negatif ilişkiyi) içerecek biçimde tasarlanmıştır. Bu örnekte kod doğrudan çalıştırılarak örnek yeniden üretebilir.

4.3. Klasik yaklaşım: GLM ile standardizasyon

```
# ---- Örnek amaçlı benzetim (simülasyon) verisi ----

set.seed(2025)

n <- 564

sst_z    <- rnorm(n)

klor_z   <- -0.67 * sst_z + sqrt(1 - 0.67^2) * rnorm(n)
# klorofil ~ SST (r ≈ -0,67)

SST      <- pmin(pmax(18.4 + 3.18 * sst_z, 12.65), 26.23)
# °C

Klorofil <- pmin(pmax(exp(-1.66 + 0.541 * klor_z), 0.09), 0.79)
# mg/m3, sağa çarpık

Tuzluluk <- rnorm(n, 39.36, 0.19)
# ppt

Yıl      <- sample(2017:2023, n, replace = TRUE)

Ay       <- sample(1:12, n, replace = TRUE)

Mevsim   <- factor(sample(c("Sonbahar","Kış","İlkbahar"), n,
TRUE, c(295,166,103)),
```

```
                    levels = c("Sonbahar","Kış","İlkbahar"))

Ay_Fazı  <-
factor(sample(c("Yeniay","İlkdördün","Dolunay","Sondördün"), n,
TRUE, c(166,136,111,151)),

                    levels =
c("Yeniay","İlkdördün","Dolunay","Sondördün"))



# Normalleştirilmiş CPUE: klorofil baskın (negatif), yıl ve
dolunay anlamlı; SST/tuzluluk zayıf

mev <- c(Sonbahar=0, Kış=-0.05, İlkbahar=-
0.33)[as.character(Mevsim)]

faz <- c(Yeniay=0, İlkdördün=-0.12, Dolunay=-0.27,
Sondördün=0.10)[as.character(Ay_Fazı)]

normalized_CPUE <- 116 - 0.053*Yıl - 0.011*Ay - 0.012*SST -
0.166*Tuzluluk -

                    1.5*Klorofil + mev + faz + rnorm(n, 0, 0.98)

d <- data.frame(Yıl, Ay, Mevsim, SST, Tuzluluk, Klorofil,
Ay_Fazı, normalized_CPUE)



# ---- Yazarın en iyi modeline (mod_7) karşılık gelen GLM ----

mod7 <- glm(normalized_CPUE ~ Yıl + Ay + Mevsim + SST + Tuzluluk
+ Klorofil + Ay_Fazı,

            data = d, family = gaussian)

summary(mod7)

AIC(mod7)
```

Üretilen çıktıdan anlamlı ($p < 0,05$) terimler ve AIC (R 4.5.2):

```
                 Estimate  Std. Error  t value  Pr(>|t|)

(Intercept)      101.669     42.787      2.38    0.0178

Yıl               -0.0532     0.0205    -2.60    0.0096

MevsimİlkbaharMevsimİlkbahar    -0.3669     0.1177    -3.12    0.0019

Klorofil          -1.1090     0.4224    -2.63    0.0089

Ay_FazıDolunay    -0.2694     0.1198    -2.25    0.0249

AIC: 1581   | n = 564
```

Bu örnek, Balkı ve diğerlerinin (2025) ulaştığı temel bulguyu yansıtmaktadır. Klorofil-a, CPUE üzerinde en güçlü ve istatistiksel olarak anlamlı negatif yönde

etkiye sahip değişkendir. Yıl ve ay evresinin dolunay düzeyi de anlamlı çıkmaktadır. Buna karşılık sıcaklık ve tuzluluğun doğrusal katkısı bu modelde istatistiksel olarak anlamlı değildir.

4.4. Makine öğrenmesiyle karşılaştırma ve yorumlama

Burada, aynı veri ve aynı değişkenlerle, klasik GLM'in yanına rastgele orman ve artırmalı regresyon ağaçları eklenerek karşılaştırma yapılmaktadır. Örneklem büyüklüğü orta düzeyde olduğundan, başarım 10 katlı çapraz doğrulamayla ölçülmüştür. Ayrıca rastgele ormanın permütasyon temelli değişken önemi çıkarılmaktadır.

```
suppressPackageStartupMessages({ library(ranger); library(gbm) })

form <- normalized_CPUE ~
Yıl+Ay+Mevsim+SST+Tuzluluk+Klorofil+Ay_Fazı



# Değişken önemi (rastgele orman, permütasyon)

rf <- ranger(form, data = d, num.trees = 500, importance =
"permutation", seed = 1)

sort(rf$variable.importance, decreasing = TRUE)



# 10-katlı CV ile GLM vs RF vs BRT

set.seed(1)

d$fold <- sample(rep(1:10, length.out = nrow(d)))

rmse <- function(a, b) sqrt(mean((a - b)^2))

res  <- data.frame(GLM = numeric(), RF = numeric(), BRT =
numeric())

for (k in 1:10) {

  tr <- d[d$fold != k, ]; te <- d[d$fold == k, ]

  g  <- glm(form, data = tr, family = gaussian);           gp <-
predict(g, te)

  r  <- ranger(form, data = tr, num.trees = 500, seed = 1); rp <-
predict(r, te)$predictions

  b  <- gbm(form, data = tr, distribution = "gaussian", n.trees =
1500,

            interaction.depth = 3, shrinkage = 0.01, bag.fraction
= 0.75, verbose = FALSE)

  bp <- predict(b, te, n.trees = 1500)
```

```
  res[k, ] <- c(rmse(te$normalized_CPUE, gp),
rmse(te$normalized_CPUE, rp),
                rmse(te$normalized_CPUE, bp))
}
round(colMeans(res), 3)
```

Çıktı (R 4.5.2):

```
# Rastgele orman değişken önemi (permütasyon)
Klorofil      SST   Mevsim  Ay_Fazı      Yıl       Ay  Tuzluluk
   0.103    0.058    0.021    0.009    0.004   -0.013    -0.025


# 10-katlı CV ortalama RMSE (normalized_CPUE)
 GLM      RF    BRT
0.977   1.005  1.025
```

4.5. Sonuçların yorumu

Üç bulgu öne çıkmaktadır.

Birincisi, öngörü doğruluğu bakımından üç yöntem de neredeyse özdeştir (çapraz doğrulama RMSE değerleri GLM için 0,98; rastgele orman için 1,01; BRT için 1,02). İyi belirlenmiş bir klasik GLM ile modern makine öğrenmesi yöntemleri arasında kayda değer bir başarım farkı ortaya çıkmamış; hatta bu örnekte en düşük hatayı klasik GLM vermiştir. Bu, makine öğrenmesinin klasik modellerin otomatik olarak yerini alan bir üstünlük olmadığını bir kez daha göstermektedir; verinin yapısı görece düzgün olduğunda GLM en az onlar kadar başarılıdır.

İkincisi, değişken önemi ile istatistiksel anlamlılık her zaman aynı bilgiyi vermez. Rastgele ormanın permütasyon önem sıralamasında klorofil-a ilk sıradadır; bu, GLM'in klorofili en anlamlı değişken bulmasıyla tutarlıdır. Ancak SST, GLM'de doğrusal katkısı anlamsız çıkmasına karşın, rastgele orman öneminde ikinci sırada yer almaktadır. Bunun nedeni, SST'nin CPUE ile doğrudan değil, büyük ölçüde klorofil-a ile olan güçlü ilişkisi (korelasyon $\approx -0{,}67$) üzerinden bağlantılı olmasıdır; rastgele orman bu dolaylı bilgiyi öneme yansıtırken, GLM'in doğrusal katsayısı diğer değişkenler denetlendiğinde SST'yi anlamsız bulmaktadır. İki yaklaşımın birlikte kullanılması, bu nedenle tamamlayıcı bir bakış sağlamaktadır.

Üçüncüsü, her iki yaklaşım da çalışmanın temel bulgusuna işaret eder: klorofil-a, bu gırgır balıkçılığında CPUE'nin en belirleyici çevresel etmenidir.

Yöntem seçimi bu noktada yalnızca hataya göre değil; yorumlanabilirlik, varsayımların şeffaflığı ve çalışmanın amacına göre yapılmalıdır.

5. Uygulama II: Iskarta ve Av/Efor Tahmininde GAM ve Makine Öğrenmesi

5.1. Artırmalı regresyon ağaçları ve rastgele orman

Bu kısımda, ağaç tabanlı bir başka güçlü yöntem olan **artırmalı regresyon ağaçları (BRT)** da işin içine katılmaktadır. İki yöntem de çok sayıda karar ağacını birleştirerek tahmin üretir; ancak ağaçları birleştirme mantıkları farklıdır. Rastgele orman, ağaçların her birini verinin rastgele seçilmiş bir alt kümesiyle ve birbirinden bağımsız olarak eğitmektedir; ardından tüm ağaçların tahminlerinin ortalamasını alarak sonuca ulaşmaktadır. Birbirinden bağımsız kurulan modellerin ortalamasının alındığı bu yaklaşım bagging yöntemi olarak bilinmektedir. Artırmalı regresyon ağaçları ise ağaçları ardışık, yani sırayla kurmaktadır; her yeni ağaç, kendinden önceki ağaçların yaptığı hataları düzeltmeye odaklanmaktadır. Bu ikinci yaklaşım da boosting olarak adlandırılmaktadır. Balıkçılıkta BRT'nin öncü uygulamalarından biri Soykan ve diğerleri (2014) tarafından gerçekleştirilmiş; kılıç balığı hedefli sürüklenen ağ ve tülina olta filolarının av çabası dağılımı, hedef dışı av endişeleri bağlamında BRT ile modellenmiştir.

Bu bölümde, söz konusu yöntemler, Ege trol ıskartası çalışması (Soykan & Ceyhan, 2024) bağlamında örnek bir veri üzerinde karşılaştırılmaktadır.

5.2. Çalışma ve veri

Soykan ve Ceyhan (2024), 2010–2012 yılları arasında Ege Denizi'nin Türkiye kıyılarındaki başlıca trol sahalarında (Çanakkale, Foça, Karaburun, Sığacık ve Güllük) yürütülen çekimlerde ıskarta dinamiklerini incelemiştir. Çalışmada, ıskartanın birim çabaya düşen miktarı (discard per unit effort, DPUE) ve ıskarta oranı üzerine derinlik, konum (enlem–boylam), çekim süresi ve mevsimin etkisi, Tweedie dağılımı ve logaritmik bağ işleviyle kurulan genelleştirilmiş toplamsal modeller aracılığıyla değerlendirilmiştir. Iskarta oranı, kışın Çanakkale'de 0,01 ile yazın Güllük'te 0,90 arasında geniş bir aralıkta değişmiştir.

Aşağıdaki örnekte, bu tür bir analizin adımları benzetim yoluyla üretilmiş örnek bir veri kümesi üzerinde gösterilmektedir. Örnek veri, beş trol sahasının bölgesel yapısını (konum, derinlik ve çekim süresi) ve DPUE'nin bu değişkenlere bağımlılığını içerecek biçimde tasarlanmıştır ve aşağıdaki kodlar çalıştırılarak örneği yeniden üretebilir.

5.3. Örnek veri ve GAM modeli

İlk adım, örnek veriyi üretip GAM modelini kurmaktır. Model, iskartanın birim çabaya düşen miktarını (DPUE), derinliğin, konumun (küresel düzleştirme, `bs="sos"`), çekim süresinin ve mevsimin bir işlevi olarak açıklar:

```
suppressPackageStartupMessages(library(mgcv))



# ---- Örnek amaçlı benzetim (simülasyon) verisi: beş trol sahası
----

set.seed(2024)

n <- 311

loc <- data.frame(

  name = c("CANAKKALE","FOCA","SIGACIK","KARABURUN","GULLUK"),

  frq  = c(49, 77, 27, 37, 121),          # gözlem sayısı

  lat  = c(40.3, 38.8, 38.0, 38.8, 37.2),

  lon  = c(25.9, 26.7, 26.6, 26.1, 27.3),

  dep  = c(273, 94, 229, 234, 71),        # ortalama derinlik (m)

  dur  = c(157, 163, 281, 176, 175),      # ortalama çekim süresi
(dk)

  base = c(1.47, 1.42, 1.67, 1.97, 1.87)) # bölge taban log-DPUE
düzeyi

i <- sample(seq_len(5), n, replace = TRUE, prob = loc$frq); L <-
loc[i, ]



lat_start_dc <- L$lat + rnorm(n, 0, 0.12)

lon_start_dc <- L$lon + rnorm(n, 0, 0.10)

Depth    <- pmax(pmin(rnorm(n, L$dep, 80), 450), 36)

Duration <- pmax(pmin(rnorm(n, L$dur, 55), 430), 50)

Season   <- factor(sample(c("WINTER","SPRING","SUMMER","AUTUMN"),
n, TRUE, c(71,79,75,86)),

                    levels =
c("WINTER","SPRING","SUMMER","AUTUMN"))

sea <- c(WINTER=-0.05, SPRING=0.03, SUMMER=0.08, AUTUMN=-
0.02)[as.character(Season)]



# DPUE: bölge tabanı + derinlik (sığda daha çok iskarta) + süre +
mevsim + gürültü

logDPUE <- L$base + 0.45*(140 - Depth)/100 + 0.0015*(Duration -
180) + sea + rnorm(n, 0, 0.60)
```

```
DPUE <- pmax(exp(logDPUE), 0.22)

df <- data.frame(DPUE, Depth, Duration, lat_start_dc,
lon_start_dc, Season)



# ---- Çalışmanın GAM modeli ----

gam_full <- gam(

  DPUE ~ s(Depth, k = 10, bs = "cs") +

         s(lon_start_dc, lat_start_dc, bs = "sos", k = 40) +  #
küresel mekânsal düzleştirme

         s(Duration, k = 4, bs = "cs") +

         Season,

  data = df, method = "REML",

  family = Tweedie(p = 1.001, link = "log")

)

summary(gam_full)
```

Üretilen çıktıdan öne çıkanlar :

```
Açıklanan sapma: %54,5   | n = 311

Düzleştirme terimleri (p-değeri):

  s(Depth)                        < 0,001

  s(lon_start_dc, lat_start_dc)   < 0,001

  s(Duration)                     < 0,001
```

Model, DPUE'deki değişkenliğin yaklaşık %54'ünü açıklamakta; derinlik, mekânsal konum ve çekim süresi düzleştirmelerinin üçü de istatistiksel olarak yüksek düzeyde anlamlı çıkmaktadır. Bu, ıskartanın hem derinliğe hem de coğrafi konuma güçlü biçimde bağlı olduğunu gösterir ve Soykan ve Ceyhan'ın (2024) temel bulgularıyla uyumludur.

5.4. GAM'i makine öğrenmesiyle karşılaştırmak

İkinci adım, aynı veride ve aynı öngörücülerle klasik GAM'i rastgele orman ve artırmalı regresyon ağaçlarıyla karşılaştırmaktır. Örneklem küçük olduğundan (n = 311), tek bir eğitim/test ayrımı yerine, daha güvenilir bir ölçüm sağlayan **10 katlı çapraz doğrulama** kullanılmıştır. Her katta üç model de aynı eğitim verisiyle kurulup, dışarıda tutulan katta DPUE tahmininin kök ortalama kare hatası (RMSE) hesaplanmaktadır.

```
suppressPackageStartupMessages({ library(ranger); library(gbm) })
```

```
# 'df', 5.3'teki üreteçten gelir (aynı oturumda çalıştırılır).



set.seed(1)

df$fold <- sample(rep(1:10, length.out = nrow(df)))

rmse <- function(a, b) sqrt(mean((a - b)^2))

res  <- data.frame(GAM = numeric(), RF = numeric(), BRT =
numeric())



for (k in 1:10) {

  tr <- df[df$fold != k, ];  te <- df[df$fold == k, ]



  # (a) GAM (yazarın modeli)

  g  <- gam(DPUE ~ s(Depth, k = 10, bs = "cs") +

                   s(lon_start_dc, lat_start_dc, bs = "sos", k =
40) +

                   s(Duration, k = 4, bs = "cs") + Season,

            data = tr, method = "REML", family = Tweedie(p =
1.001, link = "log"))

  gp <- predict(g, te, type = "response")



  # (b) Rastgele orman

  rf <- ranger(DPUE ~ Depth + lon_start_dc + lat_start_dc +
Duration + Season,

               data = tr, num.trees = 500, seed = 1)

  rp <- predict(rf, te)$predictions



  # (c) Artırmalı regresyon ağaçları

  b  <- gbm(DPUE ~ Depth + lon_start_dc + lat_start_dc + Duration
+ Season,

            data = tr, distribution = "gaussian", n.trees = 1500,

            interaction.depth = 3, shrinkage = 0.01, bag.fraction
= 0.75, verbose = FALSE)

  bp <- predict(b, te, n.trees = 1500)
```

```
  res[k, ] <- c(rmse(te$DPUE, gp), rmse(te$DPUE, rp),
rmse(te$DPUE, bp))

}

round(colMeans(res), 3)
```

Betiğin ürettiği çıktı (R 4.5.2):

```
  GAM     RF    BRT

5.319  5.236  5.473
```

5.5. Sonuçların yorumu

Bu karşılaştırmanın en dikkat çekici yönü, **üç yöntemin de neredeyse özdeş başarım göstermesidir** (çapraz doğrulama RMSE değerleri GAM için 5,32; rastgele orman için 5,24; BRT için 5,47). İyi belirlenmiş bir GAM ile modern makine öğrenmesi yöntemleri arasında öngörü doğruluğu bakımından kayda değer bir fark ortaya çıkmamıştır.

Bu sonuç, bölümün temel mesajını somut biçimde doğrulamaktadır: makine öğrenmesi, klasik istatistiksel modellerin otomatik olarak yerini alan bir üstünlük değildir. Verinin yapısı düzgün ve toplamsal olduğunda, uygun biçimde kurulmuş bir GAM, esnek makine öğrenmesi yöntemleriyle en az aynı başarıyı gösterebilir. Böyle bir durumda yöntem seçimi, yalnızca öngörü hatasına göre değil; yorumlanabilirlik, varsayımların şeffaflığı, belirsizliğin ifade edilebilmesi ve çalışmanın amacına göre yapılmalıdır. GAM'in bir üstünlüğü, her değişkenin etkisini yorumlanabilir düzleştirme eğrileriyle göstermesi ve Tweedie gibi balıkçılık verisine uygun dağılımları doğrudan modelleyebilmesidir; makine öğrenmesinin üstünlüğü ise, değişkenler arası karmaşık etkileşimlerin baskın olduğu ve işlevsel biçimin bilinmediği durumlarda ortaya çıkmaktadır.

Hangi yöntemin üstün geleceği tek bir kurala bağlanamaz. Stock ve diğerleri (2020), hedef dışı av verisinde birden çok mekânsal-zamansal tür dağılım modeli çerçevesini (Gauss–Markov rastgele alanları, GAM ve rastgele orman) karşılaştırmış ve yöntemlerin başarımlarının veri bağlamına göre değiştiğini göstermiştir. Luan, Zhang, Xu, Xue ve Ren (2020) ise rastgele orman modellerinin sınırlı örneklem büyüklüğü altındaki başarımını inceleyerek küçük örneklemlerde dikkatli olunması gerektiğini vurgulamıştır. Yukarıdaki örnekte örneklem büyüklüğünün görece küçük (n = 311) olması, tek bir ayrım yerine çapraz doğrulama kullanılmasının nedenidir ve bu uyarıların pratikteki karşılığıdır.

6. Uygulama III: İstilacı Türlerde Sayım Modelleri ve Sınıflandırma

6.1. İstilacı mavi yengeç ve mücadele bağlamı

Atlantik mavi yengeci (*Callinectes sapidus*), Akdeniz'de yaygınlaşan istilacı bir türdür ve belgelenmiş ekolojik ve sosyo-ekonomik etkileri vardır. Bu tür için etkili popülasyon denetimi, hedefli avlanmada kullanılan av araçlarının ve yemlerin göreli verimliliğine ilişkin saha kanıtı gerektirmektedir. Ceyhan, Balkı ve diğerleri (2026), Türkiye'de Azmak'ta 2023–2025 yıllarında yürütülen standart denemelerde iki sepet tasarımını (çift girişli ve şemsiye tipi) ve üç yemi (tavuk, balık, işkembe) karşılaştırmış; çaba farklarını hesaba katan (effort-offset) bir negatif binom çerçevesiyle sepet ve yem tipleri arasında doğrudan karşılaştırılabilir CPUE farkları raporlamıştır.

Bu bkısımda iki tamamlayıcı görev ele alınmaktadır: önce yakalanan birey sayısının bir **sayım modeliyle** (negatif binom) modellenmesi; ardından yüksek av durumunun bir **sınıflandırma** problemi olarak ele alınması. Böylece daha önceki kısımlarda regresyonla sınırlı kalan makine öğrenmesi karşılaştırması, sayım ve sınıflandırma bağlamlarına genişletilmektedir; karışıklık matrisi ve ROC eğrisi altındaki alan (AUC) gibi sınıflandırma ölçütleri ilk kez bu uygulamada gösterilmektedir.

6.2. Veri üreteci

Aşağıdaki kod, bu tür bir deneyin yapısını yansıtan örnek bir veri üretmektedir.Kod da yakalanan birey sayısı, sepet ve yem etkilerini ve mevsimsel düşüşü içeren bir negatif binom süreçten türetilmektedir.

```
suppressPackageStartupMessages({ library(MASS); library(ranger)
})



# ---- Örnek amaçlı benzetim (simülasyon) verisi ----

set.seed(2025)

n <- 55

pot  <- factor(sample(c("Double-entrance","Umbrella"), n, TRUE,
c(31, 24)),

               levels = c("Double-entrance","Umbrella"))

bait <- factor(sample(c("Fish","Chicken","Tripe"), n, TRUE, c(19,
18, 18)),

               levels = c("Fish","Chicken","Tripe"))

yil  <- factor(sample(c("2023","2024","2025"), n, TRUE, c(7, 36,
12)))
```

```
ay   <- factor(sample(c("6","7","8","9","10"), n, TRUE, c(6, 30,
7, 9, 3)),

               levels = c("6","7","8","9","10"))

soak_h <- sample(c(1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 5.0), n, TRUE, c(6, 19,
12, 15, 3))  # çekim süresi (saat)



# Negatif binom sayım: sepet + yem + ay etkileri + çaba (offset)

pe <- c("Double-entrance"=0, "Umbrella"=-0.43)[as.character(pot)]
# şemsiye daha az

be <- c("Fish"=0, "Chicken"=0.48, "Tripe"=-
0.97)[as.character(bait)]  # tavuk iyi, işkembe kötü

me <- c("6"=0, "7"=-0.6, "8"=-0.7, "9"=-1.4, "10"=-
2.2)[as.character(ay)]

mu <- exp(1.6 + pe + be + me + log(soak_h))

n_caught <- rnbinom(n, mu = mu, size = 8)

agg <- data.frame(n_caught, pot, bait, yil, ay, soak_h)
```

6.3. Sayım modeli: çaba-ofsetli negatif binom

Yakalanan birey sayısı bir sayımdır ve çekim süresine (çaba) göre değişmektedir. Bu nedenle model, `offset(log(soak_h))` ile çabayı hesaba katar ve aşırı yayılıma (overdispersion) dayanıklı negatif binom dağılımını kullanmaktadır. Sonuçlar oran oranı (incidence rate ratio, IRR) olarak yorumlanmaktadır. Burada 1'in üzeri daha yüksek, altı daha düşük av demektir.

```
m_nb <- glm.nb(n_caught ~ pot + bait + yil + ay +
offset(log(soak_h)), data = agg)

exp(coef(m_nb))   # oran oranları (IRR)

summary(m_nb)
```

Üretilen çıktının öne çıkan terimleri:

```
Terim          Katsayı    IRR     p

potUmbrella     -0.388    0.68   0.003

baitChicken      0.475    1.61   0.001

baitTripe       -0.853    0.43   0.000
```

Bu örnekte çift girişli sepet, şemsiye tipinden daha yüksek av vermektedir (şemsiye IRR ≈ 0,68); yem seçimi de belirleyicidir: tavuk yemi balığa göre avı yaklaşık %60 artırmakta (IRR ≈ 1,61), işkembe ise başarımı düşürmektedir (IRR ≈ 0,43). Dolayısıyla istilacı yengecin hedefli uzaklaştırılmasında en verimli

yapılandırma, çift girişli sepet ile tavuk yemidir. Negatif binom modeli, sayım verisinin çabayla ilişkisini ve aşırı yayılımı doğrudan modellediği için bu tür verilerde uygun bir klasik çerçevedir.

6.4. Sınıflandırma: "yüksek av" durumunu tahmin etmek

Aynı veri, bir sınıflandırma problemine de dönüştürülebilir. Burada, av setinin medyanın üzerinde birey yakalayıp yakalamadığı (yüksek / düşük av) bir ikili hedef olarak tanımlanır ve sepet ile yemden tahmin edilmektedir. Klasik yaklaşım olarak lojistik regresyon, makine öğrenmesi olarak rastgele orman sınıflandırıcısı kullanılmaktadır. Başarım, karışıklık matrisi ve ROC eğrisi altındaki alan ile değerlendirilmektedir.

```
agg$yuksek <- factor(ifelse(agg$n_caught >= median(agg$n_caught),
"yuksek", "dusuk"),

                     levels = c("dusuk","yuksek"))



# Tam veri lojistik regresyon -> karışıklık matrisi (eşik 0,5)

m_lo <- glm(yuksek ~ pot + bait, data = agg, family = binomial())

tahmin <- factor(ifelse(predict(m_lo, type = "response") >= 0.5,
"yuksek", "dusuk"),

                 levels = c("dusuk","yuksek"))

table(Gercek = agg$yuksek, Tahmin = tahmin)



# 5-katlı çapraz doğrulama ile AUC: lojistik vs rastgele orman

auc <- function(sc, y) {              # Mann–Whitney tabanlı AUC

  r <- rank(sc); (sum(r[y==1]) - sum(y==1)*(sum(y==1)+1)/2) /
(sum(y==1)*sum(y==0))

}

set.seed(1); agg$fold <- sample(rep(1:5, length.out = nrow(agg)))

al <- ar <- c()

for (k in 1:5) {

  tr <- agg[agg$fold != k, ]; te <- agg[agg$fold == k, ]; yte <-
as.integer(te$yuksek == "yuksek")

  lo <- glm(yuksek ~ pot + bait, data = tr, family = binomial())

  rf <- ranger(yuksek ~ pot + bait, data = tr, num.trees = 500,
probability = TRUE, seed = 1)

  if (length(unique(yte)) == 2) {
```

```
    al <- c(al, auc(predict(lo, te, type = "response"), yte))
    ar <- c(ar, auc(predict(rf, te)$predictions[, "yuksek"],
yte))
  }
}
c(Lojistik = mean(al), RF = mean(ar))
```

Çıktı:

```
# Lojistik regresyon karışıklık matrisi (tam veri)
        Tahmin
Gercek   dusuk yuksek
  dusuk     16      6
  yuksek     9     24

# 5-katlı CV AUC
Lojistik    RF
   0.76    0.72
```

Karışıklık matrisi, 55 denemenin 40'ının (16 + 24) doğru sınıflandırıldığını (doğruluk ≈ %73), yanlışların ise iki yönde dengeli dağıldığını göstermektedir. AUC değerleri (lojistik 0,76; rastgele orman 0,72), her iki yöntemin de rastlantıdan (0,5) belirgin biçimde daha iyi, birbirine yakın bir ayırt etme gücüne sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

6.5. Sonuçların yorumu

Bu kısım iki önemli konuyu bir arada sunmaktadır. **Birincisi**, makine öğrenmesinin sayım ve sınıflandırma görevlerine de uygulanabildiği; ancak burada da klasik modellerle (negatif binom, lojistik regresyon) makine öğrenmesi arasında belirgin bir başarım farkı ortaya çıkmadığıdır. Küçük örneklemli (n = 55) ve az sayıda açıklayıcı değişkenli bu tür deneysel verilerde, yorumlanabilir klasik modeller çoğu zaman yeterli ve tercih edilebilir. Luan ve diğerleri (2020), rastgele orman modellerinin sınırlı örneklem büyüklüğünde dikkatle kullanılması gerektiğini vurgulayarak bu gözlemi desteklemektedir.

İkincisi, model çıktısının doğrudan yönetim kararına çevrilebilmesidir. Hem sayım modeli hem de sınıflandırma, istilacı yengecin uzaklaştırılmasında en verimli yapılandırmanın çift girişli sepet ve tavuk yemi olduğuna işaret etmektedir. Modelin değeri, yalnızca öngörü doğruluğunda değil, sağladığı bu uygulanabilir çıkarımdadır.

7. Bilgisayarlı Görü ve Derin Öğrenme

7.1. Balıkçılıkta bilgisayarlı görü

Bilgisayarlı görü ve derin öğrenme, balıkçılık biliminde tür tanıma, bireylerin otomatik sayımı, boy ölçümü ve av kompozisyonunun görüntüden belirlenmesi gibi görevlerde giderek daha yaygın kullanılmaktadır. Gemi üstü kameralar, su altı gözlem sistemleri ve pazar/mezat görüntüleri, bu yöntemler için zengin bir veri kaynağı oluşturmaktadır. Saleh, Sheaves ve Rahimi Azghadi (2022), su altı ortamlarında balık sınıflandırması için bilgisayarlı görü ve derin öğrenme yöntemlerini kapsamlı biçimde tarayan bir derleme sunmuştur. Kamerayla yakalanan görüntülerden çok sınıflı tür tanıma da güncel bir araştırma alanıdır (Malik vd., 2023).

7.2. Evrişimli sinir ağları: temel fikir

Klasik makine öğrenmesinde model, önceden tanımlanmış özniteliklerle (ör. boy, renk, en–boy oranı) beslenmektedir. Derin öğrenmenin ayırt edici yönü, bu öznitelikleri doğrudan ham görüntünün piksellerinden kendisinin öğrenmesidir. **Evrişimli sinir ağları (convolutional neural networks, CNN)**, ardışık evrişim katmanlarıyla önce kenar ve doku gibi basit örüntüleri, sonra bunları birleştirerek yüzgeç, göz ya da vücut biçimi gibi daha karmaşık yapıları öğrenmektedir. Ağın son katmanları ise bu öğrenilmiş öznitelikleri bir sınıflandırıcıya vererek türü tahmin etmektedir. Bir CNN'in son aşaması, özünde bu bölümde gösterilen türden bir yapay sinir ağı sınıflandırıcısıdır; fark, özniteliklerin elle değil, piksellerden öğrenilmesidir.

7.3. Veri gereksinimi ve zorluklar

Derin öğrenmenin başlıca gereksinimi, çok sayıda etiketli görüntüdür. Balıkçılıkta bu veriyi toplamak ve etiketlemek maliyetli olduğundan, iki strateji öne çıkmaktadır. Birincisi, önceden büyük veri kümelerinde eğitilmiş ağların yeni bir göreve uyarlanmasıdır (öğrenme aktarımı, transfer learning). İkincisi, sentetik (yapay olarak üretilmiş) görüntülerle eğitim verisini zenginleştirmektir; Allken ve diğerleri (2019), sentetik veriyle eğitilen bir evrişimli sinir ağının balık türü tanımada başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Su altı görüntülerinde bulanıklık, değişken ışık, örtüşme (occlusion) ve tür içi çeşitlilik gibi etkenler ek zorluklar getirir (Saleh vd., 2022).

7.4. Çalışan örnek: sınıflandırıcı aşamasının gösterimi

Aşağıdaki örnek, bir CNN'in son aşamasındaki sınıflandırma mantığını, gerçek görüntü gerektirmeden göstermektedir. Üç tür (sardalya, hamsi, istavrit) için, görüntüden çıkarılabilecek türden dört öznitelik (boy, en–boy oranı, gümüşilik indeksi, yüzgeç belirginliği) **simüle** edilir ve sığ bir yapay sinir ağı (tek gizli katman, `nnet`) ile sınıflandırılmaktadır. Gerçek bir CNN'de bu öznitelikler piksellerden öğrenilmektedir; burada doğrudan verilmiştir.

```
suppressPackageStartupMessages(library(nnet))

set.seed(7)


# Üç tür için görüntüden çıkarılabilecek türden SİMÜLE
öznitelikler

gen <- function(n, boy, oran, gumus, yuzgec)

  data.frame(boy    = rnorm(n, boy,    1.5),

             oran   = rnorm(n, oran,   0.4),

             gumus  = rnorm(n, gumus,  0.12),

             yuzgec = rnorm(n, yuzgec, 0.15))

d <- rbind(

  cbind(tur = "Sardalya", gen(200, 15, 5.0, 0.80, 0.30)),

  cbind(tur = "Hamsi",    gen(200, 12, 6.2, 0.75, 0.20)),

  cbind(tur = "İstavrit", gen(200, 20, 4.0, 0.55, 0.60)))

d$tur <- factor(d$tur)


set.seed(7); i <- sample(nrow(d), 0.7 * nrow(d))

tr <- d[i, ]; te <- d[-i, ]

mu <- sapply(tr[,-1], mean); sdv <- sapply(tr[,-1], sd)
# standardizasyon

sc <- function(x) sweep(sweep(x, 2, mu), 2, sdv, "/")


# Sığ yapay sinir ağı: 1 gizli katman, 8 nöron, softmax çıktı

net  <- nnet(sc(tr[,-1]), class.ind(tr$tur), size = 8, softmax =
TRUE,

             maxit = 300, trace = FALSE)

pred <- factor(levels(d$tur)[max.col(predict(net, sc(te[,-1])))],
levels = levels(d$tur))


cm <- table(Gercek = te$tur, Tahmin = pred); cm

sum(diag(cm)) / sum(cm)   # test doğruluğu
```

Çıktı :

```
          Tahmin
Gercek     Hamsi İstavrit Sardalya
  Hamsi       60        0        3
  İstavrit     0       68        1
  Sardalya     3        1       44

Test doğruluğu: %95,6
```

Ağ, üç türü büyük ölçüde doğru ayırmaktadır (test doğruluğu ≈ %95,6); yanlışlıklar çoğunlukla biçim bakımından benzer türler (hamsi–sardalya) arasında yoğunlaşmaktadır. Bu, gerçek görüntü sınıflandırmasında da gözlenen bir örüntüdür: birbirine benzeyen türler daha sık karıştırılmaktadır.

7.5. Gerçek görüntülerle: bir CNN mimari şablonu

Gerçek görüntülerle çalışıldığında, öznitelikler elle verilmez; ağ bunları piksellerden öğrenmektedir. Aşağıda, `torch` paketiyle küçük bir evrişimli sinir ağının mimari şablonu verilmiştir. Bu blok, etiketli görüntü verisi ve `torch` kurulumu gerektirdiğinden burada çalıştırılmamıştır; yalnızca gerçek bir CNN'in yapısını göstermek içindir (fonksiyon adları gerçektir).

```
# Çalıştırmak için: install.packages("torch");
torch::install_torch()

# ve etiketli görüntü verisi gerekir. Aşağıdaki yalnızca MİMARİ
şablondur.

library(torch)



cnn <- nn_module(

  initialize = function(n_sinif) {

    self$conv1 <- nn_conv2d(3, 16, kernel_size = 3, padding = 1)
# 3 renk kanalı

    self$conv2 <- nn_conv2d(16, 32, kernel_size = 3, padding = 1)

    self$pool  <- nn_max_pool2d(2)

    self$fc1   <- nn_linear(32 * 16 * 16, 128)

    self$fc2   <- nn_linear(128, n_sinif)
# tür sayısı kadar çıktı

  },

  forward = function(x) {
```

```
    x <- self$pool(nnf_relu(self$conv1(x)))
    x <- self$pool(nnf_relu(self$conv2(x)))
    x <- torch_flatten(x, start_dim = 2)
    x <- nnf_relu(self$fc1(x))
    self$fc2(x)
  }
)
# model <- cnn(n_sinif = 5); eğitim döngüsü, optimizer
(optim_adam) ve
# etiketli görüntü kümesi ile tamamlanır.
```

7.6. Uygulama potansiyeli

Bu yöntemlerin balıkçılıktaki potansiyeli, tür tanımanın ötesine geçmektedir. Derin sinir ağları, düşük maliyetli donanımlarla stok tahminini destekleyebilmekte (Mots'oehli vd., 2024), av komozisyonunun gerçek zamanlı belirlenmesine ve otomatik birey sayımına olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin güvenilirliği eğitim verisinin niteliğine ve kapsamına doğrudan bağlıdır; sınırlı ya da yanlı veriyle eğitilmiş bir ağın çıktıları da yanlı olacaktır. Bu nedenle bilgisayarlı görü sistemleri, özellikle yönetim kararlarına girdi sağlayacaksa, insan denetimiyle birlikte ve başarımları düzenli olarak sınanarak kullanılmalıdır.

8. Yeni Sınır: Büyük Dil Modelleri ve Ajan Tabanlı Yapay Zekâ

8.1. Büyük dil modelleri ve üretken yapay zekâ

Büyük dil modelleri (large language models, LLM), doğal dil ve kod üzerinde eğitilmiş, metin üretebilen ve dönüştürebilen yapay zekâ sistemleridir. Balıkçılık araştırmalarında bu modeller; istatistiksel çözümleme kodu üretmek, yapılandırılmamış raporlardan ve makalelerden veri çıkarmak ve modelleme iş akışlarının teknik eşiğini düşürmek gibi görevlerde kullanılmaya başlanmıştır. Wang ve diğerleri (2026), büyük dil modellerinin balıkçılık yönetimi araştırmalarındaki olası kullanımlarını ve bunlara eşlik eden riskleri kanıta dayalı biçimde değerlendirmiştir. Su ürünleri alanında üretken yapay zekânın (generative AI) uygulamalarını tarayan derlemeler de hızla artmakta (Akram, Ud Din, Saoud ve Hussain, 2025); su ürünlerine özgü büyük dil modelleri de geliştirilmektedir (Narisetty vd., 2025).

Bu araçların çekiciliği, modelleme sürecini yalnızca uzmanların değil, uzman olmayan kullanıcıların da yürütebilmesinin önünü açabilmesidir. Nitekim Spillias ve diğerleri (2026), kullanıcı dostu yapay zekâ araçlarının ekosistem

modellemesini "demokratikleştirebileceğini", yani hem uzmanların hem de uzman olmayanların model kurabilmesini sağlayabileceğini tartışmaktadır.

8.2. Ajan tabanlı yapay zekâ ve modelleme otomasyonu

Büyük dil modellerinin ötesinde, ajan tabanlı yapay zekâ sistemleri, bir hedefi birden çok adıma bölerek kod yazma, çalıştırma ve sonuçlara göre kendini düzeltme gibi işlemleri ardışık olarak yürütebilir. Spillias (2026), üretken yapay zekâyı modelleme döngüsünün sekiz aşamasına (kapsam belirleme, veri, kavramsal çerçeve, geliştirme, çalıştırma, doğrulama, raporlama ve paydaş etkileşimi) yerleştiren bir çerçeve önermektedir.

Bu yaklaşımın balıkçılık modellemesindeki somut bir sınaması Brown ve diğerleri (2026) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bir yapay zekâ ajanına üç yaygın modelleme görevi verilmiştir: von Bertalanffy büyüme eğrisinin verilere dayanarak hesaplanması, bolluk–habitat ilişkisi için genelleştirilmiş doğrusal model kurulması ve stoğa katılan birey başına düşen ürün çözümlemesi. Çalışmanın bulgusu dikkatle okunmalıdır: ajan, görevleri bazı denemelerde başarıyla tamamlamış; ancak doğruluk denemeler arasında geniş ölçüde değişkenlik göstermiştir. Test edilen büyük dil modelleri arasında Claude Sonnet 4.5 en yüksek doğruluğu göstermiş ve en basit modelleme görevinde her seferinde doğru yanıt üretmiş; buna karşın karmaşık görevlerde daha az tutarlı kalmıştır. Yazarların vardığı sonuç açıktır: bu tür sistemler, yönetim kararlarında kullanılmadan önce insan denetimi gerektirmektedir. Yani ajan tabanlı yapay zekâ, balıkçılık modellemesinde otomatik ve güvenilir bir çözüm değil, umut verici ama denetim gerektiren bir yardımcı olarak değerlendirilmelidir.

8.3. Güvenilirlik, halüsinasyon ve şeffaflık

Büyük dil modellerinin ve ajan tabanlı sistemlerin en kritik sınırlılıkları güvenilirlik ekseninde toplanmaktadır. Bu modeller, sözdizimsel olarak doğru fakat mantıksal olarak hatalı sonuçlar üretebilir; olmayan bir kaynağı ya da bulguyu gerçekmiş gibi sunabilir; ve aynı soruya her seferinde tutarlı yanıt vermeyebilir. Bu son özellik, yani belirlenimsizlik (non-determinism), bilimsel yeniden-üretilebilirlik açısından ciddi bir sorundur. Fernandes-Salvador ve diğerleri (2026), deniz araştırmaları, balıkçılık ve çevre yönetimi için güvenilir (trustworthy) yapay zekânın gereklerini (şeffaflık, doğrulanabilirlik ve yanlış bilgi üretmeme) ele almaktadır.

Bu sınırlılıklar, üretken yapay zekânın yararsız olduğu anlamına gelmez; dikkatli ve denetimli kullanıldığında değerli olabildiği anlamına gelmektedir. Spillias ve diğerleri (2025), topluluk temelli balıkçılık yönetimi literatüründen nitel veri çıkarımında üretken yapay zekâ araçlarını (GPT-4 Turbo ve Elicit) insan uzmanlarla karşılaştırmış; araçların ilgili bilginin varlığını/yokluğunu ayırt etmede güvenilir olmadığını, ancak en az bir aracın yanıtlarının insan çıkarımlarıyla karşılaştırılabilir düzeyde kalabildiğini raporlamıştır. Bu, aracın

yerine değil, uzmanın gözetiminde ve çıktısı doğrulanarak kullanılması gerektiğini örnekler.

8.4. Bir uygulama örneği: ChatGPT ile yapay resif planlaması

Balıkçılık yönetiminde büyük dil modellerinin somut bir uygulaması, Düzbastılar ve Ceyhan (2026) tarafından incelenmiştir. Bu çalışma, insan-denetimli bir yapay zekâ kullanımının hem potansiyelini hem de sınırlarını iyi örnekler; bulguları, Brown ve diğerlerinin (2026) sonucuyla da örtüşür: yapay zekâ, analizin özünü bilen bir uzmanın denetiminde güçlü bir hızlandırıcıdır, denetimsiz bırakıldığında ise güvenilmezdir.

Düzbastılar ve Ceyhan (2026), büyük dil modellerinin bir balıkçılık yönetimi aracı olan yapay resif projelerinin planlanmasında kullanılıp kullanılamayacağını incelemiştir. Çalışmada ChatGPT'ye yapay resiflerle ilgili 50 soru sorulmuş ve yanıtlar beş uzman tarafından Likert ölçeğiyle değerlendirilmiştir. Bulgular, bu bölümün ana temasıyla örtüşür: yanıtların uygunluğu ve geçerliliği **komutlar (prompt) arasında belirgin biçimde değişmiş**, bilginin doğruluğu ve güvenilirliği önemli farklılıklar göstermiştir. Uzman değerlendirmelerinin yedi puanlık ölçekteki ortalamaları orta-olumlu düzeyde (yaklaşık 4,5–4,7) kalmıştır. Yazarların sonucu nettir: ChatGPT yapay resif planlamasında kavramsal bir yardımcı olabilir; ancak mevcut sınırlılıklarının (uydurma ya da güncelliğini yitirmiş bilgi) riskini azaltmak için **dikkatle kullanılmalıdır**. Bu da, üretken yapay zekânın balıkçılıkta değer taşıdığını, ancak yalnızca uzman denetimi ve doğrulamayla birlikte kullanılması gerektiğini bir kez daha örnekler.

8.5. İlkeler: sorumlu kullanım

Bu bölümde ele alınan çalışmalar, üretken ve ajan tabanlı yapay zekânın balıkçılık biliminde sorumlu kullanımı için birkaç ortak ilkeye işaret etmektedir. Doğrulanabilirlik: yapay zekânın ürettiği her kod, sayı ve iddia bağımsız olarak sınanmalıdır. İnsan denetimi: yönetim kararlarına girdi sağlayacak hiçbir çıktı, uzman onayı olmadan kullanılmamalıdır. Şeffaflık: hangi aracın, hangi komutla ve hangi veriyle kullanıldığı raporlanmalıdır. Dürüstlük: kaynaklar ve bulgular olduğu gibi temsil edilmeli, yapay zekânın yeteneği ne abartılmalı ne de küçümsenmelidir. Bu ilkeler, yapay zekânın balıkçılık araştırmalarında sorumlu ve güvenilir biçimde kullanılmasının temelini oluşturmaktadır.

9. Sınırlılıklar, Etik ve Güvenilirlik

9.1. Veri kalitesi ve yanlılık

Makine öğrenmesi ve yapay zekâ modelleri, kendilerine sunulan veriden öğrenmektedir; dolayısıyla verinin niteliği, modelin niteliğinin üst sınırını belirlemektedir. Eksik, hatalı ya da yanlı (biased) bir veri kümesiyle eğitilen bir model, bu kusurları öğrenir ve çıktısına yansıtmaktadır. Balıkçılık verileri özellikle bu açıdan hassastır: kayıtlar çoğu zaman belirli filolara, sezonlara ya da

alanlara yoğunlaşmaktadır; balıkçılık bağımlı veriler avlanma davranışının kendisinden etkilenmektedir; ve nadir türler ya da olaylar yetersiz temsil edilmektedir. Bu tür yanlılıklar fark edilmeden modele girdiğinde, sonuçlar bilimsel olarak yanıltıcı olabilir. Bu nedenle, herhangi bir modelleme çalışmasında ilk adım, verinin kapsamının ve sınırlılıklarının açıkça anlaşılması olmalıdır.

9.2. Kara kutu sorunu ve açıklanabilirlik

Klasik istatistiksel modellerin (GLM, GAM) bir üstünlüğü, katsayılarının doğrudan yorumlanabilmesidir. Buna karşılık rastgele orman, gradyan artırma ve derin sinir ağları gibi karmaşık makine öğrenmesi yöntemleri, çoğu zaman kara kutu (black box) olarak nitelenir: yüksek doğruluk sağlayabilir, ancak bir tahmine nasıl ulaştıklarını doğrudan göstermezler. Bu, yönetim kararlarına girdi sağlayacak modellerde ciddi bir sınırlılıktır; çünkü bir sonucun neden ortaya çıktığı anlaşılmadan ona güvenmek risklidir.

Bu soruna karşı, modelden bağımsız açıklama (model-agnostic explainability) araçları geliştirilmiştir. R ortamında `iml` ve `DALEX` gibi paketler, bir kara kutu modelin hangi değişkenlere dayandığını ortaya koyabilir. Aşağıdaki örnek, `DALEX` ile bir rastgele orman modelinin değişken önemini hesaplamaktadır; veri kümesine bilerek eklenen, çıktıyla ilişkisiz bir gürültü değişkeni de dahil edilmiştir.

```
suppressPackageStartupMessages({ library(ranger); library(DALEX)
})

set.seed(9)

n <- 400

sst      <- runif(n, 14, 27)

klorofil <- rgamma(n, 2, 3)

derinlik <- runif(n, 10, 120)

gurultu_degisken <- runif(n, 0, 1)                  # çıktıyla
İLİŞKİSİZ

cpue <- 20 + 8*sin((sst-14)/13*pi) + 5*log(klorofil+0.3) -
0.05*derinlik + rnorm(n, 0, 3)

d <- data.frame(cpue, sst, klorofil, derinlik, gurultu_degisken)



rf <- ranger(cpue ~ sst + klorofil + derinlik + gurultu_degisken,

             data = d, num.trees = 500, seed = 9)
```

```
# Modelden bağımsız açıklayıcı: kara kutuyu dışarıdan sorgular

exp <- DALEX::explain(rf, data = d[,-1], y = d$cpue,

                      predict_function = function(m, x)
predict(m, x)$predictions,

                      label = "RF", verbose = FALSE)

DALEX::model_parts(exp)   # permütasyon temelli değişken önemi
```

Değişken önemi çıktısı (yüksek `dropout_loss` = daha önemli):

```
         variable   dropout_loss

         klorofil        4,04

              sst        4,02

         derinlik        3,26

 gurultu_degisken        2,05
```

Sonuç, açıklanabilirlik araçlarının değerini gösterir: model, klorofil ve sıcaklığa güçlü biçimde dayanmakta; ilişkisiz gürültü değişkeni ise en düşük öneme sahip çıkmaktadır. Yani kara kutu, uygun araçlarla sorgulandığında, dayandığı bilgi kaynağını ele vermektedir. Bu tür bir denetim, modelin mantıklı gerekçelerle mi yoksa rastlantısal örüntülerle mi çalıştığını anlamak için gereklidir.

9.3. Güvenilir yapay zekâ

Açıklanabilirlik, daha geniş bir güvenilir yapay zekâ (trustworthy AI) çerçevesinin parçasıdır. Fernandes-Salvador ve diğerleri (2026), deniz araştırmaları, balıkçılık ve çevre yönetimi bağlamında güvenilir yapay zekânın gereklerini (şeffaflık, doğrulanabilirlik, yeniden-üretilebilirlik ve yanlış bilgi üretmeme) ele almaktadır. Bu gerekler, özellikle üretken ve ajan tabanlı yapay zekâ sistemlerinin, sözdizimsel olarak doğru ama gerçekte hatalı ya da uydurma bilgi üretebildiği düşünüldüğünde daha da önem kazanmaktadır.

Yapay zekâ araçlarının modelleme sürecini demokratikleştirmesi, yani uzman olmayanların da bu araçları kullanabilmesi, hem bir fırsat hem de bir risktir (Spillias vd., 2026). Fırsat, modelleme kapasitesinin yaygınlaşmasıdır; risk ise, yöntemin varsayımlarını ve sınırlılıklarını bilmeyen bir kullanıcının, görünüşte makul ama aslında hatalı sonuçlar üretmesidir. Bu nedenle araçların erişilebilir olması, uzmanlığın gereksizleştiği anlamına gelmez; tersine, sonuçları değerlendirecek uzmanlığı daha da önemli kılmaktadır.

9.4. İnsan denetimi, doğrulama ve etik

Bu kısımın tümünde yinelenen ilke, burada da geçerlidir: yönetim kararlarına girdi sağlayacak hiçbir yapay zekâ çıktısı, uzman denetimi ve bağımsız

doğrulama olmadan kullanılmamalıdır. Uygulama kısımlarında görüldüğü gibi, iyi kurulmuş klasik modeller çoğu zaman makine öğrenmesiyle benzer başarım göstermektedir; bu durumda yöntem seçimi yalnızca doğruluğa değil, yorumlanabilirliğe, şeffaflığa ve amaca göre yapılmalıdır.

Etik boyut, veri sahipliği ve mahremiyeti de kapsamaktadır. Balıkçılık verileri çoğu zaman bireysel balıkçıların ya da işletmelerin ticari bilgilerini içerdiğinden, bu verilerin paylaşımı ve kullanımı dikkatle yürütülmelidir; eğitim ve gösterim amaçlı çalışmalarda, gerçek verinin yerine benzetim verisi kullanmak, hem bilimsel şeffaflığı hem de veri sahipliğini gözeten bir yaklaşımdır. Benzer biçimde, yapay zekânın hangi aşamada, hangi komutla ve hangi veriyle kullanıldığının raporlanması, çalışmanın yeniden-üretilebilirliği ve dürüstlüğü açısından zorunludur.

10. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Bu bölüm, balıkçılıkta yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamalarını kavramsal temellerinden başlayarak R yazılımı ortamındaki somut örnekleriyle ele almıştır. Ele alınan yöntemler, ağaç tabanlı tekniklerden (rastgele orman, artırmalı regresyon ağaçları) derin öğrenmeye, oradan büyük dil modelleri ve ajan tabanlı yapay zekâya kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Makine öğrenmesinin genomik ölçekten ekosistem ölçeğine uzanan bu geniş uygulama alanı, alanın hızla olgunlaştığını göstermektedir (Kühn vd., 2025).

Bölüm boyunca yinelenen ve belki de en önemli çıkarım şudur: makine öğrenmesi, klasik istatistiksel modellerin otomatik olarak yerini alan bir üstünlük değildir. Bölümdeki örneklerde tekrar tekrar görüldüğü gibi, iyi kurulmuş bir genelleştirilmiş doğrusal ya da toplamsal model (GLM/GAM), esnek makine öğrenmesi yöntemleriyle çoğu zaman benzer öngörü başarısı göstermektedir. Böyle durumlarda yöntem seçimi yalnızca öngörü hatasına değil; yorumlanabilirliğe, varsayımların şeffaflığına, belirsizliğin ifade edilebilmesine ve çalışmanın amacına göre yapılmalıdır. Makine öğrenmesinin gerçek üstünlüğü, değişkenler arası karmaşık etkileşimlerin baskın olduğu, işlevsel biçimin bilinmediği ya da verinin (görüntü verisi gibi) yüksek boyutlu olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla klasik istatistik ile makine öğrenmesi, rakip değil, tamamlayıcı araçlar olarak görülmelidir.

Bu bölümde işlenen örnekler, yöntemlerin doğrudan uygulanabildiği başlıca alanları örneklemektedir. CPUE standardizasyonunda, çevresel sürücülerin etkisi ayıklanarak daha güvenilir sonuçlar üretilebilir. Bu, stok değerlendirmesinin temelini güçlendirmektedir. Hedef dışı av ve ıskarta yönetiminde, mekânsal-zamansal modeller sorunun yoğunlaştığı koşulları önceden belirleyerek daha seçici avlanma stratejilerine katkı sağlayabilmektedir. İstilacı türlerle mücadelede, hangi av aracı veya yem yapılandırmasının daha verimli olduğunu belirleyen modeller doğrudan uygulanabilir yönetim çıkarımları sunmaktadır. Bilgisayarlı görü ise tür tanıma ve otomatik sayımı yaygınlaştırarak tüm bu

uygulamaları besleyecek veri toplama kapasitesini artırmaktadır. Bu bölümdeki örneklerin Ege Denizi ve Türkiye balıkçılığından seçilmiş olması, yöntemlerin yerel bağlamdaki uygulanabilirliğini göstermek içindir; ancak aynı yaklaşımlar farklı bölge ve balıkçılıklara doğrudan taşınabilir niteliktedir.

Bu potansiyelin hayata geçirilmesi için birkaç öncelik öne çıkar ve bunlar bağlamdan bağımsız olarak geçerlidir. Birincisi veri altyapısıdır: standart, iyi belgelenmiş ve etiketli veri kümeleri olmadan hiçbir yöntem güvenilir sonuç veremez. İkincisi kapasite geliştirmedir: yöntemlerin varsayımlarını ve sınırlılıklarını bilen araştırmacıların yetiştirilmesi, araçların erişilebilirliğinden daha kritiktir. Üçüncüsü yeniden-üretilebilirliktir: kullanılan veri, kod veya yapay zekâ araçları söz konusu ise komutlar açıkça raporlanmalıdır. Dördüncüsü ise insan denetimidir. Yönetim kararlarına girdi sağlayacak her çıktı, uzman değerlendirmesinden ve bağımsız doğrulamadan geçmelidir.

Büyük dil modelleri ve ajan tabanlı yapay zekâ, modelleme sürecinin teknik eşiğini düşürerek balıkçılık biliminde yeni bir dönemi başlatmaktadır. Bu araçlar; kod üretiminden veri çıkarımına ve iş akışı otomasyonuna kadar pek çok görevi hızlandırma kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, bu bölümde ele alınan çalışmalar bu araçların sınırlarını da açıkça ortaya koymuştur: çıktılar tutarsız olabilir, uydurma bilgi üretebilir ve her zaman doğrulanmaya ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla öngörülebilir gelecek, yapay zekânın uzmanın yerini aldığı değil, uzmanı güçlendirdiği bir gelecektir. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi; doğru veriyle beslenip uzman denetiminde ve dürüstlük ilkesiyle kullanıldığında, sürdürülebilir balıkçılık yönetimine ve deniz kaynaklarının korunmasına değerli katkılar sunacaktır.

Kaynaklar

Aksu, Ö., & Altınterim, B. (2024). Balıkçılıkta yapay zeka uygulamaları. A. Aksoy & H. Akgül (Ed.), *Biyoloji Alanında Uluslararası Araştırma ve Değerlendirmeler* içinde (14. Bölüm). Ankara: Serüven Yayınevi.

Akram, W., Ud Din, M., Saoud, L. S., & Hussain, I. (2025). *A review of generative AI in aquaculture: Foundations, applications, and future directions for smart and sustainable farming.* arXiv:2507.11974.

Allen Akselrud, C. I. (2024). Random forest regression models in ecology: Accounting for messy biological data and producing predictions with uncertainty. *Fisheries Research, 280*, 107161. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2024.107161

Allken, V., Handegard, N. O., Rosen, S., Schreyeck, T., Mahiout, T., & Malde, K. (2019). Fish species identification using a convolutional neural network trained on synthetic data. *ICES Journal of Marine Science, 76*(1), 342–349. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy147

Balkı, C., Ceyhan, T., Tosunoğlu, Z., & Ulaş, A. (2025). Environmental drivers of fishing success: A multiyear analysis of purse seine CPUE in the Aegean Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 25*(11), TRJFAS26959. https://doi.org/10.4194/TRJFAS26959

Brown, C. J., Aitken, L. R., Takyi, R., & Tisseaux-Navarro, A. (2026). Automating ecological and fisheries modelling with agentic AI. *Fish and Fisheries, 27*, 726–739. https://doi.org/10.1111/faf.70079

Ceyhan, T. (2025). CPUE standardizasyonu: Kuramsal temeller, uygulama yöntemleri ve balıkçılıkta kullanım pratikleri. N. Yarpuz Bozdoğan & A. M. Bozdoğan (Ed.), *Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Teori, Metodoloji ve Uygulama* içinde (ss. 87–108). Ankara: Platanus Publishing.

Ceyhan T, Balkı C, Ulaş A, Akyol O, Lopez-Mengual I. Pot Type and Bait Selection Shape Catch Rates of the Invasive Blue Crab (Callinectes sapidus): Evidence from a Model-Based Comparative Analysis. Marine & Freshwater Research 2026; MF26068. https://doi.org/10.1071/MF26068

Düzbastılar, F. O., & Ceyhan, T. (2026). An analysis of a ChatGPT use case: Can a large language model (LLM) be used to plan artificial reefs as a fisheries management tool? *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 26*(4), TRJFAS27583. https://doi.org/10.4194/TRJFAS27583

Fernandes-Salvador, J. A., Borja, A., Anabitarte, A., Granado, I., Lekunberri, X., Sagarminaga, Y., . . . Lilkendey, J. (2026). Towards trustworthy artificial intelligence for marine research, fisheries and environmental management. *Fish and Fisheries, 27*, 248–263. https://doi.org/10.1111/faf.70052

Hoyle, S. D., Campbell, R. A., Ducharme-Barth, N. D., Grüss, A., Moore, B. R., Thorson, J. T., . . . Maunder, M. N. (2024). Catch per unit effort modelling for stock assessment: A summary of good practices. *Fisheries Research, 269*, 106860.

Kühn, B., Cayetano, A., Fincham, J. I., Moustahfid, H., Sokolova, M., Trifonova, N., . . . Uusitalo, L. (2025). Machine learning applications for fisheries — At scales from genomics to ecosystems. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 33*(2). https://doi.org/10.1080/23308249.2024.2423189

Luan, J., Zhang, C., Xu, B., Xue, Y., & Ren, Y. (2020). The predictive performances of random forest models with limited sample size and different species traits. *Fisheries Research, 227*, 105534. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105534

Malik, H., Naeem, A., Hassan, S., Ali, F., Naqvi, R. A., & Yon, D. K. (2023). Multi-classification deep neural networks for identification of fish species using camera captured images. *PLoS One, 18*(4), e0284992. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284992

Mots'oehli, M., Nikolaev, A., IGede, W. B., Lynham, J., Mous, P. J., & Sadowski, P. (2024). *FishNet: Deep neural networks for low-cost fish stock estimation.* arXiv:2403.10916.

Narisetty, P., Kattamanchi, U. K. R., Nimma, L. A., Karnati, S. R. K., Kore, S. N. B., Golamari, M., & Nageshreddy, T. (2025). *AQUA: A large language model for aquaculture & fisheries.* arXiv:2507.20520.

Saleh, A., Sheaves, M., & Rahimi Azghadi, M. (2022). *Computer vision and deep learning for fish classification in underwater habitats: A survey.* arXiv:2203.06951.

Soykan, C. U., Eguchi, T., Kohin, S., & Dewar, H. (2014). Prediction of fishing effort distributions using boosted regression trees. *Ecological Applications, 24*(1), 71–83. https://doi.org/10.1890/12-0826.1

Soykan, O., & Ceyhan, T. (2024). Spatio-temporal dynamics in the discards of trawl fisheries in the eastern Mediterranean. *Scientia Marina, 88*(3), e086. https://doi.org/10.3989/scimar.05431.086

Spillias, S. (2026). A prospectus on generative artificial intelligence in marine ecosystem modelling. *Fish and Fisheries, 27*, 130–144. https://doi.org/10.1111/faf.70037

Spillias, S., Ollerhead, K. M., Andreotta, M., Annand-Jones, R., Boschetti, F., Duggan, J., . . . Trebilco, R. (2025). Evaluating generative AI for qualitative data extraction in community-based fisheries management literature. *Environmental Evidence, 14*, 9. https://doi.org/10.1186/s13750-025-00362-9

Spillias, S., Trebilco, R., Adams, M. P., Boschetti, F., Constable, A., Dunstan, P., . . . Fulton, E. A. (2026). The future of artificial intelligence in ecosystem modeling. *BioScience, 76*(1), 57–70. https://doi.org/10.1093/biosci/biaf169

Stock, B. C., Ward, E. J., Eguchi, T., Jannot, J. E., Thorson, J. T., Feist, B. E., & Semmens, B. X. (2020). Comparing predictions of fisheries bycatch using multiple spatiotemporal species distribution model frameworks. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 77*(1), 146–163. https://doi.org/10.1139/cjfas-2018-0281

Wang, K., Wang, T., Wang, B., Li, Q., Liu, Y., Han, Q., . . . Ren, Y. (2026). Large language models (LLMs) for fisheries management research: Understanding potential and navigating risks. *Reviews in Fish Biology and Fisheries, 36*, 56. https://doi.org/10.1007/s11160-026-10058-z

BÖLÜM 3

Yapay Resiflerde Malzeme Teknolojileri: Tasarım, Performans ve Ekolojik Etkiler

F. Ozan Düzbastılar [1]

[1] Prof. Dr., Ege Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Avlama ve İşleme Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0002-5376-7198

1. Giriş

Yapay resifler (Artificial Reefs) ve yüzen yapay resifler (Floating Artificial Reefs) denizel biyokütlenin artırılması, habitat restorasyonunun desteklenmesi ve balıkçılık kaynaklarının geliştirilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bentik yapay resifler; habitat restorasyonu, balıkçılığın desteklenmesi, kıyı koruma, biyolojik çeşitliliğin artırılması ve ekosistem yönetimi gibi amaçlarla deniz tabanına bilinçli olarak yerleştirilen yapay yapılardır (Baine, 2001; Seaman, 2007). Yüzen yapay resifler ise özellikle pelajik türlerin belirli alanlarda toplanmasını ve avcılığını desteklemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu iki yaklaşımın birleştirilmesiyle geliştirilen hibrit sistemler ise balık agregasyonunu artırırken aynı zamanda deniz canlıları için daha kalıcı yaşam alanları oluşturabilmektedir (Zhang, Zhao, Zhou, Zhao ve Wan, 2024).

Aşırı avcılık, kıyısal yapılaşma, dip habitatlarının tahribi ve iklim değişikliği gibi antropojenik baskılar doğal resif ekosistemlerinde önemli bozulmalara neden olmuş ve yapay resif uygulamalarına olan ilgiyi artırmıştır (Duarte ve ark., 2020; Firth ve ark., 2020). Yapay resifler bu nedenle yalnızca balık topluluklarını destekleyen yapılar olarak değil, biyolojik çeşitliliğin korunması, habitat restorasyonu ve ekosistem temelli yönetim açısından da önemli araçlar olarak değerlendirilmektedir (Bortone ve ark., 2011). Kullanım amaçları arasında deniz çiftlikleri (marine ranching), biyolojik çeşitliliğin artırılması, çevresel zararların azaltılması, rekreasyonel dalış, ekoturizm, sportif ve ticari balıkçılığın desteklenmesi, yasa dışı trol faaliyetlerinin sınırlandırılması ve bilimsel araştırmalar yer almaktadır (Stolk, Markwell ve Jenkins, 2007; Seaman, 2007).

Yapay resifler kullanılan malzeme ve yapı özelliklerine göre Simülasyon Resifleri (Simulation Reefs), Replikasyon Resifleri (Replication Reefs) ve Dönüşüm Resifleri (Transformation Reefs) şeklinde sınıflandırılabilmektedir. Simülasyon Resifleri doğal taş ve kaya yapılarından; Replikasyon Resifleri beton modüller, borular, çelik piramitler ve benzeri mühendislik ürünü elemanlardan; Dönüşüm Resifleri ise gemi batıkları, uçaklar, köprü ayakları ve iskeleler gibi mevcut yapıların dönüştürülmesinden oluşmaktadır (Stolk, Markwell ve Jenkins, 2007). Yapay resiflerde kullanılan malzeme seçimi, yapının başarısını belirleyen temel unsurlardan biridir. Malzemenin işlevsellik, çevresel uyumluluk, dayanıklılık ve yapısal kararlılık özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Lukens ve Selberg, 2004). Dünya genelinde beton, çelik, betonarme, öngermeli beton, cam lifi takviyeli kompozitler, polimerler ve doğal kaya gibi farklı malzemelerin yanı sıra kullanım dışı gemiler, araçlar ve lastikler de yapay resif uygulamalarında kullanılmıştır (Düzbastılar ve Lök, 2004; Düzbastılar, 2026; Lök, Düzbastılar ve Ulaş, 2000; Lokesha, Sundar ve Sannasiraj, 2013).

Bununla birlikte, yapay resiflerin ekolojik başarısı yalnızca kullanılan malzeme miktarı veya türü ile açıklanamamaktadır. Boşluk oranı, yapısal

karmaşıklık, yüzey özellikleri ve malzeme dayanıklılığı habitat oluşumu ve tür çeşitliliğini doğrudan etkileyebilmektedir (Bohnsack ve Sutherland, 1985; Baine, 2001; Al-Horani ve Khalaf, 2013). Malzemenin yüzey pürüzlülüğü, gözenekliliği, kimyasal bileşimi ve yüzey enerjisi ise biyofilm oluşumu, mikrobiyal kolonizasyon, larval yerleşim ve bentik organizma gelişimi açısından önem taşımaktadır (Firth ve ark., 2016; Burt ve ark., 2009; Salta ve ark., 2013).

Malzeme bilimi, üretim teknolojileri ve ekolojik mühendislik alanlarındaki gelişmeler, yapay resif tasarımında yeni malzeme ve üretim yaklaşımlarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Ekolojik betonlar, geopolimerler, biyoseramikler, geri dönüştürülmüş malzemeler ve kompozit yapılar sürdürülebilirlik, biyolojik uyumluluk ve yapısal performans açısından yeni olanaklar sunarken, katmanlı üretim (3B baskı) teknolojileri doğal resiflerin karmaşık morfolojilerinin ve türlere özgü habitatların daha hassas biçimde oluşturulmasına olanak sağlamaktadır (Yoris-Nobile ve ark., 2023; Loke ve ark., 2022; Graham ve Nash, 2013). Bu gelişmelerle birlikte yapay resif malzemelerinin çevresel güvenliği de temel bir değerlendirme konusu haline gelmiştir. Uygun olmayan malzemeler ağır metal salınımı, toksisite ve mikroplastik oluşumu gibi riskler oluşturabilmektedir (Baine, 2001; Firth ve ark., 2016). Bu nedenle çağdaş yapay resif tasarımında malzeme seçimi; mühendislik performansı, biyolojik uygunluk, çevresel güvenlik ve sürdürülebilirlik ölçütlerinin birlikte değerlendirildiği disiplinlerarası bir yaklaşım çerçevesinde ele alınmaktadır (Duarte ve ark., 2020).

2. Yapay Resif Tasarımında Malzeme Seçim Kriterleri

Yapay resiflerde malzeme seçimi, biyouyumluluk, yapısal dayanıklılık, çevresel güvenlik, sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği gibi ölçütlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Başarılı bir yapay resif malzemesinin biyolojik kolonizasyona uygun, uzun ömürlü, ekonomik ve deniz ortamına kirletici salınım yapmayan özelliklere sahip olması beklenmektedir (Ozanam, Romans ve Lami, 2025). Bu nedenle modern yapay resif tasarımında yalnızca mekanik özellikler değil, biyolojik kolonizasyon, larval yerleşim, trofik etkileşimler ve habitat karmaşıklığı gibi ekolojik süreçler de dikkate alınmalıdır (Miller, 2002; Reis ve ark., 2021; O'Leary, Hubbard ve O'Leary, 2001).

2.1. Yapısal performans ve durabilite

Yapay resif malzemelerinin temel mühendislik gereklilikleri yapısal kararlılık, yapısal bütünlük ve dayanıklılıktır. Yapısal kararlılık, yapının dalga, akıntı ve kendi ağırlığından kaynaklanan kuvvetler altında devrilme, kayma veya yer değiştirmeye karşı direnç göstermesini; yapısal bütünlük ise kullanım süresi boyunca çatlama, kırılma ve parçalanma gibi hasarlara karşı fonksiyonunu korumasını ifade etmektedir. Durabilite ise malzemenin deniz suyu, korozyon, biyolojik aşınma ve diğer çevresel etkiler altında özelliklerini uzun süre muhafaza edebilme kapasitesidir. Bu özelliklerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir; çünkü yüksek başlangıç dayanımına sahip ancak deniz ortamında hızla bozunan

bir malzeme uzun dönemli yapay resif uygulamaları için uygun olmayabilir. Nitekim yapay resif tasarımında malzemenin yapısal kararlılığı ve bütünlüğü, çevresel koşullara karşı dayanıklılığı ile birlikte değerlendirilmesi gereken temel kriterlerdir (Reis ve ark., 2021; O'Leary, Hubbard ve O'Leary, 2001).

2.2. Çevresel güvenlik ve biyouyumluluk

Malzemenin çevresel açıdan güvenli olması, yapısal dayanım kadar önemlidir. Yapay resiflerde kullanılacak malzemelerin kimyasal olarak inert olması, toksik maddeler salmaması ve deniz ortamında uzun süre kararlı kalması gerekmektedir (O'Leary, Hubbard ve O'Leary, 2001). Geçmişte düşük maliyet ve kolay bulunabilirlik nedeniyle kullanılan hurda lastikler bu açıdan önemli bir örnektir. Lastiklerin deniz ortamında çinko (Zn), bakır (Cu), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd) ve bazı organik bileşikleri salabilme potansiyeli, malzeme seçiminde yalnızca mekanik özelliklerin yeterli olmadığını göstermiştir (Collins, Jensen, Mallinson, Roenelle ve Smith, 2002).

Bu nedenle malzeme seçiminde toksisite, kirletici salınımı ve yaşam döngüsü boyunca çevresel davranış da dikkate alınmalıdır. Özellikle geri dönüştürülmüş veya endüstriyel kökenli malzemelerde kimyasal stabilite ve olası kirletici salınımlarının ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu konu, yenilikçi ve sürdürülebilir malzemeler ile çevresel risklerin değerlendirildiği ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.3. Biyolojik performans

Malzeme seçiminin bir diğer temel boyutu biyolojik performanstır. Yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik, mikrotopografya, kimyasal bileşim ve yüzey enerjisi, biyofilm oluşumu, larval yerleşim, bentik organizma gelişimi ve tür çeşitliliğini etkileyebilmektedir (Reis ve ark., 2021; Firth ve ark., 2016; Burt ve ark., 2009; Salta ve ark., 2013). Gözeneklilik ve yüzey özellikleri özellikle ilk kolonizasyon aşamasında önemlidir. O'Reilly ve Willerth (2024) biyofilm oluşumu ile gözeneklilik arasında pozitif bir ilişki bulunduğunu, yüzey pH'ının ise daha sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle malzemenin yalnızca dayanıklı olması değil, organizmaların tutunmasını ve gelişimini destekleyen uygun yüzey özelliklerine sahip olması da gerekmektedir.

Malzemenin kimyasal ve fiziksel özellikleri birlikte değerlendirildiğinde biyolojik performans açısından önemli farklılıklar ortaya çıkabilmektedir. Örneğin, seramiklerin mikro-gözenekli ve biyouyumlu yüzeyleri bakteriler, diatomlar ve diğer bentik organizmalar için uygun kolonizasyon alanları sağlayabilmektedir (Kalam, Mieno ve Casareto, 2018; Li ve ark., 2026). Bununla birlikte, malzeme türünün etkisi her zaman tek başına belirleyici değildir; yüzey özellikleri ve yapısal tasarım da ekolojik performansı önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Brown, 2005).

2.4. Malzeme seçimi ve tasarımın birlikte değerlendirilmesi

Yapay resiflerde malzeme seçimi, yapısal tasarımdan bağımsız olarak ele alınmamalıdır. Boşluk oranı, yüzey alanı, yapısal karmaşıklık ve habitat çeşitliliği malzemenin ekolojik işlevini belirleyen önemli tasarım parametreleridir (Miller, 2002). Bu nedenle aynı malzeme farklı geometrilerde kullanıldığında farklı biyolojik ve hidrodinamik sonuçlar oluşturabilmektedir. Yapay resif tasarım sürecinin malzeme seçimiyle birlikte laboratuvar testleri, bilgisayar destekli modelleme, yapısal analiz ve saha uygulamalarını içermesi önerilmektedir (Nagalakshmi, Rameshwaran, Nithyambigai ve Stella Mary, 2021). Böylece malzemenin mekanik özellikleri, çevresel güvenliği ve biyolojik performansı tasarım aşamasında birlikte değerlendirilebilir.

Tarihsel olarak yapay resiflerde kullanım dışı araçlar, lastikler, gemiler ve çeşitli endüstriyel atıklar gibi düşük maliyetli fırsat malzemeleri yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak çevresel riskler, yapısal güvenlik ve uzun dönem performansa ilişkin sorunların ortaya çıkmasıyla birlikte amaca özel tasarlanmış mühendislik yapıları daha fazla önem kazanmıştır (Ramm, Florisson, Watts, Becker ve Tweedley, 2021). Bu dönüşüm, yapay resif malzemelerinin yalnızca bulunabilirlik ve maliyet açısından değil, çevresel güvenlik, dayanıklılık, stabilite ve hedef organizmalara uygunluk açısından değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur (McGurrin, Stone ve Sousa, 1989).

Sonuç olarak, yapay resiflerde ideal malzeme; yeterli mekanik dayanım ve uzun hizmet ömrünün yanı sıra düşük çevresel risk, yüksek biyouyumluluk ve uygun yüzey özellikleri sağlamalıdır. Bununla birlikte, malzemenin ekolojik performansı tek başına değerlendirilmemeli; malzeme, yapı geometrisi, hidrodinamik koşullar ve hedeflenen ekosistem işleviyle birlikte ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, geleneksel malzemelerin yanı sıra ekolojik betonlar, geopolimerler, geri dönüştürülmüş malzemeler, biyoseramikler ve kompozitler gibi yeni nesil malzemelerin geliştirilmesinin temelini oluşturmaktadır.

3. Yapay Resiflerde Geleneksel Malzemeler

Yapay resiflerde kullanılan geleneksel malzemeler; beton, çelik yapılar, batıklar, doğal kaya ve taşlar ile çeşitli polimer esaslı sistemleri kapsamaktadır. Bu malzemelerin tercih edilmesinde temel ölçütler yapısal dayanıklılık, deniz ortamındaki stabilite, çevresel güvenlik, biyolojik kolonizasyon ve hedeflenen habitatın oluşturulabilmesidir (Baine, 2001; Seaman, 2007). Malzemenin ekolojik performansı yalnızca kimyasal bileşimine değil, aynı zamanda yüzey özelliklerine, gözenekliliğine, yapısal karmaşıklığına ve resifin deniz tabanındaki konumuna da bağlıdır (Perkol-Finkel ve Sella, 2015).

3.1. Beton

Beton; yüksek mekanik dayanımı, deniz ortamındaki yapısal kararlılığı, farklı geometrilerde üretilebilmesi ve doğal kayaya benzer özellikleri nedeniyle yapay

resiflerde en yaygın kullanılan malzemelerden biridir (Qin, Chen ve Jia, 2011). Özellikle dalga ve akıntı yüklerinin yüksek olduğu ortamlarda uzun süreli stabilite sağlaması önemli bir avantajdır (Pickering, Whitmarsh ve Jensen, 1999; Seaman, 2007). Betonun gözenekli ve pürüzlü yüzeyleri zamanla biyofilm oluşumunu destekleyerek bentik organizmaların yerleşimini kolaylaştırabilmektedir (Burt ve ark., 2009).

Betonun yapısal performansı, çimento türü, agrega özellikleri, gözeneklilik ve tasarım biçimine bağlı olarak değişmektedir. Betonarme sistemlerin yüksek hidrodinamik yüklerin etkili olduğu ortamlarda mühendislik çimentolu kompozit sistemlere kıyasla daha yüksek yük taşıma ve deformasyon kapasitesi sağlayabildiği bildirilmiştir (Cruz, Valente, Miranda ve Pereira, 2025). Beton molozundan oluşturulan resiflerin de doğal kum-çakıl tabanına göre daha yüksek balık yoğunluğu ve biyokütleyi destekleyebildiği, ayrıca yüksek yapısal stabilite sağlayarak bazı türler için uygun yumurtlama habitatları oluşturduğu gösterilmiştir (Laufle ve Pauley, 1985).

Bununla birlikte, geleneksel Portland çimentosunun en önemli sınırlılıklarından biri yeni beton yüzeylerinde yüksek alkalinitedir. Taze beton yüzeylerinde pH'ın 10-11 düzeylerine ulaşabilmesi erken dönem biyolojik kolonizasyonu sınırlandırabilir; ancak yüzey pH'ı zamanla deniz suyuna yaklaşmakta ve biyofilm gelişimi kolaylaşmaktadır (O'Reilly ve Willerth, 2024; Firth ve ark., 2016). Düşük alkaliliğe sahip bağlayıcılarla üretilen betonlarda ise bu geçiş daha uygun koşullar sağlayabilmektedir (Tahsin ve ark., 2025).

Çimento sisteminin değiştirilmesi, betonun hem mühendislik hem de ekolojik performansını geliştirebilmektedir. Sülfoalüminat çimentosu yüksek erken dayanım, düşük pH, düşük klor geçirgenliği, yoğun mikroyapı ve biyolojik sülfürik aside karşı yüksek direnç sağlaması nedeniyle Portland çimentosuna alternatif olarak değerlendirilmektedir (Li ve ark., 2026). Sülfoalüminat çimentosu, deniz kumu ve deniz suyu kullanılarak geliştirilen yapay resif betonlarında daha düşük başlangıç pH'ı, daha kompakt gözenek yapısı, daha yüksek mekanik dayanım ve daha hızlı biyolojik kolonizasyon elde edilmiştir (Chen, Ji, Zhuang ve Lin, 2015). Benzer şekilde, sülfoalüminat çimentolu resif betonlarının düşük klorür geçirgenliği ve yüksek klorür bağlama kapasitesi sayesinde donatı korozyonunu azaltabildiği bildirilmiştir (Xu, Ji, Yang ve Ye, 2019).

Endüstriyel yan ürünlerin bağlayıcı veya agrega olarak kullanılması da betonun sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Çelik cürufu ve yüksek fırın cürufu içeren sistemlerin 50-90 MPa düzeyinde basınç dayanımı, düşük alkalilik ve yüksek dayanıklılık sağlayabildiği; daha düşük yüzey pH'ının alg ve diğer deniz organizmalarının yerleşimini kolaylaştırdığı belirtilmektedir (Li ve ark., 2026). Granüle yüksek fırın cürufu, çelik cürufu ve baca gazı kükürt giderim alçısından oluşan yeşil yapay resif betonunda ise katı hammaddelerin yaklaşık %98'i

endüstriyel atıklardan sağlanmış ve 28 günlük kür sonunda 71,4 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır (Huang, Wang, Liu, Hu ve Ni, 2016). Bu tür sistemlerin düşük yüzey pH'ı, istenmeyen bazı organizmaların aşırı kolonizasyonunu azaltırken alg gelişimini destekleyebilmektedir.

Betonun ekolojik performansı farklı substratlarla yapılan karşılaştırmalarda da ortaya çıkmaktadır. Beton esaslı resiflerin metal kafeslere göre daha yüksek mercan yerleşimi sağladığı ve farklı mercan cinslerinin kolonizasyonuna olanak verdiği bildirilmiştir (Knoester ve ark., 2023). Uzun süreli uygulamalarda da beton blokların yapısal bütünlüğünü koruyarak yoğun mercan kolonizasyonunu destekleyebildiği gösterilmiştir (Edwards ve ark., 2001). Beton yüzeylerinde mikrobiyal çeşitlilik ve biyolojik örtünün ahşaba göre daha yüksek olabildiği, betonun erken kolonizasyon döneminde PVC, emprenyeli ahşap, kauçuk ve çeliğe kıyasla yüksek tür çeşitliliği sağlayabildiği bildirilmiştir (Guo, Wang, Cong, Jiang ve Liang, 2021; Brown, 2005). Yüzeyde biyofilm ve fouling organizmalarının gelişmesiyle birlikte bentik toplulukların karmaşıklığı da zaman içinde artmaktadır (Bailey-Brock, 1989).

Betonun yaygın kullanımına rağmen, çimento üretiminin küresel karbon emisyonlarındaki payı sürdürülebilirlik açısından önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır (Ozanam, Romans ve Lami, 2025). Roma çimentosu ve alkali aktive malzemelerin Portland çimentosuna göre küresel ısınma potansiyelini yaklaşık %50–52 oranında azaltabildiği bildirilmiş, ancak özellikle alkali aktive sistemlerde kuruma büzülmesine bağlı çatlak oluşumunun uzun dönem mekanik performans açısından dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir (Tahsin ve ark., 2025). Bu nedenle beton teknolojisindeki güncel yaklaşım, yalnızca yüksek dayanım sağlayan değil, aynı zamanda düşük alkalilik, düşük karbon ayak izi ve yüksek biyolojik uygunluk sunan bağlayıcıların geliştirilmesine yönelmektedir (Cruz, Valente, Miranda ve Pereira, 2025).

3.2. Çelik yapılar, batıklar ve petrol platformları

Çelik; özellikle büyük ölçekli yapay resiflerde batık gemiler, petrol platformları, piramitler ve diğer yüksek profilli yapılar biçiminde kullanılmaktadır. Bu yapıların geniş hacimleri ve karmaşık geometrileri kısa sürede yoğun balık topluluklarını çekebilmektedir (Pickering ve Whitmarsh, 1997; Stolk, Markwell ve Jenkins, 2007). Kullanım ömrünü tamamlamış gemilerin resif olarak değerlendirilmesi aynı zamanda geri dönüşüm, dalış turizmi ve rekreasyonel balıkçılık açısından ekonomik fayda sağlamaktadır (Stolk, Markwell ve Jenkins, 2007). Büyük gemi yapılarının yüksek dalga enerjisine sahip bölgelerde modüler resiflere göre daha yüksek stabilite sağlayabildiği de bildirilmiştir (Kim, Kim, Shim ve Oh, 2021).

Çelik resiflerin ekolojik performansı beton sistemlerden farklı özellik gösterebilmektedir. Beton modüller doğal kayalık resiflere benzer balık toplulukları oluşturabilirken, metal gemi resiflerinde daha yüksek balık bolluğu

ve biyokütle ile farklı tür kompozisyonları görülebilmektedir (Lemoine, Paxton, Anisfeld, Rosemond ve Peterson, 2019). Petrol platformları ve benzeri yüksek profilli çelik yapılar da yüksek balık biyokütlesi oluşturabilmektedir; ancak bu biyokütlenin önemli bir bölümünün yeni biyolojik üretimden ziyade balıkların yapıya çekilmesinden kaynaklanabileceği belirtilmiştir (Smith, Lowry, Champion ve Suthers, 2016). Platformların özellikle dikey bölümlerinin korunması, doğal platformlara daha benzer balık topluluklarının oluşmasına katkı sağlayabilmektedir (Ajemian, Wetz, Shipley-Lozano, Shively ve Stunz, 2015).

Çeliğin temel dezavantajı korozyondur. Korozyon uzun dönemde yapısal bütünlüğü azaltabileceği gibi çevreye metal iyonlarının salınmasına da neden olabilir (Baine, 2001; Firth ve ark., 2016). Bu nedenle gemi, platform veya diğer çelik yapıların resif olarak kullanılmasından önce kapsamlı temizlik, kaplama, stabilite ve çevresel risk değerlendirmelerinin yapılması gerekmektedir.

3.3. Doğal kaya ve taş yapılar

Doğal kaya ve taşlar kimyasal olarak inert olmaları ve doğal sert substratlara benzer özellik göstermeleri nedeniyle çevresel uyumluluğu yüksek malzemelerdir (Seaman, 2007). Bununla birlikte, yapay resiflerde ekolojik başarı yalnızca malzeme türüne bağlı değildir. Geri dönüştürülmüş beton ile doğal kaya arasında balık toplulukları bakımından önemli fark bulunmadığı; buna karşılık sert substratın miktarının ve taban kaplama oranının balık yoğunluğu, biyokütle ve tür çeşitliliğinde daha belirleyici olduğu gösterilmiştir (Reed, Schroeter, Huang, Anderson ve Ambrose, 2006).

Farklı kaya türleri de farklı kolonizasyon sonuçları oluşturabilmektedir. Gabro, granit, kumtaşı ve betonun karşılaştırıldığı bir çalışmada gabro yüzeyleri en yüksek mercan yerleşimini sağlamış ve kaba taneli yüzey yapısının uygun mikrohabitatlar oluşturduğu belirtilmiştir (Burt, Bartholomew, Bauman, Saif ve Sale, 2009). Kireçtaşı agregalarıyla kaplı beton yapılarda yüksek bentik tür sayısı ve organizma yoğunluğu gözlenirken, doğal kaya resiflerinde daha yüksek mercan yoğunluğu belirlenmiştir (Thanner, McIntosh ve Blair, 2006). Doğal kayaların fitoplankton çeşitliliğini desteklediği ve doğal resiflere yakın yüzey özellikleri sunduğu da bildirilmiştir (Wan ve ark., 2024).

Büyük ölçekli karşılaştırmalar ise malzeme türünden çok fiziksel tasarımın önemini ortaya koymaktadır. Granit ve geri dönüştürülmüş betonun kullanıldığı geniş ölçekli bir yapay resifte malzeme türünün bentik organizma bolluğu ve tür zenginliği üzerinde belirgin bir etkisi bulunmazken, sert yüzey miktarı, yüzey eğimi ve resifin konumu kolonizasyon süreçlerinde daha belirleyici olmuştur (Schroeter, Reed ve Raimondi, 2015). Bu nedenle doğal taş kullanımında da malzeme seçimi ile birlikte yüzey alanı, eğim, boşluk ve mekânsal düzenleme gibi tasarım parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir.

Doğal taşların yüksek dayanıklılık, düşük çevresel risk ve doğal habitatlara benzerlik gibi önemli avantajlarına karşılık, karmaşık geometrilerin oluşturulmasındaki sınırlılıklar ve yüksek taşıma-yerleştirme maliyetleri dezavantaj oluşturmaktadır (Baine, 2001; Bortone ve ark., 2011). Bununla birlikte, granit tozu ve taş yıkama çamuru gibi taş ocağı yan ürünlerinin yapay resif bloklarında kullanılması, hem atıkların değerlendirilmesini hem de düşük maliyetli malzeme üretimini mümkün kılabilmektedir; bu tür bloklarda yeterli mekanik dayanım ve düşük ağır metal sızıntısı elde edilmiştir (Wilding ve Sayer, 2002).

3.4. Polimerler ve hibrit yapılar

Polimer esaslı malzemeler yapay resiflerde tek başına veya beton ve diğer malzemelerle birlikte kullanılabilmektedir. Polimer liflerin beton içerisine eklenmesi çekme ve eğilme dayanımını artırırken çatlak oluşumunu azaltabilmekte ve enerji yutma kapasitesini geliştirebilmektedir (Pham ve Huang, 2024). Beton, PVC, plastik ağ ve sentetik liflerin birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerde ise malzeme çeşitliliğinin oluşturduğu yapısal heterojenliğin omurgasız çeşitliliğini ve habitat oluşumunu artırabildiği gösterilmiştir (Zimmerman ve Martin, 2004).

PVC esaslı modüler sistemler düşük ağırlık, kolay taşınabilirlik ve düşük maliyet gibi avantajlar sunmaktadır (Omar ve ark., 1994). Ancak PVC resiflerinde beton ve seramik sistemlere göre daha düşük balık tür zenginliği, bolluğu ve biyokütle değerleri gözlenmiş ve bu durum perifiton ile makro omurgasız kolonizasyonunun daha sınırlı olmasıyla ilişkilendirilmiştir (Santos, García-Berthou, Agostinho ve Latini, 2011). Ayrıca bazı polimerlerin uzun dönem çevresel etkileri belirsizliğini korumakta; PVC, geri dönüştürülmüş lastik ve çeşitli plastiklerin metal iyonları, organik bileşikler veya mikroplastikler açısından risk oluşturabileceği bildirilmektedir (Kim, 2001; Ozanam, Romans ve Lami, 2025). Bu nedenle polimer esaslı sistemlerde mekanik avantajların yanı sıra uzun dönem çevresel güvenlik de değerlendirilmelidir.

3.5. Uygun olmayan malzemeler ve tarihsel deneyimler

Yapay resif uygulamalarının ilk dönemlerinde otomobil gövdeleri, hurda metaller, lastikler ve çeşitli endüstriyel atıklar düşük maliyet ve kolay erişilebilirlik nedeniyle yaygın biçimde kullanılmıştır (Stolk, Markwell ve Jenkins, 2007; Baine, 2001). Ancak zamanla bu malzemelerin yapısal kararlılık, bozunma ve çevresel güvenlik açısından önemli sorunlar oluşturabildiği ortaya çıkmıştır. Özellikle atık lastiklerden oluşturulan resiflerde akıntıya bağlı yer değiştirme, sedimente gömülme ve parçalanma sorunları gözlenmiştir (Firth ve ark., 2016; Pickering, Whitmarsh ve Jensen, 1999; Laufle ve Pauley, 1985). Bazı atık malzemelerin bozunmasıyla ağır metallerin ve organik kirleticilerin çevreye salınabilmesi ve biyobirikim potansiyeli oluşturabilmesi, malzeme seçiminde uzun dönemli çevresel güvenliğin dikkate alınması gerektiğini göstermiştir

(Collins, Jensen, Mallinson, Roenelle ve Smith, 2002). Bu nedenle yapay resif malzemelerinin değerlendirilmesinde yalnızca başlangıçtaki mekanik özellikleri ve organizma kolonizasyonu değil, yaşam döngüsü boyunca gerçekleşen bozunma davranışı da dikkate alınmalıdır (Suzdaleva ve Beznosov, 2021).

Tarihsel deneyimler sonucunda atık ve fırsat malzemelerinden, kontrollü biçimde üretilen mühendislik malzemelerine doğru bir geçiş gerçekleşmiştir. Fransa'daki uygulamalarda 1980'lerden sonra atık malzeme kullanımının büyük ölçüde terk edildiği ve beton esaslı modüllerin yaygınlaştığı ve bu değişimde yapısal stabilite, hizmet ömrü ve ekolojik işlevlerin daha kontrollü tasarlanabilmesinin etkili olduğu bildirilmiştir (Tessier ve ark., 2015). Yapay resif malzemeleri genel olarak fırsat malzemeleri ve özel olarak üretilmiş malzemeler şeklinde sınıflandırılmış; başarılı seçim için çevresel güvenlik, dayanıklılık, stabilite ve hedef organizmalara uygunluğun birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır (McGurrin, Stone ve Sousa, 1989). Bu yaklaşım doğrultusunda günümüzde uzun ömürlü, çevresel açıdan güvenli ve mühendislik esaslarına göre tasarlanmış beton ve çelik modüller daha yaygın olarak tercih edilmektedir (Bombace, 1989; Ramm, Florisson, Watts, Becker ve Tweedley, 2021).

4. Yenilikçi ve Sürdürülebilir Malzeme Teknolojileri

Yapay resif teknolojilerinde son yıllardaki gelişmeler; malzeme bilimi, üretim teknolojileri ve ekolojik mühendisliğin birlikte ilerlemesiyle şekillenmektedir. Geleneksel beton ve çelik yüksek dayanım ve uzun hizmet ömrü sağlasa da yüksek karbon ayak izi, alkalilik, biyolojik uyumluluk ve çevresel riskler açısından bazı sınırlılıklar taşımaktadır. Bu nedenle ekolojik betonlar, geopolimerler, geri dönüştürülmüş malzemeler, biyoseramikler, kompozitler, 3B baskı ve geosentetik sistemler öne çıkmaktadır (Loke ve ark., 2022; Yoris-Nobile ve ark., 2023).

4.1. Katmanlı üretim (3B baskı) teknolojileri

Katmanlı üretim teknolojileri, doğal resiflerin karmaşık geometrilerinin kontrollü biçimde üretilmesine, türlere özgü habitatların tasarlanmasına ve yüzey özelliklerinin hassas olarak ayarlanmasına olanak sağlamaktadır (Yoris-Nobile ve ark., 2023). Seramik esaslı yapılarda parametrik tasarım ve doğrudan tool-path kontrolü kullanılarak farklı boyutlarda boşluklar, yarıklar ve yüzey dokuları oluşturulabilmekte ve böylece çeşitli deniz organizmaları için mikrohabitatlar geliştirilebilmektedir (Berman ve ark., 2023). Literatürde incelenen 3B baskılı yapay resif uygulamalarında çimento esaslı harçlar (%62) ve seramik esaslı malzemeler (%31) en yaygın malzeme gruplarını oluştururken, geopolimerler, deniz kabuğu agregaları, geri dönüştürülmüş cam, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi sürdürülebilir bileşenlerin kullanımı da artmaktadır (Valenzuela Matus, Alves, Góis, Vaz-Pires ve Rocha, 2024). Bu yaklaşım, yalnızca karmaşık

geometrilerin değil, doğal resif morfolojilerini taklit eden biyomimetik yapıların da üretilmesini mümkün kılmaktadır.

3B baskı, geleneksel kalıp üretimine kıyasla üretim süresi ve maliyet açısından da avantaj sağlayabilmektedir. Yeniden kullanılabilir ABS esaslı kalıplarla yapılan bir çalışmada yaklaşık %98 maliyet ve %27 üretim süresi tasarrufu sağlanmış ve karmaşık biyomimetik resif geometrilerinin ekonomik olarak üretilebildiği gösterilmiştir (Cruz, Valente, Miranda ve Pereira, 2025). Farklı beton karışımlarının deniz ortamında test edildiği çalışmalarda ise CEM III esaslı karışımların orta vadede geopolimer sistemlere göre hem mekanik dayanım hem de biyolojik kolonizasyon bakımından daha başarılı olduğu belirlenmiştir (Ly ve ark., 2021).

3B baskının en önemli ekolojik avantajı, boşluk oranı, mikrohabitat yapısı, yüzey dokusu ve iç geometrinin hassas biçimde kontrol edilebilmesidir (Loke ve ark., 2022). Biyomimetik 3B baskılı modellerin geleneksel kalıpla üretilen yapılardan daha yüksek geometrik ve bilgi temelli karmaşıklık sağlayabildiği, özellikle yüzey yönelim çeşitliliği ve mikrohabitat heterojenliği açısından avantaj sunduğu bildirilmiştir (Riera, Mauroy, Francour ve Hubas, 2024). Atık makine kumu ile alkali aktive bağlayıcıların kullanıldığı 3B baskılı ekolojik betonlarda %30'a kadar atık ikamesine rağmen 30 MPa'ın üzerinde basınç dayanımı ve yüksek biyouyumluluk elde edilebilmiştir (Kuang ve ark., 2025).

Biyouyumlu 3B baskılı resiflerin geleneksel beton yapılara göre doğal resiflere daha fazla benzerlik gösterebildiği ve yüksek yüzey karmaşıklığının kolonizasyonu desteklediği bildirilmiştir (Riera ve ark., 2023; Korniejenko ve ark., 2025). Düşük karbonlu betonlar ve lif takviyeli karışımların 3B baskı ile birlikte kullanılması da dayanıklılık ve ekolojik performansı artırırken malzeme israfını azaltabilmektedir (Pham ve Huang, 2024). Ayrıca karbon mineralizasyonuyla üretilen selüloz-kalsiyum karbonat kompozitleri, 31 MPa'ya kadar basınç dayanımı sağlayarak hem karbon yakalama hem de yapay mercan taşı üretimi açısından potansiyel göstermiştir (Reyes ve ark., 2023).

4.2. Ekolojik betonlar ve geopolimer malzemeler

Ekolojik betonlar, geleneksel betonların yüksek alkalinite ve karbon emisyonu gibi sınırlılıklarını azaltmak amacıyla uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, kırılmış cam, deniz kabuğu ve diğer endüstriyel yan ürünlerin kullanıldığı sistemlerdir (Carral, Camba Fabal, Lamas Galdo, Rodríguez-Guerreiro ve Cartelle Barros, 2020; Loke ve ark., 2022). Bu malzemeler hem doğal kaynak tüketimini azaltmakta hem de uygun karışım tasarımıyla mekanik ve ekolojik performansı geliştirebilmektedir.

Silis dumanı, betonun geçirgenliğini azaltarak klorür girişini, donatı korozyonu riskini ve deniz suyunun olumsuz etkilerini azaltırken dayanımı ve servis ömrünü artırmaktadır (Li ve ark., 2026). Özellikle %10 silis dumanı içeren

sistemlerde yüksek performans elde edildiği ve deniz ortamında dayanıklılığın arttığı bildirilmiştir (Nagalakshmi, Rameshwaran, Nithyambigai ve Stella Mary, 2021). Uçucu kül, pirinç kabuğu külü, deniz kabuğu, granit tozu ve lifler gibi farklı katkıların da betonun dayanıklılığını ve sürdürülebilirliğini artırabildiği gösterilmiştir (Anand, Sendhilnathan, Arun Kumar ve Tamilarasan, 2025).

Uçucu kül içeren betonların ekolojik performansı özellikle dikkat çekicidir. %25–75 oranında uçucu kül içeren beton blokların mercan yerleşimi açısından geleneksel beton kadar başarılı olabildiği bildirilmiş ve bu malzemelerin biyolojik kolonizasyon ve çevresel güvenlik açısından uygunluğu gösterilmiştir (Lam, 2003). Cüruf, kırmızı çamur ve uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünlerin yapay resiflerde değerlendirilmesi de sürdürülebilir malzeme kullanımını desteklemektedir (Kim, 2001; Reis ve ark., 2021). Stabilize edilmiş endüstriyel atıkların uzun dönem çevresel güvenliği de araştırılmıştır. Uçucu kül, baca gazı desülfürizasyon jipsi ve çamur içeren 50 tonluk bloklarda iki yıldan uzun denizel maruziyet sonrasında Cd, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni ve Zn gibi ağır metallerin anlamlı düzeyde sızmadığı ve blokların yapısal stabilitesini koruduğu belirlenmiştir (Collins, Jensen, Lockwood ve Turnpenny, 1994).

Deniz kabukları ve doğal lifler de ekolojik betonlarda kullanılabilmektedir. İstiridye kabuğu ve geri dönüştürülmüş agrega içeren gözenekli betonlarda alkaliliğin azaldığı ve biyolojik kolonizasyonun yaklaşık %70 arttığı; ancak yüksek kabuk oranlarının mekanik dayanımı azaltabildiği bildirilmiştir (Lyu, Li, Guo ve Zhou, 2026; Kong ve ark., 2022; Li ve ark., 2026). Benzer şekilde biyokömür içeren geopolimer harçlarda uygun oranların dayanımı, çevresel performansı ve deniz ortamına uyumluluğu geliştirebildiği, yüksek oranların ise dayanımı düşürdüğü belirlenmiştir (Thapsamut ve ark., 2025).

Ekolojik betonlarda temel tasarım yaklaşımı, biyolojik performans ile mekanik dayanım arasında denge kurmaktır. Diatomit katkılı betonlarda biyofilm oluşumu artarken dayanım azalabilmekte, ultra yüksek performanslı betonlarda ise yüksek dayanımın karşılığında daha düşük biyofilm oluşumu görülebilmektedir (O'Reilly ve Willerth, 2024). Geopolimerler biyolojik kolonizasyon açısından avantaj sağlayabilirken, düşük klinkerli çimento esaslı sistemler mekanik dayanım, maliyet ve çevresel performans bakımından daha başarılı olabilmektedir (Yoris-Nobile ve ark., 2023). Mikro silika ile modifiye edilmiş betonların pH'ı deniz suyuna yaklaştırılabilir ve yüzeylerine doğal taşlar eklenerek larval yerleşimini destekleyen mikrohabitatlar oluşturulabilir (Al-Horani ve Khalaf, 2013).

Düşük çimento içerikli betonlarda 200-325 kgm^{-3} aralığında yeterli mekanik performans korunabilirken, 240 kgm^{-3} çimento içeren karışım uygun bir seçenek olarak belirlenmiştir (Galdo ve ark., 2022). Yüzey pürüzlülüğünün ve gözenekliliğin artırılması ise biyofilm oluşumu ve bentik organizma yerleşimini desteklemektedir (Salta ve ark., 2013; Firth ve ark., 2016; Reis ve ark., 2021). Bu

nedenle ekolojik beton tasarımında yalnızca bağlayıcı bileşimi değil, yüzey ve gözenek yapısı da birlikte optimize edilmelidir (Thanner, McIntosh ve Blair, 2006; Anand, Sendhilnathan, Arun Kumar ve Tamilarasan, 2025).

4.3. Geri dönüştürülmüş, düşük karbonlu ve kompozitler

Geri dönüştürülmüş malzemelerin yapay resiflerde kullanımı, doğal kaynak tüketiminin ve atık miktarının azaltılması açısından önemli bir sürdürülebilirlik yaklaşımıdır. Kullanım dışı gemiler, petrol platformları, taş ocağı atıkları ve endüstriyel yan ürünler uygun mühendislik tasarımıyla yeniden değerlendirilebilmektedir (Pickering ve Whitmarsh, 1997; Jensen, 2002). Özellikle stabilize edilmiş uçucu kül bloklarının düşük ağır metal salınımı ve yoğun biyolojik kolonizasyon sağlayabildiği bildirilmiştir (Lam, 2003).

İstiridye, midye ve deniztarağı gibi kabuk atıkları hem agrega veya bağlayıcı ikamesi hem de yüzey kaplama malzemesi olarak kullanılabilmektedir. İstiridye kabukları yüzey pürüzlülüğünü artırarak larval tutunmayı desteklerken, yüksek fırın cürufu dayanımı artırmakta ve daha düşük pH'lı yüzeylerin oluşmasına katkı sağlamaktadır (Galdo ve ark., 2022; Ozanam, Romans ve Lami, 2025; Rupasinghe, San Nicolas, Lanham ve Morris, 2024). Midye kabuklarının çimentonun %10'una ve kumun %20'sine kadar ikame edilebildiği ve okaliptüs liflerinin çelik donatıya alternatif olabileceği gösterilmiştir (Carral, Camba Fabal, Lamas Galdo, Rodríguez-Guerreiro ve Cartelle Barros, 2020). Deniztarağı kabuklarının yüzey kaplaması olarak kullanılması da biyolojik kolonizasyonu yaklaşık %20'ye kadar artırabilmektedir (Apriani ve ark., 2022).

Biyolojik kökenli organik atıkların kullanımı ise farklı bir avantaj sağlamaktadır. Muz ve yer fıstığı kabukları gibi organik katkılar azot, fosfor ve organik karbon salınımını artırarak mikroorganizmalar için besin sağlayabilmekte, ancak katkı oranının artması mekanik dayanımı azaltabilmektedir (Mat Jusoh ve ark., 2018; Li ve ark., 2026; Mohamad, Samad, Goh, Monica ve Hasbullah, 2016). Bu nedenle organik katkıların kullanımında ekolojik üretkenlik ile yapısal performans arasında optimum oran belirlenmelidir.

Gözenekli ve karbonatlanmış cüruf bloklarının geleneksel beton bloklara göre daha hızlı alg kolonizasyonu ve daha yüksek biyokütle sağlayabildiği; atık istiridye kabuğunun ise alkaliliği azaltarak biyofilm ve bentik organizma tutunmasını artırabildiği gösterilmiştir (Oyamada ve ark., 2008; Kong, Ni, Guo, Chen ve Quan, 2022). Geri dönüştürülmüş tuğla agregasının silis dumanı, uçucu kül ve sülfoalüminat çimentosuyla birlikte kullanılması da yüksek dayanım ve düşük klor geçirgenliği sağlayabilmektedir (Li ve ark., 2026).

Kompozit malzemeler, hafiflik, dayanım ve korozyon direnci açısından avantaj sağlamakla birlikte, uzun dönem çevresel etkileri ve mikroplastik oluşumu açısından da değerlendirilmelidir (Yoris-Nobile ve ark., 2023). Geri dönüştürülmüş cam agregalı harçlar çevresel uygunluk açısından başarılı

sonuçlar verirken (Santos ve ark., 2023), PROARR projesinde denizcilik, gemi inşa ve balıkçılık sektörlerinden elde edilen inert atıkların beton agregası olarak kullanılmasıyla yaklaşık 30 MPa dayanım sağlayan modüller geliştirilmiştir (Carral Couce, Rodríguez Guerreiro, Fraguela Formoso, Alvarez-Feal ve Filgueira Vizoso, 2019).

Karbon yakalama özelliğine sahip Mineralized Cellulose Material (MCM) gibi yeni kompozitler ise yapay resif üretimini karbon depolama işleviyle birleştirmektedir. Bu malzemede maksimum CO_2 tutma kapasitesi 6,5 g CO_2/g selüloz olarak belirlenmiş ve mineralizasyon aşamasında küresel ısınma potansiyelinin %31'e kadar azaltılabildiği bildirilmiştir (Reyes ve ark., 2023). Geri dönüştürülmüş lastik parçacıkları içeren gözenekli kompozitlerde ise geçirgenlik artarken dayanım azalmış, oluşan gözenek ve mikroçatlakların biyolojik kolonizasyon için uygun bir yapı sağlayabildiği belirlenmiştir (Qiao ve ark., 2025).

4.4. Biyoseramikler, seramikler ve biyoaktif malzemeler

Seramik ve biyoseramikler; kimyasal inertlik, nötr pH, yüksek biyouyumluluk ve kontrollü gözeneklilik özellikleri nedeniyle özellikle mercan restorasyonu açısından önemli alternatiflerdir (Kalam, Mieno ve Casareto, 2018; Baine, 2001; Salta ve ark., 2013). Seramik yüzeylerin doğal mercan substratlarına benzer mikro yapılar oluşturabilmesi ve pürüzlü yüzeylerinin larval tutunmayı desteklemesi önemli avantajlar sağlamaktadır (Berman ve ark., 2023; Ozanam, Romans ve Lami, 2025).

Seramik yapay resiflerin bazı karşılaştırmalı çalışmalarda en yüksek balık tür zenginliği, bolluğu ve biyokütleyi sağladığı ve hızlı kolonizasyon gösterdiği bildirilmiştir (Santos, García-Berthou, Agostinho ve Latini, 2011). Terra cotta gibi gözenekli seramikler biyofilm gelişimini desteklerken, 3B baskı ile doğal resif morfolojilerine sahip seramik yapılar üretilebilmektedir (O'Reilly ve Willerth, 2024). 3B baskılı seramiklerin mercanlar, süngerler ve diğer bentik organizmalar tarafından başarılı biçimde kolonize edildiği de gösterilmiştir (Berman ve ark., 2023).

Biyoaktif kaplamalar ve biyomimetik yüzeyler, yüzeyi yalnızca pasif bir substrat olmaktan çıkararak biyolojik kolonizasyonu yönlendirmesine olanak sağlamaktadır. Kalsiyum karbonat esaslı yüzeyler mercan larvalarının tutunmasını artırabilirken, demir laktat içeren kaplamalar alg sporlarının tutunmasını ve biyofilm oluşumunu hızlandırabilmektedir (Perkol-Finkel ve Sella, 2015; Perkol-Finkel ve ark., 2018; Lee ve ark., 2008).

4.5. Elektrokimyasal biyomineral yapılar

Elektrokimyasal biyomineralizasyon, doğal resif kireçtaşını taklit eden yapıların deniz suyundan yerinde oluşturulmasına dayanmaktadır. Düşük voltajlı elektrik akımı kullanılarak çelik ağlar üzerinde kalsiyum ve magnezyum

iyonlarının çökelmesi sağlanmakta ve kalsiyum karbonat esaslı biyomineral yapılar oluşturulmaktadır (van Treeck ve Schuhmacher, 1999).

Düşük voltajlı mineral birikim (Low Voltage Mineral Deposition, LVMD) teknolojisiyle geliştirilen Biorock yapıları yüksek poroziteli yüzeyler oluşturmakta ve mercan büyüme hızını kontrol alanlarına göre üç kata kadar artırabilmektedir (Ammar, 2009; Ozanam, Romans ve Lami, 2025). Yaklaşık iki ay içerisinde 5-10 mm kalınlığında mineral tabakanın oluşabilmesi ve yabancı malzeme girişinin sınırlı olması, bu yöntemi biyomimetik ve sürdürülebilir resif üretimi açısından gelecek vadeden bir yaklaşım haline getirmektedir.

4.6. Geosentetik malzemeler

Geosentetikler; geotekstil, geotüp, geobag, geogrid ve geocontainer gibi polimer esaslı mühendislik ürünlerini kapsamaktadır ve özellikle kıyı koruma ile habitat oluşturma uygulamalarında kullanılmaktadır (Lokesha, Sundar ve Sannasiraj, 2013). Düşük ağırlık, kolay uygulama ve deniz ortamına dayanıklılık bu sistemlerin temel avantajlarıdır. Geogrid ve geogrid-bambu hasır sistemlerinin kil, silt ve kum zeminlerde lokal oyulma ve zemine gömülmeyi azaltabildiği; kilde yaklaşık %29–45, siltta %30–47 ve kumda %39–64 oranında iyileşme sağladığı bildirilmiştir (Yun ve Kim, 2018). Geotekstil tüpler ve geobag sistemleri ise kıyı koruma işlevinin yanı sıra fiziksel habitat oluşturarak yapay resif uygulamalarında tamamlayıcı bir malzeme grubu olarak değerlendirilebilir.

5. Malzemelerin Ekolojik ve Yapısal Performansı

Yapay resiflerin başarısı yalnızca kullanılan malzemenin türüne değil, malzemenin fiziksel, kimyasal ve morfolojik özelliklerine ve yapısal tasarımına bağlıdır. Yüzey özellikleri, gözeneklilik, kimyasal bileşim, yapısal karmaşıklık ve hidrodinamik koşullar; biyofilm oluşumu, larval yerleşim, bentik organizma gelişimi ve balık topluluklarının oluşumunu doğrudan etkiler (Firth ve ark., 2016; Perkol-Finkel ve Sella, 2015; Loke ve ark., 2022). Bu nedenle malzeme performansı mühendislik ve ekolojik kriterler birlikte değerlendirilerek ele alınmalıdır.

5.1. Yüzey özellikleri ve biyofilm oluşumu

Yapay resiflerde ekolojik gelişimin ilk aşaması, malzeme yüzeylerinde biyofilm oluşumudur. Biyofilm, bentik organizmalar ve makrofauna için yerleşim substratı oluşturarak sonraki kolonizasyon süreçlerini yönlendirmektedir (Salta ve ark., 2013). Farklı malzemeler üzerinde gelişen biyofilm topluluklarının bileşimi değişmekte ve bu durum daha sonraki organizma yerleşimini etkileyebilmektedir. Sajid ve ark. (2024), farklı yapay resif malzemelerinde deniz suyuna kıyasla daha yüksek bakteri zenginliği ve çeşitliliği bulunduğunu ve malzeme özelliklerinin biyofilm kompozisyonunu doğrudan etkilediğini göstermiştir.

Yüzey pürüzlülüğü, mikrotopografya, yüzey enerjisi ve kimyasal özellikler biyofilm ve epibentik kolonizasyonun temel belirleyicileridir. Ushiama, Smith, Suthers, Lowry ve Johnston (2016), çelik, kumtaşı, ahşap ve polimetil metakrilat (PMMA) yüzeylerin kolonizasyon bakımından farklılık gösterdiğini; çelikte tür zenginliği ve bolluğun daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Brown (2005) ise malzeme türünün özellikle erken kolonizasyon döneminde etkili olduğunu, zamanla topluluk farklılıklarının azaldığını göstermiştir.

Biyofilm gelişiminin substrat tipine bağlı olduğu beton ve ahşap yüzeyler arasındaki karşılaştırmalarla da ortaya konmuştur. Beton yüzeylerde mikrobiyal zenginlik ve çeşitliliğin daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Guo, Wang, Cong, Jiang ve Liang, 2021). Benzer şekilde, Yan ve ark. (2025), beton ve doğal taş yapay resiflerin bakteriyel çeşitliliği artırdığını ve özellikle beton yüzeylerde yüksek mikrobiyal zenginlik oluştuğunu bildirmiştir.

Pürüzlü ve heterojen yüzeyler organizmaların tutunmasını kolaylaştırmakta, oluşan biyofilm ise larvalar için kimyasal yerleşim sinyalleri sağlayabilmektedir (Firth ve ark., 2016). Seramik ve 3B baskılı yüzeylerde oluşturulan mikro-pürüzlülük de biyofilm ve sessil organizma yerleşimini destekleyebilmektedir (Berman ve ark., 2023). Pürüzlü, düzensiz ve korunaklı yüzeylerin mercan yerleşimini artırdığı da gösterilmiştir (Spieler, Gilliam ve Sherman, 2001). Bu nedenle günümüzde ekolojik beton, biyoseramik ve 3B baskılı yapıların yüzey özellikleri biyolojik kolonizasyonu destekleyecek şekilde kontrol edilmektedir (Perkol-Finkel ve ark., 2018).

Malzeme farklılıklarının kolonizasyon üzerindeki etkisi beton, doğal mercan, çelik ve lastik yüzeylerin karşılaştırıldığı çalışmalarda da görülmektedir. Beton ve doğal mercan yüzeylerinde daha çeşitli bentik topluluklar gelişirken, lastik yüzeylerde kolonizasyon daha düşük kalmıştır (Fitzhardinge ve Bailey-Brock, 1989). Bununla birlikte, Lee ve ark. (2008) tarafından gösterildiği üzere, demir laktat gibi kemoçekici kaplamalar alg sporlarının tutunmasını ve biyofilm oluşumunu artırarak erken biyolojik gelişimi hızlandırabilmektedir.

5.2. Yapısal karmaşıklık ve habitat oluşturma

Yapay resiflerin ekolojik performansında yapısal karmaşıklık, malzeme türü kadar önemli bir tasarım parametresidir (Al-Horani ve Khalaf, 2013; Ammar, 2009; Knoester ve ark., 2023). Üç boyutlu yapı, boşluk düzeni, yüzey pürüzlülüğü, rölyef yüksekliği ve mekânsal organizasyon balıkların dağılımını, barınmasını ve topluluk yapısını etkiler (Thanner, McIntosh ve Blair, 2006). Bu nedenle yapısal karmaşıklığın suya yerleştirilmeden önce değerlendirilmesi ve optimize edilmesi, yapay resif tasarımının önemli aşamalarından biridir (Riera, Mauroy, Francour ve Hubas, 2024).

Farklı boyutlardaki boşlukların oluşturduğu mikrohabitatlar tür çeşitliliğini artırabilmektedir. Charbonnel, Serre, Ruitton, Harmelin ve Jensen (2002), yapısal

karmaşıklığın artırılmasıyla tür zenginliğinin iki katına, balık yoğunluğunun on katına ve biokütlenin yaklaşık kırk katına çıkabildiğini bildirmiştir. Benzer şekilde, boşluk hacmi ve iç karmaşıklığı artırılmış modüllerde daha yüksek tür zenginliği, balık yoğunluğu ve biokütle gözlenmiştir (Tessier ve ark., 2015). Küçük ölçekli boşluklar ve yüksek yapısal karmaşıklık içeren tasarımların da balık sayısını, tür çeşitliliğini ve biokütleyi artırdığı gösterilmiştir (Sherman, Gilliam ve Spieler, 2002).

Gözeneklilik, organizmalar için hem yüzey alanını hem de sığınma alanlarını artırmaktadır (Loke ve ark., 2022). Boşluk hacmi, oyuklar, çatlaklar ve farklı boyutlardaki sığınaklar habitat kalitesinin temel bileşenleridir (Spieler, Gilliam ve Sherman, 2001). Hedef türün büyüklüğüne göre boşluk boyutunun optimize edilmesi de önemlidir; mürekkep balığı (*Sepia officinalis*), ahtapot (*Octopus vulgaris*) ve kalamar (*Loligo vulgaris*) için 30-40 cm, ıstakoz (*Palinurus elephas*) için <30 cm ve küçük kabuklular için <20 cm gibi farklı hedefler önerilmiştir (Galdo ve ark. (2022).

Yapısal karmaşıklığın etkisi yalnızca balık topluluklarında görülmemektedir. İç boşluklara sahip beton bloklarda bentik üretkenliğin masif bloklara göre ortalama 2,4 kat daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Rouse, Porter ve Wilding, 2020). Farklı büyüklük ve davranış özelliklerine sahip türler için çeşitli habitat nişlerinin oluşturulması ekosistem stabilitesini ve biyolojik çeşitliliği de desteklemektedir (Graham ve Nash, 2013; Bortone ve ark., 2011). Yapısal karmaşıklık aynı zamanda hidrodinamik koşulları da belirlemektedir. Yüzey pürüzlülüğü, boşluk geometrisi ve yapı şekli su akışını, besin taşınımını ve oksijen dağılımını etkiler. Düşük türbülanslı bölgeler bentik organizmalar için, daha yüksek türbülanslı bölgeler ise aktif yüzücü balıklar için uygun habitatlar oluşturabilir (Firth ve ark., 2016; Pan, Tong, Wei, Xiao ve Xue, 2022). PVC modüllerde giriş delikleri ve çıkıntılı kolların yavru balıklar için korunaklı alanlar oluşturduğu da gösterilmiştir (Omar ve ark., 1994).

Kenya'daki farklı yapay resif tasarımlarının iki yıllık izlenmesi sonucunda, tüm resif tiplerinin kontrol alanlarına göre daha yüksek balık tür zenginliği, bolluğu ve biokütle sağladığı belirlenmiştir (Knoester ve ark., 2023). Benzer şekilde, hedef balık türlerinin dağılımının yapısı, yüzey alanı ve boşluk oranından etkilendiği gösterilmiştir (Kim, Lee ve Park, 1994). Günümüzde 3B baskı teknolojileri, bu parametrelerin hassas biçimde kontrol edilmesine ve doğal resif morfolojilerinin taklit edilmesine olanak sağlamaktadır (Yoris-Nobile ve ark., 2023; Pham ve Huang, 2024).

Bununla birlikte, yapay resiflerin doğal resiflerle tamamen aynı ekolojik performansı göstereceği varsayılmamalıdır. Küresel ölçekte yapılan değerlendirmelerde yapay resiflerin balık yoğunluğu, biokütlesi, tür zenginliği ve tür çeşitliliği bakımından doğal resiflere benzer sonuçlar verebildiği, ancak performansın malzeme ve coğrafi koşullara göre değiştiği bildirilmiştir (Paxton

ve ark., 2020). Bazı alanlarda mercan kolonizasyonu doğal resiflerden daha düşük kalabilmektedir (Ammar, 2009) ve farklı fouling toplulukları gelişebilmektedir (Svane ve Petersen, 2001). Bu nedenle başarı, doğal resiflerin birebir kopyalanmasından çok sağlanan ekolojik işlevler üzerinden değerlendirilmelidir.

5.3. Kimyasal bileşim ve biyouyumluluk

Malzemenin kimyasal bileşimi, organizmaların yerleşimini ve uzun dönem ekolojik gelişimi etkileyen temel özelliklerden biridir (Perkol-Finkel ve Sella, 2015). Malzeme kimyası, yüzeyde gelişen mikrobiyal toplulukları da yönlendirebilmektedir. Sajid ve ark. (2024), özellikle %30 istiridye kabuğu tozu içeren kabuk katkılı çimentonun mercan larvalarının yerleşimini teşvik eden *Pseudoalteromonas* ve *Thalassomonas* cinslerine ait bakterileri daha yüksek oranlarda desteklediğini göstermiştir. Beton ve ahşap yüzeylerde farklı bakteriyel toplulukların gelişmesi de substrat kimyasının biyolojik süreçlerdeki rolünü ortaya koymaktadır (Guo, Wang, Cong, Jiang ve Liang, 2021).

Geleneksel betonlarda yüksek alkalinite erken dönem kolonizasyonu sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle yeni nesil malzemelerde pH'ın deniz suyuna daha yakın seviyelere çekilmesi hedeflenmektedir (Carral, Camba Fabal, Lamas Galdo, Rodríguez-Guerreiro ve Cartelle Barros, 2020). Kalsiyum karbonat bakımından zengin malzemeler ve biyomimetik yüzeyler mercanlar ve diğer bentik organizmalar için daha uygun substratlar sağlayabilmektedir (Perkol-Finkel ve ark., 2018). Malzemenin kimyasal inertliği ve toksik bileşen içermemesi de temel bir gerekliliktir (Baine, 2001). Bu kapsamda yalnızca başlangıçtaki kimyasal özelliklerin değil, deniz ortamındaki uzun dönemli salınım ve bozunma davranışının da değerlendirilmesi gerekmektedir. Karbon mineralize edilmiş selüloz kompozitleri ise biyouyumlulukla birlikte atmosferik karbonun yakalanmasını ve depolanmasını sağlayarak bu yaklaşımı sürdürülebilirlik boyutunda genişletmektedir (Reyes ve ark., 2023).

5.4. Hidrodinamik etkileşimler ve yapısal kararlılık

Yapay resiflerin ekolojik ve mühendislik performansı, yerleştirildikleri ortamın dalga, akıntı ve sediment dinamikleriyle doğrudan ilişkilidir (Seaman, 2007). Yapının stabilitesi yalnızca malzemenin dayanımına değil, su derinliği, dalga yüksekliği, akıntı, taban eğimi, resif yönelimi ve taban oyulması gibi faktörlere de bağlıdır (Düzbastılar, Lök, Ulaş ve Metin, 2006; Düzbastılar ve Şentürk, 2009).

Resif geometrisindeki açıklıklar su akımını düzenleyebilmekte, sediment taşınımını etkileyebilmekte ve farklı organizmalar için habitat oluşturabilmektedir (Nagalakshmi, Rameshwaran, Nithyambigai ve Stella Mary, 2021). Sayısal ve deneysel çalışmalar, betonarme modüllerin normal servis koşulları ve şiddetli fırtınalarda yeterli güvenlik sağlayabildiğini, ancak ekstrem

dalga koşullarında ilave güçlendirme gerekebileceğini göstermektedir (Cruz, Valente, Miranda ve Pereira, 2025). Farklı geometrilerin karşılaştırıldığı çalışmalarda da yapı şeklinin akış düzenlemesinde belirleyici olduğu, delikli yapıların sirkülasyonu artırırken aşırı boşluk oranlarının hidrodinamik etkinliği azaltabildiği bildirilmiştir (Pan, Tong, Wei, Xiao ve Xue, 2022; Ma ve ark. (2022).

Batırılmış gemilerde stabilitenin su derinliğiyle ilişkili olması, yapay resif tasarımında malzeme kadar yer seçiminin de önemli olduğunu göstermektedir (Kim, Kim, Shim ve Oh, 2021). Fırtına koşullarında ise yüksek yoğunluklu ve düşük ağırlık merkezine sahip beton yapıların daha kararlı olduğu, hafif ve yüksek ağırlık merkezli yapıların ise önemli ölçüde yer değiştirebildiği belirlenmiştir (Bell ve Hall, 1994). Bu nedenle yüksek yoğunluklu beton yapılar, özellikle anti-trol uygulamalarında stabilite avantajı sağlamaktadır (Pickering, Whitmarsh ve Jensen, 1999).

5.5. Kolonizasyon dinamikleri ve ekosistem gelişimi

Yapay resiflerde kolonizasyon, malzeme özellikleri, yüzey koşulları, yapısal karmaşıklık ve yerel çevresel koşulların birlikte etkisiyle gelişen zamana bağlı bir süreçtir. Beton, çelik, doğal mercan ve lastik yüzeylerin karşılaştırıldığı çalışmalarda beton yüzeylerin doğal mercan substratlarına daha fazla benzeyen bentik topluluklar oluşturduğu, lastik yüzeylerde ise kolonizasyonun daha düşük kaldığı gösterilmiştir (Fitzhardinge ve Bailey-Brock, 1989). Bununla birlikte, uzun dönemde malzeme farklılıklarının azalabildiği ve toplulukların birbirine daha fazla benzeyebildiği de bildirilmiştir (Brown, 2005).

Kolonizasyonun ilk aşamalarında mikrobiyal topluluklar ve biyofilm önemli rol oynar. Yapay resif çevresinde bakteriyel çeşitlilik ve topluluk yapısının değiştiği (Yan ve ark., 2025), beton ve ahşap yüzeylerde mikrobiyal toplulukların zaman içerisinde farklı biçimde geliştiği ve biyolojik örtü arttıkça mikrobiyal çeşitliliğin de yükseldiği gösterilmiştir (Guo, Wang, Cong, Jiang ve Liang, 2021). Bu süreç, daha üst trofik seviyelerdeki organizmaların yerleşimi için temel oluşturmaktadır (Bortone ve ark., 2011). Uygun yüzey özellikleri, gözeneklilik ve biyouyumluluk kolonizasyon hızını ve biyolojik çeşitliliği artırabilmektedir (Loke ve ark., 2022). 3B baskılı seramik resiflerde balık ve omurgasızların kısa sürede yapıları kullanmaya başladığı, iki yıl içerisinde çok sayıda sert mercan kolonisinin geliştiği bildirilmiştir (Berman ve ark., 2023). Erken dönem mercan kolonizasyonunda biyofilm kompozisyonunun da önemli olduğu ve kabuk katkılı çimento yüzeylerinde mercan yerleşimini destekleyen bakterilerin daha yüksek bollukta bulunduğu belirlenmiştir (Sajid ve ark., 2024).

Uzun dönem saha çalışmaları, uygun tasarlanmış yapay resiflerin yalnızca başlangıçta organizmaları çekmekle kalmayıp zaman içerisinde daha karmaşık ekosistemlerin gelişmesine katkı sağlayabildiğini göstermektedir. Knoester ve ark. (2023), iki yıllık izleme sonucunda yapay resiflerde 32 farklı mercan cinsine

ait doğal yerleşim kaydetmiş, balık tür zenginliğinin kontrol alanlarının yaklaşık iki katına çıktığını ve balık biyokütlesinin doğal referans resiflerle karşılaştırılabilir düzeye ulaştığını bildirmiştir. Maldivler'deki uzun dönemli uygulamalarda ise kitlesel mercan beyazlaması sırasında önemli biyolojik kayıplar yaşanmasına rağmen yeni mercan yerleşimlerinin devam ettiği ve ekolojik toparlanmanın başladığı gözlenmiştir (Edwards ve ark., 2001).

Bununla birlikte, yapay resiflerin ekolojik performansı her bölgede aynı değildir. Malzeme, coğrafi konum, yerel çevre koşulları ve tasarım özellikleri kolonizasyon sürecini değiştirebilmektedir (Paxton ve ark., 2020). Bu nedenle yapay resiflerin başarısı yalnızca balık veya mercan sayısındaki artışla değil, biyofilm oluşumu, bentik üretkenlik, tür çeşitliliği, üreme, biokütle gelişimi ve ekosistem işlevlerinin zaman içerisindeki değişimiyle değerlendirilmelidir (Firth ve ark., 2016; Al-Horani ve Khalaf, 2013; Pickering, Whitmarsh ve Jensen, 1999). Genel olarak değerlendirildiğinde, yapay resiflerde ekolojik performans tek bir malzeme özelliğinin sonucu değildir. Yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal yapı ilk kolonizasyonu, gözeneklilik ve yapısal karmaşıklık habitat çeşitliliğini, hidrodinamik özellikler ise sediment ve besin taşınımını belirlemektedir. Bu özelliklerin uygun biçimde bir araya getirilmesi, uzun dönemli ve işlevsel yapay resif ekosistemlerinin geliştirilmesinde temel yaklaşımdır.

6. Çevresel ve Ekolojik Değerlendirmeler

Yapay resifler uygun malzeme, tasarım ve yer seçimi ile uygulandığında habitat restorasyonu, biyolojik çeşitliliğin artırılmasına ve balıkçılık kaynaklarının desteklenmesine katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, yanlış malzeme seçimi, uygun olmayan yerleşim ve yetersiz izleme çeşitli çevresel risklere yol açabilmektedir. Bu nedenle yapay resiflerin başarısı yalnızca kısa dönemli biyolojik artışlarla değil, uzun dönemli ekosistem etkileri ve sürdürülebilirlik ölçütleriyle değerlendirilmelidir (Baine, 2001; Seaman, 2007; Duarte ve ark., 2020).

6.1. Kimyasal riskler ve toksisite

Yapay resif malzemelerinin en az 30 yıllık hizmet ömrüne sahip olması, deniz ortamına zararlı maddeler salmaması ve biyolojik kolonizasyonu desteklemesi beklenmektedir. Bu açıdan beton, galvanizli çelik ve mühendislik çimentolu kompozitler uygun malzemeler arasında değerlendirilmektedir (Cruz, Valente, Miranda ve Pereira, 2025). Buna karşılık uygun şekilde hazırlanmamış çelik yapılar, bazı boya kaplamaları, endüstriyel atıklar ve sentetik malzemeler ağır metal veya toksik bileşik salınımı açısından risk oluşturabilmektedir (Baine, 2001; Firth ve ark., 2016).

Santos ve ark. (2023), 3B baskılı çimento ve geopolimer esaslı resif harçlarını liç davranışı ve ekotoksisite açısından incelemiş; çimento esaslı harçların daha kararlı olduğunu, geopolimerlerde ise özellikle arsenik, molibden ve selenyumun

daha hareketli olabildiğini bildirmiştir. Geri dönüştürülmüş cam agregası içeren harçlar en düşük toksisiteyi gösterirken, deniz kabuğu agregalı karışımlarda organik kalıntılara bağlı daha olumsuz biyolojik etkiler gözlenmiştir (Santos ve ark., 2023). Kurşun, bakır ve çinko gibi ağır metallerin sediment ve su kolonunda birikerek bentik organizmaları ve daha üst trofik seviyeleri etkileyebileceği de belirtilmektedir (Burt ve ark., 2009). Benzer şekilde, polimer esaslı malzemelerin bozunması mikroplastik oluşumuna yol açabilmektedir.

Bununla birlikte, bazı beton esaslı resiflerde uzun dönemli su analizleri çevredeki pH, çözünmüş oksijen ve askıda katı madde değerlerinde olumsuz değişim olmadığını göstermiştir (Al-Horani ve Khalaf, 2013). Na (2023) beton, çelik ve çelik cürufu gibi yaygın malzemelerden kaynaklanan ağır metal salınımının genel olarak düşük olduğunu, ancak uzun dönemli izleme gereksiniminin devam ettiğini belirtmiştir. Bu nedenle malzemenin kimyasal inertliği, toksik bileşen içermemesi ve deniz ortamına zararlı madde salmaması temel seçim kriterleri arasında yer almalıdır (Perkol-Finkel ve Sella, 2015).

6.2. Fiziksel etkiler ve habitat değişimi

Yapay resiflerin deniz tabanına yerleştirilmesi, yerel hidrodinamik koşulları ve sediment hareketlerini değiştirebilir. Akıntı rejimi, lokal oyulma, sediment taşınımı, erozyon ve birikim süreçleri bentik habitatların yapısını etkileyebilmektedir (Seaman, 2007). Bell ve Hall (1994), kasırga sonrasında bazı yapay resiflerin tamamen veya kısmen zemine gömüldüğünü bildirmiştir. Resif yapıları çevresinde oluşan geri döngü bölgeleri askıdaki partiküllerin ve besin maddelerinin tutulmasını sağlayarak balıkların toplanmasını, bentik organizmaların yerleşmesini ve birincil üretimi artırabilmektedir (Qin, Chen ve Jia, 2011). Ancak yapay resifler bazı alanlarda yeni habitat oluştururken doğal habitatların yer değiştirmesine veya kaybına da neden olabilir. Bu etkilerin büyüklüğü malzeme karakteristiklerine, yapısal karmaşıklığa ve özellikle yer seçimine bağlıdır (Firth ve ark., 2020).

6.3. Attraction–production tartışması

Yapay resif araştırmalarındaki temel tartışmalardan biri, gözlenen balık artışının yeni biyolojik üretimden mi (production), yoksa mevcut bireylerin resiflere çekilmesinden mi (attraction) kaynaklandığıdır (Pickering ve Whitmarsh, 1997). Brickhill, Lee ve Connolly (2005) çalışmaların önemli bir bölümünün bu iki mekanizmayı birbirinden ayıracak deneysel tasarıma sahip olmadığını ve gerçek ekolojik katkının belirlenebilmesi için uzun dönemli izlemeye ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Smith, Lowry, Champion ve Suthers (2016) yüksek profilli yapay resiflerde yüksek balık biyokütlesi gözlenmesine rağmen bunun önemli bir bölümünün çekim etkisinden kaynaklanabileceğini göstermiştir. Buna karşılık Omar ve ark. (1994), PVC modüllerin yalnızca balıkları çekmekle kalmayıp yavru balıkların korunması ve büyümesini destekleyebileceğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla yapay resiflerin

değerlendirilmesinde yalnızca balık yoğunluğu veya av verimi değil, gerçek üretim, kolonizasyon ve habitat işlevleri birlikte ele alınmalıdır.

Bu ayrımın yapılabilmesi için uzun dönemli ve nicel izleme programları gereklidir. Becker, Taylor, Folpp ve Lowry (2018), yapay resif çalışmalarının önemli bölümünde başarı kriterlerinin nicel olarak tanımlanmadığını ve ortalama izleme süresinin yaklaşık 2,4 yıl olduğunu belirtmişlerdir. Oysa bazı ekolojik toplulukların olgunlaşması 10–15 yıl veya daha uzun sürebilmektedir. Vivier ve ark. (2021) bu nedenle en az 5 yıllık izleme önermektedir. Başarı değerlendirmesinde biyokütle, tür zenginliği, av verimi, ekonomik getiri ve kullanıcı memnuniyeti gibi ölçütlerin yanında bentik topluluklar, enerji akışı, habitat işlevi ve ekosistem süreçleri de dikkate alınmalıdır (Becker, Taylor, Folpp ve Lowry, 2018; Svane ve Petersen, 2001).

Fouling organizmalarının gelişimi, yapay resiflerde yeni biyolojik üretimin oluşmasında önemli bir mekanizma olabilir. Bu nedenle biyofilm, algler, süngerler, bryozoalar, midyeler ve diğer bentik organizmaların kolonizasyonu, üreme başarısı, biyokütle artışı ve ekosistem fonksiyonları ile birlikte değerlendirilmelidir (Svane ve Petersen, 2001; Bortone ve ark., 2011; Duarte ve ark., 2020).

6.4. Sürdürülebilirlik ve uzun dönem yönetim

Yapay resif teknolojilerinde güncel yaklaşım yalnızca dayanıklı yapıların üretilmesi değil, çevresel açıdan sürdürülebilir sistemlerin geliştirilmesidir. Bu nedenle geri dönüştürülmüş malzemeler, düşük karbonlu betonlar, geopolimerler ve biyomimetik malzemeler giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Loke ve ark., 2022; Yoris-Nobile ve ark., 2023). Ancak sürdürülebilirlik malzeme seçimiyle sınırlı değildir. Yer seçimi, geometrik tasarım, izleme ve bakım süreçleri de uzun dönemli başarı açısından belirleyicidir. Yetersiz bakım ve izleme sediment birikimi, oksijen azalması, habitat bozulması ve yapısal degradasyon gibi sorunlara yol açabilmektedir (Suzdaleva ve Beznosov, 2021). Wan ve ark. (2024), yapay resiflerin ekolojik etkilerinin ilk yıllarda sınırlı kalabildiğini, 5 yıl ve üzerindeki uygulamalarda ise daha belirgin hale geldiğini bildirmiştir. Bu nedenle tasarım aşamasında yalnızca başlangıç performansı değil, uzun dönemli kullanım hedefleri de dikkate alınmalıdır.

Sensör tabanlı izleme, sualtı görüntüleme ve veri analitiği gibi teknolojiler yapay resiflerin performansının daha etkin biçimde izlenmesine olanak sağlamaktadır (Francescangeli ve ark., 2024). Böylece yapay resifler yalnızca deniz tabanına yerleştirilen pasif yapılar olmaktan çıkarak performansı izlenebilen ve gerektiğinde yönetilebilen ekolojik mühendislik sistemlerine dönüşmektedir. Sonuç olarak, yapay resiflerin çevresel başarısı malzeme özelliklerinin yanı sıra tasarım, yer seçimi, izleme ve yönetim süreçlerinin birlikte ele alınmasına bağlıdır. Bu bütüncül yaklaşım, çevresel risklerin azaltılması ve uzun dönemli ekolojik işlevlerin sürdürülebilmesi açısından temel gerekliliktir.

7. Sonuç

Yapay resifler habitat restorasyonu, biyolojik çeşitliliğin artırılması, balıkçılık kaynaklarının desteklenmesi ve kıyısal ekosistemlerin korunması amacıyla kullanılan önemli ekolojik mühendislik uygulamalarıdır. Ancak restorasyon başarısı yalnızca yapıların varlığı veya mercanların hayatta kalmasıyla değerlendirilmemeli; doğal yerleşim, balık topluluklarının gelişimi ve ekosistem işlevlerinin yeniden oluşumu da dikkate alınmalıdır. Knoester ve ark. (2023), metal kafes ve beton esaslı yapıların birlikte kullanımının yüksek mercan yaşama oranı ve doğal kolonizasyon açısından başarılı olduğunu göstermiştir.

Tarihsel olarak kaya, beton, çelik, gemi batıkları, lastikler ve çeşitli atık malzemeler kullanılmış olmakla birlikte, dayanıklılık, çevresel güvenlik ve üretim kolaylığı nedeniyle beton ve çelik esaslı mühendislik yapıları yaygınlaşmıştır. Özellikle beton; düşük maliyet, yüksek dayanım, uzun hizmet ömrü ve farklı geometrilerde üretilebilmesi nedeniyle en yaygın yapay resif malzemelerinden biridir (Ammar, 2009). Malzeme bilimindeki gelişmeler ise yapay resif teknolojilerini daha sürdürülebilir ve ekolojik işlev odaklı bir yöne taşımıştır. Ekolojik betonlar, geopolimerler, geri dönüştürülmüş agregalar, biyoseramikler, kompozitler, elektrokimyasal biyomineral yapılar ve 3B baskı teknolojileri; çevresel performans ile biyolojik kolonizasyonu birlikte geliştirme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, Brown (2005), başlangıçta malzemeler arasında görülen kolonizasyon farklılıklarının zamanla azaldığını ve daha kararlı toplulukların oluştuğunu göstermiştir. Bu durum, uzun dönemli ekolojik performansın yalnızca başlangıçtaki malzeme tercihine bağlı olmadığını ortaya koymaktadır.

Literatür genel olarak yapay resif başarısında malzeme türü kadar yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik, boşluk oranı, yapısal karmaşıklık ve hidrodinamik özelliklerin de önemli olduğunu göstermektedir. Riera, Mauroy, Francour ve Hubas (2024), yapısal karmaşıklığın ekolojik performansı belirleyen ve yerleştirme öncesinde nicel olarak değerlendirilip optimize edilebilen temel bir tasarım parametresi olduğunu belirtmiştir. Wan ve ark. (2024) ise resiflerdeki boşluk ve çıkıntıların su akımını değiştirerek besin maddelerinin tutulmasını ve organizmaların yoğunlaşmasını desteklediğini bildirmiştir. Ekolojik performansın değerlendirilmesinde biyofilm ve fouling toplulukları da dikkate alınmalıdır. Svane ve Petersen (2001), yapay resiflerin yalnızca balık toplulukları üzerinden değerlendirilmesinin yetersiz olduğunu; biyofilm, bentik omurgasızlar ve sert substrat ekolojisinin de izlenmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bununla birlikte, malzeme seçimi önemli olmakla birlikte, uygun saha seçimi ve çevresel koşulların da ekolojik başarı üzerinde güçlü etkileri bulunmaktadır (Burt, Bartholomew, Bauman, Saif ve Sale, 2009).

Çevresel güvenlik de tasarımın temel bileşenlerinden biridir. Kullanılan malzemelerin kimyasal olarak inert olması, toksik madde salmaması, uzun

dönem yapısal bütünlüğünü koruması ve deniz ortamında olumsuz etki oluşturmaması gerekmektedir. Fitzhardinge ve Bailey-Brock (1989), beton yüzeylerde doğal mercan substratlarına daha fazla benzeyen bentik toplulukların geliştiğini belirtirken, Brown (2005) uzun dönem başarıda fiziksel kararlılık, toksik olmama ve habitat karmaşıklığının korunmasının önemini vurgulamıştır. Sonuç olarak, yapay resiflerde malzeme teknolojileri geleneksel mühendislik uygulamalarından ekolojik mühendislik temelli, sürdürülebilir ve işlevsel tasarım yaklaşımlarına doğru evrilmektedir. Gelecekte düşük karbon ayak izine sahip, çevresel açıdan güvenli, biyolojik kolonizasyonu destekleyen ve hedef türlerin habitat gereksinimlerine göre tasarlanabilen malzemelerin geliştirilmesi önem taşıyacaktır. Bu süreçte malzeme bilimi, deniz biyolojisi ve kıyı mühendisliğinin birlikte ele alınması, yapay resiflerin uzun dönemli ekolojik ve yapısal başarısını artırmada belirleyici olacaktır.

Kaynaklar

Ajemian, M. J., Wetz, J. J., Shipley-Lozano, B., Shively, J. D., ve Stunz, G. W. (2015). An analysis of artificial reef fish community structure along the Northwestern Gulf of Mexico Shelf: Potential impacts of "Rigs-to-Reefs" programs. *Plos One, 10*(5), 1-22. doi:10.1371/journal.pone.0126354

Al-Horani, F. A., ve Khalaf, M. A. (2013). Developing artificial reefs for the mitigation of man-made coral reef damages in the Gulf of Aqaba, Red Sea: coral recruitment after 3.5 years of deployment. *Marine Biology Research, 9*(8), 749-757. doi:10.1080/17451000.2013.765582

Ammar, M. S. (2009). Coral reef restoration and artificial reef management, future and economic. *The Open Environmental Engineering Journal, 2*, 37-49.

Anand, S. M., Sendhilnathan, S., Arun Kumar, C. M., ve Tamilarasan, R. (2025). Experimental study of concrete properties for artificial reefs from biodegradable waste materials for fish breeding. *Marine Georesources & Geotechnology, 43*(7), 1247-1262. doi:10.1080/1064119X.2024.2397384

Apriani, M., Nugraha, A. T., Utomo, A. P., Cahyono, L., Fauzi, A., Utami, T., . . . Hanif, F. K. (2022). Coastal community empowerment: Recovery of cockle shell waste into eco-friendly artificial reefs in Mutiara Beach Trenggalek Indonesia. *Frontiers in Community Service and Empowerment, 1*(4), 76-80. doi:10.35882/ficse.v1i4.22

Bailey-Brock, J. H. (1989). Fouling community development on an artificial reef in Hawaiian waters. *Bulletin of Marine Science, 44*(2), 580–591.

Baine, M. (2001). Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. *Ocean ve Coastal Management, 44*, 241-259.

Becker, A., Taylor, M. D., Folpp, H., ve Lowry, M. (2018). Managing the development of artificial reef systems: The need for quantitative goals. *Fish and Fisheries, 19*(4), 740–752. doi:10.1111/faf.12288

Bell, M., ve Hall, J. W. (1994). Effects of Hurricane Hugo on South Carolina's marine artificial reefs. *Bulletin of Marine Science, 55*(2-3), 836–847.

Berman, O., Weizman, M., Oren, A., Neri, R., Parnas, H., Shashar, N., ve Tarazi, E. (2023). Design and application of a novel 3D printing method for bio-inspired artificial reefs. *Ecological Engineering, 188*(106892), 1-11. doi:10.1016/j.ecoleng.2023.106892

Bohnsack, J. A., ve Sutherland, D. L. (1985). Artificial reef research: A review with recommendations for future priorities. *Bulletin of Marine Science, 37*(1), 11-39.

Bombace, G. (1989). Artificial reefs in the Mediterranean Sea. *Bulletin of Marine Science, 44*(2), 1023–1032.

Bortone, S. A. (2011). A pathway to resolving an old dilemma: Lack of artificial reefs in fisheries management. In S. A. Bortone, F. Brandini, G. Fabi, ve S. Otake (Eds.), *Artificial reefs in fisheries management* (pp. 311–321). Boca Raton, FL: CRC Press.

Brickhill, M. J., Lee, S. Y., ve Connolly, R. M. (2005). Fishes associated with artificial reefs: Attributing changes to attraction or production using novel approaches. *Journal of Fish Biology, 67*, 53-71. doi:10.1111/j.1095-8649.2005.00915.x

Brown, C. J. (2005). Epifaunal colonization of the Loch Linnhe artificial reef: Influence of substratum on epifaunal assemblage structure. *Biofouling, 21*(2), 73-85. doi:10.1080/08927010512331344197

Burt, J., Bartholomew, A., Bauman, A., Saif, A., ve Sale, P. F. (2009). Coral recruitment and early benthic community development on several materials used in the construction of artificial reefs and breakwaters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 373*, 72-78. doi:10.1016/j.jembe.2009.03.009

Carral Couce, L. M., Rodríguez Guerreiro, M. J., Fraguela Formoso, J. A., Alvarez-Feal, J. C., ve Filgueira Vizoso, A. (2019). Proceedings of the 25th Pan-American Conference of Naval Engineering—COPINAVAL. In A. Vega Sáenz, N. N. Pereira, L. M. Carral Couce, ve J. A. Fraguela Formoso (Ed.), *Green Artificial Reef PROARR: Repopulation of Coastal Ecosystems and Waste Recycler of the Maritime Industries* (pp. 363-372). Springer.

Carral, L., Camba Fabal, C., Lamas Galdo, M. I., Rodríguez-Guerreiro, M. J., ve Cartelle Barros, J. J. (2020). Assessment of the materials employed in green artificial reefs for the Galician Estuaries in terms of circular economy. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(23), 1-24. doi:10.3390/ijerph17238850

Charbonnel, E., Serre, C., Ruitton, S., Harmelin, J.-G., ve Jensen, A. (2002). Effects of increased habitat complexity on fish assemblages associated with large artificial reef units (French Mediterranean coast). *ICES Journal of Marine Science, 59*, 208-213. doi:0.1006/jmsc.2002.1263

Chen, C., Ji, T., Zhuang, Y., ve Lin, X. (2015). Workability, mechanical properties and affinity of artificial reef concrete. *Construction and Building Materials, 98*, 227–236. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.109

Collins, K. J., Jensen, A. C., Lockwood, A. P., ve Turnpenny, A. W. (1994). Evaluation of stabilized coal-fired power station waste for artificial reef construction. *Bulletin of Marine Science, 55*(2-3), 1251-1262.

Collins, K. J., Jensen, A. C., Mallinson, J. J., Roenelle, V., ve Smith, I. P. (2002). Environmental impact assessment of a scrap tyre artificial reef. *ICES Journal of Marine Science, 59*, 243-249. doi:10.1006/jmsc.2002.1297

Cruz, F., Valente, I. B., Miranda, T., ve Pereira, E. B. (2025). Construction and characterization of a structural unit for modular artificial reefs. *Structures, 81*(110154), 1-15. doi:10.1016/j.istruc.2025.110154

Duarte, C. M., Agusti, S., Barbier, E., Britten, G. L., Castilla, J. C., Gattuso, J.-P., ... Worm, B. (2020). Rebuilding marine life. *Nature, 580*, 39–51. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2146-7

Düzbastılar, F. O. (2026). Su Ürünleri Sektöründe Sürdürülebilir Malzeme Teknolojileri. A. M. Bozdoğan, ve A. Atik içinde, *Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Alanında Güncel Metodolojik Yaklaşımlar* (s. 55-88). Ankara, Türkiye: Platanus Publishing. doi:10.5281/zenodo.19132316

Düzbastılar, F. O., ve Lök, A. (2004). Yapay resif inşasında kullanılan birincil malzemeler. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 21*(1-2), 181-184.

Düzbastılar, F. O., ve Şentürk, U. (2009). Determining the weights of two types of artificial reefs required to resist wave action in different water depths and bottom slopes. *Ocean Engineering, 36*, 1128-1141. doi:10.1016/j.oceaneng.2009.06.008

Düzbastılar, F. O., Lök, A., Ulaş, A., ve Metin, C. (2006). Recent developments on artificial reef applications in Turkey: Hydraulic experiments. *Bulletin of Marine Science, 78*(1), 195-202.

Edwards, A. J., Clark, S., Zahir, H., Rajasuriya, A., Naseer, A., ve Rubens, J. (2001). Coral bleaching and mortality on artificial and natural reefs in the Maldives in 1998, sea surface temperature anomalies and initial recovery. *Marine Pollution Bulletin, 42*(1), 7-15.

Firth, L. B., White, F. J., Schofield, M., Hanley, M. E., Burrows, M. T., Thompson, R. C., Skov, M. W., Evans, A. J., Moore, P. J., ve Hawkins, S. J. (2016). Facing the future: The importance of substratum features for ecological engineering of artificial habitats in the rocky intertidal. *Marine and Freshwater Research, 67*(1), 131–143. https://doi.org/10.1071/MF14163

Firth, L. B., Airoldi, L., Bulleri, F., Challinor, S., Chee, S.-Y., Evans, A. J., Hanley, M. E., Knights, A. M., O'Shaughnessy, K., Thompson, R. C., ve Hawkins, S. J. (2020). Greening of grey infrastructure should not be used as a Trojan horse to facilitate coastal development. *Journal of Applied Ecology, 57*(9), 1762–1768. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13683

Fitzhardinge, R. C., ve Bailey-Brock, J. H. (1989). Colonization of artificial reef materials by corals and other sessile organisms. *Bulletin of Marine Science, 44*(2), 567-579.

Francescangeli, M., Chatzievangelou, D., del Río Fernández, J., Gil Espert, L., Toma, D. M., Baños Castelló, P., Nogueras Cervera, M., Martínez Padró, E., Mendizábal Dinucci, V. D., Vidal Oliveras, N., ve Aguzzi, J. (2024).

Ecological monitoring of a modular artificial reef with cameras inside the project SLAGREEF. *Instrumentation Viewpoint, 23*, 65–66. doi:10.5821/iwp.2024.23.14125

Galdo, M. I., Guerreiro, M. J., Vigo, J. L., Rodriguez, I. A., Lorenzo, R. V., Couce, J. C., ve Couce, L. C. (2022). Definition of an artificial reef unit through hydrodynamic and structural (CFD and FEM) models—application to the Ares-Betanzos Estuary. *Journal of Marine Science and Engineering, 10*(230), 1-14. doi:10.3390/jmse10020230

Graham, N. A. J., ve Nash, K. L. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs, 32*(2), 315–326. https://doi.org/10.1007/s00338-012-0984-y

Guo, Z., Wang, L., Cong, W., Jiang, Z., ve Liang, Z. (2021). Comparative analysis of the ecological succession of microbial communities on two artificial reef materials. *Microorganisms, 9*(120), 1-17. doi:10.3390/microorganisms9010120

Huang, X., Wang, Z., Liu, Y., Hu, W., ve Ni, W. (2016). On the use of blast furnace slag and steel slag in the preparation of green artificial reef concrete. *Construction and Building Materials, 112*, 241–246. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.088

Jensen, A. (2002). Artificial reefs of Europe: perspective and future. *ICES Journal of Marine Science, 59*, 3-13. doi:10.1006/jmsc.2002.1298

Kalam, M. A., Mieno, T., ve Casareto, B. E. (2018). Development of artificial reefs using environmentally safe ceramic material. *Journal of Ecosystem & Ecography, 8*(1), 1-8. doi:10.4172/2157-7625.1000253

Kim, C. G. (2001). Artificial reefs in Korea. *Fisheries, 26*(12), 15-18.

Kim, C. G., Lee, J. W., ve Park, J. S. (1994). Artificial reef designs for Korean coastal waters. *Bulletin of Marine Science, 55*(2-3), 858-866.

Kim, H.-D., Kim, K.-H., Shim, K.-T., ve Oh, H. (2021). Applicability study of a sunken vessel as an artificial reef in a high wave energy zone. *Energies, 14*(4374), 1-14. doi:10.3390/en14144374

Knoester, E. G., Rienstra, J. J., Schürmann, O. J., Wolma, A. E., Murk, A. J., ve Osinga, R. (2023). Community-managed coral reef restoration in southern Kenya initiates reef recovery using various artificial reef designs. *Frontiers in Marine Science*, 1-18. doi:10.3389/fmars.2023.1152106

Kong, J., Cong, G., Ni, S., Sun, J., Guo, C., Chen, M., ve Quan, H. (2022). Recycling of waste oyster shell and recycled aggregate in the porous ecological concrete used for artificial reefs. *Construction and Building Materials, 323*(126447), 1-10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.126447

Kong, J., Ni, S., Guo, C., Chen, M., ve Quan, H. (2022). Impacts from waste oyster shell on the durability and biological attachment of recycled aggregate porous concrete for artificial reef. *Materials, 15*(17), 1-17. doi:10.3390/ma15176117

Korniejenko, K., Oliwa, K., Gądek, S., Dynowski, P., Źróbek, A., ve Lin, W.-T. (2025). A review of additive manufacturing techniques in artificial reef construction: Materials, processes, and ecological impact. *Applied Sciences, 15*(4216), 1-21. doi:10.3390/app15084216

Kuang, W., Pavlenko, P., Guo, H., Tian, K., Liu, H., Zhou, Z., . . . Shi, X. (2025). Utilization of machine-made sand waste in 3D-printed ecological concrete for artificial reefs. *Case Studies in Construction Materials, 22*(e04494), 1-15. doi:10.1016/j.cscm.2025.e04494

Lam, K. K. (2003). Coral recruitment onto an experimental pulverised fuel ash–concrete artificial reef. *Marine Pollution Bulletin, 46*, 642–653. doi:10.1016/S0025-326X(02)00482-4

Laufle, J. C., ve Pauley, G. B. (1985). Fish colonization and materials comparisons on a Puget Sound artificial reef. *Bulletin of Marine Science, 37*(1), 227–243.

Lee, H. S., Sidharthan, M., Shim, C. S., Kim, Y. D., Lim, C. Y., Ko, J. W., . . . Shin, H. W. (2008). Screening and formulation of chemoattractant coatings for artificial reef structures. *Journal of Environmental Biology, 29*(4), 605-612.

Lemoine, H. R., Paxton, A. B., Anisfeld, S. C., Rosemond, R. C., ve Peterson, C. H. (2019). Selecting the optimal artificial reefs to achieve fish habitat enhancement goals. *Biological Conservation, 238*(108200), 1-9. doi:10.1016/j.biocon.2019.108200

Li, H.-T., Wang, Y.-J., Zhang, J.-B., Yu, P., Wang, Y.-T., Li, J.-G., . . . Yang, J. (2026). Research progress and the prospect of artificial reef preparation and its impact on the marine ecological environment. *Materials, 19*(3), 1-31. doi:10.3390/ma19030447

Loke, L. H. L., ve Chisholm, R. A. (2022). Measuring habitat complexity and spatial heterogeneity in ecology. *Ecology Letters, 25*(10), 2269–2288. https://doi.org/10.1111/ele.14084

Lokesha, Sundar, V., ve Sannasiraj, S. A. (2013). Artificial reefs: A review. *Journal of Ocean and Climate: Science, Technology and Impacts, 4*(2), 117-124. doi:10.1260/1759-3131.4.2.1

Lök, A., Düzbastılar, F. O., ve Ulaş, A. (2000). Atık malzemelerin yapay resif olarak kullanımı ve çevresel etkileri. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 17*(1-2), 241-256.

Lukens, R. R., ve Selberg, C. (2004). *Guidelines for marine artificial reef materials (2nd ed.).* Gulf States Marine Fisheries Commission & Atlantic States Marine Fisheries Commission.

Ly, O., Yoris-Nobile, A. I., Sebaibi, N., Blanco-Fernandez, E., Boutouil, M., Castro-Fresno, D., . . . Stafford, R. (2021). Optimisation of 3D printed concrete for artificial reefs: Biofouling and mechanical analysis. *Construction and Building Materials, 272*(121649), 1-9. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121649

Lyu, Z., Li, C., Guo, H., ve Zhou, H. (2026). Effects of wheat straw fiber and oyster shells on properties of foamed concrete for artificial reefs. *Construction and Building Materials, 517*(145769), 1-15. doi:10.1016/j.conbuildmat.2026.145769

Ma, Q., Ding, J., Xi, Y., Song, J., Liang, S., ve Zhang, R. (2022). An evaluation method for determining the optimal structure of artificial reefs based on their flow field effects. *Frontiers in Marine Science, 9*(962821), 1-14. doi:10.3389/fmars.2022.962821

Mat Jusoh, S., Ghazali, C. M., Mat Amin, K. A., Mohd Zin, Z., Wan Nik, W. M., Mohamad, N., ve Jarkoni, N. K. (2018). Innovative uses of recycle waste materials as an artificial concrete reef for estuarine ecosystem. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 374*(012088), 1-7. doi:10.1088/1757-899X/374/1/012088

McGurrin, J. M., Stone, R. B., ve Sousa, R. J. (1989). Profiling United States artificial reef development. *Bulletin of Marine Science, 44*(2), 1004-1013.

Miller, M. W. (2002). Using ecological processes to advance artificial reef goals. *ICES Journal of Marine Science, 59*, 27-31. doi:10.1006/jmsc.2001.1162

Mohamad, N., Samad, A. A., Goh, W. I., Monica, H., ve Hasbullah, F. (2016). Nutrient leach from concrete artificial reef incorporating with organic material. *Jurnal Teknologi, 78*(5), 23–27.

Na, W.-B. (2023). Artificial reefs research. *Journal of Marine Science and Engineering, 11*(1), 1-2. doi:10.3390/jmse11010166

Nagalakshmi, R., Rameshwaran, P. M., Nithyambigai, ve Stella Mary, F. (2021). Material analysis of artificial reef structure using silica fume and their corresponding review about the structural material. *Materials Today: Proceedings, 46*, 3677–3683. doi:10.1016/j.matpr.2021.01.846

O'Leary, E., Hubbard, T., ve O'Leary, D. (2001). *Artificial Reefs Feasibility Study.* Marine Resource Series. Retrieved 6 11, 2026, from https://oar.marine.ie/bitstreams/1f57f080-a9b2-42ce-8715-9f6b27f311de/download

O'Reilly, L. M., ve Willerth, S. M. (2024). Evaluating the biocompatibility of ceramic materials for constructing artificial reefs. *Frontiers in Marine Science, 10*(1292584), 1-10. doi:10.3389/fmars.2023.1292584

Omar, R. N., Kean, C. E., Wagiman, S., Hassan, A. M., Hussein, M., Hassan, R. B., ve Hussin, C. O. (1994). Design and construction of artificial reefs in Malaysia. *Bulletin of Marine Science, 55*(2-3), 1050–1061.

Oyamada, K., Tsukidate, M., Watanabe, K., Takahashi, T., Isoo, T., ve Terawaki, T. (2008). A field test of porous carbonated blocks used as artificial reef in seaweed beds of Ecklonia cava. *Journal of Applied Phycology, 20*, 863-868. doi:10.1007/s10811-008-9332-6

Ozanam, B., Romans, P., ve Lami, R. (2025). Choosing the right substrate to restore coral reefs through artificial reef construction: a mini-review. *Blue Biotechnology, 2*(24), 1-7. doi:10.1186/s44315-025-00047-5

Pan, Y., Tong, H., Wei, D., Xiao, W., ve Xue, D. (2022). Review of structure types and new development prospects of artificial reefs in China. *Frontiers in Marine Science, 9*(853452), 1-17. doi:10.3389/fmars.2022.853452

Paxton, A. B., Shertzer, K. W., Bacheler, N. M., Kellison, G. T., Riley, K. L., ve Taylor, J. C. (2020). Meta-analysis reveals artificial reefs can be effective tools for fish community enhancement but are not one-size-fits-all. *Frontiers in Marine Science, 7*(282), 1-11. doi:10.3389/fmars.2020.00282

Perkol-Finkel, S., ve Sella, I. (2015). Harnessing urban coastal infrastructure for ecological enhancement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Maritime Engineering, 168*(3), 102–110. https://doi.org/10.1680/jmaen.15.00017

Perkol-Finkel, S., Hadary, T., Rella, A., Shirazi, R., ve Sella, I. (2018). Seascape architecture – Incorporating ecological considerations in design of coastal and marine infrastructure. *Ecological Engineering, 120*, 645–654.

Pham, L. T., ve Huang, J. Y. (2024). 3D printed artificial coral reefs: design and manufacture. *Low-carbon Materials and Green Construction, 2*(23), 1-14. doi:10.1007/s44242-024-00056-4

Pickering, H., Whitmarsh, D., ve Jensen, A. (1999). Artificial reefs as a tool to aid rehabilitation of coastal ecosystems: Investigating the potential. *Marine Pollution Bulletin, 37*(8-12), 505-514.

Qiao, W., Qin, Y., Liu, W., Wei, M., Luo, Z., Li, L., ve Yang, K. (2025). Microstructure-engineered porous cementitious composites with recycled tire particles: Orthogonal optimization for artificial reef applications. *Journal of Marine Science and Engineering, 13*(7). doi:10.3390/jmse13071261

Qin, C. X., Chen, P. M., ve Jia, X. P. (2011). Effects of artificial reef construction to marine ecosystem services value: A case of Yangmeikeng artificial reef region in Shenzhen. *Chinese Journal of Applied Ecology, 22*(8), 2160–2166.

Ramm, L. A., Florisson, J. H., Watts, S. L., Becker, A., ve Tweedley, J. R. (2021). Artificial reefs in the Anthropocene: a review of geographical and historical trends in their design, purpose, and monitoring. *Bulletin of Marine Science, 97*(4), 699–728. doi:10.5343/bms.2020.004

Reed, D. C., Schroeter, S. C., Huang, D., Anderson, T. W., ve Ambrose, R. F. (2006). Quantitative assessment of different artificial reef designs in mitigating losses to kelp forest fishes. *Bulletin of Marine Science, 78*(1), 133-150.

Reis, B., van der Linden, P., Sousa Pinto, I., Almada, E., Borges, M. T., Hall, A. E., . . . Franco, J. N. (2021). Artificial reefs in the North–East Atlantic area: Present situation, knowledge gaps and future perspectives. *Ocean & Coastal Management, 213*(105854), 1-12. doi:10.1016/j.ocecoaman.2021.105854

Reyes, G., Vega-Coloma, M., Antonova, A., Ajdary, R., Jonveaux, S., Flanigan, C., . . . Rojas, O. J. (2023). Direct CO_2 capture by alkali-dissolved cellulose and sequestration in building materials and artificial reef structures. *Advanced Materials, 35*(11), 1-12. doi:10.1002/adma.202209327

Riera, E., Hubas, C., Ungermann, M., Rigot, G., Pey, A., Francour, P., ve Rossi, F. (2023). Artificial reef effectiveness changes among types as revealed by underwater hyperspectral imagery. *Restoration Ecology, 31*(8), 1-9. doi:10.1111/rec.13978

Riera, E., Mauroy, B., Francour, P., ve Hubas, C. (2024). Establishing complexity targets to enhance artificial reef designs. *Scientific Reports, 14*(22060), 1-11. doi:10.1038/s41598-024-72227-z

Rouse, S., Porter, J. S., ve Wilding, T. A. (2020). Artificial reef design affects benthic secondary productivity and provision of functional habitat. *Ecology and Evolution, 10*, 2122–2130. doi:10.1002/ece3.6047

Rupasinghe, M., San Nicolas, R., Lanham, B. S., ve Morris, R. L. (2024). Sustainable oyster shell incorporated artificial reef concrete for living shorelines. *Construction and Building Materials, 410*(134217), 1-10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.134217

Sajid, S., Zhang, G., Zhang, Z., Chen, L., Lu, Y., Fang, J. K.-H., ve Cai, L. (2024). Comparative analysis of biofilm bacterial communities developed on different artificial reef materials. *Journal of Applied Microbiology, 135*(11), 1-12. doi:10.1093/jambio/lxae268

Salta, M., Wharton, J. A., Blache, Y., Stokes, K. R., ve Briand, J.-F. (2013). Marine biofilms on artificial surfaces: Structure and dynamics. *Environmental Microbiology, 15*(11), 2879–2893. https://doi.org/10.1111/1462-2920.12186

Santos, J., Cifrian, E., Rodriguez-Romero, A., Yoris-Nobile, A. I., Blanco-Fernandez, E., Castro-Fresno, D., ve Andres, A. (2023). Assessment of the environmental acceptability of potential artificial reef materials using two ecotoxicity tests: Luminescent bacteria and sea urchin embryogenesis. *Chemosphere, 310*(136773), 1-10. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.136773

Santos, L. N., García-Berthou, E., Agostinho, A. A., ve Latini, J. D. (2011). Fish colonization of artificial reefs in a large Neotropical reservoir: Material type and successional changes. *Ecological Applications, 21*(1), 251-262. doi:10.1890/09-1283.1

Schroeter, S. C., Reed, D. C., ve Raimondi, P. T. (2015). Effects of reef physical structure on development of benthic reef community: a large-scale artificial reef experiment. *Marine Ecology Progress Series, 540*, 43-55. doi:10.3354/meps11483

Seaman, W. (2007). Artificial habitats and the restoration of degraded marine ecosystems and fisheries. *Hydrobiologia, 580*, 143-155. doi:10.1007/s10750-006-0457-9

Sherman, R. L., Gilliam, D. S., ve Spieler, R. E. (2002). Artificial reef design: void space, complexity, and attractants. *ICES Journal of Marine Science*, *59*, 196–200. doi:10.1006/jmsc.2001.1163

Smith, J. A., Lowry, M. B., Champion, C., ve Suthers, I. M. (2016). A designed artificial reef is among the most productive marine fish habitats: new metrics to address 'production versus attraction'. *Marine Biology, 163*(188), 1-8. doi:10.1007/s00227-016-2967-y

Spieler, R. E., Gilliam, D. S., ve Sherman, R. L. (2001). Artificial substrate and coral reef restoration: What do we need to know to know what we need. *Bulletine of Marine Science, 69*(2), 1013–1030.

Stolk, P., Markwell, K., ve Jenkins, J. M. (2007). Artificial reefs as recreational Scuba diving resources: A critical review of research. *Journal of Sustainable Tourism, 15*(4), 331-350. doi:10.2167/jost651.0

Suzdaleva, A. L., ve Beznosov, V. N. (2021). Artificial reef: Status, life cycle, and environmental impact assessment. *Power Technology and Engineering, 55*(4), 45-49. doi:10.1007/s10749-021-01397-x

Svane, I., ve Petersen, J. K. (2001). On the problems of epibioses, fouling and artificial reefs, a review. *Marine Ecology, 22*(3), 169–188. doi:10.1046/j.1439-0485.2001.01729.x

Tahsin, A., Borno, I. B., Ahmed, N., Nair, N., Ashraf, W., ve Hollenbeck, C. (2025). Evaluation of low-carbon cementitious composites in marine environment for coastal protection and artificial reef substrate. *npj Materials Degradation, 9*(116), 1-16. doi:10.1038/s41529-025-00652-0

Tessier, A., Francour, P., Charbonnel, E., Dalias, N., Bodilis, P., Seaman, W., ve Lenfant, P. (2015). Assessment of French artificial reefs: due to limitations of research, trends may be misleading. *Hydrobiologia, 753*, 1-29. doi:10.1007/s10750-015-2213-5

Thanner, S. E., McIntosh, T. L., ve Blair, S. M. (2006). Development of benthic and fish assemblages on artificial reef materials compared to adjacent natural reef assemblages in Miami-Dade County, Florida. *Bulletin of Marine Science, 78*(1), 57–70.

Thapsamut, T., Khantavong, A., Jaingam, W., Thamrongnawasawat, T., Duangdee, T., Sarabhorn, P., ve Areeprasert, C. (2025). Sustainable cement and geopolymer mortars production incorporating beachside waste biochar for artificial reef applications. *Biomass and Bioenergy, 200*(107986), 1-16. doi:10.1016/j.biombioe.2025.107986

Ushiama, S., Smith, J. A., Suthers, I. M., Lowry, M., ve Johnston, E. L. (2016). The effects of substratum material and surface orientation on the developing epibenthic community on a designed artificial reef. *Biofouling, 32*(9), 1049–1060. doi:10.1080/08927014.2016.1224860

Valenzuela Matus, I., Alves, J. L., Góis, J., Vaz-Pires, P., ve Rocha, A. B. (2024). Artificial reefs through additive manufacturing: A review of their design, purposes and fabrication process for marine restoration and management. *Rapid Prototyping Journal, 30*(11), 87–122. doi:10.1108/RPJ-07-2023-0222

van Treeck, P., ve Schuhmacher, H. (1999). Artificial reefs created by electrolysis and coral transplantation: An approach ensuring the compatibility of environmental protection and diving tourism. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 49*((Supplement A)), 75-81.

Vivier, B., Dauvin, J. C., Navon, M., Rusig, A. M., Mussio, I., Orvain, F., . . . Claquin, P. (2021). Marine artificial reefs: A meta-analysis of their design, objectives and effectiveness. *Global Ecology and Conservation, 27*(e01538), 1-20. doi:10.1016/j.gecco.2021.e01538

Wan, Y., Kong, Q., Du, H., Yang, W., Zha, W., ve Li, W. (2024). Effectiveness of artificial reefs in enhancing phytoplankton community dynamics: A meta-analysis. *Science of the Total Environment, 947*(174593), 1-11. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.174593

Wilding, T. A., ve Sayer, M. D. (2002). The physical and chemical performance of artificial reef blocks made using quarry by-products. *ICES Journal of Marine Science, 59*, 250–257. doi:10.1006/jmsc.2002.1267

Xu, Q., Ji, T., Yang, Z., ve Ye, Y. (2019). Preliminary investigation of artificial reef concrete with sulphoaluminate cement, marine sand and sea water. *Construction and Building Materials, 211*, 837–846. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.272

Xu, Q., Ji, T., Yang, Z., ve Ye, Y. (2019). Steel rebar corrosion in artificial reef concrete with sulphoaluminate cement, sea water and marine sand. *Construction and Building Materials, 227*(116685), 1-10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116685

Yan, J., Wei, X., Si, L., Zhang, Z., Zhao, J., Deng, L., . . . Wu, Z. (2025). Bacterial community composition and its relationship with environmental factors in the artificial reef area for marine ranching in Changhai County. *Animals, 15*(639), 1-16. doi:10.3390/ani15050639

Yoris-Nobile, A. I., Slebi-Acevedo, C. J., Lizasoain-Arteaga, E., Indacoechea-Vega, I., Blanco-Fernandez, E., Castro-Fresno, D., . . . Sebaibi, N. (2023). Artificial reefs built by 3D printing: Systematisation in the design, material selection and fabrication. *Construction and Building Materials, 362*(129766), 1-17. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129766

Yun, D.-H., ve Kim, Y.-T. (2018). Experimental study on settlement and scour characteristics of artificial reef with different reinforcement type and soil type. *Geotextiles and Geomembranes, 46*(4), 448-454. doi:10.1016/j.geotexmem.2018.04.005

Zhang, T., Zhao, W., Zhou, C., Zhao, F., ve Wan, R. (2024). Design and modeling of an eco-friendly anchored fish aggregating device with artificial reef subjected to wave and current. *Ocean Engineering, 313*(119599), 1-15. doi:10.1016/j.oceaneng.2024.119599

Zimmerman, T. L., ve Martin, J. W. (2004). Artificial reef matrix structures (Arms): An inexpensive and effective method for collecting coral reef-associated invertebrates. *Gulf and Caribbean Research, 16*(1), 59-64. doi:10.18785/gcr.1601.08

BÖLÜM 4

Koyun *(Ovis aries)* Taksonomisi ve Evcilleştirilmesi

Cemalettin Sefa Aykaç [1]
Selahaddin Kiraz [2]

[1] Yük. Lisans öğrencisi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zootekni A.B.D., Şanlıurfa, Türkiye, Orcid No: 0000-0001-6394-8446
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye, Orcid No: 0000-0003-1298-4783

Giriş

Koyunculuk; et, süt, yapağı ve deri gibi farklı hayvansal ürünlerin üretimine katkı sağlayan, hayvancılık sektörünün temel faaliyet alanlarından biridir. Koyunların düşük verimli mera alanlarından etkin biçimde yararlanabilmesi, bakım ve besleme giderlerinin diğer bazı çiftlik hayvanlarına göre daha düşük olması, farklı çevre ve iklim koşullarına kolay uyum gösterebilmesi ile hastalıklara karşı dayanıklı yapıya sahip olmaları, bu yetiştiricilik faaliyetinin sürdürülebilir tarım açısından önemini artırmaktadır. Ayrıca koyunculuk, özellikle kırsal bölgelerde faaliyet gösteren küçük aile işletmeleri için düzenli gelir sağlayan ve bölgesel kalkınmayı destekleyen önemli bir üretim kolu olarak değerlendirilmektedir.

Koyun yetiştiriciliğinin yaygın olarak uygulanmasında, işletme maliyetlerinin düşük olması, yetiştirme koşullarının nispeten kolay olması ve hayvanların zorlu çevre koşullarına dayanıklılık göstermesi önemli rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra koyun sütü ile bu sütten üretilen peynir, yoğurt ve benzeri ürünler hem insan beslenmesinde hem de üreticilere sağladığı ekonomik katkı bakımından önemli bir yere sahiptir. Türkiye'de yetiştirilen yerli koyun ırkları arasında Hemşin koyununun yanı sıra, özellikle Amasya ve çevresinde yaygın olarak yetiştirilen Herik koyunu da bölge hayvancılığı açısından önemli genetik kaynak olarak kabul edilmektedir (Özcan, 1997).

Koyunlar, insanlık tarihinde evcilleştirilen ilk çiftlik hayvanları arasında yer almakta olup hayvancılığın gelişiminde önemli bir rol üstlenmiştir. Uzun yıllar boyunca sürdürülen yetiştirme programları ve seleksiyon uygulamaları sonucunda koyunların genetik yapısında, morfolojik özelliklerinde ve davranış biçimlerinde çeşitli değişimler meydana gelmiş; böylece modern üretim sistemlerinin gereksinimlerine daha uygun özellikler kazanmışlardır (Kiraz, 2009).

Tarih boyunca koyunlar, insanların et, süt, yapağı ve deri gereksinimlerinin karşılanmasında temel hayvansal kaynaklardan biri olmuştur. Arkeolojik bulgular ve tarihsel kayıtlar, göçebe topluluklar başta olmak üzere birçok toplumun çok eski dönemlerden itibaren koyun yetiştiriciliği yaptığını göstermektedir. Bu durum, koyunculuğun yalnızca ekonomik açıdan değil, aynı zamanda sosyal ve kültürel yaşamın da önemli bir parçası olduğunu ortaya koymaktadır (Kaymakçı ve Sönmez, 1996).

Evcil koyunlarda görülen fizyolojik ve morfolojik farklılıkların büyük bölümü, çevresel koşullara uyum ile verim özelliklerini geliştirmeye yönelik uzun süreli seleksiyon çalışmalarının sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu süreçte kas gelişimi, büyüme performansı, yemden yararlanma kapasitesi ile sindirim, dolaşım ve solunum sistemlerine ilişkin birçok özellikte adaptif değişimler gerçekleşmiştir. Günümüzde evcil koyunların kökeninin büyük ölçüde Ovis gmelinii türüne dayandığı kabul edilmekle birlikte, evrimsel süreç ve genetik

akrabalık ilişkilerinin daha ayrıntılı biçimde ortaya konulabilmesi için moleküler düzeyde yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Hiendleder ve ark., 2002; Bruford ve Townsend, 2006).

Koyun Taksonomisi

Dünya üzerindeki biyolojik çeşitlilik, çok sayıda hayvan, bitki, mantar ve mikroorganizma türünü kapsamakta olup bu çeşitliliğin tanımlanması ve sistematik olarak sınıflandırılması biyolojik bilimlerin temel çalışma alanlarından birini oluşturmaktadır. Sistematik sınıflandırma, canlıların morfolojik, genetik ve evrimsel özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesine ve biyolojik çeşitliliğin daha bütüncül biçimde anlaşılmasına olanak sağlamaktadır.

Evcil koyun (*Ovis aries*) ve keçi (*Capra hircus*), Bovidae familyası içerisinde yer alan geviş getiren memelilerdir. Bovidae familyası, keçi, koyun, sığır, antilop ve bunlarla ilişkili çok sayıda türü kapsayan geniş ve evrimsel açıdan çeşitlenmiş bir memeli grubudur. Familyanın evrimsel geçmişi Miyosen Dönemi'ne kadar uzanmakta olup, fosil kayıtları ve filogenetik çalışmalar Bovidae içerisindeki farklı soyların uzun bir evrimsel süreç boyunca çeşitlendiğini göstermektedir (Gatesy ve ark., 1992). Bu evrimsel çeşitlilik içerisinde *Ovis* ve *Capra* cinsleri, insan toplulukları tarafından erken dönemlerden itibaren ekonomik amaçlarla kullanılan ve daha sonra evcilleştirilen önemli küçükbaş hayvan gruplarını oluşturmaktadır. Evcil koyunun (*Ovis aries*) biyolojik sistematikteki sınıflandırması Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Koyunun sistematikteki yeri

Alem *Kingdom*	Hayvanlar *Animale*
Şube *Phylum*	Kordalılar (sırtı iplikliler) *Chordata*
Alt Şube *Subphylum*	Omurgalılar *Vertebrata*
Sınıf *Clasis*	Memeliler *Mamalia*
Takım *Ordo*	Tırnaklılar *Ungulata*
Alt Takım *Subordo*	Çift tırnaklılar *Artiodactyla*
Grup *Gruppia*	Geviş getirenler *Ruminantia*
Familya *Familia*	Boş boynuzlular *Cavinornia*
Alt Familya *Subfamilia*	Koyun alt familyası *Ovinae*
Cins *Genus*	Yabani ve evcil koyunlar *Ovis*

Kaynak: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy

Koyun Türleri (species) ve Alttürleri (subspecies)

- *Ovis ammon ammon*
- *Ovis ammon collium*
- *Ovis ammon darwini*
- *Ovis ammon karelini*
- *Ovis ammon nigrimontana*
- *Ovis ammon polii*
- *Ovis aries* (evcil koyun)
- *Ovis aries musimon* (mouflon)
- *Ovis canadensis* (bighorn sheep)
- *Ovis canadensis canadensis*
- *Ovis canadensis mexicana*
- *Ovis canadensis nelsoni*
- *Ovis canadensis weemsi*
- *Ovis dalli (Dall sheep)*
- *Ovis dalli dalli*
- *Ovis nivicola (snow sheep)*
- *Ovis platyurea*
- *Ovis vignei (urial)*
- *Ovis vignei arkal*
- *Ovis vignei bochariensis*
- *Ovis sp.*

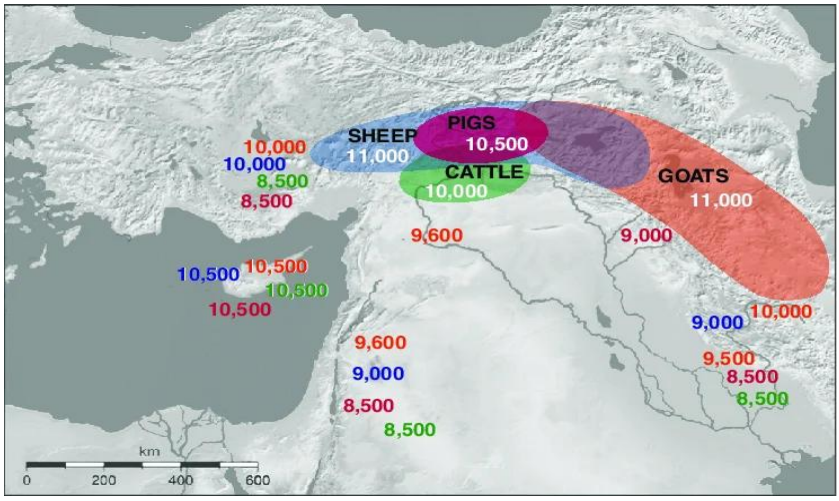
Kaynak: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy

Koyun Evcilleştirilmesi

İnsan topluluklarının göçebe yaşamdan yerleşik düzene geçmesiyle birlikte koyun yetiştiriciliği de giderek yaygınlaşmış ve zaman içerisinde dünyanın birçok farklı bölgesine ulaşmıştır. Bu dönüşümün en önemli arkeolojik kanıtlarından biri, Şanlıurfa'nın yaklaşık 15 km kuzeydoğusunda yer alan ve yaklaşık 12.000 yıl öncesine tarihlenen Göbekli Tepe'dir. Avcı-toplayıcı topluluklar tarafından inşa edilen, tonlarca ağırlığa sahip kireçtaşı dikilitaşlar; yerleşik yaşamın, tarımsal üretimin ve hayvan evcilleştirmenin başlangıcına ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır. Elde edilen bulgular, karmaşık sosyal örgütlenmenin tarım ve hayvan yetiştiriciliğinden daha erken ortaya çıkmış olabileceğini göstermektedir (Schmidt, 2007).

Yakın Doğu ve Güneybatı Asya'da gerçekleştirilen arkeolojik çalışmalar, Neolitik Dönem'e (MÖ 7000–5500) ait çok sayıda evcil hayvan kalıntısını ortaya çıkarmıştır. Bu buluntular, söz konusu bölgenin hayvan evcilleştirme süreçlerinin merkezlerinden biri olduğunu desteklemektedir (Şekil 1). Özellikle koyunun MÖ

7000–6000 yılları arasında evcilleştirildiği kabul edilmekte ve insanlarla olan ilişkisinin tarih öncesi dönemlere kadar uzandığı belirtilmektedir.



Şekil 1. Bereketli Hilal (Zeder, 2008)

Koyunun evcilleştirilmesinin Yakın Doğu'da gerçekleştiği ve bu sürecin özellikle Kuzey Mezopotamya ile Yukarı Fırat-Dicle havzasındaki erken Neolitik topluluklarla yakından ilişkili olduğu kabul edilmektedir. Evcilleştirme sürecinin ilerleyen aşamalarında evcil koyunlar farklı coğrafyalara taşınmış ve çeşitli bölgelerdeki insan topluluklarının ekonomik ve kültürel sistemlerine dâhil olmuştur. Mezopotamya ve Mısır'daki arkeolojik buluntular, koyunun et, süt, deri ve daha sonraki dönemlerde yapağı gibi ekonomik kaynaklar sağlamasının yanı sıra, toplumsal ve kültürel yaşam içerisinde de önemli bir hayvan hâline geldiğini göstermektedir.

Evcilleştirme ve bunu izleyen uzun süreli yapay seçilim süreçleri boyunca koyunlarda çeşitli morfolojik ve fenotipik değişimler meydana gelmiştir. Yabani ve erken evcil koyunlar arasındaki farklılıklar özellikle vücut büyüklüğü, boynuz morfolojisi, kafatası ve iskelet yapısı ile hayvanların yaş ve cinsiyet dağılımlarında izlenebilmektedir. Daha sonraki dönemlerde insan tercihleri doğrultusunda gerçekleştirilen seçilim ise post rengi, boynuz özellikleri ve yapağı karakterleri gibi fenotipik özelliklerin çeşitlenmesinde etkili olmuştur. Özellikle yapağı ve ince yün üretimine yönelik özelliklerin belirginleşmesi, koyunun ilk kez evcilleştirilmesinden daha sonraki dönemlerde gerçekleşen uzun süreli seçilim süreçleriyle ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle günümüz evcil koyunlarının karakteristik özellikleri, başlangıçtaki evcilleştirme olayından ziyade binlerce yıl boyunca devam eden insan kontrollü yetiştirme ve seçilim uygulamalarının bir sonucu olarak değerlendirilmelidir.

Göbekli Tepe'de gerçekleştirilen arkeozoolojik çalışmalar, yerleşimde çok çeşitli memeli ve kuş taksonlarına ait kemik kalıntılarının bulunduğunu ortaya

koymaktadır. Memeli faunası içerisinde ceylan (*Gazella* spp.), yabani sığır (*Bos primigenius*), yaban eşeği (*Equus hemionus*), yaban domuzu (*Sus scrofa*), ovikapridler (*Ovis*/*Capra*), tavşan (*Lepus* spp.), tilki (*Vulpes* spp.) ve kızıl geyik (*Cervus elaphus*) gibi taksonlar belirlenmiştir. Kuş faunası da akbaba, kartal, ördek, kaz, turna, keklik, bıldırcın ve çeşitli kargagiller gibi farklı türleri içermektedir (Peters ve Schmidt, 2004; Peters ve ark., 2014).

Göbekli Tepe'de yaşayan toplulukların çevrede bulunan farklı yabani hayvan kaynaklarından yararlandığını göstermektedir. Ceylanın faunal topluluk içerisinde önemli ölçüde temsil edilmesi, bu türün beslenme ekonomisindeki önemine işaret ederken, yabani sığır ve yaban domuzu gibi büyük memelilerin varlığı da avcılık faaliyetlerinin farklı büyüklükteki av hayvanlarını kapsadığını göstermektedir. Bu bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, Göbekli Tepe'de hayvan kullanımının tek bir türe dayalı olmayıp farklı yabani hayvan kaynaklarının birlikte değerlendirildiği geniş kapsamlı bir avcılık ve beslenme stratejisi çerçevesinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır (Peters ve Schmidt, 2004; Peters ve ark., 2014).

Demirköy yerleşimi, Diyarbakır'ın Silvan ilçesi yakınlarında, Batman Nehri'nin batı kıyısında yer alan ve Çanak Çömleksiz Neolitik Dönem'e tarihlenen arkeolojik alanlardan biridir. Yerleşim, bölgede gerçekleştirilen kurtarma kazıları ve araştırmalar kapsamında incelenmiş ve elde edilen arkeolojik veriler doğrultusunda erken Neolitik dönem içerisine tarihlendirilmiştir (Savard ve ark., 2006). Demirköy'de ele geçirilen zooarkeolojik materyal içerisinde yaban domuzu (*Sus scrofa*), geyikgiller (*Cervidae*) ve koyun (*Ovis* sp.) gibi hayvanlara ait kalıntıların bulunması, yerleşim sakinlerinin farklı yabani hayvan kaynaklarından yararlandığını göstermektedir.

Körtik Tepe, Diyarbakır ili Bismil ilçesi sınırlarında, Batman Nehri ile Dicle Nehri'nin birleştiği bölgeye yakın konumda bulunan ve Güneydoğu Anadolu'nun erken Neolitik yerleşimleri arasında değerlendirilen önemli bir arkeolojik merkezdir. Yerleşimdeki kazı çalışmaları 2000 yılında Vecihi Özkaya başkanlığında başlatılmış olup, elde edilen radyokarbon verileri Körtik Tepe'nin MÖ 10. binyılın başlarına tarihlenen erken bir yerleşim olduğunu göstermektedir (Arbuckle ve Özkaya, 2006; Özkaya ve ark., 2012). Körtik Tepe'de ortaya çıkarılan zooarkeolojik materyal, yerleşim sakinlerinin çok çeşitli yabani hayvanlardan yararlandığını göstermektedir. Faunal topluluk içerisinde özellikle ovikapridler (*Ovis*/*Capra*) önemli bir yer tutmakta; yabani koyun (*Ovis orientalis*) ve yabani keçi (*Capra aegagrus*) gibi taksonların yoğun biçimde temsil edildiği görülmektedir (Arbuckle ve Özkaya, 2006; Benz, M ve ark., 2012). Bu durum, küçükbaş hayvanların Körtik Tepe topluluklarının beslenme ekonomisinde önemli bir kaynak olduğunu ortaya koymaktadır.

Batman ilinin kuzeyinde, Sason Çayı çevresinde yer alan Hallan Çemi, Güneydoğu Anadolu'nun en erken yerleşimlerinden biri olup Geç Epipaleolitik ile Çanak Çömleksiz Neolitik A arasındaki geçiş sürecinin anlaşılması açısından önemli bir arkeolojik merkezdir. Radyokarbon verileri, yerleşimin yaklaşık 11.700–11.270 cal BP arasında iskân edildiğini göstermektedir (Starkovich ve Stiner, 2009). 1990'lı yılların başında gerçekleştirilen kazı çalışmalarında elde edilen arkeolojik ve zooarkeolojik buluntular, Hallan Çemi topluluklarının yerleşik veya yarı yerleşik bir yaşam biçimi içerisinde yabani bitki ve hayvan kaynaklarından yoğun biçimde yararlandığını ortaya koymaktadır. Hallan Çemi'nin faunal topluluğunda başta yabani ovikapridler (*Ovis*/*Capra*), kızıl geyik (*Cervus elaphus*) ve yaban domuzu (*Sus scrofa*) olmak üzere çeşitli yabani hayvan türleri temsil edilmektedir. Bu bulgular, avcılığın yerleşimin geçim ekonomisinde önemli bir yere sahip olduğunu ve topluluğun farklı ekolojik kaynaklardan yararlandığını göstermektedir (Starkovich ve Stiner, 2009).

Çanak Çömleksiz Neolitik Dönem'e ait Güneydoğu Anadolu yerleşimlerinden elde edilen zooarkeolojik bulgular, hayvan kullanımının avcılığa dayalı ekonomik stratejilerden hayvanların daha kontrollü biçimde yönetildiği sistemlere doğru kademeli olarak değiştiğini göstermektedir. Özellikle Hallan Çemi ve Körtik Tepe gibi erken Neolitik yerleşimlerde koyun ve keçi gibi küçükbaş hayvanların ekonomik açıdan önemli bir yer edinmesi, insan-hayvan ilişkilerindeki değişimin evcilleştirme sürecinin başlangıcından önce ortaya çıkan aşamalı bir gelişim olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Körtik Tepe'deki zooarkeolojik veriler, koyunun önemli bir besin kaynağı olduğunu ve hayvanların yaş ve cinsiyet kompozisyonlarının insan tercihlerini yansıtabilecek biçimde değiştiğini ortaya koymaktadır (Arbuckle ve Özkaya, 2006). Benzer şekilde, Güneydoğu Anadolu'daki erken Neolitik yerleşimlerde yabani hayvanların yoğun biçimde kullanılmaya devam etmesi, avcılığın ekonomik sistem içerisindeki önemini uzun süre koruduğunu göstermektedir (Starkovich ve Stiner, 2009; Peters ve ark., 2014).

Genel olarak değerlendirildiğinde, Güneydoğu Anadolu'daki Çanak Çömleksiz Neolitik topluluklarda hayvan kullanımındaki dönüşümün ani bir değişimden ziyade, avcılık, hayvanların seçici kullanımı, sürülerin yönetimi ve nihayetinde evcilleştirme gibi birbirini izleyen süreçler çerçevesinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu süreçte çevresel koşullar, hayvan davranışları ve insan topluluklarının ekonomik ve kültürel tercihleri birlikte etkili olmuş; evcilleştirmenin belirgin morfolojik özellikleri ortaya çıkmadan önce insan ile hayvan arasındaki ilişkinin giderek daha kontrollü bir niteliğe dönüşmesi mümkün olmuştur (Arbuckle ve Özkaya, 2006; Starkovich ve Stiner, 2009; Peters ve ark., 2014).

Sonuç

Moleküler genetik çalışmalar ise evcilleştirme sürecinin yalnızca arkeolojik ve morfolojik değişimler üzerinden değil, aynı zamanda hayvan popülasyonlarının genetik yapısındaki değişimler üzerinden de incelenebileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle modern ve antik koyun ile keçi popülasyonlarında mtDNA haplogruplarının dağılımı, farklı maternal soyların evcilleştirme ve yayılma süreçlerine katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, erken Neolitik Güneydoğu Anadolu yerleşimleri için elde edilen zooarkeolojik verilerin doğrudan belirli bir mtDNA haplogrubunun seçilmesi veya belirli dişi soylarının kontrollü biçimde çoğaltılması şeklinde yorumlanabilmesi için doğrudan antik DNA verilerine ihtiyaç bulunmaktadır.

Kaynaklar

Arbuckle, B. S., & Özkaya, V. (2006). Animal exploitation at Körtik Tepe: An early Aceramic Neolithic site in southeastern Turkey. Paléorient, 32(2), 113–136.

Benz, M., Coşkun, A., Hajdas, I., Deckers, K., Riehl, S., Alt, K. W., ... & Özkaya, V. (2012). Methodological implications of new radiocarbon dates from the Early Holocene site of Körtik Tepe, Southeast Anatolia. *Radiocarbon*, *54*(3-4), 291-304.

Bruford, M. W., & Townsend, S. J. (2006). Mitochondrial DNA diversity in modern sheep. Documenting domestication: New genetic and archaeological paradigms, 306-316.

Gatesy, J., Yelon, D., DeSalle, R., & Vrba, E. S. (1992). Phylogeny of the Bovidae (Artiodactyla, Mammalia), based on mitochondrial ribosomal DNA sequences. *Molecular biology and evolution*, *9*(3), 433–446. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040734

Hiendleder, S., Kaupe, B., Wassmuth, R., & Janke, A. (2002). Molecular analysis of wild and domestic sheep questions current nomenclature and provides evidence for domestication from two different subspecies. *Proceedings. Biological sciences*, *269*(1494), 893–904. https://doi.org/10.1098/rspb.2002.1975

Özcan, L. 1997. Küçükbaş Hayvan Yetiştirme II (Koyun ve Yapağı Üretimi). Ç.Ü. Ziraat Fak. Yay. No: 106. Adana.

Peters, J., & Schmidt, K. (2004).Early zooarchaeological evidence of animal management in the Near East. Journal of Archaeological Science, 31(12), 1525–1538. https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.05.007

Peters, J., Schmidt, K., Dietrich, O., & Pöllath, N. (2014). Göbekli Tepe: Agriculture and domestication. In C. Smith (Ed.), Encyclopedia of Global Archaeology (pp. 3065–3068). Springer.

Kaymakçı, M., Ve Sönmez, R., 1996. İleri Koyunculuk Yetiştiriciliği Kitabı,Bornova-İzmir, s18.

Kiraz, S., 2009. Şanlıurfa Yöresindeki Küçükbaş Hayvanların Filogenetik Yapılarının Moleküler Tekniklerle Belirlenmesi Çalışmaları. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Şanlıurfa, 181s.

Savard, M., Nesbitt, M., & Jones, M. K. (2006). The role of wild grasses in subsistence and sedentism: new evidence from the northern Fertile Crescent. *World Archaeology*, *38*(2), 179-196.

Schmidt, K. (2007). Göbekli tepe (p. 105). Istanbul, Turkey: Arkeoloji ve Sanat Yayınları Savard, M., Nesbitt, M., & Jones, M. K. (2006). The role of wild grasses in subsistence and sedentism: New evidence from the northern Fertile Crescent. World Archaeology, 38(2), 179–196.

Starkovich, B. M., & Stiner, M. C. (2009). Hallan Çemi Tepesi: High-ranked game exploitation alongside intensive seed processing at the Epipaleolithic–Neolithic transition in southeastern Turkey. Anthropozoologica, 44(1), 41–61.

Zeder M. A. (2008). Domestication and early agriculture in the Mediterranean Basin: Origins, diffusion, and impact. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(33), 11597–11604. https://doi.org/10.1073/pnas.0801317105

BÖLÜM 5

Karadeniz Bölgesi'nde Önemli İstilacı Böcek Türleri ve Biyolojik Mücadele İmkanları

***Kibar Ak*[1]**

[1] Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kenevir Araştırmaları Enstitüsü, Samsun/Türkiye, ORCID: 0000-0002-8004-2686

1. Giriş

Biyolojik istilalar, türlerin insan faaliyetleriyle doğal yayılış alanlarının dışına taşınması, yeni bölgelerde yerleşmesi ve yayılmasıyla gelişir. Bu süreç, üretim sistemlerini ve doğal düşman ilişkilerini etkileyerek tarımsal ve ekolojik kayıplara yol açabilir. Karadeniz Bölgesi, uluslararası ulaşım bağlantıları ve çeşitli konukçu bitkileri nedeniyle istilacı böceklerin girişi ve yerleşmesi bakımından Türkiye'nin hassas bölgelerinden biridir.

İnsan faaliyetleriyle doğal yayılış alanı dışına taşınan böcekler yabancı türler olarak değerlendirilir; ancak her yabancı tür istilacı değildir. Yeni alanda üreyerek varlığını sürdüren popülasyonlar yerleşmiş kabul edilir. İstilacılık ise yerleşen türün yayılma ve tarımsal üretim, biyolojik çeşitlilik veya ekosistem işleyişi üzerinde olumsuz etki oluşturma kapasitesiyle ilişkilidir (Blackburn ve ark., 2011; Pyšek ve ark., 2020).

Böcekler; ticari yükler, taşıtlar, canlı bitkiler ve bitkisel ürünler aracılığıyla yeni alanlara taşınabilir. Uygun konukçuların ve elverişli iklim koşullarının bulunduğu alanlarda popülasyon oluşturduktan sonra, türün uçuş kapasitesine bağlı olarak doğal yayılışla veya insan faaliyetleriyle yeniden taşınarak başka alanlara ulaşabilirler. Taşınan canlı birey sayısının ve girişlerin tekrarlanma sıklığının artması yerleşme olasılığını artırabilir. Bu nedenle limanlar, sınır kapıları, fidanlıklar ve yük aktarma alanları erken belirleme çalışmalarında öncelikli yerlerdir. (Hulme, 2009; Lockwood, Cassey ve Blackburn, 2005).

Materyal içinde gizli kalabilen gelişme dönemleri, taşınma sırasında böceklerin fark edilmesini güçleştirir. Özellikle fidan ithalatı, bitki dokusunda gelişen türlerin girişinde önemli bir yoldur. Konukçu sürekliliği ve yetersiz doğal düşman baskısı da yeni alanda popülasyon artışını kolaylaştırabilir (Liebhold, Brockerhoff, Garrett, Parke ve Britton, 2012; Pyšek ve ark., 2020).

İklim değişikliği, kışlama başarısını, gelişme süresini ve yıllık döl sayısını etkileyebilir; zararlının, konukçu bitkinin ve doğal düşmanların mevsimsel gelişim dönemleri arasındaki eş zamanlılık arasındaki uyumu değiştirebilir. Bu etkiler türlerin termal gereksinimleri ve bölgesel mikroiklim dikkate alınarak yorumlanmalıdır (Bebber, Ramotowski ve Gurr, 2013; Bellard, Jeschke, Leroy ve Mace, 2018).

İstilacı böceklerin ekonomik etkileri, verim ve kalite kayıplarının yanı sıra izleme, mücadele ve karantina kaynaklı giderleri kapsar (Diagne ve ark., 2021; Paini ve ark., 2016). Odun dokusunda gelişen türlerde geç fark edilen dal kurumaları ve ağaç ölümleri, kentsel ağaçları ve doğal odunsu bitki örtüsünü de etkiler (Brockerhoff, Liebhold, Richardson ve Suckling, 2010).

Geniş etkili insektisitlerin yoğun kullanımı, tozlayıcıları ve doğal düşmanları olumsuz etkileyerek istilacı zararlıların yol açtığı ekolojik baskıyı artırabilir. Bu nedenle mücadele yöntemleri, hedef zararlı üzerindeki etkinlikleriyle birlikte yararlı organizmaların korunması bakımından da değerlendirilmelidir (Sánchez-Bayo, 2021).

Bu bölümde; *Halyomorpha halys, Orosanga japonica ve Anoplophora chinensis* türlerinin Karadeniz Bölgesi'ndeki yayılışı ve bu türlere yönelik mücadele çalışmaları değerlendirilmektedir. Amaç, türlere ilişkin biyolojik bilgileri yerli ve yabancı çalışmalarla ilişkilendirerek biyolojik mücadelenin uygulanabilirliğini, karantina önlemleriyle ilişkisini ve bölgesel mücadele yönetimindeki öncelikleri ortaya koymaktır.

2. Karadeniz Bölgesi'nde İstilacı Böceklerin Yerleşmesini Kolaylaştıran Faktörler

Karadeniz Bölgesi'nde kıyı ve iç kesimler arasındaki sıcaklık, yağış ve yükselti farklılıkları, istilacı böceklerin yerleşme koşullarını kısa mesafelerde değiştirebilir. Yerleşme başarısı, iklimin yanı sıra konukçu varlığına, bölgeye ulaşan birey sayısına ve çoğalma kabiliyetinebağlıdır (Hulme, 2009; Walther ve ark., 2009).

Kıyı kesimindeki ılıman kışlar ve uzun vejetasyon dönemi, uygun termal gereksinimlere sahip türlerin kışlama ve gelişme başarısını destekleyebilir. *Halyomorpha halys* için yapılan modellemeler, sıcaklığın gelişme süresi ve döl sayısı üzerindeki etkisini ve iklim değişikliğiyle Avrupa'daki uygun alanların genişleyebileceğini göstermektedir (Kriticos ve ark., 2017; Stoeckli, Felber ve Haye, 2020). Bununla birlikte modelleme sonuçları, konukçu bitkilerin dağılışı ve yerel fenolojiye ilişkin verileriyle birlikte yorumlanmalıdır.

Çay, fındık ve kivi bahçelerinin sebze alanları, ormanlar ve çalılıklarla iç içe bulunması, polifag böceklere mevsim boyunca farklı beslenme ve barınma olanakları sağlar. *H. halys* ve *Orosanga japonica*'nın kültür bitkileri dışındaki konukçulardan da yararlanması, parsel çevresindeki bitki örtüsünün izlemeye dâhil edilmesini gerektirir (Akıner, Öztürk ve Sevgili, 2022; Lee, Short, Joseph, Bergh ve Leskey, 2013). *Anoplophora chinensis*'in Trabzon'daki fındık bahçelerinde gelişmesi ise odunsu konukçuların önemini göstermektedir (Turan ve Erdoğan, 2022).

Fındık üretim alanlarının önemli bir bölümünün küçük ve parçalı işletmelerden oluşması, komşu bahçelerdeki uygulamaların eş zamanlı yapılmasını zorlaştırabilir. Yakındaki yabani ve kültür bitkileri, yüksek hareket yeteneğine sahip zararlıların mücadele uygulanan bahçelere yeniden geçmesine imkan sağlar. Bu yapı, parsel düzeyindeki önlemlerin komşu işletmeler arasında koordinasyonla yürütülmesini gerektirir.

Gürcistan sınırı, uluslararası limanlar ve kara yolu bağlantıları, araçlar ve ticari materyalle taşınma riskini artırmaktadır. *H. halys*'in Kafkasya'daki kayıtları ile Türkiye'de sınır yakınında belirlenen popülasyonları, bu güzergâhın olası giriş yollarından biri olduğunu düşündürmektedir (Ak, Uluca, Aydın ve Göktürk, 2019; Musolin ve ark., 2018). Ancak taşınma yolunun doğrulanması, materyal hareketleri ile popülasyonların genetik ilişkilerinin birlikte incelenmesini gerektirir (Fenn-Moltu ve ark., 2023).

Bitkisel materyal ticaretinde risk, materyalin niteliğine ve zararlının gelişme dönemine göre değişir. Odun içindeki larvalar köklü fidanlarla, kışlayan erginler

yükler ve taşıtlarla taşınabilir. Fidanlıklar, bitki satış yerleri ve yükleme alanlarındaki kontroller bu nedenle çevredeki konukçu bitkilerin sürveyleriyle desteklenmelidir (Liebhold ve ark., 2012; Musolin ve ark., 2018).

3. İncelenen İstilacı Böcek Türleri

3.1. *Halyomorpha halys* (Stål, 1855)

3.1.1. Taksonomisi, kökeni ve dünyadaki yayılışı

Halyomorpha halys (Stål, 1855), Hemiptera takımının Heteroptera alttakımında, Pentatomidae familyası ve Pentatominae altfamilyası içerisinde yer alan fitofag bir türdür. Dorsal yüzeyindeki kahverengimsi mermer desen nedeniyle yaygın olarak kahverengi kokarca adıyla bilinmektedir. Erginlerde antenlerin dördüncü ve beşinci segmentlerindeki açık renkli bantlar, abdomenin yan kenarlarında birbirini izleyen açık-koyu lekeler ve pronotumun ön yan kenarlarındaki küçük dişçikler arazi teşhisinde yararlanılan başlıca karakterlerdir (Şekil 1). Özellikle nimflerin ve benzer görünüşlü yerli Pentatomidae türlerinin karıştırılabilmesi nedeniyle teşhiste ergin morfolojisi, genital karakterler ve gerektiğinde moleküler yöntemler birlikte değerlendirilmelidir (Özdemir ve Tuncer, 2021; Rice ve ark., 2014; Rider, 2006).



Şekil 1. *Halyomorpha halys* ergininin dorsal görünümü.

Türün doğal yayılış alanı Çin, Japonya, Kore Yarımadası ve Tayvan'ı kapsayan Doğu Asya'dır. Doğal alanı dışındaki ilk yerleşik popülasyonlar Kuzey Amerika'da saptanmış; ardından Avrupa'nın geniş bir bölümünde, Kafkasya'da, Güney Amerika'nın bazı kesimlerinde ve Kuzey Afrika'da kayıt altına alınmıştır. Uluslararası ticaret, yük ve araç taşımacılığı ile kışlama amacıyla kapalı alanlara giren erginlerin pasif taşınması, kıtalar ve bölgeler arasındaki yayılışın başlıca yollarıdır (Haye ve ark., 2015; Hoebeke ve Carter, 2003; Leskey ve Nielsen, 2018).

H. halys'in istilacı başarısı; geniş konukçu dizisi, yüksek uçuş kapasitesi, tarımsal ve doğal habitatlar arasındaki mevsimsel hareketliliği, farklı iklim koşullarına uyumu ve insan yapımı korunaklarda toplu hâlde kışlamasıyla ilişkilidir. Bu özellikler yeni alanlarda yerleşme olasılığını artırmaktadır (Lee ve ark., 2013; Leskey ve Nielsen, 2018).

3.1.2. Türkiye'ye girişi ve Karadeniz Bölgesi'ndeki yayılışı

Türkiye'de *H. halys*'e ilişkin ilk kayıtlar 2017 yılında İstanbul ve Artvin'den bildirilmiştir. Bununla birlikte, Doğu Karadeniz'deki gözlemler türün bu tarihten önce Gürcistan'da yüksek yoğunluklara ulaştığını; sınır ticareti ve kara yolu taşımacılığının Türkiye'ye girişinde rol oynamış olabileceğini göstermektedir (Ak ve ark., 2019; Çerçi ve Koçak, 2017; Güncan ve Gümüş, 2019). Artvin'in Kemalpaşa ilçesinde kışlamak üzere binalarda toplanan erginlerin belirlenmesi, istilanın başlangıç döneminde yerleşim alanlarının erken tespit bakımından taşıdığı önemi de ortaya koymuştur.

2018 yılında yürütülen arazi çalışmaları, türün Kemalpaşa'dan Trabzon'un Hayrat ilçesine kadar uzanan Doğu Karadeniz kıyı kuşağında yerleştiğini; fındık, kivi, mısır, turunçgil, yaban mersini, fasulye ve domates dâhil çok sayıda kültür bitkisinde bulunduğunu göstermiştir (Ak ve ark., 2019). İzleyen yıllardaki sürveylerde yayılışın doğudan batıya ilerlediği, Artvin ve Rize'deki yüksek yoğunlukların yanı sıra daha batıda birbirinden uzak ve düzensiz yerel popülasyonların oluştuğu belirlenmiştir (Ak, Uluca ve Tunçer, 2023). Bu dağılım, doğal uçuş ve konukçu sürekliliğinin yanı sıra araçlar, tarımsal ürünler ve diğer ticari materyallerle pasif taşınmanın da yayılışa katkı sağladığını düşündürmektedir.

Ordu'nun Çatalpınar ilçesindeki fındık bahçelerinde 2023–2024 yıllarında yürütülen çalışma, ergin uçuşunun nisan ayında başladığını, ağustos ortasından sonra arttığını ve ekim ortasına kadar sürdüğünü göstermiştir (Özpınar ve Yıldırım, 2025). Kıyı, orta ve yüksek kuşaklardaki sürveylerde üreme durumu ve popülasyonun yıllar arasındaki devamlılığı da değerlendirilmelidir (Ak ve ark., 2023).

3.1.3. Konukçu bitkileri, biyolojisi ve zarar şekli

Halyomorpha halys, odunsu ve otsu bitkileri kapsayan 300'den fazla konukçuda kaydedilmiş ileri derecede polifag bir türdür. Meyve ağaçları, sebzeler, tarla ve süs bitkileri konukçu dizisinin önemli bölümünü oluşturur. Yalnızca ergin bulunması, bitkinin üreme konukçusu olduğunu veya ekonomik zarar oluşacağını göstermez; konukçu statüsü yumurta varlığı, nimf gelişimi ve mevsim boyunca beslenme kayıtlarıyla değerlendirilmelidir (Bergmann, Venugopal, Martinson, Raupp ve Shrewsbury, 2016; Lee ve ark., 2013; Özdemir ve Tuncer, 2021; Rice ve ark., 2014).

Karadeniz Bölgesi'nde fındık, kivi, mısır ve çeşitli meyve-sebze türleri önem taşır. Zararlının mevsimsel konukçu değişimi nedeniyle bahçe içi örneklemeler, parsel sınırındaki konukçular ve yakın kışlama alanlarından elde edilen verilerle desteklenmelidir (Bergmann ve ark., 2016; Leskey ve Nielsen, 2018).

Kışı ergin dönemde geçiren bireyler, ilkbaharda sıcaklığın yükselmesiyle kışlaklardan çıkarak konukçu bitkilere yönelir. Çiftleşen dişiler yumurtalarını çoğunlukla yaprakların alt yüzeyine, genellikle 28 adet yumurtadan oluşan kümeler halinde bırakır. Yumurtadan çıkan birinci dönem nimfler bir süre yumurta kümesi çevresinde toplu hâlde kalırken, sonraki dört nimf dönemi aktif olarak beslenir ve konukçular arasında dağılır. Gelişme süresi sıcaklık, fotoperiyot ve besin niteliğine bağlıdır. Ilıman bölgelerde çoğunlukla yılda bir döl veren tür, daha sıcak koşullarda ikinci dölünü tamamlayabilir; dolayısıyla Karadeniz Bölgesi'ndeki döl sayısı ve fenoloji yükseltiye, sıcaklık birikimine ve yıllara göre değişebilir (Lee ve ark., 2013; Nielsen, Hamilton ve Matadha, 2008; Özpınar ve Yıldırım, 2025; Rice ve ark., 2014).

Nimf ve erginler sokucu-emici ağız parçalarıyla meyve, tohum, sürgün ve diğer bitki dokularında beslenir. Stiletlerin dokuya girişi ve salgıları sayesinde hücrelerin parçalanmasına ve beslenme bölgesinde nekrotik dokuların oluşmasına yol açar. *H. halys*'ın emgisi sonucunda meyve yüzeyinde çökük lekeler, renk değişimi ve şekil bozukluğu; emgi noktalarının altındaki meyve etinde ise nekrotik alanlar oluşabilir. Erken dönemdeki beslenme meyve dökümü veya gelişme geriliğiyle; hasada yakın dönemdeki beslenme ise dıştan belirti görülmese bile iç kalitenin bozulmasıyla sonuçlanabilir (Leskey ve Nielsen, 2018; Rice ve ark., 2014).

Fındıktaki zarar, meyvenin gelişme dönemine bağlı olarak farklı belirtiler oluşturur. Kabuk ve iç gelişiminin erken dönemindeki emgi; şekil bozukluğu, boş veya gelişememiş meyve oluşumunu artırabilir. İç gelişiminin ilerlediği dönemdeki beslenme ise buruşuk, lekeli, nekrotik ya da çürümeye eğilimli içlere ve randıman kaybına neden olabilir. Türkiye'deki çalışmalar, zararın fındığın ticari randımanını ve iç kalite özelliklerini azalttığını; zarar tipleri ile şiddetinin böcek faaliyeti ve fındık fenolojisinin örtüşmesine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir (Kan, Akgün ve Turan, 2024; Uluca ve ark., 2026).

3.1.4. Doğal düşmanları

H. halys'in doğal düşmanları arasında yumurta parazitoitleri, örümcekler, karıncalar, avcı Hemiptera ve bazı Coleoptera türleri ile entomopatojen mikroorganizmalar bulunur. Predatörlerin yumurta ve genç nimflerle beslenmesine karşın, tarla koşullarında tek başına yeterli popülasyon baskısı oluşturabildiğine ilişkin kanıtlar sınırlıdır. Etkinlik, habitat, pestisit uygulamaları ve zararlı-doğal düşman fenolojisinin uyumuna göre değişir (Abram ve ark., 2017; Leskey ve Nielsen, 2018).

Entomopatojen funguslar, bakteriler ve mikrosporidialar biyolojik mücadele bakımından araştırılan diğer etmenlerdir. Türkiye'de Artvin'den toplanan nimfler üzerinde yürütülen laboratuvar denemelerinde bazı bakteri izolatları ile *Beauveria bassiana*'nın yüksek ölüm oranları oluşturduğu bildirilmiştir (Tozlu ve ark., 2019). Bu bulguların uygulamaya aktarılması için arazi etkinliğinin doğrulanması gerekir. Türkiye popülasyonlarında *Nosema maddoxi*'nin saptanması da doğal baskılanma ve mikrobiyal mücadele araştırmaları açısından önemlidir (Eker, Yaman, Ertürk, Sağlam Güvendik ve Algı, 2025).

3.1.5. Yumurta parazitoitleri ve biyolojik mücadele olanakları

Doğal yayılış alanında *H. halys* yumurtaları, başta Scelionidae ve Eupelmidae türleri tarafından parazitlenmektedir. *Trissolcus japonicus* (Ashmead), yüksek konukçu arama kapasitesi ve parazitleme düzeyleri nedeniyle en ümitvar biyolojik mücadele etmenlerinden biridir. *Trissolcus mitsukurii* ve *Anastatus japonicus* da farklı coğrafyalarda önemli doğal ölüm etmenleri arasındadır (Abram ve ark., 2017; Lee ve ark., 2013; Yang, Yao, Qiu ve Li, 2009).

İstilaya uğrayan alanlarda *Anastatus*, *Ooencyrtus*, *Telenomus ve* yerli *Trissolcus* türleri *H. halys* yumurtalarını kabul edebilse de konukçu-parazitoit uyumsuzluğu başarılı ergin çıkışını sınırlandırabilmektedir (Abram ve ark., 2017; Leskey ve Nielsen, 2018). Kuzeybatı Türkiye'de 2022–2024 sürveylerinde doğal parazitlenme, yerli yeşil kokarca *Palomena prasina* yumurtalarındakine kıyasla düşük bulunmuştur. Bu sonuç, yerli parazitoitlerin korunması gerekli olmakla birlikte mevcut doğal baskının yetersiz kalabileceğini göstermektedir (Özdemir ve ark., 2025).

T. japonicus'un Kuzey Amerika ve Avrupa'da kendiliğinden yerleşmiş popülasyonlarının saptanması, destekleyici salım çalışmalarına olanak sağlamıştır (Stahl ve ark., 2019; Talamas ve ark., 2015). Bazı hedef dışı Pentatomidae yumurtalarında da gelişebilmesi nedeniyle salım programlarında konukçu özgüllüğü, popülasyonların kökeni ve ekolojik güvenlik değerlendirilmelidir. Laboratuvarda gelişebilme ile arazide gerçekleşen hedef dışı parazitlenme birbirinden ayrılmalı; salımlar ilgili karantina ve izin süreçlerine uygun yürütülmelidir (Haye ve ark., 2020; Simaz ve ark., 2023).

Türkiye'de *H. halys*'e karşı biyolojik mücadelenin temel uygulaması, zararlının doğal yayılış alanındaki başlıca yumurta parazitoitlerinden *T. japonicus*'un kitle üretimi ve doğaya salımı şeklindedir. Tarım ve Orman Bakanlığına bağlı araştırma enstitülerinde üretilen parazitoitlerin salımına 2023 yılında başlanmış; izleyen yıllarda üretim kapasitesi ve salım alanları, özellikle zararlının yoğun olduğu fındık üretim kuşağında genişletilmiştir (Özdemir ve ark., 2025). Programın başarısı yalnızca üretilen veya salınan birey sayısıyla değil; parazitoitin yerleşme ve kışlama başarısı, yeni kuşak oluşturması, salım alanı dışına yayılması, doğal *H. halys* yumurta kümelerindeki parazitleme düzeyi ve ürün zararındaki azalma üzerinden çok yıllı olarak değerlendirilmelidir. Salımların taze yumurta kümelerinin bulunduğu dönemlerle eşleştirilmesi, bahçe kenarlarındaki çiçekli bitkiler ile ilaçlanmayan sığınakların korunması ve geniş etkili insektisitlerin parazitoit faaliyetinin yoğun olduğu dönemlerde sınırlandırılması, *T. japonicus* popülasyonlarının kalıcılığını destekleyebilir.

3.1.6. Entegre mücadele içerisindeki yeri

H. halys'e karşı entegre mücadele, zararlı yoğunluğu ve ürünün duyarlı fenolojik dönemleri esas alınarak yürütülmelidir. Geniş etkili insektisitlerin doğal düşmanlar, ikincil zararlılar ve kalıntı riski üzerindeki etkileri gözetilerek yöntemlerin biyolojik mücadeleyle uyumu değerlendirilmelidir (Leskey ve Nielsen, 2018; Morrison ve ark., 2019).

İzlemede agregasyon feromonu ve sinerjisti içeren piramit, huni tipi veya yapışkan tuzaklardan yararlanılabilir. Yakalanan birey sayısı doğrudan ürün zararını göstermediğinden tuzak verileri, görsel kontroller, silkme örneklemeleri, yumurta ve nimf gözlemleri ile meyve zararının değerlendirilmesiyle desteklenmelidir. Feromon ve tuzak tipi, yapışkan plakaların yerleşimi ve yüzey temizliği yakalama etkinliğini etkiler (Altanlar ve Tuncer, 2023; Altanlar, Yeşildağ ve Tuncer, 2026; Nixon, Acebes-Doria, Kirkpatrick ve Leskey, 2024). Bahçe kenarlarında yoğunlaşma eğilimi dikkate alınarak sınır ve merkez örneklemeleri birlikte yürütülmelidir (Morrison ve ark., 2019; Weber ve ark., 2017).

Kültürel ve mekanik önlemler, kışlayan erginlerin ve pasif taşınmanın azaltılmasına yönlendirilmelidir. Binalardaki açıklıkların kapatılması, toplu hâlde bulunan erginlerin mekanik olarak uzaklaştırılması ve taşınan materyalin kontrolü bu amaca katkı sağlayabilir. Alternatif konukçuların kontrolsüz uzaklaştırılması erginleri kültür bitkilerine yöneltebileceğinden, bahçe çevresindeki bitki örtüsünün yönetimi mevsimsel hareket dikkate alınarak planlanmalıdır.

Kimyasal mücadele gerektiğinde uygulama zamanı, bahçeye giriş, nimf yoğunluğu, ürün fenolojisi ve ruhsatlı preparatların özelliklerine göre belirlenmelidir. Kenar uygulamaları veya cezbet-öldür yaklaşımları ilaçlanan alanı azaltabilir; ancak bu, insektisitin doğal düşmanlar açısından seçici olduğu anlamına gelmez (Morrison ve ark., 2019). Uygulamalar yumurta parazitoitlerinin salım ve etkinlik dönemleriyle çakıştırılmamalı; *T. japonicus*'un yerleşmesini engelleyebilecek geniş etkili insektisitlerden kaçınılmalıdır. Kimyasal mücadele, izleme sonuçları ve zarar riski gerektirdiğinde kullanılan tamamlayıcı bir araç olmalıdır.

Yumurtaların yüzeyinde bulunan zorunlu simbiyotik bakterinin yeni çıkan nimflere geçişini engellemeye yönelik biyolojik ürünlerin geliştirilmesi, tamamlayıcı bir araştırma alanıdır. Uygulama önerisi için arazi etkinliğinin ve yumurta parazitoitleriyle uyumunun doğrulanması gerekir (Tuncer ve ark., 2026).

3.2. *Orosanga japonica* (Melichar, 1898)

3.2.1. Taksonomik durumu, kökeni ve yayılışı

Orosanga japonica (Melichar, 1898), Hemiptera takımının Auchenorrhyncha alttakımı, Fulgoroidea üstfamilyası ve Ricaniidae familyasında yer alan fitofag bir türdür. Türkiye popülasyonları önce *Ricania simulans* (Walker, 1851), daha sonra *Ricania japonica* Melichar, 1898 olarak adlandırılmıştır. Morfolojik incelemeler ve 28S rDNA karşılaştırmaları bu popülasyonların *O. japonica* olduğunu desteklemiştir. Önceki adlarla yayımlanan biyoloji ve mücadele bulguları, teşhis farklılığı dikkate alınarak aynı türe ilişkin tarihsel veriler kapsamında değerlendirilmelidir (Akıner ve ark., 2022; Demir, 2009, 2018; Park ve Jung, 2021).

Erginlerde çatı biçiminde tutulan geniş ön kanatlar, koyu enine bantlar ve açık renkli düzensiz lekeler belirgindir. Nimfler, abdomenin arka ucundan uzanan

beyaz, mumsu filamentlerle tanınır (Şekil 2). Benzer Ricaniidae türleriyle karıştırılabileceğinden, özellikle yeni yayılış alanlarından alınan örneklerin teşhisinde erkek genital yapıları ve gerektiğinde moleküler belirteçler incelenmelidir (Akıner ve ark., 2022; Park ve Jung, 2021).



Şekil 2. *Orosanga japonica* ergini (a, solda) ve abdomenin arka ucunda mumsu filamentler taşıyan nimfi (b, sağda).

Doğu Asya kökenli olan türün Batı Palearktik'te Abhazya, Gürcistan, Rusya, Ukrayna, Azerbaycan, Bulgaristan, İran ve Türkiye'de kayıtları bulunmaktadır. Karadeniz havzasındaki yayılışında birbirini izleyen nemli kıyı habitatları, geniş konukçu dizisi ve yumurta bırakılmış bitkisel materyalin insan faaliyetleriyle taşınması etkili olabilmektedir. Türkiye popülasyonlarının potansiyel dağılımına ilişkin modellemeler, uygun habitatların Karadeniz ve Marmara kıyıları boyunca genişleyebileceğini göstermiştir (Akıner ve ark., 2022; Gjonov, 2011; Ismaylova, 2021).

3.2.2. Türkiye'ye girişi ve Karadeniz Bölgesi'ndeki yayılışı

Orosanga japonica Türkiye'de ilk kez 2008 yılında Artvin'in Kemalpaşa ilçesinde gözlenmiş, 2009 yılında ise Ricaniidae familyasına ait bir kayıt olarak bilimsel literatüre aktarılmıştır. Türün daha önce Abhazya ve Gürcistan'da bulunması, Türkiye'ye Batum üzerinden doğal yayılışla veya yumurta bırakılmış bitkisel materyalin taşınmasıyla girmiş olabileceğini düşündürmektedir. İlk belirlenmesinin ardından Artvin'den Rize, Trabzon, Giresun ve Ordu yönüne ilerleyen popülasyonlar, Doğu Karadeniz kıyı kuşağında kısa sürede yayılmıştır (Ak, 2026; Ak, Güçlü, Eken ve Sekban, 2015; Demir, 2009).

İzleyen sürveylerde türün Orta ve Batı Karadeniz ile Marmara Bölgesi'ndeki bazı sınırlı alanlara ulaştığı; Düzce, Sakarya ve İstanbul dâhil yeni alanlarda kültür bitkileri ve yabani bitkiler üzerinde bulunduğu bildirilmiştir (Akıner ve ark., 2022; Arslangündoğdu ve Hızal, 2019; Karataş, Karataş, Yavuz ve Genç, 2020).

3.2.3. Konukçu bitkileri, biyolojisi ve zarar şekli

Orosanga japonica, otsu ve odunsu bitkilerde beslenebilen polifag bir türdür. Türkiye'de çay, fındık, kivi, asma, incir, fasulye, hıyar, domates, böğürtlen ile çeşitli meyve, süs ve orman bitkilerinde kaydedilmiştir. Üreme konukçuları, yalnızca ergin bulunmasına göre değil, ovipozisyon izleri ve nimf gelişiminin tamamlanmasıyla belirlenmelidir (Akıner ve ark., 2022; Arslangündoğdu ve Hızal, 2019; Karataş ve ark., 2020).

Tür, Türkiye koşullarında yılda bir döl verir ve kışı yumurta döneminde geçirir. Dişiler yaz sonu ile sonbahar başında yumurtalarını çoğunlukla bir yıllık ince sürgünlerin kabuk dokusu içerisine sıralar hâlinde bırakır ve ovipozisyon yerini mumsu bir salgıyla örter (Şekil 3). Yumurtalar uzun bir diyapoz döneminden sonra mayıs sonu-haziran başında açılır. Beş nimf dönemi geçiren bireylerde ergin çıkışı genellikle haziran sonu-temmuz başında başlar; ergin yoğunluğu temmuz ve ağustos aylarında artar. Fenoloji; yükselti ile yıllık sıcaklık ve yağış koşullarına bağlı olarak yerel farklılıklar gösterebilir (Ak, 2026; Göktürk ve Mıhlı, 2015; Karataş ve ark., 2020).



Şekil 3. *Orosanga japonica* dişisinin sürgüne yumurta bırakması.

Nimf ve erginlerin genç sürgün, yaprak sapı ve yumuşak dokulardan özsu emmesi gelişme geriliği ve zayıflamaya; salgılanan ballı madde ise fumajin gelişimine neden olabilir. Sürgün dokusuna yumurta bırakılması, özellikle genç sürgünlerde yaralanma ve kurumaya yol açabilir. Ekonomik zarar konukçu, bitki fenolojisi ve yoğunluğa bağlı olduğundan yalnızca türün bulunması kimyasal mücadele kararı için yeterli değildir.

3.2.4. Doğal düşmanları ve entomopatojen mikroorganizmalar

Orosanga japonica'nın doğal düşmanları arasında predatörler, parazitoitler ve entomopatojenler bulunmakla birlikte Doğu Karadeniz'de fungusların etkisi öne çıkmaktadır. Yüksek bağıl nem ve gölgeli bitki örtüsü, konidi çimlenmesi ve enfeksiyon gelişimi için elverişli mikroklima sağlayabilir (Akıner, Öztürk, Güney ve Usta, 2020; Erper ve ark., 2022).

Türkiye'de *O. japonica* ile ilişkilendirilen mikrobiyal mücadele çalışmalarında *Lecanicillium muscarium*, *Conidiobolus coronatus*, *Beauveria bassiana*, *Metarhizium brunneum* ve bazı bakteriyel etmenler incelenmiştir. *L. muscarium*'un Doğu Karadeniz'den elde edilen izolatları arasında Lm4 izolatı, laboratuvar ve arazi koşullarında özellikle nimflere karşı yüksek patojenite göstermiş; nimflerin erginlere göre daha duyarlı olduğu belirlenmiştir (Güçlü ve ark., 2010). *C. coronatus* ile bazı bakteriyel izolatlar da biyolojik mücadele potansiyeli göstermiştir (Ak, Eken, Güçlü, Genç ve Sekban, 2014; Göktürk, 2020). Ayrıca yerel *B. bassiana* ve *M. brunneum* izolatlarından geliştirilen yağ bazlı formülasyonların arazi koşullarında yüksek etki göstermesi, mikoinsektisit geliştirme olanaklarını güçlendirmiştir (Biryol ve ark., 2021).

3.2.5. *Beauveria bassiana*'nın biyolojik mücadeledeki önemi

Beauveria bassiana, *O. japonica*'da doğal popülasyon baskılanmasına katkı sağlayan ve etkili izolatları mikrobiyal uygulamalar için geliştirilebilen başlıca entomopatojen fungustur. Konidiler kütikulaya tutunup çimlenir, integümenti geçerek hemosölde çoğalır; konukçunun ölümünden sonra uygun nemde kadavra yüzeyinde sporulasyon gerçekleşir (Şekil 4). Temasla enfeksiyon oluşturması, özsu emen böceklerin mücadelesinde önemli bir özelliktir.



Şekil 4. *Beauveria bassiana* enfeksiyonu ve dış yüzeyde fungus gelişimi gösteren *Orosanga japonica* ergini.

O. japonica'da doğal *B. bassiana* enfeksiyonları, Rize'de 2018–2019 yıllarında yürütülen arazi çalışmalarıyla belgelenmiş; farklı örnekleme alanlarında yüksek doğal enfeksiyon oranları bildirilmiştir (Akıner ve ark., 2020). Kemalpaşa'da 2019 yılında kaydedilen enfeksiyonlar ve izleyen yıllardaki sürveyler, fungusun Doğu Karadeniz'de zararlı popülasyonunun baskılanmasındaki önemini desteklemektedir (Ak, 2026; Bayramoğlu, Biryol ve Demir, 2025; Erper ve ark., 2022). Enfekte bireylerde üretilen konidilerin sağlıklı bireylere taşınması, uygun çevre koşullarında doğal enfeksiyonların yayılmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, bölgesel popülasyon azalmasının büyüklüğü ve sürekliliği, enfeksiyon oranlarıyla eş zamanlı yoğunluk ve ürün zararı kayıtları üzerinden değerlendirilmelidir.

Rize, Trabzon ve Artvin'de 2021–2022 yıllarında enfekte nimf ve erginlerden elde edilen 18 izolatın tamamı *B. bassiana* olarak tanılanmış ve laboratuvarda yüksek ölüm oranları oluşturmuştur (Bayramoğlu ve ark., 2025). Yerel izolat ve yağ bazlı formülasyonlarla alınan arazi sonuçları destekleyici uygulamalar için ümitvardır (Akıner ve ark., 2020; Biryol ve ark., 2021; Erper ve ark., 2022). Seçimde virülens, konidi üretimi, çevresel dayanıklılık ve depolama özellikleri birlikte değerlendirilmelidir.

Destekleyici uygulamalar, genç nimflerin yoğun olduğu ve konidi çimlenmesi için uygun sıcaklık ile yaprak yüzeyi neminin beklendiği dönemlere yönlendirilmelidir. Doğal fungal enfeksiyonların yaygın olduğu alanlarda ise

öncelik yeni inokulum uygulamaktan çok mevcut fungus popülasyonunun ve enfekte bireylerden sağlıklı bireylere bulaşmanın korunmasıdır.

3.2.6. Kültürel önlemler ile mikrobiyal mücadelenin birlikte uygulanması

Orosanga japonica'nın mücadele yönetiminde, kışlayan yumurtaları içeren ince sürgünler bitkinin fizyolojisine zarar vermeyecek dönemde ve yumurtalar açılmadan budanmalıdır. Kesilen sürgünler alanda bırakılmamalı ve yumurta içeren materyal yeni alanlara taşınmamalıdır. Bu önlem, ilkbaharda oluşacak nimf yoğunluğunu azaltarak mikrobiyal mücadelenin etkisini destekleyebilir (Altaş ve Ak, 2019).

Doğu Karadeniz'de *O. japonica*'ya karşı geniş alanlı kimyasal mücadeleden kaçınılması, doğal düşmanların korunması açısından önemlidir. Özellikle çay alanlarında insektisit kullanılmaması, *B. bassiana* ve diğer yararlı organizmalar üzerindeki pestisit baskısını sınırlandırarak doğal enfeksiyonların devamını desteklemiştir. Ancak bu deneyim, bütün istilacı türlere genellenmemelidir (Ak, 2026).

O. japonica'nın mücadele yönetiminde uygulama gereksinimi, nimf yoğunluğu, ürün zararı ve doğal enfeksiyon düzeyi birlikte değerlendirilerek belirlenmelidir. Kültürel önlemler ve gerektiğinde etkili yerel izolatlar önceliklidir. Çay alanlarına ilişkin kısıtlar gözetilerek kimyasal mücadele, diğer üretim alanlarında ancak bu önlemler yetersiz kaldığında ve ruhsat koşullarına uygun biçimde değerlendirilebilir (Ak, 2026).

3.3. *Anoplophora chinensis* (Forster, 1771)

3.3.1. Taksonomik durumu, kökeni ve dünyadaki yayılışı

Turunçgil uzun antenli böceği *Anoplophora chinensis* (Forster, 1771), Coleoptera takımının Cerambycidae familyası ve Lamiinae altfamilyasında yer alan, canlı odunsu bitkilerde gelişebilen bir karantina zararlısıdır. Başlangıçta *Cerambyx chinensis* olarak tanımlanmıştır. Japonya popülasyonları için kullanılan *Anoplophora malasiaca* (Thomson), taksonomik revizyonda *A. chinensis* ile eşanlamlı kabul edilmiştir; eski Japon biyoloji ve mücadele çalışmalarında bu adlandırma farklılığı dikkate alınmalıdır (Lingafelter ve Hoebeke, 2002).

Erginler iri yapılı ve parlak siyah renkli olup vücut uzunlukları yaklaşık 20–40 mm arasında değişmektedir. Elitralar üzerinde düzensiz biçimde dağılmış beyazımsı lekeler, anten segmentlerinde ise siyah ve açık mavimsi-beyaz bantlar bulunur (Şekil 5). Pronotumun her iki yanında belirgin birer dikenimsi çıkıntı yer alır. Elitraların kaide bölümündeki granüllü yapı, türün benzer uzun antenli böceklerden ayrılmasında kullanılan başlıca morfolojik karakterler arasındadır (Lingafelter ve Hoebeke, 2002).



Şekil 5. *Anoplophora chinensis* ergininin dorsal görünümü (solda) ve konukçu bitki üzerindeki görünümü (sağda).

Doğu ve Güneydoğu Asya kökenli tür, turunçgiller ile çok sayıda meyve, orman ve süs bitkisinde gelişmektedir. Topraklı veya saksılı odunsu fidanlar, bonsailer ve köklü dikim materyali, yumurta, larva ve pupaların fark edilmeden taşınmasına imkan sağlar. Avrupa'ya farklı zamanlarda giren tür, İtalya'da geniş alanlara yayılmış; Fransa, Hollanda ve Hırvatistan'da ise daha sınırlı bulaşmalar bildirilmiştir (Haack, Hérard, Sun ve Turgeon, 2010; Hérard ve Maspero, 2019).

EPPO A2 listesinde ve Avrupa Birliği'nin öncelikli karantina zararlıları arasında yer alan *A. chinensis*, fidanlıklar, meyve bahçeleri ve kentsel ağaçlar için risk taşımaktadır. İklim uygunluğu çalışmalarında potansiyel yayılış alanlarının genişleyebileceği öngörülmüştür; risk değerlendirmesinde konukçu varlığı ve materyal hareketleri de gözetilmelidir (Oğuzoğlu, Harman ve Avcı, 2024; Zhou ve ark., 2022).

3.3.2. Türkiye'de belirlenmesi ve yayılış durumu

Türkiye'de ilk doğrulanmış kayıt, 2014 yılında İstanbul ili Şile ilçesindeki bir fidanlıkta *Acer palmatum*, *A. saccharum* ve *Salix caprea* üzerinde elde edilmiştir (Hızal, Arslangündoğdu, Göç ve Ak, 2015). Daha sonra İstanbul'un farklı ilçelerinde yürütülen sürveylerde türün kentsel yeşil alanlarda ve odunsu süs bitkileri üzerinde yayılış gösterdiği belirlenmiştir. Bartın'daki bir fidanlıkta saptanan kayıt, bulaşık dikim materyalinin ülke içindeki hareketinin yeni alanlara taşınmada belirleyici olabileceğini göstermiştir (Yıldız, 2017). Antalya'dan elde edilen örneklerin tür teşhisi, morfolojik incelemelerin yanı sıra mitokondriyal COI gen bölgesine dayalı moleküler analizlerle doğrulanmıştır (Topakçı, Yükselbaba ve Göçmen, 2017).

Zararlının 2016'da Trabzon ili Maçka ilçesindeki bir fidanlıkta ve 2017'den itibaren çevredeki fındık bahçelerinde belirlenmesi, Karadeniz Bölgesi açısından önemlidir. Sonraki sürveylerde Esiroğlu, Öğütlü, Bahçekaya, Günay ve Alaçam çevresindeki bulaşık alanlar genişlemiştir. Alanın 2020'de yaklaşık 250 ha'dan 2021'de 409 ha'a ulaşması, zamanında sınırlandırılamayan zararlının bitişik fındık bahçelerine yayılabildiğini göstermektedir (Eroğlu, Coşkuner ve Usta, 2017; Turan ve Erdoğan, 2022).

Türkiye'deki kayıtlar coğrafi olarak ayrılmış bulaşık alanlara ilişkindir. Ancak sınırlı yayılış düşük risk anlamına gelmez; erken belirleme ve konukçu materyal hareketinin denetlenmesi eradikasyon olanağının korunması açısından önemlidir.

3.3.3. Konukçuları, biyolojisi ve zarar şekli

Anoplophora chinensis canlı odunsu bitkilerde gelişen geniş konukçu dizili bir türdür ve 30'dan fazla bitki familyasında kaydedilmiştir. *Acer*, *Betula*, *Carpinus*, *Citrus*, *Corylus*, *Fagus*, *Malus*, *Platanus*, *Populus*, *Prunus*, *Pyrus*, *Salix ve Ulmus* cinsleri önemli konukçular arasındadır. Avrupa'daki bulaşma alanlarında akçaağaçlar sıklıkla tercih edilmekte; Türkiye'de ise fındığın zararlının gelişmesini tamamlayabildiği ekonomik açıdan önemli bir konukçu olduğu saha gözlemleriyle belirlenmiştir (Gümüş Minnetoğlu ve Turanlı, 2024; Haack ve ark., 2010; Sjöman, Östberg ve Nilsson, 2014).

Tür çoğunlukla bir yılda dölünü tamamlamakla birlikte düşük sıcaklık, geç yumurta bırakılması ve konukçu niteliği gibi etmenlere bağlı olarak gelişme iki yıla uzayabilir. Sıcaklık; larva ve pupa gelişiminin yanı sıra erginlerin yaşam süresi, üreme başarısı ve yumurta açılımı üzerinde de belirleyicidir (Keena ve Richards, 2022; Keena, Moore ve Bradford, 2021). Erginler çıkıştan sonra yaprak, yaprak sapı ve ince dal kabuklarında olgunluk beslenmesi yapar. Dişiler yumurtalarını genellikle kök boğazına, yüzeysel köklere veya gövdenin toprağa yakın bölümünde mandibulalarıyla açtıkları kesilerin altına tek tek bırakır. Yumurtadan çıkan larvalar önce kabuk altı ve kambiyumda, ilerleyen dönemlerde diri odun ve öz odununda düzensiz galeriler açar; çoğu birey farklı larva dönemlerinde kışlar ve olgun larvalar ilkbaharda pupa olur (Haack ve ark., 2010).

Maçka'daki fındık bahçelerinde 2020–2021'de ergin çıkışları haziranın son haftalarında başlamış, erginler ağustos sonuna kadar görülmüş ve yumurta bırakma eylül başına kadar sürmüştür. Larvalara yıl boyunca, pupalara mayıs-haziranda rastlanmıştır. Bu fenoloji, çıkış delikleri ve ovipozisyon izlerinin belirlenmesinde yaz sürveylerinin önemini; larva içeren kök ve kök boğazı dokularının ise yıl boyunca taşınma riski oluşturduğunu göstermektedir (Gümüş Minnetoğlu ve Turanlı, 2024).

Zarar, larvaların iletim dokularını kesintiye uğratan galerileri ile erginlerin sürgünlerdeki olgunluk beslenmesinden kaynaklanır. Kök boğazında biriken talaş ve dışkı karışımı, kabukta T biçimli yumurta bırakma yaraları, kök ve gövde tabanındaki dairesel ergin çıkış delikleri, taçta gelişme geriliği, yapraklarda sararma, dal kurumaları ve ağacın devrilmeye yatkın hâle gelmesi başlıca belirtilerdir (Şekil 6). Birden fazla larvanın bulunduğu fındık ocaklarında kök ve gövde dokularının zayıflaması, dalların veya tüm ocağın kurumasına kadar ilerleyebilir. Belirtilerin çoğu larvalar odun dokusunda belirli bir süre beslendikten sonra belirginleştiğinden, yalnızca taç belirtilerine dayanan sürveylerde erken bulaşmalar gözden kaçabilir.



Şekil 6. *Anoplophora chinensis* zarar belirtileri: fındıkta ergin çıkış delikleri (solda) ve odun dokusundaki larvalar ile galeriler (sağda).

3.3.4. Sürvey ve erken belirleme

Sürveylerde kök boğazı, yüzeysel kökler ve gövdenin alt bölümü talaş çıkışı, ovipozisyon yaraları ve ergin çıkış delikleri bakımından sistematik incelenmelidir. Toprak, malç ve otsu örtünün belirtileri gizleyebileceği dikkate alınarak şüpheli bitkilerde kök boğazı görünür hâle getirilmelidir. Galerilerden elde edilen larva ve erginler morfolojik karakterlerle teşhis edilmeli, gerektiğinde DNA barkodlama ile doğrulanmalıdır (EPPO, 2016).

Feromon ve bitki uçucuları içeren tuzaklar görsel kontrolleri destekleyebilir; ancak ergin yakalanmaması, düşük yoğunluklu popülasyonlarda zararlının bulunmadığını göstermez. Erkek feromonunun tanımlanması izleme araçlarının geliştirilmesine katkı sağlamıştır; yakalama etkinliği konukçu çekiciliği ve tuzak yerleşiminden de etkilenebilir (Hansen ve ark., 2015). Deneyimli ekiplerin görsel kontrollerinin tuzaklar ve gerektiğinde koku tespit köpekleriyle desteklenmesi, özellikle fidanlıklar ve kentsel ağaçlandırma alanlarında erken belirleme olasılığını artırabilir (Hoppe, Schrader, Kinkar ve Vos, 2019; Hoyer-Tomiczek ve Sauseng, 2013).

Risk temelli sürveylerde ithalatçı ve üretici fidanlıklar, bulaşık materyalin bulunduğu işletmeler ve sevk edildiği alanlar ile kentsel ağaçlandırmalar ve fındık bahçeleri öncelikli olmalıdır. Her birey veya belirti, koordinat, konukçu, bitkinin kaynağı ve materyal hareketiyle birlikte kaydedilmelidir. Sevkiyatların geriye ve ileriye doğru izlenmesi, ayrı alanlardaki kayıtların aynı üretim veya sevk zinciriyle bağlantısını ortaya koyabilir.

3.3.5. Mücadelenin güçlüğü, karantina ve eradikasyon

Anoplophora chinensis ile mücadele, zararlı dönemlerin büyük bölümünün kök ve gövde içinde korunması nedeniyle güçtür. Yüzey insektisitleri derindeki larvalara yeterince ulaşmaz; erginlere yönelik uygulamalar ise uzun çıkış dönemi nedeniyle tekrar gerektirebilir. Geniş konukçu dizisi, özel mülkiyetlerde denetim güçlüğü ve belirtisiz bulaşık fidanların taşınması bu sorunu artırır. Kimyasal uygulamalar eradikasyonun temelini oluşturamaz; yalnızca resmî programda ergin yayılışını azaltan tamamlayıcı bir önlem olarak değerlendirilebilir (EPPO, 2013; Van der Gaag ve ark., 2010).

Eradikasyon, bulaşık alanın hızla sınırlandırılması ve bulaşık ya da resmî değerlendirmede yüksek risk taşıyan bitkilerin kökleriyle birlikte sökülerek hiçbir canlı dönemin çıkışına izin vermeyecek biçimde imhasına dayanır. Gövdenin kesilmesi yeterli değildir; kütük ve kalın kökler de öğütülmeli veya güvenli biçimde yok edilmelidir. Kesilen materyal açıkta bekletilmemeli ve karantina alanı dışına işlenmeden çıkarılmamalıdır. Konukçu fidan, bonsai ve köklü süs bitkilerinin hareketi denetlenmelidir (EPPO, 2013).

Son bulaşık bitkinin uzaklaştırılması eradikasyonun tamamlandığını göstermez. Gelişmenin iki yıla uzayabilmesi ve düşük yoğunluktaki bireylerin gözden kaçabilmesi nedeniyle bulaşık alan ile tampon bölgede çok yıllı sürveyler sürdürülmelidir. İzleme süresi ve örnekleme yoğunluğu bu biyolojik özellikler ile belirleme güçlüğüne göre planlanmalıdır (EPPO, 2013; Hoppe ve ark., 2019).

3.3.6. Mücadelede koordinasyonun önemi ve Türkiye'de yapılan çalışmalar

Mücadele, tek bir işletmenin bahçe içi uygulamalarıyla sınırlandırılamaz. Bakanlığın merkez ve taşra birimleri, araştırma enstitüleri, üniversiteler, belediyeler, orman teşkilatı, fidanlık işletmeleri, üretici örgütleri ve arazi sahipleri arasında görev dağılımı ve bilgi akışı tanımlanmalıdır. Ortak belirti ve kayıt ölçütlerinin kullanılması, şüpheli örneklerin teşhis laboratuvarlarına hızla ulaştırılması ve imha kararlarının gecikmeden uygulanması programın sürekliliği açısından belirleyicidir.

Türkiye'de ilk kayıttan sonra sürveyler ve karantina önlemleri uygulanmıştır. Trabzon'da bulaşık fındık ocaklarının imhası ve kimyasal uygulamalara rağmen Maçka'daki alanın 2020–2021'de genişlemesi, belirtisiz konukçuların ve materyal hareketlerinin izlenmesinin önemini göstermektedir (Turan ve Erdoğan, 2022). Fındıktaki gelişme dönemlerinin belirlenmesi, sürvey ve imha zamanlaması için yerel veri sağlamıştır (Gümüş Minnetoğlu ve Turanlı, 2024).

Belediye çalışanları, fidanlık personeli, bahçe sahipleri ve üreticilere yönelik tanı eğitimleri ile fotoğraflı bildirim sistemleri sürvey kapasitesini genişletebilir; bildirimler uzmanlarca doğrulanmalıdır. İtalya deneyimi, vatandaş katılımının yeni bulaşık alanların erken belirlenmesine katkısını, özel mülkiyetlerde sürvey ve ağaç imhasının ise uygulama güçlüğünü ortaya koymuştur (Ciampitti ve Cavagna, 2014).

3.3.7. Benzer sorun yaşayan ülkelerin deneyimleri

Avrupa'daki deneyimler, zararlının erken belirlendiği ve yayılışının sınırlı kaldığı alanlar ile geniş alanlara yerleştiği bölgelerde mücadele sonuçlarının farklılaştığını göstermektedir. İthal bitkilerle ilişkili sınırlı bulaşmalarda hızlı imha, sevkiyatın izlenmesi ve çevrede ayrıntılı sürveyler yapılması eradikasyon başarısını desteklemektedir (Hérard ve Maspero, 2019; Van der Gaag ve ark., 2010).

İtalya'nın Lombardiya Bölgesi'nde 2000'den itibaren çok sayıda belediyeye yayılan popülasyon, uzun süreli ve yüksek maliyetli bir program gerektirmiştir.

Tampon bölgeler oluşturulmuş, ağaçlar düzenli incelenmiş, bulaşık ağaçlar ile kök ve kütükler imha edilmiş, bitki hareketleri kısıtlanmış ve halk bilgilendirilmiştir. Geniş konukçu varlığı ve özel mülkiyetlerdeki uygulama güçlüğü, eradikasyon için uzun süreli kaynak ve kurumsal süreklilik gereksinimini artırmıştır (Hérard ve Maspero, 2019).

Hırvatistan'da fidanlıklarla ilişkili bulaşmaların farklı yıllarda belirlenmesi, dikim materyalinin izlenmesi ve çok yıllı sürveylerin önemini göstermektedir (Hérard ve Maspero, 2019). Kısa süreli saptanmama dönemleri, sürvey kapsamı ve belirleme etkinliği değerlendirilmeden eradikasyon başarısı olarak yorumlanmamalıdır.

Tablo 1. Avrupa ülkelerinde *Anoplophora chinensis* için bildirilen mücadele uygulamaları ve sonuçları

Ülke	**Bulaşma durumu**	**Başlıca yaklaşım**	**Sonuç**
Hollanda	İthal bitkiyle ilişkili sınırlı bulgu	Hızlı imha, geriye doğru izleme ve çevre sürveyi	Eradikasyonun başarıyla uygulandığı sınırlı bulaşmalar
Fransa	İthal dikim materyaliyle ilişkili sınırlı bulaşmalar	Eradikasyon, materyal izleme ve çevre sürveyi	Erken müdahalenin önemini gösteren örnekler
İtalya	Lombardiya'da geniş alanlara yayılmış yerleşik popülasyon	Yoğun sürvey, ağaç ve kök imhası, hareket kısıtı, halk katılımı	Uzun süreli ve yüksek maliyetli mücadele
Hırvatistan	Fidanlık kökenli, farklı yıllarda yinelenen kayıtlar	Bulaşık her alanda eradikasyon ve uzun süreli sürvey	Çok yıllı sürvey gereksinimi

Kaynak: Van der Gaag ve ark. (2010) ve Hérard ve Maspero (2019).

3.3.8. Entegre mücadele içerisindeki yeri

Anoplophora chinensis için entegre mücadele, karantina zararlısına özgü önleme, erken belirleme ve eradikasyon sürecidir. Zararlıdan ari fidan üretimi ve ticareti, risk temelli sürveyler ve bulaşma doğrulandığında uygulanacak imha işlemleri aynı program içinde yürütülmelidir. Kimyasal ve biyolojik yöntemler, odun içinde gelişen bütün bireylerin ortadan kaldırılmasını güvence altına alamadığından, bulaşık bitkinin alanda bırakılmasına gerekçe oluşturmamalıdır.

Karadeniz Bölgesi'nde özellikle Trabzon'daki fındık alanlarında mücadele sürekliliği korunmalıdır. Kontroller ergin çıkışı ve yumurta bırakma döneminde yoğunlaştırılmalı, kök boğazı incelemeleri yıl boyunca sürdürülmelidir. Yeni kayıtlar, komşu bahçeler ve bitkisel materyalin gönderildiği alanlarla birlikte değerlendirilerek karantina sınırları güncellenmelidir.

4. Üç Türün Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Üç türde giriş ve yayılma yollarını ayıran temel özellik, taşınan gelişme dönemi ve materyalin niteliğidir. *Halyomorpha halys* erginlerinin taşıt ve yüklerle taşınabilmesi, dikim materyaline bağlı olmayan girişleri de mümkün kılar. *Orosanga japonica*'da yumurta bırakılmış sürgünlerin, *Anoplophora chinensis*'te ise bitki dokusundaki gelişme dönemlerini taşıyan köklü odunsu materyalin hareketi önemlidir. Bu nedenle kontrol noktaları ilk türde yük ve ulaşım hareketlerine, diğer iki türde ise özellikle dikim materyalinin üretim ve sevk zincirine göre seçilmelidir (Akıner ve ark., 2022; Haye ve ark., 2015; Hérard ve Maspero, 2019).

Konukçu kapasitesi yalnızca kayıtlı bitki sayısıyla karşılaştırılamaz. *H. halys* ve *O. japonica*'nın otsu ve odunsu konukçuları mevsimsel beslenme sürekliliği sağlar; *A. chinensis*'te ise duyarlı odunsu bitkilerin fidanlık, kentsel ağaçlandırma ve üretim alanları arasındaki hareketi belirleyicidir. İlk iki türde konukçu kullanımının mevsimsel değişimi, üçüncü türde üretim ve dikim zincirindeki bağlantılar izleme önceliklerini farklılaştırır (Arslangündoğdu ve Hızal, 2019; Bergmann ve ark., 2016; Sjöman ve ark., 2014).

Zarar bakımından *H. halys*'te ürünün verim ve kalitesindeki kayıplar, *O. japonica*'da özsu kaybı, ovipozisyon yaraları ve fumajin; *A. chinensis*'te ise kök ve gövde dokularındaki galeri tahribatı öne çıkar. İlk iki türde zarar, yoğunluk ve bitki fenolojisine bağlı olarak kısa sürede değişebilirken odun dokusundaki tahribat daha geç görünür ve çoğu kez geri döndürülemez. Bu nedenle emici türlerde yoğunluk–zarar ilişkisi izlenmeli, karantinaya tabi *A. chinensis*'in düşük yoğunlukta saptanmasında dahi resmî müdahale geciktirilmemelidir (Ak ve ark., 2015; EPPO, 2013; Eroğlu ve ark., 2017; Kan ve ark., 2024).

Biyolojik mücadelede hedef dönemin erişilebilirliği, uygulanabilirliği belirleyen temel ayrımdır. *H. halys*'in açıkta bırakılan yumurta kümeleri yumurta parazitoitlerine, *O. japonica*'nın bitki yüzeyindeki genç nimfleri ise temasla enfeksiyon oluşturan funguslara elverişli hedefler sunar. *A. chinensis*'in bitki dokusunda korunan yumurta ve larvalarında etmenin hedefe ulaştırılması güçtür. Dolayısıyla ilk iki türde biyolojik mücadele doğrudan popülasyon baskılanmasını amaçlarken, üçüncü türde deneysel etkinlik sonuçları resmî eradikasyon önlemlerinin yerine geçirilemez (Güçlü ve ark., 2010; Haack ve ark., 2010; Haye ve ark., 2020).

Uygulama bakımından *H. halys*'te kitle üretimi ve salım, *O. japonica*'da mevcut doğal fungal enfeksiyonların korunması öne çıkmaktadır. İlkinde parazitoitin salım sonrası arazi etkinliği, ikincisinde ise doğal enfeksiyonların devamlılığı belirleyicidir. Bu farklılık, destekleyici uygulama gereksiniminin her türde aynı ölçütlerle değerlendirilemeyeceğini göstermektedir (Akıner ve ark., 2020; Simaz ve ark., 2023).

Karadeniz'in nemli kıyı koşulları, entomopatojen fungusların çimlenmesini ve enfekte bireylerde konidi oluşumunu destekleyebilir. Bu avantaj, bitki yüzeyindeki *O. japonica* nimf ve erginlerinde daha doğrudan kullanılabilir. *H.*

halys'te biyolojik mücadelenin iklimle ilişkisi özellikle parazitoitin kışlama başarısı ve konukçu yumurtalarıyla mevsimsel uyumu üzerinden değerlendirilmelidir. *A. chinensis*'te ise uygun nem, odun içindeki larvalara ulaşma güçlüğünü ortadan kaldırmaz. Sıcaklık, ultraviyole ışınım ve şiddetli yağışların konidileri yüzeyden uzaklaştırması da dikkate alındığında, bölgesel nem bütün etmenler için eşit bir üstünlük olarak yorumlanamaz (Akıner ve ark., 2020; Haye ve ark., 2020; Tozlu ve ark., 2019).

5. Sorunlar ve Araştırma Gereksinimleri

Araştırma öncelikleri, genel biyolojik bilgilerin yinelenmesinden çok, kullanılan etmenlerin bölgesel etkinliği ve güvenliği ile resmî mücadele programlarının sonuçlarını açıklayan veri eksikliklerine yönelmelidir.

Bölgede bulunan parazitoit, predatör ve entomopatojenlerin teşhisi gerektiğinde moleküler yöntemlerle doğrulanmalıdır. *H. halys* yumurtalarından elde edilen yerel parazitoitlerin mevsimsel etkinliği ve başarılı ergin çıkışı belirlenmeli; *T. japonicus*'un hedef dışı Pentatomidae türlerindeki gelişimi ve arazi parazitlenmesi ayrı değerlendirilmelidir. *O. japonica*'da fungal enfeksiyonların yoğunluk değişimine katkısı, *A. chinensis*'te ise bitki dokusundaki dönemlere ulaşabilen yerel doğal düşmanların varlığı araştırılmalıdır. Fungus izolatlarının kültür koleksiyonlarında biyolojik özellikleriyle birlikte korunması, etkinlik ve güvenlik çalışmalarının karşılaştırılabilirliğini sağlayacaktır (Abram ve ark., 2017; Haye ve ark., 2020; Sevim, Demir, Höfte, Humber ve Demirbağ, 2010).

Biyolojik mücadele etmenlerinin üretim ve uygulama kalitesi düzenli denetlenmelidir. *T. japonicus* kolonilerinde eşey oranı, ergin ömrü, uçuş ve parazitleme kapasitesinin salım sonrası etkinlikle ilişkisi belirlenmelidir. Fungus formülasyonlarında konidi canlılığı, depolama süresi ve çevresel dayanıklılık değerlendirilmelidir. İnsektisit ve fungisitlerin doğrudan ve kalıntı etkileri de incelenerek biyolojik mücadeleyle uyumlu ürün ve uygulama zamanları belirlenmelidir (Biryol ve ark., 2021; Lowenstein, Andrews, Mugica ve Wiman, 2019).

Laboratuvar bulgularının araziye aktarılmasında hedef dönem, yoğunluk ve çevresel koşullar birlikte değerlendirilmelidir. *O. japonica*'ya karşı yerel *B. bassiana* ve *M. brunneum* formülasyonlarının olumlu arazi sonuçları farklı üretim alanları ve yıllarda doğrulanmalıdır (Biryol ve ark., 2021). Parazitoitlerde laboratuvar konukçu kabulü doğal yumurta kümelerindeki parazitlenmeyle karşılaştırılmalı; *A. chinensis*'te etmenin galeri içindeki larvaya ulaştırılabilirliği gösterilmelidir. Uygulama öncesi yoğunluklar ve uygulama yapılmayan karşılaştırma alanları, doğal popülasyon değişimi ile uygulama etkisinin ayrılmasını sağlamalıdır (Haack ve ark., 2010; Haye ve ark., 2020).

Çok yıllık izleme kayıtları, yöntemler arasında karşılaştırmaya imkan verecek standartlarda tutulmalıdır. *H. halys*'te parazitlenmiş yumurta kümelerinin oranı ile küme içindeki parazitlenmiş yumurta oranı ayrı verilmelidir. *O. japonica*'da enfeksiyon oranı, zararlı yoğunluğu ve ürün zararı aynı alanlarda eş zamanlı kaydedilmelidir. *A. chinensis*'te yeni bulaşık bitkiler, bulaşık alan sınırları ve son

kaydı izleyen saptanmama süresi, sürveylerin kapsamı ve belirleme etkinliğiyle birlikte değerlendirilmelidir. Bu kayıtlar, çevresel değişkenliğin mücadele sonuçlarından ayrılmasını sağlayacaktır (Akıner ve ark., 2020; EPPO, 2013; Özdemir ve ark., 2025).

Erken uyarı ve mücadele kararları için tarih, konum, konukçu, gelişme dönemi, yoğunluk ve işlem bilgilerini içeren ortak kayıt düzeni kurulmalı; ilgili kurumlar ile üretici örgütleri arasında veri akışı ve görev paylaşımı tanımlanmalıdır. Karar ölçütleri türlere özgü tutulmalı; *A. chinensis* için ekonomik zarar eşiğine dayalı yaklaşım benimsenmemelidir (EPPO, 2013). Etkinlik ve güvenliğin üretim maliyeti ve uygulama giderleriyle birlikte değerlendirilmesi, yöntemlerin üretici tarafından kullanılabilirliğini belirleyecektir.

6. Sonuç ve Tartışma

Üç türün bölgesel önemi, yayılış hızı yanında doğal düşman etkinliği ve müdahalenin zamanlamasıyla belirlenmektedir. Nemli kıyı iklimi biyolojik mücadeleyi destekleyebilir; ancak bu katkı hedef döneme erişim ve uygulama sürekliliğine bağlıdır. Doğal düşman varlığı ile yeterli ürün koruması bu nedenle ayrı değerlendirilmelidir.

H. halys'te *T. japonicus* üretim ve salımları önemli bir uygulama kapasitesi oluşturmuştur. Ancak düşük doğal parazitlenme ve değişken salım sonuçları, üretilen birey sayısının tek başına yeterli ürün korumasını göstermediğini ortaya koymaktadır (Özdemir ve ark., 2025; Simaz ve ark., 2023). Fındığın duyarlı dönemlerindeki zarar kayıtları, salımların katkısını ve tamamlayıcı müdahale gereksinimini belirlemek için kullanılmalıdır (Uluca ve ark., 2026).

O. japonica-B. bassiana etkileşimi, kimyasal baskının sınırlanmasının doğal düşman etkinliğini destekleyebileceğini göstermektedir. Doğal enfeksiyonlar ve olumlu arazi sonuçları mikrobiyal mücadele için dayanak oluşturmaktadır (Akıner ve ark., 2020; Biryol ve ark., 2021). Bununla birlikte sürvey ve derleme verileri, bölgesel azalmanın tamamını fungusa bağlayan kontrollü deney kanıtı değildir. Doğal enfeksiyonların korunması, yeniden yoğunluk artışı görülen alanların izlenmesiyle sürdürülmelidir (Ak, 2026).

A. chinensis'te Avrupa deneyimleri, erken müdahalenin sınırlı bulaşmalarda eradikasyon olanağını artırdığını; geniş alanlara yerleşmiş popülasyonların ise uzun süreli programlar gerektirdiğini göstermektedir (Hérard ve Maspero, 2019; Van der Gaag ve ark., 2010). Türkiye'de fındık ocaklarının imhasıyla oluşan üretici kayıpları, teknik önlemler yanında ekonomik destek ve güvenilir kurumsal işleyiş gereksinimini ortaya koymaktadır (Bozkurt, 2018; Turan ve Erdoğan, 2022).

Bölgesel mücadele yönetimi, yerleşmiş emici zararlı böceklerde doğal düşmanların korunması ve zararın azaltılmasını, karantina zararlısında ise gecikmeden eradikasyon önlemlerinin uygulanmasını esas almalıdır. Ortak izleme altyapısı, türlere özgü müdahale ve başarı ölçütleriyle kullanılmalı; kurumlar arasındaki sorumluluk paylaşımı uygulamaların sürekliliğini sağlamalıdır.

Kaynakça

Abram, P. K., Hoelmer, K. A., Acebes-Doria, A., Andrews, H., Beers, E. H., Bergh, J. C., … Wiman, N. G. (2017). Indigenous arthropod natural enemies of the invasive brown marmorated stink bug in North America and Europe. *Journal of Pest Science, 90*(4), 1009–1020. https://doi.org/10.1007/s10340-017-0891-7

Ak, K. (2026). Current status of the invasive species, *Orosanga japonica* (Melichar, 1898) (Hemiptera: Ricaniidae) under natural enemy pressure in Türkiye. *Egyptian Journal of Biological Pest Control, 36*, 12. https://doi.org/10.1186/s41938-026-00892-5

Ak, K., Eken, C., Güçlü, Ş., Genç, T., & Sekban, R. (2014). Laboratory and field evaluation of the entomopathogenic fungus *Conidiobolus coronatus* for controlling *Ricania simulans* (Walker) (Ricaniidae: Hemiptera). *Egyptian Journal of Biological Pest Control, 24*(2), 455–459.

Ak, K., Güçlü, Ş., Eken, C., & Sekban, R. (2015). *Ricania simulans* (Walker, 1851) (Hemiptera: Ricaniidae), a new pest for Turkey. *Türkiye Entomoloji Dergisi, 39*(2), 179–186. https://doi.org/10.16970/ted.94434

Ak, K., Uluca, M., Aydın, Ö., & Göktürk, T. (2019). Important invasive species and its pest status in Turkey: *Halyomorpha halys* (Stål) (Heteroptera: Pentatomidae). *Journal of Plant Diseases and Protection, 126*, 401–408. https://doi.org/10.1007/s41348-019-00243-7

Ak, K., Uluca, M., & Tunçer, C. (2023). Distribution and population density of *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae) in Black Sea Region of Türkiye. *Turkish Journal of Zoology, 47*(2), 120–129. https://doi.org/10.55730/1300-0179.3122

Akıner, M. M., Öztürk, M., Güney, İ., & Usta, A. (2020). Natural infection potential and efficacy of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* against *Orosanga japonica* (Melichar). *Egyptian Journal of Biological Pest Control, 30*, 68. https://doi.org/10.1186/s41938-020-00269-2

Akıner, M. M., Öztürk, M., & Sevgili, H. (2022). Invasion history of *Orosanga japonica* (Melichar, 1898) (Hemiptera: Ricaniidae) in Turkey, comparisons with other Ricaniidae family members using molecular tools and modeling of potential global distribution. *Turkish Journal of Entomology, 46*(1), 99–114. https://doi.org/10.16970/entoted.1022151

Altanlar, E., & Tuncer, C. (2023). Kahverengi kokarca [*Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae)]'ya karşı mücadelede kullanılan feromon ve tuzak tiplerinin etkinliğinin belirlenmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 38*(3), 473–492. https://doi.org/10.7161/omuanajas.1266702

Altanlar, E., Yeşildağ, E., & Tuncer, C. (2026). Kahverengi kokarca [*Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae)]'ya karşı biyoteknik

mücadelede kullanılan iki farklı feromon tipinin etkinliğinin karşılaştırılması. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 41*, 473–484. https://doi.org/10.7161/omuanajas.1619481

Altaş, K., & Ak, K. (2019). Effect of cultural management methods against fake butterfly [*Ricania japonica* (Hemiptera: Ricaniidae)]. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 20*(2), 229–238. https://doi.org/10.17474/artvinofd.583374

Arslangündoğdu, Z., & Hızal, E. (2019). New distribution area and host plants for invasive alien insect species, *Orosanga japonica* (Melichar) in Turkey (Hemiptera: Ricaniidae). *Entomologica Americana, 124*(1–4), 26–30. https://doi.org/10.1664/1947-5136-124.1.26

Bayramoğlu, Z., Biryol, S., & Demir, İ. (2025). Distribution of entomopathogenic fungi inducing natural infections in *Orosanga japonica* (Melichar, 1898) (Hemiptera: Ricaniidae) in the Eastern Black Sea Region of Türkiye. *Turkish Journal of Entomology, 49*(2), 201–211. https://doi.org/10.16970/entoted.1666058

Bebber, D. P., Ramotowski, M. A. T., & Gurr, S. J. (2013). Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change, 3*, 985–988. https://doi.org/10.1038/nclimate1990

Bellard, C., Jeschke, J. M., Leroy, B., & Mace, G. M. (2018). Insights from modeling studies on how climate change affects invasive alien species geography. *Ecology and Evolution, 8*, 5688–5700. https://doi.org/10.1002/ece3.4098

Bergmann, E. J., Venugopal, P. D., Martinson, H. M., Raupp, M. J., & Shrewsbury, P. M. (2016). Host plant use by the invasive *Halyomorpha halys* (Stål) on woody ornamental trees and shrubs. *PLOS ONE, 11*(3), e0149975. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149975

Biryol, S., Güney, E., Eski, A., Bayramoğlu, Z., Sezen, K., Demirbağ, Z., & Demir, İ. (2021). Development of mycoinsecticide formulations with *Beauveria bassiana* and *Metarhizium brunneum* for the control of *Orosanga japonica* (Hemiptera: Ricaniidae). *Annals of Applied Biology, 179*(3), 319–330. https://doi.org/10.1111/aab.12699

Blackburn, T. M., Pyšek, P., Bacher, S., Carlton, J. T., Duncan, R. P., Jarošík, V., … Richardson, D. M. (2011). A proposed unified framework for biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution, 26*, 333–339. https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.03.023

Bozkurt, V. (2018). İstilacı böcek türlerinin mücadelesinin yönetimi: *Anoplophora chinensis* (Forster, 1771) (Coleoptera: Cerambycidae) örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 4*(ENFİTO 2018 Özel Sayısı), 25–31. https://doi.org/10.21324/dacd.441390

Brockerhoff, E. G., Liebhold, A. M., Richardson, B., & Suckling, D. M. (2010). Eradication of invasive forest insects: concepts, methods, costs and benefits. *New Zealand Journal of Forestry Science, 40*, S117–S135.

Ciampitti, M., & Cavagna, B. (2014). Public awareness: a useful tool for the early detection and a successful eradication of the longhorned beetles *Anoplophora chinensis* and *A. glabripennis*. *EPPO Bulletin, 44*(2), 248–250. https://doi.org/10.1111/epp.12116

Çerçi, B., & Koçak, Ö. (2017). Further contribution to the Heteroptera (Hemiptera) fauna of Turkey with a new synonymy. *Acta Biologica Turcica, 30*(4), 121–127.

Demir, E. (2009). Ricania Germar, 1818 species of Western Palaearctic Region (Hemiptera: Fulgoromorpha: Ricaniidae). *Munis Entomology & Zoology, 4*(1), 271–275.

Demir, E. (2018). The economically important alien invasive planthoppers in Turkey (Hemiptera: Fulgoromorpha). *Acta Entomologica Slovenica, 26*(2), 233–242.

Diagne, C., Leroy, B., Vaissière, A.-C., Gozlan, R. E., Roiz, D., Jarić, I., … Courchamp, F. (2021). High and rising economic costs of biological invasions worldwide. *Nature, 592*, 571–576. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03405-6

Eker, S., Yaman, M., Ertürk, Ö., Sağlam Güvendik, T., & Algı, G. (2025). First record and identification of a microsporidian pathogen, *Nosema maddoxi*, in the population of brown marmorated stink bug *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in Türkiye. *Acta Parasitologica, 70*, 21. https://doi.org/10.1007/s11686-024-00963-3

EPPO. (2013). PM 9/16 (1) *Anoplophora chinensis*: procedures for official control. *EPPO Bulletin, 43*, 518–526. https://doi.org/10.1111/epp.12065

EPPO. (2016). PM 7/129 (1) DNA barcoding as an identification tool for a number of regulated pests. *EPPO Bulletin, 46*, 501–537.

Eroğlu, M., Coşkuner, K. A., & Usta, Y. (2017). *Anoplophora chinensis* (Forster, 1771) (Coleoptera: Cerambycidae) Trabzon'da; tanıtımı, gelişimi ve zararı. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 17*(4), 565–579. https://doi.org/10.17475/kastorman.287670

Erper, İ., Ak, K., Türkkan, M., Yıldırım, E., Alkan, M., & Özer, G. (2022). Potential of Turkish *Beauveria bassiana* isolates for the management of the polyphagous planthopper, *Orosanga japonica* Melichar 1898 (Hemiptera: Ricaniidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control, 32*, 104. https://doi.org/10.1186/s41938-022-00604-9

Fenn-Moltu, G., Ollier, S., Bates, O. K., Liebhold, A. M., Nahrung, H. F., Pureswaran, D. S., … Bertelsmeier, C. (2023). Global flows of insect transport and establishment: The role of biogeography, trade and regulations. *Diversity and Distributions, 29*, 1478–1491. https://doi.org/10.1111/ddi.13772

Gjonov, I. (2011). *Ricania japonica* Melichar, 1898 - a representative of family Ricaniidae (Homoptera, Fulgoromorpha), new to the fauna of Bulgaria. *ZooNotes, 23*, 1–3.

Göktürk, T. (2020). Determination of the lethal effects of some entomopathogens on *Orosanga japonica* (Melichar, 1898) (Hemiptera: Ricaniidae). *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi, 7*(3), 305–314. https://doi.org/10.19159/tutad.771088

Göktürk, T., & Mıhlı, A. (2015). Investigations on struggling with *Ricania simulans* (Walker, 1851) (Hemiptera: Ricaniidae), an important pest of the Eastern Black Sea coastlines. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 16*(1), 89–93. https://doi.org/10.17474/acuofd.44749

Güçlü, Ş., Ak, K., Eken, C., Akyol, H., Sekban, R., Beytut, B., & Yıldırım, R. (2010). Pathogenicity of *Lecanicillium muscarium* against *Ricania simulans*. *Bulletin of Insectology, 63*(2), 243–246.

Gümüş Minnetoğlu, E., & Turanlı, F. (2024). Biology of citrus long-horned beetle, *Anoplophora chinensis* (Forster, 1771) (Coleoptera: Cerambycidae) on hazelnut. *Türkiye Entomoloji Dergisi, 48*(3), 279–290. https://doi.org/10.16970/entoted.1428570

Güncan, A., & Gümüş, E. (2019). Brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Heteroptera, Pentatomidae), a new and important pest in Turkey. *Entomological News, 128*, 204–210.

Haack, R. A., Hérard, F., Sun, J., & Turgeon, J. J. (2010). Managing invasive populations of Asian longhorned beetle and citrus longhorned beetle: A worldwide perspective. *Annual Review of Entomology, 55*, 521–546. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-112408-085427

Hansen, L., Xu, T., Wickham, J., Chen, Y., Hao, D., Hanks, L. M., … Teale, S. A. (2015). Identification of a male-produced pheromone component of the citrus longhorned beetle, *Anoplophora chinensis*. *PLOS ONE, 10*(8), e0134358. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134358

Haye, T., Gariepy, T., Hoelmer, K., Rossi, J.-P., Streito, J.-C., Tassus, X., & Desneux, N. (2015). Range expansion of the invasive brown marmorated stinkbug, *Halyomorpha halys*: an increasing threat to field, fruit and vegetable crops worldwide. *Journal of Pest Science, 88*, 665–673.

Haye, T., Moraglio, S. T., Stahl, J., Visentin, S., Gregorio, T., & Tavella, L. (2020). Fundamental host range of *Trissolcus japonicus* in Europe. *Journal of Pest Science, 93*, 171–182.

Hérard, F., & Maspero, M. (2019). History of discoveries and management of the citrus longhorned beetle, *Anoplophora chinensis*, in Europe. *Journal of Pest Science, 92*, 117–130. https://doi.org/10.1007/s10340-018-1014-9

Hoebeke, E. R., & Carter, M. E. (2003). *Halyomorpha halys* (Stål) (Heteroptera: Pentatomidae): a polyphagous plant pest from Asia newly detected in North America. *Proceedings of the Entomological Society of Washington, 105*, 225–237.

Hoppe, B., Schrader, G., Kinkar, M., & Vos, S. (2019). Pest survey card on *Anoplophora chinensis*. *EFSA Supporting Publications, 16*(12), 1747E. https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.EN-1747

Hoyer-Tomiczek, U., & Sauseng, G. (2013). Sniffer dogs to find Anoplophora spp. infested plants. *Journal of Entomological and Acarological Research, 45*(s1), 10–12.

Hulme, P. E. (2009). Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. *Journal of Applied Ecology, 46*, 10–18. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01600.x

Hızal, E., Arslangündoğdu, Z., Göç, A., & Ak, M. (2015). Türkiye istilacı yabancı böcek faunasına yeni bir kayıt: *Anoplophora chinensis* (Forster, 1771) (Coleoptera: Cerambycidae). *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 65*(1), 7–10.

Ismaylova, G. (2021). New record of *Orosanga japonica* (Melichar, 1898) (Hemiptera: Fulgoromorpha: Ricaniidae) from Azerbaijan. *Punjab University Journal of Zoology, 36*(2), 141–145. https://doi.org/10.17582/journal.pujz/2021.36.2.141.145

Kan, E., Akgün, M., & Turan, A. (2024). Kahverengi kokarca [*Halyomorpha halys* Stal (Hemiptera: Pentatomidae)] zararının fındığın fiziksel özellikleri üzerine etkisi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14*(3), 1654–1664. https://doi.org/10.31466/kfbd.1462141

Karataş, A., Karataş, A., Yavuz, N., & Genç, M. (2020). Distribution and activity period of the invasive *Orosanga japonica* (Melichar, 1898) (Hemiptera: Ricaniidae) in Turkey. *Zoology in the Middle East, 66*(3), 246–252. https://doi.org/10.1080/09397140.2020.1793502

Keena, M. A., Moore, P. M., & Bradford, G. (2021). Effects of temperature on *Anoplophora chinensis* (Coleoptera: Cerambycidae) adult survival, reproduction, and egg hatch. *Forests, 12*(4), 432. https://doi.org/10.3390/f12040432

Keena, M. A., & Richards, J. Y. (2022). Effects of temperature on *Anoplophora chinensis* (Coleoptera: Cerambycidae) larvae and pupae. *Environmental Entomology, 51*(1), 153–166. https://doi.org/10.1093/ee/nvab129

Kriticos, D. J., Kean, J. M., Phillips, C. B., Senay, S. D., Acosta, H., & Haye, T. (2017). The potential global distribution of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, a critical threat to plant biosecurity. *Journal of Pest Science, 90*, 1033–1043. https://doi.org/10.1007/s10340-017-0869-5

Lee, D.-H., Short, B. D., Joseph, S. V., Bergh, J. C., & Leskey, T. C. (2013). Review of the biology, ecology, and management of *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in China, Japan, and the Republic of Korea. *Environmental Entomology, 42*(4), 627–641. https://doi.org/10.1603/EN13006

Leskey, T. C., & Nielsen, A. L. (2018). Impact of the invasive brown marmorated stink bug in North America and Europe: history, biology, ecology, and management. *Annual Review of Entomology, 63*, 599–618. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043226

Liebhold, A. M., Brockerhoff, E. G., Garrett, L. J., Parke, J. L., & Britton, K. O. (2012). Live plant imports: the major pathway for forest insect and pathogen invasions of the US. *Frontiers in Ecology and the Environment, 10*, 135–143. https://doi.org/10.1890/110198

Lingafelter, S. W., & Hoebeke, E. R. (2002). *Revision of Anoplophora (Coleoptera: Cerambycidae)*. Washington, DC: Entomological Society of Washington.

Lockwood, J. L., Cassey, P., & Blackburn, T. (2005). The role of propagule pressure in explaining species invasions. *Trends in Ecology & Evolution, 20*, 223–228. https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.02.004

Lowenstein, D. M., Andrews, H., Mugica, A., & Wiman, N. G. (2019). Sensitivity of the egg parasitoid *Trissolcus japonicus* (Hymenoptera: Scelionidae) to field and laboratory-applied insecticide residue. *Journal of Economic Entomology, 112*(5), 2077–2084. https://doi.org/10.1093/jee/toz127

Morrison, W. R., III, Blaauw, B. R., Short, B. D., Nielsen, A. L., Bergh, J. C., Krawczyk, G., … Leskey, T. C. (2019). Successful management of *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in commercial apple orchards with an attract-and-kill strategy. *Pest Management Science, 75*, 104–114.

Musolin, D. L., Konjević, A., Karpun, N. N., Protsenko, V. Y., Ayba, L. Y., & Saulich, A. K. (2018). Invasive brown marmorated stink bug *Halyomorpha halys* (Stål) (Heteroptera: Pentatomidae) in Russia, Abkhazia, and Serbia: History of invasion, range expansion, early stages of establishment, and first records of damage to local crops. *Arthropod-Plant Interactions, 12*, 517–529. https://doi.org/10.1007/s11829-017-9583-8

Nielsen, A. L., Hamilton, G. C., & Matadha, D. (2008). Developmental rate estimation and life table analysis for *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). *Environmental Entomology, 37*(2), 348–355.

Nixon, L. J., Acebes-Doria, A. L., Kirkpatrick, D., & Leskey, T. C. (2024). Influence of deployment method and maintenance on efficacy of sticky card traps for *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). *Journal of Economic Entomology, 117*(5), 2003–2008. https://doi.org/10.1093/jee/toae192

Oğuzoğlu, Ş., Harman, İ., & Avcı, M. (2024). Current situation of citrus longhorned beetle [*Anoplophora chinensis* (Forster, 1771)] (Coleoptera: Cerambycidae) in Türkiye and the world. *Turkish Journal of Forestry, 25*, 145–155. https://doi.org/10.18182/tjf.1408357

Özdemir, İ. O., Şilbir, M. F., Karadağ, E., Alaybay, A., Özer, G., Tortorici, F., … Doğan, F. (2025). Low natural parasitism of the invasive *Halyomorpha halys* versus strong native suppression of *Palomena prasina*: evidence from a three-year survey in Northwestern Türkiye. *Insects, 16*(12), 1212. https://doi.org/10.3390/insects16121212

Özdemir, İ. O., & Tuncer, C. (2021). Türkiye'de yeni bir istilacı polifag zararlı, kahverengi kokarca [*Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae)]: Tanımı, benzer türler ve mevcut durum. *Black Sea Journal of Engineering and Science, 4*(2), 58–67. https://doi.org/10.34248/bsengineering.844095

Özpınar, A., & Yıldırım, S. (2025). Çatalpınar (Ordu) ilçesinde fındık zararlısı *Halyomorpha halys* (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae)'ın bazı biyolojik özelliklerinin belirlenmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 13*(2), 363–371. https://doi.org/10.33202/comuagri.1699211

Paini, D. R., Sheppard, A. W., Cook, D. C., De Barro, P. J., Worner, S. P., & Thomas, M. B. (2016). Global threat to agriculture from invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 113*, 7575–7579. https://doi.org/10.1073/pnas.1602205113

Park, J., & Jung, S. (2021). Taxonomic review of the family Ricaniidae (Hemiptera: Auchenorrhyncha: Fulgoroidea) from Korea. *Journal of Asia-Pacific Entomology, 24*(4), 1286–1300. https://doi.org/10.1016/j.aspen.2021.08.019

Pyšek, P., Hulme, P. E., Simberloff, D., Bacher, S., Blackburn, T. M., Carlton, J. T., … Richardson, D. M. (2020). Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews, 95*(6), 1511–1534. https://doi.org/10.1111/brv.12627

Rice, K. B., Bergh, C. J., Bergmann, E. J., Biddinger, D. J., Dieckhoff, C., Dively, G., … Tooker, J. F. (2014). Biology, ecology, and management of brown marmorated stink bug (Hemiptera: Pentatomidae). *Journal of Integrated Pest Management, 5*(3), A1–A13. https://doi.org/10.1603/IPM14002

Rider, D. A. (2006). Family Pentatomidae Leach, 1815. In B. Aukema & C. Rieger (Eds.), *Catalogue of the Heteroptera of the Palaearctic Region, Volume 5* (ss. 233–402). Netherlands Entomological Society.

Sánchez-Bayo, F. (2021). Indirect effect of pesticides on insects and other arthropods. *Toxics, 9*, 177. https://doi.org/10.3390/toxics9080177

Sevim, A., Demir, İ., Höfte, M., Humber, R. A., & Demirbağ, Z. (2010). Isolation and characterization of entomopathogenic fungi from hazelnut-growing region of Turkey. *BioControl, 55*, 279–297. https://doi.org/10.1007/s10526-009-9235-8

Simaz, O., Michaelson, J., Wilson, J., Talamas, E. J., Gut, L., Pote, J., & Szűcs, M. (2023). Field releases of the exotic parasitoid *Trissolcus japonicus* (Hymenoptera: Scelionidae) and survey of native parasitoids attacking *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in Michigan. *Environmental Entomology, 52*(6), 998–1007. https://doi.org/10.1093/ee/nvad102

Sjöman, H., Östberg, J., & Nilsson, J. (2014). Review of host trees for the wood-boring pests *Anoplophora glabripennis* and *Anoplophora chinensis*: an urban forest perspective. *Arboriculture & Urban Forestry, 40*(3), 143–164.

Stahl, J. M., Tortorici, F., Pontini, M., Bon, M.-C., Hoelmer, K. A., Marazzi, C., … Haye, T. (2019). First discovery of adventive populations of *Trissolcus japonicus* in Europe. *Journal of Pest Science, 92*, 371–379.

Stoeckli, S., Felber, R., & Haye, T. (2020). Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model. *International Journal of Biometeorology, 64*, 2019–2032. https://doi.org/10.1007/s00484-020-01992-z

Talamas, E. J., Herlihy, M. V., Dieckhoff, C., Hoelmer, K. A., Buffington, M., Bon, M.-C., & Weber, D. C. (2015). *Trissolcus japonicus* (Ashmead) (Hymenoptera, Scelionidae) emerges in North America. *Journal of Hymenoptera Research, 43*, 119–128.

Topakçı, N., Yükselbaba, U., & Göçmen, H. (2017). Detection and identification of citrus long-horned beetle, *Anoplophora chinensis* (Forster, 1771), a new pest in Antalya Province, Turkey by sequencing of mtCOI region. *Türkiye Entomoloji Dergisi, 41*(3), 325–331. https://doi.org/10.16970/ted.01714

Tozlu, E., Saruhan, İ., Tozlu, G., Kotan, R., Dadaşoğlu, F., & Tekiner, N. (2019). Potentials of some entomopathogens against the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control, 29*, 76. https://doi.org/10.1186/s41938-019-0176-y

Tuncer, C., Seçer, A. O., Özdemir, İ. O., Özer, G., Alkan, M., Maspero, M., & De Gregorio, T. (2026). Efficacy of selected commercial bio-products in disrupting symbiont acquisition and survival of *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). *Entomologia Experimentalis et Applicata, 174*(7), 764–773. https://doi.org/10.1111/eea.70101

Turan, A., & Erdoğan, V. (2022). Spread and damage of citrus longhorned beetle [*Anoplophora chinensis* (Forster, 1771) (Coleoptera: Cerambycidae)] to hazelnut orchards in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 10*(4), 531–535. https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i4.531-535.4480

Uluca, M., Tuncer, C., Walton, V., Dalton, D. T., Park, K. R., & Özdemir, İ. O. (2026). Phenology-linked damage dynamics of *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) on hazelnut orchards in Eastern and Middle Black Sea of Türkiye and Oregon State of the United States: Insights for seasonal-adaptive integrated pest management. *Journal of Economic Entomology, 119*(3), 2351–2364. https://doi.org/10.1093/jee/toag080

Van der Gaag, D. J., Sinatra, G., Roversi, P. F., Loomans, A., Hérard, F., & Vukadin, A. (2010). Evaluation of eradication measures against *Anoplophora chinensis* in early stage infestations in Europe. *EPPO Bulletin, 40*(2), 176–187. https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2010.02381.x

Walther, G.-R., Roques, A., Hulme, P. E., Sykes, M. T., Pyšek, P., Kühn, I., … Settele, J. (2009). Alien species in a warmer world: Risks and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution, 24*(12), 686–693. https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.008

Weber, D. C., Morrison, W. R., Khrimian, A., Rice, K. B., Leskey, T. C., Rodriguez-Saona, C., … Blaauw, B. R. (2017). Chemical ecology of *Halyomorpha halys*: discoveries and applications. *Journal of Pest Science, 90*, 989–1008.

Yang, Z.-Q., Yao, Y.-X., Qiu, L.-F., & Li, Z.-X. (2009). A new species of *Trissolcus* (Hymenoptera: Scelionidae) parasitizing eggs of *Halyomorpha halys* in China with comments on its biology. *Annals of the Entomological Society of America, 102*(1), 39–47.

Yıldız, Y. (2017). *Anoplophora chinensis* (Forster, 1771) (Coleoptera: Cerambycidae) reported at a new location in Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research, 15*(4), 111–116.

Zhou, Y., Ge, X., Liu, J., Zou, Y., Guo, S., Wang, T., & Zong, S. (2022). Climate change effects on the global distribution and range shifts of citrus longhorned beetle *Anoplophora chinensis*. *Journal of Applied Entomology, 146*(5), 473–485. https://doi.org/10.1111/jen.12996

BÖLÜM 6

Türkiye'de Fındık Bahçelerinde Bulunan Yazıcıböcekler (Coleoptera: Curculıonıdae: Scolytınae)'in Tür Çeşitliliği Ekonomik Önemi ve Entegre Yönetimi

Kibar Ak[1]
Furkan Harun Baş[2]

[1] Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kenevir Araştırmaları Enstitüsü
ORCID: 0000-0002-8004-2686
[2] Ondokuzmayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü Körfez mah., 55270, Atakum, Samsun, Türkiye.

1. GİRİŞ

Kabuk ve ambrosia böcekleri (bark and ambrosia beetles), Coleoptera takımı, Curculionidae familyasının Scolytinae altfamilyasında yer alan ve yaşamlarını büyük ölçüde odunsu bitkilerle ilişkili olarak sürdüren, ekolojik ve ekonomik açıdan önemli bir böcek grubudur. Türlerin büyük çoğunluğu zayıflamış, ölmekte olan veya yeni ölmüş odunsu bitkilerde kolonize olarak doğal ekosistemlerde organik maddenin parçalanmasına ve besin döngüsüne katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, bazı türler canlı veya fizyolojik stres altındaki bitkilerde kolonize olarak önemli ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Geniş konukçu dizisine sahip olmaları, simbiyotik mantarlarla ilişkileri ve bazı türlerin istilacı özellik göstermesi, özellikle ambrosia böceklerinin tarım ve ormancılık açısından önemini artırmaktadır (Hulcr ve Stelinski, 2017; Ranger ve ark., 2016; Gugliuzzo ve ark., 2021).

Kabuk böcekleri ile ambrosia böcekleri aynı altfamilya içerisinde değerlendirilmekle birlikte, beslenme biçimleri ve konukçu dokularında oluşturdukları galeriler bakımından farklılık göstermektedir. Kabuk böcekleri çoğunlukla kabuk altında floem ve kambiyuma yakın dokularda gelişirken, ambrosia böcekleri ksilem dokusuna girerek galeriler açmakta ve bu galerilerde geliştirdikleri simbiyotik mantarlarla beslenmektedir. Ambrosia böceklerinin çoğunda dişiler, bu mantarları mikangiyum (mycangium) adı verilen özelleşmiş yapılarda taşıyarak yeni konukçulara bulaştırmaktadır. Galeri açılması; iletim dokularının zarar görmesi, özsu akışı, dal ve gövdelerde zayıflama, kurumalar ve yoğun bulaşmalarda bitki ölümüyle sonuçlanabilmektedir. Dolayısıyla ambrosia böceklerinin zararı, galeri açma faaliyetinin yanı sıra simbiyotik mantarlarla olan ilişkileri ve bazı durumlarda ikincil mikroorganizmaların etkileriyle birlikte değerlendirilmelidir (Hulcr ve Stelinski, 2017; Ranger ve ark., 2016).

Bu türlerde konukçu seçimi ve koloni kuruluşu, bitkinin fizyolojik durumuyla yakından ilişkilidir. Kuraklık, aşırı su, yetersiz drenaj, don, kök zararı, mekanik yaralanma ve hastalıklar bitki savunmasını zayıflatarak özellikle ambrosia böceklerine duyarlılığı artırabilir. Stres altındaki odunsu bitkilerde oluşan etanol, *Xylosandrus germanus* ve bazı diğer türler için güçlü bir konukçu bulma sinyalidir; ancak etanole yönelim ve kolonizasyon başarısı türlere göre değişmektedir (Ranger ve ark., 2010, 2013, 2015; Cavaletto ve ark., 2023). Bu nedenle yönetimde popülasyon izlemesi; dengeli su yönetimi, etkin drenaj, yaralanmaların önlenmesi ve kolonize materyalin uzaklaştırılmasıyla birlikte ele alınmalıdır (Ranger ve ark., 2016, 2021; Gugliuzzo ve ark., 2021).

Özellikle geniş konukçu dizisine sahip istilacı ambrosia böcekleri, farklı yetiştirme ortamlarında kolonize olabilmeleri nedeniyle önemli bitki sağlığı sorunları arasında yer almaktadır (Ranger ve ark., 2016; Gugliuzzo ve ark., 2021). Bu geniş konukçu ve zarar potansiyeli, çok yıllık odunsu bir kültür bitkisi olan fındık (*Corylus avellana* L.) açısından da önem taşımaktadır. Nitekim güncel

çalışmalar, *Anisandrus dispar*, *Hypothenemus eruditus*, *Xyleborinus saxesenii* ve *Xylosandrus germanus* gibi türlerin farklı ülkelerdeki fındık bahçelerinde de bulunduğunu ve tür yoğunluklarının bahçe yönetimi ile izleme yöntemlerine göre değişebildiğini göstermektedir (Cresta ve ark., 2025a).

Türkiye'de fındık bahçelerindeki yazıcıböceklere ilişkin çalışmalar ağırlıklı olarak Karadeniz Bölgesi'nde yürütülmüştür. İlk araştırmalar türlerin biyolojisi, yayılışı ve zarar durumuna odaklanmış; özellikle zayıflamış bitkilerde ve drenaj sorunu bulunan bahçelerde zararın arttığını göstermiştir (Işık, 1984; Işık ve ark., 1987; Tuncer ve Ecevit, 1997). Orta ve Doğu Karadeniz'de popülasyon yoğunluğu ile zarar düzeyinin yıl, bahçe ve yetiştirme kuşağına göre değiştiği; sonraki çalışmalarda ise ergin uçuşlarının farklı tuzak ve etanol cezbedici düzenekleriyle izlenebildiği belirlenmiştir (Saruhan ve Tuncer, 2001; Ak ve ark., 2005a, b, c; Saruhan ve Akyol, 2013; Ak ve ark., 2014). Batı Karadeniz'den elde edilen güncel bulgular, sorunun bölgedeki fındık üretim alanlarında sürdüğünü göstermektedir (Karayiğit ve ark., 2023).

Fındık bahçelerinde kaydedilen Scolytinae türlerinin tümü yaygınlık, kolonizasyon yeteneği ve ekonomik zarar bakımından eşdeğer değildir. *Anisandrus dispar*, *Xylosandrus germanus* ve *Xyleborinus saxesenii* canlı ya da fizyolojik stres altındaki fındık dokularını kolonize edebilmeleri nedeniyle başlıca zararlı türlerdir. *Hypothenemus eruditus* çoğunlukla önceden ölmüş dallarda gelişirken bazı türler yalnızca seyrek olarak kaydedilmiştir (Tuncer ve ark., 2017). Bu nedenle ekonomik önem; tuzak yakalamalarına dayanılarak değil, doğru teşhis, canlı dokuda koloni kuruluşu, bulaşıklık düzeyi ve meydana gelen gerçek zararın birlikte değerlendirilmesiyle belirlenmelidir.

Bu kitap bölümünde, fındık bahçelerinde belirlenen Scolytinae türleri genel olarak değerlendirilmiş; bunlar içerisinde öne çıkan *Anisandrus dispar* (*Xyleborus dispar*), *Xylosandrus germanus*, *Xyleborinus saxesenii* ve *Hypothenemus eruditus* türleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Türlerin güncel taksonomik durumları, önemli sinonimleri, morfolojik özellikleri, dünyadaki ve Türkiye'deki yayılışları, konukçuları ve biyolojilerinin yanı sıra fındıktaki zarar durumları ve ekonomik önemleri, popülasyon dinamikleri, izleme yöntemleri ve mücadele yaklaşımları mevcut ulusal ve uluslararası literatür ışığında değerlendirilmiştir.

2. FINDIK BAHÇELERİNDE BULUNAN YAZICIBÖCEK TÜRLERİ

Türkiye'de fındık bahçelerinde yürütülen çalışmalar, farklı Scolytinae türlerinin bu agroekosistemde bulunduğunu, ancak türlerin yaygınlık ve zarar oluşturma potansiyellerinin önemli ölçüde farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur (Ak ve ark., 2005a, b, c; Tuncer ve ark., 2017). Güncel taksonomik değerlendirmelerde *Anisandrus dispar*, *Xylosandrus germanus* ve *Xyleborinus saxesenii* fındıkta ekonomik açıdan öne çıkan türler olarak değerlendirilirken, *Hypothenemus eruditus*'un daha çok önceden ölmüş dallarda kolonize olduğu;

bazı diğer Scolytinae türlerinin ise fındık bahçelerinde nadir olarak bulunduğu bildirilmiştir (Tuncer ve ark., 2017). Türkiye'de fındık bahçelerinde belirlenen başlıca Scolytinae türleri ve önem durumları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye'de fındık bahçelerinde belirlenen Scolytinae türleri ve önem durumları.

Tür	Fındık bahçelerindeki durumu	Önem durumu	Başlıca kaynaklar
Anisandrus dispar (Fabricius, 1792)	Yaygın; canlı veya fizyolojik olarak zayıflamış fındık dokularında kolonize olabilir.	Önemli zararlı	Işık, 1984; Ak ve ark., 2005a, b, c; Tuncer ve ark., 2017
Xylosandrus germanus (Blandford, 1894)	Fındık bahçelerinde yaygın olarak belirlenmiş; canlı veya stres altındaki dokularda kolonize olabilir.	Önemli zararlı	Ak ve ark., 2005b, c; Tuncer ve ark., 2017
Xyleborinus saxesenii (Ratzeburg, 1837)	Fındık bahçelerinde yaygın olarak belirlenmiş ve popülasyon izleme çalışmalarında kaydedilmiştir.	Önemli zararlı	Saruhan ve Akyol, 2013; Ak ve ark., 2014; Tuncer ve ark., 2017
Hypothenemus eruditus (Westwood, 1834)	Yaygın bulunabilir; daha çok önceden ölmüş dallarda kolonize olur.	Canlı fındık dokusunda ekonomik önemi sınırlı	Tuncer ve ark., 2017
Hypoborus ficus Erichson, 1836	Fındık bahçelerinde tespit edilmiştir.	Nadir tür	Tuncer ve ark., 2017
Taphrorychus ramicola Reitter, 1895	Fındık bahçelerinde tespit edilmiştir.	Nadir tür	Tuncer ve ark., 2017
Taphrorychus hirtellus Eichhoff, 1878	Fındık bahçelerinde tespit edilmiştir.	Nadir tür	Tuncer ve ark., 2017

Tablo 1'e göre, Türkiye'de fındık bahçelerinde belirlenen Scolytinae türlerinin hepsi aynı ekonomik öneme sahip değildir. *A. dispar, X. germanus ve X. saxesenii* fındıkta ekonomik açıdan öne çıkan başlıca türler iken, H. eruditus yaygın bulunabilmesine rağmen daha çok önceden ölmüş dallarda kolonize olmakta; *H. ficus, T. ramicola ve T. hirtellus* ise fındık bahçelerinde nadir bulunan türler olarak bildirilmiştir (Tuncer ve ark., 2017). Türkiye'de öne çıkan *A. dispar, X. germanus, X. saxesenii* ve *H. eruditus* türünün İtalya ve Gürcistan'daki fındık bahçelerinde de tespit edilmiş olması, bu türlerin farklı fındık üretim alanlarındaki varlığını ortaya koymaktadır (Cresta ve ark., 2025b). Bununla birlikte, türlerin fındıktaki ekonomik önemleri yalnızca bulunma sıklığı veya popülasyon yoğunluğuna göre değil, canlı dokuda kolonize olma yetenekleri ve

oluşturdukları zarar düzeyi birlikte dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Fındık bahçelerinde belirlenen türler arasında *X. germanus* yüksek zarar potansiyeli, *A. dispar* ise yaygınlığı bakımından öne çıkmaktadır.

3. TÜRKİYE'DE FINDIK BAHÇELERİNDE BULUNAN BAŞLICA YAZICIBÖCEK TÜRLERİ

3.1. *Anisandrus dispar* (Fabricius, 1792)

3.1.1. Taksonomisi ve Tanınması

Anisandrus dispar (Fabricius, 1792) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae: Xyleborini), odunsu bitkilerin ksilem dokusunda galeri açan ve galerilerinde geliştirdiği simbiyotik mantarlarla beslenen ambrosia böceklerinden biridir. Tür, eski literatürde ve Türkiye'de fındık bahçelerinde yürütülen ilk çalışmalarda çoğunlukla *Xyleborus dispar* (Fabricius, 1792) adıyla bildirilmiştir (Işık, 1984; Ak ve ark., 2005b, c). Güncel taksonomik değerlendirmelerde ise *Anisandrus dispar* geçerli ad olarak kullanılmakta, *Xyleborus dispar* sinonim olarak kabul edilmektedir (Tuncer ve ark., 2017; Gomez ve ark., 2018). Türkiye fındık bahçelerinde tür teşhislerinin yeniden değerlendirilmesi, Scolytinae üyelerinde doğru teşhisin zararlı türlerin belirlenmesi ve mücadele kararları açısından önemini de ortaya koymuştur (Tuncer ve ark., 2017).

Türde belirgin eşeysel dimorfizm bulunmaktadır. Dişiler erkeklerden daha iri, koyu kahverengi-siyah renkli ve silindirik yapıda olup yaklaşık 3-4 mm uzunluğundadır; erkekler ise daha küçük, kısa ve yuvarlağa yakın vücut yapısına sahiptir **(Şekil 1 a ve b).** Erkeklerin arka kanatları indirgenmiş olduğundan uçma yetenekleri yoktur. Dişilerde pronotumun ön kısmındaki dişçikler ile elitra ve elitra eğiminin yapısı tanıda kullanılan başlıca morfolojik karakterler arasındadır (Tuncer ve ark., 2017; Gomez ve ark., 2018). Fındık zararlıları açısından türün tanınmasında özellikle dişi bireylerin morfolojik özellikleri önem taşımakta; erkek bireylerin bazı diğer Scolytinae türleriyle karıştırılabilmesi nedeniyle güncel teşhis anahtarlarının kullanılması önerilmektedir (Tuncer ve ark., 2017).



Şekil 1. Anisandrus dispar'ın erkek (a) ve dişi bireyleri (b).

3.1.2. Dünyada ve Türkiye'de Yayılışı

Anisandrus dispar, Palearktik bölgede geniş yayılış gösteren bir ambrosia böceğidir. Tür Avrupa ve Asya'da doğal olarak bulunurken, Kuzey Amerika'ya sonradan taşınarak yerleşmiş ve Kanada ile Amerika Birleşik Devletleri'nin birçok bölgesinden kaydedilmiştir (Pfeffer, 1995; Gomez ve ark., 2018; Ruzzier ve ark., 2023). Türkiye'nin de içinde bulunduğu doğal yayılış alanının genişliği yanında, türün farklı coğrafi popülasyonlarının insan faaliyetleriyle bu alan içerisinde taşınabildiğine ilişkin bulgular bulunmaktadır. Nitekim Kuzeydoğu İtalya'da belirlenen ve moleküler olarak incelenen bireylerin Avrupa'daki bilinen popülasyonlardan farklı, muhtemelen Asya kökenli bir haplotipe sahip olması, *A. dispar*'da doğal yayılış alanı içerisinde de insan eliyle popülasyon hareketlerinin gerçekleşebildiğini göstermiştir (Ruzzier ve ark., 2023).

Türkiye'de A. dispar farklı coğrafi bölgelerde yayılış göstermekte ve çok sayıda ilden bildirilmektedir. Türün Adana, Ankara, Artvin, Bartın, Bolu, Bursa, Çorum, Denizli, Düzce, Giresun, Gümüşhane, Hatay, İstanbul, Karabük, Kastamonu, Muğla, Niğde, Ordu, Rize, Sakarya, Samsun, Trabzon ve Zonguldak'ın yanı sıra Batı Akdeniz Bölgesi'nden kayıtları bulunmaktadır (Tuncer ve ark., 2017). Bu kayıtlar, türün Türkiye'de yalnızca fındık yetiştirilen Karadeniz kuşağıyla sınırlı olmadığını, farklı ekolojik koşullarda da bulunduğunu göstermektedir.

Fındık üretim alanlarında A. dispar özellikle Karadeniz Bölgesi'nde uzun süredir bilinmektedir. Erken dönem araştırmalar türün Orta ve Doğu Karadeniz fındık bahçelerindeki varlığını ve zararını ortaya koymuş; sonraki çalışmalar bölgedeki yaygınlığını doğrulamıştır (Işık, 1984; Işık ve ark., 1987; Ak ve ark., 2005a, b, c; Tuncer ve ark., 2017). Orta İtalya'da türün fındıktaki biyoekolojisi ve uçuş etkinliği incelenmiş (Bucini ve ark., 2005; Speranza ve ark., 2009); İtalya ve Gürcistan'da 2023–2024 yıllarında yürütülen güncel bir çalışmada ise her iki ülkenin fındık bahçelerinde saptanmış ve İtalya'daki tuzak yakalamaları daha yüksek bulunmuştur (Cresta ve ark., 2025a).

3.1.3. Konukçuları

Anisandrus dispar geniş konukçu dizisine sahip polifag bir ambrosia türüdür ve başta geniş yapraklı ağaçlar olmak üzere çok sayıda odunsu bitkide yaşayabilmektedir. Meyve ağaçları ve sert kabuklu meyve türleri ekonomik açıdan önemli konukçuları arasında yer almakta; elma, armut, erik, kiraz, kestane ve fındık gibi bitkilerde kayıtları bulunmaktadır. Šenfeldová et al. (2024), karşılaştırmalı analizlerinde de türün konukçu çeşitliliğinin oldukça yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bir bitkinin konukçu olarak kaydedilmesi her koşulda aynı düzeyde zarar göreceği anlamına gelmemekte; koloni oluşturma başarısı bitkinin fizyolojik durumu ve konukçu türüne göre değişebilmektedir. Nitekim aşırı su stresine maruz bırakılan farklı ağaç taksonlarıyla yürütülen deneysel bir çalışmada *A. dispar* stres altındaki ağaçlara saldıran ambrosia böcekleri arasında yer almış, kontrol bitkilerinde ise saldırı görülmemiştir (Cambronero-Heinrichs ve ark., 2024).

Fındık, *A. dispar*'ın Türkiye'de ekonomik önem kazandığı başlıca konukçulardan biridir. Özellikle zayıflamış veya fizyolojik stres altındaki ocak ve dallarda koloninin arttığı, drenaj problemi bulunan bahçelerde yazıcıböcek zararının daha belirgin hâle gelebildiği bildirilmektedir (Tuncer ve Ecevit, 1997; Tuncer ve ark., 2017). Stres altındaki odunsu bitkilerin ambrosia böceklerine duyarlılığının deneysel olarak da gösterilmiş olması, fındık bahçelerinde bitki sağlığı ve su yönetiminin önemini desteklemektedir (Cambronero-Heinrichs ve ark., 2024). İtalya ve Gürcistan'daki güncel fındık bahçesinde yapılan araştırmalar da *A. dispar'*ın bu agroekosistemlerde düzenli olarak bulunduğunu ve özellikle İtalya'daki bahçelerde dikkat çeken bir bileşen olduğunu göstermektedir (Cresta ve ark., 2025a).

3.1.4. Biyolojisi

Anisandrus dispar'ın yaşam döngüsü, ambrosia böceklerine özgü böcek–mantar ilişkisiyle yakından bağlantılıdır. Döllenmiş dişiler uygun konukçu dokusuna girerek ksilem içerisinde galeriler açmakta ve mikangiyumlarında taşıdıkları simbiyotik mantarları galeri yüzeylerine bulaştırmaktadır. Larva ve erginlerin temel besin kaynağını doğrudan odun dokusu değil, galerilerde geliştirilen ambrosia mantarları oluşturmaktadır. *A. dispar* ile ilişkili başlıca simbiyotik mantar *Ambrosiella hartigii* olup, mantarın dişilerin mikangiyumlarında taşındığı ve böceğin beslenme ve üreme biyolojisinde önemli rol oynadığı uzun süredir bilinmektedir (French & Roeper, 1975; Happ ve ark., 1976; Mayers ve ark., 2015). Türkiye'de de Samsun fındık bahçelerinden elde edilen *A. dispar* dişilerinin mikangiyum ve diğer vücut kısımlarından yapılan izolasyonlarda *A. hartigii* yoğun olarak belirlenmiş ve türün temel simbiyotik mantarı olduğu ortaya konulmuştur (Tuncer ve ark., 2018).

Tür, kışı esas olarak galeri içerisinde ergin dişi olarak geçirir. İlkbaharda sıcaklıkların yükselmesiyle kışlayan dişiler galerilerden çıkarak yeni konukçulara yönelir. Türkiye'de Ordu ve Samsun'da fındık bahçelerinde yapılan izleme çalışmalarında *A. dispar* erginlerinin özellikle mart-mayıs döneminde yoğunlaştığı ve uçuşların sıcaklık artışıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir (Saruhan ve Akyol, 2013). Bu mevsimsel aktivite yabancı literatürle de uyumludur. İtalya'nın Güney Tirol elma üretim alanlarında 2018-2024 yıllarını kapsayan uzun süreli izleme çalışmasında dişi uçuşunun tüm yıllarda esas olarak şubat sonu-mayıs sonu arasında gerçekleştiği, ancak uçuş başlangıcının fenolojik olarak erken ve geç bölgeler arasında farklılaşabildiği bildirilmiştir (Wolf ve Gruber, 2025). Bu bulgular, ilkbahar uçuş döneminin popülasyon izlemesi ve mücadele zamanlaması bakımından kritik olduğunu göstermektedir.

Dişi tarafından oluşturulan ana galeride yumurtalar bırakılır; larvalar galerilerde gelişen simbiyotik mantarla beslenerek pupa ve ergin dönemine ulaşır. Erkekler uçamaz ve çiftleşme büyük ölçüde galeri sistemi içerisinde gerçekleşir. Yeni nesil döllenmiş dişiler uygun dönemde galerileri terk ederek yeni konukçulara dağılır. Türkiye fındık koşullarında türün biyolojisi ve mevsimsel aktivitesi üzerine yapılan çalışmalar, popülasyonun yıl ve lokasyona bağlı olarak

değişebilmekle birlikte ilkbahar uçuşunun belirgin olduğunu göstermektedir (Işık, 1984; Ak ve ark., 2005c; Saruhan ve Akyol, 2013).

3.1.5. Fındıkta Zarar Şekli ve Ekonomik Önemi

Anisandrus dispar fındık dallarının odun dokusuna girerek açtığı galeriler ve bu galerilerde geliştirdiği simbiyotik mantarlar nedeniyle zarar oluşturur. Giriş delikleri çoğunlukla küçük ve yuvarlak olup yoğun kolonizasyonda aynı dal üzerinde çok sayıda delik görülebilir. Galerilerin ksilem içerisinde ilerlemesi, iletim dokularının işlevini bozarak sürgün ve dallarda akıntıya, zayıflama, solma ve kurumaya; ağır bulaşmalarda ise ocakların önemli ölçüde gerilemesine yol açabilir **(Şekil 2 a, b ve c)**. Türkiye'de fındık bahçelerinde özellikle zayıflamış bitkilerin yoğun şekilde kolonize edilebildiği ve zamanla ölebileceği bildirilmiştir (Tuncer ve Ecevit, 1997; Tuncer ve ark., 2017).



Şekil 2. Anisandrus dispar'ın fındık dalındaki giriş deliği ve meydana gelen akıntı (a, b ve c).

Zarar yalnızca galeri açılmasıyla sınırlı değildir. Ambrosia böceklerinin galerilere taşıdığı simbiyotik mantarlar beslenmenin temelini oluştururken, böceklerin vücudunda veya galerilerinde bitki patojeni ya da diğer mantarlar da bulunabilmektedir. Samsun fındık bahçelerinden toplanan *A. dispar* bireylerinde

Ambrosiella hartigii yanında *Fusarium* spp., *Ophiostoma* spp. ve farklı mantarların izole edilmiş olması, zarar sürecinde böcek-mantar ilişkilerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Tuncer ve ark., 2018). Ancak bu mantarların tamamının fındıkta doğrudan hastalık etmeni olduğu veya A. dispar zararını aynı ölçüde artırdığı sonucuna yalnızca izolasyon verilerinden ulaşılamaz.

Türün Türkiye'deki ekonomik önemi hem yaygınlığı hem de fındıkta canlı veya fizyolojik olarak zayıflamış dokuları kolonize edebilmesiyle ilişkilidir. Tuncer et al. (2017), *A. dispar*'ı *X. germanus* ve *X. saxesenii* ile birlikte Türkiye fındık bahçelerinin en yaygın zararlı Scolytinae türleri arasında değerlendirmiştir. Akçakoca'da saptanan yüksek bahçe bulaşıklığı da türün Batı Karadeniz'deki güncel önemini göstermektedir (Karayiğit ve ark., 2023). Uluslararası bulgular da bu değerlendirmeyi desteklemektedir: İtalya ve Gürcistan fındık bahçelerinde *A. dispar* her iki ülkede de kaydedilmiş; İtalya'daki daha yüksek bulunma düzeyi ve ince fındık dallarını kolonize edebilme yeteneği nedeniyle potansiyel etkisinin dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir (Cresta ve ark., 2025a). Bununla birlikte, 2024 yılında farklı stresli ağaç taksonlarında yapılan deneysel çalışma, ambrosia böceklerinin saldırı ve üreme başarısının hem böcek türüne hem de konukçu taksonuna bağlı olarak değiştiğini göstermiştir; bu nedenle *A. dispar*'ın zarar potansiyeli bahçe ve bitki koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir (Cambronero-Heinrichs ve ark., 2024).

3.1.6. Mücadelesi

Anisandrus dispar'ın yaşam dönemlerinin büyük bölümünü odun dokusundaki galerilerde geçirmesi doğrudan mücadeleyi güçleştirir. Yönetimde bahçe sağlığının korunması, ergin uçuşunun izlenmesi ve uygun dönemde uygulanacak yöntemlerin birlikte kullanılması gerekir. Aşırı nem ve drenaj sorunlarının giderilmesi, bitki stresinin azaltılması ile zararlı tarafından yoğun biçimde kolonize edilmiş veya kurumuş dalların bahçeden uzaklaştırılması başlıca kültürel uygulamalardır (Tuncer ve Ecevit, 1997; Tuncer ve ark., 2017).

Türkiye'de fındık bahçelerinde popülasyonların izlenmesi ve erginlerin yakalanmasında etanol cezbedicili kırmızı kanatlı yapışkan tuzaklardan yararlanılmıştır (Şekil 3). Ordu ve Samsun'da yürütülen çalışmalarda bu tuzaklarla *A. dispar*'ın ilkbahar uçuşu izlenmiş ve farklı tuzak tiplerinin performansları değerlendirilmiştir (Saruhan ve Akyol, 2013; Ak ve ark., 2014). Yabancı fındık literatürü de tuzak tasarımının yakalama sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebildiğini göstermektedir. İtalya ve Gürcistan'daki 2023-2024 fındık bahçesi çalışmasında etanol cezbedicili farklı tuzak tipleri karşılaştırılmış; İtalya'da kırmızı huni tipindeki el yapımı tuzağın ticari çok hunili tuzaktan daha yüksek yakalama performansı gösterdiği bildirilmiştir (Cresta ve ark., 2025a). Bu sonuçlar, yakalama sayılarının yorumlanmasında tuzak tipinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Erginlerin yeni konukçuya girişinden önceki uçuş dönemi, dışarıda bulunan bireylere ulaşılabilmesi açısından mücadelede en uygun dönemdir; ancak tuzaklama tek başına yeterli bir mücadele yöntemi olarak değil, izleme ve entegre yönetimin bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 3. Kırmızı kanatlı yapışkan Anisandrus dispar tuzağı ve yakalanan erginler.

A. dispar'a karşı yerli entomopatojen mantar izolatlarının laboratuvar koşullarında yüksek mortalite oluşturması biyolojik mücadele açısından umut vericidir; ancak bunların etkinliği uygun formülasyon ve uygulama zamanı belirlenerek arazi denemeleriyle doğrulanmalıdır (Kushiyev ve ark., 2022).

Simbiyotik mantarın hedeflenmesi de alternatif bir yaklaşım olarak araştırılmıştır. *A. dispar*'ın temel besin kaynağı olan *A. hartigii*'nin gelişiminin bazı fungisitler tarafından laboratuvar koşullarında güçlü biçimde baskılandığı gösterilmiştir (Erper ve ark., 2019). Bununla birlikte bu bulgular, söz konusu fungisitlerin *A. dispar*'a karşı doğrudan arazi mücadelesinde etkili olduğu anlamına gelmemektedir. Mevcut veriler birlikte değerlendirildiğinde, fındıkta *A. dispar* yönetiminin temelini bitki stresini azaltan kültürel uygulamalar, bulaşık materyalin uzaklaştırılması ve ilkbahar uçuşunun etanol cezbedicili tuzaklarla izlenmesi oluşturmalı; biyolojik ve mantar hedefli yeni yaklaşımlar ise saha koşullarında doğrulanarak entegre mücadeleye dahil edilmelidir.

3.2. *Xylosandrus germanus* (Blandford, 1894)

3.2.1. Taksonomisi ve Tanınması

Xylosandrus germanus (Blandford, 1894) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae: Xyleborini), odunsu bitkilerin ksilem dokusunda galeriler açan ve galerilerinde geliştirdiği simbiyotik mantarlarla beslenen polifag bir ambrosia böceğidir. Tür ilk olarak *Xyleborus germanus* Blandford, 1894 adıyla tanımlanmış, daha sonraki taksonomik değerlendirmelerle *Xylosandrus* cinsine aktarılmıştır; *Xyleborus germanus* günümüzde sinonim olarak kabul edilmektedir. Türkiye fındık bahçelerinde yapılan kapsamlı taksonomik değerlendirmelerde *X. germanus*, *Anisandrus dispar* ve *Xyleborinus saxesenii* ile birlikte başlıca zararlı Scolytinae türleri arasında belirlenmiş; özellikle geçmiş

kayıtlardaki tür karışıklıkları nedeniyle doğru teşhisin fındık zararlılarının değerlendirilmesi ve mücadele kararları açısından önemi vurgulanmıştır (Tuncer ve ark., 2017; Gomez ve ark., 2018).

Türde belirgin eşeysel dimorfizm bulunmaktadır. Ergin dişiler yaklaşık 2.0–2.3 mm uzunluğunda, silindirik ve sağlam yapılı olup olgunlaştıklarında koyu kahverengi-siyah renktedir; erkekler daha küçük, açık renkli ve uçma yeteneğinden yoksundur (Şekil 4 a ve b). Dişilerde pronotumun ön yarısı asperitlerle kaplı, arka kısmı parlak ve noktalıdır; elitra üzerinde uzunlamasına nokta sıraları belirgindir. *Xylosandrus* cinsinin ayırt edilmesinde ön koksaların (procoxae) geniş biçimde birbirinden ayrılmış olması önemli bir karakterdir. Türkiye fındık bahçelerindeki türlerin ayrımında *X. germanus*'un ön koksaları arasındaki açıklığın anten scapusunun genişliğinden fazla olması ve pronotum tabanının parlak yapısı, benzer görünümlü türlerden ayrılmasında kullanılan başlıca morfolojik özellikler arasındadır (Tuncer ve ark., 2017; Gomez ve ark., 2018).



Şekil 4. Xylosandrus germanus'un erkek (a) ve dişi bireyleri (b).

3.2.2. Dünyada ve Türkiye'de Yayılışı

Xylosandrus germanus Doğu Asya kökenli istilacı bir ambrosia böceğidir. Doğal yayılış alanı Çin'in doğusu, Kore Yarımadası, Japonya, Tayvan ve Vietnam'ı kapsamaktadır. Tür, uluslararası odun ve bitki ticaretiyle doğal yayılış alanı dışına taşınmış; Kuzey Amerika, Avrupa ve Yeni Zelanda'da yerleşik popülasyonlar oluşturmuştur. Avrupa'daki ilk kayıt 1950'li yıllarda Almanya'dan bildirilmiş olmakla birlikte, tarihsel ve genetik bulgular türün Japonya'dan Almanya'ya daha erken dönemde odun materyaliyle taşınmış olabileceğine işaret etmektedir. Özellikle 2000'li yıllardan sonra Avrupa'daki

yayılışı hızlanmış ve çok sayıda ülkede kaydedilmiştir (Galko ve ark., 2019; Riba-Flinch ve ark., 2022).

Türkiye'de *X. germanus*'un doğrulanmış erken kayıtlarından biri Ordu ili kivi bahçelerinden gelmektedir. Ak et al. (2011), 2010 yılında kivi bahçesinde yürüttükleri çalışmada türü bütün örneklenen bahçelerde belirlemiş ve *A. dispar*'dan daha yaygın olduğunu bildirmiştir. Bu kayıt daha sonraki taksonomik değerlendirmelerde türün Türkiye'deki muhtemel ilk kaydı olarak değerlendirilmiştir (Tuncer ve ark., 2017). EPPO kayıtlarında da Türkiye için ilk kayıt yılı 2011 olarak verilmektedir. Bununla birlikte eski faunistik bildirişlerde adlandırma ve teşhis sorunları bulunduğundan, Türkiye'deki erken dönem kayıtları güncel teşhis anahtarları ışığında değerlendirmek gerekmektedir (Ak ve ark., 2011; Tuncer ve ark., 2017).

Fındık bahçelerinde ise *X. germanus*'un 2013 yılından itibaren Düzce, Ordu ve Samsun'da yoğun olarak bulunduğu ve zarar yaptığı bildirilmiştir (Tuncer ve ark., 2020). Daha geniş örneklemelere dayanan çalışma, türü *A. dispar* ve *X. saxesenii* ile birlikte Türkiye fındık bahçelerinin en yaygın zararlı Scolytinae türlerinden biri olarak ortaya koymuştur (Tuncer ve ark., 2017). Samsun fındık bahçelerinden elde edilen bireyler üzerinde mantar florası ve entomopatojen mantarlar üzerine yapılan çalışmalar da türün bölgede yerleşmiş ve fındıkla güçlü biçimde ilişkili bir popülasyona sahip olduğunu göstermektedir (Tuncer ve ark., 2018; Kushiyev ve ark., 2022).

3.2.3. Konukçuları

Xylosandrus germanus son derece geniş konukçu dizisine sahip polifag bir türdür. Dünya genelinde 50'den fazla familyaya ait 200'ün üzerinde ağaç ve çalı türü konukçu olarak bildirilmiştir. Konukçu listesinde *Acer*, *Alnus*, *Betula*, *Carpinus*, *Castanea*, *Fagus*, *Juglans*, *Prunus*, *Quercus*, *Salix*, *Ulmus* ve *Corylus* gibi çok sayıda geniş yapraklı odunsu bitkinin yanı sıra bazı iğne yapraklı türler de bulunmaktadır. Tür orman ağaçları, fidanlık ve süs bitkileri, meyve bahçeleri, yeni kesilmiş odun ve depolanmış kereste üzerinde gelişebilmektedir; ancak ince kabuklu geniş yapraklı odunsu bitkilerin daha sık saldırıya uğradığı bildirilmektedir (Ranger ve ark., 2016; Galko ve ark., 2019; Riba-Flinch ve ark., 2022).

Geniş konukçu dizisine karşın konukçunun fizyolojik durumu saldırı olasılığını önemli ölçüde etkilemektedir. *X. germanus* özellikle taban suyu, kuraklık, don, kök zararı ve diğer biyotik veya abiyotik stresler nedeniyle fizyolojik olarak zayıflayan odunsu bitkilere yönelmektedir. Stres altındaki dokulardan salınan etanol, dişilerin konukçu bulmasında güçlü bir kairomon görevi görmektedir. Kontrollü çalışmalar, özellikle aşırı su stresinin bitkilerde etanol üretimini artırarak *X. germanus* saldırısını teşvik edebildiğini göstermiştir (Ranger ve ark., 2013; Ranger ve ark., 2016; Galko ve ark., 2019). Bununla birlikte Türkiye fındık bahçelerindeki gözlemlerde zayıflamış ağaçların yanında sağlıklı görünümlü ağaçlarda da saldırı kaydedildiğinden, fındıkta konukçu seçimini yalnızca görünür stres belirtileriyle açıklamak uygun değildir (Tuncer ve ark., 2020).

Fındık (*Corylus avellana*), Türkiye'de *X. germanus*'un ekonomik önem kazandığı başlıca kültür bitkilerinden biridir. Türkiye'deki fındık kayıtlarının yanı sıra türün konukçu dizisinin genişliği, çevredeki ormanlık alanlar, çit bitkileri, meyve ağaçları ve diğer odunsu konukçuların fındık bahçelerindeki popülasyonların sürekliliğine katkıda bulunabileceğini düşündürmektedir. Bu nedenle bahçe içindeki bitki sağlığı kadar çevredeki potansiyel konukçu kaynaklarının da popülasyon yönetiminde dikkate alınması gerekmektedir (Ak ve ark., 2011; Tuncer ve ark., 2017; Tuncer ve ark., 2020).

3.2.4. Biyolojisi

Xylosandrus germanus'un yaşam döngüsü diğer ambrosia böceklerinde olduğu gibi simbiyotik mantar ilişkisine dayanır. Döllenmiş dişiler uygun odunsu dokuya yaklaşık 1 mm çapında giriş deliği açarak ksilem içerisinde galeri ve genişlemiş kuluçka odaları oluşturur. Galeri açılışı sırasında mikangiyumlarında taşıdıkları ambrosia mantarını galeri yüzeylerine bulaştırır; larva ve erginlerin temel besinini odun dokusu değil, burada gelişen mantar oluşturur. Güncel taksonomik çalışmalarda X. germanus'un başlıca mutualistik mantarı Ambrosiella grosmanniae olarak tanımlanmaktadır (Mayers ve ark., 2015; Ranger ve ark., 2016; Ruzzier ve ark., 2021). Türkiye'de Samsun ilinde fındık bahçelerinden elde edilen X. germanus dişilerinin mikangiyum ve vücut kısımlarından yapılan izolasyonlarda ise *Ambrosiella hartigii* yoğun olarak belirlenmiş ve çalışmada temel simbiyotik mantar olarak değerlendirilmiştir (Tuncer ve ark., 2018). Bu adlandırma farklılığı, Ambrosiella türlerinin daha sonraki moleküler ve taksonomik revizyonları dikkate alınarak yorumlanmalıdır.

Tür kışı esas olarak konukçu içerisindeki galerilerde ergin, çoğunlukla döllenmiş dişi halinde geçirir. İlkbaharda sıcaklıkların yükselmesiyle dişiler galerilerden çıkar ve yeni konukçulara yönelir. Uçuş aktivitesinin başlamasında sıcaklık önemli olup birçok bölgede 18-20 °C civarındaki sıcak günlerle aktivitenin arttığı bildirilmektedir. Türkiye fındık bahçelerinde erginlerin ilkbahardan sonbahara kadar uzun bir dönem görülebildiği; Tuncer et al. (2020) tarafından genel olarak nisan başından eylüle kadar aktif oldukları bildirilmiştir. Türün döl sayısı iklim ve bölgeye göre değişmektedir; Orta Avrupa'da çoğunlukla bir, daha sıcak bölgelerde iki veya daha fazla döl gelişebilmektedir (Weber & McPherson, 1983; Galko ve ark., 2019; Ruzzier ve ark., 2021).

Galeri içerisinde yumurtadan çıkan larvalar genellikle üç larva dönemi geçirerek yaklaşık bir ay içerisinde ergin döneme ulaşabilir. Cinsiyet oranı belirgin biçimde dişiler lehinedir; erkekler küçük, kanatsız ve çoğunlukla galeri içerisinde kalır. Yeni nesil dişiler kardeş erkeklerle galeri içerisinde çiftleşir ve döllenmiş dişiler yeni konukçulara dağılarak yeni koloniler oluşturur. Bu haplodiploid ve akraba çiftleşmesine dayalı üreme sistemi, tek bir döllenmiş dişinin yeni bir alanda popülasyon başlatabilmesini kolaylaştıran özelliklerden biridir (Weber & McPherson, 1983; Ito ve ark., 2017; Ranger ve ark., 2016).

Konukçu seçiminde etanolun rolü türün biyolojisinin en dikkat çekici özelliklerinden biridir. Fizyolojik stres altındaki ağaçların dokularında oluşan ve dışarı salınan etanol, uçan dişiler tarafından uygun konukçu göstergesi olarak

kullanılmaktadır. Ayrıca etanolun yalnızca böceği cezbetmekle kalmayıp simbiyotik mantarın gelişimini destekleyerek mantar bahçesinin kurulmasına katkıda bulunabildiği gösterilmiştir (Ranger ve ark., 2013; Ranger ve ark., 2018; Galko ve ark., 2019). Bu ilişki, fındık bahçelerinde drenaj, kök sağlığı, don ve diğer stres faktörlerinin X. germanus popülasyonları açısından neden önemli olabileceğini açıklayan biyolojik temeli oluşturmaktadır.

3.2.5. Fındıkta Zarar Şekli ve Ekonomik Önemi

Xylosandrus germanus fındık gövde ve dallarında açtığı küçük giriş delikleri ve ksilem içerisindeki galeri sistemiyle doğrudan zarar oluşturur. Yeni saldırılarda giriş deliği çevresinde açık renkli talaş veya sıkıştırılmış ince odun artığının kürdan benzeri çıkıntılar halinde görülmesi tipik belirtilerden biridir; ilkbaharda bazı giriş deliklerinden özsu sızıntısı da görülebilir. Yoğun kolonizasyon iletim dokularının işlevini bozarak sürgün ve dallarda zayıflama, solma, geriye doğru ölüm ve ileri durumlarda bitkinin yanmış bir görüntü almasına neden olarak tamamen kurumasına yol açabilir (Ak ve ark., 2011; Tuncer ve ark., 2020; Ruzzier ve ark., 2021) (Şekil 5 a, b ve c).



Şekil 5. Xylosandrus germanus'un giriş delikleri, çıkardığı talaşlar ve konukçuda ani kuruma (a, b ve c).

Zarar sürecinde böcek–mantar ilişkisi de önem taşımaktadır. *X. germanus* galeri sistemine besin mantarı taşırken vücudunda farklı mantarları da bulundurabilmektedir. Samsun fındık bahçelerinden toplanan *X. germanus* ve *A. dispar* bireylerinden Ambrosiella yanında *Fusarium* spp., *Ophiostoma* spp., *Pestalotiopsis* spp. ve çeşitli diğer mantarların izole edildiği bildirilmiştir (Tuncer ve ark., 2018). Bununla birlikte, izolasyon yoluyla bir mantarın böcek üzerinde veya mikangiyumda belirlenmesi, o mantarın fındıkta doğrudan hastalık oluşturduğunu veya zarar şiddetini artırdığını tek başına kanıtlamaz; bu ilişkilerin patojenisite çalışmalarıyla doğrulanması gerekir.

Türkiye açısından *X. germanus*'un önemi son yıllarda belirgin biçimde artmıştır. Tuncer et al. (2017), türü *A. dispar* ve *X. saxesenii* ile birlikte fındık bahçelerinin en yaygın zararlı Scolytinae türlerinden biri olarak

değerlendirmiştir. Tuncer et al. (2020) ise türün 2013'ten itibaren Düzce, Ordu ve Samsun fındık bahçelerinde yoğun olarak bulunduğunu, yoğun bulaşmalarda bitkilerde geriye doğru ölüm görülebildiğini ve kısa süre içerisinde ekonomik öneme sahip istilacı bir zararlı haline geldiğini bildirmiştir. Bu durum, *X. germanus*'un Türkiye fındık agroekosistemlerinde yalnızca faunistik bir kayıt değil, izlenmesi ve yönetilmesi gereken önemli bir zararlı olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte zarar potansiyeli bahçe koşullarından bağımsız değerlendirilmemelidir. Uluslararası çalışmalar, *X. germanus* saldırılarının çoğunlukla fizyolojik stres altındaki ağaçlarda yoğunlaştığını ve aşırı su, don, kuraklık, kök bozuklukları veya diğer streslerin saldırı riskini artırabildiğini göstermektedir (Ranger ve ark., 2013; Ranger ve ark., 2016). Türkiye fındık bahçelerinde sağlıklı görünümlü ağaçlarda da saldırı bildirilmiş olması, görünür belirti göstermeyen fizyolojik streslerin veya yerel popülasyon özelliklerinin de dikkate alınması gerektiğini düşündürmektedir (Tuncer ve ark., 2020).

3.2.6. Mücadelesi

Xylosandrus germanus ile mücadele, yumurta, larva, pupa ve ergin dönemlerinin önemli bölümünü odun dokusu içerisindeki galerilerde geçirmesi nedeniyle güçtür. Bu nedenle yönetimin temelini böcek konukçuya girdikten sonra yapılan uygulamalardan çok, bitki stresinin azaltılması, bulaşık materyalin uzaklaştırılması ve ergin uçuşunun izlenmesi oluşturmalıdır. Fındık bahçelerinde uygun sulama ve drenajın sağlanması, kök ve gövde yaralanmalarının azaltılması, kuruyan veya yoğun bulaşık dalların kesilerek bahçeden uzaklaştırılması ve bahçe içinde üreme kaynağı olabilecek ölü odunsu materyalin bırakılmaması başlıca kültürel önlemler arasında değerlendirilmelidir (Ak ve ark., 2011; Ranger ve ark., 2016; Tuncer ve ark., 2020).

Popülasyon izlemesinde etanol cezbedicili tuzaklar *X. germanus* için en yaygın kullanılan araçlardandır. Etanol, stresli konukçuların salgıladığı temel konukçu bulma sinyallerinden biri olduğundan, etanol cezbedicili tuzaklar ergin dişi uçuşunun başlangıcını ve mevsimsel seyrini belirlemede etkilidir (Şekil 6). Tuzakların özellikle düşük yüksekliklerde ve bahçe–orman sınırına yakın noktalarda yüksek yakalama sağlayabildiği bildirilmiştir (Ranger ve ark., 2016; Agnello ve ark., 2017). Türkiye'de türün kivi bahçelerindeki erken kayıtları ve fındıktaki yayılışının belirlenmesinde de etanol temelli örnekleme ve saha gözlemleri önemli rol oynamıştır (Ak ve ark., 2011; Tuncer ve ark., 2017). Ancak izleme tuzaklarının varlığı tek başına popülasyonun ekonomik olarak baskılanacağı anlamına gelmemekte; kitlesel yakalama etkinliği yerel koşullarda ayrıca değerlendirilmelidir.



Şekil 6. Xylosandrus germanus'un kırmızı kanatlı yapışkan tuzakta yakalanması.

Kimyasal mücadelede en önemli sınırlama, böceğin galeriye girdikten sonra insektisitlerden büyük ölçüde korunmasıdır. Bu nedenle dışarıda bulunan ve yeni konukçu arayan dişilerin hedeflenebildiği uçuş dönemi kritik önemdedir. Bununla birlikte farklı ülkelerde gövde uygulamalarıyla yürütülen denemelerde sonuçların değişken ve çoğu zaman sınırlı olduğu bildirilmiştir (Agnello ve ark., 2017). Sürdürülebilir yönetim çalışmalarında verbenon gibi uzaklaştırıcı yarıokimyasalların etanol cezbedicilerle birlikte kullanıldığı "it–çek" yaklaşımları da araştırılmış; bazı denemelerde *X. germanus* yakalamalarında belirgin azalmalar elde edilmesine karşın sonuçların saha ve uygulama koşullarına bağlı olarak değişebildiği görülmüştür (Gugliuzzo ve ark., 2021).

X. germanus'a karşı yerli entomopatojen mantar izolatları laboratuvar koşullarında umut verici bulunmuştur; arazi etkinliği, formülasyon ve uygulama zamanına ilişkin veriler elde edilmeden uygulamaya yönelik kesin bir değerlendirme yapılmamalıdır (Kushiyev ve ark., 2022).

Simbiyotik mantarın hedeflenmesi de alternatif bir yaklaşım olarak ele alınmıştır. Türkiye'de yapılan çalışmalarda *X. germanus* ile ilişkili Ambrosiella izolatlarının bazı fungisitlere duyarlılığı laboratuvar koşullarında değerlendirilmiştir (Erper ve ark., 2018; Tuncer ve ark., 2018). Ancak simbiyotik mantarın laboratuvarda baskılanması, söz konusu ürünlerin fındık bahçesinde böceğe karşı doğrudan etkili bir mücadele yöntemi olduğu anlamına gelmemektedir. Mevcut bilgiler birlikte değerlendirildiğinde, fındıkta *X. germanus* yönetiminin temelini bitki stresini azaltan kültürel uygulamalar, bulaşık odunsu materyalin uzaklaştırılması ve ergin uçuşunun etanol cezbedicili tuzaklarla izlenmesi oluşturmalı; biyolojik mücadele, uzaklaştırıcı yarıokimyasallar ve mantar hedefli yaklaşımlar ise saha koşullarında doğrulandıktan sonra entegre mücadele programlarına dahil edilmelidir.

3.3. *Xyleborinus saxesenii* (Ratzeburg, 1837)

3.3.1. Taksonomisi ve Tanınması

Xyleborinus saxesenii (Ratzeburg, 1837) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae: Xyleborini), çok sayıda odunsu bitkinin ksilem dokusunda galeri açan polifag bir ambrosia böceğidir. Tür eski kaynaklarda *Xyleborus saxesenii* veya *Xyleborus saxeseni* adlarıyla da yer almış, güncel sınıflandırmada *Xyleborinus saxesenii* adı kabul edilmiştir. Türkiye fındık bahçeleri açısından türün taksonomik olarak doğru tanınması özel önem taşımaktadır. Tuncer et al. (2017), önceki çalışmalarda *X. saxesenii*'nin özellikle *Lymantor coryli* ve muhtemelen *Xyleborus xylographus* ile karıştırıldığını; *X. saxesenii*'nin fındık bahçelerinde doğru olarak teşhis edilmesinin ancak daha sonraki çalışmalarda mümkün olduğunu bildirmiştir. Bu durum, Türkiye'de yazıcıböceklerle ilgili eski kayıtların güncel teşhis anahtarları ışığında değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Tuncer ve ark., 2017).

Türde belirgin eşeysel dimorfizm bulunur. Dişiler yaklaşık 2.0-2.4 mm, erkekler ise 1.6-1.8 mm uzunluğundadır. Erginler genel olarak ince yapılı; açık kahverengiden koyu kahverengiye değişen renktedir ve elitra çoğu zaman pronotumdan daha koyu görünebilir (Şekil 7). Pronotumun ön kenarında belirgin yükselmiş dişler yerine yüzeye yatık asperiteler bulunur. Türün en dikkat çekici teşhis karakterlerinden biri skutellumun küçük, konik ve düğme benzeri yapıda olması ve bir kıl demeti tarafından kısmen örtülmesidir. Elitra eğiminin çevresinde küçük sivri dişçikler bulunmasına karşın, eğimdeki 1., 2. ve 3. strialarda dişçik bulunmaması Türkiye fındık bahçelerinde karşılaşılan benzer türlerden ayrılmasında yararlı bir karakterdir (Tuncer ve ark., 2017). Kuzey Amerika teşhis anahtarlarında da dişilerde elitra eğimindeki interstrial dişçiklerin biçimi ve vücut uzunluğu türün *Xyleborinus* cinsindeki yakın türlerden ayrılmasında kullanılmaktadır (Gomez ve ark., 2018).



Şekil 7. Xyleborinus saxesenii ergini.

3.3.2. Dünyada ve Türkiye'de Yayılışı

Xyleborinus saxesenii (Ratzeburg, 1837), geniş coğrafi yayılışa sahip kozmopolit bir ambrosia böceğidir. Tür Avrupa ve Asya'nın yanı sıra Afrika, Kuzey ve Güney Amerika ile Avustralya, Yeni Zelanda ve çeşitli Pasifik adalarından bildirilmiştir (Wood and Bright, 1992; Gomez ve ark., 2018). Farklı zoocoğrafik bölgelerde bulunması, türün dünya genelinde yaygın bir dağılışa sahip olduğunu göstermektedir.

Türkiye'de *X. saxesenii* geniş bir yayılışa sahiptir. Türün farklı bölgelerden kayıtları bulunmakla birlikte, özellikle Karadeniz Bölgesi ve fındık yetiştiriciliğinin yoğun olduğu alanlardaki eski kayıtlar değerlendirilirken geçmişteki teşhis sorunlarının dikkate alınması gerekmektedir. Erken dönem fındık çalışmalarında *Anisandrus dispar*, *Hypothenemus eruditus*, *Lymantor coryli* ve *Xyleborus xylographus* bildirilmiş, ancak *X. saxesenii* kaydedilmemiştir (Işık ve ark., 1987; Ak ve ark., 2005a, b). Daha sonraki değerlendirmeler, bu kayıtların bir bölümünün *X. saxesenii*'nin hatalı teşhis edilmesinden kaynaklandığını göstermiştir (Tuncer ve ark., 2017; Tuncer ve ark., 2017).

Özellikle Karadeniz Bölgesi'nde daha önce L. coryli olarak bildirilen bazı örneklerin ve bu türe atfedilen zarar belirtilerinin gerçekte *X. saxesenii*'ye ait olduğu ortaya konulmuştur (Tuncer ve ark., 2017; Tuncer ve ark., 2017). Benzer şekilde, Türkiye'den *X. xylographus* adıyla verilen eski kayıtların da ihtiyatla değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Tuncer et al. (2017), Nearktik yayılış gösteren *X. xylographus*'un Türkiye'deki varlığının doğrulanamadığını ve önceki çalışmalarda bu adla bildirilen örneklerin büyük olasılıkla *X. saxesenii* olduğunu ifade etmiştir. Aynı çalışmada *L. coryli*'nin Türkiye fındık bahçelerinde nadir bulunan bir tür olduğu, buna karşılık *X. saxesenii*'nin yaygın türler arasında yer aldığı gösterilmiştir. Bu nedenle, *X. saxesenii*'nin Türkiye'deki geçmiş yayılış kayıtları değerlendirilirken, *L. coryli* ve *X. xylographus* adları altında verilmiş olabilecek hatalı kayıtların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Güncel taksonomik değerlendirmeler ise *X. saxesenii*'nin Türkiye fındık bahçelerinde *Anisandrus dispar* ve *Xylosandrus germanus* ile birlikte yaygın olarak bulunan başlıca ambrosia böceklerinden biri olduğunu göstermektedir (Tuncer ve ark., 2017).

3.3.3. Konukçuları

Xyleborinus saxesenii geniş konukçu dizisine sahip polifag bir türdür. Avrupa ve diğer bölgelerde kızılağaç, kayın, dişbudak, ceviz, elma, armut, erik, kiraz, şeftali, kestane, meşe ve fındık başta olmak üzere çok sayıda geniş yapraklı ağaçta; daha seyrek olarak bazı iğne yapraklılarda kaydedilmiştir. Tür çoğunlukla fizyolojik olarak zayıflamış, kurumakta olan veya yeni kesilmiş odunsu materyali kolonize etmekle birlikte, uygun koşullarda canlı bitkilere de giriş yapabilmektedir. Etanolün stres altındaki odunsu bitkilerden salınan önemli bir konukçu bulma sinyali olduğu ve *X. saxesenii* erginlerinin etanole belirgin yönelim gösterdiği deneysel olarak ortaya konulmuştur (Chen, 2021). Yakın zamanda, aşırı su stresine maruz bırakılan farklı ağaç taksonlarıyla yürütülen deneysel çalışmada da *X. saxesenii* stres altındaki ağaçları kolonize eden

ambrosia böcekleri arasında belirlenmiştir (Cambronero-Heinrichs ve ark., 2024). Bu bulgular, türün geniş konukçu kullanımının yanında konukçunun fizyolojik durumunun da kolonizasyon sürecinde önemli olduğunu göstermektedir.

Fındık (*Corylus avellana* L.) bitkisi de türün önemli konukçuları arasındadır. Türkiye'de Ordu ve Samsun fındık bahçelerinde yapılan uzun süreli tuzaklamalarda *X. saxesenii* popülasyonlarının yüksek düzeylere ulaşabildiği belirlenmiş ve tür fındıkta zarar oluşturan başlıca ambrosia böcekleri arasında değerlendirilmiştir (Saruhan ve Akyol, 2013; Tuncer ve ark., 2017). Fındık bahçelerinde bitkilerin fizyolojik durumu, yaşlı ve zayıf dalların varlığı, yüksek toprak nemi ve bahçenin çevresindeki odunsu konukçu kaynakları kolonizasyon riskini etkileyebilecek unsurlar olarak dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte, bu çevresel faktörlerin X. saxesenii üzerindeki etkisi her bahçe için doğrudan varsayılmamalı, yerel popülasyon ve bitki sağlığı verileriyle birlikte değerlendirilmelidir.

3.3.4. Biyolojisi

Xyleborinus saxesenii'nin biyolojisi, diğer ambrosia böceklerinde olduğu gibi odun dokusu içerisinde geliştirilen simbiyotik mantarlarla yakından ilişkilidir. Galeri oluşturan dişi, konukçunun ksilem dokusuna girerek bir giriş galerisi açar; galeri ilerledikçe tür için karakteristik olan geniş bir yavru odası oluşabilir (Şekil 8 a, b, c). Dişi, taşıdığı ambrosia mantarlarını yeni galeriye aktarır; galeri yüzeylerinde gelişen bu mantarlar larva ve erginlerin temel besin kaynağını oluşturur. *Xyleborinus saxesenii* galerilerinde yapılan çalışmalarda, *Raffaelea sulfurea* ve *Fusicolla acetilerea* yeni galeri oluşturan dişiler tarafından taşınan başlıca mantar türleri arasında belirlenmiştir. Bunlardan özellikle *R. sulfurea*'nın yumurta bırakma ve larva gelişimini olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir (Biedermann ve ark., 2013). Ayrıca *X. saxesenii*'de mantarların yeni galerilere taşınmasında yalnızca özelleşmiş mantar taşıma yapılarının (mikangiyumların) değil, sindirim kanalının ön bölümünün (ön bağırsak) rol oynayabildiği bildirilmektedir (Francke-Grosmann, 1975; Biedermann ve ark., 2013).



Şekil 8. Xyleborinus saxesenii'nin giriş deliği, çevresi ve odun içindeki galerileri (a, b ve c).

Xyleborinus saxesenii'nin üreme sistemi haplodiploidi ve galeri içerisinde kardeşler arasında gerçekleşen çiftleşme ile karakterizedir. Bu üreme sisteminde döllenmiş yumurtalardan dişiler, döllenmemiş yumurtalardan ise erkekler gelişir ve yeni nesilde dişiler belirgin biçimde çoğunluktadır (Biedermann, 2010). Galeriler genellikle çiftleşmiş tek bir dişi tarafından kurulmaktadır (Biedermann ve ark., 2013). Erkekler az sayıda olup dişilerden daha küçük ve uçma yeteneğinden yoksundur. Biedermann (2010), laboratuvar koşullarında incelenen galerilerde 0–3 erkek bulunduğunu ve erkeklerin yeni nesil dişiler olgunlaşıncaya kadar galeri içerisinde kaldığını belirlemiştir. Çiftleşme büyük ölçüde ana galeri içerisinde kardeşler arasında gerçekleşmekte ve dişilerin çoğu galeriden çiftleşmiş olarak ayrılmaktadır (Biedermann, 2010). Bu üreme özelliği nedeniyle, çiftleşmiş tek bir dişinin yeni bir alana ulaşması uygun koşullarda yeni bir popülasyonun kurulması için yeterli olabilmektedir (Biedermann ve ark., 2013). Türkiye'de fındık bahçelerinde yapılan çalışmalar, *Xyleborinus saxesenii*'nin ergin uçuş döneminin *Anisandrus dispar*'dan belirgin biçimde farklı olduğunu göstermektedir. Samsun ve Ordu'da 2005–2007 yıllarında yürütülen çalışmalarda, *A. dispar*'ın kışlamış erginlerinin yoğun olarak ilkbaharda, özellikle mart–mayıs aylarında uçuş gösterdiği; *X. saxesenii*'nin ergin uçuşlarının ise daha çok yaz döneminde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Samsun'da *X. saxesenii* erginlerinin yoğun uçuşu genel olarak haziran sonu ile ağustos başı arasında gerçekleşmiş ve en yüksek yakalamalar çoğunlukla temmuz ve ağustos aylarında kaydedilmiştir. Ordu'da da benzer şekilde ergin uçuşlarının yaz aylarında yoğunlaştığı ve en yüksek yakalamaların temmuz–ağustos döneminde gerçekleştiği bildirilmiştir (Saruhan ve Akyol, 2012, 2013). Samsun ili Terme ilçesindeki fındık bahçelerinde aynı dönemde yürütülen çalışmalarda *X. saxesenii* erginlerinin etil alkole yöneldiği ve ergin uçuşlarının etil alkol cezbedicili tuzaklarla izlenebildiği belirlenmiştir (Ak ve ark., 2014). Daha sonraki değerlendirmelerde de türün fındık bahçelerinde *A. dispar* ile birlikte bulunduğu, ancak ergin aktivitesinin daha çok yaz döneminde yoğunlaştığı belirtilmiştir (Tuncer ve ark., 2017). Samsun'da 2017–2019 yıllarında yapılan çalışmada ise

X. saxesenii erginlerinin mart sonundan itibaren tuzaklarda görülmeye başladığı, yakalamaların haziran sonu–temmuz başında belirgin biçimde arttığı ve ağustos ayında daha düşük düzeyde ikinci bir artış gösterdiği belirlenmiştir (Aker, 2022). Türkiye'de farklı yıllarda elde edilen bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, *X. saxesenii*'nin fındık bahçelerindeki ergin uçuşlarının uzun bir döneme yayılabildiği, ancak esas uçuş aktivitesinin yaz aylarında yoğunlaştığı anlaşılmaktadır.

3.3.5. Fındıkta Zarar Şekli ve Ekonomik Önemi

Türkiye'de fındık bahçelerinde *Xyleborinus saxesenii*'nin önemi, geçmişte yaşanan teşhis sorunları nedeniyle uzun süre yeterince ortaya konulamamıştır. Tuncer et al. (2017), önceki çalışmalarda *Lymantor coryli* ve *Xyleborus xylographus* olarak bildirilen bazı kayıtların gerçekte *X. saxesenii*'ye ait olabileceğini ortaya koymuştur. Güncel taksonomik değerlendirmeler ve arazi çalışmaları, *X. saxesenii*'nin *Anisandrus dispar* ve *Xylosandrus germanus* ile Türkiye fındık bahçelerinde yaygın olarak bulunan ve ekonomik açıdan önem taşıyan başlıca Scolytinae türlerinden biri olduğunu göstermektedir (Tuncer ve ark., 2017; Kushiyev ve ark., 2022). Samsun ve Ordu'da yürütülen izleme çalışmalarında yaz döneminde tuzak başına yüksek sayıda ergin yakalanması da türün uygun koşullarda yüksek popülasyon düzeylerine ulaşabildiğini göstermektedir (Saruhan ve Akyol, 2013). *Xyleborinus saxesenii*'nin fındık üretim alanlarındaki önemi Türkiye ile sınırlı değildir. İtalya ve Gürcistan'da 2023–2024 yıllarında yürütülen çalışmalarda türün her iki ülkedeki fındık bahçelerinde dominant Scolytinae türleri arasında yer alması, farklı fındık üretim bölgelerinde de yaygın olarak bulunabildiğini göstermektedir (Cresta ve ark., 2025a). Bununla birlikte, tuzaklarda yüksek sayıda ergin yakalanması doğrudan ekonomik zararın veya ürün kaybının göstergesi olarak değerlendirilmemelidir. Türün ekonomik öneminin belirlenmesinde tuzak yakalamalarının yanı sıra canlı ve sağlıklı bitki dokularını kolonize etme durumu, zarar gören dal ve ocak oranı, bitkilerin fizyolojik durumu ve zararın verim üzerindeki etkisi birlikte değerlendirilmelidir.

3.3.6. Mücadelesi

Xyleborinus saxesenii ile mücadele, yaşam dönemlerinin büyük bölümünün odun dokusu içindeki galerilerde geçmesi nedeniyle güçtür. Bu nedenle temel yaklaşım, bitki stresini azaltmak, yoğun bulaşık ve kurumuş dalları uzaklaştırmak ve ergin uçuşunu uygun cezbedicilerle izleyerek yeni kolonizasyon dönemini belirlemektir. Özellikle bahçe drenajının iyileştirilmesi, aşırı su yüklenmesinden kaçınılması ve bitki sağlığını zayıflatan kültürel sorunların giderilmesi, ambrosia böceklerinin tercih ettiği stresli konukçu materyalin azaltılması bakımından önemlidir. Bulaşık dal ve odun materyalinin bahçede bırakılmaması da yeni erginler için üreme kaynağının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Türkiye'de fındık bahçelerinde *X. saxesenii* popülasyonunun izlenmesinde etil alkol cezbedicili tuzaklardan yararlanılmaktadır. *A. dispar* ve *X. germanus* ile birlikte bulunduğu fındık bahçelerinde kullanılan etil alkol cezbedicili kırmızı kanatlı yapışkan tuzaklarda *X. saxesenii*'nin ergin dişileri de yakalanmaktadır. Ordu ve Samsun'da

yürütülen çalışmalarda bu tuzaklarla türün mevsimsel uçuşu izlenmiş ve yoğun yakalamaların çoğunlukla yaz döneminde, özellikle haziran-ağustos aylarında gerçekleştiği belirlenmiştir (Saruhan ve Akyol, 2013; Tuncer ve ark., 2017). Terme'de yürütülen tuzak karşılaştırmalarında %96 etil alkol kullanılan huni tipi tuzakların *A. dispar* ve X. *saxesenii*'yi yakalamada etkili olduğu; huni ve kafes tipi prototiplerin kırmızı kanatlı tuzaklara göre daha etkili ve pratik olabildiği bildirilmiştir (Ak ve ark., 2014). İtalya ve Gürcistan'daki 2023-2024 fındık bahçesi çalışmasında ise *A. dispar*, *X. germanus* ve *X. saxesenii* aynı bahçelerde etanol cezbedicili tuzaklarla belirlenmiş; *X. saxesenii* her iki ülkede de dominant tür olmuş ve tuzak tasarımının yakalama düzeyini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir (Cresta ve ark., 2025a). Bu nedenle tuzaklama, yalnızca mücadele aracı olarak değil, popülasyon yoğunluğu ve uçuş zamanının belirlenmesinde temel bir izleme yöntemi olarak değerlendirilmelidir. *X. saxesenii*'ye karşı bazı yerli entomopatojen mantar izolatlarının laboratuvar etkinliği yüksek bulunmuştur. Bu etmenlerin entegre mücadeledeki yeri, uygun formülasyon ve uygulama zamanını da kapsayan arazi denemeleriyle belirlenmelidir (Kushiyev ve ark., 2022). Mevcut bilgiler birlikte değerlendirildiğinde, fındıkta *X. saxesenii* yönetiminin temelini sağlıklı bahçe koşullarının sürdürülmesi, bulaşık odunsu materyalin uzaklaştırılması ve özellikle yaz uçuş döneminin etanol cezbedicili tuzaklarla izlenmesi oluşturmalıdır. Kimyasal uygulamaların galeri içerisindeki bireylere ulaşmasının güç olması nedeniyle, erginlerin konukçuya girişinden önceki dönem hedeflenmeli ve kimyasal mücadele tek başına temel çözüm olarak görülmemelidir. Biyolojik ve biyoteknik yöntemlerin geliştirilmesi, türün sürdürülebilir yönetimi açısından öncelikli araştırma alanları arasında değerlendirilmelidir.

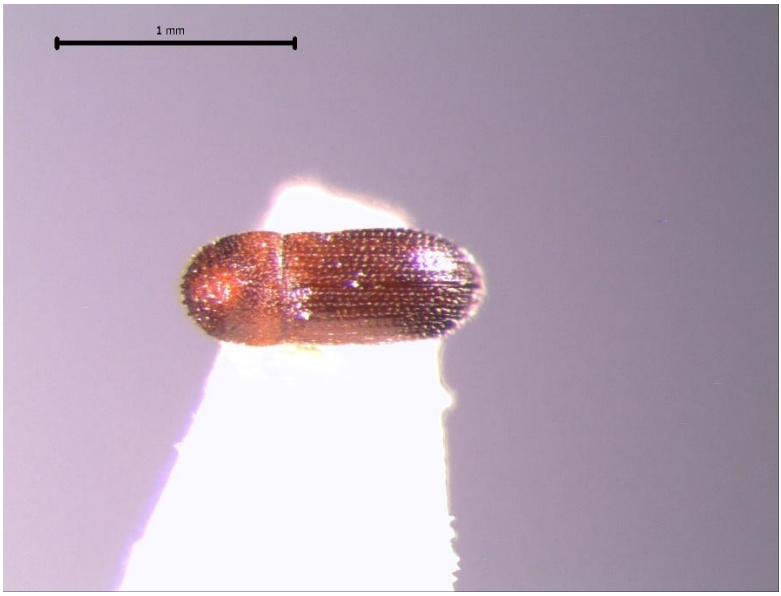
3.4. *Hypothenemus eruditus* (Westwood, 1834)

3.4.1. Taksonomisi ve Tanınması

Hypothenemus eruditus (Westwood, 1834) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), çok küçük vücutlu, son derece polifag bir kabuk böceğidir. Tür, Hypothenemus cinsinin tip türüdür ve geniş coğrafi yayılışı, morfolojik değişkenliği ve çok sayıdaki sinonimi nedeniyle taksonomik açıdan dikkat çekicidir. Güncel sistematik çalışmalarda eski geniş anlamdaki Cryphalini sınıflandırmasının yeniden düzenlenmesiyle Hypothenemus Trypophloeini içerisinde değerlendirilmektedir (Marchioro ve ark., 2024). Türkiye fındık bahçelerinde türün varlığı Ak et al. (2005) tarafından bildirilmiş, daha sonra Tuncer et al. (2017) tarafından güncel teşhis karakterleri kullanılarak doğrulanmıştır.

Ergin dişiler yaklaşık 1.0–1.3 mm uzunluğunda ve enlerinin yaklaşık 2.4 katı uzunluktadır; renk koyu kahverengi-siyahtan iki renkli bireylere kadar değişebilir (Şekil 9). Pronotum önde genişçe yuvarlak olup ön kenarında genellikle altı belirgin asperite bulunur; ortadaki çift çoğunlukla birbirine yakındır. Elitra üzerindeki strialar küçük noktalardan, interstrialar ise daha geniş ve ince kıllı sıralardan oluşur. Türün küçük vücut yapısı ve kıllanmadaki değişkenlik teşhisi güçleştirebilir (Vega ve ark., 2015; Huang ve ark., 2016). Türkiye fındık

Scolytinae anahtarında anten topuzunun yapısı ve genel vücut morfolojisi türün diğer küçük Scolytinae üyelerinden ayrılmasında kullanılmıştır (Tuncer ve ark., 2017).



Şekil 9. Hypothenemus eruditus'un ergini.

3.4.2. Dünyada ve Türkiye'de Yayılışı

Hypothenemus eruditus dünyanın tropik ve subtropik bölgelerinde son derece geniş yayılış gösteren, günümüzde birçok ılıman bölgeye de taşınmış kozmopolit bir türdür. Afrika, Asya, Avustralya, Avrupa, Nearktik, Neotropik ve Oriental bölgelerden kayıtları bulunmaktadır. Avrupa'da Akdeniz havzası başta olmak üzere Fransa, İtalya, İspanya, Malta, Azorlar, Hırvatistan, Rusya ve Ukrayna'da yerleşik popülasyonlar bildirilmiş; yakın dönemde kıta Portekiz'inden de ilk kayıt verilmiştir (Ruzzier ve ark., 2023). Güncel küresel konukçu veri setleri de türü dünya çapında yerleşmiş, olağanüstü geniş konukçu dizisine sahip Scolytinae türlerinden biri olarak değerlendirmektedir (Marchioro ve ark., 2024).

Türkiye'de *H. eruditus* Aydın, Mersin ve Samsun'dan bildirilmiştir (Tuncer ve ark., 2017). Fındık bahçelerindeki ilk kayıt Ak et al. (2005) tarafından Giresun, Ordu ve Samsun illerinde yürütülen sürveyler kapsamında verilmiş ve türün Türkiye'de fındıkta ilk kayıt niteliğinde olduğu belirtilmiştir. Daha sonraki kapsamlı değerlendirmede türün fındık bahçelerinde zaman zaman yaygın bulunabildiği, ancak canlı dokuları kolonize eden başlıca zararlı türlerden farklı olarak yalnızca önceden ölmüş dallarda geliştiği ortaya konulmuştur (Tuncer ve ark., 2017). Türün fındık agroekosistemlerindeki varlığı Türkiye ile sınırlı değildir. İtalya ve Gürcistan'da 2023–2024 yıllarında yürütülen güncel çalışmada *H. eruditus* her iki ülkenin fındık bahçelerinde de etanol cezbedicili tuzaklarla belirlenmiştir (Cresta ve ark., 2025a). Bu bulgu türün fındık bahçelerinde bulunabilen Scolytinae topluluğunun bir bileşeni olduğunu desteklemekle

birlikte, tuzaklarda yakalanması canlı fındık dokusunda ekonomik zarar oluşturduğu anlamına gelmemektedir.

3.4.3. Konukçuları

Hypothenemus eruditus Scolytinae içerisinde konukçu genişliği en yüksek türlerden biridir. Güncel derlemelerde yüzlerce bitki türü ve 80'den fazla bitki familyasıyla ilişkili olduğu bildirilmektedir (Ruzzier ve ark., 2023, 2024). Tür yalnızca dal ve gövde dokularında değil; yaprak sapı, küçük dallar, tohum, meyve ve çeşitli ölü bitkisel materyallerde de gelişebilmektedir. Ayrıca diğer böceklerin galerilerinden, mantarların meyve gövdelerinden ve işlenmiş bitkisel materyallerden dahi kaydedilmiştir (Vega ve ark., 2015; Huang ve ark., 2016). Bu olağanüstü polifaji, türün çoğunlukla ölü veya ayrışmakta olan bitki materyalini kullanabilmesiyle ilişkilendirilmektedir. Fındık (*Corylus avellana* L.) türün kayıtlı konukçuları arasındadır. Ancak Türkiye'deki ayrıntılı fındık değerlendirmeleri, *H. eruditus*'un canlı fındık dallarına saldıran bir primer zararlı olmadığını, önceden ölmüş dalları kolonize ettiğini göstermektedir (Tuncer ve ark., 2017). Bu nedenle fındığın konukçu olarak kaydedilmesi ile türün ekonomik zararlı statüsü birbirinden ayrılmalıdır. Bahçelerdeki ölü dal ve odunsu artıklar tür için uygun üreme substratı sağlayabilir.

3.4.4. Biyolojisi

Hypothenemus eruditus çoğunlukla ince dal, öz dokusu, kabuk altı ve diğer küçük bitkisel materyaller içerisinde galeri oluşturarak gelişir (Şekil 9). Dişi giriş deliğinden materyale girer, galeri açarken talaş ve dışkı artıklarını dışarı iter ve yumurtalarını galeri sistemine bırakır. Larvalar aynı materyal içerisinde gelişerek pupa ve ergin döneme ulaşır. *Hypothenemus* türlerinde besin değeri düşük ölü bitkisel substratların kullanılabilmesinde mikroorganizmaların rol oynayabileceği düşünülmekle birlikte, *H. eruditus* için ambrosia böceklerindeki gibi zorunlu bir mantar yetiştiriciliği ilişkisi ortaya konulmuş değildir; bu nedenle türün biyolojisi *Anisandrus*, *Xylosandrus* ve *Xyleborinus* türlerindeki ambrosia sistemiyle eş tutulmamalıdır (Vega ve ark., 2015).



Şekil 10. Hypothenemus eruditus'un kabuk altında açtığı yüzeysel galeriler.

Türün küçük vücut yapısı ve ölü bitkisel materyallerde gelişebilmesi, çok çeşitli mikrohabitatlardan yararlanmasına olanak sağlar. Ergin dişilerin etanole

güçlü biçimde yöneldiği bilinmektedir. Etanol cezbedicili tuzak çalışmalarında *H. eruditus*'un cezbedicisiz tuzaklara göre etanol içeren tuzaklarda daha fazla yakalandığı gösterilmiştir (Ranger ve ark., 2012). Bu davranış, fermentasyon veya stres/bozulma sürecindeki bitkisel materyalin bulunmasında etanolün bir konukçu bulma sinyali olarak kullanılabildiğini düşündürmektedir. Ancak fındık koşullarında türün ayrıntılı döl sayısı, gelişme süresi ve mevsimsel uçuş dinamiğine ilişkin özgün veriler sınırlıdır.

3.4.5. Fındıkta Zarar Şekli ve Ekonomik Önemi

Türkiye fındık literatüründe *H. eruditus* ilk olarak Ak et al. (2005) tarafından fındık bahçelerinde kaydedilmiş ve dönemin mevcut bilgileri çerçevesinde yazıcıböcek faunasının bir üyesi olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, daha geniş materyale ve güncel teşhise dayanan Tuncer et al. (2017), türün fındık bahçelerinde yaygın olabilmesine karşın yalnızca önceden ölmüş dalları kolonize ettiğini açık biçimde ortaya koymuştur. Aynı çalışmada canlı fındık dokusunda ekonomik zarar oluşturan başlıca türlerin *A. dispar*, *X. germanus* ve *X. saxesenii* olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle *H. eruditus*'un fındıktaki statüsü ekonomik zararlıdan çok ölü odunsu materyali kolonize eden ikincil/saproksilik bir Scolytinae türü olarak değerlendirilmelidir.

Hypothenemus eruditus fındık bahçelerinde bulunabilmekle birlikte, çoğunlukla önceden kurumuş veya ölmüş dalları kolonize etmektedir. Türkiye'de fındık bahçelerinde yapılan ayrıntılı incelemelerde de türün yaygın olarak bulunabildiği, ancak canlı dallarda zarar oluşturmadığı ve yalnızca ölü dalları kolonize ettiği belirlenmiştir (Tuncer ve ark., 2017). Bu nedenle kurumuş dallarda *H. eruditus* galerilerinin bulunması, dal ölümünün doğrudan bu türden kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmemelidir. Dünya genelinde geniş bir yayılışa ve çok geniş bir konukçu dizisine sahip olan *H. eruditus*'un da çoğu durumda ekonomik açıdan önemli bir zararlı olmadığı bildirilmektedir (Huang ve ark., 2016). İtalya ve Gürcistan'da 2023–2024 yıllarında yürütülen çalışmalarda türün fındık bahçelerinde tuzaklarla belirlenmiş olması da farklı fındık üretim alanlarında bulunduğunu göstermektedir (Cresta ve ark., 2025a). Bununla birlikte, tuzaklarda erginlerin yakalanması fındık bitkisinin canlı dokularının kolonize edildiğini veya türün doğrudan ekonomik zarar oluşturduğunu göstermemektedir.

3.4.6. Mücadelesi

Fındık bahçelerinde *H. eruditus* canlı dallarda ekonomik zarar oluşturan bir tür olarak değerlendirilmediğinden, bu türe özgü kimyasal veya biyoteknik bir mücadele programına gereksinim bulunmamaktadır. Yönetimde temel yaklaşım, kurumuş dalların ve diğer odunsu artıkların düzenli olarak bahçeden uzaklaştırılmasıdır. Bu uygulama, *H. eruditus*'un üreyebileceği materyali azaltırken, ekonomik açıdan daha önemli diğer Scolytinae türleri için uygun kolonizasyon ortamlarının oluşmasını da sınırlandırabilir.

Etanol cezbedicili tuzaklar *H. eruditus* erginlerini yakalayabilmektedir (Ranger ve ark., 2012). Nitekim İtalya ve Gürcistan'daki fındık bahçelerinde

kullanılan etanol cezbedicili tuzaklarda türün yakalanmış olması, bu yöntemin faunistik izleme açısından kullanılabileceğini göstermektedir (Cresta ve ark., 2025a). Ancak fındıkta ekonomik zarar oluşturduğuna ilişkin kanıt bulunmadığından, yalnızca tuzak yakalamalarına dayanarak mücadele kararı verilmemelidir. Özellikle *A. dispar*, *X. germanus* ve X. *saxesenii* ile birlikte yakalandığı bahçelerde tür teşhisinin doğru yapılması, ekonomik öneme sahip türlere yönelik izleme ve mücadele kararlarının gereksiz uygulamalardan ayrılması bakımından önemlidir.

3.5. Fındık Bahçelerinde Nadir Olarak Belirlenen Diğer Scolytinae Türleri

Türkiye'de fındık bahçelerinde yaygın olarak bulunan ve ekonomik açıdan önem taşıyan *Anisandrus dispar*, *Xylosandrus germanus* ve *Xyleborinus saxesenii* dışında, fındık bahçelerinde daha seyrek rastlanan bazı Scolytinae türleri de kaydedilmiştir. Bunlar arasında *Hypoborus ficus* Erichson, 1836, *Taphrorychus ramicola* Reitter, 1895 ve *Taphrorychus hirtellus* Eichhoff, 1878 yer almakta olup, mevcut kayıtlar bu türlerin fındıkta ekonomik açıdan önemli zararlılar olmadığını göstermektedir. Fındık bahçelerinde bu üç türün nadir bulunduğunu ve canlı fındık bitkilerinde zarar oluşturduklarına ilişkin bir bulgu bulunmadığı bildirlmiştir (Tuncer ve ark., 2017). Bununla birlikte, türlerin dünya yayılışları, konukçu ilişkileri ve genel biyolojileri birbirinden farklıdır; bu nedenle fındıktaki kayıtlarının tür bazında değerlendirilmesi gerekmektedir.

Hypoborus ficus, özellikle Akdeniz havzası ile ilişkili, Avrupa, Kuzey Afrika ve Batı Asya'da yayılış gösteren küçük bir kabuk böceğidir (Tuncer ve ark., 2017; Vujić ve Vesović, 2022). Türün temel konukçusu incir (*Ficus carica*) olup, farklı kaynaklarda *Vitis vinifera*, *Ailanthus altissima*, *Morus alba*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Corylus avellana* ve *C. colurna* gibi başka odunsu bitkilerden de kayıtlar bulunmaktadır. Bu nedenle *H. ficus* yalnızca incirle sınırlı olmamakla birlikte, ekolojisi ve ekonomik önemi en belirgin biçimde *F. carica* ile ilişkilidir (Marchioro ve ark., 2024; Vujić ve Vesović, 2022). Türkiye'de Aydın incir bahçelerinde yapılan çalışmalarda *H. ficus*'un gövde ve dallarda galeri açtığı, özellikle zayıflamış ağaçlarda yoğunlaşabildiği ve yüksek popülasyonlarda kurumayı hızlandırabildiği bildirilmiştir (Akşit ve ark., 2005, 2007). Sırbistan'daki güncel kayıtlarda da ergin, larva ve pupaların don zararına uğramış incir dallarının kabuk altında ve odun dokusunda bulunduğu gösterilmiştir (Vujić ve Vesović, 2022). Bu bulgular türün çoğunlukla fizyolojik olarak zayıflamış veya zarar görmüş odunsu dokularla ilişki kurduğunu göstermektedir.

Türkiye'de *H. ficus* Adana, İstanbul, İzmir, Mersin ve Sakarya'dan bildirilmiş; fındık bahçesi örneklemelerinde de *Corylus avellana* odunundan elde edilmiştir (Tuncer ve ark., 2017). Ancak incirdeki zarar kayıtlarının doğrudan fındığa aktarılması uygun değildir. Fındıkta türün düşük sayıda bulunması ve canlı dokularda ekonomik zarar oluşturduğunun gösterilmemiş olması nedeniyle, *H. ficus* Türkiye fındık üretiminde önemli bir zararlıdan çok nadir veya ikincil nitelikte bir Scolytinae türü olarak değerlendirilmelidir (Tuncer ve ark., 2017).

Taphrorychus ramicola, Dryocoetini içerisinde yer alan Palearktik bir kabuk böceğidir. Güncel Avrupa değerlendirmelerinde türün Güneydoğu Avrupa, Kafkasya ve Batı Asya'da; Türkiye'nin yanı sıra İran ve Suriye'de de bulunduğu bildirilmektedir (Cresta ve ark., 2025a). Konukçu kayıtları *Carpinus orientalis*, *Corylus avellana*, *Fagus orientalis* ve *Quercus cerris* gibi geniş yapraklı ağaçları kapsamaktadır (Cresta ve ark., 2025a). Türkiye'de ise Bartın, Hatay, Sakarya, Trabzon ve Batı Akdeniz'de bulunduğu, *C. avellana*'nın yanı sıra Fagus, Quercus ve Carpinus türleriyle ilişkili olduğu bildirilmiştir (Tuncer ve ark., 2017; Bakkaloğlu ve Örücü, 2019). Edirne Kent Ormanı'nda yürütülen bir çalışmada erginlerin mayıs-haziran döneminde kırmızı kanatlı yapışkan tuzaklarda yakalanması, türün Türkiye'nin kuzeybatısında da aktif popülasyonlarının bulunduğunu göstermektedir (Bakkaloğlu ve Örücü, 2019).

Fındık açısından *T. ramicola*'nın durumu daha ihtiyatlı değerlendirilmelidir. Tür geçmiş çalışmalarda *C. avellana* ile ilişkili olarak bildirilmiş olmakla birlikte, Tuncer et al. (2017) tarafından yürütülen ayrıntılı fındık bahçesi örneklemelerinde yeniden elde edilmemiş ve fındıkta ekonomik zarar oluşturduğuna ilişkin güncel bir kanıt ortaya konulmamıştır. Dolayısıyla *T. ramicola*'nın fındıkla ilişkisi gerçek bir konukçu kaydına dayanmakla birlikte, bu ilişkinin yaygınlık, kolonizasyon sıklığı ve ekonomik sonuç bakımından sınırlı olduğu anlaşılmaktadır.

Taphrorychus hirtellus da Dryocoetini içerisinde yer alan, geniş yapraklı ağaçlarla ilişkili Palearktik bir kabuk böceğidir. Tür, Orta ve Güneydoğu Avrupa'nın yanı sıra Türkiye ve Cezayir'de yayılış göstermektedir. Ayrıca 2021 yılında Orta İtalya'daki Circeo Millî Parkı'nda yakalanan örneklerin incelenmesi sonucunda İtalya faunası için ilk kez kaydedilmiştir (Cresta ve ark., 2025b). Güncel konukçu listesinde *Corylus avellana*, *Fagus orientalis*, F. *sylvatica*, *Quercus cerris*, *Q. frainetto* ve *Q. petraea* yer almaktadır. Cresta et al. (2025b), Taphrorychus cinsinin geniş yapraklı ağaçlarla, özellikle Fagaceae ve Betulaceae ile ilişkili olduğunu; T. hirtellus için ise meşelerin önemli konukçular arasında bulunduğunu belirtmektedir. Aynı çalışma, türün bilinen yayılış alanlarında konukçu bitkilerde önemli düzeyde zarar oluşturmadığını da vurgulamaktadır.

Türkiye'de *T. hirtellus* Hatay, İstanbul, Sakarya ve Sinop'tan bildirilmiş ve fındık bahçesi çalışmalarında doğrudan fındık odunundan elde edilmiştir (Tuncer ve ark., 2017). Bu kayıt, *C. avellana*'nın türün gerçek konukçuları arasında bulunduğunu desteklemektedir; nitekim güncel Avrupa konukçu derlemelerinde de fındık bu tür için konukçu olarak gösterilmektedir (Cresta ve ark., 2025; Marchioro ve ark., 2024). Bununla birlikte, Türkiye fındık bahçelerinde düşük sayıda bulunması ve canlı fındık dokularında ekonomik zarar oluşturduğunun gösterilmemiş olması nedeniyle *T. hirtellus*'un da önemli bir fındık zararlısı olarak değerlendirilmesi için yeterli kanıt bulunmamaktadır (Tuncer ve ark., 2017).

Bu üç tür birlikte değerlendirildiğinde, *H. ficus, T. ramicola* ve *T. hirtellus*'un fındıkla ilişki kurabilen ancak ekolojik özellikleri ve başlıca konukçuları farklı olan kabuk böcekleri olduğu görülmektedir. *H. ficus*'un biyolojisi esas olarak

incir ve zayıflamış odunsu dokularla ilişkilidir; *T. ramicola* ve *T. hirtellus* ise Carpinus, Corylus, Fagus ve Quercus gibi geniş yapraklı ağaçlarda kaydedilen Dryocoetini türleridir (Akşit ve ark., 2005, 2007; Marchioro ve ark., 2024; Cresta ve ark., 2025b). Fındık bahçelerinde bulunmaları, tek başına ekonomik zararlı olduklarını göstermemektedir. Mevcut Türkiye verileri, bu türlerin *A. dispar, X. germanus* ve *X. saxesenii* gibi canlı veya stres altındaki fındık dokularında ekonomik önem kazanabilen türlerden ayrı değerlendirilmesini desteklemektedir (Tuncer ve ark., 2017). Bununla birlikte, doğru tür teşhisi, konukçu ilişkilerinin izlenmesi ve gelecekte oluşabilecek popülasyon değişikliklerinin belirlenmesi açısından bu nadir türlerin kayıt altına alınması önem taşımaktadır.

4. Fındık Bahçelerinde Scolytinae Türlerinin Entegre Yönetimi

Fındık bahçelerinde Scolytinae yönetimi, hedef türün biyolojisi ve ekonomik önemi ile bahçedeki bitki sağlığının birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Ambrosia böceklerinin gelişme dönemlerini büyük ölçüde odunsu doku içinde geçirmesi, konukçu seçimlerinin bitki stresinden etkilenmesi ve ergin uçuş fenolojisinin türlere göre değişmesi, tek yönteme dayalı uygulamaların başarısını sınırlar (Ranger ve ark., 2016; Gugliuzzo ve ark., 2021). Bu nedenle kararlar doğru tür teşhisi, uçuş izleme verileri, canlı dokudaki kolonizasyon ve gözlenen zarar üzerine kurulmalıdır (Tuncer ve ark., 2017). Entegre yönetim; erken tespit ve ergin uçuşlarının izlenmesi, bitki stresinin azaltılması, üreme materyalinin ortadan kaldırılması ve gerektiğinde biyoteknik, biyolojik ya da kimyasal yöntemlerin hedef türe ve bahçe koşullarına uygun biçimde uygulanmasını kapsamalıdır.

4.1. İzleme, Erken Tespit ve Popülasyon Değerlendirmesi

Entegre yönetimin ilk aşaması, bahçede bulunan Scolytinae türlerinin doğru teşhis edilmesi ve ekonomik açıdan önemli türlerin ergin uçuşlarının izlenmesidir. Ambrosia böceklerinin etanole yönelme davranışı nedeniyle etanol cezbedicili tuzaklar, türlerin varlığının belirlenmesi ve mevsimsel uçuş aktivitesinin izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ranger ve ark., 2016; Gugliuzzo ve ark., 2021). Türkiye fındık bahçelerinde yürütülen çalışmalar da *A. dispar*, *X. germanus* ve *X. saxesenii* erginlerinin etanol cezbedicili farklı tuzak tipleriyle izlenebildiğini göstermiştir (Saruhan ve Akyol, 2012, 2013; Ak ve ark., 2014; Aker, 2022).

İzleme programlarının hedef türlerin fenolojisine göre planlanması da önemlidir. Türkiye'de *A. dispar*'ın ergin uçuşlarının daha çok ilkbaharda, *X. saxesenii*'nin ise özellikle yaz döneminde yoğunlaştığı belirlenmiştir (Saruhan ve Akyol, 2012, 2013; Aker, 2022). Bununla birlikte, tuzaklarda yakalanan ergin sayısı tek başına ekonomik zarar göstergesi değildir. Tuzak verilerinin giriş delikleri, talaş oluşumu, galeri varlığı, canlı dokudaki kolonizasyon ve bitkilerin fizyolojik durumu gibi arazi gözlemleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekir.

4.2. Bitki Stresinin Azaltılması ve Kültürel Önlemler

Fındık bitkilerinin fizyolojik açıdan güçlü tutulması, stresli konukçulara yönelen ambrosia böceklerine karşı temel koruyucu yaklaşımdır. Taban suyu

yüksekliği ve yetersiz drenajın yol açtığı su stresi, odunsu bitkilerde etanol oluşumunu ve *X. germanus* saldırısını artırabilmektedir. Bu nedenle etkin drenaj, dengeli sulama ve gübreleme, kök ve gövde yaralanmalarının önlenmesi ile diğer stres etmenlerinin azaltılması kolonizasyon riskini sınırlandırabilir (Ranger ve ark., 2013, 2016; Gugliuzzo ve ark., 2021).

Kurumuş, kırılmış veya zararlı tarafından yoğun biçimde kolonize edilmiş dallar budanarak bahçeden uzaklaştırılmalı; bu materyal bahçe içinde bırakılmamalıdır. Böylece yeni nesil erginlerin gelişebileceği üreme kaynakları azaltılır ve bahçenin yeni kolonizasyonlar için elverişliliği sınırlandırılır.

4.3. Biyoteknik Yöntemler ve Kitle Yakalama

Etanol cezbedicili tuzaklar, fındık bahçelerinde ekonomik açıdan öne çıkan ambrosia böceklerinin uçuş dönemlerinin belirlenmesinde temel biyoteknik araçlardır. Tuzakların sayısı, bahçedeki dağılımı, rengi ve yapısı ile cezbedicinin salım özellikleri yakalama başarısını doğrudan etkilediğinden, uygulama hedef türe ve uçuş fenolojisine göre planlanmalıdır. Popülasyonun azaltılmasının amaçlandığı kitle yakalama uygulamalarında ise izleme çalışmalarına göre daha yüksek tuzak yoğunluğu ve düzenli bakım gerekir (Saruhan ve Akyol, 2013; Ak ve ark., 2014; Gugliuzzo ve ark., 2021).

Bununla birlikte, izleme amacıyla etkili olan bir tuzağın aynı ölçüde popülasyon baskılaması sağlayacağı varsayılmamalıdır. Kitle yakalamanın başarısı hedef tür, tuzak ve cezbedici tipi, tuzak yoğunluğu, ergin uçuş dönemi, bahçenin büyüklüğü ve çevredeki alternatif konukçu kaynaklarına bağlıdır. Bu nedenle kitle yakalama, uygun koşullarda diğer yönetim uygulamalarını tamamlayan bir yöntem olarak değerlendirilmelidir (Gugliuzzo ve ark., 2021).

4.4. Biyolojik Mücadele Olanakları

Entomopatojen mantarlar, fındık bahçelerindeki ambrosia böceklerinin çevreyle uyumlu yönetimi açısından önemli bir araştırma alanıdır. Türkiye'nin başlıca fındık üretim alanlarından toplanan *A. dispar*, *X. germanus* ve *X. saxesenii* bireylerinden *B. bassiana*, *B. pseudobassiana*, *C. fumosorosea*, *A. lecanii* ve *M. anisopliae* dâhil çeşitli entomopatojen mantarlar izole edilmiş; bazı yerli izolatların laboratuvar koşullarında hedef türlere karşı yüksek etkinlik gösterdiği belirlenmiştir (Kushiyev ve ark., 2022).

Bu bulgular biyolojik mücadele açısından önemli bir potansiyel ortaya koymakla birlikte, laboratuvar koşullarındaki etkinlik doğrudan arazi başarısı olarak değerlendirilmemelidir. Sıcaklık, bağıl nem, uygulama zamanı, sporların çevresel koşullarda canlılığını koruması ve erginlerin galeriye giriş süresi saha etkinliğini etkileyebilir. Bu nedenle ümitvar yerli izolatların fındık bahçelerindeki performanslarının saha denemeleriyle ortaya konulması gerekmektedir.

4.5. Kimyasal Mücadelenin Yeri ve Sınırlılıkları

Scolytinae türlerinde kimyasal mücadelenin başarısı, böceklerin yaşam biçimi nedeniyle sınırlıdır. Ambrosia böceklerinde dişilerin odunsu dokuya girdikten

sonra galeri içerisinde korunması ve yavru gelişiminin bu galerilerde gerçekleşmesi, insektisitlerin hedef bireylere ulaşmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle kimyasal mücadele uygulanacaksa hedef dönem erginlerin uçuşta olduğu ve konukçu dokusuna girişinden önceki dönemdir; uygulama zamanının izleme verileriyle ilişkilendirilmesi gerekir (Ranger ve ark., 2016; Gugliuzzo ve ark., 2021).

Fındık bahçelerinde kimyasal mücadele rutin ve tek başına bir uygulama olarak ele alınmamalıdır. Hedef türün ekonomik önemi, kolonizasyon ve zarar düzeyi, bitkinin fizyolojik durumu ve diğer yöntemlerle sağlanabilecek baskılama birlikte değerlendirilmelidir.

4.6. Entegre Yönetim Yaklaşımı

Entegre yönetim, hedef türün biyolojisi, ergin uçuş fenolojisi, popülasyon düzeyi ve bahçedeki gerçek zarar dikkate alınarak planlanmalıdır. Öncelikle tür doğru teşhis edilmeli; *A. dispar, X. germanus* ve *X. saxesenii*'nin uçuşları etanol cezbedicili tuzaklarla izlenmelidir (Tuncer ve ark., 2017; Saruhan ve Akyol, 2012, 2013; Ak ve ark., 2014; Aker, 2022). Ancak mücadele kararı yalnızca tuzak yakalamalarına dayandırılmamalı; canlı dokudaki giriş delikleri, galeri ve kolonizasyon durumu ile dal, ocak ve verim düzeyindeki zarar birlikte değerlendirilmelidir.

İzleme sonuçlarına göre öncelik, bitki stresini azaltan kültürel uygulamalara ve kolonize odunsu materyalin uzaklaştırılmasına verilmelidir. Biyoteknik ve biyolojik yöntemler yerel etkinlikleri doğrulandığında programa eklenmeli; kimyasal uygulama gerekli görülürse yalnızca hedef türün uçuş döneminde, dişiler odunsu dokuya girmeden önce ve yürürlükteki ruhsat ile etiket koşullarına uygun biçimde uygulanmalıdır (Ranger ve ark., 2016; Gugliuzzo ve ark., 2021).

Tuzak verileri, bahçe kontrollerini yönlendiren bir erken uyarı göstergesi olarak kullanılmalı; ekonomik zarar ya da doğrudan ürün kaybının tek başına kanıtı sayılmamalıdır.

5. Sonuç ve Değerlendirme

Türkiye'de fındık bahçelerinde kaydedilen Scolytinae türleri ekonomik önem bakımından homojen değildir. *Anisandrus dispar*, *Xylosandrus germanus* ve *Xyleborinus saxesenii* canlı ya da fizyolojik stres altındaki fındık dokularında koloni kurabilmeleri nedeniyle izleme ve yönetimde öncelikli türlerdir. Bunlar arasında A. dispar Türkiye fındık bahçelerindeki yaygınlığı, *X. germanus* ise stres altındaki canlı odunsu bitkileri kolonize etme yeteneği ve yüksek zarar potansiyeli bakımından özel önem taşır. Buna karşılık *Hypothenemus eruditus* çoğunlukla önceden ölmüş dallarda gelişmekte; *Hypoborus ficus*, *Taphrorychus ramicola* ve *T. hirtellus* ise fındık bahçelerinde seyrek olarak kaydedilmektedir (Tuncer ve ark., 2017).

Eski kayıtlarda *Lymantor coryli* ve *Xyleborus xylographus*'a atfedilen bazı örneklerin güncel taksonomik değerlendirmeler sonucunda *X. saxesenii* olarak düzeltilmesi, doğru teşhisin faunistik kayıtlar, ekonomik önem ve mücadele

kararları açısından belirleyici olduğunu göstermiştir (Tuncer ve ark., 2017). Bu nedenle bir türün tuzakta bulunması veya yüksek sayıda yakalanması, tek başına zararlı statüsü ya da ürün kaybı göstergesi olarak değerlendirilmemelidir.

Sürdürülebilir yönetimin temelini hedef türe göre düzenlenen uçuş izlemesi, bahçe kontrolleri ve bitki stresinin azaltılması oluşturmalıdır. Etanol cezbedicili tuzaklar *A. dispar*, *X. germanus* ve *X. saxesenii*'nin mevsimsel uçuşlarını belirlemede yararlı olmakla birlikte tuzak verileri; canlı dokudaki giriş deliği ve galeri sayısı, kolonize dal ve ocak oranı, bitki fizyolojisi ile verim kaybı verileriyle birlikte yorumlanmalıdır. Etkin drenaj, dengeli bakım, mekanik yaralanmaların önlenmesi ve zararlı tarafından yoğun biçimde kolonize edilmiş dalların bahçeden uzaklaştırılması temel kültürel uygulamalardır.

Yerli entomopatojen mantar izolatlarının laboratuvar koşullarında gösterdiği yüksek etkinlik biyolojik mücadele açısından umut vericidir; ancak arazi performansı, uygulama zamanı, formülasyon ve diğer yöntemlerle uyumluluk ortaya konulmadan uygulamaya aktarılmamalıdır (Kushiyev ve ark., 2022). Gelecek çalışmalar türlere özgü ekonomik zarar düzeylerine, fındıkta stres–kolonizasyon ilişkisinin deneysel olarak belirlenmesine, farklı agroekolojik kuşaklarda uzun dönemli uçuş fenolojisine ve iklim değişikliğinin türlerin yayılışı üzerindeki etkilerine odaklanmalıdır. Bu veriler, bölgesel koşullara uyarlanmış erken uyarı ve entegre yönetim programlarının bilimsel temelini güçlendirecektir.

6. Kaynaklar

Agnello, A. M., Breth, D. I., Tee, E. M., Cox, K. D., Villani, S. M., Ayer, K. M., Wallis, A. E., Donahue, D. J., Combs, D. B., Davis, A. E., Neal, J. A. & English-Loeb, G. (2017). Xylosandrus germanus (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) occurrence, fungal associations, and management trials in New York apple orchards. Journal of Economic Entomology, 110(5), 2149–2164.

Aker, O. (2022). Determination of flight activities and populations of ambrosia beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in hazelnut orchards in Samsun, Türkiye. Black Sea Journal of Agriculture, 5(4), 406–414. https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1146116

Ak, K., Saruhan, İ. & Akyol, H. (2014). *Xyleborus dispar* (Fabricius, 1792) ve *Xyleborinus saxesenii* (Ratzeburg, 1837) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae)'ye karşı farklı tuzak tiplerinin performanslarının belirlenmesi. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 29(1), 26–35. https://doi.org/10.7161/anajas.2014.29.1.26

Ak, K., Saruhan, İ., Tuncer, C., Akyol, H. & Kılıç, A. (2011). Ordu İli kivi bahçelerinde Yazıcıböcek (Coleoptera: Scolytidae) türlerinin tespiti ve zarar oranları. Türkiye Entomoloji Bülteni, 1(4), 229–234.

Ak, K., Uysal, M., & Tuncer, C. (2005a). Giresun, Ordu ve Samsun illerinde fındık bahçelerinde zarar yapan yazıcıböceklerin zarar seviyeleri. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 22(1), 9–14.

Ak, K., Uysal, M. & Tuncer, C. (2005b). Giresun, Ordu ve Samsun illerinde fındık bahçelerinde zarar yapan yazıcıböcek (Coleoptera: Scolytidae) türleri, kısa biyolojileri ve bulunuş oranları. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 20(2), 37–44.

Ak, K., Uysal, M., Tuncer, C., & Akyol, H. (2005c). Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesinde fındıklarda zararlı önemli yazıcıböcek türleri ve çözüm önerileri. Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 19(37), 37–40.

Akşit, T., Çakmak, İ., & Moser, J. (2007). Attack by Pyemotes johnmoseri (Acari: Pyemotidae) on Hypoborus ficus (Coleoptera: Scolytidae) in fig trees in Turkey. Experimental and Applied Acarology, 41(4), 251–254. https://doi.org/10.1007/s10493-007-9063-4

Akşit, T., Çakmak, İ., & Özsemerci, F. (2005). Some new xylophagous species on fig trees (Ficus carica cv. Calymirna L.) in Aydın, Turkey. Turkish Journal of Zoology, 29(3), 211–215.

Bakkaloğlu, A. Ç., & Örücü, Ö. K. (2019). Edirne Kent Ormanında zararlı biyotik etmenlerin belirlenmesi. Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi, 4(1), 11–33. https://doi.org/10.30785/mbud.509749

Biedermann, P. H. W. (2010). Observations on sex ratio and behavior of males in Xyleborinus saxesenii Ratzeburg (Scolytinae, Coleoptera). ZooKeys, 56, 253-267.

Biedermann, P. H. W., Klepzig, K. D. & Taborsky, M. (2009). Fungus cultivation by ambrosia beetles: behavior and laboratory breeding success in three xyleborine species. Environmental Entomology, 38(4), 1096-1105.

Biedermann, P. H. W., Klepzig, K. D., Taborsky, M. & Six, D. L. (2013). Abundance and dynamics of filamentous fungi in the complex ambrosia gardens of the primitively eusocial beetle Xyleborinus saxesenii Ratzeburg. FEMS Microbiology Ecology, 83(3), 711-723.

Bucini, D., Balestra, G. M., Pucci, C., Paparatti, B., Speranza, S., Proietti Zolla, C. & Varvaro, L. (2005). Bio-ethology of *Anisandrus dispar* F. and its possible involvement in dieback (Moria) diseases of hazelnut (*Corylus avellana* L.) plants in Central Italy. Acta Horticulturae, 686, 435–444. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.686.60

Cambronero-Heinrichs, J. C., Santoiemma, G., Battisti, A., Cavaletto, G., Meggio, F., Ranger, C. M., Scabbio, E. & Rassati, D. (2024). Simulated flood-stress and X-ray tomography unveil susceptibility of different tree taxa to ambrosia beetles. Forest Ecology and Management, 568, 122106. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122106

Cavaletto, G., Ranger, C. M., Reding, M. E., Montecchio, L., & Rassati, D. (2023). Species-specific effects of ethanol concentration on host colonization by four common species of ambrosia beetles. Journal of Pest Science, 96, 833–843.

Chen, Y. (2021). Differential flight responses of two ambrosia beetles to ethanol as indicators of invasion biology: the case with Kuroshio shot hole borer (Euwallacea kuroshio) and fruit-tree pinhole borer (Xyleborinus saxesenii). Ecological Entomology, 46, 393–400. https://doi.org/10.1111/een.13013

Cresta, E., Di Sora, N., Masturzi, R., Rossini, L., Maspero, M., Kodua, M., et al. (2025a). Bark and ambrosia beetle communities in hazelnut orchards of Italy and Georgia. Insects, 16(11), 1148. https://doi.org/10.3390/insects16111148

Cresta, E., Faccoli, M., Giarruzzo, F., Di Siero, E., Ruzzier, E., Di Sora, N. & Speranza, S. (2025b). *Taphrorychus hirtellus* Eichhoff (Curculionidae: Scolytinae, Dryocoetini), a new species to the Italian fauna, with a key to the Taphrorychus species of Europe. Zootaxa, 5584(4), 559–569. https://doi.org/10.11646/zootaxa.5584.4.7

Erper, İ., Kushiyev, R., Türkkan, M. & Tuncer, C. (2018). Evaluation of some fungicides against symbiotic mantar Ambrosiella hartigii associated with Anisandrus dispar Fabricius and Xylosandrus germanus Blandford (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences, 32(1), 60–66.

Erper, İ., Kushiyev, R., Yıldırım, E., Turkkan, M. & Tuncer, C. (2019). Determination of efficacy of some fungicides used in hazelnut orchards against Ambrosiella hartigii symbiotically associated with Anisandrus dispar under laboratory conditions. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 34(2).

Francke-Grosmann, H. (1975). The epizoic and endozoic transmission of the symbiotic fungus of the ambrosia beetle Xyleborus saxeseni (Coleoptera: Scolytidae). Entomologica Germanica, 1, 279–292. https://doi.org/10.1127/entom.germ/1/1975/279

French, J. R. J. & Roeper, R. A. (1975). Studies on the biology of the ambrosia beetle *Xyleborus dispar* (F.) (Coleoptera: Scolytidae). Zeitschrift für Angewandte Entomologie, 78, 241–247. https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1975.tb04178.x

Galko, J., Dzurenko, M., Ranger, C. M., Kulfan, J., Kula, E., Nikolov, C., Zúbrik, M. & Zach, P. (2019). Distribution, habitat preference, and management of the invasive ambrosia beetle Xylosandrus germanus (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in European forests with an emphasis on the West Carpathians. Forests, 10(1), 10.

Gomez, D. F., Rabaglia, R. J., Fairbanks, K. E. O. & Hulcr, J. (2018). North American Xyleborini north of Mexico: a review and key to genera and species (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae). ZooKeys, 768, 19–68.

Gugliuzzo, A., Biedermann, P. H. W., Carrillo, D., Castrillo, L. A., Egonyu, J. P., Gallego, D., Haddi, K., Hulcr, J., Jactel, H., Kajimura, H., Kendra, P. E., Ranger, C. M., Rassati, D., Stelinski, L. L., Sutherland, R., Webster, B. & Francardi, V. (2021). Recent advances toward the sustainable management of invasive Xylosandrus ambrosia beetles. Journal of Pest Science, 94, 615–637.

Happ, G. M., Happ, C. M. & French, J. R. (1976). Ultrastructure of the mesonotal mycangium of an ambrosia beetle, *Xyleborus dispar* (F.) (Coleoptera: Scolytidae). International Journal of Insect Morphology and Embryology, 5, 381–391.

Huang, Y.-T., Hulcr, J., Johnson, A. J. & Lucky, A. (2016). A Bark Beetle Hypothenemus eruditus Westwood (1836) (Insecta: Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). University of Florida IFAS Extension, EENY-664.

Hulcr, J., & Stelinski, L. L. (2017). The ambrosia symbiosis: From evolutionary ecology to practical management. Annual Review of Entomology, 62, 285–303.

Ito, M., Kajimura, H., Hamaguchi, K., Araya, K. & Lakatos, F. (2017). Landscape-scale genetic differentiation of a mycangial mantar associated with the

ambrosia beetle, Xylosandrus germanus (Blandford) (Curculionidae: Scolytinae) in Japan. Ecology and Evolution, 7, 9203–9221.

Işık, M. (1984). Karadeniz Bölgesi fındık bahçelerinde zarar yapan Dalkıran Xyleborus (Anisandrus) dispar Fabr. (Coleoptera: Scolytidae) böceğinin biyolojisi ve mücadele metotları üzerinde araştırmalar. Araştırma Eserleri Serisi No: 30.

Işık, M., Ecevit, O., Kurt, M. A., & Yücetin, T. (1987). Doğu Karadeniz Bölgesi fındık bahçelerinde entegre savaş olanakları üzerinde araştırmalar. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları No: 20.

Karayiğit, E. N., Öztemiz, S. & Hızal, E. (2023). Akçakoca İlçesi (Düzce) fındık bahçelerinde yazıcı böcek Anisandrus dispar (Fabricius)'un bulaşma oranı. Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi, 19(1), 296–303.

Kushiyev, R., Özdemir, İ. O., Tuncer, C., Erper, İ., Kalendar, R., Alkan, M. & Özer, G. (2022). Molecular characterization of native entomopathogenic fungi from ambrosia beetles in hazelnut orchards of Turkey and evaluation of their in vitro efficacy. Insects, 13(9), 824.

Marchioro, M., Besana, L., Rossini, M., Vallotto, D., Ruzzier, E., Ortis, G., Martinez-Sañudo, I., & Faccoli, M. (2024). The first host plant dataset of Curculionidae Scolytinae of the world: miscellaneous tribes (Part 2). Scientific Data, 11, 1217. https://doi.org/10.1038/s41597-024-04087-1

Mayers, C. G., McNew, D. L., Harrington, T. C., Roeper, R. A., Fraedrich, S. W., Biedermann, P. H. W., Castrillo, L. A. & Reed, S. E. (2015). Three genera in the Ceratocystidaceae are the respective symbionts of three independent lineages of ambrosia beetles with large, complex mycangia. Fungal Biology, 119, 1075–1092.

Pfeffer, A. (1995). Zentral- und Westpaläarktische Borken- und Kernkäfer (Coleoptera: Scolytidae, Platypodidae). Basel: Pro Entomologia, 310 pp.

Ranger, C. M., Biedermann, P. H. W., Phuntumart, V., Beligala, G. U., Ghosh, S., Palmquist, D. E., Mueller, R., Barnett, J., Schultz, P. B., Reding, M. E. & Benz, J. P. (2018). Symbiont selection via alcohol benefits mantar farming by ambrosia beetles. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115, 4447–4452.

Ranger, C. M., Reding, M. E., Addesso, K. M., Ginzel, M. D., & Rassati, D. (2021). Semiochemical-mediated host selection by Xylosandrus spp. ambrosia beetles attacking horticultural tree crops. The Canadian Entomologist, 153(1), 103–120.

Ranger, C. M., Reding, M. E., Persad, A. B., & Herms, D. A. (2010). Ability of stress-related volatiles to attract and induce attacks by Xylosandrus germanus and other ambrosia beetles. Agricultural and Forest Entomology, 12(2), 177–185.

Ranger, C. M., Reding, M. E., Schultz, P. B. & Oliver, J. B. (2012). Optimizing ethanol-baited traps for monitoring damaging ambrosia beetles (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in ornamental nurseries. Journal of Economic Entomology, 105(1), 201–210.

Ranger, C. M., Reding, M. E., Schultz, P. B., & Oliver, J. B. (2013). Influence of flood-stress on ambrosia beetle host-selection and implications for their management in a changing climate. Agricultural and Forest Entomology, 15(1), 56–64.

Ranger, C. M., Reding, M. E., Schultz, P. B. & Oliver, J. B. (2016). Biology, ecology, and management of nonnative ambrosia beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in ornamental plant nurseries. Journal of Integrated Pest Management, 7(1), 9.

Ranger, C. M., Schultz, P. B., Frank, S. D., Chong, J. H., & Reding, M. E. (2015). Non-native ambrosia beetles as opportunistic exploiters of living but weakened trees. PLOS ONE, 10(7), e0131496.

Riba-Flinch, J. M., Goula, M., Espadaler, X., Pujade-Villar, J. & Riba, J. M. (2022). Current status and first detection of Xylosandrus germanus (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in live trees in the Iberian Peninsula. EPPO Bulletin, 52, 481–492.

Ruzzier, E. et al. (2023). New species and new records of exotic Scolytinae (Coleoptera, Curculionidae) in Europe. ZooKeys.

Ruzzier, E., Prazaru, S. C., Faccoli, M. & Duso, C. (2021). Xylosandrus germanus (Blandford, 1894) on grapevines in Italy with a compilation of world scolytine weevils developing on Vitaceae. Insects, 12(10), 869.

Saruhan, I., & Tuncer, C. (2001). Population densities and seasonal fluctuations of hazelnut pests in Samsun, Turkey. Acta Horticulturae, 556, 495–502.

Saruhan, İ. & Akyol, H. (2012). Monitoring population density and fluctuations of Anisandrus dispar and Xyleborinus saxesenii in hazelnut orchards. African Journal of Biotechnology, 11(18), 4202–4207. https://doi.org/10.5897/AJB11.4185

Saruhan, İ. & Akyol, H. (2013). Monitoring population density and fluctuations of Xyleborus dispar and Xyleborinus saxesenii with red winged sticky traps in hazelnut orchards. African Journal of Agricultural Research, 8(19), 2189–2194. https://doi.org/10.5897/AJAR11.1317

Speranza, S., Bucini, D. & Paparatti, B. (2009). New observations on the biology of European shot-hole borer (*Xyleborus dispar* (F.)) on hazel in Northern Latium (Central Italy). Acta Horticulturae, 845, 539–542. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.845.84

Tuncer, C., & Ecevit, O. (1997). Current status of hazelnut pests in Turkey. Acta Horticulturae, 445, 545–552.

Tuncer, C., Knížek, M. & Hulcr, J. (2017). Scolytinae in hazelnut orchards of Turkey: Clarification of species and identification key (Coleoptera, Curculionidae). ZooKeys, 710, 65–76. https://doi.org/10.3897/zookeys.710.15047

Tuncer, C., Kushiyev, R. & Erper, İ. (2018). Determination of fungal flora on Anisandrus dispar Fabricius and Xylosandrus germanus Blandford (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). Acta Horticulturae, 1226, 391–397.

Tuncer, C., Özdemir, İ. O. & Kushiyev, R. (2020). Türkiye fındık bahçelerinde yeni zararlı türler: Xylosandrus germanus Blandford (Col.: Curculionidae: Scolytinae), Metcalfa pruinosa Say (Hem.: Flatidae), Croesus septentrionalis Linnaeus (Hym.: Tenthredinidae) ve Anoplophora chinensis Forster (Col.: Cerambycidae). Black Sea Journal of Agriculture, 3(1), 74–81.

Vega, F. E., Infante, F. & Johnson, A. J. (2015). The genus Hypothenemus, with emphasis on H. hampei, the coffee berry borer. In: Vega, F. E. & Hofstetter, R. W. (eds), Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species. Academic Press.

Vujić, M. D., & Vesović, N. (2022). The fig bark beetle Hypoborus ficus Erichson, 1836 (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in Serbia: first records for more than a century. Acta Entomologica Serbica, 27(2), 91–96. https://doi.org/10.5281/zenodo.7447652

Weber, B. C. & McPherson, J. E. (1983). Life history of the ambrosia beetle Xylosandrus germanus (Coleoptera: Scolytidae). Annals of the Entomological Society of America, 76, 455–462.

Wolf, M. & Gruber, A. (2025). Investigations on the flight behaviour of Anisandrus dispar (Fabricius, 1792) in trap catches in apple orchards of the Lower Adige Valley in South Tyrol. Laimburg Journal, 7.

Wood, S. L. & Bright, D. E. (1992). A catalog of Scolytidae and Platypodidae (Coleoptera), Part 2: Taxonomic index. Great Basin Naturalist Memoirs, 13, 1–1553.

Šenfeldová, S. et al. (2024). Determinants of host breadth in non-native bark and ambrosia beetles. Forest Ecology and Management, 562, 121908. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121908

BÖLÜM 7

Narenciye Ekosistemlerinde Yünlü Beyazsinek (Aleurothrixus floccosus Maskell)'in Biyo-Ekolojik Özellikleri, Zarar Mekanizmaları Ve Entegre Mücadele Yaklaşımları

***Murat Helvacı*[1]**

[1] Yrd. Doç. Dr., Lefke Avrupa Üniversitesi, Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, ORCID : 0000-0003-0539-8030

1. Giriş ve Tarımsal Önemi

1.1. Tarım Ekosistemlerinde Bitki Sağlığı ve Arthropod Baskısı

Tarım ekosistemleri, dünya nüfusunun besin güvenliğini sağlamak, tarımsal hammadde ihtiyaçlarını karşılamak ve kırsal kalkınmayı desteklemek amacıyla insanlık tarihi boyunca korunmaya ve optimize edilmeye çalışılmış karmaşık agroekosistemlerdir. Ancak bu ekosistemler, dinamik yapıları gereği bitki sağlığını tehdit eden, tarımsal üretim potansiyelini ve ürün kalitesini doğrudan ya da dolaylı yollardan sınırlayan pek çok zararlı artropod grubu ile sürekli bir mücadele içerisindedir. Bu gruplar arasında Hemiptera takımına bağlı Aleyrodidae familyası üyeleri, yani yaygın adıyla beyazsinekler, hem açık alanda hem de örtü altı (sera) yetiştiriciliğinde en tahripkâr, adaptasyon yeteneği yüksek ve popülasyon kontrolü en güç zararlılar arasında yer almaktadır (CABI, 2021). Beyazsinekler, floem özsuyundan beslenerek bitkilerin gelişimini ve fizyolojik durumunu olumsuz etkileyebilmeleri, yoğun bulaşmalarda doğrudan zarara neden olmaları ve bazı önemli bitki virüslerinin vektörlüğünü üstlenmeleri nedeniyle dünya genelinde önemli tarımsal zararlılar arasında yer almaktadır. Özellikle *Bemisia tabaci* tür kompleksi ve *Trialeurodes vaporariorum* gibi bazı beyazsinek türleri, çok sayıda ekonomik öneme sahip bitki virüsünün taşınmasında rol oynayarak önemli verim ve kalite kayıplarına neden olabilmektedir (Fiallo-Olivé et al., 2020; Morin et al., 2024). Akdeniz iklim kuşağının baskın olduğu bölgelerde, meyve bahçelerinin ekolojik dengesi bu zararlıların popülasyon dalgalanmalarından doğrudan etkilenmektedir.

1.2. Narenciye Ekosistemlerinde *Aleurothrixus floccosus* (Maskell) Türünün Konumu ve Küresel Yayılımı

Özellikle turunçgil ekosistemlerinde özel ve istilacı bir konuma sahip olan yünlü beyazsinek (*Aleurothrixus floccosus* Maskell), Neotropik kökenli bir tür olup zaman içinde Akdeniz havzası başta olmak üzere dünyanın narenciye üreten pek çok bölgesine yayılım göstermiştir (Melone ve ark., 2025). Ulusoy ve ark. (2003) tarafından Doğu Akdeniz Bölgesi'nde gerçekleştirilen kapsamlı araştırmalarda, bu zararlının narenciye alanlarında yüksek popülasyon baskısı yarattığı, ağaçların vejetatif gelişimini engellediği ve bahçe verimini doğrudan tehdit ettiği açıkça ortaya konmuştur. Fransa, İtalya, İspanya, Yunanistan ve Türkiye gibi önemli narenciye üretim havzalarında ekonomik kayıplara neden olan bu tür, yaprak alt yüzeylerinde oluşturduğu yoğun koloniler ve mumsu yapılarla tarımsal tehdidin boyutunu her geçen gün artırmaktadır (Melone ve ark., 2025).

1.3. İklim Değişikliği, Küreselleşen Ticaret ve Popülasyon Patizmaları

Günümüz tarım ekosistemlerinde, beyazsinek popülasyonlarının iklim değişikliklerinin (artan ortalama sıcaklıklar, kuraklık periyotları) ve küreselleşen tarımsal ticaretin de etkisiyle yeni coğrafi bölgelere hızla yayıldığı bilinmektedir (Hanuka ve Scharf, 2025). Geniş spektrumlu insektisitlerin yoğun ve tekrarlanan kullanımı, hedef zararlıların yanı sıra parazitoit ve predatörler gibi doğal düşmanları da olumsuz etkileyerek biyolojik kontrol mekanizmalarını

zayıflatabilmektedir. Doğal düşmanların baskılanması sonucunda zararlı popülasyonları üzerindeki doğal kontrol azalabilmekte ve bazı durumlarda zararlıların yeniden çoğalması veya ikincil zararlı salgınları (*secondary pest outbreaks*) ortaya çıkabilmektedir. Nitekim turunçgil agroekosistemlerinde geniş spektrumlu insektisit uygulamalarının ardından *Aleurothrixus floccosus* popülasyonlarında çok büyük artışlar bildirilmiştir (Janssen ve van Rijn, 2021). Geleneksel tarım alanlarında görülen bu ani patizmalar, mevcut entegre mücadele stratejilerini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu durum, geleneksel kimyasal mücadelenin sınırlılıklarını ve çevresel dezavantajlarını açıkça gözler önüne sermekte; zararlının biyolojisine uyumlu, ekosistem tabanlı ve sürdürülebilir alternatif yönetim yaklaşımlarının acilen geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Hanuka ve Scharf, 2025). Bu doğrultuda, *Aleurothrixus floccosus* türünün ekolojik dinamiklerinin ve parazitoit kompleksinin detaylı incelenmesi, narenciye üretiminde başarı odaklı mücadele programlarının temelini oluşturmaktadır (Melone ve ark., 2025). Bu kitap bölümü, narenciye ekosistemlerinde önemli ekonomik kayıplara yol açan yünlü beyazsineğin biyo-ekolojik özelliklerini, zarar mekanizmalarını ve popülasyon dinamiklerini kapsamlı bir şekilde inceleyerek, sentetik kimyasalların doğurduğu çevresel ve ekolojik dezavantajlara karşı sürdürülebilir entegre zararlı yönetimi (IPM) ve biyolojik mücadele stratejilerini bilimsel bir perspektifle ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. Sistematik Konumu, Morfolojik Özellikleri ve Yaşam Döngüsü

2.1. Taksonomik Yerleşimi ve Coğrafi Kökeni

Aleurothrixus floccosus (Maskell), Hemiptera takımı Sternorrhyncha alttakımına bağlı Aleyrodidae familyası içerisinde yer almaktadır (CABI, 2021). Aleyrodidae familyası, bitki özsuyu ile beslenen ve morfolojik özellikleri itibarıyla hemipterlerin diğer gruplarından ayrılan özelleşmiş bir familyadır (Melone, 2025). Türün kökeni Neotropik bölge (Orta ve Güney Amerika) olmak üzere, yirminci yüzyılın ortalarından itibaren narenciye ticaretinin artmasıyla birlikte Akdeniz havzasına, Afrika'ya ve dünyanın diğer narenciye yetiştirilen alanlarına kazara taşınmış ve istilacı bir karakter kazanmıştır (CABI, 2021; Melone, 2025). Zararlı, konukçu bitkilerin özellikle genç yapraklarının alt yüzeyinde koloniler kurarak beslenir (Ulusoy ve ark., 2003). Nimf dönemlerinde salgıladıkları yoğun mumsu, pamuksu iplikçikler ve bol miktardaki tatlımsı madde (honeydew), bitkide doğrudan zayıflamaya yol açarken, dolaylı olarak da *fumajin* (kara küf) fungi gelişimine uygun ortam hazırlar (Ulusoy ve ark., 2003). Bu durum, yaprakların fotosentez kapasitesini düşürerek ve meyvelerde kalite kaybına neden olarak narenciye üretiminde ciddi ekonomik zararlara sebep olmaktadır (CABI, 2021; Ulusoy ve ark., 2003).

2.2. Morfolojik Evreler ve Biyolojik Gelişim Basamakları

Zararlının yaşam döngüsü yumurta, dört nimf dönemi (dördüncü evre puparyum/pupa evresi olarak kabul edilir) ve ergin olmak üzere temel aşamalardan oluşur (CABI, 2021):

Ergin Dönem: Ergin bireyler küçük yapılı olup vücutları genellikle sarımsı tonlardadır; kanatları ise saf beyaz renkli ince bir mumsu pudra tabakasıyla örtülmüştür. Dinlenme halinde *Aleurothrixus floccosus* erginleri, beyazımsı mumsu bir örtüyle kaplı kanatlarını vücutlarının üzerinde çatı biçiminde tutmakta ve çoğunlukla yaprakların alt yüzeylerinde bulunmaktadır. Bu davranış, türün turunçgil yapraklarının alt yüzeylerinde kolaylıkla gözden kaçabilmesine katkı sağlayabilmektedir (Soliman, 2023). Dişiler erkeklere kıyasla daha iri bireylerdir (CABI, 2021).

Yumurta Evresi: Dişiler yumurtalarını narenciye yapraklarının alt yüzeyine, tür için karakteristik olan daire veya spiral (kavisli) desenler şeklinde, yaprak dokusuna kısmen gömülü olarak bırakırlar (Soliman, 2023). Yumurtalar 0,2 mm'den daha küçük olup genellikle yaprakların alt yüzeylerine dairesel veya yarım dairesel diziler halinde bırakılmaktadır. Yumurtaların rengi gelişme sürecinde açık tonlardan daha koyu renklere doğru değişebilmektedir. Laboratuvar koşullarında yapılan çalışmalarda, *Aleurothrixus floccosus* dişilerinin ortalama 73 yumurta bıraktığı, bazı çalışmalarda ise dişi başına yaklaşık 82–89 yumurtaya ulaşan değerler bildirildiği belirlenmiştir (Selvaraj ve Sumalatha, 2022).

Nimf Evreleri: Yumurtadan yeni çıkan birinci dönem nimfler (crawler) hareketlidir ve yumurtaların bulunduğu bölgeden ayrılarak yaprak yüzeyinde uygun bir beslenme noktası ararlar. Uygun beslenme bölgesine ulaştıktan sonra stilelerini yaprak dokusuna sokarak beslenmeye başlar ve sonraki nimf dönemlerinde hareketsiz hale gelirler (Arulappan ve ark., 2022). Uygun beslenme noktasını bulduklarında hortumlarını (stylet) dokuya sabitleyerek hareketsiz döneme geçerler (Soliman, 2023). Takip eden ikinci ve üçüncü dönem nimfler hareketsiz olup, vücut çevrelerinden salgıladıkları kirli beyaz, pamuksu ve ipliksi mumsu yapılarla kendilerini tamamen çevrelerler (CABI, 2021).

Pupa Evresi (Puparyum): Son nimf evresinin (dördüncü instar) tamamlanmasına yakın puparyum şekillenir (Soliman, 2023). Bu evrede ergin yapılar tamamen olgunlaşır ve puparyum kabuğunu ters 'T' şeklinde yarıp çıkan yeni nesil erginler, uçuşarak çevre ağaçlara ve yeni yapraklara yayılım gösterirler (CABI, 2021).

3. Zarar Mekanizması ve Mumsu Kalkan Yapısı

3.1. Floem Beslenmesi ve Bitki Fizyolojisine Etkileri

Turunçgil yünlü beyazsineğinin (*Aleurothrixus floccosus* Maskell) bitkilerde oluşturduğu zarar, doğrudan floem özsuyunun emilmesi ve dolaylı olarak balözü salgısı üzerinde gelişen fumajin tabakasının fotosentetik aktiviteyi azaltması olmak üzere iki temel mekanizma üzerinden gerçekleşmektedir. Yoğun bulaşmalarda bu zararlar bitki gelişiminin zayıflamasına, yaprak dökülmesine ve meyve kalitesinde bozulmalara neden olarak ekonomik kayıplara yol açabilmektedir (Calabuig ve ark., 2015; Beyene ve ark., 2026). *Aleurothrixus floccosus*'un ergin ve özellikle nimf dönemleri, turunçgil yapraklarının floem özsuyundan beslenerek bitkinin besin ve su kaynaklarını tüketmektedir. Yüksek

popülasyon yoğunluklarında bu beslenme zararı yapraklarda solgunluk ve dökülmeye neden olabilmekte; ayrıca salgılanan balözü üzerinde gelişen fumajin tabakası fotosentetik aktiviteyi azaltarak bitkinin zamanla zayıflamasına yol açabilmektedir. Dolayısıyla yoğun A. floccosus infestasyonları, bitki gelişimi ve turunçgil üretiminin verim ve kalite unsurları üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Telli ve Yiğit, 2019; Calabuig ve ark., 2025). *Aleurothrixus floccosus*'un özellikle nimf dönemlerinde floem özsuyunu emerek beslenmesi, yoğun bulaşmalarda bitkinin fizyolojik dengesini olumsuz etkileyebilmektedir. Zararlının yüksek popülasyon yoğunluklarında beslenmesi sonucunda yapraklarda kloroz, solgunluk ve gelişme geriliği görülebilmekte; ileri düzeydeki bulaşmalarda ise erken yaprak dökülmeleri meydana gelebilmektedir (Özer ve Kısmalı, 2003).

3.2. Tatlı Madde (*Honeydew*) Salgısı ve Fumajin (Siyah Küf) Oluşumu

Zararlının oluşturduğu önemli zarar mekanizmalarından biri, beslenme sırasında nimfler tarafından salgılanan yüksek miktardaki yapışkan balözü (*honeydew*) maddesidir. Bu salgı, yaprak yüzeyinde fumajin oluşturan mantarların gelişmesi için uygun bir besin ortamı oluşturmakta ve yoğun bulaşmalarda yaprakların fotosentetik kapasitesinin azalmasına katkıda bulunmaktadır (Soliman, 2023). *Aleurothrixus floccosus* tarafından salgılanan yoğun balözü, yaprak ve meyve yüzeylerinde birikerek siyah fumajin oluşturan mantarların gelişmesi için uygun bir ortam sağlamaktadır. Fumajin tabakasının bitki yüzeylerini kaplaması, ışığın yaprak dokusuna ulaşmasını ve fotosentetik aktiviteyi olumsuz etkileyerek bitki gelişimi ve meyve kalitesi üzerinde dolaylı zararlara neden olabilmektedir. Yaprak yüzeyini kaplayan yoğun fumajin tabakası, ışığın yaprak dokusuna ulaşmasını engelleyerek fotosentetik aktivitenin azalmasına neden olabilmektedir. Yoğun bulaşmalarda bu durum meyve gelişimini ve iriliğini olumsuz etkileyebilmekte, ayrıca fumajinin meyve yüzeylerinde oluşturduğu kirlenme ürünün görsel ve ticari kalitesini düşürerek ekonomik kayıplara yol açabilmektedir (Beyene ve ark., 2026). Ayrıca meyveler üzerindeki siyah lekelenmeler, ürünün taze tüketim pazarında reddedilmesine yol açmaktadır.

3.3. Mumsu Kalkanın Fiziksel ve Kimyasal Koruma Mekanizması

Bununla birlikte, *Aleurothrixus floccosus* türünü karakterize eden önemli özelliklerden biri, nimf dönemlerinde vücutlarını giderek kaplayan yoğun ve yünlü mumsu filamentler salgılamalarıdır. Bu karakteristik mumsu yapı, türün tanınmasında önemli bir morfolojik özellik olmasının yanı sıra, özellikle ileri nimf dönemlerinde kimyasal mücadelenin etkinliğini de sınırlandırabilmektedir (Tello ve ark., 2019). Nimfler, gelişimleri sırasında vücutlarının çevresinde ince, ipliksi ve beyazımsı mumsu filamentler salgılamakta; bu filamentler gelişme ilerledikçe yoğunlaşarak karakteristik yünlü bir örtü oluşturmaktadır. Özellikle ileri nimf dönemlerinde bu mumsu yapıların yoğunlaşması, türün karakteristik morfolojik özelliklerinden biri olarak kabul edilmektedir (López ve ark., 2005; Arulappan ve ark., 2022). *A. floccosus* nimfleri tarafından oluşturulan yoğun, yünlü mumsu filamentler, nimflerin vücut yüzeyini kaplayarak temas etkili

(*contact*) insektisitlerin zararlıya ulaşmasını ve etkin penetrasyonunu sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle, özellikle ileri nimf dönemlerinde kimyasal mücadelenin etkinliği azalabilmekte ve uygulama zamanının zararlının erken gelişme dönemleri dikkate alınarak belirlenmesi önem kazanmaktadır (Calabuig ve ark., 2015). Bu karakteristik mumsu yapı, temas etkili insektisitlerin nimflerin vücut yüzeyine ulaşmasını ve penetrasyonunu sınırlandırarak kimyasal mücadelenin etkinliğini azaltabilmektedir. Bu nedenle, Aleurothrixus floccosus'un yönetiminde kimyasal uygulamaların tek başına yeterli olmadığı durumlarda, doğal düşmanların korunmasına ve biyolojik mücadeleye dayalı entegre yönetim yaklaşımlarının önemi artmaktadır (Umeh ve Adeyemi, 2011).

4. Popülasyon Dinamikleri ve Ekolojik Özellikler

4.1. Fenolojik Gözlemler ve Yıllık Nesil Sayısı

Turunçgil yünlü beyazsineği *Aleurothrixus floccosus*'un popülasyon dinamikleri, mevsimsel dalgalanmaları ve yayılışı, Akdeniz havzasındaki turunçgil üretim alanlarında uzun süredir araştırılmaktadır. Türkiye'de yapılan çalışmalar, zararlının popülasyon yoğunluğunun mevsimsel olarak önemli değişimler gösterdiğini, uygun çevre koşullarında yüksek yoğunluklara ulaşabildiğini ve doğal düşmanların popülasyon gelişiminde önemli rol oynadığını ortaya koymuştur (Yerlikaya ve ark., 2016). *A. floccosus*'un fenolojisi üzerine yapılan çalışmalar, uygun sıcaklık ve bitki gelişme koşullarında zararlının hızlı bir şekilde çoğalabildiğini ve yıl içerisinde birden fazla örtüşen nesil oluşturabildiğini göstermektedir. Akdeniz koşullarında yılda 4–7 örtüşen nesil gelişebildiği bildirilmiş; bazı çalışmalarda ise farklı gelişme dönemlerinin aynı anda bulunması ve bir yıl içerisinde altı örtüşen neslin ayırt edilebilmesi, zararlının sürekli ve dinamik bir popülasyon yapısına sahip olduğunu ortaya koymuştur (Katsoyannos ve Ifantis, 1997; Soto ve ark., 2001).

4.2. Sürgün Dinamikleri (*Flush*) ve Mikrohabitat Avantajı

Aleurothrixus floccosus'un popülasyon gelişimi, turunçgil ağaçlarının yeni sürgün (*flush*) oluşturma dönemleriyle yakından ilişkilidir. Yeni yaprakların geliştiği bu dönemlerde zararlının ergin ve nimf yoğunluklarında belirgin artışlar görülebilmekte ve popülasyonun mevsimsel dalgalanmaları büyük ölçüde sürgün gelişimi ile çevresel koşullar tarafından şekillenmektedir (Chermiti ve ark., 1993). Cassino ve Nascimento (1999) çalışmalarında, nimf evrelerinin salgıladığı yoğun mumsu iplikçikler ve yapışkan ballı baba (*honeydew*) tabakasının, zararlıya sadece besin kaynağı değil, aynı zamanda dış çevresel stres faktörlerine karşı korunaklı bir mikrohabitat sağladığını vurgulamaktadır. Aleurothrixus floccosus'un nimf dönemlerinde gelişen yoğun mumsu filament tabakası, insektisitlerin zararlı ile doğrudan temasını ve etkin penetrasyonunu sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle, özellikle yüksek popülasyon yoğunluklarında geleneksel kimyasal mücadele yöntemlerinin etkinliği azalabilmekte ve biyolojik mücadele etmenlerinin korunmasına dayalı entegre mücadele yaklaşımları önem kazanmaktadır (Ulusoy ve ark., 2003; Calabuig ve ark., 2025).

5. Entegre Zararlı Yönetimi (IPM) ve Entegre Mücadele Stratejileri

Turunçgil yünlü beyazsineğin narenciye ekosistemlerinde yarattığı ekonomik tehditlerin bertaraf edilmesinde, tek yönlü uygulamaların (özellikle tek başına kimyasal kontrolün) uzun vadede başarısız olduğu ve direnç gelişimine yol açtığı bilimsel olarak kanıtlanmıştır (Bellows ve ark., 1994). Bu nedenle, zararlı popülasyonlarını ekonomik zarar oluşturmayacak düzeylerde tutarken pestisit kullanımından kaynaklanan insan sağlığı ve çevre üzerindeki riskleri azaltmayı amaçlayan Entegre Zararlı Yönetimi (IPM) yaklaşımlarının uygulanması büyük önem taşımaktadır. IPM kapsamında izleme ve ekonomik eşiklere dayalı karar verme, önleyici ve biyolojik mücadele yöntemlerine öncelik verilmesi ve kimyasal mücadeleye yalnızca gerekli durumlarda başvurulması temel ilkeler arasında yer almaktadır (FAO, 2017; Deguine ve ark., 2021). Entegre Zararlı Yönetimi (IPM) kapsamında, kültürel, mekanik, fiziksel, biyolojik ve kimyasal mücadele yöntemlerinin zararlının biyolojisi, bitkinin gelişme dönemi, çevresel koşullar ve ekonomik zarar eşiği dikkate alınarak birbirini tamamlayacak şekilde uygulanması gerekmektedir. Önleyici ve kimyasal olmayan yöntemlere öncelik verilmeli; kimyasal mücadele ise izleme sonuçlarına göre zararlı popülasyonunun ekonomik düzeyde zarar oluşturma riski bulunduğunda, seçici ve kontrollü bir şekilde kullanılmalıdır (FAO, 2017; Mwajombe ve ark., 2025).

5.1. Kültürel Önlemler ve Bahçe Yönetimi Uygulamaları

Entegre mücadelenin temel unsurlarından biri olan kültürel tedbirler, turunçgil ağaçlarının gelişme koşullarını ve taç yapısını düzenleyerek *Aleurothrixus floccosus* popülasyonlarının gelişimini sınırlandırmayı ve doğal düşmanların etkinliğini desteklemeyi amaçlamaktadır. Budama yönetimi uygulanan turunçgil bahçelerinde *A. floccosus* popülasyonlarının farklılık gösterebildiği ve doğal düşmanların korunmasının zararlı yönetiminde önemli olduğu bildirilmiştir (Tello-Mercado ve Zarzar-Maza, 2021).

Dengeli ve Bilinçli Gübreleme: Bahçelerde aşırı azotlu gübre tatbiki, narenciye ağaçlarında sürekli olarak taze ve yumuşak sürgün (*flush*) çıkışını tetikler. Bellows ve ark. (1994) tarafından vurgulandığı üzere, yünlü beyazsinekler beslenme ve yumurta bırakma tercihlerini bu taze sürgünlerden yana kullandıkları için azot yönetimi toprak ve yaprak analizlerine dayandırılmalıdır.

Bakım, Budama ve Taç Yönetimi: Sık dikim yapılan veya taç yapısı budama eksikliği nedeniyle aşırı kapanan bahçelerde hava sirkülasyonu kısıtlanır, nispi nem artar ve ışıklanma azalır. Bu mikroiklim koşulları, beyazsinek nimflerinin gelişimi ve popülasyon artışı için uygun bir ortam oluşturabilmektedir. Bu nedenle, taç yoğunluğunu ve sürgün gelişimini düzenlemeye yönelik uygun kültürel uygulamalar, zararlı popülasyonlarının yönetiminde önem taşımaktadır. Nitekim farklı dikim ve budama sistemlerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda, A*leurothrixus floccosus* popülasyon düzeylerinin yetiştirme ve taç yönetimi uygulamalarına göre değişebildiği bildirilmiştir (Tello-Mercado ve Zarzar-Maza, 2021).

Karınca Popülasyonlarının Kontrolü: Beyazsineklerin salgıladığı yoğun *honeydew* (tatlı madde) tabakası, bahçedeki karıncalar için önemli bir besin kaynağıdır. Karıncalar ile balözü üreten Hemiptera türleri arasındaki trofobiyotik ilişki, turunçgil agroekosistemlerinde biyolojik mücadelenin etkinliğini etkileyebilmektedir. Karıncalar, bu zararlıların salgıladığı balözüne besin kaynağı olarak erişirken, karşılığında predatör ve parazitoitler gibi doğal düşmanlara karşı koruma sağlayabilmektedir. Bu etkileşim, özellikle beyazsineklerle mücadelede kullanılan *Cales noacki* gibi parazitoitlerin etkinliğini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, karınca popülasyonlarının yönetilmesi, turunçgillerde biyolojik mücadele programlarının etkinliğini artırmaya yönelik önemli bir IPM bileşeni olarak değerlendirilebilir (Calabuig ve ark., 2015; Plata ve ark., 2025).

5.2. Mekanik ve Fiziksel Mücadele Yöntemleri

Düşük ve orta yoğunluktaki popülasyonlarda, *Aleurothrixus floccosus* erginlerinin bahçe içerisindeki uçuş ve popülasyon dinamiklerini izlemek amacıyla sarı yapışkan tuzaklardan yararlanılabilir. Nitekim Antalya'da yürütülen çalışmalarda *A. floccosus* ergin popülasyonlarının izlenmesinde sarı yapışkan tuzaklar kullanılmış ve ergin uçuşlarının mevsimsel değişimi ortaya konmuştur (Arzuman ve ark., 2021). Ayrıca, sezon başında yoğun bulaşık olduğu tespit edilen spesifik dal ve sürgünlerin mekanik olarak kesilip uzaklaştırılması, zararlının tüm bahçeye yayılmasını önleyen pratik bir fiziksel yöntemdir (Bellows ve ark., 1994).

5.3. Biyolojik Mücadele ve Doğal Düşman Kompleksi

Turunçgil yünlü beyazsineğinin yönetiminde biyolojik mücadele, doğal düşmanların etkinliğine dayalı sürdürülebilir bir kontrol yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır (Melone ve ark., 2025). Doğal koşullarda *Aleurothrixus floccosus* popülasyonları üzerinde etkili olan çok sayıda parazitoit, predatör ve entomopatojen bulunmaktadır. Türkiye'nin Doğu Akdeniz Bölgesi'nde yapılan çalışmalarda, *A. floccosus* ile ilişkili beş predatör, üç parazitoit ve bir entomopatojen türü belirlenmiştir (Ulusoy ve ark., 2003). Bunlar arasında özellikle *Cales noacki* Howard ve *Amitus spiniferus* (Brèthes), *Aleurothrixus floccosus*'un biyolojik mücadelesinde en etkili ve yaygın kullanılan parazitoitler arasında yer almakta ve her iki tür de klasik biyolojik mücadele programlarında önemli rol oynamaktadır (Melone ve ark., 2025). Bu parazitoitler, Aleurothrixus floccosus'un özellikle nimf dönemlerini parazitleyerek zararlının gelişimini ve çoğalmasını sınırlandırmakta ve böylece popülasyon yoğunluğunun doğal olarak baskılanmasına katkı sağlamaktadır (Calabuig ve ark., 2015; Telli ve Yiğit, 2019). Bahçe içi ekosistemde bulunan yararlı faunanın korunması, doğal düşmanların etkinliğini azaltabilecek geniş spektrumlu insektisit uygulamalarının sınırlandırılması açısından önem taşımaktadır. Özellikle *Aleurothrixus floccosus* popülasyonları üzerinde etkili olan parazitoit ve predatörlerin korunması, zararlının doğal yollarla baskı altında tutulmasına katkı sağlamaktadır (Telli ve Yiğit, 2019).

5.3. Kimyasal Mücadelenin Yeri, Sınırlılıkları ve Seçici İlaç Kullanımı

Turunçgil yünlü beyazsineğin (*Aleurothrixus floccosus*) nimf dönemlerinde gelişen yoğun mumsu örtü, özellikle ileri nimf dönemlerinde insektisitlerin zararlıya ulaşmasını ve etkinliğini sınırlandırabilmektedir. Laboratuvar çalışmalarında, dördüncü nimf dönemlerinin mumsu örtüleri nedeniyle buprofezine karşı daha yüksek direnç gösterdiği bildirilmiştir (Beitia & Garrido, 1990). Biyolojik mücadelenin yetersiz kaldığı ve zararlı popülasyonunun ekonomik zarar eşiğini aştığı durumlarda kimyasal mücadeleye başvurulabilir. Ancak, doğal düşmanlar üzerindeki olumsuz etkileri azaltmak amacıyla geniş spektrumlu insektisitler yerine, mümkün olduğunca hedef zararlıya yönelik ve seçici özellikte insektisitlerin tercih edilmesi; uygulamaların ise izleme sonuçlarına ve ekonomik eşiklere dayalı olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Deguine ve ark., 2021; Schmidt-Jeffris, R. A., 2023). Geniş spektrumlu insektisitlerin doğal düşmanlar üzerindeki olumsuz etkileri, *Aleurothrixus floccosus* popülasyonlarının doğal biyolojik baskıdan kurtularak artmasına zemin hazırlayabilmektedir. Nitekim, *A. floccosus*'un doğal düşmanlarının bulunmadığı veya yeterli düzeyde etkin olmadığı durumlarda yüksek popülasyon yoğunluklarına ulaşabildiği bildirilmiştir (Telli ve Yiğit, 2012). Bu nedenle tercih edilecekse, doğal dengelere zarar vermeyen ruhsatlı yazlık petrole dayalı yağlar veya büyüme düzenleyici spesifik preparatlar, yaprak alt yüzeylerini tamamen yıkayacak biçimde uygulanmalıdır (Bellows ve ark., 1994).

6. Ek Literatür ve Küresel Vaka Analizleri

6.1. Akdeniz Havzasında Parazitoit Etkinliği ve Başarı Örnekleri

Akdeniz havzasındaki narenciye alanlarında *Aleurothrixus floccosus* popülasyonlarının uzun vadeli baskılanmasında klasik biyolojik mücadele projeleri kritik rol oynamıştır. *Aleurothrixus floccosus*'un yeni yayıldığı bölgelerde biyolojik mücadele, zararlı popülasyonlarının baskılanmasında önemli bir yaklaşım olarak öne çıkmıştır. Özellikle *Cales noacki*, Akdeniz havzası ve diğer turunçgil üretim bölgelerinde klasik biyolojik mücadele programlarında kullanılan başlıca parazitoitlerden biri olmuş ve uygun çevre koşullarında *A. floccosus* popülasyonlarında yüksek düzeyde azalma sağlayabilmiştir. Cezayir'de gerçekleştirilen saha çalışmalarında da *C. noacki* ile *A. floccosus* popülasyon dinamikleri arasındaki ilişki ortaya konmuş ve parazitoitin biyolojik mücadeledeki potansiyeli değerlendirilmiştir (Mahmoudi ve ark., 2018).

6.2. Tropikal ve Subtropikal Meyve Üretiminde Beyazsinek Yönetimi

Aleurothrixus floccosus esas olarak turunçgil türlerini tercih etmekle birlikte, turunçgiller dışındaki bazı bitki türlerinde de gelişebilen polifag bir zararlıdır. Doğu Akdeniz Bölgesi'nde yapılan araştırmalarda turunçgillerin yanı sıra nar, dişbudak, patlıcan ve domates gibi farklı bitki türlerinin de *A. floccosus* için konukçu olabildiği bildirilmiştir. Bu geniş konukçu yelpazesi, özellikle turunçgil bahçelerinin çevresindeki alternatif konukçu bitkilerin ve yabancı otların zararlı yönetimi açısından dikkate alınmasını gerektirmektedir (Ulusoy ve ark., 2003).

Patti ve Rapisarda (1981) Sicilya'daki narenciye alanlarında yürüttükleri çalışmalarda, farklı parazitoit türlerinin (*Cales noacki* ve *Amitus spiniferus*) mevsimsel geçişlerde birbirini tamamlayıcı bir rol üstlendiğini ve parazitlenme oranlarının yaz sonuna doğru zirve yaptığını tespit etmişlerdir.

6.3. Karantina Önlemleri ve Uluslararası Ticaretin Rolü

Turunçgil yünlü beyazsineğinin (*Aleurothrixus floccosus*) yeni üretim alanlarına taşınmasında bulaşık fidan ve bitkisel materyaller önemli bir yayılma yolu oluşturabilmektedir. Türkiye'nin Hatay ilinde yapılan araştırmalarda, zararlının farklı ilçelere yayılışında özellikle *A. floccosus* ile bulaşık turunçgil fidanlarının taşınması ve yasadışı ticaretinin önemli rol oynadığı belirlenmiştir (Telli ve Yiğit, 2019). Bu bağlamda, sertifikalı fidan kullanımı ve bahçe girişlerinde sıkı karantina denetimlerinin uygulanması, zararlının yayılımını durdurmak için atılacak ilk ve en kritik adımı oluşturmaktadır.

6. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Narenciye üretim alanlarında son yıllarda sıklıkla karşılaşılan yünlü beyazsinek (*Aleurothrixus floccosus* Maskell) istilaları, tarımsal ekosistemlerin hassasiyetini ve doğru yönetilmediğinde ortaya çıkan ekonomik riskleri açıkça gözler önüne sermektedir (Gerling, 1990). Zararlının floem özsuyu ile beslenerek bitki fizyolojisini zayıflatması, salgıladığı yoğun tatlı madde (*honeydew*) ile fumajin (siyah küf) oluşumuna yol açarak meyve kalitesini düşürmesi ve en önemlisi nimf dönemlerindeki kalın mumsu kalkan yapısı sayesinde kimyasal ilaçlara karşı fiziksel direnç geliştirmesi, tek boyutlu mücadele yöntemlerini tamamen geçersiz kılmaktadır (Byrne ve Bellows, 1991). Literatürdeki bulgular ve saha gözlemleri, yünlü beyazsinek yönetiminde en kalıcı, ekonomik ve çevre dostu yaklaşımın Entegre Zararlı Yönetimi (IPM) ilkelerine dayalı olduğunu net bir şekilde kanıtlamaktadır (Naranjo ve ark., 2010). Bu bağlamda;

1-) Bahçe içi ekolojik dengenin gözetilmesi,

2-) *Cales noacki* ve *Amitus spiniferus* gibi etkili parazitoit komplekslerinin korunması ve desteklenmesi,

3-) Aşırı azotlu gübreleme ile yanlış sulama gibi popülasyon patizmalarını tetikleyen kültürel hatalardan kaçınılması,

4-) Karınca popülasyonlarının kontrol altında tutularak doğal düşman faaliyetlerinin kesintiye uğratılmasının sağlanması,

5-) Uluslararası karantina kurallarına ve sertifikalı fidan kullanımına riayet edilmesi,

yünlü beyazsinek popülasyonlarını ekonomik zarar eşiğinin altında tutmanın anahtarıdır (Gerling, 1990; Naranjo ve ark., 2010). Gelecekte narenciye entegre mücadele programlarının başarısı; iklim değişikliğinin beyazsinek ve parazitoitlerin biyolojisi üzerindeki etkilerinin uzun vadeli izlenmesine, iklim dostu yeni biyolojik ajanların entegrasyonuna ve çiftçi eğitim programlarının yaygınlaştırılmasına bağlı olacaktır (Byrne ve Bellows, 1991). Sürdürülebilir

tarım hedefleri doğrultusunda, kimyasal girdilerin en aza indirildiği bu ekosistem odaklı yaklaşımlar, hem ürün kalitesini ve miktarını güvence altına alacak hem de narenciye agro-ekosistemlerinin devamlılığını sağlayacaktır (Naranjo ve ark., 2010).

Kaynakça

Arulappan, J., Evans, G. A., Mohan, C., Babu, M., Meerasahib, A. K., Muthu, A., & Hegde, V. (2022). Morphological and molecular identification of the woolly whitefly, Aleurothrixus floccosus (Maskell). *International Journal of Tropical Insect Science*, *42*(3), 2493-2500. https://doi.org/10.1007/s42690-022-00777-8.

Arzuman, Ş., Karaca, İ., & Özgökçe, M. S. (2021). Antalya ili turunçgillerinde zararlı Turunçgil Pamuklu Beyazsineği Aleurothrixus floccosus maskell ve Turunçgil Beyazsineği Dialeurodes citri (ashmead)(Hemiptera: Aleyrodidae) ile bazı doğal düşmanlarının populasyon gelişmeleri. ISPEC Journal of Agricultural Sciences, 5(1), 216-226. https://doi.org/10.46291/ISPECJASvol5iss1pp216-226.

Bellows, T. S., Perring, T. M., Gill, R. J., ve Headrick, D. H. (1994). Description of a species of *Bemisia* (Homoptera: Aleyrodidae) encountered in recent outbreaks in the United States. *Annals of the Entomological Society of America*, 85(2), 195-206. https://doi.org/10.1093/aesa/87.2.195.

Beitia, F., & Garrido, A. (1990). Mortality produced by buprofezin in immature stages of Aleurothrixus floccosus (Mask.) in the laboratory.

Beyene, G. K., Getu, E., Fite, T., Kassaye, A., Goftishu, M., & Kebede, M. (2026). Prediction of the Potential Geographical Distribution of the Woolly Whitefly Aleurothrixus floccosus (Maskell) on Sweet Orange. Plant-Environment Interactions, 7(3), e70169. https://doi.org/10.1002/pei3.70169.

Byrne, D. N., ve Bellows, T. S. (1991). Whitefly biology. *Annual Review of Entomology*, 36(1), 431-457. https://doi.org/10.1146/annurev.en.36.010191.002243.

CABI Compendium. (2021). *Aleurothrixus floccosus* (WOOLLY WHITEFLY). CAB International. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.4538.

Calabuig, A., Garcia-Marí, F., & Pekas, A. (2015). Ants in citrus: impact on the abundance, species richness, diversity and community structure of predators and parasitoids. Agriculture, Ecosystems & Environment, 213, 178-185. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.001.

Cassino, P. C., & Nascimento, F. N. (1999). Aleirodídeos (Homoptera: Aleyrodidae) em plantas cítricas no Brasil: distribuição e identificação. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, *28*(1), 75-83. https://doi.org/10.1590/S0301-80591999000100008.

Chermiti, B., Onillon, J. C., Dali, M., & Messelmani, H. (1993). Control of the woolly whitefly, Aleurothrixus floccosus (Hom., Aleurodidae) by the parasitoid, Cales noacki (Hymenopt., Aphelinidae). Bulletin OILB/SROP, 16(7), 86-98.

Deguine, J. P., Aubertot, J. N., Flor, R. J., Lescourret, F., Wyckhuys, K. A., & Ratnadass, A. (2021). Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. Agronomy for Sustainable Development, 41(3), 38. https://doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w.

FAO (2017). Integrated pest management of major pests and diseases in Eastern Europe and the Caucasus. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i5475e.

Fiallo-Olivé, E., Pan, L. L., Liu, S. S., & Navas-Castillo, J. (2020). Transmission of begomoviruses and other whitefly-borne viruses: dependence on the vector species. Phytopathology, 110(1), 10-17. https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-19-0273-FI.

Gerling, D. (1990). Natural enemies of whiteflies: predators and parasitoids. *Whiteflies: their bionomics, pest status and management*, 147-185. https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543024080076928.

Hanuka, G., ve Scharf, I. (2025). Interactions Between Woolly Whiteflies and Their Parasitoid Wasp: Development, Competition, and Reproductive Potential. J Appl Entomol, 149: 549-557. https://doi.org/10.1111/jen.13401

Janssen, A., & van Rijn, P. C. (2021). Pesticides do not significantly reduce arthropod pest densities in the presence of natural enemies. *Ecology letters*, *24*(9), 2010-2024. https://doi.org/10.1111/ele.13819.

Katsoyannos, P., Ifantis, K., & Kontodimas, D. C. (1997). Phenology, population trend and natural enemies of Aleurothrixus floccosus (Hom.: Aleyrodidae) at a newly invaded area in Athens, Greece. BioControl, 42(4), 619-628. https://doi.org/10.1007/BF02769820.

Lopez, V. F., Kairo, M. T. K., & Bacon, P. R. (2005). Bioecological studies on the whiteflies (Hemiptera: Aleyrodidae) of Trinidad and Tobago. *Living World, Journal of the Trinidad and Tobago Field Naturalists' Club*. 15-22.

Mahmoudi, A., Benfekih, L., Yigit, A., & Goosen, M. (2018). An assessment of population fluctuations of citrus pest woolly whitefly Aleurothrixus floccosus (Maskell, 1896)(Homoptera, Aleyrodidae) and its parasitoid Cales noacki Howard, 1907 (Hymenoptera, Aphelinidae): A case study from Northwestern Algeria. *Acta agriculturae Slovenica*, *111*(2). http://doi.org/10.14720/aas.2018.111.2.15.

Melone, G., Andretta, L., Guastaferro, V. M., Romito, E., Formisano, G., Giorgini, M., & Laudonia, S. (2025). The Parasitoid Complex of *Aleurothrixus floccosus* (Hemiptera: Aleyrodidae) in the Citrus Groves of Central–Southern Italy. *Insects*, *16*(10), 1037.

Morin, S., Atkinson, P. W., & Walling, L. L. (2024). Whitefly–plant interactions: an integrated molecular perspective. Annual Review of Entomology, 69(1), 503-525. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120120-093940.

Mwajombe, K. K., Maro, J., Njusi, M. A., & Gwabara, D. E. (2025). Integrated pest management: Training guide for facilitators. Food & Agriculture Organization. https://doi.org/10.4060/cd7169en.

Naranjo, S. E., Castle, S. J., De Barro, P. J., & Liu, S. S. (2010). Population dynamics, demography, dispersal and spread of Bemisia tabaci. In *Bemisia: Bionomics and management of a global pest* (pp. 185-226). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2460-2_6.

Özer, G., & Kısmalı, Ş. (2003). Izmir İli Turuncgil Alanlannda Turuncgil Pamuklu Beyazsinegi Aleurothrixus Floccosus (Maskell) (Homoptera: Aleyrodidae)'un Yayılışı, Zaran ve Populasyon Yogunlugu Üzerinde Arastirmalar. Turkish Journal of Entomology, 27(1), 61-72. https://izlik.org/JA76FH92WC.

Patti, I., & Rapisarda, C. (1981). Findings on the morphology and biology of aleyrodids injurious to cultivated plants in Italy.

Plata, Á., Fernández de Bobadilla, M., & Tena, A. (2026). Evolutionary ecology of the interactions between trophobiotic ants and parasitoids of phloem-feeding hemipterans. Biological Reviews, 101(2), 695-712. https://doi.org/10.1111/brv.70102.

Schmidt-Jeffris, R. A. (2023). Nontarget pesticide impacts on pest natural enemies: progress and gaps in current knowledge. Current Opinion in Insect Science, 58, 101056. https://doi.org/10.1016/j.cois.2023.101056.

Selvaraj, K., & Sumalatha, B. V. (2022). Increasing distribution, biology and population dynamics of invasive woolly whitefly, Aleurothrixus floccosus on guava. http://epubs.icar.org.in/ejournal/index.php/IJPP/article/view/121791.

Soliman, A. M. (2023). *Aleurothrixus floccosus*: an invasive pest attacks different species of citrus trees in Alexandria Governorate, Egypt. Alexandria Science Exchange Journal, 44(4), 647-653.

Soto, A., Ohlenschläger, F., & Garcia-Marí, F. (2001). Population dynamics and biological control of the whiteflies Aleurothrixus floccosus, Dialeurodes citri and Parabemisia myricae (Homoptera: Aleyrodidae) in citrus orchards of Valencia (Spain).

Telli, Ö., & Yiğit, A. (2019). Hatay ili turunçgillerinde zararlı turunçgil pamuklu beyazsineği, Aleurothrixus floccosus'un (Maskell) (Hemiptera: Aleyrodidae) yayılışı, konukçuları, popülasyon değişimi ve biyolojisi. Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi, 24(2), 97-109. https://izlik.org/JA89DE92TU.

Tello, V., Peralta, O., & Rioja, T. (2019). Voltinismo de Aleurothrixus floccosus Maskel (Hemiptera: Aleyrodidae) en un agroecosistema de oasis en el

Desierto de Atacama, Región de Tarapacá, Chile. Idesia (Arica), 37(1), 5-7. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005002303.

Tello Mercado, V., & Zarzar-Maza, M. (2021). Population fluctuation and parasitism of Aleurothrixus floccosus (Hemiptera: Aleyrodidae) in citrus trees from Atacama Desert, Chile. Revista Colombiana De Entomologia, 47(1). https://doi.org/10.25100/socolen.v47i1.7806.

Ulusoy, M. R., Vatansever, G., Erkılıç, L., & Uygun, N. (2003). Studies on *Aleurothrixus floccosus* (Maskell)(Homoptera, Aleyrodidae) and its parasitoid, Cales noacki Howard (Hymenoptera, Aphelinidae) in the East Mediterranean Region of Turkey. Journal of pest science, 76(6), 163-169. https://doi.org/10.1007/s10340-003-0014-5.

Umeh, V. C., & Adeyemi, A. (2011). Population dynamics of the woolly whiteflyAleurothrixus floccosus (Maskell) on sweet orange varieties in Nigeriaand association of A. floccosus with the entomopathogenic fungiAschersonia spp. Fruits, 66(6), 385-392. http://doi.org/10.1051/fruits/2011056.

Yerlikaya, H., Yıldırım, E. M., & Başpınar, H. (2016). Aydın İl Merkezi'nde turunç ağaçlarında Aleurothrixus floccosus (Maskell) (Hemiptera: Aleyrodidae)' un popülasyon dalgalanması ve doğal düşmanlarının belirlenmesi. Türkiye Entomoloji Bülteni, 6(1), 75-81. https://doi.org/10.16969/teb.48650.

BÖLÜM 8

Kivide Virüs Hastalıklarının Epidemiyolojisi ve Yayılım Dinamikleri

Yağmur Türkmen[1]

[1] Dr., Ordu Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü
0000-0002-0566-1591

1. Giriş

Kivi (*Actinidia* spp.), dünya genelinde ekonomik öneme sahip çok yıllık meyve türlerinden biridir. Ticari üretimde özellikle *Actinidia deliciosa* ve *A. chinensis* yaygın olarak yetiştirilmektedir (Ferguson, 2013; Huang & Ferguson, 2001). Kivide viral hastalıklara yönelik çalışmalar özellikle 2000'li yıllardan sonra hız kazanmış; moleküler tanı yöntemleri ve yüksek verimli dizileme (high-throughput sequencing, HTS) teknolojileri, daha önce tanımlanmamış viral genomların ve *Actinidia* türlerindeki viral çeşitliliğin ortaya konmasına önemli katkı sağlamıştır (Clover vd., 2003; Blouin vd., 2013; Zhao vd., 2021; Zhao vd., 2022).

Kivide viral enfeksiyonların epidemiyolojik açıdan önem taşımasının temel nedenlerinden biri, bitkilerin büyük ölçüde vejetatif yollarla çoğaltılmasıdır. Enfekteli ana bitkilerden elde edilen aşı kalemi, çelik veya diğer çoğaltım materyallerinin kullanılması, virüslerin yeni bitkilere ve üretim alanlarına taşınmasına neden olabilir. Nitekim *Apple stem grooving virus* (ASGV, *Capillovirus mali*) ve *Actinidia* ile ilişkili *Citrus leaf blotch virus* (CLBV, *Citrivirus citri*) gibi virüslerin çoğaltım materyaliyle ilişkilendirilmesi, bitki materyali hareketinin epidemiyolojik önemini ortaya koymuştur (Clover vd., 2003; Chavan vd., 2013).

Bunun yanında, aynı bitkide birden fazla virüsün bulunabilmesi kivi viral hastalıklarının tanılanmasını ve epidemiyolojik değerlendirmesini daha karmaşık hâle getirmektedir. Farklı üretim bölgelerinde yapılan surveylerde tekli enfeksiyonların yanı sıra çeşitli virüslerin birlikte bulunduğu enfeksiyonlar da belirlenmiştir (Zhao vd., 2021; Shang vd., 2022). HTS çalışmalarının ortaya koyduğu geniş viral çeşitlilik ise *Actinidia* türlerinde viral enfeksiyonların yalnızca belirti gösteren bitkiler üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir (Zhao vd., 2021; Zhao vd., 2022).

Bu nedenle kivide virüs hastalıklarının değerlendirilmesinde yalnızca virüslerin varlığının belirlenmesi değil, enfeksiyon kaynakları, çoğaltım materyalinin rolü, bulaşma ve yayılma yolları, konukçu özellikleri ve üretim sistemleri arasındaki ilişkilerin birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu bölümde *Actinidia* türlerinde virüs hastalıklarının epidemiyolojisi ve yayılım dinamikleri; enfeksiyon kaynakları, yayılma yolları, coğrafi dağılım, bitki materyali hareketi ve hastalık yönetimi açısından değerlendirilecektir.

2. Kivide Virüs Hastalıklarının Ortaya Çıkışı ve Yayılışının Tarihsel Gelişimi

Kivide virüs hastalıklarına ilişkin ilk çalışmalar uzun süre sınırlı kalmış, virüslerin varlığına yönelik sistematik araştırmalar özellikle 2000'li yıllardan sonra hız kazanmıştır. Daha erken dönemlerde kivi bitkilerinde mozaik, halkalı leke ve kloroz gibi virüs benzeri belirtiler bildirilmiş olsa da bu belirtilerin

etiyolojik nedenleri çoğunlukla kesin olarak ortaya konulamamıştır. *Actinidia* türlerinde doğal olarak enfekte olan ilk virüs, 2003 yılında Çin'den Yeni Zelanda'ya gönderilen kivi çeliklerinin karantina incelemeleri sırasında belirlenen ***Apple stem grooving virus*** **(ASGV, *Capillovirus mali*)** olmuştur (Clover vd., 2003; Blouin vd., 2013).

Bu ilk kaydın ardından Yeni Zelanda, Çin ve İtalya'da yürütülen çalışmalar, *Actinidia* türlerinin farklı virüslerle enfekte olabildiğini ortaya koymuştur. 2013 yılında yayımlanan kapsamlı bir değerlendirmede, o tarihe kadar kivide belirlenmiş 13 virüs ele alınmış ve bunların bir bölümünün kivi için yeni konukçu kayıtları olduğu, bir bölümünün ise *Actinidia* türlerinde yeni viral etmenler olarak tanımlandığı bildirilmiştir (Blouin vd., 2013).

Bu dönemde *Actinidia virus A* (AcVA, *Vitivirus alphactinidiae*) ve *Actinidia virus B* (AcVB, *Vitivirus betactinidiae*) gibi yeni virüslerin tanımlanması, kivi virolojisindeki araştırmaların yalnızca daha önce bilinen bitki virüslerinin yeni bir konukçuda belirlenmesiyle sınırlı olmadığını göstermiştir. Daha sonraki çalışmalar ise *Actinidia* türlerinde yeni viral türlerin keşfini sürdürmüştür (Blouin vd., 2012; Chavan vd., 2013).

2010'lu yılların sonlarına doğru moleküler tanı yöntemlerinin yanı sıra **yüksek verimli dizileme (HTS)** teknolojilerinin kullanılmaya başlanması, kivideki viral çeşitliliğin daha kapsamlı biçimde ortaya çıkarılmasını sağlamıştır. Bu yaklaşım sayesinde daha önce tanımlanmamış viral genomların belirlenmesi mümkün olmuş ve *Actinidia* türlerinde bilinen virüslerin sayısı kısa sürede önemli ölçüde artmıştır. Örneğin, Çin'in Shaanxi Eyaleti'nde gerçekleştirilen bir çalışmada HTS kullanılarak 10 bilinen virüsün yanı sıra üç yeni virüs belirlenmiş ve bu virüslerin *A. deliciosa* ve *A. chinensis* üzerindeki dağılımları incelenmiştir (Zhao vd., 2021).

Daha yakın dönemde gerçekleştirilen viromik çalışmalar, bu çeşitliliğin yalnızca ticari olarak yetiştirilen kivi bitkileriyle sınırlı olmadığını da göstermiştir. Kültüre alınmış ve yabani *Actinidia* materyallerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, her iki grupta da çok sayıda virüs belirlenmiş ve yabani *Actinidia* türlerinin viral çeşitliliğin anlaşılması açısından önemli bir kaynak olabileceği ortaya konmuştur (Zhao vd., 2022).

3. Virüslerin Kivi Bahçelerine Giriş Kaynakları

Kivide virüslerin yeni üretim alanlarına taşınmasında en önemli giriş kaynaklarından biri enfekteli çoğaltım materyalidir. Kivi yetiştiriciliğinde istenen genetik özelliklerin korunması amacıyla vejetatif çoğaltımın yaygın olarak kullanılması, ana bitkide bulunan virüslerin yeni bitkilere aktarılması açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Özellikle enfekteli aşı kalemleri, anaçlar ve çelikler kullanıldığında virüslerin yalnızca aynı üretim alanı içerisinde değil, farklı bahçelere ve üretim bölgelerine de taşınması mümkün olmaktadır. Kivi virüsleri üzerine yapılan güncel değerlendirmelerde, kontrolsüz aşılama ve

çelikle çoğaltmanın viral hastalıkların yayılmasında önemli bir faktör olduğu ve virüslerden ari çoğaltım materyalinin temel koruma stratejilerinden biri olduğu vurgulanmaktadır (Zhang vd., 2022).

Özellikle aşılamanın virüslerin yeni bitkilere aktarılmasındaki rolü, *Actinidia* virüsleri açısından deneysel olarak da gösterilmiştir. Örneğin *Actinidia virus C* (AcVC) ile yürütülen çalışmada, enfekteli anaçlar üzerine aşılanan sağlıklı sürgünlerde enfeksiyonun gelişebildiği ve virüsün aşılı sürgünlere taşınabildiği gösterilmiştir. Bu bulgu, enfekteli aşı materyalinin yeni bitkilere virüs aktarımı açısından önemli olabileceğini göstermektedir (Zhao vd., 2020).

Virüslerin kivi üretim alanlarına girişinde germplazm ve bitki materyalinin ülkeler ve üretim bölgeleri arasındaki hareketi de önemli bir risk oluşturabilir. Özellikle yeni çeşitlerin, genotiplerin veya ıslah materyallerinin farklı bölgelerden getirildiği durumlarda, enfeksiyonların başlangıçta belirti göstermeyen bitkiler aracılığıyla taşınması mümkündür. Bu nedenle bazı ülkelerde *Actinidia* türlerine ait ithal bitki materyali için özel karantina uygulamaları bulunmaktadır. Örneğin Yeni Zelanda'da *Actinidia* spp. için uygulanan ithalat sonrası karantina (post-entry quarantine, PEQ) sistemi, farklı bitki ve çoğaltım materyallerinin karantina koşullarında değerlendirilmesini öngörmektedir (Ministry for Primary Industries [MPI], 2025).

Ayrıca Yeni Zelanda'nın güncel *Actinidia* Plants for Planting Import Health Standard düzenlemesi, ithal edilen *Actinidia* bitkileri için dormant çelikler ve doku kültürü gibi materyallere özel gereklilikler getirmekte ve belirli durumlarda bitkilerin ithalat sonrası karantina tesislerinde tutulmasını öngörmektedir. Bu durum, *Actinidia* üretim materyalinin uluslararası hareketinin bitki sağlığı açısından kontrollü bir süreç olarak ele alındığını göstermektedir (MPI, 2025).

Tohumla taşınma, vejetatif çoğaltıma kıyasla daha az üzerinde durulan ancak bazı *Actinidia* virüsleri açısından önemli olabilecek bir giriş yoludur. Bunun en açık örneklerinden biri *Actinidia seed borne latent virus* (ASbLV, *Prunevirus actinidiae*)'dir. Amponsah vd. (2022), ASbLV'nin enfekteli dişi ve erkek ebeveynlerden tohumlara yüksek oranlarda aktarılabildiğini göstermiştir. Çalışmada hem maternal hem de paternal aktarımın gerçekleştiği ortaya konmuştur. Bununla birlikte, bu durumun tüm kivi virüsleri için genellenemeyeceği ve tohumla taşınmanın virüse özgü olarak değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmalıdır.

Sonuç olarak, kivide virüslerin yeni bahçelere girişinde enfekteli aşı kalemleri, anaçlar, çelikler ve diğer vejetatif çoğaltım materyalleri başlıca risk kaynakları olarak değerlendirilebilir (Zhang vd., 2022). Tohum yoluyla taşınma ise bütün virüsler için geçerli olmamakla birlikte, özellikle ASbLV gibi belirli virüsler açısından önem taşımaktadır (Amponsah vd., 2022). Bu nedenle yeni bir bahçenin viral hastalıklar açısından epidemiyolojik durumu, yalnızca bahçedeki

mevcut bitkilerin kontrolüyle değil, bahçenin kuruluşunda kullanılan materyalin kaynağı ve sağlık durumu ile birlikte değerlendirilmelidir.

4. Kivide Virüslerin Yayılma Yolları

Kivide virüslerin bir bahçeye girişinden sonra bitkiler arasında yayılması; virüsün biyolojik özellikleri, konukçu–patojen etkileşimi ve üretim uygulamalarına bağlı olarak farklı yollarla gerçekleşebilir. Bu yollar arasında **vejetatif çoğaltım ve aşılama, mekanik bulaşma, vektörlerle taşınma ve bazı virüslerde tohum veya polen aracılığıyla aktarım** yer almaktadır. Bu nedenle farklı virüslerin epidemiyolojik davranışları aynı şekilde değerlendirilmemelidir (Blouin vd., 2013; Zhang vd., 2022).

4.1. Vejetatif çoğaltım

Vejetatif çoğaltım, kivide virüslerin bitkiler arasında taşınmasında en etkili yollardan biridir. Enfekteli ana bitkilerden elde edilen çelik, aşı kalemi veya diğer çoğaltım materyallerinin kullanılması, virüsün yeni bitkilere doğrudan aktarılmasına ve enfeksiyonun sonraki üretim döngülerinde devam etmesine olanak sağlar. Bu nedenle bir bahçedeki enfeksiyon oranının yalnızca mevcut bulaşma koşullarıyla değil, kullanılan başlangıç materyalinin sağlık durumu ile de ilişkili olabileceği düşünülmelidir (Zhang vd., 2022).

4.2. Aşılama

Aşılama, vejetatif çoğaltımın özel bir biçimi olmakla birlikte epidemiyolojik açıdan ayrıca değerlendirilmelidir. Enfekteli bir bitkiden alınan aşı kaleminin sağlıklı bir anaç üzerinde kullanılması, sistemik olarak taşınabilen virüslerin yeni bitkiye aktarılmasına neden olabilir. Bu nedenle aşılama, özellikle virüslerin **bahçe içerisinde yeni bitkilerin enfekte edilmesinden ziyade enfeksiyonun başlangıç materyaliyle taşınması** açısından önemlidir. *Actinidia virus C* (AcVC) üzerinde yapılan çalışmalar da virüsün aşılama yoluyla aktarılabildiğini göstermiştir (Zhao vd., 2020).

4.3. Mekanik bulaşma

Mekanik bulaşma, enfekteli bitki özsuyunun sağlıklı bitkilere taşınmasıyla gerçekleşebilir. Kivi yetiştiriciliğinde budama ve diğer bitki işlemleri sırasında kullanılan alet ve ekipmanlar, mekanik olarak taşınabilen virüsler açısından potansiyel bir bulaşma yolu oluşturabilir. Nitekim *Cherry leaf roll virus* (CLRV, *Nepovirus avii*)'ın kivi bitkilerinde sıra boyunca yayılım göstermesi, budama veya benzeri ekipmanlarla mekanik taşınma olasılığıyla ilişkilendirilmiştir; ayrıca kivi bahçelerinde budama işleminin bazı virüslerin yayılmasına katkıda bulunabileceği bildirilmiştir (Blouin vd., 2013; Zhang vd., 2022). Bununla birlikte, mekanik bulaşmanın tüm kivi virüsleri için önemli bir epidemiyolojik yol olduğu söylenemez. Örneğin AcCRaV'nin deneysel olarak mekanik inokulasyonla *Nicotiana benthamiana*'ya aktarılabildiği gösterilmiş, ancak bu

mekanizmanın kivi bahçesindeki doğal yayılış açısından epidemiyolojik öneminin düşük olabileceği belirtilmiştir (Zheng vd., 2017). Bu nedenle mekanik bulaşma, virüse özgü deneysel ve epidemiyolojik kanıtlar temelinde değerlendirilmelidir.

4.4. Vektörler

Bitki virüslerinin yayılmasında yaprakbitleri, koşniller, unlu bitler, akarlar ve diğer bazı organizmalar önemli vektörler olabilir. Ancak *Actinidia* türlerinde bulunan virüslerin önemli bir bölümü için doğal vektör henüz belirlenmemiştir. Kivide bildirilen çok sayıdaki virüsün yalnızca bir kısmında vektörle taşınmaya ilişkin bilgi bulunmakta, bazı virüslerde ise konukçu bitkideki doğal yayılma mekanizması hâlen açıklanamamaktadır. Bu nedenle kivide vektör kaynaklı epidemiyolojik yayılım değerlendirilirken, virüsün yalnızca ait olduğu cins veya familyadaki diğer türlerin bilinen vektörlerinden hareketle doğrudan bir sonuç çıkarılmamalıdır (Zhang vd., 2022).

Örneğin *Actinidia virus C* (AcVC) bir vitivirüs olmasına rağmen, kivide bu virüsün doğal bir vektör aracılığıyla taşındığına ilişkin kanıt bulunmamaktadır. AcVC'nin yayılmasında aşılama yoluyla taşınmanın daha olası bir yol olduğu düşünülmektedir; ancak doğal vektörünün belirlenmediği açıkça belirtilmelidir (Zhao vd., 2020).

Bununla birlikte, kivide vektör kaynaklı yayılım tamamen göz ardı edilmemelidir. Örneğin *Cucumber mosaic virus* (CMV, *Cucumovirus CMV*) ve *Alfalfa mosaic virus* (AMV, *Alfamovirus AMV*) gibi geniş konukçu dizisine sahip virüslerin yaprakbitleri tarafından taşınabildiği bilinmektedir. Bu virüslerin *Actinidia* bitkilerinde bulunması, özellikle alternatif konukçulardan kivi bitkilerine taşınmaları açısından potansiyel bir epidemiyolojik bağlantı oluşturabilir. Ancak bu durum, kivi bahçelerinde doğal epidemilerin mutlaka yaprakbitleri aracılığıyla gerçekleştiği anlamına gelmemektedir (Blouin vd., 2013).

AcCRaV için de doğal vektörün belirlenmiş olduğuna ilişkin kanıt bulunmamaktadır. *Emaravirus* cinsindeki bazı virüslerin akarlarla taşınabildiği bilinmekle birlikte, bu genel biyolojik özellik AcCRaV için doğal bir vektör bulunduğunu göstermemektedir. Bu nedenle potansiyel vektör ile deneysel olarak doğrulanmış vektör birbirinden ayrılmalıdır.

4.5. Tohum ve Polen Yoluyla Olası Yayılım

Tohum ve polen yoluyla virüs taşınması, kivide vejetatif çoğaltım kadar yaygın ve iyi belgelenmiş bir yayılma yolu değildir. Bununla birlikte, bazı *Actinidia* virüslerinde tohumla aktarımın gerçekleşebildiğine ilişkin deneysel kanıtlar bulunmaktadır. Özellikle *Actinidia seed-borne latent virus* (ASbLV, *Prunevirus actinidiae*) üzerinde yapılan çalışmada, virüsün hem maternal hem de paternal kaynaklı tohumlara yüksek oranlarda aktarılabildiği gösterilmiştir. Bu

bulgu, ASbLV açısından enfekteli bitkilerden elde edilen tohumların yeni üretim materyaline virüs taşıyabileceğini göstermektedir (Amponsah vd., 2022).

Polen yoluyla virüs aktarımı ise *Actinidia* türlerinde daha sınırlı araştırılmış bir konudur. Bu nedenle, belirli bir virüs için deneysel olarak doğrulanmış bir aktarım mekanizması bulunmadığı sürece polen kaynaklı yayılımın kivi bahçelerinde önemli bir epidemiyolojik yol olduğu sonucuna varılmamalıdır.

Bu nedenle tohum ve polen yoluyla yayılım, kivide genel bir virüs bulaşma mekanizması olarak değil, virüse ve konukçuya özgü olarak değerlendirilmesi gereken potansiyel yollar olarak ele alınmalıdır. Özellikle yeni *Actinidia* virüslerinin keşfedilmesiyle birlikte, virüslerin tohum, polen ve diğer üreme dokularındaki varlığının araştırılması gelecekteki epidemiyolojik çalışmalar açısından önem taşımaktadır.

4.6. İnsan Faaliyetleri ve Bitki Materyali Hareketi

Kivi yetiştiriciliğinde insan faaliyetleri, virüslerin hem üretim alanı içerisinde hem de farklı üretim alanları arasında taşınmasına katkıda bulunabilir. Özellikle budama, aşılama, sürgünlerin düzenlenmesi ve diğer bitki bakım işlemleri sırasında enfekteli ve sağlıklı bitkiler arasında temas oluşması, mekanik olarak taşınabilen virüsler açısından potansiyel bir bulaşma yolu oluşturabilir. Bu nedenle yetiştiricilik işlemlerinde kullanılan ekipmanların temizliği ve enfekteli bitkilerin sağlıklı bitkilerden ayrılması, virüslerin yayılma riskinin azaltılmasında önem taşımaktadır.

İnsan faaliyetlerinin epidemiyolojik önemi yalnızca bahçe içerisindeki işlemlerle sınırlı değildir. Fidanlıklar, üretim materyalinin farklı bahçelere dağıtıldığı önemli geçiş noktaları olduğundan, enfekteli bitkilerin çoğaltılması ve dağıtılması durumunda tek bir enfeksiyon kaynağı daha geniş bir üretim alanına yayılabilir. Bu nedenle virüslerden ari veya virüs açısından test edilmiş çoğaltım materyalinin kullanılması, kivi viral hastalıklarının yönetiminde temel koruyucu yaklaşımlardan biri olarak değerlendirilmektedir (Zhang vd., 2022).

Uluslararası bitki materyali hareketi de virüslerin coğrafi olarak yeni bölgelere taşınmasında önemli bir risk oluşturabilir. Özellikle *Actinidia* germplazmının ülkeler arasında taşınması sırasında karantina ve sağlık kontrollerinin uygulanması, henüz üretim alanında bulunmayan patojenlerin girişinin önlenmesi açısından önemlidir. Yeni Zelanda'da *Actinidia* bitkileri ve farklı çoğaltım materyalleri için uygulanan ithalat sonrası karantina sistemleri, bu riskin bitki sağlığı açısından dikkate alındığını göstermektedir (MPI, 2025).

Bu nedenle insan faaliyetleri, kivide virüslerin epidemiyolojisinde doğrudan bir biyolojik vektör olarak değil, **enfekteli bitki materyalinin seçilmesi, çoğaltılması, işlenmesi ve taşınması yoluyla virüslerin hareketini kolaylaştıran bir faktör** olarak değerlendirilmelidir. Özellikle fidanlık aşamasından bahçe tesisine kadar geçen süreçte bitki sağlığı kontrollerinin

bütüncül biçimde uygulanması, enfeksiyonların yeni üretim alanlarına taşınma olasılığını azaltabilir.

5. Kivide Virüs Epidemiyolojisini Etkileyen Faktörler

Kivide virüslerin epidemiyolojisi yalnızca virüsün özelliklerine değil, konukçu bitkinin özellikleri, çevresel koşullar ve yetiştirme sistemine de bağlı olarak değişmektedir (Zhang vd., 2022). Aynı virüsün farklı üretim alanlarında farklı oranlarda görülmesi, bu faktörlerin enfeksiyonun oluşumu ve yayılmasındaki rolünü ortaya koymaktadır (Shang vd., 2022). Özellikle bitki yaşı, çeşit/genotip, çevresel koşullar ve başlangıçtaki enfeksiyon durumu epidemiyolojik açıdan önem taşımaktadır (Shang vd., 2022; Zhang vd., 2022).

5.1. Konukçu ve Bitki Yaşı

Kivide virüs enfeksiyonlarının görülme sıklığı konukçu türü, çeşit ve yetiştirme bölgesine göre değişebilmektedir. *Actinidia deliciosa* ve *A. chinensis* üzerinde yürütülen çalışmalarda virüslerin dağılım ve enfeksiyon oranlarının çeşitler ve üretim alanları arasında farklılık gösterebildiği belirlenmiştir (Zhao vd., 2021). Bunun yanında, bazı virüslerin tespit edilme oranlarının bitki yaşı ile birlikte artabildiği bildirilmiştir. Sichuan'da gerçekleştirilen bir surveyde, incelenen bazı ana virüslerin tespit oranları ile asma yaşı arasında pozitif bir ilişki bulunmuştur (Shang vd., 2022). Bu durum, çok yıllık kivi bitkilerinde enfeksiyonların zaman içerisinde birikmesinin epidemiyolojik değerlendirmelerde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

5.2. Çevresel Koşullar

Sıcaklık, yükselti ve diğer çevresel koşullar virüslerin konukçudaki gelişimini ve bazı durumlarda yayılmasını etkileyebilir. Shang vd. (2022), aynı çalışma alanında daha yüksek rakımlarda bazı virüslerin tespit oranlarının daha düşük olduğunu bildirmiş ve bu durumu daha düşük sıcaklıkların virüs çoğalması veya olası vektör aktivitesi üzerindeki etkisiyle ilişkilendirmiştir. Bununla birlikte, bu gözlemin tüm kivi virüsleri için genellenmesi doğru değildir. Çevresel koşulların epidemiyolojik etkisinin virüs-konukçu etkileşimi ve olası vektörlerin biyolojisi ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

5.3. Bahçe ve Yetiştirme Sistemi

Kivide yetiştirme ve çoğaltma uygulamaları, virüslerin bahçe içerisindeki ve farklı üretim alanları arasındaki yayılışını etkileyebilir. Özellikle kontrolsüz aşılama ve çelikle çoğaltma uygulamaları enfekte bitkilerin üretim sisteminde kullanılmasına ve enfeksiyonun yeni bitkilere taşınmasına yol açabilir. Ayrıca budama ve diğer bitki işlemleri sırasında oluşan yaralar, mekanik olarak taşınabilen etmenler açısından potansiyel bulaşma noktaları oluşturabilir (Zhang vd., 2022). Bu nedenle üretim materyalinin sağlık durumu kadar bahçe yönetim uygulamalarının da epidemiyolojik açıdan dikkate alınması gerekir.

5.4. Başlangıç Enfeksiyon Düzeyi

Bir üretim alanına virüsün enfekte çoğaltım materyali ile girmesi, hastalığın başlangıç enfeksiyon düzeyini belirleyen temel faktörlerden biridir. Özellikle çok yıllık bitkilerde enfeksiyonun ilk aşamada düşük oranda bulunması, sonraki yıllarda yeni enfeksiyonların eklenmesiyle daha yüksek enfeksiyon oranlarına ulaşmasına engel olmayabilir. Bu nedenle virüslerden ari veya virüs açısından test edilmiş çoğaltım materyalinin kullanılması, epidemiyolojik açıdan yalnızca yeni enfeksiyonların önlenmesi değil, aynı zamanda başlangıç inokulumunun azaltılması bakımından da önem taşımaktadır (Zhang vd., 2022). Bu yaklaşım, kivi üretiminde uzun vadeli virüs yönetiminin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilebilir.

6. Kivide Virüslerin Coğrafi Yayılımı

Kivide virüslerin coğrafi dağılımı, *Actinidia* türlerinin yetiştirildiği alanların yanı sıra bitki materyalinin hareketi, virüslerin konukçu aralığı ve kullanılan tanı yöntemleriyle yakından ilişkilidir. Günümüzde kivi yetiştiriciliği çok sayıda ülkede yapılmasına rağmen, virüslerin varlığına ilişkin bilimsel kayıtlar sınırlı sayıda üretim bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Özellikle Çin, Yeni Zelanda, İtalya ve Güney Kore, kivi virüslerinin tanımlanması ve dağılımının araştırılması açısından öne çıkan ülkelerdir (Zhang vd., 2022).

Çin, hem *Actinidia* türlerinin genetik çeşitliliğinin yüksek olması hem de dünyanın en geniş kivi üretim alanlarına sahip olması nedeniyle kivi virolojisi çalışmalarının merkezinde yer almaktadır. Özellikle Shaanxi ve Sichuan eyaletlerinde gerçekleştirilen surveylerde çok sayıda virüs türü belirlenmiş ve aynı üretim alanlarında farklı virüslerin birlikte bulunabildiği gösterilmiştir (Zhao vd., 2021; Shang vd., 2022). Shaanxi'de gerçekleştirilen yüksek verimli dizileme çalışmalarında hem daha önce bilinen virüsler hem de yeni viral türler saptanmış; virüslerin dağılımının *A. deliciosa* ve *A. chinensis* arasında ve farklı yetiştirme bölgelerinde değişebildiği ortaya konmuştur (Zhao vd., 2021). Daha sonraki viromik çalışmalar ise virüs çeşitliliğinin yalnızca ticari bahçelerle sınırlı olmadığını, yabani *Actinidia* popülasyonlarında da önemli bir viral çeşitlilik bulunduğunu göstermiştir (Zhao vd., 2022).

Yeni Zelanda, kivi virüslerinin ilk tanımlandığı ülkelerden biri olması bakımından özel bir konuma sahiptir. 2003 yılında Çin'den getirilen *A. chinensis* çoğaltım materyalinin karantina koşullarında incelenmesi sırasında ASGV'nin belirlenmesi, *Actinidia* türlerinde doğal olarak bulunan bir virüsün ilk kesin kayıtlarından biri olmuştur (Clover vd., 2003). Daha sonraki çalışmalar, Yeni Zelanda'daki germplazm ve üretim materyalinin geçmişte Çin'den yapılan bitki materyali girişleriyle ilişkisini ve bu materyalin virüslerin taşınmasındaki potansiyel önemini ortaya koymuştur (Blouin vd., 2013).

İtalya da kivi virüslerinin coğrafi dağılımının araştırıldığı önemli üretim merkezlerinden biridir. İtalya'da AcVA, AcVB, CMV, *Cucumber necrosis virus* (CNV, *Tombusvirus cucumis*), *Pelargonium zonate spot virus* (PZSV, *Anulavirus PZSV*) ve *Actinidia virus 1* (AcV-1, *Olivavirus actinidiae*) gibi farklı virüsler bildirilmiştir (Zhang vd., 2022). Özellikle PZSV'nin kivi bitkilerinde ciddi belirtiler ve ekonomik kayıplarla ilişkilendirilmesi, bazı virüslerin yalnızca varlıkları açısından değil, bölgesel epidemiyolojik önemleri açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Blouin vd., 2013).

Güney Kore'de ise AcVA ve AcVB'nin kivi bitkilerinde bulunduğu bildirilmiştir (Cho vd., 2017). Bu kayıtlar, virüslerin coğrafi dağılımının yalnızca belirli bir üretim ülkesine özgü olmadığını, farklı *Actinidia* yetiştirme bölgelerinde benzer veya farklı viral etmenlerin ortaya çıkabileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte, günümüzde belirli ülkelerde daha fazla virüs türünün bildirilmiş olması, bu bölgelerin mutlaka daha yüksek viral çeşitliliğe sahip olduğu anlamına gelmemektedir. Virüs araştırmalarının yoğunluğu, örnekleme kapsamı ve kullanılan tanı yöntemleri ülkeler arasında farklılık göstermektedir. Özellikle HTS ve viromik yaklaşımların kullanımının yaygınlaşması, daha önce yalnızca birkaç virüsle ilişkilendirilen üretim alanlarında çok daha geniş bir viral çeşitliliğin ortaya çıkarılmasına olanak sağlamıştır (Zhao vd., 2021; Zhao vd., 2022). Bu nedenle mevcut coğrafi dağılım kayıtları, gerçek küresel dağılımın tamamını değil, bugüne kadar araştırılmış üretim alanlarında elde edilen bilgiyi yansıtmaktadır.

Kivide virüslerin coğrafi yayılımının değerlendirilmesinde ayrıca virüsün *Actinidia* spp.'ye özgü olup olmadığı da dikkate alınmalıdır. CMV, AMV veya bazı diğer geniş konukçu aralığına sahip virüsler farklı bitki türlerinde yaygın olarak bulunabilirken, AcVA, AcVB ve *Actinidia* türleri ile ilişkili diğer virüslerin dağılımı daha çok kivi üretim materyali ve *Actinidia* popülasyonlarıyla bağlantılı olabilir (Blouin vd., 2013; Zhang vd., 2022). Dolayısıyla coğrafi yayılım, yalnızca bir virüsün hangi ülkelerde saptandığı üzerinden değil, konukçu aralığı, bitki materyali hareketi, üretim sistemi ve tanı kapasitesi birlikte değerlendirilerek yorumlanmalıdır.

7. Küresel Bitki Materyali Ticareti ve Virüslerin Yayılım Riski

Kivi yetiştiriciliğinin farklı ülke ve bölgelere yayılması, *Actinidia* türlerine ait bitki materyalinin uluslararası hareketini de artırmıştır. Çeşit, anaç, aşı kalemi, çelik, fidan ve diğer çoğaltım materyallerinin ülkeler arasında taşınması, üretim açısından önemli bir gereksinim olmakla birlikte, bitki patojenlerinin yeni coğrafi bölgelere taşınması açısından da potansiyel bir risk oluşturmaktadır. Özellikle virüslerin enfekteli ancak belirti göstermeyen bitkilerde bulunabilmesi, yalnızca görsel kontrole dayalı değerlendirmelerin yetersiz kalmasına neden olabilmektedir (Clover vd., 2003; Blouin vd., 2013).

Kivide virüslerin uluslararası bitki materyali hareketiyle taşınabileceğine ilişkin önemli örneklerden biri, Çin'den Yeni Zelanda'ya getirilen *Actinidia* materyalidir. Clover vd. (2003), Çin'den ithal edilen *A. chinensis* odunsu çeliklerinin karantina koşullarında incelenmesi sırasında ASGV enfeksiyonunu belirlemiştir. Benzer şekilde, Çin kaynaklı *A. chinensis* ve *A. deliciosa* materyalinin Yeni Zelanda'ya gönderilmesiyle gerçekleştirilen araştırmalarda farklı *Actinidia* virüslerinin tanımlanması, germplazm hareketinin yeni viral etmenlerin farklı üretim sistemlerine taşınmasındaki potansiyel rolünü ortaya koymuştur (Chavan vd., 2013).

Bu risk nedeniyle bitki materyalinin uluslararası hareketinde karantina ve ithalat sonrası karantina uygulamaları önem taşımaktadır. Yeni Zelanda'da *Actinidia* türlerine yönelik güncel düzenlemeler, farklı çoğaltım materyalleri için bitki sağlığı ve karantina gereklilikleri tanımlamaktadır (MPI, 2025).

Karantina uygulamalarının yanı sıra, ithal edilecek materyalin türü ve üretim şekline göre belirlenen bitki sağlığı standartları da virüslerin giriş riskinin azaltılmasında önemlidir. Yeni Zelanda'nın *Actinidia Plants for Planting* standardında farklı çoğaltım materyalleri için bitki sağlığı ve karantina koşulları tanımlanmış; özellikle dormant çelikler ve doku kültürü materyali için özel gereklilikler getirilmiştir (MPI, 2025).

Bununla birlikte, karantina sistemlerinin etkinliği yalnızca ithalat aşamasındaki kontrole bağlı değildir. Virüslerin tanılanmasında kullanılan yöntemlerin duyarlılığı ve örnekleme stratejisi da hastalığın belirlenebilmesini etkileyebilir. Özellikle belirti göstermeyen veya düşük düzeyde enfeksiyon taşıyan bitkilerin bulunması, yalnızca simptom gözlemlerine dayalı kontrollerin enfekte materyalin üretim sistemine girişini tamamen önleyemeyebileceğini göstermektedir. Nitekim kivi bitkileri üzerinde yapılan bir surveyde bazı virüsler simptomsuz bitkilerde de tespit edilmiş ve özellikle çoğaltım amacıyla kullanılacak bitkilerin sağlık durumunun moleküler yöntemlerle doğrulanması gerektiği vurgulanmıştır (Zhao vd., 2021; Amponsah vd., 2022).

Bu nedenle küresel bitki materyali ticaretinde virüslerin yayılım riskinin azaltılması için virüs açısından test edilmiş çoğaltım materyalinin kullanılması, güvenilir tanı yöntemlerinin uygulanması, uygun karantina prosedürlerinin yürütülmesi ve materyalin izlenebilirliğinin sağlanması birlikte ele alınmalıdır. Özellikle yeni çeşit ve genotiplerin uluslararası dolaşımının arttığı günümüzde, bitki materyalinin ticari değerinin yanı sıra taşıdığı epidemiyolojik risk de değerlendirilmelidir.

8. Kivide Çoklu Virüs Enfeksiyonları ve Epidemiyolojik Önemi

Kivide aynı bitkide birden fazla virüsün bulunması, viral hastalıkların tanılanmasını ve epidemiyolojik olarak değerlendirilmesini güçleştiren önemli bir durumdur. Özellikle çok yıllık ve vejetatif olarak çoğaltılan bitkilerde, farklı

dönemlerde meydana gelen enfeksiyonların zaman içerisinde aynı bitkide birikmesi mümkündür. Bu nedenle bir üretim alanında yalnızca tek bir virüsün varlığına odaklanılması, bahçedeki gerçek viral enfeksiyon durumunun tam olarak ortaya konmasını engelleyebilir (Zhao vd., 2021; Zhang vd., 2022).

Çin'de gerçekleştirilen survey çalışmalarında kivi bitkilerinde birden fazla virüsün aynı örnekte bulunabildiği gösterilmiştir. Özellikle Shaanxi ve Sichuan'da yapılan araştırmalarda farklı virüslerin tekli veya çoklu enfeksiyonlar şeklinde bulunduğu bildirilmiştir (Zhao vd., 2021; Shang vd., 2022). Bu bulgular, kivi bahçelerinde viral enfeksiyonların yalnızca tek etmen–tek hastalık ilişkisi üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir.

Çoklu enfeksiyonların epidemiyolojik açıdan önemli sonuçlarından biri, belirtilerin yorumlanmasını güçleştirmesidir. Aynı bitkide birden fazla virüs bulunduğunda, gözlenen simptomun hangi etkene bağlı olduğunu yalnızca görsel değerlendirme ile belirlemek mümkün olmayabilir. Ayrıca enfeksiyonların konukçu üzerindeki etkileri virüslerin türüne, enfeksiyon zamanına ve konukçunun genotipine bağlı olarak değişebilir. Bununla birlikte, birlikte bulunan virüsler arasında mutlaka sinerjistik veya antagonistik bir etkileşim bulunduğu varsayılmamalıdır; bu tür ilişkilerin ortaya konulabilmesi için kontrollü deneysel çalışmalar gereklidir.

Çoklu enfeksiyonlar tanı yöntemlerinin seçimi açısından da önem taşımaktadır. Tek bir virüse yönelik serolojik veya moleküler testler, aynı bitkide bulunan diğer viral etmenleri ortaya çıkarmayabilir. Bu nedenle özellikle belirti göstermeyen veya karmaşık simptomlara sahip bitkilerde birden fazla hedefi kapsayan tanı yaklaşımlarının kullanılması önem kazanmaktadır. HTS ve viromik çalışmaların *Actinidia* türlerinde daha önce bilinmeyen viral etmenleri ortaya çıkarması, bu yaklaşımın epidemiyolojik surveylerdeki değerini göstermektedir (Zhao vd., 2021; Zhao vd., 2022).

Çoklu enfeksiyonların bir diğer önemli yönü, enfekte çoğaltım materyalinin yeni üretim alanlarına birden fazla virüsü aynı anda taşıyabilmesidir. Özellikle aşı kalemi, çelik veya diğer vejetatif materyallerin kullanılması durumunda, yalnızca hedeflenen tek bir virüsün değil, bitkide bulunan diğer viral etmenlerin de yeni bitkilere aktarılması mümkündür. Bu nedenle çoğaltım materyalinin sağlık kontrolünde yalnızca ekonomik açıdan önemli olduğu bilinen tek bir virüsün araştırılması yerine, bölgesel olarak önem taşıyan viral etmenlerin mümkün olduğunca birlikte değerlendirilmesi daha güvenilir bir yaklaşım sağlayabilir (Zhang vd., 2022).

Sonuç olarak, kivi virüslerinin epidemiyolojisinde çoklu enfeksiyonlar; tanı doğruluğu, simptomların yorumlanması, enfeksiyonların izlenmesi ve çoğaltım materyalinin sağlık durumunun belirlenmesi açısından dikkate alınmalıdır. Gelecekte yapılacak surveylerde enfeksiyonların yalnızca “pozitif” veya “negatif” olarak değerlendirilmesi yerine, virüs kombinasyonlarının ve bunların

çeşit, bitki yaşı ve yetiştirme bölgesi ile ilişkilerinin de ortaya konması, kivi viral hastalıklarının epidemiyolojisinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

9. Kivide Virüs Hastalıklarının Yönetimi

Kivide virüs hastalıklarının yönetimi, enfeksiyon meydana geldikten sonra hastalığın tedavi edilmesinden çok, virüslerin üretim sistemine girişinin ve yeni bitkilere yayılmasının önlenmesine dayanır. Virüs enfeksiyonlarının çoğunda doğrudan etkili bir tedavi yönteminin bulunmaması nedeniyle, koruyucu ve önleyici uygulamalar epidemiyolojik açıdan temel önem taşımaktadır. Bu nedenle kivi üretiminde virüs yönetimi; sağlıklı çoğaltım materyalinin kullanılması, erken tanı, karantina, bahçe hijyeni ve enfeksiyon kaynaklarının azaltılması gibi uygulamaların birlikte yürütülmesini gerektirir (Blouin vd., 2013; Zhang vd., 2022).

Bu yaklaşımın ilk aşamasını virüs açısından test edilmiş ve sağlıklı çoğaltım materyalinin kullanılması oluşturur. Çelik, aşı kalemi, anaç ve diğer vejetatif materyaller enfeksiyonların yeni bitkilere ve üretim alanlarına taşınmasında önemli bir rol oynayabildiğinden, üretim materyalinin sağlık durumunun belirlenmesi epidemiyolojik açıdan kritik öneme sahiptir. Özellikle belirti göstermeyen enfeksiyonların bulunabilmesi nedeniyle yalnızca görsel değerlendirmeye dayalı seçim yeterli olmayabilir. Serolojik ve moleküler yöntemlerle gerçekleştirilen kontroller, enfekte materyalin üretime alınma riskini azaltırken, HTS ve viromik yaklaşımlar çok sayıda viral etmenin aynı materyalde bulunabileceği durumlarda daha kapsamlı bir değerlendirme sağlayabilir (Zhao vd., 2021; Zhao vd., 2022).

Virüs yönetiminde karantina ve bitki materyali hareketinin kontrolü de önemli bir koruyucu basamaktır. Özellikle yeni çeşit, genotip veya ıslah materyalinin farklı ülkelerden ya da üretim bölgelerinden getirilmesi sırasında karantina uygulamalarının yürütülmesi, daha önce bulunmayan viral etmenlerin yeni alanlara giriş riskini azaltabilir. Yeni Zelanda'da *Actinidia* türlerine yönelik uygulanan ithalat sonrası karantina sistemi, bu yaklaşımın örneklerinden biridir (MPI, 2025). Bununla birlikte karantinanın etkinliği, yalnızca materyalin izole edilmesine değil, uygun örnekleme ve duyarlı tanı yöntemlerinin kullanılmasına da bağlıdır.

Üretim alanlarında ise enfekte bitkilerin belirlenmesi ve enfeksiyon kaynaklarının mümkün olduğunca azaltılması önem taşımaktadır. Enfekte bitkiler, bazı virüsler açısından bahçe içerisindeki yeni enfeksiyonların kaynağı olabilir. Budama, aşılama ve diğer bitki işlemleri sırasında kullanılan alet ve ekipmanların uygun şekilde temizlenmesi, mekanik olarak taşınabilen virüsler açısından bulaşma riskini azaltabilir. Bunun yanında, doğal vektörü belirlenmiş virüsler açısından uygun vektör yönetimi de değerlendirilmelidir. Ancak birçok *Actinidia* virüsü için doğal vektörlerin henüz bilinmemesi, bu alandaki yönetim stratejilerinin geliştirilmesini sınırlamaktadır (Zhang vd., 2022).

Virüs hastalıklarının uzun vadeli yönetiminde düzenli survey ve epidemiyolojik izleme de önem taşımaktadır. Üretim alanlarında virüslerin yayılışının, çeşitler arasındaki farklılıkların, bitki yaşı ile enfeksiyon arasındaki ilişkilerin ve çoklu enfeksiyonların izlenmesi, virüslerin dağılımının ve risk faktörlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayabilir (Zhao vd., 2021; Shang vd., 2022). Ayrıca yüksek verimli dizileme ve diğer moleküler tanı yaklaşımlarının survey çalışmalarına dahil edilmesi, daha önce tanımlanmamış viral etmenlerin belirlenmesine katkı sağlayabilmektedir (Zhao vd., 2021; Zhao vd., 2022).

Sonuç olarak, kivide virüs hastalıklarının yönetimi tek bir mücadele yöntemine dayanmamalı; **sağlıklı çoğaltım materyali kullanımı, güvenilir tanı, karantina, bitki materyali hareketinin kontrolü, bahçe hijyeni ve düzenli epidemiyolojik izleme** birlikte değerlendirilmelidir. Bu yaklaşımın temel amacı, enfeksiyon oluştuktan sonra hastalığı baskılamaktan çok, virüsün üretim sistemine girişini önlemek ve mevcut enfeksiyonların yeni bitkilere yayılma olasılığını azaltmaktır. Bununla birlikte, *Actinidia* virüslerinin önemli bir bölümünde bulaşma mekanizmaları ve doğal vektörlerin henüz tam olarak ortaya konmamış olması, gelecekteki araştırmaların özellikle epidemiyolojik bilgi boşluklarına yönlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

10. Sonuç

Kivide virüs hastalıklarının epidemiyolojisi, yalnızca belirli virüslerin varlığı veya dağılımıyla açıklanamayacak kadar karmaşık bir yapıya sahiptir. *Actinidia* türlerinin vejetatif olarak çoğaltılması, enfekte çoğaltım materyalinin üretim alanları arasında taşınabilmesi ve bitkilerin uzun yıllar aynı alanda yetiştirilmesi, virüslerin üretim sisteminde yerleşmesi ve zaman içerisinde yayılması açısından önemli unsurlardır. Buna karşılık çevresel koşullar, bitki yaşı, çeşit özellikleri, yetiştirme uygulamaları ve olası vektörler, enfeksiyonların görülme sıklığını ve yayılışını farklı şekillerde etkileyebilmektedir.

Kivide virüslerin coğrafi dağılımına ilişkin mevcut bilgiler, özellikle Çin, Yeni Zelanda, İtalya ve diğer önemli üretim bölgelerinde gerçekleştirilen çalışmalarla giderek genişlemektedir. Bununla birlikte belirli bölgelerde çok sayıda virüsün bildirilmiş olması, bu bölgelerin mutlaka daha yüksek viral çeşitliliğe sahip olduğu anlamına gelmemektedir. Tanı yöntemlerindeki gelişmeler ve HTS/viromik yaklaşımların yaygınlaşması, daha önce fark edilmemiş viral etmenlerin ve çoklu enfeksiyonların ortaya çıkarılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle mevcut dağılım verileri, araştırma ve örnekleme yoğunluğundaki bölgesel farklılıklar dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Küresel bitki materyali hareketi, kivi virüslerinin yeni üretim alanlarına taşınması açısından önemli bir epidemiyolojik risk oluşturmaktadır. Özellikle belirti göstermeyen enfekte bitkilerin çoğaltım materyali olarak kullanılması, virüslerin fark edilmeden yeni bölgelere ulaşmasına neden olabilir. Bu nedenle virüs hastalıklarının yönetiminde üretime sağlıklı ve test edilmiş materyalle

başlanması, uygun karantina uygulamalarının yürütülmesi ve düzenli epidemiyolojik izlemenin sağlanması temel öncelikler arasında yer almaktadır.

Aynı bitkide birden fazla virüsün bulunabilmesi de kivi viral hastalıklarının değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Çoklu enfeksiyonlar, simptomların yorumlanmasını ve tek bir etmen üzerinden yapılan epidemiyolojik değerlendirmeleri zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle gelecekteki surveylerde yalnızca belirli virüslerin varlığının araştırılması yerine, üretim alanlarındaki viral çeşitliliğin ve enfeksiyon kombinasyonlarının mümkün olduğunca kapsamlı biçimde ortaya konması önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, kivide virüs hastalıklarının sürdürülebilir yönetimi enfeksiyonun üretim sistemine girişini önleme, yayılma kaynaklarını azaltma ve epidemiyolojik değişimleri düzenli olarak izleme ilkelerine dayanmalıdır. Sağlıklı çoğaltım materyali, duyarlı tanı yöntemleri, karantina, uygun bahçe uygulamaları ve düzenli surveylerin birlikte uygulanması, virüslerin üretim alanlarında yerleşmesini ve yayılmasını sınırlandırmada temel araçlardır. Bununla birlikte birçok *Actinidia* virüsünün doğal bulaşma mekanizmaları ve vektörleri hakkındaki bilgilerin sınırlı olması, epidemiyolojik araştırmaların sürdürülmesini gerekli kılmaktadır.

Kaynaklar

Amponsah, N. T., van den Brink, R., Datson, P. M., Austin, P. T., Horner, M., & MacDiarmid, R. M. (2022). Actinidia seed-borne latent virus (ASbLV, *Betaflexiviridae*) is transmitted paternally and maternally at high rates. *Australasian Plant Pathology*, *51*, 399–407. https://doi.org/10.1007/s13313-022-00867-8

Blouin, A. G., Chavan, R. R., Pearson, M. N., MacDiarmid, R. M., & Cohen, D. (2012). Detection and characterisation of two novel vitiviruses infecting *Actinidia*. *Archives of Virology, 157*(4), 713–722. https://doi.org/10.1007/s00705-011-1219-1

Blouin, A. G., Pearson, M. N., Chavan, R. R., Woo, E. N. Y., Lebas, B. S. M., Veerakone, S., Ratti, C., Biccheri, R., MacDiarmid, R. M., & Cohen, D. (2013). Viruses of kiwifruit (*Actinidia* species). *Journal of Plant Pathology*, *95*, 221–235. https://www.jstor.org/stable/23721513

Chavan, R. R., Blouin, A. G., Cohen, D., & Pearson, M. N. (2013). Characterization of the complete genome of a novel citrivirus infecting *Actinidia chinensis*. *Archives of Virology*, *158*, 1679–1686. https://doi.org/10.1007/s00705-013-1654-2

Cho, S.-Y., Kim, H., & Yi, S.-I. (2017). First report of *Actinidia virus A* and *Actinidia virus B* infecting *Actinidia chinensis* in South Korea. *Plant Disease, 101*(7), 1248. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-17-0379-PDN

Clover, G. R. G., Pearson, M. N., Elliott, D. R., Tang, Z., Smales, T. E., & Alexander, B. J. R. (2003). Characterization of a strain of *Apple stem grooving virus* in *Actinidia chinensis* from China. *Plant Pathology*, *52*, 371–378. https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2003.00857.x

Ferguson, A. R. (2013). Kiwifruit: The wild and the cultivated plants. *Advances in Food and Nutrition Research, 68*, 15–32. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394294-4.00002-X

Huang, H., & Ferguson, A. R. (2001). Review: Kiwifruit in China. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 29*(1), 1–14. https://doi.org/10.1080/01140671.2001.9514154

Ministry for Primary Industries. (2025). *Actinidia* Plants for Planting 2025 – Import Health Standard (MPI.IHS.*ACTINIDIA*.PFP). New Zealand Government.

Shang, J., Jia, Q., Zhang, L., Zhang, S., Du, J., Wang, W., & Shui, J. (2022). Occurrence and molecular variability of the main kiwifruit viruses in the Sichuan Province of China. *Viruses*, *14*, 2460. https://doi.org/10.3390/v14112460

Zhang, G., Bai, B., Xu, M., Liu, Y., Wu, Y., & Zhao, L. (2022). Advances in and prospects for *Actinidia* viruses. *Plant Disease*, *106*, 1321–1329. https://doi.org/10.1094/PDIS-10-21-2270-FE

Zhao, L., Cao, M., Huang, Q., Jing, M., Bao, W., Zhang, Y., Hou, C., … Wang, Q.-C. (2020). Occurrence and molecular characterization of Actinidia virus C (AcVC), a novel vitivirus infecting kiwifruit (*Actinidia spp.*) in China. *Plant Pathology*, *69*, 775–782. https://doi.org/10.1111/ppa.13171

Zhao, L., Cao, M., Huang, Q., Wang, Y., Sun, J., Zhang, Y., Hou, C., & Wu, Y. (2021). Occurrence and distribution of *Actinidia* viruses in Shaanxi Province of China. *Plant Disease*, *105*, 929–939. https://doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1190-RE

Zhao, L., Wang, J., Shrestha, S., Sun, J., Wang, Y., Hou, C., Cao, M., & Wu, Y. (2022). Viromics reveals the viral diversity in cultivated and wild kiwifruit. *Plant Disease*, *106*, 3120–3126. https://doi.org/10.1094/PDIS-03-22-0669-RE

Zheng, Y., Navarro, B., Wang, G., Wang, Y., Yang, Z., Xu, W., Zhu, C., Wang, L., Di Serio, F., & Hong, N. (2017). Actinidia chlorotic ringspot-associated virus: A novel emaravirus infecting kiwifruit plants. *Molecular Plant Pathology, 18*(4), 569–581. https://doi.org/10.1111/mpp.12421

BÖLÜM 9

Balıkçılıkta Mekânsal, Zamansal ve Bayesçi Modelleme: R ile Kavramlar, Yöntemler ve Örnekler

***Tevfik Ceyhan*[1]**

[1] Prof. Dr., Ege Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Bornova, İzmir
ORCID: 0000-0002-4799-5709

1. Giriş

Balıkçılık verisinin, istatistiksel çözümlemeyi güçleştiren üç temel özelliği vardır. Bu özellikler klasik doğrusal modellerin dayandığı varsayımları çoğu zaman geçersiz kılmakta; dolayısıyla verinin kendi yapısına uygun yöntemler gerekir.

Birinci özellik çok değişkenliliktir. Örneğin bir trol seferinde tek bir tür değil, onlarca tür bir arada kaydedilmektedir; av kompozisyonu da bu türlerin birlikte değişen bollukları üzerinden ortaya çıkmaktadır. Türleri tek tek ele almak, bu birlikte değişim yapısını ve topluluk düzeyindeki örüntüleri gölgede bırakmaktadır. İkinci özellik mekânsal ve zamansal bağımlılıktır: birbirine yakın istasyonlardan, ardışık yıllardan ya da aynı gemiden gelen gözlemler birbirine benzemekte, dolayısıyla bağımsız sayılamaz. Üçüncü özellik **belirsizliktir**. Örnekleme deseninin düzensizliği, gözlem hataları ve seyrek veri; bir kestirimin ne ölçüde güvenilir olduğunun açıkça belirtilmesini zorunlu kılmaktadır.

Balıkçılık verisinin çözümlemesinde, tahmin başarısını önceleyen yöntemler geniş bir yelpazeye yayılmıştır: genelleştirilmiş doğrusal modeller (Generalized Linear Model, GLM), genelleştirilmiş toplamsal modeller (Generalized Additive Model, GAM) ve makine öğrenmesi yaklaşımları bunların başında gelmektedir. Bu yöntemler, birim çabaya düşen av (Catch Per Unit Effort, CPUE) standardizasyonu gibi sorunlarda yaygın biçimde kullanılmıştır (Maunder & Punt, 2004; Ceyhan, 2025). Bu bölüm ise tahmin odaklı bu yaklaşımların yanı sıra, yorumlanabilirliği ve belirsizliğin açık ifadesini önceleyen istatistiksel modellere yer vermektedir. Böylece değerlendirmenin ölçütü yalnızca bir modelin ne kadar iyi tahmin ettiği değil; verinin bağımlı yapısını ne ölçüde doğru temsil ettiği ve sonuçlara hangi güvenle bakılabileceğidir.

Bölümün odağında, birbirini tamamlayan üç yöntem ailesi vardır. Çok değişkenli analiz (multivariate analysis), topluluk yapısını bütün olarak çözümlemekte ve tür bileşimindeki bölgesel farkları ortaya koymaktadır. Mekânsal ve zamansal modelleme, gözlemler arasındaki konumsal ve zamana bağlı bağımlılığı doğrudan modele katmakta; böylece örnekleme deseninden arındırılmış bolluk indeksleri üretmektedir (Anderson, Ward, English, Barnett ve Thorson, 2025). Bayesçi çıkarım (Bayesian inference) ise bilinmeyen parametreler hakkında doğrudan olasılık ifadeleri kurmakta ve seyrek veride önsel bilgiyi sisteme katmaya olanak tanımaktadır (Gelman vd., 2013; McElreath, 2020). Üç yaklaşım bir araya geldiğinde, modern balıkçılık veri çözümlemesinin belirsizlik ve mekânsal bağımlılık boyutları, makine öğrenmesinin sağladığı esneklikle birlikte ele alınabilmektedir.

Her yöntem önce kuramsal gerekçesiyle tanıtılmakta, ardından R ortamında bir uygulamayla somutlaştırılmaktadır. Uygulamalarda kullanılan veriler, yazarın ham verisini paylaşmamak amacıyla `set.seed()` ile üretilmiş benzetim (simülasyon) verileridir. Örnekler, olabildiğince gerçek bulgulara bağlanarak

yöntemlerin gerçek balıkçılık sorularına nasıl uygulandığı gösterilmesi amaçlanmıştır..

2. Kuramsal Arka Plan

2.1. Balıkçılık Verisinin Bağımlı Yapısı

Klasik regresyon ve varyans analizi yöntemleri, gözlemlerin birbirinden bağımsız olduğu varsayımına dayanmaktadır. Balıkçılık verisinde bu varsayım çoğu zaman geçerli değildir. Birbirine yakın istasyonlarda ölçülen bolluk değerleri ortak çevresel koşullar nedeniyle benzeşmekte; ardışık yıllarda aynı stoktan elde edilen değerler stok dinamiğinin sürekliliği nedeniyle ilişkilenmekte; aynı gemi ya da sefer içinde toplanan gözlemler ise ortak av gücü ve operasyon özellikleri yüzünden bir arada değişmektedir (Zuur, Ieno, Walker, Saveliev & Smith, 2009).

Bağımlı gözlemleri bağımsızmış gibi ele almak yalnızca bir incelik sorunu değildir; çıkarımı doğrudan yanıltmaktadır. Bağımlılık göz ardı edildiğinde etkin örneklem büyüklüğü olduğundan büyük sayılmakta; buna bağlı olarak standart hatalar küçük tahmin edilmekte, güven aralıkları ise gerçekte olması gerekenden dar çıkmaktadır. Sonuçta anlamlı olmayan bir etki anlamlı görünebilmekte, belirsizlik de olduğundan az raporlanmaktadır. Bu yüzden bağımlı yapının modele açıkça katılması, hem daha dürüst bir belirsizlik ifadesi hem de daha güvenilir bir çıkarım için gereklidir.

Bu bağımlılığı modele katmanın iki temel yolu vardır. Birincisi, gözlemlerin gruplanmış yapısını rastgele etkilerle (random effect) temsil eden karışık etkili modellerdir (mixed effects model); örneğin her gemi için tanımlanan bir rastgele kesim terimi, gemiler arası düzenli farkları soğurmaktadır. İkincisi, konuma ya da zamana bağlı benzeşmeyi sürekli bir yüzey üzerinden modelleyen düzgünleştirme (smoothing) ve rastgele alan (random field) yaklaşımlarıdır (Wood, 2017). İlerleyen kısımlarda her iki yol da uygulamalı olarak ele alınmaktadır.

2.2. Bayesçi Paradigma

İstatistiksel çıkarımda iki temel yaklaşım vardır. Sıklıkçı (frequentist) yaklaşımda parametreler sabit fakat bilinmeyen büyüklüklerdir; belirsizlik ise verinin varsayımsal tekrarları üzerinden tanımlanmaktadır. Bayesçi yaklaşımda ise bilinmeyen parametreler birer olasılık dağılımıyla temsil edilmekte, veri gözlendikçe bu dağılım güncellenmektedir. Ayrım, güven aralığı ile güvenilir aralık (credible interval) arasındaki farkta somutlaşmaktadır: sıklıkçı güven aralığı yöntemin uzun vadeli kapsama özelliğine gönderme yaparken, Bayesçi güvenilir aralık doğrudan parametrenin bu aralıkta bulunma olasılığı biçiminde okunabilmektedir.

Bayesçi çıkarımın çekirdeği Bayes kuralıdır. Bir parametre kümesi θ ve gözlenen veri için sonsal (posterior) dağılım, olabilirlik (likelihood) ile önsel (prior) dağılımın çarpımıyla orantılıdır:

$$p(\theta \mid veri) \propto p(veri \mid \theta) \cdot p(\theta) \quad (1)$$

Bu ifadede önsel dağılım, veriyi görmeden önce parametre hakkındaki bilgiyi; olabilirlik, verinin parametreye kattığı bilgiyi; sonsal dağılım ise ikisinin birleşiminden doğan güncellenmiş bilgiyi temsil etmektedir. Sonuç bir nokta kestirimi değil, tüm bir dağılımdır; dolayısıyla parametreye ilişkin her türlü olasılık sorusu doğrudan bu dağılım üzerinden yanıtlanabilmektedir.

Bu yapının balıkçılık uygulamalarında birkaç somut üstünlüğü vardır. Birincisi, sonuçların doğrudan olasılık diliyle ifade edilebilmesidir; *stokta bir önceki yıla göre düşüş olma olasılığı* gibi ifadeler, yönetim kararları için sıklıkçı p-değerinin veremediği bir açıklık taşımaktadır (Punt & Hilborn, 1997). İkincisi, seyrek ya da bilgi içeriği düşük veride alan bilgisini zayıf bilgilendirici önsellerle sisteme katma olanağıdır; bu da kestirimleri makul sınırlar içinde tutmaktadır. Üçüncüsü, gemi ve sefer gibi gruplayıcı etkileri içeren hiyerarşik modeller doğal biçimde kurulabilmektedir (Gelman vd., 2013; McElreath, 2020).

Bu üstünlüklerin bedeli hesaplama yüküdür. Karmaşık modellerde sonsal dağılım çözümsel olarak elde edilemez; onun yerine Markov Zinciri Monte Carlo (Markov chain Monte Carlo, MCMC) gibi örnekleme yöntemleriyle sayısal olarak yaklaşılmaktadır. Bu yüzden Bayesçi modellemede yakınsama (convergence) tanılarının denetimi, sonuçlar yorumlanmadan önce gelen zorunlu bir adımdır. Modern balıkçılık uygulamaları için önsel seçimini, tanı denetimini ve model karşılaştırmasını kapsayan iyi uygulama çerçeveleri geliştirilmiştir (Monnahan, 2024).

2.3. R Ekosistemi

Bu bölümde ele alınan yöntemlerin tamamı, R ortamında açık kaynaklı ve yaygın paketlerle uygulanabilmektedir. Her paketin çözümleme zincirinde belirli bir rolü vardır. Çok değişkenli topluluk analizinde `vegan` paketi; metrik olmayan çok boyutlu ölçekleme (NMDS), çok değişkenli izinli varyans analizi (PERMANOVA) ve çevresel vektör uydurumu gibi araçları sunmaktadır (Oksanen vd., 2024). Mekânsal vektör verisinin işlenmesi ve koordinat referans sistemlerinin yönetimi `sf` paketiyle yapılmaktadır (Pebesma, 2018); iki boyutlu mekânsal düzgünleştirme ise genelleştirilmiş toplamsal modeller aracılığıyla `mgcv` paketiyle gerçekleştirilmektedir (Wood, 2017).

Mekânsal ve zamansal bağımlılığı rastgele alanlarla modellemek ve örneklemeden arındırılmış bolluk indeksleri üretmek için `sdmTMB` paketi kullanılmaktadır; bu paket, stokastik kısmi diferansiyel denklem (stochastic partial differential equation, SPDE) yaklaşımıyla mekânsal-zamansal

(spatiotemporal) genelleştirilmiş karışık etkili modelleri hızlı biçimde kurmaktadır (Anderson vd., 2025). Bayesçi hiyerarşik modeller ise Stan altyapısını sezgisel bir formül arayüzüyle kullanılabilir kılan `brms` paketiyle kurulmakta; yakınsama tanısı ve sonsal görselleştirmede `posterior` ile `bayesplot` paketlerinden yararlanılmaktadır (Bürkner, 2017). Veri işleme ve görselleştirme ise bölüm boyunca `dplyr` ve `ggplot2` ile yürütülmektedir.

Uygulama bölümlerinde kullanılan ortak kurulum aşağıdaki gibidir:

```
# Örnek amaçlı ortak kurulum
#
install.packages(c("vegan","sf","mgcv","sdmTMB","brms","dpl
yr","ggplot2"))
library(vegan)   # çok değişkenli topluluk analizi
library(sf)      # mekânsal vektör veri
library(mgcv)    # GAM, iki boyutlu düzgünleştirme
library(dplyr)   # veri işleme
library(ggplot2) # görselleştirme
```

3. Uygulama I: Çok Değişkenli Analiz (Topluluk Yapısı)

3.1. Sorun

Bir çalışma için yapılan örneklemede çoğu zaman tek bir tür değil, onlarca tür aynı istasyonda kaydedilmektedir. Bu veri, satırları istasyonlar, sütunları türler olan bir tür–istasyon matrisiyle temsil edilmektedir. Türlerin tek tek incelenmesi, uygulamada üç soruyu yanıtsız bırakmaktadır: hangi istasyonlar birbirine tür bileşimi bakımından benzemektedir, bu benzeşmeyi hangi çevresel değişken yönlendirmektedir ve önceden tanımlanan bölgeler (örneğin kıyı ve açık sular) topluluk düzeyinde gerçekten farklı mıdır. Bu soruların hepsi, türleri ayrı ayrı değil, topluluğu bütün olarak ele almayı gerektirmektedir. Çok değişkenli analiz, tam da bu bütünsel bakışı sağlamaktadır (Legendre & Legendre, 2012). Aynı yaklaşım, av bileşimine dayanarak balıkçılık uygulamalarını sınıflandırmakta da kullanılmakta ve tür–istasyon örüntülerini yönetim açısından anlamlı gruplara ayırmaktadır (Parsa, Emery, Williams ve Nicol, 2020).

3.2. Veri (benzetim tür–istasyon matrisi)

Aşağıdaki örnekte, kıyı ve açık sularda otuzar istasyondan oluşan bir benzeri kullanılmaktadır. Türlerin bollukları, derinliğe bağlı olarak Poisson dağılımından üretilmekte; kimi türler sığ sularda, kimileri derin sularda yoğunlaşmaktadır. Veri, gerçek ham veriyi paylaşmamak amacıyla `set.seed()` ile üretilmiş bir benzetimdir; ancak derinlik–tür ilişkisi Ege Denizi kıyı balıkçılığından bilinen örüntüyü yansıtmaktadır.

```
# Örnek amaçlı benzetim verisi (tür–istasyon matrisi)

library(vegan)

set.seed(2025)

n_ist <- 60

bolge <- factor(rep(c("Kıyı","Açık"), each = n_ist/2))

derinlik <- ifelse(bolge=="Kıyı", rnorm(n_ist/2,25,8),
rnorm(n_ist/2,90,20))

sicaklik <- 20 - 0.05*derinlik + rnorm(n_ist,0,0.8)

lambda <- function(taban,egim) exp(taban + egim*scale(derinlik))

M <- cbind(

  Barbun  = rpois(n_ist,lambda(2.2,-0.9)), Mezgit  =
rpois(n_ist,lambda(1.8,-0.6)),

  Berlam  = rpois(n_ist,lambda(1.5, 0.8)), Lüfer   =
rpois(n_ist,lambda(2.0,-0.4)),

  İstavrit= rpois(n_ist,lambda(2.4, 0.3)), Kalkan  =
rpois(n_ist,lambda(1.2,-0.7)),

  Sardalya= rpois(n_ist,lambda(2.6,-0.2)), Kolyoz  =
rpois(n_ist,lambda(1.9, 0.9)))

comm <- as.data.frame(M)

env  <- data.frame(bolge, derinlik, sicaklik)
```

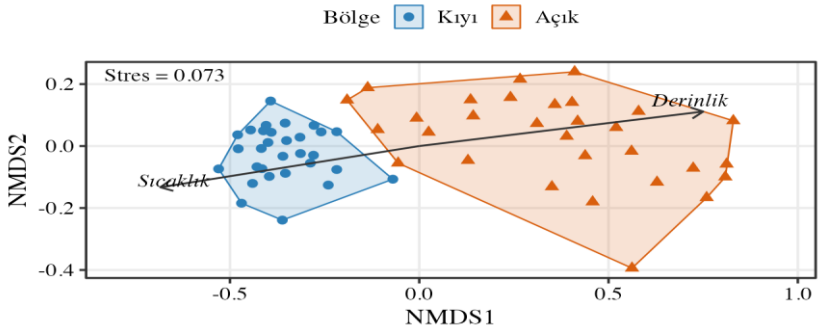
Üretilen matris 60 istasyon ve 8 tür içermektedir. Benzetimde kıyı istasyonlarının ortalama derinliği yaklaşık 27 m, açık istasyonlarınki yaklaşık 91 m olarak gerçekleşmektedir; böylece iki bölge belirgin bir derinlik karşıtlığı taşımaktadır.

3.3. Ordinasyon: NMDS (Bray–Curtis)

Topluluk yapısını iki boyutta görselleştirmenin yaygın yolu, metrik olmayan çok boyutlu ölçeklemedir (NMDS). Yöntem, istasyonlar arası Bray–Curtis benzemezliği (Bray–Curtis dissimilarity) üzerinden hesaplanan uzaklıkların sıra düzenini olabildiğince koruyan bir ordinasyon (ordination) üretmektedir. Gösterimin başarısı, stres değeri (stress) ile ölçülmektedir; 0,1'in altındaki değerler iki boyutlu gösterimin uzaklık yapısını iyi koruduğuna işaret etmektedir.

```
set.seed(2025)
nmds <- metaMDS(comm, distance="bray", k=2, trymax=200, trace=FALSE)
nmds$stress                          # 0.073
plot(nmds, type="n")
points(nmds, display="sites", col=as.integer(env$bolge), pch=19)
ordihull(nmds, groups=env$bolge, draw="polygon",
         col=c("skyblue","orange"), alpha=60)
```

Çözümlemede stres değeri 0,073 olarak elde edilmektedir. Varsayılan deneme sayısı yakınsama için yetmediğinden, `trymax` değeri yükseltilerek rastgele başlangıç sayısı artırılmış ve kararlı bir çözüme ulaşılmıştır; bu, NMDS uygulamasında rutin bir adımdır. Elde edilen düşük stres, iki boyutlu gösterimin güvenilir olduğunu göstermektedir. Ordinasyon grafiğinde (Şekil 3.1) kıyı ve açık istasyonları birbirinden ayrı iki bulut oluşturmakta, ancak açık suların bulutu daha geniş bir saçılım sergilemektedir. Bu saçılım farkı, bir sonraki adımda niceliksel olarak sınanmaktadır.



Şekil 3.1. Kıyı ve açık su istasyonlarının Bray–Curtis benzemezliğine dayalı NMDS ordinasyonu. Çokgenler her bölgenin kapladığı alanı, oklar çevresel değişkenlerin (envfit) ordinasyondaki yönünü göstermektedir. Düşük stres değeri (0,073) iki boyutlu gösterimin uzaklık yapısını iyi koruduğuna işaret etmektedir.

3.4. Çevresel vektörler ve PERMANOVA

Ordinasyonun hangi çevresel değişkenlerle hizalandığı envfit ile, bölgeler arası farkın istatistiksel anlamlılığı ise çok değişkenli izinli varyans analiziyle (PERMANOVA) sınanmaktadır (Anderson, 2001). PERMANOVA, `adonis2`

işleviyle uygulanmakta ve grup farkının varyansın ne kadarını açıkladığını permütasyon temelli bir sınama ile değerlendirmektedir.

```
set.seed(2025)

ef <- envfit(nmds ~ derinlik + sicaklik, data = env, permutations =
999)

ef                                          # derinlik r2=0.95;
sicaklik r2=0.80



bray <- vegdist(comm, method = "bray")

set.seed(2025)

adonis2(bray ~ bolge, permutations = 999)  # R2=0.60; F=88.6;
p=0.001

set.seed(2025)

anova(betadisper(bray, env$bolge))         # varsayım kontrolü:
p<0.001
```

Çevresel vektörde derinlik güçlü bir belirleyici olarak öne çıkmakta (r^2=0,95; p=0,001), sıcaklık da anlamlı fakat bir miktar zayıf bir gradyan oluşturmaktadır (r^2=0,80; p=0,001). İki değişkenin ilişkili olması beklenen bir sonuçtur, çünkü benzetimde sıcaklık derinliğe bağlı üretilmiştir. PERMANOVA, kıyı ve açık toplulukları arasındaki farkın toplam benzemezliğin yaklaşık %60'ını açıkladığını ve bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir (R^2=0,60; F=88,6; p=0,001).

Bu sonuç tek başına yeterli değildir. PERMANOVA'nın anlamlı çıkması, grupların yalnızca ortalama bileşim (konum) bakımından değil, grup içi saçılım bakımından da farklı olmasından kaynaklanabilmektedir. Bu ayrımı denetlemek için çok değişkenli saçılım homojenliği, çok değişkenli dağılımların homojenliğini sınayan `betadisper` (PERMDISP) ile denetlenmektedir (Anderson, 2006). Bu örnekte saçılım farkı anlamlıdır (F=16,3; p<0,001); yani açık suların topluluğu, ordinasyonda gözlenen geniş bulutla uyumlu biçimde, kıyıya göre daha değişken bir bileşim taşımaktadır. Dolayısıyla iki bölge arasındaki fark yalnızca bir yer değiştirme değil, aynı zamanda bir değişkenlik farkıdır; PERMANOVA sonucu bu çekinceyle yorumlanmalıdır. Bu durum, PERMANOVA'nın her zaman `betadisper` ile birlikte raporlanması gerektiğini somut biçimde göstermektedir (Anderson, 2001).

Sonraki adım. Çok değişkenli çözümleme, kıyı ve açık suların ayrı topluluk birimleri oluşturduğunu ve bu ayrımı derinliğin yönlendirdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, alan bazlı yönetim birimlerinin tanımlanmasına zemin hazırlamaktadır. Bir sonraki adım, topluluğun bütününden tek bir hedef türe geçerek, o türün bolluğunu mekân ve zamanla birlikte modellemektir.

4. Uygulama II: Mekânsal ve Zamansal Modelleme

4.1. Neden Mekânsal Otokorelasyon Önemlidir?

Balıkçılık verisinde birbirine yakın konumlardan alınan gözlemler benzer değerler taşımaktadır; bu benzeşme mekânsal otokorelasyon (spatial autocorrelation) olarak adlandırılmaktadır. Otokorelasyon bir sorun değil, bir bilgi kaynağıdır: yakın noktaların birbiri hakkında bilgi taşıması, tahmin edilmeyen konumlarda kestirim yapılmasına olanak vermektedir. Buna karşılık, standart bir regresyon bu yapıyı görmezden geldiğinde artıklar mekânda kümelenmekte, gözlemler olduğundan bağımsız sayılmakta ve belirsizlik küçük tahmin edilmektedir. Dolayısıyla mekânsal yapı, ya açıkça modele katılmalı ya da en azından varlığı sınanmalıdır.

Bu kısımda, aynı sorun üç aşamada ele alınmaktadır: önce mekânsal otokorelasyonun varlığı Moran I istatistiği (Moran's I) ile teşhis edilmekte, ardından `mgcv` ile iki boyutlu düzgünleştirme uygulanmakta, son olarak `sdmTMB` ile SPDE tabanlı bir rastgele alan kurularak örneklemeden arındırılmış bir bolluk indeksi (index of abundance) üretilmektedir. Uygulama, Ege Denizi kıyı gırgır balıkçılığından esinlenen bir benzetim verisi üzerinden yürütülmektedir; Balkı, Ceyhan, Tosunoğlu ve Ulaş (2025) İzmir Körfezi gırgır balıkçılığında 2017–2023 döneminde standartlaştırılmış CPUE'nin azaldığını göstermiştir; buradaki odak ise örnekleme desenindeki mekânsal yapının kendisi ve indeksin bu yapıdan arındırılmasıdır. Buradaki benzetim, bu ortamı yansıtacak biçimde kurulmuştur. Zamansal etkiler bağlamında Ceyhan, Tserpes, Akyol ve Peristeraki (2018) doğu Akdeniz kılıç balığı (*Xiphias gladius*) paragat balıkçılığında ay evresi ile CPUE ilişkisini incelemiş ve ay evrelerinin CPUE üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmadığını, buna karşılık yıllar arası farkın anlamlı olduğunu göstermiştir.

4.2. Veri ve Mekânsal Otokorelasyonun Teşhisi

Benzetim verisi, 2017–2023 yılları arasında 300 av operasyonundan oluşmaktadır. Her operasyonun konumu (boylam, enlem), yılı ve deniz yüzeyi sıcaklığı (sea surface temperature, SST) kaydedilmekte; CPUE, iki av sahasında yoğunlaşan bir mekânsal etki, SST ve yıla bağlı bir azalış eğilimiyle üretilmektedir. Mekânsal otokorelasyonun varlığı, sıradan bir genelleştirilmiş doğrusal modelin artıkları üzerinden Moran I istatistiği ile sınanmaktadır.

```
# Örnek amaçlı benzetim verisi (Ege gırgır CPUE'sinden esinli)
library(sf); library(mgcv); library(sdmTMB)
set.seed(2025); n <- 300
lon <- runif(n,26.0,27.2); lat <- runif(n,38.3,39.2)
yil <- sample(2017:2023, n, replace=TRUE)
gauss <- function(lo,la,c1,c2,s) exp(-((lo-c1)^2+(la-c2)^2)/(2*s^2))
mekan_etki <- as.numeric(scale(1.5*gauss(lon,lat,26.35,38.55,0.15) +
                               1.2*gauss(lon,lat,26.95,39.05,0.15)))
sst <- 18 + 3*scale(lat)[,1] + rnorm(n,0,0.5)
yil_etki <- c(`2017`=0,`2018`=-.05,`2019`=-.12,`2020`=-.20,
              `2021`=-.18,`2022`=-.28,`2023`=-
.35)[as.character(yil)]
log_cpue <- 1.5 + 0.6*mekan_etki - 0.08*sst + yil_etki +
rnorm(n,0,0.3)
dat <- data.frame(lon,lat,yil,sst,cpue=exp(log_cpue))
dsf <- st_as_sf(dat, coords=c("lon","lat"), crs=4326)


# Komşuluk ağırlıkları ve GLM artıkları üzerinde Moran I
coords <- st_coordinates(dsf); d <- as.matrix(dist(coords))
W <- 1/d; diag(W) <- 0; W <- W/rowSums(W)
glm0 <- glm(log(cpue) ~ sst + factor(yil), data=dat)
res  <- residuals(glm0)                       # Moran I = 0.194 (p =
0.001)
```

Sıradan modelin artıklarında Moran I istatistiği 0,194 olarak hesaplanmakta ve 999 izinli yeniden örnekleme ile bu değerin bağımsızlık altında beklenenden (yaklaşık −0,003) belirgin biçimde büyük olduğu görülmektedir (p=0,001). Bu sonuç, artıkların mekânda rastgele dağılmadığını, yani modelin mekânsal yapıyı yakalayamadığını göstermektedir. Bu tanı, mekânsal bir bileşen eklenmesi gerektiğinin gerekçesidir.

4.3. GAM ile Mekânsal Düzgünleştirme

İlk yaklaşım, konumu iki boyutlu bir düzgünleştirici ile modele katmaktır. `mgcv` paketinde `s(lon, lat)` terimi, boylam ve enlemin ortak etkisini esnek bir yüzey olarak tahmin etmektedir (Wood, 2017).

```
gam0    <- gam(log(cpue) ~ sst + factor(yil), data=dat,
method="REML")

gam_mek <- gam(log(cpue) ~ s(lon,lat,k=40) + sst + factor(yil),

               data=dat, method="REML")

summary(gam_mek)                 # s(lon,lat): edf=32.9, p<0.001

plot(gam_mek, select=1, scheme=2)
```

Mekânsal terim güçlü biçimde anlamlıdır (edf=32,9; p<0,001) ve modelin açıkladığı sapmayı büyük ölçüde artırmaktadır: mekânsal terim olmadan açıklanan sapma yalnızca %11,5 iken, `s(lon, lat)` eklenmesiyle %85,1'e çıkmaktadır. Bu sıçrama, verideki değişkenliğin önemli bölümünün konumsal olduğunu ve mekân göz ardı edildiğinde açıklanamadan kaldığını göstermektedir. Dikkate değer bir başka nokta, SST katsayısının standart hatasının mekânsal terim eklendiğinde 0,012'den 0,032'ye yükselmesidir. Bu, bir kayıp değil bir kazançtır: mekânsal otokorelasyon hesaba katıldığında belirsizlik daha dürüst, yani daha büyük tahmin edilmektedir.

4.4. sdmTMB ile Rastgele Alan ve İndeks Standardizasyonu

GAM'ın düzgünleştiricisi mekânı yakalamakta güçlü olsa da, bolluk indeksi üretmek ve mekânsal ilişkiyi açık bir kovaryans yapısıyla modellemek için jeoistatistiksel bir çerçeve daha uygundur. `sdmTMB` paketi, Gauss rastgele alanını stokastik kısmi diferansiyel denklem yaklaşımıyla, bir ağ üzerinde verimli biçimde tahmin etmektedir (Lindgren, Rue & Lindström, 2011; Anderson vd., 2025). Bu jeoistatistiksel yaklaşımın bolluk indekslerinin kesinliğini artırdığı, yapılan bir araştırmadaki ABD Batı Kıyısı demersal balıkları üzerinde gösterilmiştir (Thorson, Shelton, Ward ve Skaug, 2015). Ayrıca mekân ve zaman etkileşimlerinin indeks standardizasyonu modellerine katılması da aynı çizginin bir parçasıdır (Thorson ve Ward, 2013). Aynı jeoistatistiksel çerçevenin balıkçılıkta yaygınlaşmasında, sdmTMB'nin kavramsal öncülü sayılabilecek VAST (vektör özbağlanımlı mekânsal-zamansal model, Vector Autoregressive Spatio-Temporal) paketi belirleyici olmuştur; VAST, mekânsal-zamansal indeks standardizasyonunu çok sayıda stok değerlendirmesinde uygulanabilir kılmıştır (Thorson, 2019).

Model kurulmadan önce iki uygulama kararı, yakınsama tanılarıyla yönlendirilmiştir. Birincisi, SST değişkeni standartlaştırılmıştır; ölçeklenmemiş değişkenler yıl kesimleriyle sayısal olarak çakışıp Hessian matrisinin pozitif tanımlı olmamasına yol açmaktaydı. İkincisi, başlangıçta eklenen mekânsal-zamansal (spatiotemporal) bileşenin varyansı ihmal edilebilir düzeyde (sıfıra yakın) tahmin edildiğinden, sanity() çıktısının önerisiyle bu bileşen modelden çıkarılmış ve yalnızca zamanla değişmeyen bir mekânsal alan bırakılmıştır. Bu, benzetimin yapısıyla da tutarlıdır: av sahaları yıllar arasında yer değiştirmemekte, yalnızca genel düzey azalmaktadır.

```
dat$sst_std <- as.numeric(scale(dat$sst))       # yakınsama için
standardize

dat$X <- dat$lon*88; dat$Y <- dat$lat*111       # kaba km (örnek)

mesh <- make_mesh(dat, xy_cols=c("X","Y"), cutoff=8)   # 107 düğüm

fit <- sdmTMB(cpue ~ 0 + as.factor(yil) + sst_std, data=dat,
mesh=mesh,

              family=lognormal(link="log"), spatial="on",

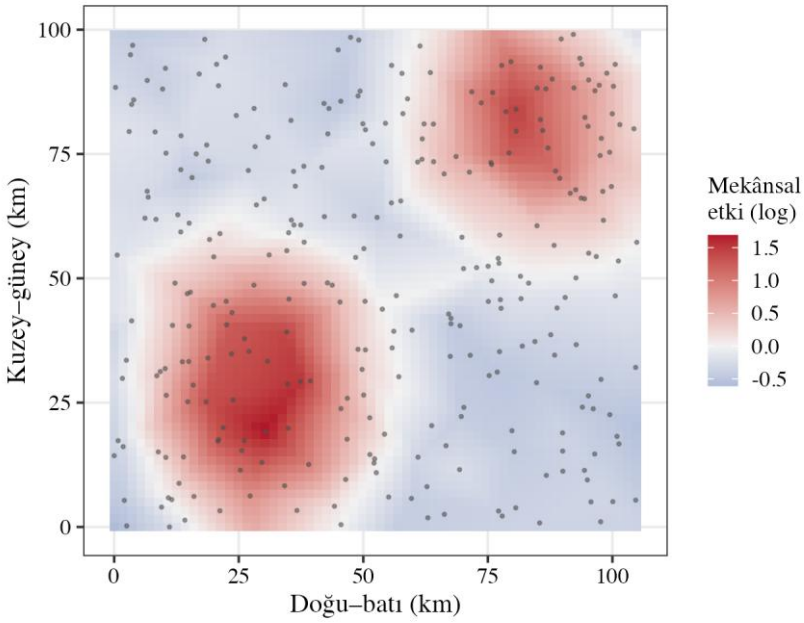
              spatiotemporal="off", time="yil")

sanity(fit)                                     # tüm denetimler
olumlu

tidy(fit, conf.int=TRUE)                         # sabit etkiler

tidy(fit, effects="ran_pars", conf.int=TRUE)     # range=59 km,
sigma_O=0.56
```

Yakınsama denetimlerinin tamamı olumlu sonuç vermektedir. Mekânsal ilişki yaklaşık 59 km'lik bir menzil parametresiyle (%95 aralık: 33–104 km) ve 0,56'lık bir mekânsal standart sapmayla (sigma_O) tahmin edilmektedir; bu, av sahalarının onlarca kilometrelik ölçekte ilişkili olduğu anlamına gelmektedir. Tahmin edilen mekânsal alan, iki belirgin yüksek verim odağını ortaya koymaktadır (Şekil 4.1). Yıl kesimleri 2017'den (−0,10) 2023'e (−0,37) doğru düzenli biçimde azalmaktadır. Burada CPUE modeli olarak log-normal dağılım kullanılmıştır; çünkü benzetim verisi sıfır av içermemektedir. Gerçek av verisinde başarısız operasyonlar da olduğundan, bu durumda sıfırları ve pozitif avları birlikte modelleyen Tweedie ailesi ya da iki parçalı (delta) modeller tercih edilmektedir.



Şekil 4.1. `sdmTMB` ile tahmin edilen mekânsal rastgele alan (log ölçeğinde). Kırmızı bölgeler ortalamanın üzerinde, mavi bölgeler altında verim beklenen alanları göstermektedir; gri noktalar av operasyonlarının konumlarıdır. Alan zamanla değişmediğinden tek bir yıl için gösterilmiştir.

Modelin asıl ürünü, örnekleme deseninden arındırılmış yıllık bolluk indeksidir. İndeks, tahmin yüzeyinin bir ızgara üzerinde toplanmasıyla elde edilmektedir.

```
grid <- expand.grid(X=seq(min(dat$X),max(dat$X),length=40),

                    Y=seq(min(dat$Y),max(dat$Y),length=40),

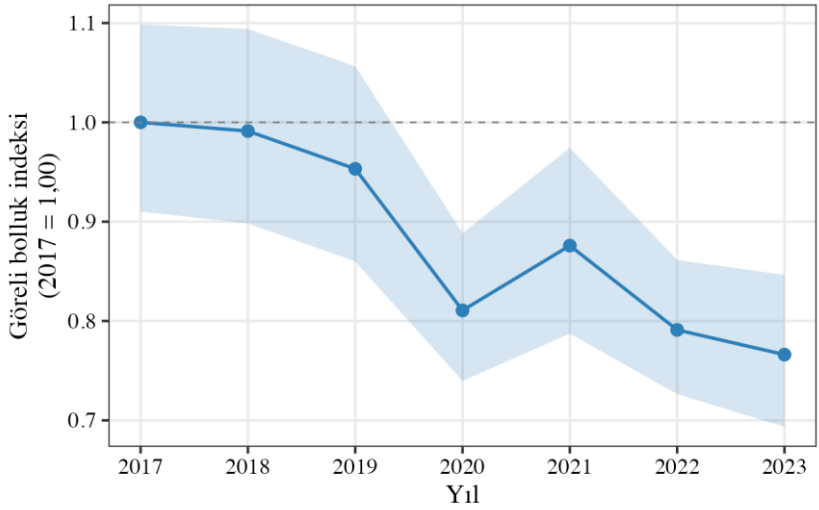
                    yil=sort(unique(dat$yil)))

grid$sst_std <- 0                                  # ortalama koşul

pr  <- predict(fit, newdata=grid, return_tmb_object=TRUE)

get_index(pr, area=1, bias_correct=TRUE)          # yıl, est, lwr,
upr
```

Elde edilen indeks, 2017'yi 1,00 kabul ettiğinde 2023'te yaklaşık 0,77 düzeyine inmektedir; bu, dönem boyunca yaklaşık %23'lük bir azalışa karşılık gelmekte ve her yıl kendi güven aralığıyla raporlanmaktadır (Şekil 4.2). Ham CPUE ortalamasının aksine, bu indeks yılların farklı konumlarda örneklenmesinden kaynaklanan yanlılığı düzeltmektedir; çünkü tahmin, sabit bir ızgara ve ortalama çevresel koşullar altında yapılmaktadır.



Şekil 4.2. sdmTMB ile üretilen, örnekleme deseninden arındırılmış göreli bolluk indeksi (2017 = 1,00). Gölgeli bant %95 güven aralığını göstermektedir. İndeks, dönem boyunca yaklaşık %23'lük bir azalışa işaret etmektedir.

Örnek bağı ve sonraki adım. Bu sonuç, Balkı ve diğerlerinin (2025) İzmir Körfezi gırgır balıkçılığında saptadığı azalış eğilimiyle aynı yöndedir; ancak burada standardizasyon, bir mekânsal rastgele alan eklenerek bir adım ileri taşınmıştır. Bu kısımda `sdmTMB` ile kurulan mekânsal alan güçlü bir araçtır; aynı mekânsal-zamansal çerçeve, daha tanıdık bir `mgcv` genelleştirilmiş toplamsal modeliyle de kurulabilir.

4.5. Uygulanmış Örnek: Orkinos CPUE'sinde Mekânsal-Zamansal GAM

Bu kısımda tanıtılan mekânsal düzgünleştirme yaklaşımı, yazarın kendi çalışmalarından birinde doğrudan uygulanmıştır. Karakulak ve Ceyhan (2024), doğu Akdeniz orkinos (*Thunnus thynnus*) gırgır balıkçılığının 1992–2006 dönemine ait CPUE'sini genelleştirilmiş toplamsal modelle standardize etmiştir. Yanıt değişkeni birim çekim gününe düşen av (ton); açıklayıcılar ise mekân (enlem-boylam), yıl, ay, tekne boyu (Length Over All, LOA), deniz yüzeyi sıcaklığı ve tuzluluktur. Mekânsal bileşen, küre üzerinde spline (splines on the sphere) temeliyle (`bs="sos"`) kurulmuştur; CPUE'nin sıfırları da içeren çarpık dağılımı nedeniyle 4.4 numaralı alt başlık altında değinilen Tweedie dağılımı kullanılmıştır.

Bu örnek, önceki uygulamalardan iki bakımdan ayrılmaktadır. Birincisi, zaman iki ayrı düzgünleştiriciyle (yıl ve ay) modele katılmakta; böylece hem yıllar arası eğilim hem de sezon içi örüntü ayrı ayrı yakalanmaktadır. İkincisi, tekne boyu gibi bir filo değişkeni açıklayıcı olarak eklenmekte ve av gücündeki farkların CPUE'ye etkisi ayrıştırılmaktadır.

Aşağıda bu kurgu, Karakulak ve Ceyhan'ın (2024) verisiyle aynı yapıyı taşıyan bir benzetim verisiyle yeniden üretilmektedir.

```
# Örnek amaçlı benzetim verisi (Karakulak & Ceyhan, 2024 kurgusu;
gerçek veri değil)

library(mgcv)

set.seed(2024); n <- 386

lon <- runif(n, 26, 36); lat <- runif(n, 34, 40)      # doğu Akdeniz

Yil <- sample(1992:2006, n, replace = TRUE)

Ay  <- sample(5:9, n, replace = TRUE, prob = c(.35,.30,.20,.10,.05))
# Mayıs–Haziran baskın

LOA <- round(runif(n, 20, 64))                        # tekne boyu
(m)

SST <- rnorm(n, 23, 2.5)                              # deniz yüzeyi
sıcaklığı (°C)

Tuzluluk <- rnorm(n, 38.8, 0.45)                      # tuzluluk
(ppt)

mekan <- 0.9*exp(-((lon-27)^2+(lat-39)^2)/(2*1.0^2)) +   # kuzey Ege
odağı

         1.2*exp(-((lon-34)^2+(lat-36)^2)/(2*1.2^2))     # Levant /
güneydoğu odağı

eta <- log(3.6) + mekan + (0.6*plogis((Yil-2001)/1.5) - 0.3) +

       c(`5`=0.10,`6`=0.40,`7`=-0.25,`8`=-
0.10,`9`=0.00)[as.character(Ay)] +
```

```
       0.020*(LOA-45) + 0.35*(Tuzluluk-38.8) + 0.0*SST   # SST
etkisi ~ yok

CPUE <- rTweedie(exp(eta), p = 1.4, phi = 2.0)        # sıfır
içeren; ort ~5 t/(çekim·gün)

d_ork <- data.frame(CPUE, Yil, Ay, lon, lat, LOA, SST, Tuzluluk)
# Karakulak & Ceyhan (2024) modeli: mekân(sos) + yıl + ay + tekne
boyu + SST + tuzluluk

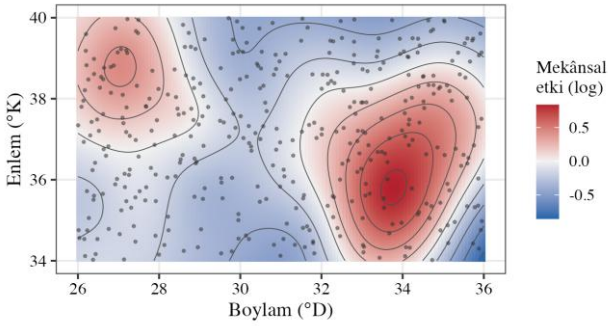
m_ork <- gam(CPUE ~ s(Yil) + s(Ay, k=5) + s(lon, lat, bs="sos",
k=50) +

                    s(LOA) + s(SST) + s(Tuzluluk),

             data = d_ork, method = "REML", family = tw(link="log"))

anova(m_ork)      # SST anlamsız; yıl, ay, mekân, LOA ve tuzluluk
anlamlı
```

Benzetimde ortalama CPUE yaklaşık 5 t/(çekim·gün), en yüksek değer ise 52 t/(çekim·gün) düzeyindedir; gözlemlerin yaklaşık %13'ü sıfır avlıdır. Modelde açıklanan sapma yaklaşık %32'dir. Sonuçlar, Karakulak ve Ceyhan'ın (2024) temel bulgularını yakından yansıtmaktadır: yıl, ay, mekân, tekne boyu ve tuzluluk açıklayıcıları istatistiksel olarak anlamlı çıkarken, deniz yüzeyi sıcaklığının etkisi anlamlı değildir (p≈0,38). Tekne boyunun etkisi özellikle güçlüdür; daha büyük teknelerin birim çabaya düşen avı belirgin biçimde daha yüksektir. Mekânsal düzgünleştirici ise yüksek CPUE'nin doğu Akdeniz'de Türkiye kıyısı boyunca yoğunlaştığını ortaya koymaktadır (Şekil 4.3). Deniz yüzeyi sıcaklığının anlamsız çıkması dikkate değerdir: geniş ölçekte göç eden orkinos için av başarısını belirleyen etken tek başına sıcaklık değil, konum, zaman ve av gücüdür.



Şekil 4.3. Orkinos CPUE modelinde küre üzerinde spline (`bs="sos"`) ile tahmin edilen mekânsal etki (log ölçeğinde). Kırmızı bölgeler ortalamanın üzerinde CPUE beklenen alanları, gri noktalar av operasyonlarının konumlarını göstermektedir. Yüksek değerler doğu Akdeniz'de Türkiye kıyısı boyunca yoğunlaşmaktadır.

Bu örnek, 4.3'te bahsi geçen GAM yaklaşımının gerçek bir balıkçılık sorusuna nasıl uygulandığını göstermektedir: `sdmTMB`'nin SPDE tabanlı rastgele alanına bir alternatif olarak, `mgcv`'nin küre üzerinde spline düzgünleştiricisi mekânsal, zamansal ve operasyonel yapıyı tek bir yorumlanabilir modelde birleştirmektedir. Buraya kadarki tüm yaklaşımlar belirsizliği güven aralığı diliyle ifade etmiştir.

5. Uygulama III: Bayesçi Hiyerarşik Modelleme

5.1. Neden Bayesçi Yaklaşım?

Önceki uygulamada üretilen indeks, mekânsal yapıyı hesaba katmakla birlikte iki soruya yanıt vermemektedir. Birincisi, aynı stoktan avlanan farklı gemilerin sistematik farkı nasıl ayrıştırılır? İkincisi, "2023 yılında bir düşüş yaşanmış olma olasılığı nedir?" gibi doğrudan bir soru, güven aralığı diliyle değil, olasılık diliyle nasıl yanıtlanır? Bayesçi hiyerarşik modelleme her iki soruyu da doğal biçimde ele almaktadır. Gemi ve sefer gibi gruplayıcı birimler rastgele etkilerle temsil edilmekte; parametrelerin tam sonsal dağılımı elde edildiğinden her türlü olasılık ifadesi doğrudan hesaplanabilmektedir (Punt & Hilborn, 1997; McElreath, 2020).

5.2. Model Kurulumu

Bu uygulamada, 4. kısmın benzetim verisi bir gemi kimliğiyle genişletilmektedir; yirmi gemi arasında, av gücü farklarını temsil eden bir rastgele kesim etkisi bulunmaktadır. Model, `brms` paketiyle kurulmakta ve Stan altyapısı üzerinden örneklenmektedir (Bürkner, 2017). Kullanılan önseller zayıf bilgilendiricidir (weakly informative prior) ve katsayılar için normal (0, 2), kesim için normal (1, 2), gemi standart sapması ve artık standart sapma için üstel (1) alınmıştır. Bu önseller, kestirimleri makul bir ölçek içinde tutmakta, ancak veri konuştukça belirleyiciliğini yitirmektedir (Gelman vd., 2013).

```
library(brms)

# dat: kısım 4 verisi + 20 gemili gerçek bir rastgele etki

priors <- c(prior(normal(0,2), class="b"),

            prior(normal(1,2), class="Intercept"),

            prior(exponential(1), class="sd"),

            prior(exponential(1), class="sigma"))

bmod <- brm(bf(log(cpue) ~ sst + factor(yil) + (1|gemi)),

            data=dat, family=gaussian(), prior=priors,

            chains=4, iter=2000, warmup=1000, cores=4, seed=2025,
refresh=0)
```

5.3. Yakınsama Tanısı

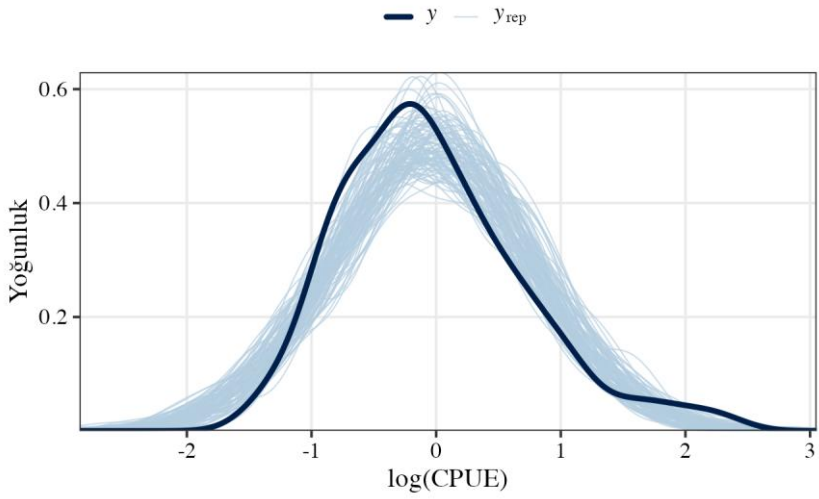
Bayesçi çıkarımda sonuçlar yorumlanmadan önce, MCMC örneklemesinin yakınsayıp yakınsamadığı denetlenmelidir. Üç ölçüt öne çıkmaktadır. Bunlar zincirler arası uyumu ölçen R̂ değerinin 1'e yakınlığı, etkin örneklem büyüklüğünün (effective sample size, ESS) yeterliliği ve sonsal öngörü kontrolünün (posterior predictive check) uygunluğudur.

```
summary(bmod)       # Rhat, Bulk_ESS

plot(bmod)          # zincir izi (trace): kararlı "tüylü tırtıl"

pp_check(bmod)      # sonsal öngörü: benzetilen veri gözlemi anıyor
mu
```

Bu modelde tüm parametreler için R̂ en çok 1,003 olarak elde edilmekte ve etkin örneklem büyüklüklerinin en düşüğü bile binin belirgin biçimde üzerinde, önerilen eşiğin çok ötesinde kalmaktadır; bu değerler yakınsamanın sağlandığını göstermektedir. Sonsal öngörü kontrolünde benzetilen verinin ortalaması (yaklaşık −0,03) gözlemin ortalamasıyla (yaklaşık −0,03) örtüşmekte, yani modelin ürettiği veri gözlenen veriyi makul biçimde anmaktadır (Şekil 5.1). Gemi rastgele etkisinin standart sapması 0,22 olarak tahmin edilmekte (%95 güvenilir aralık: 0,09–0,37) ve benzetimde kullanılan gerçek değeri (0,21) yakından geri kestirmektedir. Bu, hiyerarşik modelin önemli bir özelliğini göstermektedir: az gözlemli gemilerin kestirimleri toplu ortalamaya doğru çekilmekte (büzülme, shrinkage), böylece aşırı uç tekne tahminleri yumuşatılmaktadır.



Şekil 5.1. Sonsal öngörü kontrolü (`pp_check`). Koyu çizgi gözlenen log(CPUE) dağılımını, açık renkli çizgiler sonsal dağılımdan çekilen 100 benzetimi göstermektedir. Benzetimlerin gözlemi sarması, modelin veriyle uyumlu olduğuna işaret etmektedir.

5.4. Model Karşılaştırması

Modelin yakınsadığı doğrulandıktan sonra, alternatif kurgular öngörü başarısı bakımından karşılaştırılabilir. Bayesçi çerçevede bunun yaygın aracı, her gözlemi sırayla dışarıda bırakarak öngörü başarısını kestiren çapraz doğrulama, yani LOO-CV'dir (leave-one-out cross-validation); bu ölçüt, modern Bayesçi balıkçılık iş akışlarında model seçiminin başlıca pratik aracı olarak önerilmektedir (Monnahan, 2024). `brms`, LOO-CV'yi Pareto düzgünleştirmeli önem örneklemesiyle hesaplayan `loo()` işlevini sunmaktadır. Aşağıda, gemi rastgele etkisini içeren hiyerarşik model, aynı etkiyi dışlayan daha yalın bir modelle karşılaştırılmaktadır.

```
bmod_yalin <- brm(bf(log(cpue) ~ sst + factor(yil)),

                  data=dat, family=gaussian(), prior=priors[-3],

                  chains=4, iter=2000, warmup=1000, cores=4,
seed=2025, refresh=0)

loo(bmod, bmod_yalin)                 # elpd farkı ve standart
hatası
```

Karşılaştırmada beklenen log öngörü yoğunluğu (expected log predictive density, elpd) hiyerarşik model lehine çıkmaktadır: gemi etkisini dışlayan modelin elpd'si yaklaşık 5,9 birim daha düşük (standart hata 3,9) tahmin edilmektedir. Bu fark, gemiler arası gerçek av gücü değişkenliğiyle tutarlı biçimde hiyerarşik yapıyı desteklemekte; ancak standart hatanın büyüklüğü farkın ezici olmadığını, dolayısıyla yalın modelin de kesin biçimde dışlanamayacağını göstermektedir. LOO-CV bu haliyle model seçimini tek bir p-değerine değil, öngörü başarısındaki farkın belirsizliğiyle birlikte okunan bir ölçüye dayandırmaktadır.

5.5. Sonsal Olasılık İfadeleri

Bayesçi yaklaşımın ayırt edici gücü, sonsal dağılım üzerinden doğrudan olasılık soruları yanıtlanabilmesidir.

```
post <- as_draws_df(bmod)

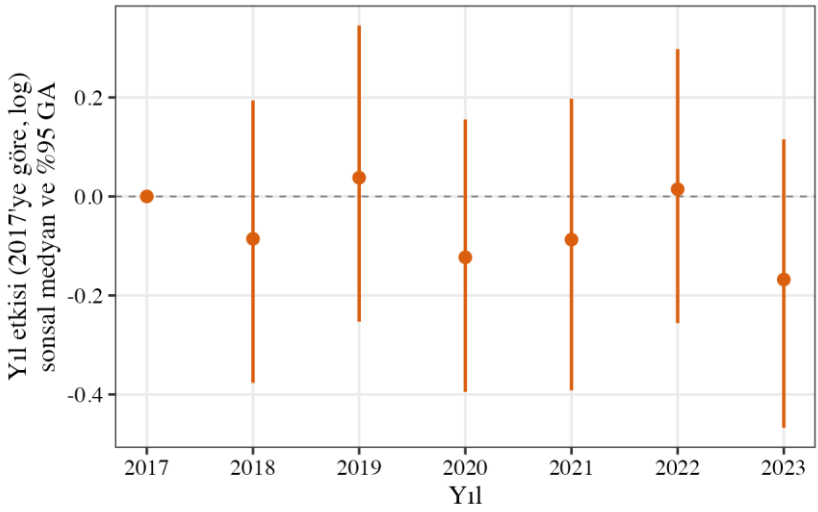
mean(post$b_factoryil2023 < 0)                          # P(2023 etkisi
< 0)

fark <- post$b_factoryil2023 - post$b_factoryil2020

quantile(fark, c(.025,.5,.975)); mean(fark < 0)      # 2023 ile 2020
farkı
```

Sonsal dağılıma göre 2023 yılı etkisinin (2017'ye kıyasla) bir düşüşe karşılık gelme olasılığı yaklaşık %87'dir. 2023 ile 2020 yılları arasındaki fark ise medyan olarak −0,05 (%95 güvenilir aralık: −0,34, 0,25) düzeyindedir ve düşüş yönünde olma olasılığı yaklaşık %63'tür. Bu ifadeler, sıklıkçı bir p-değerinin veremediği bir açıklık taşımaktadır: bir hipotezi reddetmek yerine, ilgilenilen olayın olasılığı

doğrudan bildirilmektedir. Yıl etkilerinin sonsal dağılımları ve %95 güvenilir aralıkları Şekil 5.2'de topluca gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Bayesçi modelde yıl etkilerinin (2017 referans alınarak) sonsal medyanları ve %95 güvenilir aralıkları. Aralıkların çoğunun sıfır çizgisini kesmesi, mekânsal yapının bu modele katılmamasından kaynaklanan belirsizliği yansıtmaktadır.

Buradaki olasılıkların kesin olmaması, üzerinde durulması gereken bir noktadır. Bu model, mekânsal rastgele alanı içermemekte, dolayısıyla 4. kısımda açıkça modellenen konumsal değişkenlik burada artık varyansa karışmaktadır (artık standart sapma 0,69 olarak tahmin edilmektedir). Bu, yıl etkilerinin belirsizliğini artırmakta ve olasılık ifadelerini olduğundan daha temkinli kılmaktadır. Bu gözlem, tesadüfi değildir: mekânsal yapıyı ve hiyerarşik yapıyı tek bir modelde birleştirmenin, belirsizliği daha da daraltacağını göstermektedir.

6. Yöntemlerin Birlikte Kullanımı ve Karar Desteği

Bu kısımda ele alınan üç yaklaşım, birbirinin yerine geçen seçenekler değil, tek bir çözümleme zincirinin birbirini tamamlayan halkalarıdır. Çok değişkenli analiz, hangi türlerin ve alanların birlikte ele alınacağını, yani çözümlemenin birimini tanımlamaktadır. Mekânsal ve zamansal modelleme, tanımlanan birim için örnekleme deseninden arındırılmış bir bolluk sinyali üretmektedir. Bayesçi çıkarım ise bu sinyalin belirsizliğini, karar vericinin doğrudan kullanabileceği olasılık ifadelerine dönüştürmektedir. Nitekim önceki kısımda, mekânsal yapıyı içermeyen bir Bayesçi modelin yıl etkilerini belirsiz bıraktığı görülmüştür; bu durum, yaklaşımların ayrı ayrı değil birlikte kullanıldığında en güçlü olduğunu somut biçimde göstermektedir.

Modern yazılım araçları, bu yaklaşımlar arasındaki sınırları giderek bulanıklaştırmaktadır. `sdmTMB`, mekânsal-zamansal bir modeli sıklıkçı olarak kestirebildiği gibi, aynı model üzerinde tam Bayesçi çıkarıma da olanak tanımaktadır (Anderson vd., 2025). `brms` ise hiyerarşik yapıya, Gauss süreçleri

ya da koşullu özbağlanımlı terimlerle mekânsal bileşenler ekleyebilmektedir (Bürkner, 2017). Bu iki dünyayı birleştiren bir başka çerçeve, tümleşik yuvalı Laplace yaklaşımıdır (integrated nested Laplace approximation, INLA); INLA, mekânsal Bayesçi modelleri MCMC'ye kıyasla çok daha hızlı biçimde kestirmektedir (Rue, Martino & Chopin, 2009). Balıkçılıkta yaygın kullanılan bir başka Bayesçi araç, biyokütle değerlendirmesini JAGS altyapısı üzerinden kuran JABBA'dır (Winker, Carvalho ve Kapur, 2018). Mekânsal-zamansal modellerin balıkçılık yönetimindeki kullanımı, olasılıksal bolluk öngörülerini de kapsayacak biçimde genişleyen güncel bir derlemede ele alınmaktadır (Grüss vd., 2025). Uygulamada yöntem seçimi bir ilke tartışması değil, sorunun yapısına ve veri hacmine bağlı bir mühendislik kararıdır: büyük veride hız için `sdmTMB` ya da INLA, esnek hiyerarşik yapılar için `brms`, biyokütle temelli stok değerlendirmesi için JABBA öne çıkmaktadır.

Bu kısımda dağınık biçimde ele alınan yöntem–araç eşleşmeleri, Tablo 1'de özetlenmiştir. Tablo, bir çözümlemeye başlarken "hangi soru, hangi yöntem, hangi paket ve ne zaman" sorularına hızlı bir başvuru sunmaktadır.

Tablo 1. Ele alınan yöntemlerin araştırma sorusuna göre seçim rehberi.

Araştırma sorusu	**Yöntem**	**R paketi**	**Ne zaman tercih edilir**
Tür bileşimi / topluluk yapısı nasıl farklılaşıyor?	NMDS + PERMANOVA (+ `betadisper`)	`vegan`	Çok türlü tarama verisinde bölge ya da grup farkını bütünsel çözümlemek
Mekânsal ve çevresel etki doğrusal değilse?	GAM, iki boyutlu düzgünleştirme (`s(lon,lat), bs="sos"`)	`mgcv`	Yorumlanabilir tek model; orta ölçekli veri ve tanıdık arayüz
Örneklemeden arındırılmış bolluk indeksi gerekiyorsa?	SPDE tabanlı mekânsal-zamansal rastgele alan	`sdmTMB` (VAST)	Mekânsal yapıyı açık kovaryansla modellemek; büyük veride hız
Gruplayıcı etkiler ve tam belirsizlik isteniyorsa?	Bayesçi hiyerarşik (karışık etkili) model	`brms` (INLA)	Gemi/sefer gibi rastgele etkiler, doğrudan olasılık ifadeleri, önsel bilgi katmak
Yalnızca av/indeks serisinden stok durumu isteniyorsa?	Bayesçi üretim (biyokütle) modeli	JABBA	Veri kısıtlı biyokütle temelli stok değerlendirmesi

7. Sınırlılıklar ve İyi Uygulama İlkeleri

Bu bölümde gösterilen yöntemler güçlüdür, ancak denetimsiz kullanıldığında yanıltıcı olabilmektedir. Birkaç ilke, uygulamanın güvenilirliğini belirlemektedir.

Birincisi, ordinasyon sonuçları tek başına yorumlanmamalıdır. NMDS grafiğinde iki grubun ayrı görünmesi, aralarındaki farkın yalnızca ortalama bileşimden kaynaklandığı anlamına gelmemektedir. 3. kısımdaki örnekte, PERMANOVA anlamlı bir fark bulmasına karşın çok değişkenli saçılım homojenliği sınaması da anlamlı çıkmıştır; böylece farkın bir bölümünün grup içi değişkenlik farkından kaynaklandığı ortaya konmuştur. Bu nedenle PERMANOVA her zaman `betadisper` gibi bir saçılım denetimiyle birlikte raporlanmalıdır (Anderson, 2001).

İkincisi, mekânsal modeller ağ ve sınır seçimlerine duyarlıdır. `cutoff` değeri, düğüm sayısını ve dolayısıyla hem hesaplama yükünü hem de tahmin edilen menzili etkilemektedir. Bu nedenle ağ çözünürlüğüne ilişkin bir duyarlılık incelemesi yapılması ve koordinatların uygun bir ölçekte (örneğin kilometre) tutulması önerilmektedir. Aynı biçimde, mekânsal bir modelin öngörü başarısı sıradan k-katlı çapraz doğrulamayla değerlendirildiğinde iyimser bir sonuç elde edilmektedir; çünkü rastgele ayrılan eğitim ve sınama kümeleri mekânda iç içe geçmekte, birbirine yakın gözlemler her iki kümede birden yer almaktadır. Bu yanlılığı azaltmak için, veriyi mekânsal bloklara ayırarak yakın gözlemlerin aynı katta toplanmasını sağlayan mekânsal blok çapraz doğrulama (spatial block cross-validation) tercih edilmelidir.

Üçüncüsü, yakınsama tanıları atlanamaz. Bu bölümün uygulamalarında, ilk kurulan mekânsal-zamansal modelin yakınsamadığı `sanity()` çıktısıyla görülmüştür; değişkenlerin standartlaştırılması ve gereksiz bileşenin çıkarılmasıyla model düzeltilmiştir. Aynı biçimde Bayesçi modelde $\hat{R}$ etkin örneklem büyüklüğü ve sonsal öngörü kontrolü, sonuçlar yorumlanmadan önce denetlenmelidir. Yakınsamayan bir modelin çıktısı, ne kadar makul görünürse görünsün, güvenilir değildir (Monnahan, 2024).

Dördüncüsü, önseller tarafsız değildir. Zayıf bilgilendirici önseller kestirimleri makul sınırlarda tutmakta, ancak sonucu etkileyebilmektedir; özellikle seyrek veride önsel seçiminin sonuca duyarlılığı raporlanmalıdır. Son olarak, bütün bu yöntemler veri kalitesinin önüne geçememektedir. Hatalı konum kayıtları, tutarsız çaba tanımları ya da seçici örnekleme, en gelişmiş modeli bile yanıltmaktadır. Özellikle balıkçılığa bağımlı veride, örnekleme deseninin mekânsal yanlılığı CPUE standardizasyonunu sistematik biçimde etkileyebilmekte; bu etki benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir (Ducharme-Barth vd., 2022). Bu nedenle mekânsal bir modelin ürettiği arındırılmış indeks bile, örnekleme tasarımının kör noktalarını tümüyle telafi edememektedir. Modelleme, iyi veriyi ikame etmez, yalnızca ondan daha çok bilgi çıkarır.

8. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Bu bölüm, balıkçılık verisinin üç temel zorluğuna (çok değişkenlilik, mekânsal-zamansal bağımlılık ve belirsizlik) karşılık gelen bir araç kutusu sunmaktadır. Çok değişkenli analiz topluluk yapısını çözümlemekte, mekânsal-zamansal modeller arındırılmış bolluk indeksleri üretmekte, Bayesçi hiyerarşik modeller ise belirsizliği doğrudan olasılıkla ifade etmektedir. Bu yöntemlerin ortak paydası, tahmin başarısının yanında yorumlanabilirliği ve dürüst belirsizlik ifadesini önceleyen istatistiksel bir bakıştır.

Bu bakış, makine öğrenmesinin esnek tahmin yöntemleriyle karşıt değil, tamamlayıcıdır. Makine öğrenmesinin örüntü yakalamadaki esnekliği ile Bayesçi-mekânsal modellerin belirsizliği ölçme ve yorumlama gücü, giderek melez yaklaşımlarda birleşmektedir. Yapay zekâ araçları da balıkçılık yönetiminin çeşitli görevlerinde giderek daha fazla sınanmaktadır; örneğin Düzbastılar ve Ceyhan (2026), büyük dil modellerinin (large language models, LLM) yapay resif planlaması gibi bir yönetim görevindeki olanaklarını ve sınırlarını uzman değerlendirmesiyle incelemiştir.

Bu çalışmadaki örnekler göstermektedir ki ticari av ve çaba kayıtları, çevresel uydu verileriyle birleştirildiğinde, standartlaştırılmış ve mekânsal olarak açık bolluk indeksleri üretilebilmektedir; bu indeksler, alan bazlı yönetim ve stok değerlendirmesi için doğrudan girdi oluşturmaktadır. Nitekim Akdeniz'de ticari türlerin mekânsal dağılım modelleri, deniz koruma alanlarında küçük ölçekli balıkçılığın yönetimine katkı sağlamak için halihazırda kullanılmaktadır (La Manna vd., 2024). Bu yöndeki ilerleme, veri altyapısının iyileştirilmesine, açık ve yeniden üretilebilir R iş akışlarının benimsenmesine ve yöntem seçiminin sorunun yapısına göre yapılmasına bağlıdır.

Kaynaklar

Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology, 26*(1), 32–46. (Cilt ve sayfalar PDF'ten teyit edildi.)

Anderson, M. J. (2006). Distance-based tests for homogeneity of multivariate dispersions. *Biometrics, 62*(1), 245–253. https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2005.00440.x

Anderson, S. C., Ward, E. J., English, P. A., Barnett, L. A. K., & Thorson, J. T. (2025). sdmTMB: An R package for fast, flexible, and user-friendly generalized linear mixed effects models with spatial and spatiotemporal random fields. *Journal of Statistical Software, 115*(2), 1–46. https://doi.org/10.18637/jss.v115.i02

Balkı, C., Ceyhan, T., Tosunoğlu, Z., & Ulaş, A. (2025). Environmental drivers of fishing success: A multiyear analysis of purse seine CPUE in the Aegean Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 25*(11), TRJFAS26959. https://doi.org/10.4194/TRJFAS26959

Bürkner, P.-C. (2017). brms: An R package for Bayesian multilevel models using Stan. *Journal of Statistical Software, 80*(1), 1–28. https://doi.org/10.18637/jss.v080.i01

Ceyhan, T. (2025). CPUE standardizasyonu: Kuramsal temeller, uygulama yöntemleri ve balıkçılıkta kullanım pratikleri. N. Yarpuz Bozdoğan & A. M. Bozdoğan (Ed.), *Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Teori, Metodoloji ve Uygulama* içinde (ss. 87–108). Ankara: Platanus Publishing.

Ceyhan, T., Tserpes, G., Akyol, O., & Peristeraki, P. (2018). The effect of the lunar phase on the catch per unit effort (CPUE) of the Turkish swordfish longline fishery in the eastern Mediterranean Sea. *Acta Ichthyologica et Piscatoria, 48*(3), 213–219. https://doi.org/10.3750/AIEP/02431

Ducharme-Barth, N. D., Grüss, A., Vincent, M. T., Kiyofuji, H., Aoki, Y., Pilling, G., . . . Thorson, J. T. (2022). Impacts of fisheries-dependent spatial sampling patterns on catch-per-unit-effort standardization: A simulation study and fishery application. *Fisheries Research, 246*, 106169. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2021.106169

Düzbastılar, F. O., & Ceyhan, T. (2026). An analysis of a ChatGPT use case: Can a large language model (LLM) be used to plan artificial reefs as a fisheries management tool? *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 26*(4), TRJFAS27583. https://doi.org/10.4194/TRJFAS27583

Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., & Rubin, D. B. (2013). *Bayesian data analysis* (3. baskı). Boca Raton: CRC Press.

Grüss, A., Allyn, A. J., Thorson, J. T., Mills, K. E., Yasumiishi, E., Pinkerton, M. H., . . . Sibanda, N. (2025). Probabilistic forecasts of fish abundances with spatio-temporal models to support fisheries management. *Fish and Fisheries.* https://doi.org/10.1111/faf.70025

Karakulak, F. S., & Ceyhan, T. (2024). The influences of temporal-spatial parameters on CPUE of the Atlantic bluefin tuna purse seine fishery in eastern Mediterranean. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 104*, e6, 1–8. https://doi.org/10.1017/S002531542400002X

La Manna, G., Ronchetti, F., Moro Merella, M., Vargiu, R., Perretti, F., & Ceccherelli, G. (2024). Using spatial distribution modeling of commercial species to inform management of small-scale fisheries in a Mediterranean marine protected area. *Ecology and Evolution, 14*, e70169. https://doi.org/10.1002/ece3.70169

Legendre, P., & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* (3. baskı). Amsterdam: Elsevier.

Lindgren, F., Rue, H., & Lindström, J. (2011). An explicit link between Gaussian fields and Gaussian Markov random fields: The stochastic partial differential equation approach. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 73*(4), 423–498. https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2011.00777.x

Maunder, M. N., & Punt, A. E. (2004). Standardizing catch and effort data: A review of recent approaches. *Fisheries Research, 70*(2–3), 141–159. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2004.08.002

McElreath, R. (2020). *Statistical rethinking: A Bayesian course with examples in R and Stan* (2. baskı). Boca Raton: Chapman & Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/9780429029608

Monnahan, C. C. (2024). Toward good practices for Bayesian data-rich fisheries stock assessments using a modern statistical workflow. *Fisheries Research, 275*, 107024. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2024.107024

Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., . . . Weedon, J. (2024). *vegan: Community ecology package* (R paketi). https://CRAN.R-project.org/package=vegan

Parsa, M., Emery, T. J., Williams, A. J., & Nicol, S. (2020). A robust métier-based approach to classifying fishing practices within commercial fisheries. *Frontiers in Marine Science, 7*, 552391. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.552391

Pebesma, E. (2018). Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *The R Journal, 10*(1), 439–446. https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009

Punt, A. E., & Hilborn, R. (1997). Fisheries stock assessment and decision analysis: The Bayesian approach. *Reviews in Fish Biology and Fisheries, 7*, 35–63.

Rue, H., Martino, S., & Chopin, N. (2009). Approximate Bayesian inference for latent Gaussian models by using integrated nested Laplace approximations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 71*(2), 319–392. https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2008.00700.x

Thorson, J. T. (2019). Guidance for decisions using the Vector Autoregressive Spatio-Temporal (VAST) package in stock, ecosystem, habitat and climate assessments. *Fisheries Research, 210*, 143–161. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.10.013

Thorson, J. T., Shelton, A. O., Ward, E. J., & Skaug, H. J. (2015). Geostatistical delta-generalized linear mixed models improve precision for estimated abundance indices for West Coast groundfishes. *ICES Journal of Marine Science, 72*(5), 1297–1310. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu243

Thorson, J. T., & Ward, E. J. (2013). Accounting for space–time interactions in index standardization models. *Fisheries Research, 147*, 426–433.

Winker, H., Carvalho, F., & Kapur, M. (2018). JABBA: Just Another Bayesian Biomass Assessment. *Fisheries Research, 204*, 275–288. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.03.010

Wood, S. N. (2017). *Generalized additive models: An introduction with R* (2. baskı). Boca Raton: CRC Press.

Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R.* New York: Springer.

BÖLÜM 10

Kurakçıl Peyzaj Yaklaşımı ve Kentsel Isı Adası Etkisi: İklim Dirençli Kentsel Yeşil Alanlar için Güncel Yaklaşımlar

Handan Çakar[1]
Hülya Akat[2]

[1] Doç. Dr., Ege Üniversitesi, Bayındır Meslek Yüksekokulu Park ve Bahçe Bitkileri Bölümü, Peyzaj ve Süs Bitkileri Programı, Orcid:0000-0001-7209-5545
[2] Doç. Dr., Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Ortaca Meslek Yüksekokulu, Park ve Bahçe Bitkileri Bölümü, Peyzaj ve Süs Bitkileri Programı, Orcid:0000-0002-0927-8530

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, günümüzde doğal ve beşerî sistemleri çok yönlü etkileyen en önemli küresel çevre sorunlarından biri olarak kabul edilmektedir. Sanayileşme, hızlı kentleşme, nüfus artışı ve doğal kaynakların sürdürülebilir olmayan biçimde kullanılması, atmosferde sera gazı birikimini artırarak iklim sisteminde önemli değişimlere neden olmaktadır. Bu değişimlerin kent ölçeğindeki en belirgin yansımalarından biri ise hava sıcaklıklarının artması ve buna bağlı olarak kentsel mikroklima koşullarının değişmesidir (Baş & Partigöç, 2023; IPCC, 2023).

Kentleşme sürecinde doğal ve geçirgen yüzeylerin yerini asfalt, beton ve diğer geçirimsiz yüzeylerin alması, bitki örtüsünün azalması ve yapı yoğunluğunun artması, kentlerin çevresindeki kırsal alanlara göre daha yüksek sıcaklıklara sahip olmasına neden olmaktadır. "Kentsel Isı Adası" olarak tanımlanan bu olgu, özellikle yoğun yapılaşmanın görüldüğü kent merkezlerinde daha belirgin şekilde hissedilmekte ve iklim değişikliğinin etkilerini yerel ölçekte daha da artırmaktadır (Oke, 1982; Voogt & Oke, 2003; Yılmaz & Öztürk, 2023).

Kentsel ısı adası etkisi yalnızca sıcaklık artışı ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda enerji tüketiminin yükselmesi, hava kalitesinin bozulması, su kaynakları üzerindeki baskının artması, biyolojik çeşitliliğin azalması ve insan sağlığının olumsuz etkilenmesi gibi birçok çevresel, ekonomik ve sosyal sorunu da beraberinde getirmektedir. Özellikle sıcak hava dalgalarının daha sık ve daha şiddetli yaşandığı günümüzde yaşlılar, çocuklar ve kronik hastalığı bulunan bireyler başta olmak üzere hassas gruplar açısından önemli bir halk sağlığı riski oluşturmaktadır (Santamouris, 2015; Yasdıman, 2023; Çağlayan & Kayaer, 2024). Bu nedenle kentsel ısı adası etkilerinin azaltılmasına yönelik uygulamalar yalnızca çevresel kaliteyi artıran müdahaleler olarak değil, aynı zamanda iklim değişikliğine uyum ve kentsel dirençliliğin geliştirilmesine yönelik temel stratejiler arasında da değerlendirilmektedir (Baş & Partigöç, 2023).

Son yıllarda yürütülen araştırmalarda, kentsel ısı adasının azaltılmasına yönelik çözümler arasında yeşil altyapı sistemleri, mavi-yeşil altyapı uygulamaları, doğa temelli çözümler (Nature-based Solutions) ve iklim duyarlı planlama yaklaşımları ön plana çıkmaktadır. Parklar, kent ormanları, yeşil çatılar, yeşil duvarlar, yağmur bahçeleri ve geçirgen yüzeyler gibi uygulamaların gölgeleme ve evapotranspirasyon yollarıyla kentsel sıcaklıkların azaltılmasına önemli katkılar sağladığı birçok araştırmada ortaya konulmuştur (Çakar & Akat Saraçoğlu, 2023; Çakar & Akat Saraçoğlu, 2024; Çakar vd., 2025; Gill vd., 2007; Bowler vd., 2010; Üstündağ vd., 2023; Yüksel & Coşkun Hepcan, 2023). Bununla birlikte, bu uygulamaların başarısı yalnızca yeşil alanların miktarlarının artırılmasına değil, aynı zamanda bitki materyallerinin ekolojik özellikleri, su gereksinimleri, bakım yönetimleri ve uzun dönemli sürdürülebilirlikleri gibi bazı ölçütlerin birlikte değerlendirilmesine bağlıdır (Acar & Yavuz, 2023).

Bu noktada kurakçıl peyzaj yaklaşımı (xeriscape), iklim değişikliğine uyum sağlayabilen ve su kaynaklarının etkin kullanımını esas alan sürdürülebilir bir tasarım anlayışı olarak öne çıkmaktadır. Kuraklığa dayanıklı bitki türlerinin tercih edilmesi, yerel tür kullanımının desteklenmesi, sulama gereksiniminin azaltılması, geçirgen yüzeylerin artırılması ve doğal süreçlerle uyumlu peyzaj tasarımının benimsenmesi hem su tüketiminin azaltılmasına hem de kentsel mikroklima koşullarının iyileştirilmesine katkılar sağlayabilmektedir (Akat Saraçoğlu & Çakar, 2023a; Çetinkale Demirkan & Akat, 2024; İlhan vd., 2024a). Bu yönüyle kurakçıl peyzaj, su tasarrufunun yanı sıra ekosistem hizmetlerinin desteklenmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması ve iklim değişikliğine uyum kapasitesinin artırılmasına katkı sağlayan önemli bir planlama ve tasarım yaklaşımıdır. (Acar & Yavuz, 2023; Akat Saraçoğlu & Çakar, 2023b).

Bu çalışmada, iklim değişikliği bağlamında kentsel ısı adasının oluşum mekanizmaları ve kentler üzerindeki etkileri incelenmekte, kentsel ısı adasının azaltılmasına yönelik güncel yaklaşımlar ortaya konulmakta ve kurakçıl peyzaj yaklaşımının iklim dirençli kentsel yeşil alanların planlanmasındaki potansiyeli güncel literatür ışığında değerlendirilmektedir.

2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KENTSEL ISI ADASI ETKİSİ

2.1. İklim Değişikliği ve Kentleşme İlişkisi

İklim değişikliği, atmosferde sera gazı konsantrasyonlarının artmasına bağlı olarak sıcaklık rejimlerinin değişmesi, yağış desenlerinin düzensizleşmesi ve aşırı hava olaylarının sıklık ile şiddetinin artması gibi çok yönlü etkiler ortaya çıkaran küresel bir süreçtir. Özellikle son yüzyılda hız kazanan sanayileşme, fosil yakıt tüketimi, arazi kullanımındaki değişimler ve plansız kentleşme, bu sürecin temel itici güçleri arasında yer almaktadır (IPCC, 2023). Küresel ölçekte yaşanan bu değişimler, kentlerde hem doğal ekosistemleri hem de kentsel yaşam kalitesini doğrudan etkileyen yeni çevresel sorunların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Kentler, nüfus yoğunluğu, yapılaşma biçimi ve ekonomik faaliyetlerin yoğunluğu nedeniyle iklim değişikliğinin etkilerini en belirgin şekilde hisseden yerleşim alanlarıdır. Dünya nüfusunun yaklaşık %55'inin kentsel alanlarda yaşadığı ve bu oranın 2050 yılında %68'e ulaşmasının beklendiği dikkate alındığında, kentlerin iklim değişikliğine uyum kapasitesinin artırılması sürdürülebilir kalkınma açısından kritik bir önem taşımaktadır (United Nations, 2018). Kentleşme sürecinde doğal alanların yapılaşmaya açılması, geçirgen yüzeylerin azalması ve bitki örtüsünün tahrip edilmesi, kentlerin doğal iklim düzenleme kapasitesini zayıflatmaktadır (Acar & Yavuz, 2023). Hızlı kentleşmeye bağlı olarak meydana gelen arazi örtüsü değişimleri yalnızca ekolojik süreçleri değil, aynı zamanda kentlerin enerji dengesi ve mikroklima özelliklerini de değiştirmektedir. Doğal yüzeylerin yerini asfalt, beton ve diğer geçirimsiz yapı malzemelerinin alması güneş ışınımının daha fazla depolanmasına, yüzey sıcaklıklarının yükselmesine ve gece saatlerinde

depolanan ısının atmosfere geri salınmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda kent merkezleri ile çevresindeki kırsal alanlar arasında belirgin sıcaklık farkları oluşmakta ve kentsel ısı adası olarak tanımlanan mikroklima olgusu ortaya çıkmaktadır (Oke, 1982; Voogt & Oke, 2003).

Kentleşmenin iklim değişikliği üzerindeki etkisi tek yönlü değildir. Bir taraftan kentleşme sera gazı emisyonlarını artırarak küresel iklim değişikliğini hızlandırırken, diğer taraftan iklim değişikliğinin neden olduğu sıcaklık artışları kentlerde mevcut mikroklima sorunlarını daha da şiddetlendirmektedir. Bu karşılıklı etkileşim, özellikle yaz aylarında sıcak hava dalgalarının daha yoğun hissedilmesine, enerji talebinin artmasına ve kentsel yaşam kalitesinin düşmesine neden olmaktadır (Baş & Partigöç, 2023; Yılmaz & Öztürk, 2024).

Bu nedenle günümüzde kent planlama ve tasarım anlayışı yalnızca nüfus artışına bağlı mekânsal gereksinimleri karşılamaya odaklanmamakta, aynı zamanda iklim değişikliğinin etkilerini azaltan ve kentlerin uyum kapasitesini artıran yaklaşımları da içermektedir. İklim dirençli kent kavramı bu süreçte önem kazanmış, yeşil altyapı sistemleri, mavi-yeşil altyapı, doğa temelli çözümler ve sürdürülebilir peyzaj uygulamaları kentlerin iklim değişikliğine uyumunda temel araçlar olarak değerlendirilmeye başlanmıştır (Baş & Partigöç, 2023; Yılmaz & Öztürk, 2023).

Sonuç olarak, iklim değişikliği ile kentleşme arasındaki etkileşim yalnızca küresel ölçekte çevresel değişimleri hızlandırmakla kalmamakta, aynı zamanda kentlerin mikroklima özelliklerini de dönüştürmektedir. Bu dönüşüm, kentsel ısı adası oluşumunu iklim değişikliğinin yerel ölçekteki en önemli yansımalarından biri hâline getirmekte ve kent planlama yaklaşımlarında iklim uyumunu temel bir gereklilik olarak öne çıkarmaktadır.

2.2. Kentsel Isı Adasının Oluşumu ve Temel Dinamikleri

Kentsel ısı adası, kent merkezlerinde ölçülen hava veya yüzey sıcaklıklarının çevresindeki kırsal alanlara göre daha yüksek olması şeklinde tanımlanan bir mikroklima olgusudur. İlk kez 19. yüzyılın başlarında Londra'da tanımlanan bu olgu, günümüzde hızlı kentleşmenin en önemli çevresel sonuçlarından biri olarak kabul edilmektedir (Oke, 1982). Özellikle son yıllarda küresel iklim değişikliğinin etkileriyle birlikte daha sık ve daha şiddetli hissedilen sıcak hava dalgaları, kentsel ısı adasının etkisini artırarak kentlerin çevresel sürdürülebilirliği açısından önemli bir risk oluşturmaktadır (Santamouris, 2015).

Kentsel ısı adasının oluşumunda birçok doğal ve antropojenik faktör birlikte rol oynamaktadır. Bunlar arasında arazi örtüsündeki değişimler, geçirimsiz yüzeylerin artması, yoğun yapılaşma, bitki örtüsünün azalması, ulaşım faaliyetleri, enerji tüketimi ve endüstriyel çalışmalar temel belirleyiciler olarak öne çıkmaktadır (Voogt & Oke, 2003; Baş & Partigöç, 2023). Doğal alanların beton, asfalt ve diğer sert zeminlerle yer değiştirmesi, yüzeylerin güneşten gelen

kısa dalga radyasyonlarını daha fazla absorbe etmesine ve depolanan ısının gece saatlerinde atmosfere geri salınmasına neden olmaktadır. Bu durum özellikle yaz aylarında gece sıcaklıklarının düşmesini engelleyerek kent ile kırsal alan arasındaki sıcaklık farkını belirginleştirmektedir.

Kentsel morfoloji de ısı adasının oluşumunda belirleyici bir unsurdur. Yapı yoğunluğunun artması, bina yüksekliklerinin fazlalaşması ve sokak kanyonlarının oluşması hava dolaşımını sınırlandırarak kent içerisinde ısının tutulmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda koyu renkli yapı malzemeleri düşük yansıtıcılık (albedo) özellikleri nedeniyle güneş enerjisinin önemli bir bölümünü depolamakta ve çevre sıcaklığının yükselmesine katkılarda bulunmaktadır. Buna karşılık açık renkli yüzeyler, geçirgen kaplamalar ve uygun kentsel form düzenlemeleri yüzey sıcaklıklarının azaltılmasında etkili uygulamalar arasında gösterilmektedir (Yılmaz & Öztürk, 2023).

Bitki örtüsünün azalması ise kentsel ısı adasının oluşumunu hızlandıran en önemli çevresel değişimlerden biridir. Bitkiler, gölgeleme sağlamalarının yanı sıra evapotranspirasyon yoluyla çevre sıcaklığının düşürülmesinde önemli rol oynamaktadır. Ancak kentleşme sürecinde yeşil alanların parçalanması, ağaçların yoğunluğunun azalması ve geçirimsiz yüzeylerin yaygınlaşması bu doğal soğutma mekanizmalarını zayıflatmaktadır. Sonuç olarak kent merkezlerinde depolanan ısı miktarı artmakta ve yüzey sıcaklıkları çevredeki doğal alanlara göre belirgin biçimde yükselmektedir (Gill vd., 2007; Bowler vd., 2010).

Son yıllarda uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar, arazi örtüsü ile yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkinin nicel olarak ortaya konulmasına önemli katkılar sağlamıştır. Özellikle Landsat uydu görüntülerinden elde edilen yer yüzey sıcaklığı verileri, yoğun yapılaşmış alanlar ile bitki örtüsünün baskın olduğu alanlar arasında belirgin sıcaklık farklılıklarının bulunduğunu göstermektedir. İzmir kenti Karşıyaka ilçesi örneğinde yürütülen çalışmada yoğun taç örtüsüne sahip mavi-yeşil altyapı alanlarının çevresinde daha yüksek soğutma etkisi oluşturduğu belirlenirken (Yüksel & Coşkun Hepcan, 2023), Adana kentinde gerçekleştirilen araştırmada ise endüstriyel alanlar ve yoğun geçirimsiz yüzeylerin en yüksek yüzey sıcaklıklarına sahip olduğu ortaya konulmuştur (Ünal Çilek, 2022). Benzer şekilde üniversite kampüsleri üzerinde yapılan çalışmalar da bitki yoğunluğu yüksek alanların çevresine göre daha düşük yüzey sıcaklıkları oluşturduğunu göstermektedir (Güneş vd., 2021).

Literatürde dikkat çeken önemli bir nokta, kentsel ısı adasının yalnızca iklim değişikliğinin bir sonucu olarak değerlendirilmemesi gerektiğidir. Güncel araştırmalar, kentlerin fiziksel yapısı, arazi kullanım biçimi ve peyzaj deseni gibi planlama kararlarının bu süreci doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması; arazi kullanım kararları, yeşil altyapı planlaması, bitkilendirme stratejileri ve sürdürülebilir peyzaj tasarımını

birlikte ele alan disiplinler arası bir planlama ve tasarım yaklaşımını gerektirmektedir (Baş & Partigöç, 2023; Üstündağ vd., 2023; Yılmaz & Öztürk, 2023). Bu yaklaşım, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınacak kurakçıl peyzaj uygulamalarının, su tasarrufunun yanı sıra kentsel mikroklimanın iyileştirilmesine de katkı sağlayan bütüncül bir uyum stratejisi olduğunu ortaya koymaktadır.

2.3. Kentsel Isı Adasının Çevresel, Ekolojik ve Toplumsal Etkileri

Kentsel ısı adası, yalnızca kentlerde sıcaklıkların yükselmesine neden olan bir mikroklima olgusu olmayıp çevresel, ekolojik, ekonomik ve toplumsal boyutları bulunan çok yönlü bir sorundur. İklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleştiği günümüzde, kentlerde artan sıcaklıklar enerji tüketiminden su kaynaklarına, ekosistemlerden halk sağlığına kadar birçok sistemi doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle kentsel ısı adası, sürdürülebilir kentleşme ve iklim değişikliğine uyum politikalarının temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Santamouris, 2015; Baş & Partigöç, 2023).

Kentsel ısı adasının en belirgin sonuçlarından biri enerji tüketimindeki artıştır. Özellikle yaz aylarında yükselen hava sıcaklıkları, iklimlendirme sistemlerinin kullanımını artırmakta ve buna bağlı olarak elektrik tüketimi önemli ölçüde yükselmektedir. Artan enerji talebi yalnızca ekonomik maliyetleri artırmamakta, aynı zamanda fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminin devam ettiği bölgelerde sera gazı emisyonlarının yükselmesine de neden olmaktadır. Böylece iklim değişikliği ile kentsel ısı adası arasında karşılıklı olarak birbirini güçlendiren bir döngü oluşmaktadır (Gill vd., 2007; Yılmaz & Öztürk, 2023).

Artan sıcaklıklar su kaynakları üzerinde de önemli baskılar oluşturmaktadır. Buharlaşma hızının yükselmesi, sulama ihtiyacının artması ve uzun süreli kuraklık dönemlerinin daha sık yaşanması, özellikle su kaynakları açısından hassas bölgelerde sürdürülebilir su yönetimini zorlaştırmaktadır. Kentlerde bitkisel alanların korunabilmesi için artan sulama gereksinimi, içme ve kullanma suyu üzerindeki talebi artırırken, iklim değişikliğine bağlı yağış düzensizlikleri bu sorunu daha da derinleştirmektedir. Bu nedenle günümüzde su verimliliği sağlayan peyzaj uygulamaları yalnızca estetik veya ekonomik bir tercih değil, aynı zamanda iklim değişikliğine uyumun temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Acar & Yavuz, 2023).

Kentsel ısı adasının önemli etkilerinden biri de ekolojik süreçlerde meydana gelen değişimlerdir. Kentleşmeyle birlikte doğal habitatların parçalanması, geçirimsiz yüzeylerin yaygınlaşması ve bitki örtüsünün azalması sonucunda sıcaklık rejimi değişmekte, biyolojik çeşitlilik azalmakta, habitat sürekliliği bozulmakta ve ekosistem hizmetleri zayıflamaktadır. Özellikle gölgeleme, karbon depolama, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve mikroklimanın düzenlenmesi gibi ekosistem hizmetlerinin etkinliği, bitki örtüsünün azalmasıyla birlikte önemli

ölçüde düşmektedir. Bu durum, kent ekosistemlerinin iklim değişikliğine karşı direnç kapasitesini de azaltmaktadır (Bowler vd., 2010; Acar & Yavuz, 2023).

Kentsel ısı adasının en dikkat çekici etkilerinden biri ise halk sağlığı üzerindeki sonuçlarıdır. Artan sıcaklıklar, özellikle sıcak hava dalgaları sırasında yaşlılar, çocuklar, kronik hastalığı bulunan bireyler ve açık alanda çalışanlar için ciddi sağlık riskleri oluşturmaktadır. Isı stresi, sıcak çarpması, kardiyovasküler ve solunum sistemi hastalıklarında artış gibi doğrudan etkilerin yanı sıra, yüksek gece sıcaklıkları nedeniyle dinlenme ve uyku kalitesinin azalması da toplum sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Araştırmalar, yoğun yapılaşmış kent merkezlerinde yaşayan bireylerin kırsal alanlarda yaşayanlara göre sıcaklık kaynaklı sağlık risklerine daha fazla maruz kaldığını ortaya koymaktadır (Yasdıman, 2023; Çağlayan & Kayaer, 2024).

Kentsel ısı adasının toplumsal etkileri, çevresel adalet ve yaşam kalitesi açısından da önem taşımaktadır. Yeşil alanlara erişimin sınırlı olduğu, yoğun yapılaşmış ve sosyoekonomik açıdan dezavantajlı mahallelerde yaşayan bireyler sıcaklık artışlarından daha fazla etkilenmektedir. Buna karşın, nitelikli kentsel yeşil alanlara sahip bölgelerde gölgeleme ve evapotranspirasyon etkisi sayesinde daha düşük sıcaklıklar ölçülmekte, açık alan kullanımı artmakta ve termal konfor koşulları iyileşmektedir. Bu durum, yeşil alanların rekreasyon işlevlerinin yanı sıra iklim değişikliğine uyum ve toplum sağlığının korunmasında kritik öneme sahip kentsel altyapı bileşenleri olduğunu göstermektedir (Yüksel & Coşkun Hepcan, 2023).

Tüm bu etkiler birlikte değerlendirildiğinde, kentsel ısı adasının yalnızca sıcaklık artışına indirgenemeyecek kadar kapsamlı bir çevre sorunu olduğu görülmektedir. Güncel literatür, bu sorunun çözümünde tek bir uygulamanın yeterli olmadığını, yeşil altyapı sistemleri, iklim duyarlı planlama, doğa temelli çözümler ve sürdürülebilir peyzaj yaklaşımlarının birlikte ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu kapsamda, su verimliliğini esas alan ve ekolojik süreçleri destekleyen kurakçıl peyzaj yaklaşımı, bitki türü seçimleri, kentsel yeşil alanların planlanması ve yönetimi süreçlerinde iklim değişikliğine uyum sağlayan bütüncül çözümlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

3. KENTSEL ISI ADASININ AZALTILMASINA YÖNELİK GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

3.1. Yeşil Altyapı Sistemleri

İklim değişikliğinin kentler üzerindeki etkilerinin belirginleşmesiyle birlikte, kentsel ısı adasının azaltılmasına yönelik geliştirilen yaklaşımlar arasında yeşil altyapı sistemleri ön plana çıkmaktadır. Geleneksel gri altyapının tamamlayıcısı olarak değerlendirilen yeşil altyapı, doğal ve yarı doğal alanları, parkları, kent ormanlarını, yeşil koridorları, ağaçlandırılmış yol akslarını, yeşil çatı ve yeşil duvar uygulamalarını kapsayan bütünleşik bir sistem olarak tanımlanmaktadır.

Bu yaklaşım yalnızca yeşil alan miktarının artırılmasını değil, ekolojik süreçlerin sürekliliğini sağlayan bağlantılı bir ağ oluşturulmasını da amaçlamaktadır (Acar & Yavuz, 2023; Üstündağ vd., 2023).

Yeşil altyapı sistemlerinin kentsel ısı adasının azaltılmasındaki temel etkisi, gölgeleme ve evapotranspirasyon mekanizmalarına dayanmaktadır. Ağaç-ağaççıklar ve çalı toplulukları güneş radyasyonunun önemli bir bölümünü absorbe ederek sert zeminlerin aşırı ısınmasını engellerken, bitkiler tarafından gerçekleştirilen evapotranspirasyon süreci çevre sıcaklığının düşürülmesine katkılar sağlamaktadır. Bu doğal soğutma mekanizması, özellikle yoğun yapılaşmış kent merkezlerinde mikroklima koşullarının iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Gill vd., 2007; Bowler vd., 2010).

Yeşil altyapının etkinliği yalnızca toplam yeşil alan miktarına bağlı değildir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, bitki örtüsünün mekânsal dağılımı, taç örtüsü yoğunluğu, bitki katmanlarının çeşitliliği ve yeşil alanların birbirleriyle bağlantılı olması gibi faktörlerin de sıcaklığın azaltılmasında belirleyici olduğunu göstermektedir. Dağınık ve parçalı yeşil alanlar belirli noktalarda sınırlı bir soğutma etkisi oluştururken, süreklilik gösteren yeşil koridorlar ve geniş taç örtüsüne sahip ağaç toplulukları daha geniş alanlarda sıcaklıkların düşürülmesine katkı sağlamaktadır (Üstündağ vd., 2023).

Karşıyaka örneğinde gerçekleştirilen araştırmada, yoğun bitki örtüsüne sahip mavi-yeşil altyapı alanlarının çevresinde belirgin bir soğutma etkisi oluşturduğu ve bu etkinin yeşil alanın büyüklüğü kadar kullanılan bitki yoğunluğu ile de ilişkili olduğu belirlenmiştir (Yüksel & Coşkun Hepcan, 2023). Benzer şekilde farklı kentlerde yürütülen uzaktan algılama çalışmalarında, fazla bitki yoğunluğuna sahip alanların yer yüzey sıcaklıklarının yoğun yapılaşmış bölgelerden daha düşük olduğu ortaya konulmuştur (Güneş vd., 2021; Ünal Çilek, 2022). Bu bulgular, yeşil altyapının estetik ve rekreasyonel işlevler üstlenmesinin yanı sıra kentlerin termal konforunun iyileştirilmesinde aktif rol oynayan ekolojik bir altyapı sistemi olduğunu da göstermektedir.

Bununla birlikte, yeşil altyapının planlanmasında yalnızca yeni yeşil alanların oluşturulmasına odaklanılması yeterli değildir. Bitki türlerinin iklim koşullarına uygunluğu, bakım gereksinimleri, su tüketimi ve uzun dönemli sürdürülebilirliği de planlama sürecinde dikkate alınmalıdır (Akgedik vd., 2025; Çiçek & Akat, 2025). Özellikle kurak ve yarı kurak iklim bölgelerinde yüksek su tüketimine sahip bitkilere dayalı uygulamalar, sıcaklıkların azaltılmasına katkı sağlasa bile uzun vadede sürdürülebilir su yönetimi açısından yeni sorunlar ortaya çıkarabilmektedir (Çetinkale Demirkan vd., 2025; İlhan vd., 2024b). Bu nedenle güncel çalışmalar, yeşil altyapının niceliği kadar niteliğinin de önem taşıdığını ve

bitki türü seçimlerinin iklim koşullarıyla uyumlu biçimde yapılması gerektiğini vurgulamaktadır (Acar & Yavuz, 2023; Çiçek vd., 2026).

Bu yaklaşım, yeşil altyapının gelecekte yalnızca yeşil alan miktarını artıran bir planlama aracı olarak değil, aynı zamanda ekolojik dayanıklılığı güçlendiren, su kaynaklarını koruyan ve iklim değişikliğine uyumu destekleyen çok işlevli bir sistem olarak ele alınacağını göstermektedir. Dolayısıyla yeşil altyapı uygulamalarının başarısı, alan büyüklüğünden çok, ekolojik işlevleri destekleyen tasarım ve yönetim kararlarına bağlıdır. Bu durum, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde kurakçıl peyzaj yaklaşımıyla bütünleşen planlama anlayışlarının önemini artırmaktadır.

3.2. Mavi-Yeşil Altyapı ve Kentsel Mikroklimanın Düzenlenmesi

İklim değişikliğinin kentlerde neden olduğu sıcaklık artışları, kuraklık ve düzensiz yağış rejimleri, yeşil altyapı uygulamalarının su yönetimi bileşenleriyle birlikte ele alınmasını gerekli kılmıştır. Bu doğrultuda geliştirilen mavi-yeşil altyapı yaklaşımı, yeşil alan sistemleri ile suya dayalı doğal ve yapay unsurların bütüncül biçimde planlanmasını esas alan sürdürülebilir bir kentleşme modeli olarak öne çıkmaktadır. Parklar, sulak alanlar, dere koridorları, göletler, yağmur bahçeleri, biyolojik hendekler, geçirgen yüzeyler ve yağmur suyu depolama sistemleri bu yaklaşımın temel bileşenleri arasında yer almaktadır (Yüksel & Coşkun Hepcan, 2023).

Mavi-yeşil altyapı sistemlerinin temel amacı yalnızca yağmur suyunun yönetilmesi değildir. Aynı zamanda yüzey akışını azaltmak, suyun doğal döngüsünü desteklemek, taşkın riskini azaltmak, biyolojik çeşitliliği korumak ve kentlerde termal konforu artırmak gibi çok yönlü ekosistem hizmetleri sunmaktadır. Özellikle su yüzeylerinin buharlaşma yoluyla oluşturduğu serinletici etki ile bitki örtüsünün sağladığı gölgeleme ve evapotranspirasyon birlikte değerlendirildiğinde, mavi-yeşil altyapının kentsel mikroklimanın düzenlenmesinde önemli bir rol üstlendiği görülmektedir (Yüksel & Coşkun Hepcan, 2023).

Son yıllarda uzaktan algılama teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar, mavi-yeşil altyapı bileşenlerinin yer yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koymuştur. Yüksel & Coşkun Hepcan (2023), Karşıyaka örneğinde yürüttükleri araştırmada, farklı özelliklere sahip mavi-yeşil altyapı alanlarının çevresindeki soğutma etkisini karşılaştırmış, yoğun taç örtüsüne sahip alanların seyrek bitki örtüsüne sahip açık alanlara göre belirgin düzeyde daha yüksek soğutma etkisi oluşturduğunu belirlemiştir. Buna karşın bitki örtüsünün yetersiz olduğu alanlarda anlamlı bir sıcaklık düşüşü sağlanamadığı ifade edilmiştir. Bu bulgu, mavi-yeşil altyapının başarısının yalnızca su varlığına değil, bitkisel yapının niteliğine de bağlı olduğunu göstermektedir.

Mavi-yeşil altyapı yaklaşımının önemli üstünlüklerinden biri, farklı ekosistem hizmetlerini aynı sistem içerisinde bir araya getirebilmesidir. Yağmur suyunun depolanması ve yeniden kullanılması su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine katkı sağlarken, geçirgen yüzeyler yüzey akışını azaltmakta ve yeraltı suyu beslenmesini desteklemektedir. Aynı zamanda bitkilendirilmiş alanlar karbon depolama, hava kalitesinin iyileştirilmesi, habitat oluşturma ve rekreasyon olanaklarının geliştirilmesi gibi çok sayıda ekolojik ve sosyal işlevi birlikte yerine getirmektedir (Üstündağ vd., 2023).

Bununla birlikte, mavi-yeşil altyapının uzun dönemli başarısı, tasarım sürecinde bölgesel iklim özelliklerinin ve su kaynaklarının dikkate alınmasına bağlıdır. Özellikle Akdeniz iklim kuşağı gibi yaz kuraklığının belirgin olduğu bölgelerde yüksek sulama gereksinimi olan bitki türlerinin tercih edilmesi, sistemin sürdürülebilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalar, mavi-yeşil altyapının planlanmasında su tüketimi düşük, kuraklığa dayanıklı ve yerel iklim koşullarına uyum sağlayabilen bitki türlerinin kullanılmasının önemini vurgulamaktadır (Acar & Yavuz, 2023). Böylece hem su kaynaklarının korunması hem de kentsel mikroklimanın iyileştirilmesi aynı planlama yaklaşımı içerisinde birlikte ele alınabilmektedir.

Güncel literatür birlikte değerlendirildiğinde, mavi-yeşil altyapının mühendislik temelli yağmur suyu yönetim sistemlerini de kapsayan, iklim değişikliğine uyum, ekosistem hizmetlerinin güçlendirilmesi ve kentsel yaşam kalitesinin artırılması açısından çok işlevli bir planlama yaklaşımı olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, sistemin etkinliği bitki materyallerinin ekolojik özellikleri, su yönetim stratejileri ve uzun dönemli bakım süreçleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu durum, kentsel yeşil alanların geleceğinde su verimliliğini temel alan kurakçıl peyzaj yaklaşımının, mavi-yeşil altyapı sistemlerinin tamamlayıcı ve güçlendirici bir bileşeni olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.3. Doğa Temelli Çözümler ve İklim Duyarlı Planlama

İklim değişikliğinin kentler üzerindeki etkilerinin giderek artması, geleneksel mühendislik çözümlerinin tek başına yeterli olmadığını göstermiş ve doğal süreçlerden yararlanan planlama yaklaşımlarının önemini artırmıştır. Bu doğrultuda son yıllarda "doğa temelli çözümler" (Nature-based Solutions, NbS), "iklim duyarlı tasarım" (Climate Sensitive Design) ve "dirençli kent" (Resilient City) kavramları, iklim değişikliğine uyum politikalarının temel bileşenleri arasında yer almaya başlamıştır. Ortak amaçları, kentlerin ekolojik işleyişini güçlendirerek çevresel riskleri azaltmak, yaşam kalitesini artırmak ve kentlerin iklim değişikliğine karşı uyum kapasitesini geliştirmektir (Baş & Partigöç, 2023; Yılmaz & Öztürk, 2024).

Doğa temelli çözümler, doğal ekosistemlerin işleyişinden yararlanarak çevresel sorunlara sürdürülebilir çözümler geliştirilmesini esas almaktadır. Bu

yaklaşım biyolojik çeşitliliğin korunmasının yanı sıra su yönetimi, karbon depolama, hava kalitesinin iyileştirilmesi, taşkın kontrolü ve mikroklimanın düzenlenmesi gibi çok sayıda ekosistem hizmetinin birlikte değerlendirilmesini öngörmektedir. Bu nedenle son yıllarda kent parkları, yeşil koridorlar, yağmur bahçeleri, sulak alan restorasyonları ve geçirgen yüzey uygulamaları, doğa temelli çözümlerin en yaygın örnekleri arasında gösterilmektedir (Üstündağ vd., 2023).

İklim duyarlı planlama yaklaşımı ise kentsel gelişmenin iklim verileri dikkate alınarak yönlendirilmesini hedeflemektedir. Yapı yoğunluğu, bina yönlenmesi, sokak geometrisi, rüzgâr koridorları, açık ve yeşil alan sistemleri ile bitkilendirme kararlarının birlikte ele alınması neticesinde kentlerin termal konfor koşullarının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Özellikle mikroklima analizlerinin planlama sürecine entegre edilmesi, kentsel ısı adası oluşumunun azaltılmasına yönelik tasarım kararlarının bilimsel verilere dayandırılmasına olanak sağlamaktadır. Tunçbilek (2023), İzmir'de gerçekleştirdiği iklim duyarlı tasarım çalışmasında kentsel morfoloji ile bitkilendirme stratejilerinin birlikte ele alınmasının kentsel ısı adası etkisinin azaltılmasında önemli katkılar sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

Bu süreçte öne çıkan bir diğer kavram ise dirençli kent yaklaşımıdır. Dirençlilik, kentlerin iklim değişikliği gibi dışsal baskılar karşısında mevcut durumunu koruyabilme kapasitesiyle birlikte değişen koşullara uyum sağlayabilme ve kendini yeniden organize edebilme yeteneğini ifade etmektedir. Güncel çalışmalar, dirençli kentlerin hazırlık, uyum, iyileşme ve dönüşüm süreçlerini kapsayan çok boyutlu bir planlama anlayışı gerektirdiğini vurgulamaktadır (Yılmaz & Öztürk, 2024). Bu yaklaşım kapsamında yeşil altyapı sistemleri, mavi-yeşil altyapı ağları ve doğa temelli çözümler birbirini tamamlayan bileşenler olarak değerlendirilmektedir.

Literatürde dikkat çeken ortak noktalardan biri, iklim değişikliğine uyumun yeni teknolojilerin kullanımı ile doğal süreçleri destekleyen planlama ve tasarım kararlarının bütüncül biçimde uygulanmasına bağlı olduğudur. Özellikle bitki örtüsünün korunması ve artırılması, geçirimsiz yüzeylerin azaltılması, yağmur suyunun yerinde yönetilmesi ve ekolojik bağlantıların güçlendirilmesi, farklı disiplinlerde yürütülen çalışmaların ortak önerileri arasında yer almaktadır (Acar & Yavuz, 2023; Baş & Partigöç, 2023; Üstündağ vd., 2023).

Bununla birlikte, güncel literatürde yeşil altyapı, mavi-yeşil altyapı ve doğa temelli çözümler sıklıkla ele alınmasına rağmen, bu yaklaşımların su verimliliği ve bitki materyallerinin iklim uyumu boyutlarının çoğu zaman ikincil planda kaldığı görülmektedir. Özellikle yaz kuraklığının belirgin olduğu iklim bölgelerinde, yüksek sulama gereksinimine sahip bitkilere dayalı yeşil alan uygulamalarının uzun vadede sürdürülebilirliğinin tartışmalı olduğu vurgulanmaktadır. Bu durum, kentsel yeşil alanların yalnızca sıcaklığı azaltan

sistemler olarak değil, aynı zamanda su kaynaklarını koruyan ve iklim değişikliğine uyum sağlayan ekolojik sistemler olarak yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu çerçevede, kurakçıl peyzaj yaklaşımı yeşil altyapı, mavi-yeşil altyapı ve doğa temelli çözümlerle aynı hedefleri paylaşmakla birlikte, özellikle su verimliliğini planlama ve tasarım sürecinin merkezine yerleştirmesi bakımından diğer yaklaşımlardan ayrılmaktadır. Dolayısıyla kurakçıl peyzaj, alternatif bir bitkilendirme yönteminin ötesinde, iklim dirençli kentsel yeşil alanların oluşturulmasına yönelik bütüncül bir planlama ve tasarım yaklaşımı olarak değerlendirilmelidir.

4. KURAKÇIL PEYZAJ YAKLAŞIMI VE KENTSEL ISI ADASI ETKİSİ

4.1. Kurakçıl Peyzaj Yaklaşımının Kavramsal Çerçevesi

İklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleşmesi ve kullanılabilir su kaynakları üzerindeki baskının artması, kentsel yeşil alanların planlanmasında geleneksel peyzaj anlayışlarının yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmıştır. Özellikle yaz kuraklığının belirgin olduğu iklim bölgelerinde yüksek su tüketimine dayalı bitkilendirme uygulamalarının sürdürülebilir olmadığı görülmüş, bu durum su kaynaklarını koruyan, bakım gereksinimlerini azaltan ve doğal çevreyle uyumlu planlama yaklaşımlarının geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Acar & Yavuz, 2023; IPCC, 2023). Bu yaklaşımların başında ise kurakçıl peyzaj (xeriscape) gelmektedir.

Kurakçıl peyzaj yaklaşımı, çoğu zaman yalnızca az su isteyen bitkilerin kullanıldığı peyzaj uygulamaları olarak algılansa da gerçekte bundan çok daha kapsamlı bir planlama ve tasarım anlayışını ifade etmektedir (Acar & Yavuz, 2023). Yaklaşımın temelini doğru alan planlaması, iklim koşullarına uygun bitki seçimi, suyun etkin kullanımı, toprak özelliklerinin iyileştirilmesi, organik malç uygulamaları, uygun bakım teknikleri ve verimli sulama sistemlerinin birlikte değerlendirilmesi oluşturmaktadır. Dolayısıyla kurakçıl peyzajın başarısı yalnızca bitki materyaline değil, peyzajın bütüncül olarak tasarlanmasına bağlıdır.

İlk olarak 1980'li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nin kurak ve yarı kurak bölgelerinde geliştirilen kurakçıl peyzaj yaklaşımı, günümüzde iklim değişikliğine uyum stratejileri kapsamında dünyanın birçok bölgesinde uygulanmaktadır (Acar & Yavuz, 2023; Yılmaz & Öztürk, 2023). Başlangıçta temel amacı sulama suyu tüketimini azaltmak olan bu yaklaşım, zaman içerisinde biyolojik çeşitliliğin korunması, bakım maliyetlerinin düşürülmesi, karbon ayak izinin azaltılması ve iklim dirençli yeşil alanların oluşturulması gibi daha geniş hedefleri kapsayan sürdürülebilir bir peyzaj yönetim modeli hâline gelmiştir.

Kurakçıl peyzajın temel ilkeleri incelendiğinde, su tasarrufunun tek hedef olmadığı görülmektedir. Yerel iklim koşullarına uyum sağlayabilen bitki türlerinin kullanılması, doğal ekolojik süreçlerin desteklenmesi, geçirgen yüzeylerin artırılması ve yağmur suyunun etkin biçimde değerlendirilmesi, bu yaklaşımın sürdürülebilirlik boyutunu güçlendiren temel unsurlar arasında yer almaktadır (Çöp & Akat, 2021; Üstündağ vd., 2023). Bu yönüyle kurakçıl peyzaj yeşil altyapı, mavi-yeşil altyapı ve doğa temelli çözümlerle benzer amaçları paylaşmakta, ancak su verimliliğini tasarım sürecinin merkezine yerleştirmesi bakımından bu yaklaşımlardan ayrılmaktadır.

Son yıllarda yayımlanan çalışmalar, kurakçıl peyzajın yalnızca kurak bölgeler için geliştirilmiş özel bir uygulama olmadığını, iklim değişikliğinin etkilerinin hissedildiği farklı iklim kuşaklarında da sürdürülebilir kentleşme politikalarının önemli bir bileşeni hâline geldiğini göstermektedir. Özellikle sıcak hava dalgalarının daha sık yaşandığı kentlerde su tüketiminin azaltılması ile mikroklima koşullarının iyileştirilmesinin birlikte ele alınması, kurakçıl peyzaj yaklaşımının önemini artırmaktadır. Bu nedenle günümüzde kurakçıl peyzaj, estetik kaygılar ile ekolojik işlevleri bir araya getiren, su kaynaklarının korunmasını destekleyen ve iklim değişikliğine uyum sağlayan çok boyutlu bir planlama yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir (Baş & Partigöç, 2023; Tunçbilek, 2023; Yılmaz & Öztürk, 2024).

Bu kapsamda kurakçıl peyzajın başarısı, yalnızca kullanılan bitki türlerinin kuraklığa dayanıklılığı ile açıklanamaz. Bitki kompozisyonunun oluşturulma biçimi, gölgeleme kapasitesi, geçirgen yüzey oranı, toprak-su ilişkisi ve sulama yönetimi birlikte değerlendirildiğinde, kurakçıl peyzajın kentlerin mikroklima koşullarının iyileştirilmesine katkı sağlayabilecek önemli bir planlama yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla bu yaklaşım, kentsel ısı adasının azaltılmasına yönelik geliştirilen güncel stratejiler içerisinde su verimliliğini esas alan, ekolojik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirliği destekleyen bütüncül bir tasarım anlayışı olarak ele alınmalıdır.

4.2. Kurakçıl Peyzaj Yaklaşımının Kentsel Mikroklima Üzerindeki Etkileri

Kentlerde mikroklima koşulları arazi örtüsü, yapı yoğunluğu, yüzey malzemeleri, bitki örtüsü ve su yüzeyleri gibi birçok bileşenin karşılıklı etkileşimi sonucunda şekillenmektedir. Bu bileşenlerde meydana gelen değişimler yer yüzey sıcaklığıyla birlikte hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgâr hareketleri ve termal konfor koşullarını da doğrudan etkilemektedir. Özellikle yoğun kentleşme sürecinde geçirimsiz yüzeylerin yaygınlaşması ve bitki örtüsünün azalması, doğal enerji dengesini bozarak kentsel mikroklimanın değişmesine ve kentsel ısı adasının güçlenmesine neden olmaktadır (Oke, 1982; Voogt & Oke, 2003).

Kurakçıl peyzaj yaklaşımı, bu sürecin tersine çevrilmesine katkı sağlayabilecek ekolojik planlama araçlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

Her ne kadar temel amacı su kullanımını azaltmak olsa da uygun bitki seçimi, geçirgen yüzeylerin artırılması ve doğal süreçlerin desteklenmesi sayesinde kentsel mikroklima üzerinde de olumlu etkiler oluşturmaktadır. Bu nedenle güncel çalışmalar, kurakçıl peyzajı su tasarrufunun yanı sıra iklim değişikliğine uyum stratejilerinin önemli bileşenlerinden biri olarak ele almaktadır (Acar & Yavuz, 2023).

Kurakçıl peyzaj uygulamalarında bitki örtüsü, mikroklimanın düzenlenmesinde temel rol üstlenmektedir. Özellikle ağaç-ağaççıklar ve çalı grupları, güneş radyasyonunun doğrudan sert zeminlere ulaşmasını engelleyerek yüzey sıcaklıklarının düşürülmesine katkı sağlamakta ve evapotranspirasyon yoluyla çevredeki havanın serinlemesine yardımcı olmaktadır. Bu etkinin büyüklüğü bitki sayısıyla birlikte tür, taç genişliği, yaprak yoğunluğu ve bitkisel kompozisyonun mekânsal düzenine de bağlıdır. Dolayısıyla sıcaklığın azaltılmasında belirleyici olan unsur, yeşil alanın niceliğinden çok, ekolojik işlevleri yerine getirebilecek nitelikte tasarlanmış olmasından kaynaklanmaktadır (Bowler vd., 2010; Yüksel & Coşkun Hepcan, 2023).

Bununla birlikte, literatürde zaman zaman kurakçıl peyzajın serinletici etkisinin sınırlı olabileceğine yönelik değerlendirmeler de bulunmaktadır. Bu görüşlerin temelinde, kurakçıl peyzajın yanlış biçimde yalnızca seyrek bitkilendirme veya kaktüs ve sukulent ağırlıklı tasarımlar olarak algılanması yer almaktadır. Oysa çağdaş kurakçıl peyzaj yaklaşımı, yerel iklim koşullarına uyum sağlayabilen ağaç-ağaççıklar, çalılar ve yer örtücü bitkilerin dengeli kullanıldığı, gölgeleme kapasitesi yüksek ve suyun etkin yönetildiği bütüncül bir tasarım anlayışını benimsemektedir. Bu nedenle mikroklima üzerindeki etkinin değerlendirilmesinde, bitki örtüsünün yoğunluğundan ziyade ekolojik işlevleri ön plana çıkaran tasarım kararlarının dikkate alınması gerekmektedir.

Kurakçıl peyzaj uygulamalarında kullanılan geçirgen yüzeyler de mikroklima açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Geçirimsiz yüzeylerin azaltılması, yağmur suyunun toprağa sızmasını kolaylaştırırken yüzey akışını azaltmakta ve toprak neminin korunmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca doğal zeminlerin korunması, sert yüzeylerin gün boyunca depoladığı ısının azalmasına yardımcı olarak yüzey sıcaklıklarının dengelenmesini desteklemektedir. Böylece kurakçıl peyzaj yalnızca bitkilendirme kararlarıyla değil, yüzey tasarımı ve su yönetimiyle de mikroklimanın iyileştirilmesine katkı sunmaktadır.

Literatürde son yıllarda öne çıkan çalışmalar, kurakçıl peyzaj uygulamalarının mikroklimatik koşullar üzerindeki etkilerinin yüzey sıcaklığı, gölgeleme ve bitki örtüsünün oluşturduğu serinletici etki gibi göstergeler üzerinden değerlendirildiğini ortaya koymaktadır (Güneş vd., 2021; Tunçbilek, 2023; Yüksel & Coşkun Hepcan, 2023). Bu bulgular, kurakçıl peyzaj uygulamalarının değerlendirilmesinde su verimliliğinin yanı sıra mikroklimaya sağladığı katkının da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak kurakçıl peyzaj yaklaşımı, uygun bitki kompozisyonu, geçirgen yüzey kullanımı ve doğal su döngüsünü destekleyen tasarım kararları sayesinde kentsel mikroklimanın düzenlenmesine katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, bu katkının düzeyi kullanılan bitki türlerinden çok, peyzajın bütüncül olarak planlanması ve uygulanmasıyla ilişkilidir. Bu nedenle kurakçıl peyzaj uygulamalarının başarısı, su verimliliği sağlamasının yanı sıra yüzey sıcaklıklarının azaltılması, mikroklimatik koşulların iyileştirilmesi ve iklim değişikliğine uyum kapasitesine sağladığı katkı çerçevesinde değerlendirilmelidir.

4.3. Kurakçıl Peyzaj Yaklaşımının İklim Dirençli Kentsel Yeşil Alanların Oluşturulmasına Katkıları

İklim değişikliğinin kentlerde oluşturduğu baskılar yalnızca artan sıcaklıklarla sınırlı değildir. Su kaynaklarının azalması, aşırı hava olaylarının sıklığının artması, biyolojik çeşitlilik kayıpları ve kent ekosistemlerinin işlevlerinde meydana gelen bozulmalar, kentsel yeşil alanların planlanma ve yönetim anlayışının yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu süreçte geliştirilen iklim dirençli kent yaklaşımı, kentlerin değişen çevresel koşullara uyum sağlayabilen, ekolojik süreçlerini sürdürebilen ve yaşam kalitesini koruyabilen sistemler olarak ele alınmasını öngörmektedir. Kentsel yeşil alanlar ise bu yaklaşımın en önemli bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Baş & Partigöç, 2023; Yılmaz & Öztürk, 2024).

Kurakçıl peyzaj yaklaşımı, iklim dirençli kentsel yeşil alanların oluşturulmasına farklı ölçeklerde katkı sağlamaktadır. Bunlardan ilki, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimidir. Geleneksel peyzaj uygulamalarında yüksek sulama gereksinimine sahip bitki türlerinin yoğun olarak kullanılması, özellikle kurak ve yarı kurak iklim bölgelerinde uzun vadede önemli su tüketimine neden olmaktadır. Buna karşılık kurakçıl peyzaj yaklaşımı, iklim koşullarına uyum sağlayabilen bitki türlerinin tercih edilmesi, sulama ihtiyacının azaltılması ve yağmur suyunun daha etkin değerlendirilmesi gibi uygulamalarla su kaynakları üzerindeki baskının azaltılmasına katkı sunmaktadır. Bu durum mevcut su varlığının korunmasının yanı sıra gelecekte yaşanabilecek kuraklık risklerine karşı kentlerin uyum kapasitesinin artırılmasını da desteklemektedir.

Kurakçıl peyzajın sağladığı bir diğer önemli katkı, ekosistem hizmetlerinin sürekliliğini desteklemesidir. Yerel çevre koşullarına uyum sağlayan bitki türlerinin kullanılması, habitat sürekliliğinin korunmasına ve kentlerde biyolojik çeşitliliğin desteklenmesine olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda bitki örtüsü, gölgeleme, evapotranspirasyon ve karbon depolama gibi düzenleyici ekosistem hizmetleri aracılığıyla hava kalitesinin iyileştirilmesine, mikroklimanın düzenlenmesine ve termal konforun artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle kurakçıl peyzaj, yalnızca estetik bir tasarım anlayışı değil, kent

ekosistemlerinin işlevselliğini güçlendiren ekolojik bir planlama yaklaşımıdır (Acar & Yavuz, 2023).

Kurakçıl peyzaj yaklaşımının önemli özelliklerinden biri de uzun dönemli yönetim süreçlerini kolaylaştırmasıdır. Su gereksinimi yüksek, fazla bakım isteyen bitkilendirme uygulamaları zaman içerisinde önemli ekonomik yükler oluşturabilmektedir. Buna karşılık yerel iklim koşullarına uygun bitki materyalinin kullanılması, sulama, gübreleme ve bakım gereksinimlerinin azalmasına katkı sağlayarak yeşil alan yönetiminde kaynak kullanımının daha verimli planlanmasına olanak tanımaktadır. Bu durum özellikle yerel yönetimlerin sürdürülebilir yeşil alan politikaları açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bununla birlikte, kurakçıl peyzaj yaklaşımının başarısı kuraklığa dayanıklı bitki türlerinin seçiminin ötesinde değerlendirilmelidir. Literatürde giderek daha fazla vurgulandığı üzere, iklim dirençli yeşil alanların oluşturulabilmesi için bitki materyali seçiminde ekolojik tolerans, su tüketimi, mikroklima üzerindeki etkiler, biyolojik çeşitliliğe katkı ve bakım gereksinimleri gibi çok sayıda ölçütün birlikte ele alınması gerekmektedir (Acar & Yavuz, 2023; Baş & Partigöç, 2023; Tunçbilek, 2023; Üstündağ vd., 2023). Bu doğrultuda kurakçıl peyzaj yaklaşımı, bitki türü seçimi, planlama, tasarım ve yönetim süreçlerini bütüncül biçimde ele alan bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Acar & Yavuz, 2023; Yılmaz & Öztürk, 2023).

Güncel çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, iklim değişikliğine uyum sağlayan kentlerin oluşturulmasında tek bir çözümün yeterli olmadığı görülmektedir. Yeşil altyapı sistemleri, mavi-yeşil altyapı uygulamaları, doğa temelli çözümler ve iklim duyarlı planlama yaklaşımları birbirini tamamlayan stratejiler olarak öne çıkmaktadır. Kurakçıl peyzaj ise bu yaklaşımlar içerisinde özellikle su verimliliğini temel alması, doğal kaynak kullanımını azaltması ve uzun dönemli sürdürülebilirliği desteklemesi bakımından farklılaşmaktadır. Bu nedenle geleceğin kentsel yeşil alanlarının planlanmasında kurakçıl peyzajın, diğer iklim uyum stratejileriyle birlikte değerlendirilmesi hem kentsel ısı adasının azaltılması hem de kentlerin çevresel dayanıklılığının artırılması açısından önemli bir gereklilik olarak görülmektedir.

5. GELECEĞE YÖNELİK PERSPEKTİFLER

İklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleşmesi, kentlerin mevcut çevresel sorunlara çözüm üretmesinin yanı sıra gelecekte karşılaşılabilecek iklim senaryolarına uyum sağlayabilecek planlama ve tasarım yaklaşımlarını da geliştirmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda kurakçıl peyzaj yaklaşımı, su verimliliğini temel alan uygulamalarıyla önemli avantajlar sunmakla birlikte, değişen iklim koşulları karşısındaki etkinliğinin farklı ölçeklerde değerlendirilmesine yönelik araştırmalara gereksinim bulunmaktadır. Özellikle kurakçıl peyzaj uygulamalarının kentsel mikroklima üzerindeki uzun dönemli

etkilerini ortaya koyan çalışmaların sınırlı olması, bu alandaki önemli bilgi boşluklarından biri olarak değerlendirilmektedir.

Günümüzde yürütülen araştırmaların önemli bir bölümü, kentsel ısı adasının uzaktan algılama yöntemleriyle belirlenmesine veya yeşil alanların soğutma etkisinin ortaya konulmasına odaklanmaktadır (Voogt & Oke, 2003; Güneş vd., 2021; Tunçbilek, 2023). Buna karşın kurakçıl peyzaj uygulamalarının farklı bitki kompozisyonları, yüzey özellikleri ve yönetim biçimleriyle birlikte değerlendirilerek mikroklima üzerindeki etkilerini inceleyen deneysel çalışmalar oldukça sınırlıdır. Gelecekte farklı iklim bölgelerinde gerçekleştirilecek karşılaştırmalı araştırmalar, kurakçıl peyzajın yalnızca su tüketimi açısından değil, termal performans bakımından da değerlendirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Bir diğer önemli araştırma alanı, bitki materyalinin mikroklima üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasıdır. Literatürde bitki örtüsünün gölgeleme ve evapotranspirasyon yoluyla sıcaklıkların azaltılmasına katkı sağladığı konusunda genel bir görüş birliği bulunmasına rağmen (Güneş vd., 2021; Tunçbilek, 2023; Yüksel & Coşkun Hepcan, 2023), farklı bitki türlerinin taç yapısı, yaprak özellikleri, mevsimsel davranışları ve ekolojik toleranslarının kentsel mikroklima üzerindeki etkilerini birlikte ele alan çalışmaların sayısı henüz sınırlıdır. Bu nedenle gelecekte yürütülecek araştırmalarda bitki materyallerinin yalnızca estetik ve fonksiyonel özellikleri değil, iklim değişikliğine uyum kapasitesi ve mikroklima düzenleme potansiyeli de değerlendirme ölçütleri arasında yer almalıdır.

İklim dirençli kentlerin oluşturulmasında disiplinler arası yaklaşımların geliştirilmesi de geleceğin önemli çalışma alanlarından biridir. Peyzaj mimarlığı, şehir ve bölge planlama, mimarlık, çevre mühendisliği gibi farklı disiplinlerin birlikte çalışması, kentsel ısı adasının oluşum mekanizmalarının daha doğru analiz edilmesine ve çözüm önerilerinin daha etkin biçimde geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Özellikle yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verileri, insansız hava araçları, mikroklima modellemeleri, uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemlerinin birlikte kullanıldığı bütünleşik araştırmaların önümüzdeki yıllarda daha fazla önem kazanacağı öngörülmektedir. Bunun yanında, iklim değişikliğine uyum stratejilerinin çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik boyutlarının bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir. Kurakçıl peyzaj uygulamalarının yaşam döngüsü maliyetleri, bakım gereksinimleri, rekreasyonel katkıları ve ekosistem hizmetlerine sağladığı katkılar birlikte ele alındığında, planlama kararlarının daha bütüncül biçimde yönlendirilmesi mümkün olacaktır. Böylece kentsel yeşil alanlar yalnızca çevresel işlevleri yerine getiren mekânlar olmaktan çıkarak iklim değişikliğine uyum sağlayan, doğal kaynakları koruyan ve yaşam kalitesini artıran çok işlevli sistemler hâline gelebilecektir.

6. SONUÇ

İklim değişikliği ve hızlı kentleşme süreci, kentsel alanlarda sıcaklık artışlarını belirgin hâle getirerek kentsel ısı adasını günümüzün öncelikli çevresel

sorunlarından biri hâline getirmiştir. Yoğun yapılaşma, geçirimsiz yüzeylerin artması ve bitki örtüsünün azalması sonucunda ortaya çıkan bu olgu, enerji tüketiminin yükselmesi, su kaynakları üzerindeki baskının artması, ekosistem hizmetlerinin zayıflaması ve insan sağlığının olumsuz etkilenmesi gibi çok boyutlu sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle kentsel ısı adasının azaltılması, iklim değişikliğine uyum politikalarının temel hedeflerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatür incelendiğinde, yeşil altyapı sistemleri, mavi-yeşil altyapı uygulamaları, doğa temelli çözümler ve iklim duyarlı planlama yaklaşımlarının kentsel ısı adasının azaltılmasına önemli katkılar sunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, bu yaklaşımların başarısı bitki materyallerinin özellikleri, su yönetimi, arazi kullanım kararları ve ekolojik süreçlerin birlikte değerlendirilmesine bağlıdır. Bu çerçevede kurakçıl peyzaj yaklaşımı, su verimliliğini temel alan yapısı sayesinde iklim değişikliğine uyum sürecinde öne çıkan planlama ve tasarım yaklaşımlarından biri olarak bilinmektedir. Kurakçıl peyzaj, bölgenin yerel iklim koşullarına uyumlu bitki materyallerinin kullanılması, geçirgen yüzeylerin desteklenmesi, doğal su döngüsünün korunması ve ekolojik süreçlerin güçlendirilmesi yoluyla kentsel mikroklimanın iyileştirilmesine ve iklim dirençli kentsel yeşil alanların oluşturulmasına katkılar sağlamaktadır. Bu doğrultuda mevcut literatür, kurakçıl peyzajın kentsel ısı adası üzerindeki etkilerini doğrudan ortaya koyan araştırmaların henüz sınırlı olduğunu göstermektedir. Özellikle farklı iklim bölgelerinde gerçekleştirilecek uzun dönemli saha çalışmalarıyla bitki materyali, mikroklima ve termal performans arasındaki ilişkinin bütüncül olarak değerlendirilmesi, bu alandaki bilgi birikiminin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Sonuç olarak, kurakçıl peyzaj yaklaşımının günümüzde yalnızca su verimliliğini esas alan bir tasarım anlayışı olarak değil; iklim değişikliğine uyumu destekleyen, kentsel ısı adası etkilerinin azaltılmasına katkı sağlayan ve iklim dirençli kentsel yeşil alanların oluşturulmasına rehberlik eden bütüncül bir planlama ve tasarım yaklaşımı olarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Kaynakça

Acar, H., & Yavuz, A. (2023). Kentsel alanlarda iklime uyumlu peyzaj tasarım yaklaşımları ve stratejiler. PEYZAJ - Eğitim, Bilim, Kültür ve Sanat Dergisi, 5(2), 63–76. doi:10.53784/peyzaj.1310681

Akat Saraçoğlu, Ö., & Çakar, H. (2023a). Muğla tuzcul alanlarındaki kurakçıl peyzaj çalışmalarında kullanılabilecek çim türleri. In A. M. Bozdoğan & N. Y. Bozdoğan (Eds.), Ziraat, orman ve su ürünleri alanında akademik araştırma ve derlemeler (ss. 161–188). Platanus Yayınevi.

Akat Saraçoğlu, Ö., & Çakar, H. (2023b). Kurakçıl peyzaj (xeriscape) uygulamalarında kullanılan sulama sistemlerinin irdelenmesi. In K. Özrenk (Ed.), Ziraat, orman ve su ürünleri alanında uluslararası araştırma ve değerlendirmeler (Cilt 1, ss. 253–278). Serüven Yayınevi.

Akgedik, S. A., Akat, H., & Çetinkale Demirkan, G. (2025). Köyceğiz Kulak Mesire Alanı örneğinde su etkin uygulamaların irdelenmesi. Bahçe, 54(Özel Sayı 1), 183–191. doi:10.53471/bahce.1539319

Baş, E., & Partigöç, N. S. (2023). İklim değişikliğine karşı dirençli kentler: Kentsel ısı adası etkisi bağlamında bir inceleme. Dirençlilik Dergisi, 7(1), 183–198.

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. Landscape and Urban Planning, 97(3), 147–155. doi:10.1016/j.landurbplan.2010.05.006

Çakar, H., & Akat Saraçoğlu, O. (2024). Çatı bahçelerinde kurakçıl peyzaj yaklaşımının değerlendirilmesi. In M. Özyavuz (Ed.), Peyzaj mimarlığı kitabı (Bölüm 2, ss. 20–41). Yaz Yayınları.

Çağlayan, M., & Kayaer, M. (2024). Sıcak hava dalgaları ve ısı ada etkisi ile mücadelede idarenin sorumluluğu. Uluslararası Batı Karadeniz Sosyal ve Beşerî Bilimler Dergisi, 8(1), 87–107.

Çakar, H., & Akat Saraçoğlu, Ö. (2023). Yağmur bahçeleri: Sürdürülebilir su yönetimi ve gelecekteki potansiyeli. In K. Yazıcı (Ed.), Kentleşme perspektifinden peyzaj mimarlığına bakış (ss. 121–145). İKSAD Publishing. doi:10.5281/zenodo.10301427

Çakar, H., Akat Saraçoğlu, Ö., & Akat, H. (2025). Kentsel yeşil altyapıda sürdürülebilirlik yaklaşımı: Dikey bahçelerde kurakçıl bitkiler. In K. Özrenk & A. Bolat (Eds.), Ziraat, orman ve su ürünleri alanında uluslararası akademik araştırma ve çalışmalar (Bölüm 2, ss. 17–32). Serüven Yayınevi.

Çetinkale Demirkan, G., & Akat, H. (2024). Suyun sürdürülebilir kullanımı kapsamında kurakçıl peyzaj yaklaşımı değerlendirmeleri. In G. Çetinkale Demirkan (Ed.), Mimarlık, planlama ve tasarımda güncel yaklaşımlar (ss. 87–105). BİDGE Yayınları.

Çetinkale Demirkan, G., Turhan Eren, İ., & Âdem, R. (2025). Bir kurakçıl peyzaj tasarımı: Nefes Park örneği. Kent Akademisi Dergisi, 18(5), 3002–3027. doi:10.35674/kent.1679234

Çiçek, K., & Akat, H. (2025). Peyzaj düzenleme alanlarında kuraklık stresine karşı geliştirilen stratejiler. In G. Bengisu & C. Demir (Eds.), Ziraat, orman ve su ürünleri alanında akademik çalışmalar XIX (ss. 229–274). İKSAD Publishing House. doi:10.5281/zenodo.17229015

Çiçek, K., Akat, H., & Çakar, H. (2026). Bir kentsel açık yeşil alanın sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi: Muğla/Ortaca 100. Yıl Cumhuriyet Parkı örneği. International Journal of Social and Humanities Sciences Research, 13(132), 1046–1073. doi:10.5281/zenodo.21088743

Çöp, S., & Akat, H. (2021). Kurakçıl peyzaj çalışmalarında bitkisel uygulamalar: Muğla-Sarıgerme Halk Plajı örneği. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(2), 263–277. doi:10.29048/makufebed.934101

Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. Built Environment, 33(1), 115–133. doi:10.2148/benv.33.1.115

Güneş, C., Pekkan, E., & Tün, M. (2021). Eskişehir kent merkezinde yer alan üniversite kampüslerindeki kentsel ısı adası etkilerinin Landsat-8 uydu görüntüleri üzerinden araştırılması. Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, 4(1), 22–32.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

İlhan, Ö., Akat, H., & Akat Saraçoğlu, Ö. (2024a). Kurakçıl peyzaja dönüşüm projesi kapsamında gerçekleştirilen bitkisel uygulamalar: Muğla-Ortaca ilçesi örneği. International Journal of Social and Humanities Sciences Research, 11(104), 570–582.

İlhan, Ö., Akat, H., & Akat Saraçoğlu, Ö. (2024b). Muğla ili Ortaca ilçesindeki Kültür Park'ın kurakçıl peyzaj açısından irdelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(4), 1754–1774.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1–24. doi:10.1002/qj.49710845502

Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges. Energy and Buildings, 91, 43–56. doi:10.1016/j.enbuild.2015.01.027

Tunçbilek, L. N. (2023). Climate sensitive design approach to reduce the urban heat island effect: Case of Poligon Stream and its surroundings, İzmir [Yüksek lisans tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü].

United Nations. (2018). World urbanization prospects: The 2018 revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Retrieved from https://population.un.org/wup/assets/WUP2018-Report.pdf

Ünal Çilek, M. (2022). Kentsel yüzey ısı adalarının belirlenmesinde yer yüzey sıcaklık verilerinin kullanımı. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (33), 213–222.

Üstündağ, Ç., Karataş, Ş. İ., Parıldar, N. N., & Artar, M. (2023). Kentsel ısı adalarının azaltılmasında yeşil altyapı sistemlerinin önemi. PEYZAJ - Eğitim, Bilim, Kültür ve Sanat Dergisi, 5(2), 124–134. doi:10.53784/peyzaj.1406139

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 86(3), 370–384. doi:10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Yasdıman, K. (2023). Kentsel ısı adası, sıcaklık dalgaları ve halk sağlığı ilişkisi. Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi, 18(67), 53–65. doi:10.17932/IAU.ABMYOD.2006.005/abmyod_v18i67003

Yılmaz, D., & Öztürk, S. (2023). Kentsel ısı adası etkisinin sistematik bir incelemesi: Kentsel form, peyzaj ve planlama stratejileri. Çevre, Şehir ve İklim Dergisi, 2(4), 302–323.

Yılmaz, D., & Öztürk, S. (2024). Kentsel ısı adası oluşumuna karşı dirençli kentlerin rolü üzerine bir araştırma. Journal of Humanities and Tourism Research, 14(2), 81–91.

Yüksel, A. T., & Coşkun Hepcan, Ç. (2023). Kentsel yüzey sıcaklığı ve mavi-yeşil altyapı ilişkisi: Karşıyaka örneği. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 20(1), 91–98. doi:10.25308/aduziraat.1214763

BÖLÜM 11

Kivilerde (*Actinidia* spp.) Fitoplazma Hastalıkları: Mevcut Bilgiler ve Araştırma Gereksinimleri

***Yağmur Türkmen*[1]**

[1] Dr., Ordu Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü
Orcid: 0000-0002-0566-1591

1. Giriş

Kivi (*Actinidia* spp.), dünya genelinde ekonomik öneme sahip önemli bir meyve türü olup, başta *A. deliciosa* ve *A. chinensis* olmak üzere farklı *Actinidia* tür ve çeşitlerinin yetiştiriciliği yapılmıştır (Ferguson, 2013; Huang & Ferguson, 2001). Kivi üretimindeki artışla birlikte hastalıkların verim, meyve kalitesi ve üretim sürekliliği üzerindeki etkileri de daha fazla önem kazanmıştır. Kivi yetiştiriciliğinde fungal, bakteriyel ve viral kökenli çok sayıda hastalık tanımlanmış olup (Li vd., 2022; Vanneste vd., 2011; Zhang vd., 2022), bu hastalık etmenlerinin yanı sıra fitoplazmaların da *Actinidia* türlerinde enfeksiyon oluşturabildiği bildirilmiştir (Marzachì vd., 1999; Paltrinieri vd., 2012, 2013, 2016).

Fitoplazmaların kivi bitkilerindeki varlığı ilk olarak İtalya'da gerçekleştirilen bir çalışmada ortaya konmuş ve *Actinidia deliciosa* doğal bir fitoplazma konukçusu olarak bildirilmiştir (Marzachì vd., 1999). Daha sonraki araştırmalarda, özellikle İtalya'nın kuzey ve orta kesimlerindeki kivi üretim alanlarında farklı 16Sr gruplarına ait fitoplazmaların tekli ve karışık enfeksiyonlar şeklinde bulunduğu gösterilmiştir (Paltrinieri vd., 2012, 2013). Bu çalışmalar, kivi bitkilerinde fitoplazma enfeksiyonlarının yalnızca tek bir fitoplazma grubu ile sınırlı olmadığını ve farklı fitoplazma gruplarının aynı üretim materyali veya üretim alanında bulunabileceğini ortaya koymuştur.

Kivilerde fitoplazma enfeksiyonları yapraklarda kızarma, sararma, aşağı doğru kıvrılma ve buruşma, sürgünlerde gelişme bozuklukları ve genel bitki gerilemesi gibi belirtilerle ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte, belirtilerin fitoplazma enfeksiyonuna özgü olmaması ve kivi yetiştiriciliğinde bakteriyel, fungal ve viral etmenlerin de benzer gelişme bozukluklarına yol açabilmesi, etmenin güvenilir biçimde tanılanmasını gerekli kılmıştır. Ayrıca, bazı araştırmalarda fitoplazma ile *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* enfeksiyonlarının aynı bitkilerde bulunabildiği bildirilmiş, ancak bu birlikteliğin biyolojik ve epidemiyolojik anlamı henüz tam olarak açıklanamamıştır (Paltrinieri vd., 2012, 2016).

Bu bölümde, kivi (*Actinidia* spp.) bitkilerinde şimdiye kadar bildirilen fitoplazmalar; hastalık belirtileri, tanı ve moleküler karakterizasyon yöntemleri, bulaşma ve epidemiyoloji açısından değerlendirilmiş ve kivi yetiştiriciliği açısından mevcut bilgiler ile araştırılması gereken konular birlikte ele alınmıştır.

2. Kivilerde bildirilen fitoplazmalar

Kivide fitoplazma varlığına ilişkin ilk kayıt Marzachì vd. (1999) tarafından İtalya'nın Liguria bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı botanik türlere ait 56 semptomlu bitki incelenmiş ve bunların 49'unda fitoplazma enfeksiyonu belirlenmiştir. *Actinidia* bitkisi bu araştırmada doğal fitoplazma konukçusu olarak ilk kez rapor edilmiştir. Moleküler ve RFLP analizleri sonucunda kivi

izolatının 16SrXII grubu ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Güncel EPPO kayıtlarında bu ilişki *'Candidatus Phytoplasma solani'* ile ilişkilendirilmiştir (EPPO, 2026).

Daha kapsamlı bir araştırma Paltrinieri vd. (2012) tarafından Kuzey ve Orta İtalya'daki kivi bahçelerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmada *A. chinensis* ve *A. deliciosa* türlerine ait toplam 72 ağaç incelenmiş ve farklı fitoplazma gruplarının tekli veya karışık enfeksiyonlar halinde bulunduğu belirlenmiştir. 16SrI, 16SrXII ve 16SrX gruplarına ait fitoplazmaların tespit edilmesi, kivinin birden fazla fitoplazma grubu için konukçu olabileceğini göstermiştir. Fitoplazma pozitif bitkilerde yapraklarda erken kızarma, aşağı doğru kıvrılma ve buruşma gibi belirtiler gözlenmiştir. Araştırmada ayrıca fitoplazma ile *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* (Psa) enfeksiyonu arasında olası bir ilişki değerlendirilmiş, ancak bu ilişkinin hastalık gelişimindeki rolü kesin olarak ortaya konulamamıştır (Paltrinieri vd., 2012).

Paltrinieri vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen bir başka araştırmada ise Emilia-Romagna, Veneto ve Lazio bölgelerinden alınan *Actinidia* örneklerinde 16SrI-B, 16SrX-A ve 16SrXII-A gruplarına ait fitoplazmalar belirlenmiştir. Ayrıca 16SrI + 16SrX, 16SrX + 16SrXII-A ve 16SrI + 16SrXII-A kombinasyonlarında karışık enfeksiyonlar da saptanmıştır. Çalışmada özellikle sarı meyveli çeşitlerin daha yüksek oranda pozitif bulunması dikkat çekmiştir. Bununla birlikte, araştırmada fitoplazmaların doğal vektörleri belirlenmemiş ve enfeksiyonların ekonomik sonuçları ayrıntılı olarak ortaya konulamamıştır.

Daha sonra Paltrinieri vd. (2016), fitoplazmalar ile Psa arasındaki olası ilişkiyi ele alan ayrı bir makale yayımlamıştır. Çalışmada Kuzey ve Orta İtalya'daki kivi bahçelerinden *A. chinensis* ve *A. deliciosa* türlerine ait 72 bitki incelenmiş ve 16SrI, 16SrXII ve 16SrX gruplarına ait fitoplazmaların tekli veya karışık enfeksiyonlar halinde bulunduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, çalışmada verilen örnek sayısı, fitoplazma grupları ve enfeksiyon oranlarına ilişkin bulguların Paltrinieri vd. (2012) tarafından bildirilen sonuçlarla önemli ölçüde örtüşmesi dikkat çekmektedir. Bu nedenle 2016 tarihli yayın, mevcut bilgiler ışığında 2012 çalışmasından tamamen bağımsız ikinci bir survey olarak değerlendirilmemeli; fitoplazma–Psa ilişkisini özellikle öne çıkaran ve önceki araştırmalarla bağlantılı bir yayın olarak ele alınmalıdır. Bununla birlikte, mevcut bibliyografik bilgiler iki yayında kullanılan bitki materyalinin tamamen aynı olduğunu kesin olarak ortaya koymak için yeterli değildir (Paltrinieri vd., 2016).

Mevcut çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, kivilerde şimdiye kadar özellikle 16SrI, 16SrX ve 16SrXII gruplarına ait fitoplazmaların bildirildiği görülmektedir. Ancak mevcut kayıtların büyük ölçüde İtalya'da gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki çalışmaya dayanması, fitoplazmaların *Actinidia* türlerindeki gerçek coğrafi dağılımı ve yaygınlığı hakkında kesin bir değerlendirme yapılmasını güçleştirmektedir. Ayrıca farklı çalışmalarda bildirilen 16Sr grup ve

alt grup tanımlamalarının, güncel *'Candidatus Phytoplasma'* tür adlarıyla doğrudan eş anlamlı olmadığı dikkate alınmalıdır. Bu nedenle mevcut kivi izolatlarının taksonomik konumlarının daha ayrıntılı biçimde belirlenmesi için 16S rRNA analizlerine ek olarak uygun tamamlayıcı moleküler belirteçlerin kullanıldığı yeni çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

3. Hastalık belirtileri

Kivide fitoplazma enfeksiyonları ile ilişkilendirilen belirtiler arasında özellikle yapraklarda erken kızarma, yaprakların aşağı doğru kıvrılması, buruşma, sararma, genel gelişme geriliği ve sürgünlerde anormal gelişim bildirilmiştir (Paltrinieri vd., 2012, 2013).

A. deliciosa bitkilerinde yaprak kızarması ve yapraklarda aşağı doğru kıvrılma öne çıkan belirtiler arasında yer alırken, *A. chinensis* bitkilerinde yaprak renk değişiklikleri ve genel gerileme belirtileri de gözlenmiştir. Bazı bitkilerde düzensiz odunlaşma göstermeyen dallar ve sürgünlerde proliferasyon benzeri gelişimler bildirilmiştir.

Bununla birlikte, bu belirtilerin fitoplazmaya özgü olmadığı vurgulanmalıdır. Kivi bitkilerinde su stresi, kök ve kök boğazı hastalıkları, Psa enfeksiyonu, diğer bakteriyel hastalıklar ve çevresel stresler de benzer yaprak ve sürgün belirtilerine neden olabilmektedir. Dolayısıyla yalnızca simptomatolojiye dayanarak fitoplazma enfeksiyonu hakkında kesin tanı yapılması mümkün değildir.

Bu durum özellikle kivi yetiştiriciliğinde önem taşımaktadır. Fitoplazma enfeksiyonlarının latent olarak da bulunabilmesi, görsel gözlemlerin tek başına güvenilir bir survey yöntemi olmadığını göstermektedir. Bu nedenle simptomlu bitkilerin yanı sıra simptomsuz bitkilerin de moleküler olarak incelenmesi gerekmektedir.

4. Tanı ve moleküler karakterizasyon

Fitoplazmaların kültüre alınamaması nedeniyle hastalıkların tanısında moleküler yöntemler temel araç olarak kullanılmıştır. İlk aşamada fitoplazmaya özgü DNA'nın 16S rRNA gen bölgesinden PCR veya nested-PCR ile çoğaltılması, düşük yoğunlukta bulunan fitoplazmaların belirlenmesinde yaygın olarak tercih edilmiştir (Laimer, 2009; Wei & Zhao, 2022).

Özellikle 16S rRNA gen bölgesi, fitoplazmaların ilk tanımlanması ve 16Sr grup/subgrup analizleri açısından güçlü bir moleküler belirteç olmuştur. Bununla birlikte, yakın akraba izolatların ayrımında 16S rRNA bölgesinin çözünürlüğünün sınırlı kalabilmesi nedeniyle *tuf*, *secY*, *rp* ve diğer protein kodlayan gen bölgelerinin kullanılması önerilmiştir. Çoklu gen analizleri, farklı fitoplazma izolatları arasındaki genetik farklılıkların daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasına olanak sağlamıştır (Wei & Zhao, 2022).

Kivi fitoplazmaları açısından mevcut çalışmaların büyük bölümü 16S rRNA temelli moleküler yaklaşımlara dayanmıştır. Bu nedenle gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda 16S rRNA bölgesinin yanı sıra *tuf* ve *secY* gibi ikinci moleküler belirteçlerin kullanılması**,** kivide bulunan fitoplazmaların daha güvenilir şekilde karakterize edilmesine katkı sağlayacaktır.

Günümüzde fitoplazma sınıflandırması yalnızca 16Sr grup analizine dayanmamakta; moleküler filogeni, genomik özellikler ve *'Candidatus Phytoplasma'* tür tanımlama kriterleri birlikte değerlendirilmektedir. Bertaccini vd. (2022), *'Candidatus Phytoplasma'* tür tanımlamalarına ilişkin kriterleri güncellemiş ve fitoplazma taksonomisinin daha standart bir çerçevede yürütülmesini önermiştir.

5. Bulaşma ve epidemiyoloji

Fitoplazmalar esas olarak floemle beslenen böcekler aracılığıyla taşınmaktadır. Yaprak pireleri (*Cicadellidae*), yaprak bitleri benzeri bazı Hemiptera grupları, psyllidler ve diğer floem emici böcekler arasında fitoplazma vektörleri tanımlanmıştır. Bulaşma, vektörün enfekteli bitkiden fitoplazmayı alması, organizmanın böcek içerisinde çoğalması ve daha sonra sağlıklı bitkiye aktarılması şeklinde gerçekleşmektedir (Weintraub & Beanland, 2006).

Bununla birlikte, kivide fitoplazmaların doğal vektörü henüz ortaya konulmamıştır**.** Paltrinieri vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen araştırmada da vektör çalışması yapılmadığı belirtilmiştir. Dolayısıyla kivi bahçelerinde bulunan herhangi bir fitoplazma-pozitif böceğin otomatik olarak vektör kabul edilmesi bilimsel olarak doğru değildir. Bir böceğin gerçek vektör olduğunun gösterilebilmesi için fitoplazmanın kazanımı ve sağlıklı bitkiye başarılı şekilde aktarılması deneysel olarak ortaya konulmalıdır (Weintraub & Beanland, 2006).

Vejetatif çoğaltma materyali de fitoplazmaların uzun mesafeli taşınması açısından önem taşımaktadır. Özellikle fidanlar ve mikroçoğaltım materyalleri, enfekteli ana bitkilerden elde edilmeleri durumunda patojenin yeni üretim alanlarına taşınmasına neden olabilir. Meyve ağaçlarında bitki materyalinin önemli bir giriş ve yayılma yolu olabildiği bildirilmiştir (Laimer, 2009).

Kivide Paltrinieri vd. (2013), yaygın olarak kullanılan mikroçoğaltım sistemlerinin fitoplazmaların taşınmasında olası bir rol oynayabileceğini tartışmıştır. Ancak bu hipotezin deneysel olarak doğrulanması gerekmektedir. Bu nedenle fidanlık ve anaç materyalinin fitoplazmalar açısından test edilmesi, gelecekteki biyogüvenlik çalışmalarının önemli bileşenlerinden biri olmalıdır.

6. Fitoplazmaların diğer kivi patojenleriyle ilişkisi

Kivi üretiminde hastalıkların ortaya çıkışı çoğu zaman tek bir patojenin etkisiyle sınırlı kalmamakta ve farklı biyotik ve abiyotik streslerin birlikte etkisi söz konusu olabilmektedir. Bu durum fitoplazmalar açısından da önemlidir.

Paltrinieri vd. (2012), kivi bahçelerinde fitoplazma varlığı ile Psa enfeksiyonu arasındaki olası ilişkiyi araştırmıştır. Çalışmada Psa açısından negatif olan bazı bitkilerde fitoplazma pozitifliği belirlenmiş ve iki patojen arasındaki ilişkinin daha ayrıntılı olarak araştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Daha sonraki çalışmada da fitoplazma–Psa birlikteliği yeniden değerlendirilmiştir (Paltrinieri vd., 2016).

Bununla birlikte, mevcut veriler fitoplazmaların Psa enfeksiyonunu artırdığını veya Psa'nın fitoplazma hastalığını tetiklediğini göstermemektedir**.** Bu nedenle iki patojen arasındaki ilişkinin nedensel bir etkileşim şeklinde yorumlanmasından kaçınılmalıdır.

Benzer şekilde, kivi asma gerileme sendromu (kiwifruit vine decline syndrome, KVDS) gibi kompleks hastalık tablolarında fitoplazmaların rolü konusunda da kesin bir nedensellik ortaya konulmamıştır. Bu tür hastalık komplekslerinde farklı fungal, bakteriyel ve çevresel faktörlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla fitoplazma varlığının KVDS'nin doğrudan nedeni olduğu şeklindeki bir yorum mevcut kanıtlarla desteklenmemektedir.

7. Türkiye açısından değerlendirme

Türkiye'de kivi yetiştiriciliği özellikle Karadeniz ve Marmara bölgelerinde önem kazanmış ve üretim alanlarının genişlemesiyle birlikte hastalık ve zararlıların düzenli olarak izlenmesi gerekli hale gelmiştir.

Tarafımca gerçekleştirilen mevcut literatür taramasında, Türkiye'de yetiştirilen kivilerde fitoplazma enfeksiyonunu moleküler olarak doğrulayan yayımlanmış bir araştırma kaydına rastlanmamıştır**.** Bu durum Türkiye'de kivide fitoplazmaların bulunmadığı anlamına gelmemekte, yalnızca mevcut literatürde bu konudaki araştırmaların son derece sınırlı olduğunu göstermektedir.

Bu nedenle Türkiye'deki kivi üretim alanlarında sistematik fitoplazma surveylerinin gerçekleştirilmesi önem taşımaktadır. Özellikle Ordu, Rize, Samsun, Yalova ve Bursa gibi kivi yetiştiriciliğinin yoğun olduğu bölgelerde simptomatoloji ile birlikte moleküler tanıya dayalı araştırmalar yürütülebilir.

Surveylerde yalnızca belirgin simptom gösteren bitkilerin değil, aynı zamanda simptomsuz bitkilerin, farklı yaş gruplarındaki bitkilerin ve fidanlık materyalinin de incelenmesi gerekmektedir. İlk aşamada 16S rRNA gen bölgesine dayalı PCR/nested-PCR analizleri kullanılabilir; pozitif örneklerin dizi analizi ve *tuf* veya *secY* gibi tamamlayıcı gen bölgeleri üzerinden karakterizasyonu, elde edilen izolatların daha güvenilir biçimde sınıflandırılmasını sağlayabilir.

Ayrıca kivi bahçelerinde bulunan floemle beslenen böceklerin belirlenmesi ve bunların fitoplazma taşıyıcılığı açısından incelenmesi, Türkiye'deki olası epidemiyolojik döngünün ortaya çıkarılması açısından önemlidir. Bunun yanında

fidan ve mikroçoğaltım materyalinin test edilmesi, fitoplazmaların üretim alanlarına taşınma riskinin değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

8. Sonuç

Kivilerde fitoplazma hastalıklarına ilişkin mevcut bilgiler sınırlı olmakla birlikte, *Actinidia deliciosa* ve *A. chinensis* bitkilerinin farklı fitoplazma grupları tarafından enfekte edilebildiği gösterilmiştir. İlk kayıtların ardından özellikle İtalya'da gerçekleştirilen çalışmalar, kivide 16SrI, 16SrX ve 16SrXII gruplarına ait fitoplazmaların tekli veya karışık enfeksiyonlar şeklinde bulunabildiğini ortaya koymuştur. Enfekteli bitkilerde yaprak kızarması, yaprakların aşağı doğru kıvrılması ve buruşması, sararma, sürgünlerde anormal gelişim ve genel gelişme geriliği gibi belirtiler bildirilmiştir. Bununla birlikte, bu belirtilerin fitoplazmalara özgü olmaması nedeniyle görsel gözlemler tek başına güvenilir bir tanı ölçütü olarak değerlendirilmemelidir.

Kivide fitoplazmaların tanılanmasında moleküler yöntemler temel yaklaşım olarak öne çıkmıştır. Özellikle 16S rRNA gen bölgesine dayalı PCR ve nested-PCR yöntemleri fitoplazma varlığının belirlenmesinde kullanılmış; ancak yakın akraba grupların ayrıntılı karakterizasyonu açısından 16S rRNA bölgesinin sınırlılıkları bulunduğu görülmüştür. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda *tuf*, *secY* ve benzeri tamamlayıcı gen bölgelerinin kullanılması, kivide bulunan fitoplazmaların genetik çeşitliliğinin ve taksonomik konumlarının daha güvenilir biçimde belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Mevcut literatürde kivide fitoplazmaların doğal vektörleri henüz belirlenmemiştir. Benzer şekilde, fidan ve mikroçoğaltım materyalinin fitoplazmaların taşınmasındaki rolü olası bir bulaşma yolu olarak değerlendirilmiş, ancak bu yolun epidemiyolojik önemi deneysel olarak ortaya konulmamıştır. Fitoplazmaların *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* ile birlikte bulunabildiğine ilişkin bulgular da mevcut olmakla birlikte, bu birlikteliğin hastalık gelişimindeki nedensel rolü henüz açıklığa kavuşturulamamıştır. Bu nedenle kivi hastalıklarının değerlendirilmesinde tek bir patojene odaklanmak yerine, fitoplazmaların diğer biyotik ve abiyotik streslerle olası ilişkilerinin birlikte ele alınması gerekmektedir.

Kivi asma gerileme sendromu gibi kompleks hastalık tabloları açısından da fitoplazmaların rolü dikkatle değerlendirilmelidir. Mevcut veriler, fitoplazmaların bu hastalık komplekslerinin doğrudan etiyolojik ajanları olduğunu ortaya koymak için yeterli değildir. Dolayısıyla fitoplazma varlığı ile hastalık gelişimi arasındaki ilişkinin ortaya konulabilmesi için moleküler tanının yanı sıra epidemiyolojik ve deneysel çalışmaların yürütülmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

Bertaccini, A. (2007). Phytoplasmas: Diversity, taxonomy, and epidemiology. Frontiers in Bioscience, 12, 673–689. https://doi.org/10.2741/2092

Bertaccini, A., & Duduk, B. (2009). Phytoplasma and phytoplasma diseases: A review of recent research. Phytopathologia Mediterranea, 48(3), 355–378. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-3300

Bertaccini, A., Arocha-Rosete, Y., Contaldo, N., Duduk, B., Fiore, N., Guglielmi Montano, H., Kube, M., Kuo, C.-H., Martini, M., Oshima, K., Quaglino, F., Schneider, B., Wei, W., & Zamorano, A. (2022). Revision of the 'Candidatus Phytoplasma' species description guidelines. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 72(4), 005353. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.005353

EPPO. (2026). 'Candidatus Phytoplasma solani'. EPPO Global Database. Erişim tarihi: 9 Eylül 2026, https://gd.eppo.int/taxon/PHYPSO

Ferguson, A. R. (2013). Kiwifruit: The wild and the cultivated plants. Advances in Food and Nutrition Research, 68, 15–32. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394294-4.00002-X

Huang, H., & Ferguson, A. R. (2001). Review: Kiwifruit in China. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 29(1), 1–14. https://doi.org/10.1080/01140671.2001.9514154

Laimer, M. (2009). Detection of phytoplasmas of temperate fruit trees. In M. Laimer & W. G. M. Assante (Eds.), Molecular techniques in plant disease diagnostics. Totowa, NJ: Humana Press.

Li, X., Zeng, S., Liu, J., Wang, Y., & Sui, Y. (2022). Introduction and multiplex management strategies of postharvest fungal diseases of kiwifruit: A review. Biological Control, 176, 105096. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105096

Marzachì, C., Alma, A., d'Aquilio, M., Minuto, G., & Boccardo, G. (1999). Detection and identification of phytoplasmas infecting cultivated and wild plants in Liguria (Italian Riviera). Journal of Plant Pathology, 81(2), 127–136. https://doi.org/10.4454/jpp.v81i2.1057

Namba, S. (2019). Molecular and biological properties of phytoplasmas. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 95(7), 401–418. https://doi.org/10.2183/pjab.95.028

Paltrinieri, S., Biondi, E., Contaldo, N., Lucchese, C., De Salvador, F. R., & Bertaccini, A. (2016). Possibile interazione fra presenza di fitoplasmi e di Pseudomonas syringae pv. actinidiae in piante di kiwi. Kiwi Informa, 12, 93–96.

Paltrinieri, S., Piergiacomi, M., Ardizzi, S., Contaldo, N., Biondi, E., Lucchese, C., & Bertaccini, A. (2012). Phytoplasma detection and identification in kiwi plants and possible correlation with Pseudomonas syringae pv. actinidiae presence. Petria, 22(3), 167–173.

Paltrinieri, S., Piergiacomi, M., Contaldo, N., De Salvador, F. R., & Bertaccini, A. (2013). Indagine sulla presenza di fitoplasmi in Actinidia spp. in Italia centro-settentrionale. Petria, 23(1), 25–28.

Pedroncelli, A., Singh, Y., Hogenhout, S. A., & Janik, K. (2026). Advances in understanding phytoplasma interactions with plants and insects. Annual Review of Phytopathology. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-011325-105751

Vanneste, J. L., Kay, C., Onorato, R., Yu, J., Cornish, D. A., Spinelli, F., & Max, S. (2011). Recent advances in the characterisation and control of Pseudomonas syringae pv. actinidiae, the causal agent of bacterial canker on kiwifruit. Acta Horticulturae, 913, 443–455. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.913.59

Wei, W., & Zhao, Y. (2022). Phytoplasma taxonomy: Nomenclature, classification, and identification. Biology, 11(8), 1119. https://doi.org/10.3390/biology11081119

Weintraub, P. G., & Beanland, L. (2006). Insect vectors of phytoplasmas. Annual Review of Entomology, 51, 91–111. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151039

Zhang, G., Bai, B., Xu, M., Liu, Y., Wu, Y., & Zhao, L. (2022). Advances in and prospects for Actinidia viruses. Plant Disease, 106(5), 1321-1329. https://doi.org/10.1094/PDIS-10-21-2270-FE

BÖLÜM 12

Türkiye'nin Köpük Böcekleri

Mehmet Zahid Karahalilöz[1]
Emine Demir Özden[2]

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitki Koruma ABD, Düzce, Türkiye ORCID: 0009-0002-4634-3378
[2] Prof. Dr., Düzce Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Bitki Koruma Bölümü, Düzce, Türkiye ORCID: 0000-0003-4486-003X

1. Giriş

1.1 Köpükböceklerinin Genel Özellikleri

Köpük böceklerinin nimf döneminde bitkiler üzerinde oluşturduğu salgılar doğa bilimcilerinin ilgisini çektiğinden dolayı, köpük böcekleri ile ilgili çalışmalar oldukça eskiye dayanmaktadır. İlkbahar aylarında birçok bitki üzerinde köpük böceklerinin oluşturduğu köpük kitleleri göze çarpar. Bitkilerdeki bu köpüğün köpük böcekleri tarafından yapıldığı daha bilinmeden çok önceleri, yerel halk tarafından bu köpüğün kökeni hakkında değişik hikayeler uydurulmuştur (Yurtsever 2000a).

Çayır köpük veya köpüklü ağustos böcekleri olarak bilinen cercopidler, Hemiptera takımı Auchenorrhyncha alt takımına bağlı geniş bir familyadır. Bazı türlerinin gerek nimf, gerekse erginlerinin olarak kurbağayı andırması nedeniyle yabancı literatürlerde "froghoppers" ismi de verilmektedir (Hamilton 1982).

Köpük böceklerinin içerisinde yer aldığı Cercopoidea süper familyası içerisinde değişik taksonomik gruplara ait 2400 civarında tür kaydı bilinmektedir (Hodkinson & Casson 1991).

2. Sistematik ve Taksonomi

2.1 Türkiye'de bulunan familyalar

Cercopoidler ülkemizde Aphrophoridae ve Cercopidae olmak üzere iki familya ile temsil edilmektedirler. Cercopidae ve Aphrophoridae tropik bölgeler başta olmak üzere dünya çapında birçok tür ile temsil edilir.

2.2 Köpük Böceklerinin Sistematik Yeri.

- Alem: Animalia (Hayvanlar)
- Şube: Arthropoda (Eklembacaklılar)
- Altşube: Hexapoda (Altıbacaklılar)
- Sınıf: Insecta (Böcekler)
- Altsınıf: Pterygota (Kanatlıböcekler)
- Takım: Hemiptera (Yarımkanatlılar)
- Alttakım: Auchenorrhyncha (Ağustosböcekleri, Yaprakpireleri, Köpükböcekleri, Bitkipireleri)
- Üstfamilya: Cercopoidea (Köpükböcekleri)
- Familya: Cercopidae
- Familya: Aphrophoridae

3. Morfolojik ve Biyolojik Özellikler

3.1 Aphrophoridae familyasının morfolojik özellikleri

Köpük böcekleri vücut büyüklükleri 3-12 mm olan türlerdir. Ön kanatlarda siyah ya da kırmızı desenlenme yoktur. Sarıdan kahverengiye değişen renklenmeye sahiptirler. Baş pronotum kadar geniştir (Holzinger vd, 2003). Türlerin ayrımında genital yapıların özellikleri oldukça önemlidir. Aphrophoridae familyasına ait türlerin genel görüntü örnekleri Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Aphrophoridae familyasına ait bir böcek (Wikipedia contributors, n.d.)

Erkek genital yapılar: Genital segmenti dıştan çevreleyen pigofer, ventral tarafta dorsalden daha uzun ya da daha kısa olabilir. Anal tüp farklı şekillerdedir. Aedegus genellikle tek parçalı, kısa ve geniştir. Apikalde çatallı ya da çatalsızdır. Phallotrema geniş ve ovaldir. Bazalde dar olan stiluslar girinti oluşturarak genişler (Holzinger vd, 2003).

Dişi genital yapılar: Abdomenin yarı uzunluğuna dek ulaşabilen uzun ve ince bir ovipozitöre sahiptirler. Pregenital sternum VII'nin arka kenarı konkav, konveks ya da çeşitli şekillerdedir (Holzinger vd, 2003).

3.2 Cercopidae familyasının morfolojik özellikleri

Boyutları 6-12 mm olan renkli elitralarıyla karakterize olan türleri kapsar. Ön kanatları kırmızı siyah renklenme gösterir. Bu desenlenme tür içinde varyasyona sahiptir. Vertekste 2 basit göz bulunur. Ön bacaklarda femur kalın değildir. Pronotum genellikle düz, hafif bombeli olabilir. Arka tibia yuvarlaktır, 1-2 dikene sahiptir. Baş pronotumdan dardır (Holzinger vd, 2003). Türlerin ayrımında diğer yapıların yanı sıra genital yapıların özellikleri büyük öneme sahiptir. Cercopidae familyasına ait türlerden örnekler Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Cercopidae familyasına ait bir böcek (Angelova & Gjonov, 2024)

Erkek genital yapılar: Subgenital plaklar kısadır. Stiluslar genellikle kanca şeklindedir. Phallobase yuvarlaktır ve aedegus boru şeklindedir.

Dişi genital yapılar: Abdomenin yarı uzunluğuna dek ulaşabilen uzun ve ince bir ovipozitöre sahiptirler (Holzinger vd, 2003).

3.3 Köpük Böceklerinin Köpük İçeriği

Birçok ülkede yaşayan köpük böceklerinin köpük salgısı ilkbahar aylarında yeterince nemli ortamlar içeren uygun habitatlarda bulunan birçok bitki üzerinde görülebilmektedir (Weaver & King 1954; Yurtsever 2000a). Nimfler ve erginlerin hepsi ksilem özsuyu ile beslenir, bitki üzerinde beslenme esnasında nimfler baş aşağı durur (Whittaker 1970; Raven 1983). Nimflerin ürettiği köpüğün esas içeriği ksilemden sağlanır. Bu salgı abdomenin bazı kaudal eklentilerinden çıkarılan hava ile doldurularak baloncuklar oluşturulur (Yurtsever 2000a; Weaver & King 1954; Whittaker 1970; 2000a).

Köpük böceklerinin ürettiği salgının, ergin olana kadar nimfleri koruyarak onlara emniyetli bir mikrohabitat sağladığı bilinmektedir (Whittaker 1970). Köpük böceklerinin köpük içeriği, anüsten çıkardıkları yapışkan salgı, köpük içeriğindeki kimyasal maddeler ve bunların esas görevleri hakkındaki detaylı çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yakın zamanda yapılan bir deneysel çalışmada (del Campo et al. 2011) köpük içeriğindeki bazı maddelerin, nimfleri bazı preadatör böceklere karşı koruduğu göstermiştir. Bütün çalışmalar köpük içeriğinin nimflere nemli bir ortam sağlayarak onları kurumaya karşı sıcaklık etkisinden koruduğu, ayrıca köpüğün içerisindeki maddelerin zararlı mikroorganizma ve preadtörlere karşı etkili olduğunu göstermektedir. Ancak köpük içeriğindeki koruyucu maddelerin neler olduğu net bir şekilde açıklanamamıştır (Yurtsever et al., 2012).





Şekil 3. **Şekil 4.**

Şekil 3 ve 4' te köpük böceklerinin yaptığı köpük ve nimfler görülmektedir.

3.4 Biyolojik Özellikleri

Genel olarak, Cercopidae ve Aphrophoridae'de son deri değiştirme, kanatların genişlemesini ve zarların kurumasını sağlayan, anormal derecede büyük ve kuru kabarcıklarla çevrili köpük içerisinde gerçekleşir; erginlerin köpük yapısında bulunduğu tek zaman budur. Buna karşılık, Clastopteridae familyasında son deri değişimi köpüklerinin dışında gerçekleşir. Univoltin (yılda tek döl) olan çoğu ılıman köpük böceklerinin aksine, tropik köpük böceklerinin çoğu mevsimsel yağış düzenlerine bağlı yaşam döngüleri nedeniyle multivoltindir (yılda çok döl) (Carvalho ve Webb, 2005). Bu böceklerde çiftleşme sırasında bağlanma, ters yöne bakan Cicadellidlerin aksine, her bir çift yan yana aynı yöne bakacak şekilde gerçekleşir (Carvalho ve Webb, 2005). Cercopoidler yumurtalarını toprağa, yaprak döküntülerine ve gövde yüzeylerine bırakır. Yumurtadan yeni çıkmış nimfler uygun, bol sulu bir beslenme yeri bulana kadar, konukçu bitkinin üzerinde dolaşır. Türlere ve iklime göre 4-9 hafta arasında değişen gelişim süresinin, 1-3 haftasını ergin olarak geçirirler. (Carvalho ve Webb, 2005).

4. Ekonomik Önemi

4.1 Tarımsal Zararı

Bazı Cercopidae türleri ekonomik zarara neden olabilir. Örneğin pirinçte ya direkt beslenme yoluyla ya da hastalık etmeni olan organizmaların vektörü olarak zarar oluştururlar. Bazı türler, çeltik yanıklığına neden olan fungusun bulaştırılmasına neden olmaktadır. Şeker kamışı ve bazı yem bitkilerinden de zarar kayıtları bilinmektedir (Paladini vd, 2018).

Cercopoidea aynı zamanda, dünyadaki ksilem (odun borusu) özsuyu emen en büyük böcek grubunu oluşturmaktadır. Bu üstfamilyanın türlerinin büyük bir kısmı otsu monokotil (tekçenekli) bitkilerden, bazıları da (Clastopteridae) ağaçlardan veya çalılardan alınan özsu ile beslenirler. Çoğu Cercopid, otlaklarda köklerle beslenen nimfleriyle birlikte yaşarlar. Baklagiller, ceviz, pamuk,

narenciye, akçaağaç, kahve, üzüm ve yonca gibi birçok ekonomik öneme sahip bitkiye zarar verdikleri için, bazı türler zirai açıdan oldukça önem arz etmektedir. Hatta *Philaenus spumarius* (L.) gibi bazı türler *Xylella fastidiosa* gibi karantina listelerinde yer alan patojenleri bitkiler arasında taşıyarak vektör görevi görürler (Carvalho ve Webb, 2005; Brambila ve Hodges, 2008).

Cercopoidlerin sebep olduğu şiddetli salgınlar, bitkilerin tüm toprak üstü kısımlarının sararmasına neden olur. Bu zarar, yem üretimini, kalitesini ve lezzetini düşürür, süt ve et üretimini azaltır, gelişmiş meraların kurulmasını ve kalıcılığını engeller (Carvalho ve Webb, 2005).

4.2 Tarımsal Yararı

Her ne kadar büyük çoğunluğu bitki zararlısı olarak bilinse de, üstfamilyanın bazı türlerinin, bazı parazitik bitkilerin ve zararlı otların ksilem sıvısını tüketerek tarıma faydalı olduğu da kaydedilmektedir (Thompson, 2011; Mozaffarian ve Wilson, 2015).

5. Ülkemizde Bulunan Bazı Köpük Böceği Cins ve Türleri

Aphrophoridae ve Cercopidae Familyası

Aphrophoridae ülkemizde ise 7 cins ve 16 tür ile temsil edilmektedir (Nast, 1972; Lodos ve Kalkandelen, 1981; 1988; Önder ve ark., 2011). Türlerin nimflerinin tamamı köpük üretmez (Brambila ve Hodges, 2008). Genellikle uzun yapılı scutelluma sahip, göz alıcı renklere sahip olmayan türlerdir. Gözlerin boyu, eninden fazladır. Bu grup Cercopidae ile benzer şekilde, Avrupa'ya özgü 4-6 mm' lik *Philaenus spumarius* (L.) ve, neredeyse 30 mm'ye ulaşan Madagaskar'a özgü büyük *Ptyelus goudoti* (Bennett, 1833) gibi birbirine kıyasla oldukça farklı boylarda türler içerir (Bartlett ve ark., 2018). Aphrophoridae türleri genellikle Gymnospermler, otsu dikotiller (Carvalho ve Webb, 2005), Graminae'ler ve çalılıklardan beslenir (Lodos ve Kalkandelen, 1981). Bununla birlikte, bu genellemenin pek çok istisnası vardır ve bazı türler olağanüstü geniş bir yelpazedeki konakçılardan beslenmektedir. Örneğin bir Aphrophorid olan çayır tükürük böceği *P. spumarius* (Linnaeus, 1758) muhtemelen diğer tüm fitofag böceklerden daha fazla kayıtlı konakçıya sahiptir. *P. spumarius* (Linnaeus, 1758), Yeni Zelanda ve Kuzey Amerika'da olduğu gibi, parazitik yaşayan en önemli Aphrophorid zararlı türüdür. Öyle ki, en az 380 kayıtlı konakçıdan bilinmektedir (Hamilton, 1982) ve bu türün yem bitkileri (mera), çilekler ve çok yıllık bitkiler için çok zararlı böceklerden biri olduğu bildirilmiştir (Quartau ve Borges, 1998). *P. spumarius* (Linnaeus, 1758), Palaearktik'e özgü, erginleri en az 13 renk fenotipinden oluşan, dikkat çekici ve çarpıcı bir renk polimorfizmine sahip, bol ve yaygın bulunan bir türdür (Halkka ve Halkka, 1990).

Cercopidae, parlak renk ve desenleriyle karakterize edilir ve yakından ilişkili oldukları Aphrophoridae ile birlikte, ürettikleri çok miktarda koruyucu köpük nedeniyle, tükürük böceği ismiyle anılırlar (Carvalho ve Webb, 2005). Bu

familyanın türleri de ksilemden beslenirler ve besleyici pompanın dilatörlerini barındıran büyükçe bir postclypeusları vardır (Bartlett ve ark., 2018). Cercopidae Familyası dünyada 173 cins ve 1480 tür ile temsil edilir (Bartlett ve ark., 2018). Bunların dünyadaki dağılımı homojen olmaktan uzaktır. Öyle ki, Indomalayan'da (IND) 620 tür tanımlı iken, Neotropikal'de (NEO) 418, Holoarktik Bölge'de 101, Afrotropikal'de (AFR) 196, Okyanusya'da (OCE) 165 türle sınırlıdır. Bu sayı Australasia'da (AUS) sadece 22 dir. (Soulier-Perkins, 2019; Bartlett ve ark., 2018). Familya Ülkemizde ise 3 cins ve 7 türle temsil edilmektedir (Nast, 1972; Lodos ve Kalkandelen, 1981; 1988; Önder ve ark., 2011).

5.1 Türkiye'de bulunan Aphrophoridae türleri

***Aphrophora alni* (Fallen, 1805)**

Bu tür ülkemizde Adana (Seyhan, Belemedik), Afyon (Başmakçı Yaylası), Ankara (Beypazarı, Çubuk, Eymir Gölü), Artvin (Merkez ilçe, Fidanlık, Hopa, Kabaca), Aydın (Kuşadası), Balıkesir (Edremit, Kepsut, Manyas), Bitlis (Tatvan), Çanakkale (Gökçeada), Bolu (Akçakoca), Çorum, Diyarbakır (Çermik), Erzincan (Merkez ilçe, Çağlayan, Başköy. Refahiye), Erzurum (Merkez ilçe, Tufanç köyü), Giresun (Merkez ilçe, Keşap, Şebinkarahisar), İstanbul (Belgrad Ormanı, Polonezköy), İzmir (Bozdağ, Kozak, Yamanlar), Kayseri (Himmetdede, Pınarbaşı), Kırklareli (Merkez ilçe, Pınarhisar, Lüleburgaz), Konya (Çumra, Ereğli), Kütahya (Merkez ilçe, Domaniç), Mardin, Manisa (Soma), Muğla (Fethiye - Seki), Ordu (Ünye, Yılanlıkaya, Ünye, Kumru, Mesudiye, Perşembe), Rize (Ardeşen, Kaçkar Dağı, Pazar), Samsun (Kavak), Sinop, Tekirdağ (Barbaros), Trabzon (Merkez ilçe, Maçka), Yozgat (Çekerek)'de yayılış gösterir (Lodos ve Kalkandelen, 1981).

Konakçıları çok çeşitlidir. Bunlardan bazıları *Oryza* sp. (pirinç), *Pisum* sp. (bezelye), *Vitis* sp. (asma), *Corylus* sp. (fındık), *Cornus* sp. (kızılcık), *Rubus* sp. (böğürtlen), *Crataegus* sp. (alıç), *Amygdalus* sp. (badem), *Juglans* sp. (ceviz), *Prunus* sp. (erik), *Cerasus* (vişne), *Rosa* sp. (gül), *Cynodon* sp. (çim), *Mespilus* sp. (muşmula), *Fagus* sp. (kayın), *Urtica* sp. (ısırgan), *Verbascum* sp. (sığırkuyruğu) ve *Alnus* sp. (kızılağaç) Dlabola (1961)'dır. Nimfler *Trifolium* sp. (üçgül), *Hypericum* sp. (kantaron), *Erigeron* sp. (şifaotu), *Hieracium* sp. (şahinotu), *Taraxacum* sp. (karahindiba) ve orman ağaçları ile çalılıklardır (Lodos ve Kalkandelen, 1981).

Aphrophora corticea Germar, 1821

Bu tür Afyonkarahisar, Ankara, Antalya, Aydın, Bilecik, Çanakkale, Isparta, Kütahya, Muğla, Tokat'ta yayılış gösterir (Lodos ve Kalkandelen, 1981; Demir, 2008; Önder vd., 2011).

Tarım alanlarında ve ormanlık alanlarda görülür, bolluğu nadirdir (Lodos ve Kalkandelen, 1981; Önder vd., 2011).

Aphrophora exoleta Horvath, 1901

Türkiye'den bilinmekle birlikte kesin lokalite kaydı verilmemiştir (Lodos ve Kalkandelen, 1981; Önder vd., 2011).

Aphrophora geruzei Tanyeri ve Zeybekoğlu, 2021

Bu tür ülkemizden son yıllarda tanımlanmış olup Kastamonu ve Sinop'ta yayılış gösterir ve *Pinus* sp. (çam)'dan toplanmıştır (Tanyeri ve Zeybekoğlu, 2021).

Aphrophora salicina (Goeze, 1778)

Bu tür Ankara, Balıkesir, Çanakkale, Giresun, Gümüşhane, Kırklareli, Kütahya'dan bilinir (Lodos ve Kalkandelen, 1981; Demir, 2007; Önder vd., 2011).

Ormanlık, makilik ve çayırlık alanlarda, özellikle *Salix* sp. (söğüt)'de bulunur (Lodos ve Kalkandelen, 1981; Demir, 2007; Önder vd., 2011).

Lepyronia coleoptrata Linnaeus, 1758

Bu tür Adana, Kahramanmaraş (Dlabola, 1957), Afyon, Ankara, Antalya, Artvin, Aydın, Çanakkale, Çankırı, Çorum, Diyarbakır, Edirne, Erzincan, Gümüşhane, İzmir, Kütahya, Kars, Mardin, Muğla, Muş, Sakarya, Siirt, Tokat illerinde yayılış göstermektedir (Lodos ve Kalkandelen, 1981; Demir, 2008).

Çayırlık alanlar, meralar, tarım alanları, ormanlık ve makilikte bulunur. Konukçuları arasında *Medicago sativa* (yonca), *Populus tremula* (kavak), *Salix alba* (söğüt), *Rubus sp.* (böğürtlen), *Juglans regia* (ceviz) ile *Acarus calamus* (saz otu), *Galium aparine* (yoğurt otu), *Cirsium arvense* (köygöçüren), kuzukulağı ve *Lepidium draba* yer almaktadır.

Mesoptyelus impictifrons (Horvath, 1911)

Türkiye'deki yayılışı Antalya (Alanya, Gazipaşa) (Demir, 2008); Hatay (Yayladağı) (Linnavuori, 1965); İçel (Anamur, Aydıncık, Ovacık) (Demir, 2008) Kahramanmaraş, Kayseri olarak gözlenmiştir (Önder ve ark., 2011).

Mesoptyelus petrovi (Grigoriev, 1910)

Bu tür Artvin ve Trabzon'dan bilinir (Lodos ve Kalkandelen, 1981; Önder vd., 2011).

Neophilaenus albipennis (Fabricius, 1798)

Ankara ve Kırklareli'den orman açıklıkları, çayırlık alandan bilinir (Demir, 2007; Önder vd., 2011).

Neophilaenus campestris (Fallen, 1805)

Neophilaenus campestris'in Türkiye'deki Yayılışı Adana (Pozantı), Adıyaman (Nemrut), Afyon (Gazlıgöl), Ankara (Çubuk Baraj), (Lodos ve Kalkandelen, 1981); Ankara (Kızılcahamam (Soğuksu)) (Demir, 2006b); Ankara (Kalecik (İdrisdağı), Kızılcahamam (Soğuksu), Sincan Mülk) (Demir, 2007b); Antalya (Alanya (Keşefli, Okurcalar), Gazipaşa (Çalıpınar-Kahyalar, Çalıpınar), Gündoğmuş (Çiçekoluk, Güneycik), Manavgat (Merkez-Çeltikçi, Bucakşeyhler, Seleukeia, Belenobası, Demirciler, Yukarıışıklar-Tilkiler, Tilkiler, Yaylaalan)) (Demir, 2008). Artvin (Murgul, Seyitler), (Lodos ve Kalkandelen, 1981); Balıkesir (Kazdağı Milli Parkı (Demir, 2006a); Bitlis, Bursa (Mudanya, Uludağ, Zeytinbağı), Çanakkale (Gökçeada, İntepe, Küçükkuyu), Elazığ (Özgen ve ark., 2019), Eskişehir (Seyitgazi), Giresun, İstanbul (Polonezköy), Hatay (Yayladağı, Belen), İzmir (Bergama, Bornova, Çeşme, Ilıca, Menemen, Torbalı, Sabuncubeli), Kırklareli (Vize), Kütahya (Merkez ilçe, Tavşanlı), Manisa (Gölmarmara, Gördes, Kula), Muğla (Merkez ilçe, Bodrum, Fethiye-Seki), Nevşehir (Merkez ilçe - Bağcılık İst.), Samsun (Havza), Sinop (Boyabat), Siirt, Trabzon (Merkez ilçe, Akçaabat, Arsin) ve Van(Tendürek Dağı) olarak gözlenmiştir (Lodos ve Kalkandelen, 1981).

Çoğunlukla, *Juncus* sp. (kofa), *Triticum* sp. (buğday) ve çeşitli yabani otlarda, bazıları *Rhododendron* sp. (orman gülü), *Quercus* sp. (meşe), *Ulmus* sp. (karaağaç), *Pinus* sp. (çam), *Abies* sp. (köknar), *Pyrus* sp. (armut), *Corylus* sp. (fındık), *Zea* sp. (mısır) ve *Medicago* sp. (yonca) türlerinde bol bulunmaktadır. Dlabola (1961), güneşli, kuru çayırlarda yaşadığını, Akdeniz Bölgesi'nde çok yaygın, diğer bölgelerde ise bulunduğunu bildirmiştir (Lodos ve Kalkandelen, 1981). Tarım alanı, ormanlık, makilik ve çayırlık alanda yaşamaktadır (Önder ve ark., 2011).

Neophilaenus lineatus (Linnaeus, 1758)

Bu tür ülkemizde Bursa (Kaya ve Kovancı, 2004), İstanbul ve Ankara (Dlabola, 1957) ile Erzincan, İzmir, Nevşehir, Afyon (Lodos ve Kalkandelen, 1981) ve Van (Koçak ve Kemal, 2012) illerinde yayılış göstermektedir.

Bazı yabancı otlar, odunsu bitkiler ve mera alanları konukçuları arasında yer almaktadır (Biedermann, 2003). Poaceae familyasına ait Arrhennatherum elatius bitkisi de önemli konukçuları arasında yer almaktadır (Badmin, 1996). Bu türün konukçularına özelleşmiş olduğu bildirilmiştir.

Neophilaenus minor (Kirschbaum, 1868)

Adana, Ankara, Antalya, Balıkesir, Konya, Manisa Çayırlık, orman açıklıklarından toplanmıştır (Demir, 2008; Önder vd., 2011).

Paraphilaenus notatus (Mulsant & Rey, 1855)

Bu tür Türkiye'de Elazığ ve Van'dan bilinmektedir (Önder vd, 2011; Özgen vd., 2018).

Philaenus signatus Melichar, 1896

Adana, Antalya, Hatay, İzmir, Mersin (Lodos ve Kalkandelen, 1981; Demir, 2008).

Philaenus spumarius (Linnaeus, 1758)

Yüksek derecede polifag olması *P. Spumarius*' un pek çok farklı habitatlarda yaşayabilmesine olanak sağlamıştır (Halkka & Halkka 1990; Stewart & Lees 1996; Yurtsever 2000a).

P. spumarius' un beslendiği yüzlerce bitki Kuzey Amerika (Weaver & King 1954; Lavigne 1959), Yeni Zelanda (Archibald & Cox 1979), Hawaii (Davis & Mitchell 1946) ve Avrupa „da (Halkka et al. 1967; Yurtsever 1999) kaydedilmiştir. Bu bitkiler otsulardan ağaçlara kadar geniş bir aralıkta bulunan bitkilerdir. Ekinler, otlar, bahçe bitkileri, çalılar, devedikenleri örnek olarak verilebilir (Halkka et al. 1967; Booth 1993).

Nimfler ve erginler bitkinin toprak üstünde kalan hemen her kısmından beslenebilirler; ama özellikle bitkinin 10 yaprak, çiçek ve meyve gibi büyüyen kısımlarını tercih ederler (Mundinger 1946; Wiegert 1964).

P. spumarius' un delici-emici ağız yapılarıyla bitkilerin yaprak, dal ve gövdelerinden özsu emmek suretiyle bitkilere zarar verdiği bildirilmiştir. Özsu emilmesi sırasında, bitkide hastalık oluşturan virüs, mikoplazma ve riketsiyaların vektörlüğünü yaparak bunları sağlıklı bitkilere taşıdığı belirtilmektedir. Özellikle Pierce asma virüsü hastalığı, cüce yonca ve şeftali sarısı hastalıklarının bu böceklerle taşındığı belirtilmektedir (Weaver & King 1954).

Xylella fastidiosa'nın Güney Avrupa'ya girişiyle birlikte *P. spumarius*, söz konusu bakteriyi taşıma yeteneği ve Avrupa kıtasındaki yaygın dağılımı nedeniyle tarım için önemli bir tehdit haline gelmiştir. Bu bakteri Avrupa'da İtalya, İspanya, Fransa ve Portekiz'de görülmekte olup *P.spumarius* başlıca vektörüdür. Bu hastalık, bölgedeki zeytinlikleri ciddi ekonomik, ekolojik ve sosyal sonuçlarla hızla tahrip etmektedir (Formisano vd., 2022).

Poophilus costalis (Walker, 1851)

Bu tür Türkiye'de Mardin'den bilinmekte olup sinonimi olan *Poophilus nebulosus* Lethierry, 1876 ismiyle kullanılmıştır (Lodos ve Kalkandelen, 1988).

5.2 Türkiye'de görülen Cercopidae türleri

Cercopis distincta (Melichar, 1896)

Lodos ve Kalkandelen (1981)'e göre bu tür Türkiye'den bilinmekte olup lokalite kaydı belirtmemiştir. Son yıllardaki çalışmalara göre Hatay'dan bilinmektedir (Demirel ve Dinç, 2021).

Cercopis intermedia Kirschbaum, 1868

Ülkemizin hemen hemen her yerinde yaygın olarak bulunan *C. intermedia* 'nın Avrupa, Kuzey Afrika, Iran, Israil, Suriye, Bağımsız Devletler Topluluğu ülkelerinde 19 yayılmış olduğu bildirilmektedir (Lodos ve Kalkandelen, 1981).

C. intermedia 'nın yonca, bazı yabancı otlar, erik, akasya, söğüt ve antep fıstığı ağaçlarından toplandığı kaydedilmektedir (Lodos ve Kalkandelen, 1981).

Cercopis sanguinolenta (Scopoli, 1763)

Ülkemizde pek ender görüldüğü bildirilen *C. sanguinolenta'*nın Güney ve Orta Avrupa'da yayıldığı, ergin ve nimflerinin çeşitli bitkilerde görülmesine rağmen ekonomik düzeyde zarar yaptığına dair bir kayıt bulunmamaktadır (Lodos 1986).

Cercopidae türlerinin kültür bitkilerinde genellikle zararsız olduğu belirtilmiş ise de (Hamilton 1982), bunların bitkilerde meydana getirdikleri zarar ile ilgili yeterli kayıt bulunmamaktadır. Cercopidlerin genel olarak kurak iklim koşullarında zararının daha çok arttığı tespit edilmiştir (Lodos 1986). Ayrıca nimflerin beslenirken salgıladıkları toksik maddeler nedeniyle bitkilerde şekil bozuklukları meydana gelmekte ve ekonomik zarar daha çok artmaktadır (Weaver and King 1954; Hamilton 1982)

Cercopis septemmaculata (Melichar, 1903)

Bu tür Türkiye'de Adana, Hatay, İzmir, Kastamonu, Mardin, Siirt'den bilinmektedir (Lodos ve Kalkandelen, 1988; Demirel ve Dinç, 2021).

Cercopis vulnerata Rossi, 1807

Ülkemizde bu tür, Bursa (Kovancı vd., 2004), Bartın (Kaygin vd., 2008), Orta Anadolu (Altınayar, 1981), Marmara Bölgesi'nin Batı kesimleri (Lodos, 1986), Konya (Altınayar, 1981), Eskişehir (Altınayar, 1981), Kocaeli ve Sakarya (Lodos ve Kalkandelen, 1981)'da yayılış göstermektedir.

Konukçuları ise *Beta vulgaris* (Şeker pancarı), *Fragaria vesca* (çilek), *Pyrus communis* (armut), *Malus domestica* (elma), *Medicago sativa* (yonca), *Ribes rubrum* (frenk üzümü), *Prunus avium* (kiraz), *Prunus domestica* (erik), *Corylus avellana* (fındık), *Rubus caesius* (böğürtlen), *Humulus lupulus* (şerbetçiotu), *Salix alba* (söğüt) ve bazı yabancı otlar konukçuları arasındadır (Hill, 1987).

Haematoloma dorsatum (Ahrens, 1812)

Bu tür Türkiye'de Adana, Hatay, İzmir, Kastamonu, Mardin, Siirt'den bilinmektedir (Lodos ve Kalkandelen, 1981).

Çeşitli otlardan, Fabaceae türlerinden, meşe, erik, kavak, alıç, yabani güllerden toplanmıştır (Lodos ve Kalkandelen, 1981).

Triecphorella geniculata (Horvath, 1881)

Bu tür Türkiye'de Adana, Antalya, Kahramanmaraş, Konya, Samsun'dan bilinmektedir (Lodos ve Kalkandelen, 1981; Demir, 2008).

6. Sonuç ve Öneriler

Bu derleme çalışmasında Anadolu'da yayılış gösteren köpük böceklerinin sistematik yapıları, biyolojik özellikleri, ekonomik önemleri ve vektörlük potansiyelleri değerlendirilmiştir. İncelenen literatürler, Türkiye'de bulunan köpük böceği türlerinin oldukça geniş bir konukçu bitki spektrumuna sahip olduğunu ve tarımsal ekosistemlerde önemli roller üstlendiğini ortaya koymaktadır. Özellikle *Philaenus spumarius, Neophilaenus campestris ve Aphrophora alni* gibi türlerin hem doğal alanlarda hem de tarımsal üretim alanlarında yaygın olarak bulunduğu belirlenmiştir. Bu türlerin ksilem özsuyu ile beslenmeleri nedeniyle bitkilerde fizyolojik zayıflamaya neden oldukları, ayrıca bazı bitki hastalıklarının taşınmasında potansiyel vektör görevi üstlendikleri anlaşılmaktadır.

Köpük böceklerinin oluşturduğu köpük salgısının nimflerin hayatta kalmasında önemli bir koruyucu mekanizma olduğu ve bu yapının biyokimyasal içeriğinin henüz tam olarak açıklanamadığı görülmektedir. Bunun yanında Türkiye'de köpük böcekleri üzerine yapılan çalışmaların çoğunlukla faunistik kayıtlar ile sınırlı kaldığı, türlerin ekolojik ilişkileri, popülasyon dinamikleri ve vektörlük kapasiteleri üzerine yeterli araştırmanın bulunmadığı dikkati çekmektedir. Özellikle son yıllarda dünyada büyük ekonomik kayıplara neden olan *Xylella fastidiosa* gibi patojenlerin yayılış riskleri dikkate alındığında, Türkiye'deki köpük böceklerinin vektörlük durumlarının detaylı biçimde araştırılması büyük önem taşımaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda türlerin moleküler yöntemlerle teşhis edilmesi, konukçu tercihleri ile mevsimsel popülasyon değişimlerinin belirlenmesi ve tarımsal alanlardaki ekonomik zarar düzeylerinin ortaya konması önerilmektedir. Ayrıca sürdürülebilir tarım uygulamaları kapsamında biyolojik mücadele yöntemlerinin geliştirilmesi ve düzenli sürvey çalışmalarının yapılması, olası salgınların ve patojen taşınımının önlenmesi açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynakça

Altınayar, G., 1981. Orta Anadolu Bölgesi tahıl tarlalarındaki böcek faunasının saptanması üzerine çalışmalar. Bitki koruma bülteni, 21(2): 53-88.

Archibald, R. D. & Cox, J. M. 1979. New records of plant pests in New Zealand. NZ. J. Agrig. Res., 22: 201-207

Badmin, J.S., 1996. The biology of the grassland froghopper Neophilaenus campestris at Dungeness. D.B.O. Report, 84-87

Biedermann, R., 2003. Aggregation and survival of Neophilaenus albipennis (Hemiptera: Cercopidae) spittlebug nymphs. European Journal of Entomology, 100, 493-499.

Booth, W. J. 1993. Aspects of host plant relations in Cercopidae (Homoptera: Auchenorrhyncha). Ph. D. Dissertation, University of Wales, Cardiff.

Borror, D. J., Triplehorn, C. A. & Johnson N. F. 1989. An ıtroduction to the study of Insects. Saunders College Publishing, Philadelphia.

Brambila, J. ve Greg S. Hodges, G. S., 2008. Bugs (Hemiptera). (J. L. Capinera, Editör). In: Encyclopedia of Entomology. 2nd. Springer, 591-605, Florida

Carvalho, C., ve Webb, M., 2005. Cercopid Spittle Bugs Og The New World (Hemiptera Auchenorrhyncha, Cercopidae). Pensoft Series Faunistica (49), Sofia-Moskova.

Davis, C.J. & Mitchell, A.L. 1946. Host records of Philaenus spumarius (L.) at Kilauea, Hawaii National Park (Homoptera, Cercopidae). Proc. Haw. Ent. Soc., 12: 515-516.

Demir E., 2007b. Auchenorrhyncha (Homoptera) Data from Ankara with Two New Records to Turkey. Munis Entomology & Zoology, 2: 481-492.

Demir, E. 2006a. Preliminary Report on the Auchenorrhyncha (Hemiptera) Fauna of Kazdağı National Park with Two New Records for Turkey. Acta Entomologica Slovenica, 14 (1): 89-102.

Demir, E. 2006b. Contributions to the Knowledge of Turkish Auchenorrhyncha (Homoptera) with a New Record, Pentastiridius nanus (Ivanoff, 1885). Munis Entomology& Zoology, 1 (1): 97-122

Demir, E., 2008. The Fulgoromorpha and Cicadomorpha of Turkey. Part I: Mediterranean Region (Hemiptera). Munis Entomology & Zoology, 3: 447-522.

Demirel, E., Dinç, H. 2021. *Cercopis sanguinolenta* (Scopoli, 1763) (Hemiptera: Auchenorrhyncha: Cercopidae) dilemma and redescription of rare *Cercopis* Fabricius, 1775 species from Turkey. Türkiye entomoloji dergisi, 45(1): 99-114.

Dlabola, J., 1957. Results of the Zoological Expedition of the National Museum in Pragae to Turkey. 20 Homoptera Auehenorrhyncha. Acta Entomologica Musei Nationalis Pragae, 31(469), 19-68.

Formisano, G., Iodice, L., Cascone, P., Sacco, A., Quarto, R., Cavalieri, V., Bosco, D., Guerrieri, E. ve Giorgini, M. (2022). Wolbachia infection and genetic diversity of Italian populations of Philaenus spumarius, the main vector of Xylella fastidiosa in Europe. PLoS ONE, 17(8), e0272028.

Halkka, O., Raatikainen, M., Vasarainen, A., Heinonen, L. 1967. Ecology and ecological genetics of Philaenus spumarius (L.) Homoptera. Ann. Zool. Fenn., 4: 1-18.

Hamilton AKG., 1982. The Insects and Arachnids of Canada Part 10, The Spittlebuqs of Canada. Biosystematics Research Institute Ottawa, Ontario, Publication 1740.

Hill, D., 1987. Agricultural insect pests of temperate regions their control. Cambridge University Press, 667s, London.

Hodkinson, J. & Casson, D. 1991. A lesser predilection for bugs: Hemiptera (Insecta) diversity in tropical rain forests. Biol. J. Linn. Soc., 43: 101-109.

Holzinger, W. E., Kammerlander, I. and Nickel, H. 2003. The Auchenorrhyncha of Central Europe. Fulgoromorpha, Cicadomorpha excl. Cicadellidae. (Volume:1) Koninklijke Brill NV, 673.

Kaya, M., Kovancı, B., 2004. Bursa'da Abududu Alanlarında Saptanan Homoptera Türleri. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 35(1-2), 1-4.

Kaygin, A.T., Sönmezyildiz, H., Ülgentürk, S., Özdemir, I., 2008. Insect Species Damage on Ornamental Plants and Saplings of Bartin Province and Its Vicinity in the Western Black Sea Region of Turkey. International Journal of Molecular Sciences, 9(4), 526-541.

Koçak, A.Ö., Kemal, M., 2012. List of two thousand species of pterygot insects in Van Province (East Turkey). Cesa News 81, 2-86

Kovancı, O.B., Gençer, N.S., Kovancı, B., Akgül, H.C., 2004. Bursa İli Çilek Alanların

Lavigne, R. 1959. Biology of Philaenus leucophthalmus (L.), in Massachusetts. J. Econ. Ent., 52: 904-907.

Lodos N., 1986. Türkiye Entomolojisi II. Genel Uygulamalı ve Faunistik. Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir.

Lodos, N. and Kalkandelen, A., 1981, Preliminary list of Auchenorrhyncha with notes on distribution and importance of species in Turkey, VII. Family Cicadellidae : Ulopinae, Megopthalminae, Ledrinae, Macropsinae and Agallinae. Türk. Bit.Kor. Derg., 5 (4), 215-230.

Lodos, N. and Kalkandelen, A. 1988. Preliminary list of Auchenorrhyncha with notes on distribution and importance of Turkey XXVII. (Addenda and Corrigenda). Türkiye Entomoloji Dergisi 12(1): 11-22.

Mozaffarian, F. and Wilson, M. R., 2015. The aphrophorid spittlebugs of Iran (Hemiptera: Cercopoidea: Aphrophoridae). Zootaxa 4052 (4):442- 456.

Mundinger, F. G. 1946. The control of spittle insects in strawberry plantings. J. Econ. Ent., 39: 299-305.

Önder, F., Tezcan, S., Karsavuran, Y., Zeybekoğlu, Ü., 2011.Türkiye Cicadomorpha, Fulgoromorpha ve Sternorrhyncha (Insecta: Hemiptera) Kataloğu. Meta Basım, 168 s, İzmir.

Özgen, İ., Topdemir, A. ve Mozaffarian, F., 2018 Additional Notes on the Some Aphrophorid Spittlebugs of Eastern Anatolia (Hemiptera: Cercopoidea: Aphrophoridae). International Journal of Innovative Engineering Applications. 2(2): 60-61.

Paladini, A., Domahovski, A. C., Krinski, D. and Foerster, L.A. 2018. Reports of new wing color polymorphism and taxonomic information to Cercopids (Auchenorrhyncha: Cercopidae) from upland rice crop, Pará State, Brazil. Brazilian Journal of Biology, 78:4, 728-735.

Raven, J. A. 1983. Phytophages of xylem and phloem: a comparison of animal and plant sap-feeders. Adv. Ecol. Res. 13: 136-234.

anyeri, R., Zeybekoğlu, Ü. 2021. A New Species of the Genus *Aphrophora* Germar (Hemiptera: Auchenorrhyncha: Aphrophoridae) From Turkey. Entomological News, 130(1): 70-78.

Thompson, W. M. O., 2011. Introduction: Whiteflies, Geminiviruses and Recent Events, pp. 1–13. (W. M. O. Thompson), The Whitefly, Bemisia tabaci (Homoptera: Aleyrodidae) Interaction with Geminivirus-infected Host Plants. Springer, Berlin, Germany.

Weaver, C. R. & King, D. R. 1954. Meadow spittlebug Philaenus leucophtalmus (L.). Ohio. Agric. Exp. Stn. Res. Bull. 741: 1-99.

Whittaker, J. B. 1970. Cercopid spittle as a microhabitat. Oikos., 21: 59-64.

Wiegert, R. G. 1964. Population energetics of meadow spittlebugs (Philaenus spumarius L.) as affected by migration and habitat. Ecol. Monogr., 34: 217-241.

Yurtsever, S. 1999. Inheritance of three dorsal colour/pattern morphs some Turkish Philaenus spumarius (Homoptera: Cercopidae) populations. Isr. J. Zool.,, 45: 361-369. Yurtsever, S. 2000a. On the polymorphic meadow spittlebug, Philaenus spumarius (Homoptera: Cercopidae). Turk. J. Zool., 24: 447-459.

BÖLÜM 13

Glifosat İzopropilamin Tuzunun Ergin Zebra Balığı (*Danio rerio*) Üzerindeki Akut Davranışsal ve Morfolojik Yanıtlar Üzerine Etkisi

Özge Zencir Tanır[1]
Nalan Yıldırım Doğan[2]

[1] Doç. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, ORCID: 0000-0002-2111-7019
[2] Prof. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, ORCID: 0000-0002-5344-5367

1. GİRİŞ

Pestisitler, modern tarımda verimliliği artırmak amacıyla yaygın şekilde kullanılmakta olup, çevresel kalıcılıkları ve toksik özellikleri nedeniyle ekosistem üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Özellikle herbisitler ve insektisitlerin yüzey sularına taşınması, sucul organizmalarda gelişim bozuklukları, oksidatif stres ve davranış değişiklikleriyle ilişkilendirilmiştir. Örneğin glifosat, sucul ortamlarda mikrobiyal dengeyi bozmakta, fosfor metabolizmasını etkilemekte ve uzun süreli maruziyetlerde balık türlerinde nörotoksik yanıtları artırmaktadır (Vaudin et al., 2023; Gomes et al., 2022).Ayrıca düşük dozlarda dahi endokrin bozucu etkileri olan pestisitlerin üreme sağlığı üzerinde uzun dönemli etkileri olduğu belirtilmiştir (Ramos et al., 2020). Bu bulgular, pestisit maruziyetinin yalnızca akut toksisite ile değil, kronik ve düşük doz etkileriyle de değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Dopaminerjik nöron hasarının oluşturulması amacıyla çeşitli kimyasal nörotoksinlerin kullanıldığı çalışmalarda, MPTP'nin lipofilik yapısı sayesinde kan-beyin bariyerini geçerek dopaminerjik nöron kaybını indüklediği ve başarılı bir PH modeli oluşturduğu gösterilmiştir. Bunun yanında pestisit sınıfındaki parakuat ve rotenon maruziyetlerinin dopaminerjik dejenerasyon ve Parkinson patogenezi ile ilişkili olduğu bildirilmiştir. Katekolamin yapısı nedeniyle dopamin taşıyıcılarına yüksek afinite gösteren 6-hidroksidopamin (6-OHDA) ise oksidatif stres ve inflamasyon yolaklarını aktive ederek nöronal hasara neden olmaktadır.

Bu kimyasal ajanların zebra balıkları ve larvalarında benzer şekilde dopaminerjik hücre kaybı oluşturduğu, motor fonksiyon bozukluklarıyla birlikte belirgin nörotoksik etkiler sergilediği literatürde vurgulanmaktadır. Bu bulgular, zebra balığının dopaminerjik sistem bozukluklarının modellenmesi ve terapötik adayların taranması için güvenilir ve translasyonel değeri yüksek bir organizma olduğunu göstermektedir. (Alturfan, 2023)

Herbisitler, tarımsal üretimde yabancı ot kontrolünü sağlamak için kullanılan kimyasal maddeler olup bitkilerde fotosentez, aminoasit sentezi, hücre bölünmesi ve lipid metabolizması gibi temel süreçleri hedef alır. Türkiye'de yaygın kullanılan herbisit grupları arasında glifosat, asetolaktat sentaz (ALS) inhibitörleri ve fenoksi asit türevleri bulunmaktadır. Glifosat, şikimat yolunu inhibe ederek aromatik aminoasit sentezini durdurur ve geniş spektrumlu etki gösterir (TÜBİTAK MAM, 2018). Ancak yoğun glifosat kullanımı toprak mikrobiyal çeşitliliğinde azalma, ağır metal mobilizasyonunda artış ve bazı sucul türlerde toksik yanıtlar oluşturabilir (Güneş & Kara, 2021). ALS inhibitörü herbisitler ise özellikle dar yapraklı yabancı otlarda etkili olmakla birlikte, sürekli ve kontrolsüz kullanım hızlı direnç gelişimine yol açabilir (Önen & Işık, 2014).

Herbisitlerin ekosistem üzerindeki etkileri yalnızca hedef dışı bitkilerle sınırlı olmayıp, toprak solucanları, arılar, planktonik canlılar ve mikroorganizmalar

üzerinde de fizyolojik stres oluşturabilmektedir. Türkiye'de yapılan çalışmalar, yanlış doz ve zamanlamanın biyoçeşitlilik kaybını artırdığını ve sucul çevrelerde birikime yol açabildiğini göstermiştir (Çetin & Uzun, 2019). Bu nedenle herbisit kullanımında entegre yabancı ot yönetimi, ürün rotasyonu ve biyolojik alternatiflerin uygulanması ekolojik riskleri azaltmak açısından kritik öneme sahiptir.

Glifosat, bitkilerde aromatik amino asitlerin sentezinden sorumlu şikimat yolunu hedefleyen geniş spektrumlu bir herbisittir ve EPSPS enziminin inhibisyonu yoluyla tirozin, triptofan ve fenilalanin üretimini engeller .Ancak glifosfatın toksik etkileri yalnızca bitkilerle sınırlı değildir; in vitro ve in vivo çalışmalar, glifosfatın oksidatif stres, mitokondriyal disfonksiyon ve hücre ölüm mekanizmalarını tetikleyebileceğini göstermiştir (Cattani, Martinez, Heinz, & Garcia, 2019; Makame et al., 2023). Formülasyonlarda bulunan yardımcı bileşenler (ko-formülantlar), toksisitenin şiddetini artırarak hayvan ve hücre modellerinde daha belirgin etkiler yaratabilmektedir (Makame et al., 2023).

Zebra balığı (*Danio rerio*), şeffaf embriyoları, hızlı gelişimi, genetik homolojisi ve laboratuvar koşullarına uyum sağlayabilen ekolojik özellikleri nedeniyle toksikoloji ve biyomedikal araştırmalarda yaygın olarak kullanılan bir model organizmadır (Yipel & İlhan, 2021). Dış döllenme ve yüksek üreme kapasitesi, embriyoların doğrudan gözlemlenmesine olanak tanır; optik şeffaflık sayesinde kardiyovasküler sistem, viseral organlar, sinir sistemi ve somitogenez gibi süreçler in vivo incelenebilir (Kimmel et al., 1995; López-Olmeda & Sánchez-Vázquez, 2011). Genomunun tamamen dizilenmiş olması ve insan genleriyle yüksek homoloji göstermesi, çevresel stres faktörlerinin moleküler ve genetik etkilerini araştırmada zebra balığını değerli bir model hâline getirir (Howe et al., 2013). Ekolojik olarak D. rerio, Güney Asya'nın yavaş akışlı ve durgun sularında yaşayan bir tatlı su türü olup, sıcaklık, oksijen seviyesi ve su kimyasında değişikliklere karşı yüksek tolerans gösterir; bu özellikler laboratuvar koşullarına adaptasyonu kolaylaştırır ve yıl boyunca sürdürülebilir üreme kapasitesi sağlar (Spence et al., 2008).

Zebra balığı üzerine yapılan deneyler, glifosfatın embriyonik gelişim, sinir sistemi ve kardiyovasküler fonksiyonlar üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak ortaya koymaktadır.

Gaur ve ark. (2016), Kardiyovasküler etkiler açısından zebra balığı gastrula evresinden itibaren 50 µg/ml glifosfat ile muamele etmiş ve 48 saat sonra atriyum ve ventrikülde yapısal bozukluklar, kalp sarmalında düzensizlik, situs inversus benzeri konfigürasyonlar ve kalp atım sayısında düşme tespit etmişlerdir. Ayrıca, mef2ca gen ekspresyonundaki bozulma, glifosfatın erken kalp hücresi farklılaşmasını olumsuz etkileyebileceğini göstermiştir.

Öztürk (2019), sulfonilüre herbisiti olan tribenuron metilin zebra balığı (*Danio rerio*) embriyoları üzerindeki olası teratojenik etkileri üzerine yaptığı çalışmada farklı konsantrasyonlarda (1,8; 0,9; 0,4; 0,2 ve 0,1 mg/L) uygulanan tribenuron metilin, gelişmekte olan embriyo ve larvalarda çeşitli morfolojik bozukluklara yol açtığı gözlemlemiş ve teratolojik etkilerin 5 günlük izleme periyodu boyunca devam ettiği ve doz artırımıyla birlikte deformasyon şiddetinin arttığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, tribenuron metilin zebra balığı embriyo hücrelerinde belirgin toksik etki oluşturduğunu ve erken gelişim basamaklarında yapısal anormalliklere neden olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, herbisit maruziyetinin sucul organizmalar üzerindeki gelişimsel risklerini destekleyen literatürle uyumlu olup ekotoksikolojik açıdan önem taşımaktadır.

Çetin ve Uzun (2019) etilen bisditiyokarbamat (EBDC) grubu bir fungisit olan mancozebin zebra balığı (*Danio rerio*) üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılan çalışmada, özellikle ovaryum dokusunda meydana gelen histopatolojik değişiklikler incelenmiştir.Zebra balıkları 5 ppm ve 7,5 ppm mancozeb dozlarına maruz bırakılmış; ışık mikroskobunda yapılan histolojik analizlerde kontrol grubunun normal ovaryum yapısına sahip olduğu, ancak deney gruplarında gelişmiş oosit sayılarında azalma ve oositlerde belirgin deformasyonların oluştuğu belirlenmiştir.Bu sonuçlar, mancozebin üreme dokuları üzerinde toksik ve olumsuz etkiler gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

Verep, B., & Yıldırım, H. (2020) önceki araştırmalar, glifosatın balıklar üzerinde genellikle orta düzeyde akut toksisite gösterdiğini ve LC_{50} değerlerinin mg/L aralığında yer aldığını belirtmektedir. 2,4-D'nin, glifosata kıyasla daha toksik olduğu ve balıklarda daha düşük konsantrasyonlarda mortaliteye yol açtığı literatürde sıkça rapor edilmiştir. Asetoklor ise birçok çalışmada en yüksek akut toksisiteye sahip herbisit olarak tanımlanmakta ve düşük LC_{50} değerleri ile dikkat çekmektedir. Bu çalışmada elde edilen toksisite sıralaması (asetoklor > 2,4-D > glifosat), lepistes (Poecilia reticulata) için literatürde bildirilen genel eğilimle örtüşmektedir.

Güner, U. (2020) sentetik ve sistemik bir herbisit olan Cyhalofop-butyl, özellikle tahıl tarımında yabancı ot mücadelesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Trakya Bölgesi'nde yoğun biçimde kullanılan Chillinger 200 EC (Cyhalofop-butyl) formülasyonunun Gambusia holbrooki üzerinde gerçekleştirilen akut toksisite denemelerinde, statik test koşulları altında 96 saatlik LC_{50} değerinin 4,140 ppm olarak belirlenmesi, bu herbisitin balıklar için orta düzeyde toksik olduğunu göstermektedir. Literatürde benzer herbisitlerle yapılan çalışmalar da, Cyhalofop-butyl'in hedef dışı sucul organizmalar üzerinde letal etkilere yol açabildiğini ve tarımsal alanlardan su kaynaklarına taşınması

durumunda ekosistemler açısından potansiyel bir risk oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Duruel, H. E. E. (2022) , glufosinat-amonyumun zebra balığında (*Danio rerio*) oluşturabileceği subletal etkiler hem in vivo hem de in vitro düzeyde araştırılmıştır. In vivo deneylerde yetişkin balıklara 120 saat boyunca 50 ve 100 mg/L dozlar uygulanarak oksidatif stres ve biyokimyasal değişimler değerlendirilmiştir. In vitro deneylerde ise zebra balığı karaciğer hücre hattı (ZFL) 250, 500 ve 1000 mg/L dozlarına 96 saat maruz bırakılarak sitotoksik ve genotoksik etkiler çeşitli biyokimyasal testler (MTT, nötral kırmızısı, LDH, BrdU, tripan mavisi, mikronükleus vb.) ile analiz edilmiştir.Her iki deney sisteminde de kontrol grubuna kıyasla belirgin biyokimyasal ve hücresel değişimler gözlenmiş, glufosinat-amonyumun oksidatif stres mekanizmasını tetiklediği ve hücre/protein hasarına yol açtığı belirlenmiştir. Sonuçlar, herbisitin zebra balığı üzerinde hem doku hem hücre düzeyinde toksik etkiler oluşturabileceğini göstermektedir.

Liu ve ark. (2022), zebra balığı embriyolarını 120 saat boyunca farklı glifosfat konsantrasyonlarına (0,7; 7; 35 mg/L) maruz bırakmış ve erken yumurtadan çıkma, kalp atım hızında düşme, perikardiyal ve yumurta kesesi ödemi, yüzgeç eksikliği ve vücut uzunluğunda kısalma gibi gelişimsel bozuklukları gözlemlemiştir. Bu fenotipik etkiler, tiroid ve büyüme hormonu/insülin-benzeri büyüme faktörü (GH/IGF) eksenindeki değişikliklerle ilişkilendirilmiş ve oksidatif stres, endoplazmik retikulum (ER) stresi, inflamasyon ve apoptozla ilişkili gen ekspresyon değişimleriyle desteklenmiştir.

Smith ve ark. (2023), düşük çevresel düzeyde glifosfat maruziyetinin zebra balığı embriyolarında transkriptom düzeyinde değişikliklere yol açtığını göstermiştir. 0, 1, 100 ve 1000 µg/L konsantrasyonlarında 96 saat maruziyet sonucunda metabolik süreçler, sinir sistemi gelişimi, histon deasetilasyonu ve oosit olgunlaşmasıyla ilişkili 30 genin farklı ekspresyon gösterdiği raporlanmıştır. Bu bulgular, çevresel düzeyde glifosfatın embriyonik gelişim üzerinde moleküler düzeyde önemli etkiler yaratabileceğini ortaya koymaktadır.

Yapıcı (2023) sentetik bir progestin ve endokrin bozucu kimyasal olan levonorgestrelin (LNG) zebra balığında (*Danio rerio*) antioksidatif sistem üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla farklı doz ve sürelerde uygulamıştır. Düşük (0,312 µg/L) ve yüksek (6,24 µg/L) dozlara 24–96 saat maruz bırakılan balıklardan alınan kas ve karaciğer dokularında SOD, CAT, GPx ve MDA düzeyleri ölçülmüştür.Sonuçlar, enzim aktivitelerinin LNG maruziyetiyle değiştiğini ancak istatistiksel olarak büyük ölçüde anlamlı olmadığı göstermiştir. Yüksek doz uygulaması SOD ve GPx aktivitelerinde özellikle karaciğer dokusunda artışa neden olurken, CAT aktivitesi daha değişken bir seyir göstermiştir. MDA sonuçları, karaciğerin LNG'ye karşı kas dokusuna

göre daha duyarlı olduğunu ve oksidatif stres için önemli bir gösterge olduğunu ortaya koymuştur.

2024 yılında yayımlanan bir çalışmada yetişkin zebra balıklarının pestisit maruziyeti sonrasında davranış, solungaç histolojisi, DNA hasarı ve gen ekspresyonu düzeylerinde değişiklikler bildirilmiştir (Bianchi et al., 2024). Bu yılda ayrıca, Abe et al. (2024), saf glifosat ile ticari formülasyonu karşılaştırmış; her iki uygulamanın oksidatif stres ve motor performansı etkileyebildiğini, ticari formülasyonun ise gelişim, kolinerjik nörotransmisyon ve DNA hasarı bakımından daha belirgin etkiler gösterebildiğini bildirmiştir.

2025 yılında yayımlanan çalışmalar glifosatın nörogelişimsel etkilerini ve pH'ın toksisite testlerindeki önemini vurgulamıştır (Sridhar et al., 2025; Zhou et al., 2025). Klátyik et al. (2025), glifosat, formülasyonlar ve ko-formülantların toksikolojik açıdan birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. 2026 yılı verileri ise ergin zebra balıklarında davranış, AChE/CaE aktiviteleri, oksidatif stres ve lipid metabolizmasında değişiklikler bulunduğunu göstermektedir (Bejaoui et al., 2026). Zhang et al. (2026), meta-analiz ve tür duyarlılık dağılımı yaklaşımıyla glifosatın sucul toksisitesinin türler ve çevresel koşullar arasında değişebildiğini; pH, sıcaklık ve su sertliği gibi faktörlerin toksisiteyi etkileyebildiğini bildirmiştir.

Bu kapsamda glifosat izopropilamin tuzunun ergin zebra balıklarında oluşturduğu davranışsal değişiklikler ve morfolojik bozukluklar değerlendirilerek, glifosatın sucul organizmalar üzerindeki potansiyel risklerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Ayrıca elde edilen bulguların, glifosat kaynaklı sucul çevre kirliliğinin ekotoksikolojik etkilerinin anlaşılmasına ve çevresel risk değerlendirmelerine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Deney Hayvanı

Su toksikolojisi ve çevresel risk değerlendirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle, deney modeli olarak ergin zebra balığı (*Danio rerio*) kullanılmıştır. Görünür hastalık belirtisi veya morfolojik anormallik göstermeyen sağlıklı balıklar, Akdeniz Su Ürünleri Araştırma Üretme ve Eğitim Ensitüsü Müdürlüğünden cinsiyetleri karışık olan toplamda 50 adet temin edilmiş ve deneyden önce yedi gün boyunca laboratuvar koşullarına alıştırılmıştır. Deney öncesi balıkların ortalama ağırlığı 0.938±0.09 gr, ortalama boyu ise 4±0.3 cm olarak belirlendi (Şekil 1). Alıştırma sırasında balıklar kontrollü bir fotoperiyot (14 saat ışık: 10 saat karanlık) altında tutulmuş ve günde iki kez ticari zebra balığı yemi ile beslenmiştir. Metabolik değişkenliği en aza indirmek için maruz kalmanın başlamasından 24 saat önce yemleme durdurulmuştur.



Şekil 1. Ergin Zebra Balığı (*Danio rerio*) (photo: Zencir Tanır)

2.2 Deney Koşulları

Deneyler, kloru giderilmiş musluk suyu içeren cam akvaryumlarda yapılmıştır. Test suyu, kalıntı kloru gidermek için kullanımdan en az 24 saat önce belediye musluk suyu havalandırılarak hazırlanmıştır. Deney boyunca çözünmüş oksijen konsantrasyonlarını yaklaşık 8,0 ± 1,0 mg L^{-1}'de tutmak için hava taşları kullanılarak sürekli havalandırma sağlanmıştır. Su sıcaklığı, termostatik olarak kontrol edilen akvaryum ısıtıcıları kullanılarak 26-28°C arasında tutuldu. pH, 7,0 ile 7,5 arasında tutulurken, fotoperiyot koşulları, uluslararası kabul görmüş zebra balığı yetiştirme kılavuzlarına uygun olarak 14 saat ışık ve 10 saat karanlık olacak şekilde ayarlandı. Deneysel koşulların istikrarlı olmasını sağlamak için su kalitesi parametreleri günlük olarak izlendi.

Deneyler, kimyasal olarak inert malzemelerden üretilmiş standart akvaryumlar içinde 15 x 28 x 37 cm boyutlarındaki 1 kontrol grubu olmak üzere toplamda 4 adet akvaryumda yürütülmüştür .Deney sırasında su kalitesini sürekli izlemek için kullanılan ekipmanlar şunlardır: Oksijen Ölçümü (Oksijenmetre), deney suyunun oksijen seviyesi ölçülmüştür. Ölçülen oksijen değerleri, balıkların yaşamsal ihtiyaçlarını karşılamak adına su kalitesinin izlenmesine yardımcı olmuştur. pH Ölçümü (pH Metre), suyun asidite veya bazlık derecesi olan pH seviyeleri düzenli aralıklarla ölçülmüştür. Sıcaklık Takibi (Termometre), su sıcaklığı sürekli olarak ölçülmüş ve bu, balıkların konfor seviyelerini korumak ve deney koşullarını sabit tutmak adına önemli olmuştur. Kimyasal Konsantrasyon Belirleme (Hassas Terazi), deneyde kullanılan test çözeltilerindeki kimyasal konsantrasyonlar belirlenmiştir. Bu kapsamda hassas ölçüm yapan tartı kullanılmıştır. Bu ekipmanlar, deney sürecinin güvenilirliğini sağlamak ve sonuçları doğru bir şekilde değerlendirmek için kullanılmıştır. Deneyler, kimyasal olarak inert özellikteki standart akvaryumlarda, biri kontrol grubu olmak üzere toplam dört deney düzeneğinde yürütülmüştür. Deney öncesinde akvaryumlara filtre ve ayarlanabilir ısıtıcı sistemleri yerleştirilmiş, su sıcaklığı zebra balıklarının yaşam koşullarına uygun olacak şekilde 25 ± 1 °C'de sabitlenmiştir. Deney süresince su kalitesinin korunması ve deney koşullarının standartlaştırılması amacıyla filtre sistemleri sürekli çalıştırılmış, sıcaklık düzenli

olarak izlenmiştir. Ayrıca çözünmüş oksijen düzeyi, pH ve sıcaklık gibi temel su kalite parametreleri belirli aralıklarla ölçülerek kaydedilmiş, kullanılan kimyasal çözeltilerin hazırlanmasında hassas ölçüm ekipmanlarından yararlanılmıştır. Bu uygulamalar, deneysel koşulların güvenilirliğini artırmak ve çinko sülfatın zebra balıkları üzerindeki etkilerinin doğru şekilde değerlendirilmesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

2.3. Kimyasal Madde ve Maruziyet

Deneylerde kullanılacak olan test suyu, en az 24 saat süreyle dinlendirilmiş ve özel olarak havalandırılarak kloru giderilmiş şehir şebeke suyundan elde edilmiştir. Akvaryumların içine, hava taşı yardımıyla oksijen sağlanarak, suyun tüm akvaryumlarda ortalama 8.0±1 mg/L oksijen miktarına ulaşması sağlanmıştır. Bu özenli hazırlık, deney koşullarının balıkların doğal yaşam ortamlarına daha yakın olmasını ve sonuçların güvenilirliğini artırmayı amaçlamaktadır. sıcaklığı 26–28 °C'ye termostat ile sabitlenecektir.

Danio rerio ile gerçekleştirilen akut toksisite çalışmasında kullanılan kimyasal olan glifosat, güvenilir bir tedarikçi olan SigmaAldrich firmasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılacak glifosat hassas terazi kullanılarak akvaryumlar biri kontrol, diğerleri deney grubu 25 olmak üzere gruba ayrılır ve akvaryumlara yerleştirilir. Deney gruplarındaki zebra balıklarına 1 haftalık adaptasyon sürecinin ardından 0,2 mg/L, 0,5 mg/L ve 10 mg/L glifozat izopropilamin tuzu eklendi ve 96 saat (4 gün) boyunca muamele edilir

3. BULGULAR

3.1. Glifosat Maruziyetinin Zebra Balıklarında Davranışsal Etkileri

Danio rerio bireylerinin 96 saat boyunca 0,2 mg/L, 0,5 mg/L ve 10 mg/L glifosat izopropilamin tuzu konsantrasyonlarına maruz bırakılması sonucunda davranışsal parametrelerde dozla ilişkili değişiklikler gözlenmiştir. Kontrol grubunda bulunan balıklar deney süresince normal yüzme aktivitesi, sürü davranışı ve çevresel uyaranlara karşı düzenli refleksler sergilerken, glifosat uygulanan gruplarda çeşitli davranış bozuklukları ortaya çıkmıştır.

Özellikle 10 mg/L uygulama grubunda yüzme aktivitesinde belirgin azalma, dibe çökme eğilimi, düzensiz yüzme hareketleri ve zaman zaman denge kaybı gözlenmiştir. Ayrıca bazı bireylerde su yüzeyine sık yönelme ve hızlı operkulum hareketleri ile karakterize solunum güçlüğü belirtileri kaydedilmiştir. Düşük doz gruplarında (0,2 ve 0,5 mg/L) ise davranış değişikliklerinin daha hafif düzeyde olduğu, ancak kontrol grubuna kıyasla hareketlilikte azalma ve çevresel uyaranlara verilen tepkilerde yavaşlama meydana geldiği belirlenmiştir.

Gözlenen bu davranış değişiklikleri, glifosatın sinir sistemi üzerinde oluşturduğu nörotoksik etkilerle açıklanabilir. Literatürde glifosatın oksidatif

stres mekanizmalarını aktive ederek nöronal fonksiyonları bozabildiği ve nörotransmitter sistemlerini etkileyebildiği bildirilmektedir (Cattani et al., 2019; Makame et al., 2023). Ayrıca pestisit maruziyetinin dopaminerjik nöronlarda dejenerasyona yol açabileceği ve bunun sonucunda motor koordinasyon bozukluklarının ortaya çıkabileceği belirtilmiştir (Alturfan, 2023).

3.2. Glifosat Maruziyetinin Zebra Balıklarında Morfolojik Etkileri

Deney sonunda yapılan morfolojik değerlendirmelerde kontrol grubunda herhangi bir dış görünüş anomalisi gözlenmezken, glifosat uygulanan gruplarda doz artışına bağlı olarak çeşitli yapısal değişiklikler belirlenmiştir. Özellikle yüksek doz grubunda vücut renginde solgunlaşma, yüzgeçlerde deformasyon, yüzgeç bütünlüğünde bozulmalar ve bazı bireylerde hafif vücut eğrilikleri gözlenmiştir.

Morfolojik değişimlerin şiddetinin özellikle 10 mg/L konsantrasyonunda arttığı ve bireylerin genel kondisyonunda belirgin bir bozulmaya neden olduğu görülmüştür. Düşük konsantrasyonlarda ise daha çok renk değişimleri ve yüzgeç hareketlerinde zayıflama gibi hafif düzeyde etkiler tespit edilmiştir.

Elde edilen bulgular, zebra balıklarında glifosatın gelişimsel ve yapısal toksisite oluşturabileceğini gösteren önceki çalışmalarla uyumludur. Liu ve ark. (2022), glifosata maruz bırakılan zebra balığı embriyolarında perikardiyal ödem, yumurta kesesi ödemi, yüzgeç eksikliği ve vücut uzunluğunda kısalma gibi ciddi morfolojik bozukluklar bildirmiştir. Benzer şekilde Gaur ve ark. (2016), glifosat uygulamasının kalp gelişimini etkileyerek kardiyak yapıda deformasyonlara yol açtığını göstermiştir.

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Zebra balığında dopaminerjik sistem bozukluklarının, Parkinson hastalığı modellerinde kullanılan MPTP, rotenon ve paraquat gibi nörotoksinlere maruziyet sonrasında da benzer davranışsal belirtiler oluşturduğu bilinmektedir. Bu çalışmada gözlenen hareket azalması ve koordinasyon bozuklukları, glifosatın dolaylı olarak dopaminerjik sinyal yollarını etkileyebileceğini düşündürmektedir. Benzer şekilde Vaudin ve ark. (2023) ile Gomes ve ark. (2022), glifosatın uzun süreli maruziyetlerde balıklarda nörotoksik yanıtları artırdığını ve davranış değişikliklerine neden olduğunu bildirmişlerdir.

Su yüzeyine yönelme davranışının artması ise solungaç fonksiyonlarının etkilenmesi sonucunda ortaya çıkan hipoksi kaynaklı bir stres tepkisi olarak değerlendirilebilir. Glifosatın balıklarda solungaç dokusunda hasar oluşturduğu ve oksijen alım kapasitesini düşürdüğü daha önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir (Çavaş ve Könen, 2007).

Her ne kadar mevcut çalışmada ergin bireyler kullanılmış olsa da gözlenen yüzgeç deformasyonları ve renk değişimleri glifosatın hücresel düzeyde

oluşturduğu oksidatif stres ile ilişkili olabilir. Oksidatif stres sonucunda lipid peroksidasyonu, protein hasarı ve hücre zarında bozulmalar meydana gelmekte, bu durum dış morfolojide gözle görülür değişikliklere neden olabilmektedir. Duruel (2022), başka bir herbisit olan glufosinat-amonyumun zebra balığında oksidatif stres mekanizmasını aktive ederek doku ve hücre düzeyinde hasar oluşturduğunu bildirmiştir. Benzer mekanizmaların glifosat maruziyetinde de rol oynadığı düşünülmektedir.

Öztürk (2019) tarafından tribenuron metil ile gerçekleştirilen çalışmada da zebra balığı embriyolarında doz artışına bağlı teratojenik etkiler ve morfolojik deformasyonlar gözlenmiştir. Bu durum, farklı herbisit gruplarının benzer toksikolojik mekanizmalarla sucul organizmaların gelişim ve morfolojisini olumsuz etkileyebildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen davranışsal ve morfolojik bulgular, glifosat izopropilamin tuzunun zebra balıkları üzerinde akut dönemde dahi belirgin toksik etkiler oluşturabildiğini göstermektedir. Davranış bozuklukları sinir sistemi ve solunum fonksiyonlarındaki etkilenmenin göstergesi olarak değerlendirilirken, morfolojik değişimler ise hücresel ve doku düzeyindeki toksisiteyi yansıtmaktadır. Etkilerin özellikle yüksek konsantrasyonlarda daha belirgin olması, glifosatın doz bağımlı toksik potansiyelini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, glifosatın yalnızca hedef bitkiler üzerinde değil, hedef dışı sucul organizmalar üzerinde de önemli biyolojik etkiler oluşturabileceğini desteklemektedir. Tarımsal alanlardan yüzey sularına taşınan glifosatın sucul ekosistemlerdeki balık popülasyonları açısından risk oluşturabileceği ve bu nedenle çevresel izleme çalışmalarında davranışsal ve morfolojik biyobelirteçlerin dikkate alınması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca, glifosatın hedef organizmalar dışındaki sucul canlılar üzerinde oluşturabileceği olumsuz etkiler göz önünde bulundurularak, herbisit kullanımında çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri benimsenmeli, kimyasal mücadele yöntemlerine alternatif biyolojik ve entegre mücadele stratejileri desteklenmelidir. Böylece hem tarımsal verimlilik korunabilecek hem de sucul ekosistemler üzerindeki toksik baskı azaltılabilecektir.

KAYNAKÇA

Abe, F. R., Dorta, D. J., Gravato, C., & de Oliveira, D. P. (2024). Elucidating the effects of pure glyphosate and a commercial formulation on early life stages of zebrafish using a complete biomarker approach: All-or-nothing! Science of the Total Environment, 916, 170012. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170012

Alturfan, E. E. (2023). Zebra balıklarında dopaminerjik nöron hasarı. In P. R. Dinçer (Ed.), Zebra balığının model organizma olarak kullanımı (1. baskı, ss. 91–96). Türkiye Klinikleri.

Ames, J., Miragem, A. A., Cordeiro, M. F., Cerezer, F. O., & Loro, V. L. (2022). Effects of glyphosate on zebrafish: A systematic review and meta-analysis. Ecotoxicology, 31, 1189–1204. https://doi.org/10.1007/s10646-022-02581-z

Bejaoui, S., Ames, J., Belhassen, D., Úbeda-Manzanaro, M., Soudani, N., & Araújo, C. V. M. (2026). Glyphosate repercussions on *Danio rerio*: Integrating behavioral crisis, biochemical imbalance and lipidomic changes. Aquatic Toxicology, 293, 107762. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2026.107762

Bianchi, M., Paravani, E. V., Acosta, M. G., Odetti, L. M., Simoniello, M. F., & Poletta, G. L. (2024). Pesticide-induced alterations in zebrafish (*Danio rerio*) behavior, histology, DNA damage and mRNA expression: An integrated approach. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 280, 109895. https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2024.109895

Çavaş, T., & Könen, S. (2007). Detection of cytogenetic and DNA damage in peripheral erythrocytes of goldfish (Carassius auratus) exposed to a glyphosate formulation using the micronucleus test and the comet assay. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 634(1–2), 138–145.

Cattani, D., Martinez, C. B., Heinz, R., & Garcia, S. C. (2019). Glyphosate-based herbicides and oxidative stress in astrocyte cultures: Implications for neurotoxicity. NeuroToxicology, 70, 115–124.

Çetin, B., & Uzun, O. (2019). Herbisit kullanımının çevresel etkileri üzerine güncel değerlendirmeler. Tarım Bilimleri Dergisi, 25(3), 412–420.

Duruel, H. E. E. (2022). Glufosinat-Amonyum'un zebra balığı (*Danio rerio*) üzerindeki subletal toksik etkilerinin in vivo ve in vitro olarak değerlendirilmesi (Order No. 29443099). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (2724587388). Retrieved from https://www.proquest.com/dissertations-theses/glufosinat-amonyum-un-zebra-balığı-danio-rerio/docview/2724587388/se-2

Gaur, H., Bhargava, A., & ark. (2016). Cardiovascular developmental toxicity of glyphosate in zebrafish embryos (*Danio rerio*). Environmental Toxicology and Pharmacology, 48, 29–38. https://doi.org/10.1016/j.etap.2016.05.005

Gomes, M. P., Le Manac'h, S. G., Moingt, M., & Huguenot, D. (2022). Impacts of glyphosate-based herbicides on aquatic environments: Updated ecotoxicological perspectives. Science of the Total Environment, 829, 154–190.

Güneş, T., & Kara, M. (2021). Glifosat uygulamalarının toprak mikrobiyal yapısına etkisi: Türkiye örneği. Ekoloji Dergisi, 30(118), 45–54.

Güner, U. (2020). Acute toxicity (LC_{50}) of cyhalofop butyl on Gambusia holbrooki. Journal of the Institute of Science and Technology, 10(4), 2394–2399. https://doi.org/10.21597/jist.718688

Howe, K., Clark, M. D., Torroja, C. F., Torrance, J., Berthelot, C., Muffato, M., et al. (2013). The zebrafish reference genome sequence and its relationship to the human genome. Nature, 496, 498–503. https://doi.org/10.1038/nature12111

Kimmel, C. B., Ballard, W. W., Kimmel, S. R., Ullmann, B., & Schilling, T. F. (1995). Stages of embryonic development of the zebrafish. Developmental Dynamics, 203(3), 253–310. https://doi.org/10.1002/aja.1002030302

Klátyik, S., Simon, G., Takács, E., Oláh, M., Zaller, J. G., Antoniou, M. N., Benbrook, C., Mesnage, R., & Székács, A. (2025). Toxicological concerns regarding glyphosate, its formulations, and co-formulants as environmental pollutants: A review of published studies from 2010 to 2025. Archives of Toxicology, 99, 3169–3203. https://doi.org/10.1007/s00204-025-04076-2

Liu, Z., Shangguan, Y., Zhu, P., Sultan, Y., Feng, Y., Li, X., & Ma, J. (2022). Developmental toxicity of glyphosate on embryo-larval zebrafish (*Danio rerio*). Ecotoxicology and Environmental Safety, 236, 113493. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113493

López-Olmeda, J. F., & Sánchez-Vázquez, F. J. (2011). Environmental cycles, melatonin, and clock genes in zebrafish. Chronobiology International, 28(10), 716–727. https://doi.org/10.3109/07420528.2011.607676

Makame, H., … (2023). Co-formulants in glyphosate-based herbicides enhance cytotoxicity in human blood cells. Toxicology Reports, 10, 112–124. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2023.01.005

Önen, H., & Işık, D. (2014). ALS inhibitörü herbisitlere karşı yabancı ot direnci: Türkiye'de durum ve yönetim stratejileri. Yabancı Ot Bilimi Dergisi, 17(2), 89–98.

Öztürk, B. (2019). Tribenuron metilin zebra balığı gelişimindeki teratolojik etkilerinin incelenmesi (Tez No: 29178386) [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi]. ProQuest Dissertations & Theses Global.

Ramos, M. T., Barreto, A., Silva, A. M., & Oliveira, M. (2020). Endocrine disruption and reproductive effects of pesticide exposure: An updated review. Environmental Research, 187, 109–124.

Smith, A. B., … (2023). Transcriptomic signaling in zebrafish (*Danio rerio*) embryos exposed to environmental concentrations of glyphosate. Aquatic Toxicology, 260, 106514. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106514

Spence, R., Gerlach, G., Lawrence, C., & Smith, C. (2008). The behaviour and ecology of the zebrafish, Danio rerio. Biological Reviews, 83, 13–34. https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00030.x

Sridhar, V. V., Turner, L. W., Reidenbach, L. S., Horzmann, K. A., & Freeman, J. A. (2025). A review of the influence of pH on toxicity testing of acidic environmental chemical pollutants in aquatic systems using zebrafish (*Danio rerio*) and glyphosate toxicity as a case study. Ecotoxicology and Environmental Safety, 289, 117506. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117506

Vaudin, A., Prado, J. R., & Thiel, B. E. (2023). Long-term glyphosate exposure and implications for freshwater species: A comprehensive review. Ecotoxicology and Environmental Safety, 256, 114–342.

Verep, B., & Yıldırım, H. (2020). Lepistes balıklarında bazı herbisitlerin akut toksik etkisinin araştırılması. Anadolu Çevre ve Hayvan Bilimleri Dergisi, 5(1), 106–114.

Yapıcı, M. (2023). Farklı doz ve sürelerde levonorgestrel uygulamasının zebra balıklarında (*Danio rerio*, Hamilton, 1822) antioksidatif metabolizma üzerine etkileri (Tez No: 31159540) [Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi]. ProQuest Dissertations & Theses Global.

Yipel, M., & İlhan, F. (2021). Zebrafish (*Danio rerio*) as a model organism in environmental and biomedical research. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 21, 431–445. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v21_5_04

Zhang, T., Fan, Y., Yang, Q., Zhang, R., & Guo, W. (2026). An integrated review of glyphosate ecotoxicity and environmental fate in aquatic systems using species sensitivity distributions and meta-analysis. Pesticide Biochemistry and Physiology, 219, 107025. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2026.107025

Zhou, N., Li, R., Lu, J., Cheng, J., Xu, W., Tao, L., & Zhang, Y. (2025). Effects of glyphosate on zebrafish (*Danio rerio*) developmental toxicity. Environmental Toxicology, 40(9), 1160–1172. https://doi.org/10.1002/tox.24503

BÖLÜM 14

Tritikalenin Evrimsel Gelişimi ve Gelecek Potansiyeli

Birol Taş[1]

[1] Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü
0000-0003-4975-0278

1. Giriş ve Tarihsel Gelişim

Tritikale, birbirini tamamlayan agronomik özellikleri bir araya getiren bir genetik yapı temelinde, ***Triticum*** cinsinin yüksek verim ve tane üretim potansiyeli ile ***Secale*** cinsinin çevresel streslere ve zorlayıcı yetiştirme koşullarına karşı dayanıklılığı birleştirilmiş, ilk başarılı sentetik tahıl türlerinden biri olarak kabul edilmektedir (McGoverin ve ark., 2011; Ayalew ve ark., 2018). Buğday ile çavdar melezlemesi (tritikale) üzerine yapılan ilk çalışmalar, 19. yüzyılın ikinci yarısına kadar uzanmaktadır. A. S. Wilson tarafından 1875 yılında yürütülen çalışmalar, tritikalenin tarihsel gelişimine ilişkin temel araştırmaların mihenk taşı olmuştur. 1875'ten sonra, verimli yavrular elde etmeye yönelik çalışmalar W. Rimpau tarafından yürütülmüş ve daha sonra diğer araştırmacılar tarafından devam ettirilmiştir (Chen, 2010). Böylece, farklı genotiplerin genomlarının tek bir bitkide birleştirilmesine ilişkin son bulguların uygulanması, daha sonraki sentetik amfiploid geliştirme çalışmalarının temelini oluşturmuştur.

Tritikale materyalinin ilk nesillerinde, yüksek kromozom sayısı, düzensiz kromozom eşleşmesi ve özellikle de düşük verimlilikle kanıtlanan üreme yetersizliği ve istikrarsızlık gibi önemli sitogenetik sorunlarla karşılaşılmıştır. Bununla birlikte, bu erken dönem materyalleri, daha sonraki tritikale ıslah programlarının genetik ve sitogenetik temelini oluşturdu. Özellikle, kolşisin uygulaması ve doku kültürü gibi biyoteknolojik yaklaşımların ıslah programlarına entegrasyonu, kromozom stabilitesini ve verimliliği artırmaya yardımcı olan önemli katkılar sağladı (Briggle, 1969; Crespo-Herrera ve ark., 2017). Bu arada, ilk oktoploid materyaller, daha yüksek agronomik performans ve daha iyi tane gelişimi gösteren materyallerle yer değiştirdi (Oettler, 2005).

Hekzaploid tritikalenin geliştirilmesi, genetik stabiliteyi artırarak verim, adaptasyon ve tahıl özelliklerini iyileştirme yolunda önemli bir adım olmuştur. Bu süreçte kromozomal translokasyonlar, delesyonlar ve diğer sitogenetik manipülasyonların kullanılması, çavdardan buğdaya ve tritikaleye yararlı ve elverişli alellerin aktarılmasını mümkün kılmıştır. Özellikle, çavdardan elde edilen hastalık ve çevresel strese tolerans alelleri, tritikale ve buğday ıslahı için önemli bir genetik kaynak oluşturmuştur. Günümüzde, 1BL.1RS translokasyonu olarak bilinen çavdardan türetilmiş hastalık özellikleri bunlardan biridir ve hastalık toleransının aktarılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır; ayrıca bu özellikler, bazı fermantasyon ve agronomik özelliklerin yanı sıra, bahçecilik sorunlarının giderilmesinde, stresin azaltılmasında ve yabani özelliklerin geliştirilmesinde de kullanılmaktadır (Mondal ve ark., 2016).

Tritikale genetik kaynaklarının genişletilmesinde, çavdar ve buğday dışındaki yabani akraba türler ön plana çıkmaya başlamıştır. Buğday ve çavdar arasındaki cinsler arası melezlemelerle geliştirilen tritikale genotipleri, *Tritipyrum* gibi diğer sentetik amfiploidlerle birlikte iklim değişkenliğinin arttığı ve tarımsal üretim için uygun alanların hızla daraldığı ortamlarda yeni adaptif özelliklerin ıslah

programına kazandırılması yönünden önemli genetik kaynaklar olarak değerlendirilmektedir (Farokhzadeh ve ark., 2023; Rezai ve ark., 2024). Ayrıca, *Thinopyrum intermedium* gibi yabani akraba türlerden elde edilen kromozomal materyalin tritikale ya da buğdayın salniceu karakterlerine taşınması, hastalık ve çevresel streslere dayanıklılık ve agronomik performansın artırılmasına yönelik önemli genetik kaynak oluşturması açısından bir diğer ilişkili genetik kaynağı oluşturmaktadır (Jiang ve ark., 2026).

Günümüzde tritikale ıslahı, klasik melezleme ve kromozom ıslahının ötesine geçerek yüksek verimli fenotipleme, genomik seleksiyon, moleküler belirteç destekli seleksiyon ve CRISPR/Cas9 aracılı hedefli gen düzenleme gibi ileri biyoteknolojik yaklaşımları içermektedir. Bu teknolojiler mevcut genetik varyasyonun daha etkin kullanımı, verim ve kalite özelliklerinin birlikte geliştirilmesi ve farklı çevre koşullarına adaptasyonun artırılması açısından yeni imkânlar sunmaktadır (Cai, 2024). Özellikle ikincil ve üçüncül gen havuzlarında var olan yararlı alellerin belirlenmesi ve bunların seçkin genotiplere aktarılması, genomik ve omik teknolojilerin moleküler belirteç destekli seleksiyonla kullanımı daha da önemli hale getirmektedir (Khalid ve ark., 2023). Genomik verilerin bu şekilde kullanımı, popülasyonlar içerisindeki genetik varyasyonun detaylı biçimde karakterize edilmesi ve farklı çevre koşullarında üstün performansla ilişkili alel ve haplotiplerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Bevan ve ark., 2017). Bu bağlamda pangenom yöntemleri, tek bir referans genomunda bulunmayan gen bölgelerini ve yabancı akrabalardan gelen genetik çeşitliliği ortaya çıkarır. Böylece geniş gen kaynaklarını hedefli ıslah programlarına taşıma işi kolaylaşır. Bu sayede daha önce iyi tanımlanmamış gen bölgeleri bulunarak, bu bölgeler belirli tarım özellikleriyle ilişkilendirilebilir. Genomik yöntemlerin yanında, biyokimyasal işaretler de çavdar kromatininin erken nesillerde izlenmesinde yardımcı olur. Özellikle ω-sekalin proteinlerinin poliakrilamid jel elektroforezi (PAGE) ile tespiti, çavdar kökenli kromatinin bulunmasında uzun süredir kullanılan bir yöntemdir (Gupta ve Shepherd, 1992; Seo ve Hong, 1998). Çavdar kaynaklı sekalin bantları ortaya çıktığında, bazı buğday depo proteini bantları kaybolur; bu durum 1R kromozomu ya da 1RS/1BL gibi çavdar segmentlerinin varlığı hakkında ön bilgi verir (Gupta ve Shepherd, 1992). Bununla birlikte, protein elektroforezi profilleri yabancı kromatinin kesin kromozomal konumunu, fiziksel uzunluğunu veya yapısal organizasyonunu tek başına ortaya koyamaz. Bu nedenle PAGE tabanlı protein belirteçlerinin sitogenetik analizler ve DNA temelli moleküler belirteçlerle birlikte değerlendirilmesi daha güvenilir sonuçlar sağlamaktadır. Yöntemin düşük maliyetli olması, kısa sürede çok sayıda bireyin taranmasına olanak sağlaması ve erken generasyonlarda ön seleksiyon amacıyla kullanılabilmesi ise önemli pratik avantajlar sunmaktadır.

Sonuç olarak, tritikalenin tarihsel gelişimi, basit bir buğday–çavdar melezlemesinden başlayarak kromozom mühendisliği, yabani akraba gen

kaynaklarının kullanımı ve ileri genomik teknolojilerin bütünleştirildiği çok katmanlı bir ıslah sürecine dönüşmüştür. Oktoploid ve erken dönem sentetik materyallerde karşılaşılan fertilite ve kromozomal stabilite sorunlarının aşılmasıyla geliştirilen heksaploid ve ikincil tritikale materyalleri, günümüzde daha geniş genetik kaynakların değerlendirilmesine olanak sağlayan bir temel oluşturmuştur. Güncel genomik, pangenomik, sitogenetik ve biyokimyasal yaklaşımların birlikte kullanılması, tritikalenin genetik çeşitliliğinin daha ayrıntılı biçimde karakterize edilmesini ve yararlı genetik varyasyonun daha hassas biçimde seçilmesini mümkün kılmaktadır. Bu gelişmeler, özellikle iklim değişkenliği, su ve arazi kaynaklarındaki kısıtlamalar ve artan üretim gereksinimleri karşısında, yüksek verim ile çevresel dayanıklılığı birlikte taşıyan yeni tritikale genotiplerinin geliştirilmesi için önemli bir bilimsel altyapı oluşturmaktadır.

Türkiye'de tritikale ıslahı ve adaptasyon araştırmaları, 1970'li yıllarda Uluslararası Mısır ve Buğday Geliştirme Merkezi (CIMMYT) kaynaklı materyallerin ülkeye getirilmesiyle ivme kazanmış; ilk tescilli yerli çeşidimiz olan "Tatlıcak-97" ise 1997 yılında ulusal üretim deseninde yerini almıştır (Aydoğan ve ark., 2021).

2. Tritikalenin Agronomik Özellikleri ve Yetiştirme Teknikleri Açısından Sürdürülebilirliği

Tritikalenin verim ve kalite potansiyelinin ortaya konması, genotip, ekolojik koşullar ve yetiştirme teknikleri arasındaki etkileşime bağlıdır. Bu nedenle sürdürülebilir üretimde tek bir uygulamadan çok, genotip seçimi ile su, besin ve bitki koruma yönetiminin birlikte ele alınması gerekir.

2.1. Gübreleme ve Azot Yönetimi

Tritikale, çavdardan aldığı güçlü kök sistemi sayesinde azot (N) ve diğer besin maddelerini topraktan etkili biçimde alma ve kullanma kapasitesine sahiptir (Furan ve ark., 2005; Güney, 2020). Azotlu gübreleme; tane verimi, hektolitre ağırlığı, başaktaki tane dolumu ve tane protein oranını doğrudan etkiler (Gülmezoğlu ve ark., 2019; Akgün ve ark., 2021). Araştırmalar, azot uygulamasının bin tane ağırlığı, başak sayısı ve hasat indeksi gibi verim bileşenlerini de iyileştirebildiğini göstermektedir. Ancak bu olumlu etki belirli bir dozdan sonra sınırlanmaktadır (Gülmezoğlu ve Aytaç, 2010).

- Bitki boyunun gereğinden fazla uzaması
- Yatma (lodging) riskinin ve buna bağlı hasat kayıplarının artması
- Yeraltı sularında nitrat yıkanması riskinin artması ve buna bağlı çevresel zararların ortaya çıkması söz konusu olabilir (Oral, 2018; Yörük, 2019; Jamil ve ark., 2021).

Bu nedenle gübrelemede yalnızca en yüksek biyolojik verim değil, ekonomik ve ekolojik açıdan uygun doz hedeflenmelidir. Azotun bölünerek uygulanması, uygun ekim sıklığı ve yabancı ot kontrolüyle birlikte değerlendirildiğinde besin maddelerinden yararlanmayı artırabilir (Kara, 2007; Akgün ve ark., 2021; Bielashov ve ark., 2022). Sapa kalkma döneminde verilen azot, bitkinin gelişme dönemindeki N ihtiyacının karşılanmasına ve tane ile kaba yem kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlarken (Kara, 2007; Akgün ve ark., 2021), fosfor ve kükürt ile dengeli kullanımı protein sentezini desteklemektedir. Organik gübre uygulamaları da yeşil ot verimini artırmanın yanı sıra toprak verimliliğinin korunmasına katkı sağlayabilmektedir (Akbay ve ark., 2023; Barry ve ark., 2024).

2.2. Su Yönetimi ve Ekim Zamanı

Tritikalenin toplam su gereksinimi buğdaya benzer olmakla birlikte, su stresine toleransı daha geniştir (Şentürk ve Akgün, 2014; Kızılgeçi ve Yıldırım, 2017). Kıraç koşullarda diğer bazı tahıllara göre daha yüksek biyokütle oluşturabilmektedir. Buna rağmen kritik fenolojik dönemlerdeki kuraklık verimde önemli kayıplara yol açabilir. Özellikle çiçeklenme ve tozlaşma dönemine rastlayan Mayıs-Haziran aylarındaki su stresi, tane tutma ve tane dolumunu olumsuz etkiler. Bu nedenle söz konusu dönemde yapılacak ilave sulamalar verim istikrarı açısından önemli olabilir (Küçüközdemir ve ark., 2021).

Ekim zamanı, bitkinin kışa girerken kök ve kardeş gelişimini yeterli düzeyde tamamlaması açısından önemlidir. Nemli ve ılıman bölgelerde erken sonbahar ekimi, sonbahardaki azot alımını ve biyokütle birikimini artırarak azot kullanım etkinliğini yükseltebilmektedir (Lyons ve ark., 2017; Vogeler ve ark., 2022).

2.3. Bitki Koruma ve Hasat Stratejileri

Tritikale, hızlı vejetatif gelişimi ve yüksek rekabet gücü sayesinde yabancı otları gölgeleme ve baskılama kapasitesine sahiptir. Kardeşlenme dönemindeki yabancı ot kontrolü, bitkinin su ve besin maddelerinden daha iyi yararlanmasını sağlar. Böylece herbisit kullanım ihtiyacının azaltılması ve daha düşük girdili üretim mümkün olabilir (Sadreddine, 2016; Bielashov ve ark., 2022; Yu ve ark., 2023). Tritikalenin hastalık ve zararlılara karşı görece yüksek dayanıklılığı da kimyasal mücadele ihtiyacını azaltabilir. Ancak bu durum, bitki koruma uygulamalarının her koşulda gereksiz olduğu anlamına gelmez. Genotip, çevre ve hastalık-zararlı baskısı birlikte değerlendirilmelidir (Oral ve Ülker, 2016).

Hasat zamanı, tritikalenin kullanım amacına göre belirlenmelidir. Bitkinin gelişmesi ilerledikçe kuru madde üretimi ile besin maddesi yoğunluğu arasındaki denge değişir. Bu nedenle optimum hasat zamanı, hedeflenen ürün veya yem kalitesine göre belirlenmelidir. Silajlık kullanımda olgunluk dönemi, fermantasyon özellikleri ve organik madde sindirilebilirliğini etkiler. Bu etkinin genotiplere göre değişebildiği bildirilmektedir (Karadağoğlu ve Özdüven, 2019).

Biçim yüksekliği ve sıklığının uygun belirlenmesi de yem materyalinin kalitesinin korunması açısından önemlidir (Alatürk ve Gökkuş, 2025). Tane üretiminde tritikalenin tane dökme eğiliminin buğdaya göre daha düşük olması, hasat zamanında bir miktar esneklik sağlayarak tarla kayıplarını azaltabilir (Ayalew ve ark., 2018). Hasat edilen ürünün neminin yaklaşık %12–14'e düşürülmesi ve ardından depolanması da depolama süresince kalite kayıplarının azaltılması açısından önemlidir.

3. Tritikalenin Stres Toleransı, Genotip × Çevre Etkileşimi ve Verim İstikrarı

Tritikalenin öne çıkan özelliklerinden biri, olumsuz ekolojik koşullara ve farklı stres faktörlerine uyum sağlayabilmesidir.

- Abiyotik Stres Toleransı: Tritikale, çavdar genomundan gelen özellikleri sayesinde düşük ve çok düşük sıcaklık, kuraklık, yüksek toprak asiditesi (alüminyum toksisitesi), tuzluluk ve besin maddesi yetersizliği gibi marjinal koşullarda ekonomik düzeyde ürün verebilmektedir (Albayrak ve ark., 2006; Sakız ve Koca, 2023; Yağbasanlar ve Makaracı, 2024). Doğu Anadolu gibi kışların sert geçtiği bölgelerde soğuğa dayanıklı genotipler, yüksek kışlık performans göstererek verim kayıplarını azaltabilmektedir (Karagöz ve ark., 2019; Küçüközdemir ve ark., 2021).
- Biyotik Stres Toleransı: Tritikale, serin iklim tahıllarında görülen yaprak pası, külleme ve kök çürüklüğü gibi fungal hastalıkların yanı sıra bazı zararlılara karşı da görece yüksek dayanıklılık gösterebilmektedir (Oral ve Ülker, 2016). Bu özellik pestisit kullanımının azaltılmasına ve dolayısıyla üretim maliyetleri ile çevresel yükün düşürülmesine katkı sağlayabilir.
- Genotip × Çevre Etkileşimi: Tritikalenin verim ve kalite performansı, genotip ile çevre koşulları arasındaki etkileşimden önemli ölçüde etkilenir. Bu nedenle tek bir genotipin bütün ortamlarda aynı performansı göstermesi beklenmez. Islah çalışmalarında yalnızca yüksek mutlak verime değil, farklı çevrelerde istikrarlı performans gösterebilen ve geniş adaptasyon yeteneğine sahip çeşitlere de odaklanılmaktadır (Güngör ve ark., 2022). Genotipler arasında kalite bakımından da belirgin farklılıklar vardır (Lermi ve Palta, 2018; Kır ve Yavuz, 2024). Yeşil ve kuru ot verimlerinin geniş bir aralıkta değişmesi, bölgeye uygun materyal seçiminin önemini göstermektedir. Zayıf topraklarda tritikalenin karışıma dahil edilmesi kuru ot verimini artırabilir. Organik gübre kullanımı ise NDF ve ADF oranlarını düşürerek sindirilebilirliği yükseltebilmektedir. Bu sonuçlar, tritikale ıslahında tek bir özelliğe dayalı seçim yerine verim,

adaptasyon, yem kalitesi ve stres dayanıklılığının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Djekić ve ark., 2011; Özdemir ve ark., 2024).

4. Tritikalenin Kullanım Alanları, Tane ve Kaba Yem Kalitesinin Sürdürülebilirliği

Tritikale yalnızca tane üretimi için yetiştirilen bir tahıl değildir. Yeşil ot, kuru ot, silaj ve saman olarak da değerlendirilebilen çok amaçlı bir yem bitkisidir.

Tritikalenin üretim değerini yalnızca tane verimi üzerinden değerlendirmek, bu türün çok amaçlı kullanım potansiyelini göz ardı eder. Tanesinin besleme değeri, hazmolabilir protein içeriği ve yüksek lizin düzeyi, özellikle hayvancılık işletmeleri için önemli bir yem hammaddesi olmasını sağlamaktadır (Altındal, 2017; Güngör ve ark., 2023). Türkiye'de ortalama tane veriminin 336 kg/da düzeyinde olması ve genotipler arasında önemli farklılıklar bulunması, üretim performansının bölge ve genotip temelinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Güngör ve ark., 2022; Özdemir ve ark., 2024). Genotiplere bağlı olarak protein oranlarının %13,3–14,8 arasında değişebildiği ve diğer kışlık tahıllarla karşılaştırılabilir düzeylerde olduğu bildirilmektedir (Başer ve ark., 2019). Özellikle tahıllarda sınırlayıcı amino asitlerden biri olan lizinin yüksek olması, tritikalenin kanatlı ve diğer monogastrik hayvanların rasyonlarında değerlendirilmesini desteklemektedir (Bishnoi ve ark., 2019; Korkut ve ark., 2019; Abdullah ve Khalaf, 2023). Bu nedenle tritikale, özellikle hayvan yemi üretiminde önemli bir alternatif oluşturmakta; ekim alanlarının artırılması da dışarıdan yem teminini azaltmaya katkı sağlayabilmektedir.

Başlıca kullanım şekilleri ve bunların öne çıkan özellikleri aşağıda verilmiştir:

Yeşil / Kuru Ot: Yüksek biyokütle birikimi ve uygun ADF/NDF dengesi sağlar. Erken biçim, ruminantlarda sindirilebilirliği artırabilir (Alp, 2009; Lermi ve Palta, 2018).

Silajlık Kullanım: Süt-hamur olum döneminde yapılan biçimler, uygun organik madde sindirilebilirliği ve fermantasyon kalitesi sağlayabilir (Karadağoğlu ve Özdüven, 2019).

İkili Kullanım (Ot + Tane): Erken vejetatif dönemde yapılan otlatma veya biçimden sonra bitkinin yeniden gelişme yeteneğinden yararlanılarak aynı alandan hem yem hem de tane elde edilebilir. Bu sistemde tohum verimindeki olası azalma, elde edilen kaliteli ot verimiyle kısmen telafi edilebilir ve böylece ekonomik açıdan sürdürülebilir bir üretim modeli oluşturulabilir (Balkan ve ark., 2011; Kaplan ve ark., 2014; Sadrettin, 2016; Alatürk, 2018).

Baklagil Karışımları: Yem bezelyesi veya adi fiğ ile karışık ekim, Alan Eşdeğerlik Oranı (AEO/LER) ile birim alandan elde edilen ham protein verimini artırabilir. Yem bezelyesi karışımlarında %25 baklagil ve %75 tahıl oranının

kullanılması ve tritikalenin süt olgunluğu döneminde hasat edilmesi, ham protein ile toplam kuru ot verimini artıran etkili bir strateji olarak bildirilmektedir. Fiğ-tritikale karışımlarında dengeli azot ve fosfor dozları da ot verimi ve silaj kalitesini artırabilmektedir (Korkmaz ve Kızılşimşek, 2024).

5. Sonuç

Sürdürülebilir tritikale yetiştiriciliğinde başarı, uygun genotip seçimiyle birlikte bölgesel ekim zamanı, su ve besin yönetimi, yabancı ot ve bitki koruma uygulamaları ile kullanım amacına uygun hasat stratejisinin birlikte ele alınmasına bağlıdır (Tamagno ve ark., 2022). Böyle bir yaklaşım, sınırlı kaynaklarla istikrarlı üretim sağlarken girdi maliyetlerini ve çevresel yükü de azaltabilir.

Tritikalenin münavebeye dahil edilmesi, toprak hastalıkları ve zararlıların yaşam döngüsünün kırılmasına katkı sağlayabilir. Kükürt ile desteklenen azotlu gübreleme, protein sentezini ve dolayısıyla silajın besin değerini artırabilir. Hayvancılık ile bitkisel üretimin birlikte yürütüldüğü karma işletmelerde ise sap, saman ve tane kayıplarının azaltılması, işletme içi yem yeterliliğini destekleyebilir (Derycke ve ark., 2018; Vega-García ve ark., 2023).

Gelecekteki tritikale ıslahı ve yetiştirme çalışmalarında yalnızca tane verimine odaklanmak yeterli olmayacaktır. Geniş adaptasyon, abiyotik stres toleransı, azot ve su kullanım etkinliği ile hayvansal beslemeye uygun yem kalitesi birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle düşük ADF/NDF ve yüksek protein gibi özelliklerin çoklu kriterli seleksiyon programlarına dahil edilmesi önem taşımaktadır. Genomik seleksiyon ve hızlı jenerasyon ilerletme gibi tekniklerin kullanılması, istenen besinsel özelliklerin ve hastalık dayanıklılığının hedeflenen hatlarda daha kısa sürede sabitlenmesine yardımcı olabilir. Üstün genotiplerin farklı lokasyonlarda ve yıllarda çiftçi koşullarında test edilmesi ise genotip × çevre etkileşiminin daha iyi anlaşılmasını ve geniş adaptasyonlu, verim stabilitesi yüksek çeşitlerin belirlenmesini sağlayacaktır. Katılımcı değerlendirme ve çiftçi geri bildirimlerinin sürece dahil edilmesi de geliştirilen çeşitlerin benimsenmesini ve araştırma sonuçlarının uygulamaya aktarılmasını kolaylaştırabilir.

Kaynaklar

Abdullah, S. A., Khalaf, A. S. (2023). Effect of seed size and seeding rates on yield attributes of Triticale var. Admiral. Iraqi Journal of Agricultural Sciences, 54(3), 820-836.

Akbay, F., Erol, A., Kızılşimşek, M. (2023). The effect of some organic fertilizers on vetch + triticale cultivation and conservation of soil fertility. Muş Alparslan Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, 3(1), 27-39.

Akgün, İ., Özbek, E., Şener, A. (2021). Makarnalık buğday ve tritikale çeşitlerinde hasat zamanı ve azotlu gübre uygulamasının tane verimi ile bazı kalite özelliklerine etkisi. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 10(2), 53-63.

Alatürk, F. (2018). Farklı sayı ve yüksekliklerden yapılan biçimlerle tritikalede ikili üretimin (tohum ve ot) olabilirliği üzerinde bir araştırma. ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 6, 235-241.

Alatürk, F., Gökkuş, A. (2025). Effects of Cutting Management on the Feed Quality of Triticale Grain. International Journal of Innovative Approaches in Science Research, 9(4), 86-97.

Albayrak, S., Mut, Z., Töngel, Ö. (2006). Tritikale (x Triticosecale Wittmack) hatlarında kuru ot ve tohum verimi ile bazı tarımsal özellikler. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 1(1):13-21.

Alp, A. (2009). Determination of agricultural characteristics of some released triticale (xTriticosecale Wittmack) cultivars under rainfed conditions in Diyarbakır. YYÜ Tar. Bil. Der., 19(2): 61-70

Altındal, N. (2017). Tritikale (x Triticosecale Wittmack) genotiplerinin ISSR-PCR yöntemi ile moleküler düzeyde tanımlanması. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 14(3)

Ayalew, H., Kumssa, T. T., Butler, T. J., Ma, X. (2018). Triticale improvement for forage and cover crop uses in the Southern Great Plains of the United States. Frontiers in Plant Science, 9, 1130.

Aydoğan, S., Şahin, M., Akçacık, A. G., Demir, B., Hamzaoğlu, S., Özer, E. (2021). Evaluation of triticale breeding material in terms of some quality traits. Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi, 10 (1): 29-39

Barry, M., Alexander, C., Allen, D., Vvedensky, V. V., Tegesov, D. S. (2024). Effect of the fertilizer application rates on the performance of the winter triticale on podzolic soil. African Journal of Agricultural Research, 20(2), 198–204.

Bevan, M., Uauy, C., Wulff, B. B. H., Zhou, J., Krasileva, K. V., Clark, M. D. (2017). Genomic innovation for crop improvement. Nature, 543(7645), 346–354.

Bielashov, O., Rozhkov, A., Kalenska, S., Karpuk, L., Marenych, M., Kuts, O. V., Zaitseva, I., Romanov, O. V., Muzafarov, N. (2022). Influence of pre-sowing

application of mineral fertilizers, root and foliar nutrition on productivity of winter triticale plants. Ecological Engineering ve Environmental Technology, 23(6), 1-14.

Briggle, L. W. (1969). Triticale-A Review. Crop Science, 9(2), 197-202.

Bishnoi, O. P., Suresh, S., Behl, R. K. (2019). Comparative performance of triticale genotypes in North Western Plain Zone of India for grain yield and its attributes. Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics, 5(1):1-6

Cai, R. (2024). Breeding Triticale for Stress-Prone Environments: Genetic Insights and Methodologies. Triticeae Genomics and Genetics, 15(5), 277-286.

Chen, Z. J. (2010). Molecular mechanisms of polyploidy and hybrid vigor. Trends in Plant Science, 15(2), 57-71.

Crespo-Herrera, L., Garkava-Gustavsson, L., Åhman, I. (2017). A systematic review of rye (Secale cereale L.) as a source of resistance to pathogens and pests in wheat (Triticum aestivum L.). Hereditas, 154(1), 14.

Derycke, V., Landschoot, S., Dewitte, K., Wambacq, E., Latré, J., Haesaert, G. (2018). Straw yield and quality: An extra motivation for the introduction of triticale in mixed farming systems. Cereal Research Communications, 46(1), 158-168.

Djekić, V., Mitrović, S., Milovanović, M., Djurić, N., Kresović, B., Tapanarova, A., Djermanovic, V., Mitrovic, M. (2011). Implementation of triticale in nutrition of non-ruminant animals. African Journal of Biotechnology, 10(30), 5697-5704.

Farokhzadeh, S., Hassani, H. S., Tahmasebi, S., Zinati, Z., Mobasseripour, E. S. (2023). Exploring agronomic traits and breeding prospects of primary tritipyrum and triticale lines to increase grain yield potential. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 83(3), 355–365.

Furan, M. A., Demir, İ., Yüce, S., Can, R. R. A., Aykut, F. (2005). Ege bölgesi tritikale çeşit geliştirme çalışmaları. Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi. 18(2), 251-256.

Gupta, R. B., Shepherd, K. W. (1992). Identification of Rye Chromosome 1R Translocations and Substitutions in Hexaploid Wheats Using Storage Proteins as Genetic Markers. Plant Breeding, 109(2), 130-140.

Gülmezoğlu, N., Aytaç, Z. (2010). Response of grain and protein yields of triticale varieties at different levels of applied nitrogen fertilizer. African Journal of Agricultural Research, 5(18), 2563-2569.

Gülmezoğlu, N., Özer, E., Gürbüz, N. A. (2019). Bazı tritikale (xTriticosecale Wittmack) genotiplerinin kardeş başaklardaki tanelerin fiziksel ve kalite özelliklerine azot oranlarının etkileri. Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi, 8(1), 43-53.

Güney, M. (2020). Farklı dönemlerde biçilen buğday+çavdar karışımı hasılların besin madde içerikleri ile verim özelliklerinin karşılaştırılması. Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi, 6(2), 365-370.

Güngör, H., Çakır, M. F., Dumlupınar, Z. (2022). Evaluation of triticale: Genotype by environment interaction and GGE biplot analysis. The Journal of Animal and Plant Sciences, 32(6), 1637-1647.

Güngör, H., Çakır, M. F., Turan, Y., Gedik, B., Kantar, B. H., Dumlupınar, Z. (2023). Evaluation of some triticale (x Triticosecale Wittmack) cultivars and lines under Düzce ecological conditions. International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences, 7(1), 126-130.

Jamil, M., Ansar, M., Ahmed, Z. I., Ahmed, T., Shehzad, M., Ahmad, A., Mahmood, I. (2021). Biometric characteristics of winter forage cereals grown under nitrogen fertilization in temperate rain conditions. Revista de la Facultad de Agronomía, 38(4), 846-866.

Jiang, C., He, M., Xu, Y., Xing, Q., Qu, Y., Zhao, H., Jin, H., Zhang, R., Du, R., Kong, D., Yang, K., Song, A., Li, X., Li, H., Cui, L., Zhang, Y. (2026). Development and characterization of novel St-R translocation triticale from a trigeneric hybrid. Agronomy, 16 (3), 336.

Kaplan, M., Kökten, K., Arslan, M., Özdemir, S., Seydoşoğlu, S. (2014). Farklı yem bezelyesi (Pisum arvense) genotiplerinin tanelerinin yem içeriği yönünden karşılaştırılması. Türkiye 5. Uluslararası Katılımlı Tohumculuk Kongresi, Diyarbakır, 363-368.

Kara, K. (2007). Bazı triticale çeşitlerinde farklı ekim sıklıkları ile azot dozlarının verim ve verim öğelerine etkileri. Ziraat Mühendisliği, Ocak-Haziran, Sayı: 356

Karadağoğlu, Ö., Özdüven, M. L. (2019). Bazı tritikale çeşitlerinde farklı olgunlaşma dönemlerinin silolamada fermantasyon özellikleri ve yem değeri üzerine etkileri. Veteriner Hekimler Derneği Dergisi, 90(2), 132-142.

Karagöz, H., Küçüközdemir, Ü., Dumlu, B., Yalçın, Z. (2019). Determination of yield, quality and winter hardiness characteristics of some triticale (xTriticosecale Wittmack) genotypes in Pasinler and Erzincan locations. Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics, 5(2), 74-83.

Khalid, A., Hameed, A., Tahir, M. F. (2023). Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. Frontiers in Nutrition, 10, 1053196.

Kır, H., Yavuz, T. (2024). Bazı tritikale çeşitlerinin verim ve kalite performanslarının belirlenmesi. Ziraat Mühendisliği, 380, 63-69.

Kızılgeçi, F., Yıldırım, M. S. (2017). Bazı tritikale (x Triticosecale Wittmack) genotiplerinin verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi, 4(1), 43–50.

Korkmaz, Z., Kızılşimşek, M. (2024). Kahramanmaraş koşullarında farklı oranlarda yem bezelyesi ile tritikale yetiştiriciliğinin ot verimi ile yem kalitesine etkisi. Agrozal, 1(2), 70-77.

Korkut, Z. K., Balkan, A., Özdüven, L., Bilgin, O., & Başer, İ. (2019). Assessing of the some feeding quality characteristics of triticale in comparison with other winter cereals. Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics, 5(1), 24-31.

Kruppa, K., Türkösi, E., Holušová, K., Kalapos, B., Szakács, É., Cséplő, M., Farkas, A., Ivanizs, L., Szőke-Pázsi, K., Mikó, P., Kovács, P., Gulyás, A., Hidvégi, N., Molnár-Láng, M., Darkó, É., Bartoš, J., Gaál, E., Molnár, I. (2024). Genotyping-by-sequencing uncovers a Thinopyrum 4StS·1JvsS Robertsonian translocation linked to multiple stress tolerances in bread wheat. Theoretical and Applied Genetics, 138(1), 13.

Küçüközdemir, Ü., Dumlu, B., Karagöz, H., Yılmaz, O. (2021). Determination of yield and cold hardiness of some triticale (xTriticosecale Wittmack) genotypes in Eastern Anatolia Region. Journal of Agricultural Production, 2(1), 26-31.

Lermi, A. G., Palta, Ş. (2018). Bartın koşullarında tritikale çeşitlerinin yem verim potansiyellerinin değerlendirilmesi. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 5(4), 563-568.

Lyons, S. E., Ketterings, Q. M., Godwin, G., Cherney, J. H., Czymmek, K., Kilcer, T. (2017). Early fall planting increases growth and nitrogen uptake of winter cereals. Agronomy Journal, 109(3), 795-801.

McGoverin, C., Snyders, F., Müller, M., Botes, W. C., Fox, G., Manley, M. (2011). A review of triticale uses and the effect of growth environment on grain quality. Journal of the Science of Food and Agriculture, 91(7), 1155-1165.

Mondal, S., Rutkoski, J.E., Velu, G., Singh, P. K., Crespo-Herrera, L., Guzmán, C., Bhavani, S., Lan, C., He, X., Singh, R. P. (2016). Harnessing diversity in wheat to enhance grain yield, climate resilience, disease and insect pest resistance and nutrition through conventional and modern breeding approaches. Frontiers in Plant Science, 7, 991.

Oettler, G. (2005). The fortune of a botanical curiosity – Triticale: past, present and future. The Journal of Agricultural Science, 143(5), 329-346.

Oral, E. (2018). Effect of nitrogen fertilization levels on grain yield and yield components in triticale based on AMMI and GGE biplot analysis. Applied Ecology and Environmental Research, 16(4), 4865-4878.

Oral, E., Ülker, M. (2016). Tritikale (x Triticosecale Wittmack) çeşitlerinde özellikler arası ilişkiler ve path analizi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(3): 153-160.

Özdemir, S., Çaçan, E., Kökten, K. (2024). Bazı tritikale çeşitlerinin tohum ve saman verimleri ile saman kaliteleri açısından karşılaştırılması. Doğu Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 107–114.

Rezai, M., Seifati, S. E., Saravi, A. T., Hasani, H. S. (2024). Genetic diversity and population structure of primary tritipyrum lines in comparison with bread wheat varieties and triticale lines using SCoT Markers. Iran J. Biotechnol, 22(3).

Sadreddine, B. (2016). Yield and quality of dual-purpose barley and triticale in a semi-arid environment in Tunisia. African Journal of Agricultural Research, 11(30), 2730-2735.

Sakız, B., Koca, Y. O. (2023). Farklı fosfor dozlarının tritikalede verim ve kalite üzerindeki etkileri. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 60(1), 103-109.

Seo, Y. W., Hong, B. H. (1998). Electrophoretic and Immunological evaluation of Secalin in Rye, Triticale, and Wheat-Rye Translocation Wheat. The Korean Journal of Crop Science, 43(4), 228-233.

Şentürk, Ş., Akgün, İ. (2014). Bazı tritikale genotiplerinin Batı Geçit Bölgesinde verim ve verim unsurlarının belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 9 (1):16-26.

Tamagno, S., Pittelkow, C. M., Fohner, G. R., Nelsen, T. S., Hegarty, J., Carter, C. E., Vang, T., Lundy, M. (2022). Optimizing water and nitrogen productivity of wheat and triticale across diverse production environments to improve the sustainability of baked products. Frontiers in Plant Science, 13, 952303.

Vega-García, J. I., López-González, F., Morales-Almaráz, E., Arriaga-Jordán, C. M. (2023). Secondary growth rye or triticale silage: Small-grain cereals as a dual-purpose forage option for small-scale dairy systems in the highlands of Mexico. Chilean Journal of Agricultural Research, 83(1), 31-42.

Vogeler, I., Thomsen, I. K., Taube, F., Poulsen, H. V., Loges, R., Hansen, E. M. (2022). Effect of winter cereal sowing time on yield and nitrogen leaching based on experiments and modelling. Soil Use and Management, 38(1), 663–675.

Yağbasanlar, T., Makaracı, A. (2024). Bazı tritikale çeşitlerinin Çukurova koşullarında verim ve verim ögelerinin belirlenmesi. Kırşehir Ahi Evran Üni. Ziraat Fakültesi Dergisi, 4(2), 71-81.

Yörük, N. (2019). Bursa koşullarında yetiştirilen adi fiğ-tritikale karışımında farklı azotlu ve fosforlu gübre dozlarının ot verimi ile ot ve silaj kalitesi üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, 57s.

Yu, C., Wang, G., Liu, X., Zhang, H., Qian, M., Liu, H., Zhang, Y., Li, H. (2023). Effect of Sesbania and Triticale rotation on plant characteristics and soil quality in coastal saline-alkaline land: A two-year field experiment. BioResources, 18(4), 7109-7123.

BÖLÜM 15

Tarım Alet ve Makinalarında Görülen Ergonomik Sorunlar ve İnsan Sağlığına Etkileri

***Birol Taş*[1]**

[1] Prof. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü
0000-0003-4975-0278

1. Giriş

Ergonomi, en sade tanımıyla işi insana uydurma bilimidir. İnsanın anatomik, fizyolojik ve bilişsel özelliklerini dikkate alarak sistem performansı ile çalışanın iyilik halini birlikte eniyileştirmeyi hedefler; örgütsel boyut da bunun içinde yer alır. Tarım sektörü bu yaklaşım için sınanmaya değer bir uygulama alanıdır: açık alan, düzensiz zemin, iklim baskısı, uzun çalışma saatleri, mevsimsel yoğunluk ve aynı operatörün birden fazla makine kullanması iç içe geçer. Tüm bu öğeler bir arada devreye girdiği için tarımda güvenlik sorunu makinenin mekanik emniyetiyle sınırlı kalmaz; operatörün makineye erişimi, görüşü, oturuşu, kuvvet gereksinimi, titreşim maruziyeti, dikkat yükü ve dinlenme düzeni de en az koruyucu muhafazalar kadar belirleyicidir. (International Labour Organization, 2024; International Ergonomics Association, n.d.-b)

Tarım tarihsel olarak en tehlikeli iş kollarından biri olagelmiştir. Uluslararası Çalışma Örgütü, tarımın hem yoğun fiziksel emek hem de makine, kimyasal, iklim ve arazi temelli çoklu maruziyetler nedeniyle yüksek riskli bir sektör olduğunu vurgulamaktadır. Mekanizasyon, özellikle ağır işlerin ve el emeğinin bir bölümünün yükünü azaltmış olsa da risk profilini ortadan kaldırmamış; aksine uzun süreli oturma, tüm vücut titreşimi, el-kol titreşimi, yüksek gürültü, bilişsel yük ve bakım-arıza anlarında yakın temaslı tehlikeler gibi yeni ya da dönüşmüş riskler üretmiştir. Bu nedenle tarım makinalarının değerlendirilmesinde "daha güçlü makine" yaklaşımından "insan-makine-çevre uyumu" yaklaşımına geçmek zorunludur. (International Labour Organization, 2015; Benos ve ark., 2020)

2. Yöntem

Bu çalışma derleme makalesi olarak tasarlanmıştır. İçerik oluşturulurken kurumsal belgelere; son beş yıla ilişkin eğilimleri değerlendirmek için ise SGK, BLS, HSE, ILO ve EU-OSHA gibi resmî veri kaynaklarına başvurulmuştur. Tarım makinalarında ergonomi, titreşim, kas-iskelet sistemi bozuklukları, iş kazaları ve operatör sağlığı konularındaki hakemli güncel çalışmalar da değerlendirmeye dahil edilmiştir (Bureau of Labor Statistics, 2026a, 2026b; European Agency for Safety and Health at Work, 2025; Health and Safety Executive, 2025a, 2025b; International Ergonomics Association, 2026-a,b; International Labour Organization, 2023-2024; Sosyal Güvenlik Kurumu, 2025)

Resmî veri sistemlerinde doğrudan ve standart bir "ergonomi kaynaklı kaza" sınıfı her ülkede bulunmadığından, bu makalede ergonomiyle güçlü nedensel bağ kurulan göstergeler kullanılmıştır. Bunlar arasında iş ilişkili kas-iskelet sistemi bozuklukları, aşırı zorlanma, tekrarlayıcı hareket, tüm vücut titreşimi, uzun süreli oturma, sırt vakaları ve tarım sektöründeki iş kazaları yer almaktadır. Türkiye bölümünde SGK yıllıklarından NACE 01, 02 ve 03 grupları birleştirilerek tarım/ormancılık/balıkçılık sektörü için beş yıllık karşılaştırmalı çizelge oluşturulmuştur. (Benos ve ark., 2020; Ekmekci ve Yaman, 2024; Sosyal Güvenlik Kurumu, 2025)

Tarama Aşaması	Yayın Sayısı (n)
Scopus'tan elde edilen kayıtlar	419
Web of Science'tan elde edilen kayıtlar	338
ScienceDirect'ten elde edilen kayıtlar	267
Google Scholar'dan elde edilen kayıtlar	689
ResearchGate'ten elde edilen kayıtlar	121
Toplam kayıt	**1.834**
Yinelenen (duplicate) kayıtlar çıkarıldı	655
Kalan kayıtlar	**1.179**
Başlık ve özet incelemesine alınan kayıtlar	980
Konuyla doğrudan ilişkili olmayan çalışmalar çıkarıldı	736
Tam metni incelenen çalışmalar	**244**
Tam metnine ulaşılamayan çalışmalar	150
İnsan sağlığı veya ergonomik risk verisi içermeyen çalışmalar	48
Tarım makinaları dışında kalan çalışmalar	20
Derleme kriterlerini karşılamayan çalışmalar	9
Nitel senteze dahil edilen çalışmalar	**17**

3. Ergonominin Tarihsel Gelişimi

Ergonomi kavramı etimolojik olarak Yunanca “ergon” (iş) ve “nomos” (yasalar) sözcüklerinden türetilmiştir. Alanın kurumsal gelişimi ise özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrasında ivme kazanmıştır. Uluslararası Ergonomi Birliği'nin aktardığına göre İngiltere'de 1949'da kurulan Ergonomics Research Society, alanın kurumsallaşmasında belirleyici olmuş; 1957'de Leyden'deki toplantılarda uluslararası birlik fikri olgunlaşmış; 1959'da hazırlık komitesinin ilk toplantısı yapılmış ve 1961 Stockholm Genel Kurulu ile IEA fiilen düzenli çalışma dönemine geçmiştir. Söz konusu çizgi, ergonominin zanaat

deneyiminden sistematik bilimsel tasarıma evrilmesini temsil eder. (International Ergonomics Association, 2026-a)

Ergonominin ilk dönemleri ağırlıklı olarak fiziksel yük, antropometri, koltuk tasarımı, kumanda yerleşimi ve kuvvet gereksinimi gibi konulara odaklanırken, 2000 yılında benimsenen IEA tanımı bu alanı fiziksel, bilişsel ve örgütsel boyutları kapsayacak biçimde genişletmiştir. Böylece ergonomi yalnızca "rahat koltuk" ya da "uygun yükseklikte tezgâh" tasarımı olmaktan çıkıp, karar verme, zihinsel iş yükü, vardiya düzeni, ekip koordinasyonu, eğitim ve güvenlik kültürü gibi başlıkları da içeren bir sistem tasarımı disiplinine dönüşmüştür. Tarım makineleri açısından bu genişleme önemlidir; çünkü operatör sağlığı üzerinde yalnızca titreşim ve postür değil, iş yoğunluğu, zaman baskısı, bakım davranışı ve risk algısı da doğrudan etkilidir. (International Ergonomics Association, 2026-b; International Labour Organization, 2024)

4. Tarım Alet ve Makinalarında Başlıca Ergonomik Sorun Alanları

Mekanizasyonun kullanıldığı tüm tarımsal çalışmalarda en sık tartışılan sorun tüm vücut titreşimi olmuştur. Traktörler, biçerdöverler, arazi araçları ve çeşitli çekili-ekipman kombinasyonları düzensiz zeminlerde çalıştığı için operatörler hem sürekli titreşime hem de ani mekanik şoklara maruz kalmaktadırlar. Annals of Work Exposures and Health'te yayımlanan saha ölçümleri, tarım makinaları kullanımında yüksek düzeyde titreşim ve gövde postürü değişkenliği bulunduğunu; bu maruziyetlerin özellikle bel bölgesinde kas-iskelet yüklenmesini artırdığını göstermektedir. Titreşim, kötü koltuk süspansiyonu, hız, arazi pürüzlülüğü ve uygunsuz oturma ile birleştiğinde biyomekanik yük daha da büyür. (Fethke ve ark., 2018; Benos ve ark., 2020)

İkinci temel sorun, operatör-makine uyumsuzluğudur. Tarım makinalarında direksiyon, pedal, debriyaj, vites, hidrolik kumandalar, ekranlar ve aynalar farklı beden ölçülerine sahip kullanıcılar için her zaman uygun konumlandırılmamaktadır. Antropometrik uyumsuzluk; omuz elevasyonu, gövde rotasyonu, ileri uzanma, bilek deviasyonu ve ayakta/oturarak dengesiz çalışma gibi zorlayıcı duruşlar üretir. Özellikle sık binme-inme, ekipman takma-sökme, yük bağlama, kuyruk mili çevresinde çalışma ve bakım sırasında diz, bel ve omuz üzerine binen yük belirgin biçimde artabilir. Kısa vadede yorgunluk, uzun vadede ise kronik ağrı ve iş kapasitesi kaybıyla sonuçlanabilir (Benos ve ark., 2020; International Labour Organization, 2024)

Yürüyerek kullanılan ya da elde taşınan ekipmanlarda tablo biraz değişir: el-kol titreşimi ve tekrarlayıcı hareket daha baskın hale gelir. Motorlu tırpanlar, budama ekipmanları, hasat yardımcıları ve benzeri araçlarda kavrama kuvveti, yineleyici üst ekstremite hareketleri ve lokal titreşim birlikte seyreder. Söz konusu birleşim omuz, dirsek, önkol, el ve bilek bölgesinde ağrı, uyuşma, kuvvet kaybı ve ince işlev bozukluklarına yol açabilir. Benos ve arkadaşlarının derlemesi, sürücü koltuğu bulunan makinalarda baskın şikâyetin bel kaynaklı

bozukluklar olduğunu; el tipi makinalarda ise üst ekstremite bozukluklarının öne çıktığını ve ana mekanizmanın sırasıyla tüm vücut titreşimi ile el-kol titreşimi olduğunu ortaya koymaktadır (Benos ve ark., 2020).

Tarım ergonomisini yalnızca fiziksel riskler üzerinden tartışmak eksik kalır. Açık alanda çalışmak, güneş, sıcaklık, toz, çamur, rüzgâr, nem ve düşük görüş kaynaklı çevresel baskılar ortaya çıkarır. Kabin yalıtımı zayıf olduğu makinalarda gürültü ve termal yük artar; yoğun sezonda uzayan çalışma saatleri, yetersiz mola ve zaman baskısı da dikkat kaybına yol açar. Böyle bir ortamda fiziksel zorlanma ile bilişsel yorgunluk birbirini besler ve kaza olasılığı yükselir. Bu yüzden tarım makinası ergonomisi, oturma ve kumanda tasarımıyla sınırlı düşünülmemeli; çalışma süresi, bakım düzeni, eğitim ve güvenlik kültürü de hesaba katılmalıdır. (International Labour Organization, 2024; Ekmekci ve Yaman, 2024)

Çizelge 1. Tarım alet ve makinalarında başlıca ergonomik sorun alanları ve olası sağlık etkileri

Ergonomik sorun alanı	Tipik maruziyet / örnek durum	Olası sağlık etkileri
Tüm vücut titreşimi	Traktör, biçerdöver ve arazi araçlarında düzensiz zemin, yüksek hız ve zayıf koltuk süspansiyonu	Bel ağrısı, disk yüklenmesi, yorgunluk, denge bozukluğu
Uygunsuz oturuş ve duruş	İleri uzanma, gövde rotasyonu, pedal ve kumandaya zor erişim, sık binme-inme	Boyun, omuz, sırt ve diz sorunları; kronik kas-iskelet sistemi yakınmaları
El-kol titreşimi ve tekrarlayıcı hareket	Motorlu tırpan, budama, taşıma ve tekrar eden kontrol hareketleri	El-bilek ağrısı, uyuşma, kavrama gücü kaybı, üst ekstremite bozuklukları
Ağır kaldırma ve manuel taşıma	Parça değişimi, ekipman bağlama, yükleme-boşaltma, bakım işlemleri	Bel zorlanması, kas gerilmesi, akut incinmeler
Gürültü ve çevresel yük	Yüksek motor sesi, toz, sıcaklık, kötü görüş, uzun vardiya	İşitme riski, dikkat azalması, hata ve kaza olasılığında artış

Not. Çizelge, mekanize tarım ergonomisi literatüründeki baskın risk kümeleri özetlenerek yazar tarafından oluşturulmuştur. (Benos ve ark., 2020; Fethke ve ark., 2018)

5. Ergonomik Sorunların İnsan Sağlığına Etkileri

Tarım makinalarına bağlı ergonomik maruziyetlerin en görünür sonucu kas-iskelet sistemi bozukluklarıdır. Bel, boyun, omuz, sırt, diz ve üst ekstremitelerde ortaya çıkan ağrı ve işlev kaybı ilk aşamada geçici yakınmalar biçiminde görülse de, maruziyet sürdüğünde kalıcı hasarlara yol açan bir rahatsızlığa dönüşebilir. Örneğin İngiltere 'de, iş ile ilişkili kas-iskelet sistemi hastalıklarının hâlâ en yaygın mesleki sağlık yüklerinden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Sürücüler üzerine yapılan güncel meta-analizler de uygunsuz oturma, uzun günlük çalışma süresi, yetersiz sırt desteği ve manuel yük taşımanın bel ağrısı riskini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir (Health and Safety Executive, 2025-a; Jia ve ark., 2024). Türkiye'de sürücüler üzerinde yapılan kesitsel araştırmalar da bu ilişkiyi desteklemektedir. İzmir'de 447 taksi sürücüsü ile yürütülen çalışmada son bir yılda bel ağrısı prevalansı %49,7 bulunmuş; on yıldan fazla çalışma (OR=3,23), haftalık dinlenme gününün olmaması (OR=3,11), fiziksel aktivite eksikliği ve sürücü koltuğunda lumbar desteğin bulunmaması (OR=1,67) anlamlı risk etmenleri olarak tanımlanmıştır (Kurtul ve Güngördü, 2022).

6. Son Beş Yılda Dünyada ve Türkiye'de Ergonomi İlişkili Göstergeler

Bu bölümde kullanılan sayılar, doğrudan her ülkede ayrı bir "ergonomi kazası" sınıfı bulunduğu varsayımına dayanmamaktadır. Uygulamada resmî veri üretim sistemleri çoğu zaman olayı "aşırı zorlanma", "tekrarlayıcı hareket", "gün kayıplı bel-sırt vakası", "iş ilişkili kas-iskelet sistemi bozukluğu", "uzun süreli oturma" ya da sektör bazlı iş kazası olarak raporlar. Bu nedenle aşağıdaki çizelgeler, ergonomi ile güçlü nedensel bağı bulunan uluslararası resmî göstergeleri ve Türkiye'ye ilişkin sektör/alan verilerini birlikte değerlendirmektedir. Böyle bir yaklaşım, veri sınırlılıklarını görünür kılarken eğilimleri izlemeyi de mümkün hale getirmektedir. (Bureau of Labor Statistics, 2026-a,b; Health and Safety Executive, 2022, 2025-a,b; International Labour Organization, 2023)

Çizelge 2. Son beş yılda dünyadan seçilmiş ergonomi ilişkili resmi göstergeler

Yıl / dönem	Kurum / bölge	Ergonomi ilişkili resmi gösterge	Bulgular
2021/22	HSE, Büyük Britanya	İş ilişkili kas-iskelet sistemi bozukluğu	477.000 çalışan; tarım/ormancılık/ balıkçılık ortalamanın üzerinde risk grupları arasında
2021-2022	BLS, ABD	Aşırı zorlanma ve bedensel tepkiye bağlı DART vakaları	1.001.440 vaka; 521.350 vaka en az bir gün işten

			uzak kalma ile sonuçlandı
2023	ILO, dünya	İş kaynaklı ölüm ve yaralanma yükü	Yıllık 2,93 milyon ölüm ve 395 milyon ölümcül olmayan iş yaralanması; ölümcül iş kazalarının üçte biri tarım işçilerinde
2023/24	HSE, Büyük Britanya	Kas-iskelet sistemi kaynaklı iş günü kaybı	7,8 milyon gün kaybı
2024	BLS, ABD	Gün kayıplı yaralanmalarda burkulma/gerilme/yırtılma ve sırt vakaları	568.150 burkulma-gerilme-yırtılma; 248.180 sırt vakası; medyan 8 gün işten uzak kalma
2024/25	HSE, Büyük Britanya	İş ilişkili kas-iskelet sistemi bozukluğu	511.000 çalışan; 7,1 milyon iş günü kaybı
2025 (ESENER 2024)	EU-OSHA, Avrupa	İşyerlerinde başlıca ergonomik risk maruziyetleri	Uzun süreli oturma %64; tekrarlayıcı el/kol hareketleri %63

Not. DART: Days Away, Restriction or Transfer. Çizelgede dogrudan ergonomi etiketiyle değil, ergonomiyle yakin iliskili resmi gostergeler derlenmistir. (Bureau of Labor Statistics, 2026-a, 2026-b; European Agency for Safety and Health at Work, 2025; Health and Safety Executive, 2022, 2025-a, 2025-b; International Labour Organization, 2023)

Uluslararası göstergeler, ergonomi kaynaklı yükün geçici değil yapısal olduğunu göstermektedir. Büyük Britanya'da 2021/22 dönemindeki 477 bin iş ilişkili kas-iskelet sistemi bozukluğu sayısının 2024/25'te 511 bine çıkmış olması, sorunun otomasyon ve dijitalleşme ile kendiliğinden çözülmediğini ortaya koymaktadır. ABD'de ise hem 2021-2022 hem 2023-2024 dönemlerinde aşırı zorlanma, tekrarlayıcı hareket ve bedensel reaksiyon grubu en yüksek DART nedenleri arasında kalmıştır. Avrupa işletme anketlerinde uzun süreli oturma ve tekrarlayıcı el-kol hareketlerinin hâlâ en sık raporlanan riskler olması da, ergonomik maruziyetlerin çağdaş iş sistemlerinde biçim değiştirerek sürdüğünü düşündürmektedir. (Bureau of Labor Statistics, 2026-a; European

Agency for Safety and Health at Work, 2025; Health and Safety Executive, 2025-a,b)

Çizelge 3. SGK 4/1-a verilerine göre Türkiye'de tarım/ormancılık/balıkçılık sektöründe iş kazası ve meslek hastalığı sayıları, 2020-2024

Yıl	Tarım/ ormancılık/ balıkçılık iş kazası	Tarım/ ormancılık/ balıkçılık meslek hastalığı	Türkiye toplam iş kazası	Türkiye toplam meslek hastalığı
2020	3.331	2	384.262	908
2021	4.258	1	511.084	1.207
2022	4.610	2	588.823	953
2023	5.337	1	681.401	945
2024	6.134	3	733.646	888

Not. Tarım/ormancılık/balıkçılık sütunu, SGK yıllıklarındaki NACE 01, 02 ve 03 ana gruplarının toplamıdır; çizelge yazar tarafından SGK tabloları üzerinden derlenmiştir. Kapsam yalnızca 5510 sayılı Kanunun 4/1-a maddesi altındaki sigortalıları içerir. (Sosyal Güvenlik Kurumu, 2025)

Türkiye'de resmî kayıtlar, tarım/ormancılık/balıkçılık grubunda 2020'de 3.331 olan iş kazası sayısının 2024'te 6.134'e yükseldiğini, yani beş yıllık dönemde yaklaşık %84,2 arttığını göstermektedir. Aynı dönemde Türkiye genel toplam iş kazaları da 384.262'den 733.646'ya çıkmıştır. Buna karşılık tarım/ormancılık/balıkçılık için kaydedilen meslek hastalığı sayısı 1 ile 3 arasında kalmış; Türkiye toplamı da 2021'de 1.207 iken 2024'te 888'e gerilemiştir. Ergonomik risklerin yüksek olduğu ve uluslararası literatürde kas-iskelet sistemi sorunlarının yaygın biçimde raporlandığı bir sektörde bu kadar düşük meslek hastalığı sayıları, gerçek yükün düşük olmasından çok tanı, bildirim ve kayıt eksikliğine işaret etmektedir. (Benos ve ark., 2020; Sosyal Güvenlik Kurumu, 2025)

Bu tablo yorumlanırken iki sınırlılık özellikle dikkate alınmalıdır. Birincisi, SGK 4/1-a verileri ücretli sigortalı çalışanları kapsadığından, aile işçiliği, küçük üreticilik, mevsimlik çalışma ve kayıt dışı istihdamın yaygın olduğu tarımsal emek yapısının tamamını yansıtmaz. İkincisi, resmî istatistiklerde "ergonomi" bağımsız bir neden kodu olarak yer almadığı için; bel-sırt yakınmaları, tekrarlayıcı üst ekstremite sorunları veya titreşim kaynaklı tablolar çoğu zaman genel meslek hastalığı kayıtları içinde görünmez kalır. Dolayısıyla Türkiye'de nicel olarak düşük görünen meslek hastalığı rakamları, ihtiyatla okunmalı ve saha araştırmalarıyla birlikte değerlendirilmelidir. (Ekmekci ve Yaman, 2024; Sosyal Güvenlik Kurumu, 2025)

Çizelge 4. Son beş yılda Türkiye'den seçilmiş saha araştırmaları

Yıl / çalışma	Örneklem	Ergonomi ilişkili temel bulgu	Yorum
2022, İzmir taksi sürücüleri	447 sürücü	Son bir yılda bel ağrısı prevalansı %49,7; >10 yıl çalışma OR=3,23; haftalık dinlenme yok OR=3,11; lumbar destek yok OR=1,67	Uzun süreli oturma, yetersiz dinlenme ve koltuk desteği eksikliği Türkiye'de mekanik/oturma temelli bel yükünü doğrulamaktadır
2024, Orta Anadolu çiftçileri	366 çiftçi	Son bir yılda iş kazası geçirme oranı %33,0; PPE eksikliği %51,5; ulaşım ilişkili sorunlar %36,4; >8 saat/gün ve ≥5 gün/hafta çalışma kaza olasılığını artırdı	Tarımda ergonomi, yalnızca makine tasarımı değil çalışma süresi, ulaşım ve koruyucu uygulamalarla birlikte ele alınmalıdır

Not. İkinci çizelgedeki sürücü çalışması tarım makinası operatörlerini doğrudan içermemekle birlikte, uzun süreli oturma, titreşim, yetersiz dinlenme ve koltuk desteği gibi maruziyet örüntüleri nedeniyle destekleyici kanıt olarak kullanılmıştır. (Ekmekci ve Yaman, 2024; Kurtul ve Güngördü, 2022)

Türkiye'den son yıllardaki saha verileri, resmî istatistiklerde görünmeyen ergonomik yükü daha net ortaya koymaktadır. Orta Anadolu'daki çiftçilerde son bir yılda iş kazası oranının %33,0 olması; kişisel koruyucu donanım eksikliği, ulaşım sorunları ve uzun çalışma sürelerinin belirgin risk etmenleri olarak öne çıkması, ergonominin tarımda yalnızca koltuk tasarımı veya makine standardı meselesi olmadığını göstermektedir. Aynı şekilde, İzmir'deki sürücülerde bel ağrısının yaklaşık her iki çalışandan birinde görülmesi; dinlenme düzeni, koltuk desteği ve uzun mesleki maruziyetin önemini teyit etmektedir. Bu bulgular, tarım makineleri için koltuk-süspansiyon, erişim ve mola yönetimi politikalarının birlikte ele alınmasını gerekli kılmaktadır. (Ekmekci ve Yaman, 2024; Kurtul ve Güngördü, 2022)

7. Tartışma ve İyileştirme Öncelikleri

Değerlendirilen bulgular, tarım makinalarında ergonomik sorunların üç katmanda üretildiğini göstermektedir: tasarım, kullanım ve sistem düzeyi. Tasarım düzeyinde koltuk süspansiyonu, kumanda yerleşimi, basamak ve tutamak geometrisi, kabin görüşü, gürültü yalıtımı ve titreşim sönümleme kritik önemdedir. Kullanım düzeyinde hız seçimi, bakım alışkanlıkları, ekipman bağlama-sökme pratikleri, kişisel koruyucu kullanım ve mola davranışı belirleyicidir. Sistem düzeyinde ise iş yoğunluğu, mevsimsel baskı, uzun çalışma saatleri, informal istihdam ve sağlık gözetimi eksikliği öne çıkar. Bu üç düzeyden

yalnızca birine müdahale etmek, sorunu kalıcı olarak çözmemektedir. (Benos ve ark., 2020; International Labour Organization, 2024)

Makine tasarımı açısından öncelik; ayarlanabilir ve çok eksenli titreşim sönümleme kapasitesi olan operatör koltukları, farklı beden ölçülerine uyarlanabilir kumanda bölgeleri, düşük eforlu pedal ve manivela sistemleri, kaymaz yüzeyli erişim basamakları ve güvenli iniş-biniş geometrileridir. Ekran ve uyarı sistemlerinde bilişsel ergonomi ilkeleri gözetilmeli, bilgi yükü sadeleştirilmeli ve kritik uyarılar görsel-işitsel açıdan ayrıştırılmalıdır. El tipi ekipmanlarda ise ağırlık, tutma çapı, denge noktası ve titreşim emici yapıların iyileştirilmesi, üst ekstremite zorlanmasını azaltmada doğrudan etkilidir. Tasarımın erken aşamasında ergonominin yer almaması, sonradan eğitim veya davranış çağrılarıyla tam olarak telafi edilemez. (International Ergonomics Association, 2026-b; Benos ve ark., 2020)

Türkiye için en kritik politika alanlarından biri veri kalitesidir. Tarım sektöründe özellikle 4/1-a dışındaki çalışan gruplar, kayıt dışılık ve aile emeği nedeniyle mevcut istatistiklerin dışında kalabilmektedir. Bu nedenle kas-iskelet sistemi yakınmaları, bel-boyun ağrısı, titreşim maruziyeti ve işlev kaybı gibi ergonomi ilişkili göstergelerin periyodik taramalarla desteklenmesi; tarım il müdürlükleri, iş sağlığı birimleri ve sosyal güvenlik kurumları arasında daha bütünleşik bir kayıt sistemi kurulması gereklidir. Bunun yanında operatör eğitimi, zorunlu dinlenme araları, tarla içi ulaşım güvenliği, bakım-onarım protokolleri ve kadın/yaşlı operatörler için antropometrik uygunluk standartlarının geliştirilmesi önleyici etkinliği artıracaktır. (Ekmekci ve Yaman, 2024; Sosyal Güvenlik Kurumu, 2025)

8. Sonuç

Tarım alet ve makinalarında ergonomi sorunu, makineleşmenin yan ürünü değil; insan gereksinimleri gözetilmeden yapılan mekanizasyonun doğal sonucudur. Tarihsel olarak ergonomi, fiziksel iş tasarımından bilişsel ve örgütsel tasarıma doğru genişlemiş; günümüzde güvenli, verimli ve sürdürülebilir çalışma sistemleri kurmanın temel araçlarından biri haline gelmiştir. Tarım sektöründe ise bu ihtiyaç daha belirgindir; çünkü operatör, makine ve çevre eşzamanlı olarak değişken, öngörülmesi zor ve yüksek yük üreten bir sistem oluşturur. (International Ergonomics Association, 2026-a, b; International Labour Organization, 2024)

Son beş yıllık veriler ve saha araştırmaları birlikte değerlendirildiğinde, kas-iskelet sistemi bozukluklarının ve ergonomiyle ilişkili iş kazalarının hem dünyada hem Türkiye'de önemini koruduğu görülmektedir. Türkiye'de tarım/ ormancılık /balıkçılık sektöründe iş kazalarının artmasına rağmen kayıtlı meslek hastalıklarının çok düşük seyretmesi, görünürdeki güvenliği değil; büyük olasılıkla eksik tanı ve eksik bildirimi yansıtmaktadır. Bu nedenle etkili bir çözüm; daha iyi koltuk ve kumanda tasarımı, titreşim-gürültü kontrolü, yeterli

mola ve eğitim, sektör özgül veri toplama ve sağlık gözetimini birlikte içeren çok katmanlı bir ergonomi politikası gerektirir. (Bureau of Labor Statistics, 2026a-b; Ekmekci ve Yaman, 2024; Health and Safety Executive, 2025a-b; Sosyal Güvenlik Kurumu, 2025)

Kaynaklar

1. Benos, L., Tsaopoulos, D., ve Bochtis, D. (2020). A review on ergonomics in agriculture. Part II: Mechanized operations. Applied Sciences, 10(10), 3484. https://doi.org/ 10.3390/app10103484
2. Bureau of Labor Statistics. (2026-a). Employer-reported workplace injuries and illnesses, 2023-2024. U.S. Department of Labor. https://www.bls.gov/news. release/osh.nr0.htm
3. Bureau of Labor Statistics. (2026-b). Injuries, illnesses, and fatalities: IIF home. U.S. Department of Labor. https://www.bls.gov/iif/oshcdnew.htm
4. Ekmekci, M., ve Yaman, S. (2024). Occupational health and safety among farmers: A comprehensive study in Central Anatolia, Turkey. BMC Public Health, 24, 2732. https://doi.org/10.1186/s12889-024-20249-7
5. European Agency for Safety and Health at Work. (2025). Prolonged sitting, psychosocial risks and digitalisation top workplace safety and health concerns, new EU survey reveals. https://osha.europa.eu/en/about-eu-osha/press-room/prolonged-sitting-psychosocial-risks-and-digitalisation-top-workplace-safety-and-health-concerns-new-eu-survey-reveals
6. Fethke, N. B., Schall, M. C., Merlino, L. A., Chen, H., Branch, C. A., ve Ramaswamy, M. (2018). Whole-body vibration and trunk posture during operation of agricultural machinery. Annals of Work Exposures and Health, 62(9), 1123-1133. https://doi.org/10.1093/annweh/wxy076
7. Health and Safety Executive. (2022). Health and safety at work: Summary statistics for Great Britain 2022. https://www.hse.gov.uk/statistics/assets/docs/hssh2122.pdf
8. Health and Safety Executive. (2025-a). Key figures for Great Britain 2024 to 2025. https://www.hse.gov.uk/statistics/overview.htm
9. Health and Safety Executive. (2025-b). Working days lost in Great Britain. https://www.hse.gov.uk/statistics/ dayslost.htm
10. International Ergonomics Association. (2026-a). Mission, strategies and history. https://iea.cc/about/introduction/
11. International Ergonomics Association. (2026-b). What is ergonomics? https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/
12. International Labour Organization. (2015). Agriculture: A hazardous work. https://www.ilo.org/resource/agriculture-hazardous-work-0
13. International Labour Organization. (2023). Nearly 3 million people die of work-related accidents and diseases. https://www.ilo.org/resource/news/nearly-3-million-people-die-work-related-accidents-and-diseases

14. International Labour Organization. (2024). Ergonomics. https://www.ilo.org/ergonomics

15. Jia, J., Zhang, M., Cao, Z., Yang, Z., Hu, X., Lei, S., Zhang, Y., Leng, W., Kang, X., ve ark. (2024). Prevalence of and risk factors for low back pain among professional drivers: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 19, 551. https://doi.org/10.1186/s13018-024-04999-z

16. Kurtul, S., ve Güngördü, N. (2022). Low back pain and risk factors among taxi drivers in Turkey: A cross-sectional study. La Medicina del Lavoro, 113 (3), e2022025. https://doi.org/10.23749/mdl.v113i3.12859

17. Sosyal Güvenlik Kurumu. (2025). İstatistik yıllıkları. https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4

BÖLÜM 16

Toprak ve Toprak İlişkili Doğal Hammaddelerin Terapi ve Rehabilitasyon Alanındaki Potansiyel Kullanımları

Serdar Sarı[1]

[1] Doç. Dr., Iğdır Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü
ORCİD: 0000-0002-9990-7918

1. Toprak ve Toprağın Kullanım Alanları

Toprak yeryüzünün büyük bir kısmını ince bir örtü halinde kaplayan, iklim, canlılar, topografik koşullar, ana materyal ve zamanın etkileşimi ile oluşmuş kendine özgü özelliklere sahip üç boyutlu, üç fazlı, canlı, dinamik doğal bir bütündür (Baillie, 2001; FAO, 2026). Ana materyal toprağın mineralojik ve kimyasal özelliklerinin temelini oluştururken, iklimsel parametreler toprak oluşum süreçlerinin hızını ve gelişimini, topografik koşullar toprak derinliğini ve drenaj özelliklerini, organizmalar organik maddenin ayrışması ve besin elementlerinin döngüsünü, zaman ise profil gelişimi, horizonlaşma ve pedojenik süreçleri şekillendirmektedir (SSSA, 2008; FAO, 2015; Hartemink, 2016).

Toprağın katı fazını mineral ve organik madde, sıvı fazını toprak çözeltisi (çözünmüş maddeler), gaz fazını ise oksijen, CO_2, su buharı ve diğer çeşitli gazlar oluşturmaktadır. Bu üç fazın birbirleri ile olan oranı ve etkileşimi, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik davranışını etkilemektedir (FAO, 2015).

Toprağın fiziksel özellikleri tekstür, strüktür, porozite, hacim ağırlığı, su tutma kapasitesi ve geçirgenliği; kimyasal özellikleri pH, elektriksel iletkenlik, katyon değişim kapasitesi, organik madde, karbonatlar ve besin elementi içeriklerini; biyolojik özellikleri ise mikroorganizmalar, toprak faunası ve bitki köklerini kapsamaktadır (USDA-NRCS, 1996; SSSA, 2008). Bu özellikler, toprak oluşum faktörleri ve çevresel koşulların etkisiyle dikey ve yatay yönde, ayrıca zaman içinde değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla toprak belirgin mekânsal ve zamansal değişkenliğe sahip heterojen bir doğal sistemdir (Corwin & Lesch, 2005; Si, 2008).

Toprağın sahip olduğu özellikler, kullanım amacını belirlemekle beraber farklı sektörlerde doğal kaynak veya hammadde olarak değerlendirilmesine de olanak sağlamaktadır (Blum, 2005).

Karasal gıda üretiminin temel bileşenlerinden biri olan toprak; suyun depolanması ve filtrelenmesi, iklimin düzenlenmesi, biyoçeşitliliğin korunması, karbonun tutulması ve insan yaşamının sürdürülebilirliği açısından da önemli bir kaynaktır (Dominati et al., 2010; Adhikari & Hartemink, 2016).

Toprakla ilişkili doğal hammaddeler; toprakla fiziksel, kimyasal, mineralojik veya oluşumsal açıdan ilişkili olan, ancak her zaman toprak olarak sınıflandırılmayan ve özgün özellikleri nedeniyle doğal hammadde olarak değerlendirilebilen materyalleri ifade etmektedir. Bu materyaller ana materyalden köken alabileceği gibi, ayrışma ve pedojenik süreçler sonucunda oluşmuş veya değişime uğramış mineral ve organik materyalleri de kapsayabilir (Olson, 2004; Kühn and Eberhardt, 2023).

Toprağın katı fazındaki minerallerin önemli bir bölümünü primer ve sekonder mineraller oluşturur. Primer mineraller ana materyalden miras alınmış ve toprak oluşumu sırasında kimyasal yapıları büyük ölçüde korunmuş minerallerdir;

özellikle kum ve silt fraksiyonlarında yaygındır. Sekonder mineraller ise primer minerallerin ayrışması, dönüşümü veya ayrışma ürünlerinin yeniden çökelmesiyle oluşur ve çoğunlukla kil fraksiyonunda bulunur. Bu mineraller tane boyutu dağılımı, özgül yüzey alanı, yüzey özellikleri ve kimyasal reaksiyonları önemli ölçüde etkiler (Schaetzl & Thompson, 2015; Sparks, 2019).

Toprak organik maddesi; bitkisel ve hayvansal kalıntılar, mikroorganizmalar ve bunların ayrışma ürünlerinden oluşan, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini şekillendiren temel bir bileşendir. Organik girdiler topraktaki biyolojik ve kimyasal süreçlerle sürekli dönüşür; bir bölümü ayrışırken bir bölümü mineral yüzeyleriyle etkileşerek daha kararlı formlarda birikir. Organik maddenin miktarı, niteliği ve ayrışma derecesi agregat stabilitesi, su tutma kapasitesi, besin elementi dönüşümü ve mikrobiyal aktivite üzerinde etkilidir (Lehmann & Kleber, 2015; Paul, 2016).

Ana materyal, çevresel koşullar, oluşum süresi ve mineral-organik madde etkileşimleri toprakların farklı özellikler kazanmasına neden olur. Bu özellikler hem ekosistem işlevlerini hem de insanların topraktan yararlanma biçimlerini etkileyerek farklı kullanım alanlarının ortaya çıkmasını sağlar (Wilson, 2019; Kleber et al., 2021).

Toprağın mineralojik, fiziksel, kimyasal ve biyolojik çeşitliliği, bitki yetiştirme ortamı olarak kullanımının yanı sıra farklı kullanım olanaklarının ortaya çıkmasına da katkı sağlamaktadır. Toprakla ilişkili mineraller ve organik bileşenler seramik, porselen, yapı malzemeleri, çimento, cam ve döküm sanayinde; özellikle kil mineralleri ise yüksek özgül yüzey alanı, adsorpsiyon, iyon değişimi ve reolojik[2] özellikleri nedeniyle farmasötik, kozmetik ve terapötik uygulamalarda değerlendirilebilmektedir (Carretero, 2002; López-Galindo & Viseras, 2004; Moraes et al., 2017).

Bu kullanım potansiyelinde toprağın bütünsel özelliklerinin yanı sıra mineral ve organik bileşenlerin mineralojik yapısı, tane boyutu, yüzey alanı ve kimyası, adsorpsiyon, plastisite ve reolojik davranış gibi özellikleri önemli rol oynamaktadır (Murray, 1991, 2000; Wilson, 2019; Kleber et al., 2021). Bu nedenle toprak olarak sınıflandırılmayan ancak toprakla oluşumsal, mineralojik veya fizikokimyasal açıdan ilişkili olan materyaller de doğal kaynak ve hammadde olarak değerlendirilebilir.

Bu kapsamda toprak oluşumu ve gelişimiyle ilişkili mineral, organik ve jeolojik kökenli materyaller, bölümün amacı doğrultusunda işlevsel gruplar altında ele alınmıştır (Tablo 1).

[2] Reolojik; akış ve şekil değiştirme özellikleri

Tablo 1. Toprak, toprak bileşenleri ve toprakla ilişkili doğal materyallerin işlevsel gruplandırılması

Grup	Tanımı / temel özelliği	Örnekler	Temel kaynaklar
Toprak	Pedojenik süreçler sonucunda oluşmuş; katı, sıvı ve gaz fazlarını içeren, üç boyutlu ve dinamik doğal sistem.	Tarım, orman ve mera toprakları	Soil Survey Staff (2014)
Primer mineraller	Ana materyalden miras alınan ve pedojenik süreçler sırasında yapısal/kimyasal değişime nispeten daha az uğramış mineraller.	Kuvars, feldispatlar, mikalar	Nanzyo & Kanno (2018a)
Sekonder mineraller	Primer minerallerin ayrışması ve dönüşümü veya ayrışma ürünlerinden yeni mineral oluşumu sonucunda gelişen mineraller.	Smektit, kaolinit, bazı illitler, Fe/Al oksit ve oksihidroksitleri	Nanzyo & Kanno (2018b)
Toprak organik bileşenleri	Bitkisel, hayvansal ve mikrobiyal kökenli organik girdiler ile bunların ayrışma ve dönüşüm ürünleri.	Bitki ve hayvan kalıntıları, mikrobiyal biyokütle ve dönüşüm ürünleri	Paul (2016)
Toprakla ilişkili doğal mineral ve organik hammaddeler	Toprak sistemi, ana materyal veya yüzeye yakın jeolojik oluşumlarla mineralojik/oluşumsal ilişkisi bulunabilen ve özellikleri nedeniyle hammadde olarak değerlendirilebilen doğal materyaller.	Kil ve kilce zengin materyaller, diatomit, zeolit, kum-çakıl, turba	Murray (2000); Kühn & Eberhardt (2023)*
Subsolum ve ayrışmış ana materyaller	Solumun altında veya onunla geçişli olarak bulunan; ana materyalin ayrışma derecesine bağlı olarak farklı özellikler gösteren materyaller.	Regolit, saprolit, saprock	Juilleret et al. (2016)

Not. *Bu gruplandırma bir toprak taksonomisi veya mevcut toprak sınıflandırma sistemlerine alternatif bir sınıflandırma değildir. Bölüm kapsamında toprak, toprağın mineral ve organik bileşenleri ile toprakla ilişkili doğal materyaller arasındaki ilişkilerin ve bunların potansiyel kullanım alanlarının birlikte değerlendirilebilmesi amacıyla oluşturulmuş işlevsel ve kavramsal bir gruplandırmadır. Gruplar arasında oluşumsal ve mineralojik açıdan örtüşmeler bulunabilir.*

** Kühn & Eberhardt (2023), doğrudan bir "doğal hammadde" sınıflandırması yapmamakta; soil solid material kavramının sınırlarını desteklemek amacıyla kullanılmaktadır.*

Primer ve sekonder mineraller ile organik materyaller öncelikle toprağın bileşenleridir; ancak toprak ortamından ayrıldıklarında veya doğal yataklarda bulunduklarında bağımsız hammadde niteliği kazanabilirler. Bu nedenle bir

materyalin toprak bileşeni olması ile doğal hammadde olarak değerlendirilmesi ayrıştırılmalıdır (Murray, 2000; Moraes et al., 2017).

İnce fraksiyonlardaki mineraller; yüzey yükü, özgül yüzey alanı, iyon değişim kapasitesi ve suyla etkileşim özellikleri nedeniyle belirgin fizikokimyasal davranışlar gösterir. Kil minerallerinin kristal yapısı ve aktif yüzeyleri su, iyonlar ile organik ve inorganik bileşiklerle etkileşime olanak sağlar (López-Galindo et al., 2007; Moraes et al., 2017). Su tutma, adsorpsiyon, iyon değişimi, şişme, plastisite ve ısı transferi gibi özellikler kil içeren materyallerin terapötik uygulamalardaki potansiyelinin temelini oluşturmaktadır (Carretero, 2002; López-Galindo et al., 2007).

Kil minerallerinin farklı mineral ve organik bileşenlerle birlikte bulunduğu çamur materyalleri (peloid) bu açıdan özel önem taşır. Peloidlerin ısı depolama ve transferi, su tutma, adsorpsiyon, yapışkanlık ve iyon değişimi gibi özellikleri kullanım açısından değerlendirilir; ancak terapötik yanıt yalnızca mineralojik bileşime değil, fiziksel özelliklere, hazırlama ve uygulama koşullarına da bağlıdır (Carretero, 2020a, 2020b).

2. Terapi ve Rehabilitasyon Kavramları ve Toprak Kökenli Materyallerin Kullanım Potansiyeli

2.1. Terapi ve Rehabilitasyon Kavramlarına Genel Bakış

Terapi; hastalık, yaralanma, fonksiyon kaybı veya sağlıkla ilişkili sorunların azaltılması, kontrolü ya da mevcut fonksiyonların desteklenmesine yönelik farklı müdahaleleri kapsayan geniş bir yaklaşımdır (NLM, 2026; Reuben & Tinetti, 2012).

Rehabilitasyon, sağlık durumunun yol açtığı fonksiyonel sınırlılıkları azaltmayı ve bireyin bağımsızlık ve işlevselliğini en üst düzeyde desteklemeyi amaçlayan kapsamlı bir sağlık hizmetidir. Bu yaklaşım vücut fonksiyonlarının yanında günlük yaşam aktiviteleri, toplumsal katılım ve anlamlı yaşam rollerini de kapsar (Stucki et al., 2018; WHO, 2024).

Terapi ve rehabilitasyon yöntemleri bireyin gereksinimleri, sağlık durumu ve fonksiyonel hedeflerine göre planlanır. Egzersiz, manuel uygulamalar, fiziksel ve termal modaliteler, yardımcı ürün ve teknolojiler, eğitim ve günlük yaşam aktivitelerine yönelik müdahaleler bu kapsamda yer alır (WHO, 2023).

Fiziksel ve fizikokimyasal özelliklerinden yararlanılan materyaller özellikle termal ve topikal[3] uygulamalarda önemlidir. Isı iletimi, su içeriği, yüzey özellikleri, mekanik davranış ve kimyasal bileşim uygulama koşullarını

[3] Topikal; ilaç veya tıbbi tedavilerin doğrudan cilt veya mukoza zarı üzerine bölgesel olarak uygulanması demektir.

etkilediğinden, uygun doğal materyaller yardımcı veya uygulama materyali olarak değerlendirilebilmektedir (Ferrand & Yvon, 1991; Carretero, 2020a).

Toprak ve toprakla ilişkili doğal materyaller; mineralojik, fiziksel ve fizikokimyasal özellikleri nedeniyle terapi ve rehabilitasyon açısından araştırılabilecek doğal kaynaklardır. Özellikle kil minerallerinin suyla etkileşimi, özgül yüzey alanı, yüzey yükü, iyon değişimi, adsorpsiyon, plastisite, reoloji ve termal özellikleri kullanım davranışını belirler. Organik bileşenler ile hazırlama ve uygulama koşulları da bu davranışı değiştirebildiğinden, potansiyel kullanım yalnızca köken veya mineralojik bileşime göre değil, işlevsel özelliklerin bütünüyle değerlendirilmelidir (Viseras et al., 2007; Moraes et al., 2017; Carretero, 2020a, 2020b).

2.2. Terapi ve Rehabilitasyon Yöntemlerinde Doğal Materyallerin Yeri

Terapi ve rehabilitasyonda egzersiz ve manuel uygulamaların yanı sıra elektroterapi, hidroterapi, termoterapi ve diğer fiziksel ajanlardan yararlanılabilmektedir; bu modalitelerde ısı, elektrik, mekanik kuvvet veya su kontrollü biçimde kullanılır (WHO, 2023).

Termoterapide ısıtılmış su, sıcak paket, parafin ve peloid gibi materyaller kullanılabilir. Uygulamanın fiziksel niteliğini yalnızca sıcaklık değil, materyalin ısıyı depolama ve aktarma özellikleri de belirler. Hidroterapi ve balneoterapi suyun fiziksel ve termal özelliklerinden yararlanır. Sıcaklık, kaldırma kuvveti ve hidrostatik basınç hareketi ve egzersizi etkileyebilir (Torres-Ronda & i del Alcázar, 2014). Balneoterapi de bunlara mineral bileşim ve kimyasal özellikler de eklenir (Matsumoto, 2018); kas-iskelet sistemi hastalıklarında ağrı, fiziksel fonksiyon ve yaşam kalitesi gibi etkilerin sonuçları klinik çalışmalarda incelenmiştir (Antonelli et al., 2018; Protano et al., 2023; Crevenna et al., 2025).

Doğal materyallerin kullanımı özellikle termal ve topikal uygulamalarda belirgindir. Peloidoterapide katı ve sıvı fazlardan oluşan doğal veya hazırlanmış peloidlerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinden yararlanılır. Katı faz kil mineralleri, kuvars, feldispat ve organik bileşenler içerebilir; bunların oranı peloidin fiziksel ve fizikokimyasal davranışını etkiler (Carretero, 2020a; Gomes et al., 2021).

Peloidlerin termoterapötik kullanımında ısıyı depolama ve kontrollü aktarma davranışı önemlidir. Yüksek ısı kapasitesi ve görece düşük ısıl iletkenlik, ısının uygulama süresince korunmasına katkı sağlayabilir (Carretero, 2020a). Bu nedenle peloidler özellikle bazı kas-iskelet sistemi uygulamalarında kullanılmakta; ağrı, fonksiyonel durum ve yaşam kalitesi üzerindeki etkileri klinik çalışmalarda araştırılmaktadır (Karaarslan et al., 2021).

Doğal materyallerin kullanım uygunluğu; mineralojik, kimyasal, fiziksel ve fizikokimyasal özelliklerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Kil içeren materyallerde su tutma, ısı depolama ve transferi, adsorpsiyon, iyon değişimi,

şişme, plastisite ve reoloji uygulama davranışını etkiler. Farklı ülkelerdeki peloidlerin ve Türkiye'deki termal çamurların bu özellikler bakımından önemli farklılıklar gösterebildiği bildirilmiştir (Carretero, 2020a; Karakaya et al., 2017).

Dolayısıyla yalnızca materyal türüne odaklanmak yeterli değildir; mineralojik bileşim, yüzey özellikleri, KDK, su tutma ve şişme, termal ve reolojik davranış ile kimyasal bileşim bir bütün olarak ele alınmalıdır.

2.3. Terapi ve Rehabilitasyonda Etkili Olan Toprak ve Toprakla İlişkili Doğal Materyal Özellikleri

Bu materyallerin terapi ve rehabilitasyondaki kullanım potansiyeli; mineralojik yapı, su içeriği, organik bileşenler ve hazırlama koşullarının etkileşimiyle ortaya çıkan fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal özelliklere bağlıdır. Bu nedenle değerlendirme uygulama amacına göre çoklu özellikler üzerinden yapılmalıdır.

2.3.1 Termal Özellikler

Doğal materyallerin termal özellikleri ısıyı depolama, iletme ve aktarma davranışını belirler. Vücut yüzeyine uygulanacak materyallerde özgül ısı, termal iletkenlik, termal difüzivite ve soğuma davranışı önemlidir (Carretero, 2020a; Gomes et al., 2021).

Peloidlerde katı ve sıvı fazın birlikte oluşturduğu termal davranış, materyalin terapötik kullanım özellikleri açısından önem taşımaktadır. Peloidin su içeriği ve kil-su oranı özgül ısı kapasitesi ve soğuma davranışını etkilerken, kil fraksiyonunun mineralojik bileşimi de termal özelliklerin şekillenmesinde rol oynayabilmektedir. Bu kapsamda, farklı mineralojik bileşime sahip killer ve kil-su karışımları üzerinde yapılan çalışmalar, mineralojik özellikler ile su içeriğinin peloidlerin ısı tutma ve aktarma davranışları üzerinde etkili olduğunu göstermektedir (Armijo et al., 2016).

Bu nedenle termoterapötik potansiyelin belirlenmesinde yalnızca ısı tutma kapasitesi değil, ısının depolanma ve aktarılma biçimi de doğrudan ölçülerek değerlendirilmelidir.

2.3.2 Su Tutma ve Su ile Etkileşim Özellikleri

Doğal materyallerin suyla etkileşimi, özellikle kil miktarı ve mineralojik yapı tarafından belirlenir. Kil minerallerinin yüzey özellikleri, yüzey yükü ve özgül yüzey alanı, suyun tutulma ve mineral yüzeyleriyle etkileşme biçimini etkiler (Johnston, 2018).

Smektitler[4] katmanlar arasına su alarak belirgin hidratasyon ve şişme gösterirken, kaolinitte suyla etkileşim daha çok dış yüzeylerde gerçekleşir ve

[4] Smektit; topraklarda ve killerde yaygın bulunan 2:1 tipi tabakalı silikat kil mineralleri grubudur.

şişme sınırlıdır. Bu mineralojik farklılıklar, su ilavesi sonrasında materyalin kıvamını ve fiziksel davranışını etkileyebilir (Johnston, 2018).

Peloidlerde katı faz ile su arasındaki etkileşim, uygulamaya uygun fiziksel özelliklerin oluşmasında önemlidir. Bu nedenle mineralojik bileşimle birlikte su içeriği, hidratasyon ve suyla etkileşim özellikleri de peloidlerin fiziksel ve fizikokimyasal karakterizasyonunda dikkate alınmaktadır (Carretero, 2020a).

Su tutma özelliği, topikal olarak kullanılan kil ve peloidlerin uygulama sırasında uygun kıvam ve fiziksel bütünlüğünü sürdürebilmesine katkıda bulunur (Carretero, 2020a; Armijo et al., 2016).

Bu nedenle su tutma ve suyla etkileşim özellikleri, tek başına doğrudan terapötik etkinliğin göstergesi olarak değil, materyalin fiziksel özelliklerini ve uygulamaya uygunluğunu belirleyen faktörler arasında değerlendirilmelidir (Carretero, 2020a).

2.3.3. Özgül Yüzey Alanı ve Yüzey Yükü

Toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin fizikokimyasal davranışlarının belirlenmesinde özgül yüzey alanı ve yüzey yükü önemli özelliklerdir. Özellikle kil minerallerinin küçük tane boyutları ve tabakalı yapıları, birim kütle başına düşen yüzey alanının yüksek olmasına neden olmaktadır. Mineral yüzeylerinin genişlemesi, su, iyonlar ve çeşitli moleküller ile gerçekleşebilecek etkileşim alanını artırarak materyalin fizikokimyasal davranışını etkilemektedir. (Johnston, 2018; Carretero, 2020a).

Mineral yüzeylerinin elektriksel özellikleri de bu etkileşimlerde önemli rol oynamaktadır. Kil minerallerinde kristal yapıdaki izomorfik yer değiştirmeler ve mineral yüzeylerinde meydana gelen yük gelişimi sonucunda kalıcı veya pH'ya bağlı yüzey yükleri oluşabilmektedir. Özellikle negatif yüzey yükleri, çözeltide bulunan katyonların mineral yüzeyleri yakınında tutulmasına ve yüzey ile çözeltinin iyonik bileşimi arasında etkileşim oluşmasına neden olmaktadır. Bu özellik, kil minerallerinin su ve çözeltide bulunan iyonlarla olan ilişkilerinin temelini oluşturmaktadır (Johnston, 2018).

Özgül yüzey alanı ile yüzey yükünün birlikte değerlendirilmesi, doğal materyallerin yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda kimyasal etkileşim kapasitesinin anlaşılmasına da katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte bu özellikler mineral türüne göre önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Smektitler, yüksek özgül yüzey alanları ve belirgin yüzey yükleri nedeniyle çevrelerindeki su ve iyonlarla daha geniş bir etkileşim kapasitesine sahipken, kaolinit gibi minerallerde bu kapasite daha sınırlıdır (Johnston, 2018; Carretero, 2020a).

Terapi ve rehabilitasyon açısından değerlendirildiğinde, yüksek özgül yüzey alanı ve yüzey yükü, özellikle materyalin su, iyonlar ve çözeltide bulunan çeşitli bileşenlerle etkileşim kapasitesinin belirlenmesi bakımından önem taşımaktadır.

Ancak bu özelliklerin varlığı tek başına terapötik bir etki anlamına gelmemekte; materyalin uygulama koşullarındaki davranışının değerlendirilmesi için temel bir fizikokimyasal özellik olarak ele alınması gerekmektedir (Carretero, 2020a).

Bu özellikler aynı zamanda kil minerallerinin katyonları yüzeylerinde tutabilme ve belirli koşullarda çözeltideki iyonlarla değiştirebilme kapasitesinin temelini oluşturmaktadır (Johnston, 2018). Bu nedenle özgül yüzey alanı ve yüzey yükünden sonra, doğal materyallerin katyon değişim kapasitesi ve adsorpsiyon özelliklerinin ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.3.4. Katyon Değişim ve Adsorpsiyon Özellikleri

Katyon değişim kapasitesi (KDK), özellikle kil mineralleri bakımından zengin toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin önemli kimyasal özelliklerinden biridir. Mineral yüzeylerindeki negatif yükler, çözeltide bulunan katyonların yüzey yakınında tutulmasına ve belirli koşullarda başka katyonlarla yer değiştirmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle KDK, bir materyalin katyonları tutma ve değiştirme potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılan temel göstergelerden biri olarak kabul edilmektedir (Schoonheydt & Johnston, 2006).

Kil mineralinin türü, özgül yüzey alanı ve yapısal özellikleri KDK üzerinde belirleyici olmaktadır. Özellikle smektit grubu mineraller, yüksek yüzey alanları ve belirgin negatif yükleri nedeniyle genellikle daha yüksek KDK değerlerine sahipken, kaolinit gibi minerallerde bu kapasite daha düşüktür. Dolayısıyla doğal bir materyalin toplam kil içeriğinin yanı sıra kil fraksiyonunun mineralojik bileşiminin de değerlendirilmesi gerekmektedir (Ma & Eggleton, 1999; Schoonheydt & Johnston, 2006).

Adsorpsiyon ise iyonların yanı sıra farklı çözünmüş maddelerin mineral yüzeylerinde tutulmasını ifade eden daha geniş bir etkileşim mekanizmasıdır. Bu süreç elektrostatik çekim, yüzey kompleksleşmesi ve diğer yüzey etkileşimleri aracılığıyla gerçekleşebilmekte ve materyalin mineralojik özellikleri ile çözeltinin kimyasal koşullarından etkilenebilmektedir. Kil minerallerinin yüksek yüzey reaktivitesi, bu materyallerin çevrelerindeki çözeltide bulunan çeşitli bileşenlerle etkileşim kapasitesini artırabilmektedir (Schoonheydt & Johnston, 2006; Johnston, 2018).

Terapi ve rehabilitasyon açısından KDK ve adsorpsiyon özellikleri, öncelikle doğal materyalin uygulama ortamındaki kimyasal davranışının ve farklı bileşenlerle etkileşim kapasitesinin anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Peloidlerin fizikokimyasal özellikleri ile katyon salımı ve iyon değişimine ilişkin çalışmalar, mineralojik bileşim ve hazırlama koşullarının bu etkileşimler üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir (Carretero et al., 2014; Sánchez-Espejo et al., 2015). Bununla birlikte yüksek KDK veya adsorpsiyon kapasitesi tek başına terapötik etkinliğin göstergesi olarak değerlendirilmemeli; bu

özellikler materyalin mineralojik ve kimyasal bileşimi, uygulama koşulları ve güvenlilik özellikleriyle birlikte ele alınmalıdır.

Bu çerçevede, yüzey özellikleri ve iyon tutma kapasitesinden sonra materyalin suyla etkileşim sonucunda kazandığı şişme, plastisite ve reolojik davranış, özellikle peloid ve benzeri topikal materyallerin uygulama özelliklerinin belirlenmesinde ayrı bir değerlendirme konusu oluşturmaktadır (Carretero et al., 2014).

2.3.5. Şişme, Plastisite ve Reolojik Özellikler

Kil içeren toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin suyla etkileşimi sonucunda ortaya çıkan şişme, plastisite ve reolojik davranışlar, materyalin uygulama sırasındaki fiziksel özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir. Özellikle smektit grubu kil minerallerinde tabakalar arasına ve mineral yüzeylerine suyun alınması, mineral yapısında hacimsel değişimlere neden olabilmekte ve buna bağlı olarak materyalin kıvamı ile deformasyon davranışı değişebilmektedir. Bu davranışın düzeyi, başta kil mineralojisi olmak üzere su içeriği ve katı-sıvı oranı gibi özelliklere bağlı olarak farklılık göstermektedir (Johnston, 2018; Carretero, 2020a).

Plastisite, materyalin belirli bir su içeriği aralığında kırılmadan şekil değiştirebilme özelliğini ifade ederken, reolojik özellikler uygulanan kuvvet karşısında deformasyon ve akış davranışını ortaya koymaktadır. Viskozite, akma davranışı ve tiksotropi[5] gibi özellikler, özellikle su içeriği yüksek kil içeren materyallerin uygulama sırasında yüzeye yayılması, yüzeyde tutulması ve mekanik etkiler karşısındaki davranışının değerlendirilmesinde önem taşımaktadır. Bu nedenle peloid ve benzeri topikal materyallerin hazırlanmasında yalnızca mineralojik bileşim değil, kullanım sırasında ortaya çıkan fiziksel davranış da dikkate alınmalıdır (Gomes et al., 2021).

Türkiye'deki bazı termal çamurlar üzerine yapılan çalışmalar, materyallerin plastisite, viskozite ve tiksotropi özelliklerinin birbirinden önemli ölçüde farklılaşabildiğini ve bu farklılıkların mineralojik ve fizikokimyasal özelliklerle ilişkili olduğunu göstermektedir. Çelik Karakaya et al. (2017) inceledikleri Türk termal çamurlarında bu özelliklerin yanı sıra su emme ve katyon değişim kapasitesi gibi parametrelerin de materyaller arasında farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, doğal materyallerin terapi amacıyla değerlendirilmesinde standart bir materyal davranışının varsayılmaması ve her materyalin kendi özellikleri üzerinden karakterize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

[5] tiksotropi; çalkalandığında, karıştırıldığında veya başka bir şekilde sarsıldığında sıvılaşan, ancak hareketsiz bırakıldığında yeniden eski haline dönen belirli jellerin sergilediği geri dönüşümlü davranış.

Bu özellikler doğrudan terapötik etkinliği ifade etmemekle birlikte, materyalin hazırlanabilirliği, uygulanabilirliği ve uygulama sırasında göstereceği fiziksel davranışın belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla şişme, plastisite ve reolojik özellikler; mineralojik bileşim, su içeriği ve yüzey özellikleri ile materyalin kullanım koşulları arasındaki ilişkiyi ortaya koyan tamamlayıcı parametreler olarak değerlendirilmelidir.

2.3.6. Mineralojik ve Kimyasal Bileşim

Toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin kullanım potansiyelinin değerlendirilmesinde mineralojik ve kimyasal bileşim temel karakterizasyon parametreleri arasında yer almaktadır. Materyalin içerdiği kil mineralleri, kuvars, feldispatlar, karbonatlar ve diğer mineral fazlar; özgül yüzey alanı, katyon değişim kapasitesi, su ile etkileşim, termal davranış ve reolojik özellikler gibi daha önce ele alınan birçok fizikokimyasal özelliği doğrudan veya dolaylı olarak etkileyebilmektedir. Bu nedenle doğal bir materyalin terapi veya rehabilitasyon amacıyla değerlendirilmesinde yalnızca toplam mineral içeriğinin değil, mineral fazların türü ve göreli miktarlarının da belirlenmesi önem taşımaktadır (Carretero, 2020a).

Peloidlerin mineralojik bileşiminde smektit, kaolinit, illit ve illit-smektit gibi fillosilikatlar; kuvars, feldispat, kalsit ve dolomit gibi kil dışı minerallerle birlikte bulunabilmektedir. Bu minerallerin türleri ve oranları materyalin fiziksel ve fizikokimyasal özelliklerinde farklılıklara yol açabilmektedir (Carretero, 2020a). Türkiye'nin farklı bölgelerinden elde edilen peloidler üzerinde yapılan bir çalışmada da montmorillonit, kaolinit ve muskovit gibi kil minerallerinin yanı sıra kuvars, kalsit, dolomit ve albit gibi minerallerin farklı oranlarda bulunduğu belirlenmiştir (Özay et al., 2020).

Mineralojik bileşimin yanında kimyasal bileşim ve element dağılımı da materyalin karakterizasyonunda dikkate alınmalıdır. Özellikle kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve demir gibi elementlerin mineral veya çözünmüş fazlarla ilişkilerinin belirlenmesi, materyalin kimyasal davranışının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bunun yanında mikro/eser elementlerin konsantrasyonlarının belirlenmesi, terapötik amaçla kullanılabilecek doğal materyallerin kimyasal karakterizasyonu ve güvenliliğinin değerlendirilmesi bakımından önem taşımaktadır. Türkiye'deki peloidler üzerinde yapılan araştırmalarda mineralojik bileşimle birlikte pH, elektriksel iletkenlik, çözünmüş iyonlar, eser elementler ve organik madde gibi parametrelerin değerlendirilmesi bu bütüncül karakterizasyon yaklaşımını desteklemektedir (Özay et al., 2020).

Bu kapsamda nadir toprak elementleri (NTE) de doğal materyallerin ayrıntılı jeokimyasal karakterizasyonunda değerlendirilebilecek element gruplarından biridir. Bununla birlikte NTE'lerin bir materyalde bulunması tek başına terapötik bir etki veya sağlık yararı anlamına gelmemektedir. Bu elementlerin biyolojik etkileri; element türü, konsantrasyonu, kimyasal formu ve maruziyet koşullarına

bağlı olarak değişebildiğinden, toplam ve biyolojik olarak erişilebilir miktarları ile biyolojik sistemlerle etkileşim potansiyellerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Pagano et al., 2015; Wang et al., 2024). Bu nedenle NTE'lerin terapötik bileşenler olarak genellenmesi yerine, doğal materyallerin kimyasal karakterizasyonu ve güvenlilik değerlendirmesi kapsamında ele alınması daha uygun olacaktır (Pagano et al., 2015; Wang et al., 2024).

Sonuç olarak mineralojik ve kimyasal bileşim, doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyon alanındaki kullanım potansiyelinin değerlendirilmesinde tek başına belirleyici bir ölçüt değildir. Mineral fazların fizikokimyasal özelliklerle ilişkisi ile materyalde bulunan elementlerin miktarı, kimyasal formu ve biyolojik olarak erişilebilirliği birlikte değerlendirilmelidir. Bu bütüncül yaklaşım, materyalin fizikokimyasal ve işlevsel özelliklerinin yanı sıra uygulamaya uygunluğunun ve insan sağlığı açısından olası güvenlilik sorunlarının değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır (Carretero, 2020a; Pagano et al., 2015)

2.3.7. Organik Madde ve Biyolojik Özellikler

Toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerde bulunan organik maddeler, mineral bileşenlerle birlikte materyalin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin şekillenmesine katkı sağlamaktadır. Bitkisel ve mikrobiyal kökenli organik bileşikler ile bunların ayrışma ürünleri, mineral yüzeyleriyle çeşitli etkileşimler oluşturarak materyalin yapısal ve kimyasal özelliklerini etkileyebilmektedir. Özellikle organik bileşiklerin mineral yüzeylerinde tutulması ve organo-mineral birlikteliklerin oluşması, organik ve mineral fazlar arasındaki etkileşimlerin temel mekanizmaları arasında yer almaktadır (Kleber et al., 2007).

Peloidlerde organik bileşenlerin miktarı ve niteliği, materyalin oluşum ortamına ve olgunlaşma koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Humik maddeler, organik asitler, lipitler ve diğer organik bileşiklerin yanı sıra mikroalgler ve diatomlar gibi biyolojik kökenli bileşenler de peloidlerin organik yapısına katkıda bulunabilmektedir (Carretero, 2020b). Termal çamurlar üzerinde yapılan çalışmalar, olgunlaşma sürecinde organik bileşimin değişebildiğini ve mikroalglerin bu sürece organik maddeler sağlayabildiğini göstermektedir (Centini et al., 2015).

Peloidlerde mikroorganizmaların varlığı ayrıca değerlendirilmesi gereken bir özelliktir. Mikroalgler, diatomlar, siyanobakteriler, bakteriler ve diğer mikroorganizmaların peloidlerin biyolojik bileşimine katılabildiği bildirilmektedir. Bununla birlikte, peloidlerde bulunan organik bileşikler ve mikroorganizmalar ile gözlenen terapötik etkiler arasındaki ilişkiler henüz tam olarak açıklığa kavuşturulmuş değildir. Bu nedenle biyolojik bileşenlerin olası işlevsel katkıları ile mikrobiyolojik güvenlilik boyutunun birbirinden ayrılarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Carretero, 2020b).

Bu nedenle organik madde ve biyolojik özellikler, terapi ve rehabilitasyon amacıyla kullanılabilecek doğal materyallerin değerlendirilmesinde iki yönlü ele alınmalıdır. Bir taraftan organik bileşenlerin mineral fazlarla etkileşimleri ve materyalin fizikokimyasal özelliklerine olası katkıları incelenirken, diğer taraftan mikrobiyolojik içeriğin kullanım güvenliği açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Organik ve biyolojik bileşenlerin varlığı tek başına terapötik etkinliğin göstergesi olarak değerlendirilmemeli; materyalin genel karakterizasyonu, işlevsel özellikleri ve güvenlilik değerlendirmesinin bir parçası olarak ele alınmalıdır (Carretero, 2020b).

2.3.8. Güvenlilik ve Toksikolojik Özellikler

Toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyon amacıyla değerlendirilmesinde, sahip oldukları işlevsel özelliklerin yanı sıra insan sağlığı açısından güvenliliğinin de belirlenmesi gerekmektedir. Doğal materyallerin mineralojik ve kimyasal bileşimleri oluşum ortamlarına ve jeolojik kökenlerine bağlı olarak farklılık gösterebildiğinden, benzer amaçlarla kullanılan materyaller arasında dahi element konsantrasyonları değişebilmektedir. Bu nedenle bir materyalin doğal kökenli olması tek başına güvenli olduğu anlamına gelmemekte; kullanım öncesinde kaynağa özgü karakterizasyon ve güvenlilik değerlendirmesi önem taşımaktadır (Çelik Karakaya & Karakaya, 2018).

Özellikle arsenik (As), kadmiyum (Cd), kurşun (Pb), cıva (Hg), antimon (Sb), krom (Cr) ve nikel (Ni) gibi potansiyel olarak toksik elementlerin belirlenmesi, doğal materyallerin güvenlilik değerlendirmesinde önem taşımaktadır. Türkiye'nin farklı bölgelerindeki termal çamurlar üzerinde yapılan bir araştırmada As, Cd, Hg, Pb ve Sb gibi toksik elementlerin konsantrasyonlarının örnekler arasında değiştiği ve bazı peloidlerde karşılaştırma amacıyla kullanılan farklı kil materyallerine göre daha yüksek değerlerin bulunabildiği bildirilmiştir (Çelik Karakaya & Karakaya, 2018). Bu bulgular, terapötik amaçla kullanılacak doğal materyallerin kaynağa özgü kimyasal analizlerle değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte toplam element konsantrasyonu, topikal kullanım sonucunda gerçekleşebilecek maruziyeti tek başına açıklamak için yeterli değildir. Elementlerin mineralojik olarak bağlı bulundukları fazlar, çözünürlükleri ve uygulama koşullarında serbestleşme potansiyelleri biyolojik olarak erişilebilir miktarlarını etkileyebilmektedir. Peloidlerden yapay ter ortamına geçen elementlerin incelendiği çalışmalar, toplam element içeriğinin yanı sıra ter ortamında serbestleşebilen fraksiyonların belirlenmesinin dermal maruziyetin değerlendirilmesi açısından önemli olduğunu göstermektedir (Bastos et al., 2023). Bu nedenle güvenlilik değerlendirmelerinde toplam element analizlerinin, gerektiğinde çözünebilir veya dermal olarak biyolojik erişilebilir fraksiyonların belirlenmesiyle desteklenmesi daha kapsamlı bir yaklaşım sağlayacaktır.

Nadir toprak elementleri de doğal materyallerin ayrıntılı jeokimyasal karakterizasyonunda dikkate alınabilecek element gruplarından biridir. NTE'lerin bir materyalde bulunması tek başına terapötik etkinlik veya sağlık yararı olarak yorumlanmamalıdır. Bu elementlerin biyolojik etkileri element türü, konsantrasyon, kimyasal form ve maruziyet koşullarına bağlı olarak değişebildiğinden, toplam ve biyolojik olarak erişilebilir miktarları ile biyolojik sistemlerle etkileşim potansiyellerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Pagano et al., 2015; Wang et al., 2024). Bu nedenle NTE'lerin doğal terapötik materyallerde öncelikle kimyasal karakterizasyon ve güvenlilik kapsamında değerlendirilmesi daha uygun olacaktır.

Kimyasal güvenliliğin yanında mikrobiyolojik güvenlilik de özellikle su ve organik madde içeren peloidler açısından önemlidir. Termal çamurlarda çeşitli mikroorganizmaların bulunabildiği ve hazırlama, olgunlaştırma veya kullanım süreçlerinin mikrobiyolojik kaliteyi etkileyebildiği bildirilmektedir. Peloterapi tesislerinde gerçekleştirilen çalışmalar, peloidlerin mikrobiyolojik hijyen kalitesinin izlenmesinin ve potansiyel patojenlerin kontrol edilmesinin önemini ortaya koymaktadır (Baldovin et al., 2020). Bu nedenle terapötik amaçla kullanılacak doğal materyallerin mikrobiyolojik özellikleri, kimyasal özelliklerin yanında ayrı bir güvenlilik parametresi olarak değerlendirilmelidir.

Bazı doğal materyaller doğal kökenli radyonüklidler içerebildiğinden, materyalin kökeni ve kullanım özellikleri gerektirdiğinde radyolojik karakterizasyonun da güvenlilik değerlendirmesine dahil edilmesi düşünülebilir. Türkiye'deki terapötik peloidler üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K ve ^{137}Cs elementlerinin aktivite konsantrasyonları belirlenmiş ve bunlara bağlı radyolojik doz değerlendirmeleri yapılmıştır (Çelik Karakaya et al., 2015). Bu yaklaşım, peloidlerin güvenliliğinin yalnızca mineralojik bileşim veya potansiyel olarak toksik element konsantrasyonları üzerinden değil, gerektiğinde radyolojik özellikleri de kapsayacak şekilde değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyon alanındaki kullanım potansiyeli değerlendirilirken mineralojik ve kimyasal bileşim, fizikokimyasal özellikler, potansiyel olarak toksik elementler, gerektiğinde NTE'ler, mikrobiyolojik özellikler ve radyolojik özellikler birlikte ele alınmalıdır. Bununla birlikte değerlendirilecek parametrelerin kapsamı materyalin kökenine, bileşimine ve kullanım biçimine göre belirlenmelidir. Böyle bir yaklaşım, doğal materyalin kullanım potansiyelinin yanı sıra insan sağlığı açısından olası risklerinin ve uygun kullanım koşullarının daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır (Çelik Karakaya & Karakaya, 2018; Bastos et al., 2023; Baldovin et al., 2020; Çelik Karakaya et al., 2015).

2.4. Toprak ve Toprakla İlişkili Doğal Materyallerin Terapi ve Rehabilitasyonda Kullanım Örnekleri ve Potansiyeli

Toprak ve toprakla ilişkili doğal materyaller, sahip oldukları mineralojik, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklere bağlı olarak sağlıkla ilişkili farklı uygulamalarda değerlendirilebilmektedir. Bu materyaller arasında özellikle kil ve kil minerali içeren doğal materyaller ile peloidler, topikal ve termal uygulamalardaki kullanımları nedeniyle öne çıkmaktadır. Bunun yanında toprakla ilişkili organik materyaller ile bazı mineral kökenli doğal hammaddeler de özgün fizikokimyasal özellikleri nedeniyle sağlık alanındaki çeşitli uygulamalar açısından araştırılmaktadır (Carretero, 2002; Carretero & Pozo, 2009; Carretero, 2020a, 2020b).

Bununla birlikte bu materyallerin kullanım düzeyleri ve bunlara ilişkin bilimsel kanıtlar aynı değildir. Peloidler doğrudan terapötik uygulamalarda kullanılmakta ve özellikle kas-iskelet sistemi hastalıklarında klinik araştırmalara konu olmaktadır. Kil ve kil mineralleri ise peloidlerin katı fazını oluşturabilmelerinin yanı sıra topikal preparatlarda ve farmasötik sistemlerde yardımcı materyal olarak kullanılabilmektedir. Diğer mineral ve organik kökenli materyallerin sağlık alanındaki kullanımları ise materyale bağlı olarak geleneksel, deneysel veya potansiyel düzeyde kalabilmektedir (Carretero & Pozo, 2009; Carretero, 2020b; Gomes et al., 2021).

Bu nedenle mevcut veya geleneksel kullanım, klinik ya da deneysel olarak araştırılan uygulamalar ve yalnızca materyalin özelliklerine dayanılarak öngörülen potansiyel kullanım alanlarının birbirinden ayrılması gerekmektedir. Ayrıca doğal materyallerin bileşim ve özellikleri kaynağa bağlı olarak değişebildiğinden, terapi ve rehabilitasyon alanındaki kullanım potansiyelleri materyal karakterizasyonu, standardizasyon ve güvenlilik değerlendirmeleriyle birlikte ele alınmalıdır (Carretero, 2020a; Gomes et al., 2021). Toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyon alanındaki potansiyel kullanım biçimleri, kanıt durumları ve değerlendirilmesi gereken temel parametreler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyon alanındaki ve potansiyel kullanım biçimlerinin genel değerlendirmesi

Materyal grubu	**Öne çıkan özellikler**	**Mevcut / potansiyel kullanım biçimi**	**Terapi ve rehabilitasyonla ilişkisi**	**Kanıt / kullanım durumu**	**Temel değerlendirme ve risk parametreleri**	**Kaynaklar**
Kil ve kil minerali içeren doğal materyaller (smektit/bentonit, kaolinit, illit vb.)	Yüzey alanı ve yükü, adsorpsiyon, KDK, su ile etkileşim, plastisite ve reolojik özellikle	Cilt üzerine doğrudan uygulanan kil maskeleri, kil lapaları ve benzeri topikal uygulamalar; kil-su karışımları; peloid hazırlanması, farmasötik ve biyomedikal uygulamalarda yardımcı/taşıyıcı materyal	Cilt ile temas eden uygulamalar ve peloidoterapide katı faz; sağlık alanında farklı yardımcı uygulamalar	Topikal ve yardımcı uygulamalarda kullanım mevcut; farmasötik ve biyomedikal alanlarda deneysel çalışmalar bulunmaktadır.	Mineralojik ve kimyasal saflık, tane boyutu, toksik elementler, mikrobiyolojik kalite ve uygulama biçimi	Carretero (2002); Carretero ve Pozo (2009); Carretero (2020a); Gomes et al. (2021)
Peloidler ve terapötik çamurlar	Termal davranış, su tutma, plastisite, reoloji, mineral-organik bileşim	Peloidoterapi, cilt üzerine uygulanan lokal çamur paketleri, çamur banyoları ve diğer doğrudan temas uygulamaları	Özellikle termoterapi ve kas-iskelet sistemi ile ilişkili uygulamalar	Terapötik kullanım mevcut; bazı hastalık ve peloid uygulamaları için klinik çalışmalar bulunmaktadır	Mineralojik ve kimyasal bileşim, termal özellikler, uygulama sıcaklığı ve süresi, toksik elementler, mikrobiyolojik ve gerektiğinde radyolojik özellikler	Flusser et al. (2002); Odabasi et al. (2008); Forestier et al. (2010); Carretero (2020b))
Toprakla ilişkili organik materyaller ve turba	Yüksek su içeriği/tutma kapasitesi, organik bileşenler, humik maddeler ve termal özellikler	Peloid ve organik çamur bileşeni; cilt üzerine uygulanan termal ve topikal preparatlar	Balneolojik ve termal uygulamalarla ilişkili kullanım	Bazı materyaller de geleneksel ve uygulamalı kullanım bulunmaktadır; materyale özgü kanıt düzeyi değişmektedir.	Organik bileşim, ayrışma derecesi, mikrobiyolojik kalite, toksik elementler ve diğer kontaminantlar	Beer et al. (2003); Carretero (2020b)
Diğer toprakla ilişkili mineral kökenli doğal materyaller (zeolit, diatomit ve	Materyale göre değişen porozite, yüzey alanı, adsorpsiyon ve iyon	Taşıyıcı, adsorban veya yardımcı materyal olarak farmasötik ve biyomedikal araştırmalar;	Doğrudan rehabilitasyon uygulamalarından çok sağlıkla ilişkili materyal araştırmaları üzerinden	Materyale ve kullanım alanına göre değişmekle birlikte çoğunlukla deneysel veya	Mineralojik ve kimyasal saflık, partikül özellikleri, biyouyumluluk, toksik elementler ve	Cerri et al. (2016); Bacakova et al. (2018); Ruggiero et al. (2014);

benzeri materyaller)	değişim özellikleri	terapi ve rehabilitasyon açısından potansiyel kullanım	değerlendirilebilir	potansiyel düzeydedir.	toksikolojik değerlendirme	Peng et al. (2024)

Tablo 2'de görüldüğü üzere, toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyonla ilişkisi aynı düzeyde değildir. Özellikle peloidler doğrudan terapötik uygulamalarda kullanılmakta ve klinik araştırmalarda değerlendirilmekteyken, bazı mineral kökenli materyallerin sağlık alanındaki kullanımı daha çok farmasötik veya biyomedikal uygulamalarla sınırlıdır. Örneğin diz osteoartritinde gerçekleştirilen kontrollü çalışmalar, çamur paketi veya spa tedavilerini klinik sonuçlar açısından değerlendirmiştir (Flusser et al., 2002; Odabasi et al., 2008; Forestier et al., 2010).

Bununla birlikte doğal bir materyalin belirli fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip olması tek başına terapötik etkinliğin göstergesi olarak değerlendirilmemelidir. Peloid literatüründe de materyalin mineralojik, kimyasal, organik ve fizikokimyasal özellikleri ile gözlenen terapötik sonuçlar arasındaki ilişkinin her durumda yeterince ortaya konulamadığı bildirilmektedir (Carretero, 2020a, 2020b). Bu nedenle kullanım potansiyelinin değerlendirilmesinde materyalin özellikleri ile uygulama biçimi, temas süresi, uygulama sıcaklığı, güvenlilik koşulları ve mevcut klinik veya deneysel kanıtların birlikte dikkate alınması gerekmektedir.

Bu genel değerlendirme doğrultusunda, terapi ve rehabilitasyon alanında öne çıkan materyal grupları ve bunların kullanım biçimleri aşağıdaki alt başlıklarda ele alınmıştır.

2.4.1. Kil ve Kil Minerali İçeren Doğal Materyaller

Kil ve kil minerali içeren doğal materyaller, insanlık tarafından uzun süredir farklı amaçlarla kullanılmakta olup sağlıkla ilişkili uygulamalar da bu kullanım alanları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte "kil" kavramı tek bir mineral türünü ifade etmemektedir. Doğal killer; smektit, kaolinit, illit, paligorskit ve sepiolit gibi farklı kil minerallerini değişen oranlarda içerebilmekte, ayrıca kuvars, feldispat ve karbonatlar gibi kil dışı mineraller ile organik bileşenleri de bünyelerinde bulundurabilmektedir. Bu nedenle sağlık alanında kullanılan kil içeren doğal materyallerin özellikleri ve kullanım uygunlukları, mineralojik bileşim ve materyalin kaynağına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir (Carretero, 2002; Carretero & Pozo, 2009).

Kil ve kil minerali içeren materyallerin sağlık alanındaki kullanımları özellikle cilt ile doğrudan temas eden topikal uygulamalarda görülmektedir. Kil maskeleri, kil lapaları ve kil içeren çamur preparatları bu uygulamalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca kil mineralleri, peloidlerin katı fazının önemli bileşenlerinden birini oluşturmakta ve su veya mineral sularla karıştırılarak uygulamaya uygun çamur materyallerinin hazırlanmasında kullanılabilmektedir.

Smektitlerin su ile etkileşim ve şişme özellikleri, kaolinitin daha sınırlı şişme davranışı ile paligorskit ve sepiolit gibi lifsi kil minerallerinin farklı yüzey ve reolojik özellikleri, bu mineralleri içeren materyallerin fiziksel ve uygulama özelliklerinin farklılaşmasına neden olabilmektedir (Carretero & Pozo, 2009; Carretero, 2020a).

Kil minerallerinin sağlık alanındaki kullanım olanakları topikal uygulamalarla sınırlı değildir. Yüzey alanı, adsorpsiyon kapasitesi, iyon değişimi ve reolojik özellikleri nedeniyle bazı kil mineralleri farmasötik preparatlarda yardımcı madde, adsorban veya aktif bileşenlerin taşınmasına yönelik materyaller olarak kullanılmakta ya da bu amaçlarla araştırılmaktadır (Carretero & Pozo, 2009). Ayrıca kil minerali temelli sistemlerin kontrollü ilaç salımı, yara iyileşmesine yönelik materyaller, doku mühendisliği ve diğer biyomedikal uygulamalardaki potansiyelleri de araştırılmaktadır (Viseras et al., 2007; Aguzzi et al., 2007). Bununla birlikte bu çalışmaların önemli bir bölümü farmasötik veya biyomedikal materyal araştırmaları kapsamında olduğundan, elde edilen sonuçların doğrudan terapi ve rehabilitasyon alanında klinik etkinlik kanıtı olarak değerlendirilmemesi gerekmektedir.

Bu nedenle kil ve kil minerali içeren doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyon alanındaki potansiyeli, yalnızca kil mineralinin türüne veya belirli bir fizikokimyasal özelliğine dayanılarak değerlendirilmemelidir. Kullanılacak materyalin mineralojik ve kimyasal bileşiminin belirlenmesi; tane boyutu, saflık, potansiyel olarak toksik elementler ve mikrobiyolojik kalite gibi güvenlilik parametrelerinin değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Özellikle doğal yataklardan elde edilen killerin bileşimlerinin kaynağa göre değişebilmesi, sağlıkla ilişkili uygulamalarda materyale özgü karakterizasyon ve standardizasyon gereksinimini ortaya koymaktadır (Carretero, 2020a, 2020b).

2.4.2. Peloidler ve Terapötik Çamurlar

Peloidler, doğal jeolojik ve/veya biyolojik materyallerin su ile bir araya gelmesi sonucunda oluşan ya da terapötik uygulamalarda kullanmak amacıyla hazırlanan çamur benzeri materyaller olup, sağlık alanında kullanılan toprakla ilişkili doğal materyaller arasında önemli bir yere sahiptir. Peloidlerin katı fazı kil mineralleri başta olmak üzere farklı mineral bileşenler ve değişen miktarlarda organik maddeler içerebilirken, sıvı fazı tatlı su, deniz suyu veya mineral/termal sulardan oluşabilmektedir. Bu bileşenlerin türü ve oranı, peloidin mineralojik ve kimyasal bileşiminin yanı sıra su tutma, reoloji ve termal davranış gibi uygulama açısından önemli özelliklerini de etkileyebilmektedir (Carretero, 2020a, 2020b).

Peloidlerin terapi ve rehabilitasyon alanındaki kullanımı çoğunlukla cilt yüzeyine belirli bir sıcaklıkta doğrudan uygulanmasına dayanmaktadır. Lokal çamur paketleri, vücudun belirli bölgelerine yapılan peloid uygulamaları ve çamur banyoları başlıca kullanım biçimleri arasında yer almaktadır. Uygulamada materyalin ısıyı depolaması ve cilt yüzeyine belirli bir hızda aktarması,

peloidlerin termoterapötik kullanımında öne çıkan özelliklerden biridir. Kil-su karışımları üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, mineralojik bileşim ve su içeriğinin materyalin özgül ısı kapasitesi ve soğuma davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir (Armijo et al., 2016). Bununla birlikte peloid uygulamalarında gözlenen etkilerin yalnızca termal özelliklere bağlanması uygun değildir; mineral ve kimyasal bileşim, organik bileşenler, uygulama koşulları ve cilt-materyal etkileşimlerinin olası katkıları da araştırılmaktadır (Carretero, 2020b).

Peloid ve çamur uygulamalarının klinik olarak en fazla araştırıldığı alanlardan biri kas-iskelet sistemi hastalıkları, özellikle osteoartrittir. Diz osteoartriti üzerine gerçekleştirilen kontrollü ve randomize kontrollü çalışmalarda çamur paketleri ve peloid uygulamalarının ağrı ve fiziksel fonksiyon gibi klinik sonuçlar üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve bazı çalışmalarda uygulama sonrasında iyileşmeler bildirilmiştir (Flusser et al., 2002; Odabasi et al., 2008). Bunun yanında çamur uygulamasını da içeren spa tedavi programlarının diz osteoartritindeki etkileri geniş katılımlı randomize kontrollü çalışmalarda araştırılmıştır (Forestier et al., 2010). Bu çalışmalar peloid ve çamur uygulamalarının özellikle osteoartrit gibi bazı kas-iskelet sistemi hastalıklarında tamamlayıcı bir uygulama olarak araştırıldığını göstermekle birlikte, bildirilen klinik sonuçların kullanılan materyal ve tedavi protokolü çerçevesinde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bununla birlikte klinik çalışmalarda kullanılan peloidlerin mineralojik ve kimyasal bileşimleri, hazırlama ve olgunlaştırma yöntemleri, uygulama sıcaklıkları, süreleri ve tedavi protokolleri arasında farklılıklar bulunabilmektedir. Ayrıca bazı çalışmalarda peloid uygulamaları mineral su banyoları, egzersiz veya standart tedavi gibi diğer uygulamalarla birlikte gerçekleştirildiğinden, gözlenen etkinin yalnızca peloid materyalinin belirli bir bileşenine veya özelliğine bağlanması güçleşmektedir. Peloidlerin mineralojik, kimyasal ve fizikokimyasal özellikleri ile bildirilen terapötik sonuçlar arasındaki ilişkinin yeterince ortaya konulamadığı da belirtilmektedir (Carretero, 2020b). Bu nedenle klinik olarak bildirilen olumlu sonuçlar tüm peloidlerin aynı terapötik etkiye sahip olduğu şeklinde yorumlanmamalı; materyal karakterizasyonu, uygulama protokolü ve klinik sonuçların birlikte değerlendirildiği daha standardize çalışmalara ihtiyaç olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Peloidlerin doğal kaynaklardan elde edilmesi ve bileşimlerinin kaynağa göre değişebilmesi, güvenlilik değerlendirmesini de önemli hâle getirmektedir. Türkiye'deki terapötik çamurlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, mineralojik ve kimyasal bileşim ile potansiyel olarak toksik elementlerin materyaller arasında değişebildiğini göstermektedir (Çelik Karakaya & Karakaya, 2018). Bunun yanında peloidlerin mikrobiyolojik hijyen kalitesinin izlenmesi ve potansiyel mikrobiyolojik risklerin değerlendirilmesi gerekmektedir (Baldovin et al., 2020).

Materyalin kökeni ve özelliklerinin gerektirdiği durumlarda doğal ve antropojenik radyonüklidlerin belirlenmesi ve radyolojik doz değerlendirmelerinin yapılması da güvenlilik karakterizasyonunun bir parçası olarak ele alınabilir (Çelik Karakaya et al., 2015). Dolayısıyla peloidlerin terapi ve rehabilitasyon açısından değerlendirilmesinde yalnızca olası klinik yararlar değil; materyalin kaynağı, karakterizasyonu, standardizasyonu ve güvenli kullanım koşulları da birlikte dikkate alınmalıdır.

2.4.3. Turba ve Organik Maddece Zengin Doğal Materyaller

Toprakla ilişkili doğal materyaller içerisinde organik madde bakımından zengin materyaller de sağlıkla ilişkili uygulamalarda değerlendirilebilmektedir. Bu grupta özellikle turba, büyük ölçüde kısmen ayrışmış bitkisel organik materyalden oluşan doğal bir materyal olarak öne çıkmaktadır. Turba ve organik maddece zengin çamurlar; yüksek su içerikleri, termal özellikleri ve humik maddeler başta olmak üzere farklı organik bileşenleri içermeleri nedeniyle balneolojik uygulamalarda ve peloid olarak kullanılabilmektedir (Beer & Lange, 2013). Bu materyaller mineral kökenli killerden bileşim açısından farklı olmakla birlikte, doğal olarak yüksek su içermeleri veya suyla hazırlanabilmeleri nedeniyle cilt yüzeyine uygulanabilen çamur benzeri sistemler oluşturabilmektedir.

Turba içeren peloidler ve organik çamurlar çoğunlukla cilt yüzeyine uygulanmakta ve bu uygulamalarda fiziksel ve termal etkilerin yanı sıra organik bileşenlerin olası katkıları da araştırılmaktadır. Özellikle humik asit ve fulvik asit r gibi organik maddelerin fizikokimyasal ve biyolojik özellikleri çeşitli çalışmalara konu olmuştur. Turbadan elde edilen bazı organik fraksiyonların insan derisinden geçişinin in vitro olarak incelendiği çalışmalar, turba bileşenlerinin ciltle etkileşiminin yalnızca teorik bir varsayım olmadığını göstermekle birlikte, bu sonuçlar doğrudan klinik terapötik etkinlik kanıtı oluşturmamaktadır (Beer et al., 2003). Ayrıca farklı kökenlerden elde edilen turbalardaki humik asitlerin fizikokimyasal özelliklerinin ve antioksidan aktivitelerinin değişebildiği deneysel olarak gösterilmiştir (Zykova et al., 2018).

Turbanın organik bileşimi; bitkisel kaynak, ayrışma ve humifikasyon derecesi ile oluşum ortamı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Dolayısıyla humik maddeler veya diğer organik bileşenlerin varlığı tek başına materyalin terapötik etkinliğinin göstergesi olarak değerlendirilmemelidir. Turba ve diğer organik maddece zengin doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyon alanındaki kullanımlarında organik bileşimin karakterizasyonunun yanı sıra su içeriği ve termal özellikler ile mikrobiyolojik kalite, potansiyel olarak toksik elementler ve diğer olası kontaminantların da değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle söz konusu materyallerin kullanım potansiyeli, fiziksel ve kimyasal özellikleri, mevcut deneysel ve klinik kanıtlar ile güvenlilik parametreleri birlikte dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

2.4.4. Toprakla İlişkili Diğer Mineral Kökenli Doğal Materyaller

Kil mineralleri ve peloidlerin yanı sıra, toprakla ilişkili bazı mineral kökenli doğal materyaller de sahip oldukları özgün fiziksel ve kimyasal özellikler nedeniyle sağlık alanındaki farklı uygulamalar açısından araştırılmaktadır. Bu materyaller arasında doğal zeolitler ve diatomit öne çıkmaktadır. Bununla birlikte bu materyallerin sağlık alanındaki kullanım düzeyleri kil ve peloidlerden farklı olup, özellikle terapi ve rehabilitasyon açısından doğrudan klinik kullanımlarına ilişkin kanıtlar daha sınırlıdır. Bu nedenle zeolit ve diatomit gibi materyallerin bu alandaki önemi, mevcut terapötik kullanımdan çok biyomedikal ve farmasötik araştırmalarda ortaya konulan özellikleri ve geliştirilebilecek uygulamalar açısından taşıdıkları potansiyel üzerinden değerlendirilmelidir (Bacakova et al., 2018; Kraljević Pavelić et al., 2018; Ruggiero et al., 2014).

Doğal zeolitler, gözenekli kristal yapıları, iyon değişim kapasiteleri ve adsorpsiyon özellikleri nedeniyle farklı sağlık ve biyomedikal uygulamalarda araştırılmaktadır. Özellikle doğal zeolitlerden klinoptilolitin insan ve hayvan sağlığıyla ilişkili kullanımları ve güvenliliği üzerine çalışmalar bulunmaktadır (Kraljević Pavelić et al., 2018). Bunun yanında zeolitlerin kontrollü ilaç ve gen taşıma sistemleri, doku mühendisliği, biyomalzeme kaplamaları ve yara iyileşmesine yönelik materyallerde kullanım olanakları araştırılmaktadır (Bacakova et al., 2018). Doğal klinoptilolit bakımından zengin kayaçlardan farmasötik sistemlerin geliştirilmesine uygun materyallerin hazırlanması da deneysel olarak incelenmiştir (Cerri et al., 2016). Bununla birlikte doğal zeolitlerin mineralojik ve kimyasal bileşimleri, saflıkları ve eşlik eden mineral fazları kaynağa göre değişebilmektedir. Bu nedenle belirli bir zeolit materyali için elde edilen biyolojik veya sağlıkla ilişkili sonuçların bütün doğal zeolitlere genellenmesi uygun değildir. Sağlıkla ilişkili kullanımlarda zeolit türünün belirlenmesi, materyalin mineralojik ve kimyasal saflığının değerlendirilmesi ve kullanım biçimine özgü güvenlilik çalışmalarının yapılması önem taşımaktadır (Cerri et al., 2016; Kraljević Pavelić et al., 2018).

Diatomit ise fosilleşmiş diyatomların silisli iskelet kalıntılarından oluşan, sedimenter kökenli doğal bir materyaldir. Gözenekli yapısı ve yüzey özellikleri nedeniyle diatomit ve diatomit kökenli silis materyallerinin özellikle ilaç taşıma sistemlerindeki kullanım potansiyeli araştırılmaktadır. Doğal diatomitin saflaştırılarak nanopartiküllere dönüştürüldüğü deneysel bir çalışmada, elde edilen diatomit silika nanopartiküllerinin kanser hücrelerine ilaç taşınmasına yönelik potansiyeli değerlendirilmiştir (Ruggiero et al., 2014). Daha güncel çalışmalarda da diatomit kökenli biyosilikanın ilaç taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesinde kullanılabileceği araştırılmıştır (Peng et al., 2024). Bununla birlikte bu çalışmalar büyük ölçüde deneysel ve materyal geliştirme düzeyinde olduğundan, diatomitin terapi veya rehabilitasyonda doğrudan klinik olarak kullanılan bir materyal olduğu sonucuna ulaşmak mümkün değildir. Bu nedenle

diatomit, mevcut bir terapötik materyalden ziyade özgün yapısal özellikleri nedeniyle sağlık alanındaki yeni materyal ve taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesinde potansiyel bir doğal hammadde olarak değerlendirilebilir.

Zeolit ve diatomit örnekleri, toprakla ilişkili doğal materyallerin sağlık alanındaki potansiyelinin yalnızca günümüzde terapötik amaçlarla kullanılan materyallerle sınırlı olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte bir doğal materyalin yüksek yüzey alanı, porozite, adsorpsiyon veya iyon değişimi gibi özelliklere sahip olması tek başına terapötik etkinlik anlamına gelmemektedir. Bu materyallerin gelecekte terapi ve rehabilitasyonla ilişkili uygulamalarda değerlendirilebilmesi için mineralojik ve kimyasal karakterizasyonlarının yapılması, biyouyumluluk ve toksikolojik özelliklerinin belirlenmesi ve hedeflenen kullanım biçimine yönelik deneysel ve klinik çalışmalarla etkinlik ve güvenliliklerinin ortaya konulması gerekmektedir (Cerri et al., 2016; Kraljević Pavelić et al., 2018; Ruggiero et al., 2014).

3. Toprak ve Toprakla İlişkili Doğal Materyallerin Terapi ve Rehabilitasyon Alanındaki Gelecek Perspektifi

Toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyondaki kullanımlarının bilimsel olarak geliştirilmesi, geleneksel kullanım bilgisinin materyal karakterizasyonu, güvenlilik değerlendirmeleri ve klinik kanıtlarla desteklenmesini gerektirmektedir. Gelecekteki çalışmalar yalnızca hangi materyalin kullanıldığına değil, materyalin hangi mineralojik, fizikokimyasal ve biyolojik özelliklerinin uygulama davranışı ve klinik sonuçlarla ilişkili olduğuna odaklanmalıdır. Nitekim terapötik amaçla kullanılan peloidlerde dahi materyal özelliklerinin kapsamlı biçimde karakterize edilmediği ve bu özelliklerle terapötik sonuçlar arasındaki ilişkinin yeterince ortaya konulamadığı bildirilmektedir (Carretero, 2020a, 2020b).

Bu süreçte toprak bilimi ve materyal karakterizasyonu temel bir başlangıç noktasıdır. Mineralojik ve kimyasal bileşim, tane boyutu, yüzey alanı ve yüzey özellikleri, katyon değişim kapasitesi, su tutma, şişme, reoloji, termal davranış, organik madde ve element içeriği gibi özelliklerin materyalin kullanım amacına göre birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Böyle bir yaklaşım, materyalin işlevsel özellikleri ile olası risklerinin aynı çerçevede değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır (Carretero, 2020a).

Standardizasyon da temel gereksinimlerden biridir. Aynı materyal grubu içerisinde değerlendirilen kil, peloid, turba veya diğer doğal materyallerin bileşim ve özellikleri kaynağa göre değişebilmektedir. Bu nedenle örnekleme ve hazırlama yöntemleri, materyal karakterizasyonu ve uygulama protokollerinin açık biçimde tanımlanması, farklı çalışmaların karşılaştırılabilirliği ve elde edilen sonuçların yorumlanması açısından önem taşımaktadır (Carretero, 2020a, 2020b).

Gelecekte zeolit, diatomit ve farklı mineral-organik sistemlerin taşıyıcı, adsorban, kontrollü salım sistemi veya biyomedikal materyal olarak geliştirilmesine yönelik araştırmaların ilerlemesi beklenebilir. Zeolitlerin kontrollü ilaç ve gen taşıma, doku mühendisliği ve biyomalzeme uygulamalarındaki potansiyeli hâlihazırda araştırılmaktadır (Bacakova et al., 2018). Benzer şekilde diatomit kökenli materyallerin ilaç taşıma sistemlerinde kullanımına yönelik deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Bununla birlikte bu tür biyomedikal uygulamalarda elde edilen sonuçlar doğrudan terapötik veya rehabilitatif etkinlik olarak yorumlanmamalı; materyallerin biyouyumluluk ve toksikolojik özellikleri ile hedeflenen kullanım biçimindeki etkinlik ve güvenlilikleri ayrıca ortaya konulmalıdır.

Bu alanın gelişimi disiplinler arası bir yaklaşımı gerektirmektedir. Toprak bilimi, jeoloji ve mineraloji materyalin kökeni, oluşumu ve özelliklerinin belirlenmesine; malzeme bilimi işlevsel davranışının ortaya konulmasına, toksikoloji ve mikrobiyoloji güvenliliğinin değerlendirilmesine, sağlık bilimleri ise uygun uygulama protokollerinin geliştirilmesi ve klinik sonuçların değerlendirilmesine katkı sağlayabilir. Bu disiplinlerin birlikte çalışması, materyalin özellikleri ile biyolojik ve klinik sonuçlar arasındaki ilişkilerin daha açık biçimde ortaya konulmasını sağlayabilir.

Doğal materyallerin kullanımının yaygınlaşması durumunda hammadde kaynaklarının sürdürülebilirliği de dikkate alınmalıdır. Bu konu özellikle turba gibi ekolojik açıdan hassas doğal kaynaklarda önem taşımaktadır. Turbalıkların önemli karbon depoları ve özgün ekosistemler olması nedeniyle turba kaynaklarının kullanımı, koruma ve sürdürülebilir yönetim ilkeleriyle birlikte değerlendirilmelidir (UNEP, 2022). Diğer mineral kökenli doğal hammaddelerde ise çıkarma ve işleme süreçlerinin çevresel etkileri, kaynakların izlenebilirliği ile sürdürülebilir kullanım koşulları materyal ve üretim biçimine özgü olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak bu alandaki gelecekteki ilerleme, yalnızca yeni doğal materyallerin araştırılmasına değil; mevcut materyallerin özellik-etki ilişkilerinin açıklanmasına, materyal ve uygulama protokollerinin standardizasyonuna, güvenlilik değerlendirmelerine, klinik doğrulamaya ve doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımına bağlıdır. Bu yaklaşım, toprak ve toprakla ilişkili doğal materyallerin terapi ve rehabilitasyon alanındaki gerçek kullanım potansiyelinin bilimsel kanıtlar temelinde belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

4. Sonuç

Toprak; mineral ve organik bileşenler ile sıvı ve gaz fazlarının etkileşimi sonucunda fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri şekillenen dinamik bir sistemdir. Bu özellikler yalnızca toprağın tarımsal ve ekolojik işlevlerini belirlemekle kalmamakta, aynı zamanda bazı toprak bileşenleri ve toprakla

ilişkili doğal materyallerin farklı kullanım alanlarında hammadde olarak değerlendirilmesine de olanak sağlamaktadır.

Bu bölümde ele alınan materyaller arasında kil ve kil minerali içeren doğal materyaller ile peloidler, terapi ve rehabilitasyon alanıyla en doğrudan ilişkilendirilebilen gruplardır. Peloidler özellikle termal ve topikal uygulamalarda kullanılmakta ve bazı kas-iskelet sistemi hastalıklarında klinik araştırmalara konu olmaktadır. Turba ve organik maddece zengin doğal materyallerin kullanım ve kanıt düzeyleri materyal ve uygulama biçimine göre değişirken, zeolit ve diatomit gibi mineral kökenli materyallerin sağlık alanındaki potansiyeli daha çok farmasötik ve biyomedikal araştırmalar üzerinden ortaya konulmaktadır.

Doğal materyallerin termal davranış, suyla etkileşim, yüzey özellikleri, adsorpsiyon ve iyon değişimi, plastisite, reoloji, mineralojik ve kimyasal bileşim ile organik içerik gibi özellikleri kullanım biçimleri ve uygulanabilirlikleri açısından önem taşımaktadır. Bununla birlikte bu özelliklerin hiçbiri tek başına terapötik etkinliğin göstergesi değildir. Materyallerin olası yararları değerlendirilirken mineralojik ve kimyasal karakterizasyonun yanı sıra potansiyel olarak toksik elementler, mikrobiyolojik kalite ve gerekli durumlarda radyolojik özellikler gibi güvenlilik parametrelerinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak toprak ve toprakla ilişkili doğal materyaller, sahip oldukları çeşitlilik ve işlevsel özellikler nedeniyle terapi ve rehabilitasyon alanında mevcut ve potansiyel kullanım olanakları sunmaktadır. Ancak bu potansiyelin bilimsel ve güvenli uygulamalara dönüştürülebilmesi; materyal karakterizasyonu, standardizasyon, biyouyumluluk ve güvenlilik değerlendirmeleri ile uygun klinik çalışmaların birlikte yürütülmesine bağlıdır. Toprak bilimleri ile sağlık bilimleri arasında kurulacak disiplinler arası yaklaşım, bu doğal materyallerin gerçek terapötik potansiyelinin ve kullanım sınırlarının bilimsel olarak ortaya konulmasında temel öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services—A global review. Geoderma, 262, 101-111. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009

Aguzzi, C., Cerezo, P., Viseras, C., & Caramella, C. (2007). Use of clays as drug delivery systems: Possibilities and limitations. Applied Clay Science, 36(1–3), 22–36. https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.06.015

Antonelli, M., Donelli, D., & Fioravanti, A. (2018). Effects of balneotherapy and spa therapy on quality of life of patients with knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis. Rheumatology International, 38(10), 1807–1824. https://doi.org/10.1007/s00296-018-4081-6

Armijo, F., Maraver, F., Pozo, M., Carretero, M. I., Armijo, O., Fernández-Torán, M. T., Fernández-González, M. V., & Corvillo, I. (2016). Thermal behaviour of clays and clay-water mixtures for pelotherapy. Applied Clay Science, 126, 50–56. https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.020

Bacakova, L., Vandrovcova, M., Kopova, I., & Jirka, I. (2018). Applications of zeolites in biotechnology and medicine—A review. Biomaterials Science, 6(5), 974–989. https://doi.org/10.1039/C8BM00028J

Baillie, I.C. (2001), Soil Survey Staff 1999, Soil Taxonomy. Soil Use and Management, 17: 57-60. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2001.tb00008.x

Baldovin, T., Amoruso, I., Caldara, F., Buja, A., Baldo, V., Cocchio, S., & Bertoncello, C. (2020). Microbiological hygiene quality of thermal muds: A pilot study in pelotherapy facilities of the Euganean Thermal District (NE Italy). International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(14), 5040. https://doi.org/10.3390/ijerph17145040

Bastos, C. M., Rocha, F., Patinha, C., & Marinho-Reis, P. (2023). Bioaccessibility by perspiration uptake of minerals from two different sulfurous peloids. Environmental Geochemistry and Health, 45, 6621–6641. https://doi.org/10.1007/s10653-023-01639-z

Beer, A.-M., & Lange, U. (2013). Peloid therapy. An overview of the empirical status and evidence of mud therapy. Zeitschrift für Rheumatologie, 72(6), 581–589. https://doi.org/10.1007/s00393-013-1144-7

Beer, A.-M., Junginger, H. E., Lukanov, J., & Sagorchev, P. (2003). Evaluation of the permeation of peat substances through human skin in vitro. International Journal of Pharmaceutics, 253(1–2), 169–175. https://doi.org/10.1016/S0378-5173(02)00706-8

Blum, W. E. (2005). Functions of soil for society and the environment. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 4(3), 75-79. https://doi.org/10.1007/s11157-005-2236-x

Carretero, M. I. (2002). Clay minerals and their beneficial effects upon human health. A review. Applied clay science, 21(3-4), 155-163. https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00085-0

Carretero, M. I. (2020a). Clays in pelotherapy. A review. Part I: Mineralogy, chemistry, physical and physicochemical properties. Applied Clay Science, 189, 105526. https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105526

Carretero, M. I. (2020b). Clays in pelotherapy. A review. Part II: Organic compounds, microbiology and medical applications. Applied Clay Science, 189, 105531. https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105531

Carretero, M. I., & Pozo, M. (2009). Clay and non-clay minerals in the pharmaceutical industry: Part I. Excipients and medical applications. Applied Clay Science, 46(1), 73–80. https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.07.017

Carretero, M. I., Pozo, M., Legido, J. L., Fernández-González, M. V., Delgado, R., Gómez, I., Armijo, F., & Maraver, F. (2014). Assessment of three Spanish clays for their use in pelotherapy. Applied Clay Science, 99, 131–143. https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.022

Centini, M., Tredici, M. R., Biondi, N., Buonocore, A., Maffei Facino, R., & Anselmi, C. (2015). Thermal mud maturation: Organic matter and biological activity. International Journal of Cosmetic Science, 37(3), 339–347. https://doi.org/10.1111/ics.12204

Cerri, G., Farina, M., Brundu, A., Daković, A., Giunchedi, P., Gavini, E., & Rassu, G. (2016). Natural zeolites for pharmaceutical formulations: Preparation and evaluation of a clinoptilolite-based material. Microporous and Mesoporous Materials, 223, 58–67. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.10.034

Corwin, D.L. and Lesch, S.M. (2005). Characterizing Soil Spatial Variability. In Water Encyclopedia J.H. Lehr and J. Keeley (eds), 5, 465-471. https://doi.org/10.1002/047147844X.gw93

Crevenna, R., Scheifinger, J., & Keilani, M. (2025). Relevance of balneotherapy for back pain—a systematic literature review covering the past 5 years. Wiener Medizinische Wochenschrift. https://doi.org/10.1007/s10354-025-01118-3

Çelik Karakaya, M., & Karakaya, N. (2018). Chemical composition and suitability of some Turkish thermal muds as peloids. Turkish Journal of Earth Sciences, 27(3), 191–204. https://doi.org/10.3906/yer-1712-8

Çelik Karakaya, M., Doğru, M., Karakaya, N., Cingilli Vural, H., Kuluöztürk, F., & Şahin Bal, S. (2015). Radioactivity concentrations and dose assessments of therapeutic peloids from some Turkish spas. Clay Minerals, 50(2), 221–232. https://doi.org/10.1180/claymin.2015.050.2.06

Çelik Karakaya, M., Karakaya, N., & Aydın, S. (2017). The physical and physicochemical properties of some Turkish thermal muds and pure clay minerals and their uses in therapy. Turkish Journal of Earth Sciences, 26(6), 395–409. https://doi.org/10.3906/yer-1707-8

Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (USDA) (1996). Indicators for soil quality evaluation. Soil Quality Information Sheet.

Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. Ecological economics, 69(9), 1858-1868. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002

Ferrand, T., & Yvon, J. (1991). Thermal properties of clay pastes for pelotherapy. Applied Clay Science, 6(1), 21–38. https://doi.org/10.1016/0169-1317(91)90008-W

Flusser, D., Abu-Shakra, M., Friger, M., Codish, S., & Sukenik, S. (2002). Therapy with mud compresses for knee osteoarthritis: Comparison of natural mud preparations with mineral-depleted mud. Journal of Clinical Rheumatology, 8(4), 197–203. https://doi.org/10.1097/00124743-200208000-00003

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2015). Status of the world's soil resources: Main report. FAO. Retrieved September 7, 2026. https://openknowledge.fao.org/items/f16010ce-1874-4108-bd03-a6a592e2e53a

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2026). Key definitions: What is soil? FAO Soils Portal. Retrieved September 7, 2026, from https://www.fao.org/soils-portal/about/all-definitions/en

Forestier, R., Desfour, H., Tessier, J.-M., Françon, A., Foote, A. M., Genty, C., Rolland, C., Roques, C.-F., & Bosson, J.-L. (2010). Spa therapy in the treatment of knee osteoarthritis: A large randomised multicentre trial. Annals of the Rheumatic Diseases, 69(4), 660–665. https://doi.org/10.1136/ard.2009.113209

Gomes, C. S. F., Carretero, M. I., Pozo, M., Maraver, F., Cantista, P., Armijo, F., Legido, J. L., Teixeira, F., & Rocha, F. (2021). Peloids as thermotherapeutic agents. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(4), 1965. https://doi.org/10.3390/ijerph18041965

Hartemink, A. E. (2016). The definition of soil since the early 1800s. Donald L. Sparks (Ed.), Advances in Agronomy, 137, 73–126. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.001

Johnston, C. T. (2018). Clay mineral–water interactions. In Developments in Clay Science, (Vol. 9, pp. 89–124). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102432-4.00004-4

Juilleret, J., Dondeyne, S., Vancampenhout, K., Deckers, J., & Hissler, C. (2016). Mind the gap: a classification system for integrating the subsolum into soil surveys. Geoderma, 264, 332-339.. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.031

Karaarslan, F., Yılmaz, H., Akkurt, H. E., Gül, S., & Kardeş, S. (2021). Effectiveness of peloid therapy in patients with chronic low back pain: a single-blind controlled study. International Journal of Biometeorology, 65, 1799–1809 (2021). https://doi.org/10.1007/s00484-021-02137-6

Kleber, M., Bourg, I. C., Coward, E. K., Hansel, C. M., Myneni, S. C., & Nunan, N. (2021). Dynamic interactions at the mineral–organic matter interface. Nature Reviews Earth & Environment, 2(6), 402-421. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00162-y

Kleber, M., Sollins, P., & Sutton, R. (2007). A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. Biogeochemistry, 85(1), 9–24. https://doi.org/10.1007/s10533-007-9103-5

Kraljević Pavelić, S., Simović Medica, J., Gumbarević, D., Filošević, A., Pržulj, N., & Pavelić, K. (2018). Critical review on zeolite clinoptilolite safety and medical applications in vivo. Frontiers in Pharmacology, 9, 1350. https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01350

Kühn, D., & Eberhardt, E. (2023). A classification of soil solid material for natural and anthropogenic soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 186, 507–521. https://doi.org/10.1002/jpln.202200444

Lehmann, J., Kleber, M. The contentious nature of soil organic matter. Nature 528, 60–68 (2015). https://doi.org/10.1038/nature16069

López-Galindo, A., & Viseras, C. (2004). Pharmaceutical and cosmetic applications of clays. In F. Wypych & K. G. Satyanarayana (Eds.), Clay surfaces: Fundamentals and applications (pp. 267–289). Elsevier. 10.1016/S1573-4285(04)80044-9

López-Galindo, A., Viseras, C., & Cerezo, P. (2007). Compositional, technical and safety specifications of clays to be used as pharmaceutical and cosmetic products. Applied Clay Science, 36(1–3), 51–63. https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.06.016

Ma, C., & Eggleton, R. A. (1999). Cation Exchange Capacity of Kaolinite. Clays and Clay Minerals, 47(2), 174–180. https://doi:10.1346/CCMN.1999.0470207

Matsumoto, S. (2018). Evaluation of the role of balneotherapy in rehabilitation medicine. Journal of Nippon Medical School, 85(4), 196–203. https://doi.org/10.1272/jnms.JNMS.2018_85-30

Moraes, J. D. D., Bertolino, S. R. A., Cuffini, S. L., Ducart, D. F., Bretzke, P. E., & Leonardi, G. R. (2017). Clay minerals: Properties and applications to dermocosmetic products and perspectives of natural raw materials for therapeutic purposes—A review. International journal of pharmaceutics, 534(1-2), 213-219. https://doi.org/ 10.1016/j.ijpharm.2017.10.031

Murray, H. H. (1991). Overview—clay mineral applications. Applied clay science, 5(5-6), 379-395. https://doi.org/10.1016/0169-1317(91)90014-Z

Murray, H. H. (2000). Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: A general overview. Applied Clay Science, 17(5–6), 207–221. https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00016-8

Nanzyo, M., & Kanno, H. (2018a). Primary minerals. In Inorganic constituents in soil: Basics and visuals (pp. 11–35). Springer. http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/23197

Nanzyo, M., & Kanno, H. (2018b). Secondary minerals. In Inorganic constituents in soil: Basics and visuals (pp. 37–58). Springer. http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/23197

National Library of Medicine (NLM) (2026). Therapeutics. Medical Subject Headings (MeSH). National Center for Biotechnology Information. Retrieved September 7, 2026, from https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/68013812

Odabasi, E., Turan, M., Erdem, H., & Tekbas, F. (2008). Does mud pack treatment have any chemical effect? A randomized controlled clinical study. The Journal of Alternative and Complementary Medicine, 14(5), 559–565. https://doi.org/10.1089/acm.2008.0003

Olson, K. R. (2004). Factors of Soil Formation - Parent Material. In Encyclopedia of Soils in the Environment (Vol. 4, pp. 532-535). Elsevier Inc.. https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00005-9

Özay, P., Karagülle, M., Kardeş, S., & Karagülle, M. Z. (2020). Chemical and mineralogical characteristics of peloids in Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 192(12), 805. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08777-2

Pagano, G., Guida, M., Tommasi, F., & Oral, R. (2015). Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements—Knowledge gaps and research

prospects. Ecotoxicology and Environmental Safety, 115, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.01.030

Paul, E. A. (2016). The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. Soil Biology and Biochemistry, 98, 109-126. https://10.1016/j.soilbio.2016.04.001

Peng, G., Cai, J., Wang, Z., Zhang, W., Xu, J., Zhang, D., & Gong, D. (2024). Facile fabrication of diatomite biosilica-based nasal drug delivery vehicle for enhanced treatment of allergic rhinitis. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 234, 113715. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2023.113715

Protano, C., Fontana, M., De Giorgi, A., Marotta, D., Cocomello, N., Crucianelli, S., Del Cimmuto, A., & Vitali, M. (2023). Balneotherapy for osteoarthritis: A systematic review. Rheumatology International, 43(9), 1597–1610. https://doi.org/10.1007/s00296-023-05358-7

Reuben, D. B., & Tinetti, M. E. (2012). Goal-oriented patient care—An alternative health outcomes paradigm. New England Journal of Medicine, 366(9), 777–779. https://doi.org/10.1056/NEJMp1113631

Ruggiero, I., Terracciano, M., Martucci, N. M., De Stefano, L., Migliaccio, N., Taté, R., Rendina, I., Arcari, P., Lamberti, A., & Rea, I. (2014). Diatomite silica nanoparticles for drug delivery. Nanoscale Research Letters, 9, 329. https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-329

Sánchez-Espejo, R., Cerezo, P., Aguzzi, C., López-Galindo, A., Machado, J., & Viseras, C. (2015). Physicochemical and in vitro cation release relevance of therapeutic muds “maturation”. Applied Clay Science, 116, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.08.007

Schaetzl, R. J., & Thompson, M. L. (2015). Weathering. In Soils: Genesis and Geomorphology (pp. 165–180). Chapter, Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139061803.010

Schoonheydt, R. A., & Johnston, C. T. (2006). Surface and interface chemistry of clay minerals. In F. Bergaya, B. K. G. Theng, & G. Lagaly (Eds.), Handbook of clay science (Developments in Clay Science, Vol. 1, pp. 87–113). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01003-2

Si, B.C. (2008), Spatial Scaling Analyses of Soil Physical Properties: A Review of Spectral and Wavelet Methods. Vadose Zone Journal, 7: 547-562. https://doi.org/10.2136/vzj2007.0040

Soil Science Society of America (SSSA) (2008). Designations for Soil Horizons and Layers. In Glossary of Soil Science Terms 2008. Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/2008.glossarysoilscienceterms

Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy, United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Sparks, D.L. (2019). Fundamentals of Soil Chemistry. In Encyclopedia of Water, P. Maurice (Ed.). https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0025

Stucki, G., Bickenbach, J., Gutenbrunner, C., & Melvin, J. (2018). Rehabilitation: The health strategy of the 21st century. Journal of Rehabilitation Medicine, 50(4), 309–316. https://doi.org/10.2340/16501977-2200

Torres-Ronda, L., & i del Alcázar, X. S. (2014). The properties of water and their applications for training. Journal of Human Kinetics, 44, 237–248. https://doi.org/10.2478/hukin-2014-0129

United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). Global peatlands assessment: The state of the world's peatlands—Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands (Main report), Retrieved September 7, 2026. Global Peatlands Initiative. https://www.unep.org/resources/global-peatlands-assessment-2022?utm

Viseras, C., Aguzzi, C., Cerezo, P., & López-Galindo, A. (2007). Uses of clay minerals in semisolid health care and therapeutic products. Applied Clay Science, 36(1–3), 37–50. https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.07.006

Wang, W., Yang, Y., Wang, D., & Huang, L. (2024). Toxic effects of rare earth elements on human health: A review. Toxics, 12(5), 317. https://doi.org/10.3390/toxics12050317

Wilson, M. J. (2019). The importance of parent material in soil classification: A review in a historical context. Catena, 182, 104131. https://doi.org/ 10.1016/j.catena.2019.104131

World Health Organization (WHO) (2024). Rehabilitation, Retrieved September 7, 2026. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation

World Health Organization. (2023). Package of interventions for rehabilitation: Module 1. Introduction. World Health Organization. 5 July 2023. https://www.who.int/publications/i/item/9789240067097?utm_source

Zykova, M. V., Schepetkin, I. A., Belousov, M. V., Krivoshchekov, S. V., Logvinova, L. A., Bratishko, K. A., Yusubov, M. S., Romanenko, S. V., & Quinn, M. T. (2018). Physicochemical Characterization and Antioxidant Activity of Humic Acids Isolated from Peat of Various Origins. Molecules, 23(4), 753. https://doi.org/10.3390/molecules23040753

BÖLÜM 17

Balık Çiftlikleri ve Avcılık Balıkçılığı Arasındaki Ekolojik Bağlantılar ve Etkileşim Mekanizmaları

Adnan Tokaç [1]

[1] Prof. Dr., Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi ORCID: 0000-0002-2968-7315

1. GİRİŞ

Deniz balıkları yetiştiriciliği ile avcılık balıkçılığı, çoğu kıyı sisteminde aynı su kütlesini, aynı taban yapısını ve çoğu zaman aynı balık popülasyonlarını paylaşır. Bu paylaşım, iki faaliyeti birbirinden bağımsız üretim biçimleri olmaktan çıkarıp tek bir ekolojik sistemin iki bileşeni hâline getirir. Nitekim güncel literatürde, yetiştiricilik ile avcılığın geleceğinin ayrı ayrı değil, etkileşimleri ve ortak yönetimleri üzerinden ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Clavelle vd., 2019). Bu bağlantının kurulduğu yol, kafeslerin kapladığı yüzey alanından çok daha geniştir: bir ağ kafes çiftliği, kurulduğu noktada madde akışını, besin ağı ilişkilerini, enfeksiyon dinamiklerini ve gen akışını aynı anda değiştiren çok kanallı bir müdahaledir.

2. EKOLOJİK BAĞLANTILAR VE ETKİLEŞİM MEKANİZMALARI

2.1. Trofik Bağlantılar

Bu müdahalenin ilk ve en görünür kanalı yabani balık toplanması ve balıkçılığın çiftliklere yönelmesi şeklinde kendini gösteren trofik bağlantıdır. Kafeslerden dökülen yem artıkları, dışkı ve kafes ağları üzerinde gelişen örtü organizmaları, deniz ortamına sürekli ve öngörülebilir bir organik madde akışı sağlar. Bu akış, çiftlik çevresinde yoğun yabani balık toplulukları oluşmasına yol açar; Akdeniz kıyılarında bu toplulukların mevsimsel bir yapı gösterdiği ve beslenmelerinde çiftlik kaynaklı yemin belirleyici olduğu ortaya konmuştur (Fernandez-Jover vd., 2008). Bağlantı yalnızca erişkin bireylerle sınırlı değildir; çiftlikler çok sayıda türün juvenil bireyleri için yerleşim alanı işlevi görmektedir (Fernandez-Jover vd., 2009). Trofik bağlantının bireysel düzeydeki izi, vücut kondisyonu ve yağ asidi bileşimindeki değişimde okunabilmekte (Fernandez-Jover vd., 2007), bu izler çiftlik kökenli ve yabani bireylerin ayırt edilmesinde ayıraç olarak kullanılabilmektedir (Arechavala-Lopez vd., 2013). Etkinin yönü her zaman olumsuz değildir: Norveç kıyılarında çiftliklerin yabani morina ve kömürcün için besleyici bir kaynak oluşturduğu, bu türlerin kondisyon göstergelerinde iyileşme sağlandığı gösterilmiştir (Dempster vd., 2011).

Trofik bağlantının balıkçılığa yansıması, biyokütlenin mekânsal olarak yeniden dağılmasıdır. Ege Denizi'nde akustik yöntemlerle yürütülen çalışmalar, çiftlik bulunan alanlarda yabani balık agregasyonlarının mekânsal yapısının belirgin biçimde değiştiğini ortaya koymuştur (Giannoulaki vd., 2005). Türkiye kıyılarında bu değişim doğrudan av çabasına yansımakta; kafes çiftliği çevresi, yerel balıkçılar için düzenli bir av sahası hâline gelmektedir (Akyol ve Ertosluk, 2010; Akyol vd., 2020). Buradaki kritik kavramsal ayrım, çekim (attraction) ile üretim (production) arasındadır: çiftlik çevresindeki yüksek yoğunluk, bölgesel stokta gerçek bir artışa değil yalnızca yakın çevreden bireylerin çekilmesine dayanıyorsa, bu alanlarda yoğunlaşan avcılık toplam verimi artırmadan stok üzerinde ek baskı oluşturur. Yunanistan'ın oligotrofik sularında çiftlik faaliyetinin yerel av miktarına yansımasını inceleyen çalışma (Machias vd.,

2006) ile lüferin havza ölçeğinde çiftlikler çevresinde toplanmasına ilişkin bulgular (Sanchez-Jerez vd., 2008; Miralles vd., 2016), bu ayrımın ampirik karşılığını oluşturmaktadır.

2.2. Genetik Bağlantılar

İkinci kanal genetik bağlantıdır. Kafeslerden kaçan bireyler, yabani popülasyonların üreme alanlarına kadar dağılabilmekte (Uglem vd., 2008) ve uzun dönemde ölçülebilir bir gen akışı yaratmaktadır; Norveç'te yarım yüzyıllık üretim geçmişinin ardından çok sayıda yabani somon popülasyonunda çiftlik kaynaklı introgresyon saptanmıştır (Karlsson vd., 2016; Glover vd., 2017). Kaçak bireylerin hayatta kalma ve üreme başarısıyla ölçülen uygunluğunun yabani bireylerin gerisinde kalması (Weir ve Grant, 2005), bu gen akışının popülasyon düzeyinde bir uyum maliyeti taşıdığını göstermektedir. Bağlantının balıkçılık açısından ikinci sonucu, av kompozisyonunun bulanıklaşmasıdır: yabani olduğu varsayılan avın bir bölümü kaçak bireylerden oluşuyorsa, stok göstergeleri olduğundan daha iyi bir şekilde anlaşılmasına neden olabilmektedir (Dimitriou vd., 2007).

2.3. Epidemiyolojik Bağlantılar

Üçüncü kanal epidemiyolojik bağlantıdır ve çift yönlü işler. Yüksek konak yoğunluğu, parazit ve patojenler için elverişli bir ortam yaratır; deniz bitinin yetiştiricilik ve yabani balık üzerindeki ekolojisi bu bağlantının en iyi belgelenmiş örneğidir (Costello, 2006). Çiftliklerden kaynaklanan enfeksiyon baskısının göç yolları üzerindeki juvenil bireyleri etkilediği gösterilmiş (Krkošek vd., 2005), etkinin yabani salmonid gerilemelerindeki olası payı tartışılmıştır (Costello, 2009). Bağlantının ters yönü de gerçektir: Türkiye'nin Akdeniz kıyılarında yabani balık türlerinde betanoda virüsün saptanması (Kaplan vd., 2023), yabani popülasyonların çiftlikler için bir rezervuar oluşturabileceğini göstermektedir. Buna karşılık Batı Akdeniz'de çiftlik varlığının yabani balıkların toplam parazit topluluklarını anlamlı biçimde değiştirmediğinin bulunması (Fernandez-Jover vd., 2010), aktarım riskinin türe, parazit yaşam döngüsüne ve hidrodinamik koşullara göre büyük değişkenlik gösterdiğini hatırlatmaktadır.

2.4. 2.3. Biyojeokimyasal Bağlantılar

Dördüncü kanal biyojeokimyasal bağlantıdır. Yem artığı ve dışkı kaynaklı organik madde, tabanda birikerek bentik topluluk yapısını değiştirir; kararlı izotop çalışmaları bu maddenin besin ağına girdiğini ve etkisinin yüzlerce metre uzağa taşınabildiğini ortaya koymuştur (Vizzini ve Mazzola, 2004). Türkiye kıyılarında çiftliklerin besin tuzları ve bentik topluluk üzerindeki etkisi ölçülmüş (Yucel-Gier vd., 2007), Akdeniz'de en hassas alıcının deniz çayırları olduğu gösterilmiştir (Pergent-Martini vd., 2006). Bu kanal, balıkçılığı doğrudan ilgilendirir: deniz çayırları ve yumuşak taban habitatları, avlanan pek çok tür için yumurtlama ve büyüme alanıdır; dolayısıyla habitat düzeyindeki bir değişim,

zamanla av verimine yansır. Bağlantının ters yönünde ise yem girdisi yer alır; etçil türlerin yetiştiriciliğinin balık unu ve yağına dayanması (Tacon ve Metian, 2008), yetiştiriciliğin küçük pelajik stoklar üzerinde dolaylı bir talep baskısı oluşturmasına yol açmaktadır (Naylor vd., 2000).

3. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu dört kanala, koruma statüsündeki türlerle kurulan bağlantıyı da eklemek gerekir. Kafesler, deniz memelileri için yoğunlaşmış bir besin kaynağı oluşturur; Türk Ege kıyılarında Akdeniz foku ile çiftlikler arasındaki etkileşimin uzun dönemli izlenmesi (Güçlüsoy ve Savas, 2003), ekolojik bağlantının koruma politikasıyla kesiştiği noktayı göstermektedir.

Bu mekanizmaların ortak özelliği, birbirinden bağımsız işlememeleridir. Trofik çekim, çiftlik çevresinde av çabasını yoğunlaştırarak ağ hasarı ve dolayısıyla kaçış olasılığını artırır; kaçışlar genetik bağlantıyı beslerken, yoğunlaşan yabani balık toplulukları epidemiyolojik bağlantının taşıyıcısı hâline gelir; organik yük ise taban habitatını değiştirerek bu toplulukların bileşimini yeniden biçimlendirir. Bu nedenle etkileşim, tek tek mekanizmaların toplamı olarak değil, birbirini besleyen bir ilişkiler ağı olarak ele alınmalıdır. Mekanizmaların işlediği mekânsal ölçekler de farklıdır: organik yük tesis ve koy ölçeğinde, parazit aktarımı ve yabani balık hareketleri bölge ölçeğinde, yem talebi ise havza ve küresel ölçekte etki gösterir. Düzenleyici çerçevelerin büyük bölümünün tesis ölçeğinde kurgulanmış olması, bu ölçek uyumsuzluğunu yetiştiricilik–balıkçılık etkileşiminin merkezî yönetim sorunu hâline getirmektedir.

KAYNAKÇA

Akyol, O. ve Ertosluk, O. (2010). Fishing near sea-cage farms along the coast of the Turkish Aegean Sea. *Journal of Applied Ichthyology*, *26*(1), 11-15. doi:10.1111/j.1439-0426.2009.01348.x

Akyol, O., Özgül, A., Düzbastılar, F. O., Şen, H., Ortiz de Urbina, J. M. ve Ceyhan, T. (2020). Seasonal variations in wild fish aggregation near sea-cage fish farms in the Turkish Aegean Sea. *Aquaculture Reports*, *18*, 100478. doi:10.1016/j.aqrep.2020.100478

Arechavala-Lopez, P., Fernandez-Jover, D., Black, K. D., Ladoukakis, E., Bayle-Sempere, J. T., Sanchez-Jerez, P. ve Dempster, T. (2013). Differentiating the wild or farmed origin ofMediterranean fish: a review of tools for sea bream and sea bass. *Reviews in Aquaculture*, *5*(3), 137-157. doi:10.1111/raq.12006

Clavelle, T., Lester, S. E., Gentry, R. ve Froehlich, H. E. (2019). Interactions and management for the future of marine aquaculture and capture fisheries. *Fish and Fisheries*, *20*(2), 368-388. doi:10.1111/faf.12351

Costello, M. J. (2006). Ecology of sea lice parasitic on farmed and wild fish. *Trends in Parasitology*, *22*(10), 475-483. doi:10.1016/j.pt.2006.08.006

Costello, M. J. (2009). How sea lice from salmon farms may cause wild salmonid declines in Europe and North America and be a threat to fishes elsewhere. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *276*(1672), 3385-3394. doi:10.1098/rspb.2009.0771

Dempster, T., Sanchez-Jerez, P., Fernandez-Jover, D., Bayle-Sempere, J., Nilsen, R., Bjørn, P. A. ve Uglem, I. (2011). Proxy Measures of Fitness Suggest Coastal Fish Farms Can Act as Population Sources and Not Ecological Traps for Wild Gadoid Fish. *PLoS ONE*, *6*(1), e15646. doi:10.1371/journal.pone.0015646

Dimitriou, E., Katselis, G., Moutopoulos, D. K., Akovitiotis, C. ve Koutsikopoulos, C. (2007). Possible influence of reared gilthead sea bream (Sparus aurata, L.) on wild stocks in the area of the Messolonghi lagoon (Ionian Sea, Greece). *Aquaculture Research*, *38*(4), 398-408. doi:10.1111/j.1365-2109.2007.01681.x

Fernandez-Jover, D., Faliex, E., Sanchez-Jerez, P., Sasal, P. ve Bayle-Sempere, J. T. (2010). Coastal fish farming does not affect the total parasite communities of wild fish in SW Mediterranean. *Aquaculture*, *300*(1-4), 10-16. doi:10.1016/j.aquaculture.2009.12.006

Fernandez-Jover, D., Jimenez, J. A. L., Sanchez-Jerez, P., Bayle-Sempere, J., Casalduero, F. G., Lopez, F. J. M. ve Dempster, T. (2007). Changes in body condition and fatty acid composition of wild Mediterranean horse mackerel (Trachurus mediterraneus, Steindachner, 1868) associated to sea cage fish

farms. *Marine Environmental Research*, *63*(1), 1-18. doi:10.1016/j.marenvres.2006.05.002

Fernandez-Jover, D., Sanchez-Jerez, P., Bayle-Sempere, J. T., Arechavala-Lopez, P., Martinez-Rubio, L., Jimenez, J. A. L. ve Lopez, F. J. M. (2009). Coastal fish farms are settlement sites for juvenile fish. *Marine Environmental Research*, *68*(2), 89-96. doi:10.1016/j.marenvres.2009.04.006

Fernandez-Jover, D., Sanchez-Jerez, P., Bayle-Sempere, J. T., Valle, C. ve Dempster, T. (2008). Seasonal patterns and diets of wild fish assemblages associated with Mediterranean coastal fish farms. *ICES Journal of Marine Science*, *65*(7), 1153-1160. doi:10.1093/icesjms/fsn091

Giannoulaki, M., Machias, A., Somarakis, S. ve Karakassis, I. (2005). wild fish spatial structure in response to presence of fish farms. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, *85*(5), 1271-1277. doi:10.1017/s0025315405012427

Glover, K. A., Solberg, M. F., McGinnity, P., Hindar, K., Verspoor, E., Coulson, M. W., . . . Svåsand, T. (2017). Half a century of genetic interaction between farmed and wild Atlantic salmon: Status of knowledge and unanswered questions. *Fish and Fisheries*, *18*(5), 890-927. doi:10.1111/faf.12214

Güçlüsoy, H. ve Savas, Y. (2003). Interaction between monk seals Monachus monachus (Hermann, 1779) and marine fish farms in the Turkish Aegean and management of the problem. *Aquaculture Research*, *34*(9), 777-783. doi:10.1046/j.1365-2109.2003.00884.x

Kaplan, M., Pekmez, K., Çağırgan, A., Tekelioğlu, B., Oğuz, U., Kafa, B., . . . Kalaycı, G. (2023). Survey on Betanodavirus in Wild Fish Species in the Turkish Coastlines of the Mediterranean Sea and Molecular Characterization: detecting different genotypes from different fish in different locations. *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists*, *43*(2). doi:10.48045/001c.74914

Karlsson, S., Diserud, O. H., Fiske, P., Hindar, K. ve Handling Editor: W. Stewart Grant (2016). Widespread genetic introgression of escaped farmed Atlantic salmon in wild salmon populations. *ICES Journal of Marine Science*, *73*(10), 2488-2498. doi:10.1093/icesjms/fsw121

Krkošek, M., Lewis, M. A. ve Volpe, J. P. (2005). Transmission dynamics of parasitic sea lice from farm to wild salmon. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *272*(1564), 689-696. doi:10.1098/rspb.2004.3027

Machias, A., Giannoulaki, M., Somarakis, S., Maravelias, C., Neofitou, C., Koutsoubas, D., . . . Karakassis, I. (2006). Fish farming effects on local fisheries landings in oligotrophic seas. *Aquaculture*, *261*(2), 809-816. doi:10.1016/j.aquaculture.2006.07.019

Miralles, L., Mrugala, A., Sanchez-Jerez, P., Juanes, F. ve Garcia-Vazquez, E. (2016). Potential Impact of Mediterranean Aquaculture on the Wild Predatory Bluefish. *Marine and Coastal Fisheries*, *8*(1), 92-99. doi:10.1080/19425120.2015.1125977

Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., . . . Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, *405*(6790), 1017-1024. doi:10.1038/35016500

Pergent-Martini, C., Boudouresque, C., Pasqualini, V. ve Pergent, G. (2006). Impact of fish farming facilities on Posidonia oceanica meadows: a review. *Marine Ecology*, *27*(4), 310-319. doi:10.1111/j.1439-0485.2006.00122.x

Sanchez-Jerez, P., Fernandez-Jover, D., Bayle-Sempere, J., Valle, C., Dempster, T., Tuya, F. ve Juanes, F. (2008). Interactions between bluefish Pomatomus saltatrix (L.) and coastal sea-cage farms in the Mediterranean Sea. *Aquaculture*, *282*(1-4), 61-67. doi:10.1016/j.aquaculture.2008.06.025

Tacon, A. G. ve Metian, M. (2008). Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects. *Aquaculture*, *285*(1-4), 146-158. doi:10.1016/j.aquaculture.2008.08.015

Uglem, I., Bjørn, P. A., Dale, T., Kerwath, S., Økland, F., Nilsen, R., . . . McKinley, R. S. (2008). Movements and spatiotemporal distribution of escaped farmed and local wild Atlantic cod (Gadus morhua L.). *Aquaculture Research*, *39*(2), 158-170. doi:10.1111/j.1365-2109.2007.01872.x

Vizzini, S. ve Mazzola, A. (2004). Stable isotope evidence for the environmental impact of a land-based fish farm in the western Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, *49*(1-2), 61-70. doi:10.1016/j.marpolbul.2004.01.008

Weir, L. K. ve Grant, J. W. (2005). Effects of aquaculture on wild fish populations: a synthesis of data. *Environmental Reviews*, *13*(4), 145-168. doi:10.1139/a05-012

Yucel-Gier, G., Kucuksezgin, F. ve Kocak, F. (2007). Effects of fish farming on nutrients and benthic community structure in the Eastern Aegean (Turkey). *Aquaculture Research*, *38*(3), 256-267. doi:10.1111/j.1365-2109.2007.01661.x

BÖLÜM 18

Sürdürülebilir Kırsal Kalkınma: Konya-Karaman İllerinde Mısır Tarımının Değerlendirilmesi

Mustafa Belen[1]
Ahmet Bayrac[2]
Ali Kahraman[3]

[1] Zir. Müh., Selcuk University, Faculty of Agriculture, ORCID: 0009-0007-7147-2311
[2] Dr., Agricultural Credit Cooperatives of Turkiye (Number: 2136), ORCID: 0000-0001-5643-1131
[3] Prof. Dr., Selcuk University, Faculty of Agriculture, ORCID: 0000-0003-3203-4697

Giriş

Sürdürülebilirlik günümüzde hayata dair hemen her konuda karşımıza çıkan ve geleceğe dair planlamaların temelini oluşturan bir olgudur. Kırsal alanlardaki toplulukların sürdürülebilirliğini sağlamak ve etkili adımlar atarak sürdürülebilir kırsal topluluklar oluşturmak büyük önem taşımaktadır. Bu önem, yalnızca ülke kalkınmasına ve Gayri Safi Yurtiçi Hasılaya katkıda bulunmakla kalmayacak, aynı zamanda kentsel alanlardaki göçü, yoğunluğu ve aşırı nüfusu azaltmaya da yardımcı olacaktır. Sürdürülebilirlik, tasarımın ayrılmaz bir parçası olarak yeryüzündeki herhangi bir alanın çevresini, enerji kaynaklarını ve potansiyelinin kullanımını ele alan stratejiler olarak tanımlanmaktadır. Sürdürülebilir toplumlar, bireylerin sağlıklı, üretken ve keyifli bir yaşam sürmeye devam edebilmeleri için sosyal, ekonomik ve çevresel özelliklerini korur ve geliştirir. Çevresel sürdürülebilirlik ise, kirlilik, küresel ısınma, ormansızlaşma, yenilenemeyen kaynakların aşırı kullanımı ve fiziksel bozulma ile ilgili yeni küresel kaygıları ifade eder. Bu yönüyle bakıldığında tarımsal faaliyetler; sürdürülebilirliğin temel taşını oluşturmaktadır.

Ülke kültürünü meydana getiren yerel kültür bileşeni ise, toplumu oluşturan bireylerin hayatının şekillenmesinde önemli rol oynamaktadır. Kırsal toplulukların işlerinde kültür ve gelenekler her zaman merkezde yer almıştır. Kırsal topluluklar iyi ücretli işlere, sağlık hizmetlerine erişime, eğitime erişime, sağlıklı bir doğal çevreye ve güçlü bir topluma bağımlıdır. Kırsal kültür durağan değildir; yeni gerçeklere uyum sağlar. Göç, teknoloji ve ekonomideki değişimler yeni etkiler ve zorluklar ortaya çıkartır.

Mısır (*Zea mays*), gıda, yem, lif ve yakıt üretimi için her yıl çok yüksek miktarlarda üreten, küresel ölçekte hayati öneme sahip bir üründür. Mısır ekimi için tarla hazırlığı ve planlaması, ilkbahar ekiminin ve aynı derecede başarılı bir yaz büyüme mevsiminin başarısı için çok önemlidir. Bu durum, araştırmacılara tarla hazırlığı, ekim öncesi tarlanın düzenlenmesi, tohum ekimi ve erken mevsim tarla değerlendirmeleri konusunda yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Mısır tarımında, özellikle zararlı kontrolü, sulama ve gübreleme uygulamaları açısından prosedürler farklılık gösterebilir. Bu uygulamalar, mevcut makine ve hava koşullarına bağlı olarak kısmi farklılıklar gösterebilir (Draves ve ark., 2026). Bunun yanı sıra, ürünlerin fiyatlarını tahmin etmek, çiftçilerin her yıl aşması gereken karmaşık bir zorluktur. Tarımsal üretimin yapıldığı bölgenin iklim şartları, ham petrol fiyatı ve piyasa talebi gibi birden fazla özelliği kullanarak verimli bir karar destek sistemi oluşturmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Ertuğrul ve ark., 2024; Kaabi ve ark., 2025).

Araştırmalarda sadece zirai veriler değil, aynı zamanda kültürel değerlere dair bilgilerin de edinilmesi elzemdir. Zira yapılan bir araştırmada, farklı kültürlere sahip kişilerin tarımsal üretimi artırmak için başarılı stratejiler bulmak amacıyla deneme yanılma yöntemini benimsediğini ve bunun da aslında tarımsal eğitim

girişimleri geliştirmelerine yol açtığını göstermiştir. Ayrıca aynı çalışmada, devletin kültür politikasındaki değişimin, başarılı kolektif çiftliklerin daha önce mümkün olmayan bir şekilde kültürel gelişim sağlaması için fırsatlar oluşturduğu ifade edilmiştir. Hızla değişen siyasi ve ideolojik koşullar arasında yol alırken, tarımla uğraşan insanların kültürü ve ideolojisine dair kendi yeni kavramlarını ve anlayışlarını şekillendirip ortaya koymaları ve kültürel alandan sosyal yapıyı nasıl inşa edeceklerinin belirlenmesi önem taşımaktadır (Johnston, 2026).

Kırsal nüfusun temel geçim kaynağının tarım olmasından hareketle sürdürülebilirlik temelinde hazırlanan bu araştırmada, Konya ve Karaman illerinde, daha 2000'li yılların başlarında tanışılan ve daha sonra çok geniş ölçülerde yaygınlaşarak yer edinen mısır bitkisinin tarımı ele alınarak karşılaşılan temel sorunlar, üretimi etkileyen faktörler, olası fırsat ve riskler dikkate alınarak toplamda 200 çiftçi ile yüz yüze anket soruları yanıtlanmış olup, elde edilen veriler değerlendirilerek sürdürülebilirliğe katkı sunulması amaçlanmıştır.

Materyal ve Yöntem

Bu araştırma, 2025 ve 2026 yıllarında, mısır üretiminin yoğun yapıldığı Konya ve Karaman illerinde yapılmıştır. Saha çalışmaları kapsamında toplam 200 mısır üreticisi ile yüz yüze anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Mısır üreticilerine; kişisel meslek bilgileri, mısır tarımı uygulamaları, kuraklık deneyimleri ve yeni ıslah teknolojilerine bakış açılarını ölçmek amacıyla toplam 23 soruluk bir anket uygulanmıştır.

Çalışma kapsamında mısır üretimini sınırlayan temel faktör olan kuraklık stresine yönelik hususlar özellikle dikkate alınarak, sürdürülebilir ve yenilikçi çözüm yaklaşımlarının ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda çalışmada, rastgele seçilen 200 çiftçiden "Sistematik Örnekleme Yöntemi"ne göre toplanan veriler, bilgisayar tabanlı "Microsoft Office-Excel" programı kullanılarak yüzde (%) birimiyle ifade edilen sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Bu araştırmada yöneltilen soruların hazırlanmasında; bölgede yaşanan başlıca sorunların olabildiğince dikkatli bir şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır (Çiçek ve Erkan, 1996; Şenol, 2012; Kahraman, 2023; Bayrac ve ark., 2025).

Araştırma Sonuçları

Çalışma kapsamında mısır üreticilerine yönlendirilen anket soruları ve alınan cevapların yüzdelik (%) olarak dağılımları bu kısımda verilmiştir.

S1) Kaç dekar alanda mısır üretimi yapıyorsunuz?

a) 0-49 da= %14 b) 50-149 da= %42

c) 150-299 da= %28 d) 300 ve üzeri= %16

S2) İşletmenizde yetiştiriciliğini yaptığınız mısır bitkisinin temel kullanım amacı nedir?

a) Tanelik mısır= %85 b) Silajlık mısır %15

S3) Mısır tarımı yaptığınız alanlarda düzenli olarak münavebe (ekim nöbeti) uyguluyor musunuz?

a) Evet, her yıl farklı ürün ekiyorum= %56

b) Hayır, sürekli (üst üste) mısır ekiyorum= %22

c) Kısmen uyguluyorum= %22

S4) Mısır üretiminde kullandığınız temel sulama yönteminiz hangisidir?

a) Damla sulama= %90 b) Yağmurlama sulama= %5

c) Pivot / lineer sistemler= %3

d) Yüzey sulama (karık, salma)= %2

S5) Mısır üretiminde kullandığınız sulama suyu kaynağı nedir?

a) Yeraltı suyu (özel kuyu)= %65 b) Kooperatif sulama= %35

S6) Mısır üretiminde bir sezon boyunca toplam sulama suyu sayınız kaçtır?

a) 5-7= %8 b) 8-10= %49

c) 11-13= %40 d) 14 ve üzeri= %3

S7) Mısır üretiminde kullandığınız toplam gübre ne kadardır (kg/da)?

a) 50-74 kg= %13 b) 75-99 kg= %26

c) 100-124 kg= %40 d) 125 kg ve üzeri= %21

S8) Mısır bitkisinin gelişim dönemlerindeki mevsimsel yağış miktarı ve dağılımını nasıl değerlendirirsiniz?

a) Tamamen yetersiz= %65 b) Kısmen yetersiz= %18

c) Kararsız / düzensiz= %15 d) Yeterli ve dengeli= %2

S9) Son 10 yılda tarımsal su kaynaklarınızın miktarındaki değişimi nasıl değerlendiriyorsunuz?

a) Şiddetli azalma= %33 b) Kademeli azalma= %60

c) Değişim yok)= %4 d) Mevsimsel değişken= %3

S10) Mısır üretiminde karşılaştığınız en büyük problem nedir?

a) Su kısıtı ve kuraklık stresi= %78

b) Bitki besleme eksikliği ve yetersiz gübreleme= %4

c) Hastalık ve zararlı baskıları= %17

d) Mekanizasyon ve işçilik sorunları= %1

S11) Mısır üretiminde yaşanan kuraklık stresinin toplam verimi ne oranda azalttığını düşünüyorsunuz?

a) %10 - %24= %36 b) %25 - %49= %49

c) %50 - %74= %13 d) %75ve üzeri= %2

S12) Mısır üretiminde yaşanan kuraklık, bitkinin en çok hangi gelişme döneminde yaşanıyor?

a) Çimlenme ve ilk gelişim dönemi= %12

b) Sapa kalkma ve vejetatif büyüme dönemi= %11

c) Tepe ve koçan püskülü oluşum dönemi= % 64

d) Koçan oluşumu ve tane dolum dönemi= %13

S13) Şiddetli kuraklık stresi altında hasat edilen mısırın kalitesinde ne gibi değişiklikler gözlemliyorsunuz?

a) Hektolitre kaybı= %17

b) Kuru madde ve besin değerinde azalma= %5

c) Tane yapısında bozulma ve çatlama= %4

d) Koçanda dolum ve tane boşlukları= %74

S14) Kuraklık nedeniyle başlangıçta tanelik mısır olarak planladığınız tarlanızı silajlık mısır olarak biçmek zorunda kaldınız mı?

a) Evet, sık sık yaşadım= %5 b) Nadiren yaşadım= %13
c) Hayır, hiç yaşamadım= %82

S15) Kuraklık nedeniyle mısır üretimine ara verdiğiniz veya tamamen vazgeçip başka bir ürüne yöneldiğiniz oldu mu?

a) Mısır üretimini tamamen bıraktım= %14

b) Üretim alanını azalttım= %45

c) Ekim yapmaya devam ediyorum= %33

d) Gelecekte bırakmayı düşünüyorum= %8

S16) Mısır tohumu seçerken kararınızı etkileyen en önemli kriter nedir?

a) Yüksek verim potansiyeli= %55

b) Kuraklık ve stres toleransı= %32

c) Marka güveni= %12 d) Devlet desteği= %1

S17) Yeni bir tohum çeşidi denemek için kimin tavsiyesine güvenirsiniz?

a) Akademik kurum ve üniversiteler= %7

b) Özel sektör ve tohum firmaları= %37

c) Kamu kuruluşları= %5

d) Önder çiftçiler ve çevre deneyimi= %51

S18) Kuraklığa toleranslı bir mısır tohumu, üretim planınızı nasıl etkiler?

a) Ekim alanlarını genişletirim= %43

b) Üretim riskim azalır= %6

c) Su tasarrufu ve verimlilik sağlarım= %14

d) Mevcut düzeni korurum= %37

S19) Kuraklığa daha toleranslı bir tohum için normal tohum fiyatına göre %20 ve üzeri fark ödemeyi kabul eder misiniz?

a) Kesinlikle kabul ederim= %53

b) Şartlı kabul ederim= %30

c) Kararsızım= %5 d) Kabul etmem %12

S20) Kuraklıkla başa çıkmak için şu anda hangi yöntemi kullanıyorsunuz?

a) Modern sulama= %41 b) Çeşit değişikliği= %26

c) Kimyasal ve bitkisel destekler= %2

d) Müdahale edemiyorum= %31

S21) CRISPR (gen düzenleme) teknolojisini ve bitki ıslahındaki kullanım alanlarını daha önce duydunuz mu?

a) Evet, duydum= %19 b) Hayır, duymadım= %81

S22) Mısırın su stresine karşı laboratuvarda direnç kazanması teknolojisine bakış açınız nedir?

a) Çok olumlu %43 b) Olumlu ama temkinliyim= %40

c) Kararsızım %9 d) Olumsuz= %8

S23) Günümüz iklim şartları göze alındığında, çocuklarınız gelecekte mısır üretimine devam edebilecek midir?

a) Evet, devam edebilir= %21 b) Kararsızım= %17

c) Hayır, devam edemez= %62

Konya ve Karaman illerinde toplam 200 çiftçi ile yüz yüze yapılan görüşmeler sonucunda elde edilen verilerin yukarıda özetlendiği şekilde olduğu tespit edilmiştir.

Sürdürülebilirlik temelleri üzerine kurulan çalışmalar giderek daha fazla önem göstermekte ve multidisipliner olarak odak noktasında yer almaya devam etmektedir (Okumuş ve ark., 2023; Khattak ve ark., 2026; Tanur Erkoyuncu ve ark., 2026). Endonezya'da sürdürülebilirlik temelinde yapılan bir araştırmada (Ridwan ve ark., 2025), mısır tarımının sürdürülebilirliğinin, özellikle çevresel bozulma, taşıma kapasitesi sorunları, fiyat dalgalanmaları ve kimyasal girdilere bağımlılık gibi çeşitli zorluklarla karşı karşıya olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada kullanılan yöntemler arasında 2015-2024 dönemi için üretim verilerinin analizi, Rapfish isimli bir yazılım ile Çok Boyutlu Ölçekleme yaklaşımı kullanılarak sürdürülebilirlik analizi ve SWOT yöntemi kullanılarak strateji formülasyonu yer almıştır. Çalışmaya dair bölgedeki mısır tarımının sürdürülebilirlik endeksi 55,88 olarak bulunmuş olup, orta düzeyde sürdürülebilir bir seviyeyi göstermiştir, buna göre ekolojik ve kurumsal boyutlar ise başlıca zorlukları oluşturmaktadır.

Yapılan güncel bir başka araştırmada (Jauhari ve Wakhid, 2026), özellikle mısır endüstrisi için tasarlanmış, iş fırsatlarını ve karbon emisyonu sınırlama ve ticaret politikalarının etkilerini entegre eden gelişmiş bir kapalı döngü tarımsal tedarik zinciri optimizasyon modeli incelenmiştir. Bu çalışmanın bulgularının endişe verici bir eğilimi ortaya koyduğu ifade edilmiştir. Şöyle ki, tüketici talebi arttıkça, maliyetler, karbon emisyonları ve atık üretimi de artarken, paradoksal olarak, sektördeki iş fırsatlarının azaldığı bildirilmiştir. İşletme maliyetlerindeki ve karbon fiyatlarındaki dalgalanmalar, karbon emisyonları veya istihdam fırsatları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadan, sadece finansal yönleri etkiliyor gibi görünmektedir. Söz konusu bakış açısı, mısır tedarik zincirinde ekonomik ve çevresel hedefleri dengelemenin karmaşıklığına dikkat çekmektedir.

Gübre sübvansiyonu politikasının etkinliği ve girdi kullanımının mısır üretimi üzerindeki etkisini analiz etmek için bir başka araştırma (Fauziyah ve ark., 2025) gerçekleştirilmiştir. Araştırma bulgularına göre mısır üretimini olumlu etkileyen girdiler arazi alanı, tohum, üre gübresi, NPK gübresi, hayvan gübresi, işçi ve insektisitler olmuştur. Diğer taraftan, gübre sübvansiyonu politikasının etkinliğinin teknik verimlilik üzerinde olumlu bir etkisi olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, gübre sübvansiyonu politikasının uygulanmasının etkinliğinin artırılmasının, mısır tarımında teknik verimliliği artırmak için bir strateji olarak değerlendirilebileceği bildirilmiştir.

Hane halkının gıda güvenliği, özellikle tarımsal üretimin yapıldığı bölgelerde, toplum refahının önemli bir göstergesidir (Rohimah ve ark., 2026). Ailenin ve çiftliğin yeteneklerinin ekonomik, çevresel, sosyal ve kültürel işlevlerin geliştirilmesinde uyumlu bir şekilde birleştirildiği tarım, kırsal alanların sürdürülebilir kalkınmasını sağlamada ve dayanıklılık kriterlerine ulaşmada en büyük fırsatlara sahiptir, bu da gelişiminin incelenmesini önemli kılmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma ilkelerine uyum açısından, zanaatkarlık, organik, sosyal,

gazilik ve dayanışma tarımı gibi gelecek vadeden tarım türlerini ayırt etmenin uygun olduğu tespit edilmiştir (Shpykuliak ve ark., 2025).

Öneriler

Çiftçiler, gelecekteki üretim fiyatı belirsizliğine rağmen üretim kararları almaktadırlar. Sonuç olarak, çiftçilerin gelecekteki üretim fiyatına ilişkin beklentileri, yatırım ve emtia arzının önemli bir belirleyicisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte, çiftçilerin beklentilerini nasıl oluşturdukları sürecine dair anlayışımız halen sınırlıdır. Bu araştırma, Konya ve Karaman ilinde mısır tarımı yapan çiftçilerin yeni bilgileri fiyat beklentilerine nasıl dahil ettikleri sürecini anlamaya yönelik yeni bir adım sunmaktadır.

Mısır tarımının yaygın olarak yapıldığı bölgelerde tarımsal üretim bir yaşam biçimidir ve toprak erozyonu, iklim değişikliği ve biyoçeşitlilik kaybı gibi çevresel sorunlar bu bölgedeki çiftçilerin geçim kaynaklarını dolayısıyla sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Agroekoloji ve yenileyici tarım bazen eş anlamlı olarak yorumlanır ancak motivasyonları farklılık gösterebilir; agroekoloji muhtemelen sosyopolitik boyutlardan daha fazla etkilenmektedir. Bununla birlikte, yenileyici tarım bazen ekonomik ve teknolojik boyutlardan daha fazla etkilenen bir kavram olarak ele alınmaktadır.

Kültürel yönden bakıldığında, davranışsal ve deneysel ekonominin yükselişiyle birlikte, modern araştırmalar tarım ekonomisindeki bir dizi klasik sorunu yeniden ele almıştır. Örneğin, son çalışmalar çiftçilerin pazarlama kararlarını referans fiyatına göre almaya devam ettiğini öne sürmektedir.

Bu araştırmanın bulgularına ve ilgili güncel literatür bilgilerine dayanarak, mısır tarımının sürdürülebilirliğinin geliştirilmesi için temel stratejiler arasında yeşil altyapı ve uyarlanabilir yetiştirme yoluyla iklim riskinin azaltılması, yerel organik gübrelerle kimyasal gübrelere bağımlılığın azaltılması ve çiftçi grubu kurumlarının ve pazarlamanın güçlendirilmesi ön plana çıkmaktadır. Bu stratejilerin uygulanmasının, çiftçilerin ekonomik dayanıklılığını artırması, çevresel koşulları iyileştirmesi ve mısır tarımının uzun vadeli sürdürülebilirliğine katkıda bulunması beklenmektedir. Söz konusu hususların gerçekleştirilebilmesi için; sürdürülebilirlik konusunda eğitimlerin yediden yetmişe verilerek, kültürel yapının dikkate alınması gerektiği söylenebilir.

References

Bayrac, A., Kahraman, A., Okumus, O., Doruk Kahraman, N. (2025). Economics of agriculture and sustainability of agro-economy. 4th International Congress of the Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology (TURJAF 2025), April 28-30, 2025, Niğde, Turkiye, pp. 625-628

Çiçek, A., & Erkan, O. (1996). Research and sampling methods in agricultural economics (Tarım ekonomisinde araştırma ve örnekleme yöntemleri). Gaziosmanpaşa University, Faculty of Agriculture Publications, 12, Tokat, Turkiye (in Turkish).

Draves, M. A., Traylor, Z. B., Salazar-Vidal, M. N., Fitzsimmons, S. L., & Flint-Garcia, S. (2026). Field preparation and planting corn (Zea mays). Cold Spring Harbor Protocols, 2026(5), pdb-prot108636.

Ertuğrul, R., Gökmen, S., & Kahraman, N. D. (2024). Evaluation of quantitative trait loci for drought tolerance, located on the barley (Hordeum vulgare L.) chromosomes 1, 2, and 6, in the genomic background of three cultivars. Pakistan Journal of Botany, 56(4),. DOI: http://dx.doi.org/10.30 848/PJB2024-4(17)

Fauziyah, E., Maflahah, I., & Hidayati, D. R. (2025). Policy impacts on farm efficiency: Fertilizer subsidies in corn production in Madura Island, Indonesia. Research on World Agricultural Economy, 136-154.

Jauhari, W. A., & Wakhid, P. A. (2026). A multi-echelon closed-loop agricultural supply chain network problem for corn industry with waste recycling and carbon regulation. Modeling Earth Systems and Environment, 12(1), 6.

Johnston, R. A. (2026). Growing Better: Culture and Agriculture in the Post-Stalin Era. Kritika: Explorations in Russian and Eurasian History, 27(2), 279-312.

Kaabi, J., Harrath, Y., & Price, E. (2025). Utilizing ensemble learning techniques to enhance corn price prediction: a case study on South Dakota. Agronomy, 15(11), 2447.

Kahraman, A. (2023). Evaluation of Legume Farming in Turkey and Agricultural Sustainability. Legume Research, 46 (2), 166-170. doi: 10.18805/LRF-697

Khattak, W. A., Anas, M., Farid, A., Kahraman, N. D., Keskin, N. C., & Fahad, S. (2026). Micronutrients trace elements' chemistry and soil uptake. In: Sustainable Soil Chemistry and Plant Nutrition, 173-194. Elsevier.

Okumuş, O., Kahraman, N. D., Oğuz, M. Ç., & Yıldız, M. (2023). Magnetic field treatment in barley: Improved salt tolerance in early stages of development. Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences, 37(3), 556-569.

Ridwan, M., Karlinasari, L., & Hariyadi, (2025). Strategies for sustainable corn farming development in Bima Regency. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 11(12), 1032-1044.

Rohimah, A., Saty, F. M., & Berliana, D. (2026). Analysis of Corn Farmers Household Ressilence in Watodiri Village, IIe Ape District, Lembata Regency. In Proceedings of the International Conference on Agriculture Strategy for Sustainability (ICASS), 2 (1), 91-100.

Shpykuliak, O., Humeniuk, M., Shelenko, D., Nemish, D., & Balaniuk, S. (2025). Management of farm development and their role in the socio-economic recovery of rural areas. Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 12(2), 101-115.

Şenol, Ş. (2012). Research and sampling methods (Araştırma ve örnekleme yöntemleri). Nobel Akademi Yayıncılık, Ankara, Turkiye (in Turkish).

Tanur Erkoyuncu, M., Doruk Kahraman, N., Yıldız, M. (2026). Effects of magnetic field exposure and growth regulators on callus ınduction and shoot regeneration in barley (hordeum vulgare l.) embryo culture. Journal of Agricultural Production, 7 (1), 20-34. https://doi.org/10.56 430/japr o.1759992.

BÖLÜM 19

Türkiye'de Tahılların Depolama Şekli ve Bazı Önemli Depo Zararlıları

Merve Yıldız[1]
Asuman Kaplan Evlice[2]

[1] Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sivas, Türkiye. Orcid ID: 0009-0001-8255-4538
2 Doç. Dr., Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Sivas, Türkiye. Orcid ID: 0000-0002-0344-6767

GİRİŞ

İnsanoğlunun temel ihtiyaçları ortaktır ve bunların başında beslenme gelir. Beslenme ihtiyacını karşılamak üzere üretilen fazla ürünlerin yıl boyunca bozulmadan kullanılabilmesi için uygun koşullarda muhafaza edilmesi gerekir (Ribeiro, 2016). Geçmişte, Şekil 1'de de görüldüğü üzere, ürünün özelliklerine uygun muhafaza koşullarının sağlanmasında bölgenin doğal özellikleri önemli rol oynamıştır (Kaya, 2020).



Şekil 1. Taşkale Tahıl Ambarları
(https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/karaman/gezilecekyer/taskale-tahil-ambarlari)

Temel gıda maddelerinin başında gelen hububat, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de insan ve hayvan beslenmesi açısından büyük önem taşımakta ve tarımsal üretimin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Pirinç, buğday ve mısır, toplam küresel tahıl üretimin yaklaşık %85'ini oluşturmaktadır (Tadesse, 2020). Buğday, Türkiye'nin tarımsal üretiminde en büyük paya sahip ürünlerden biri olup, ülke tarımı ve gıda güvenliği açısından stratejik bir öneme sahiptir (FaoStat, 2026). Buğday üretiminde, Türkiye'nin sahip olduğu iklim ve ekolojik koşullar belirleyici bir rol oynamaktadır (Erdemci vd., 2021). Buğday ve buğdaydan elde edilen ürünlerin ülkemizde yaygın olarak tüketilmesi, bu ürünlerin hasat sonrasında uygun koşullarda muhafaza edilmesini ve kalite kayıplarının önlenmesini daha da önemli hâle getirmektedir (Yetkin ve Atakan, 2022). Türkiye'de buğday hasadının genel olarak Mayıs-Ağustos döneminde gerçekleştirilmesi nedeniyle, hasat sonrasında ürünün güvenli bir şekilde depolanması; depolama koşullarının kontrol edilmesi ve depolanmış üründe

kalite ve miktar kayıplarına neden olabilecek zararlılarla etkin bir şekilde mücadele edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Birinci Dünya Savaşı'ndan sonra sanayi tesislerinin büyük ölçüde yok olması dünyanın pek çok ülkesinde tarıma yönelmeyi zorunlu kılmış ve tarımsal üretimin hızla artması sonucu üretici ülkelerde özellikle buğday stokları büyük ölçüde çoğalmıştır. Buğday stoklarındaki bu artış dış piyasada rekabete, fiyatların düşmesine ve bunlardan kaynaklanan büyük krizlere neden olmuştur. Özellikle 1928 yılı sonrasında birçok ülkede buğday fiyatları hızla düşmeye başlamıştır. Bu gelişme üzerine hükümet 10/07/1932 tarihinde yürürlüğe giren 2056 sayılı Kanunla Ziraat Bankasını buğday alımıyla görevlendirmiştir. Ziraat Bankasına, buğday depo ihtiyacını karşılamak üzere silo ve ambar inşası hakkında çıkarılan 11/06/1933 tarihli ve 2303 sayılı Kanunla hububat muhafaza tesisleri yapma görevi de verilmiştir. Ziraat Bankası 1932/1933 yıllarında çoğu Orta Anadolu'da olmak üzere birçok alım merkezi açmıştır. Buğday üretiminin artmasının yanında, İkinci Dünya Savaşı belirtilerinin gittikçe artması, Ziraat Bankasında Buğday Masası Şefliği adı altında yürütülen işlerin oluşturulacak başka bir kuruluşa devredilmesini zorunlu kılmıştır. 13/7/1938 tarihli Resmî Gazetede yayımlanan 24/6/1938 tarihli ve 3491 sayılı Kanunla iktisadi devlet teşekkülü niteliğinde ve buğday işleri ile iştigal etmek için Toprak Mahsulleri Ofisi (TMO) kurulmuştur (Bacaksiz ve Uysal, 2019).

Toprak Mahsulleri Ofisinin kuruluşuyla birlikte Türkiye'de tahıl depolama faaliyetleri daha planlı ve modern bir yapıya kavuşmuştur. Geçmişte Taşkale Ambarları gibi geleneksel yöntemlerle sürdürülen muhafaza anlayışı, zamanla artan rekolteye paralel olarak modern silo sistemlerine evrilmiştir. Fakat, özellikle gelişmekte olan ülkelerde depolanan tahılların yaklaşık %70'i köylerde geleneksel yöntemlerle muhafaza edilmektedir (Ahmad vd., 2022).

Tahılın üretilmesi kadar, hasat sonrasında ürünün güvenli bir şekilde korunması da gıda güvenliği açısından kritik bir aşamadır. Dünya genelinde tarımsal üretim zincirindeki en büyük kayıplardan biri, yetersiz depolama koşulları ve zararlı organizmalardan kaynaklanmaktadır. Depolama sürecinde sıcaklık ve nem gibi fiziksel etkenlerin yanı sıra böcekler ve diğer zararlılar tahıl stoklarında ciddi miktar ve kalite kayıplarına yol açmaktadır. Bu doğrultuda çalışmada, Türkiye'deki tahıl depolama şekilleri ve bu süreçte karşılaşılan bazı önemli depo zararlıları ele alınmıştır.

DEPOLAMA VE ÇEŞİTLERİ

Birçok ülkede, üretilen ürünlerin düzenli tedariğinin sağlanabilmesi ve acil durumlarda kullanılabilmesi amacıyla depolanmaktadır (Ertürk vd., 2023). Hasat sonrası tahılların uygun koşullarda depolanması, ulusal gıda güvenliğinin sağlanmasında tarımsal üretimden daha belirleyici bir rol oynamaktadır. Depolama sürecindeki kayıplar yalnızca gıda israfına değil, aynı zamanda insan emeği, tarımsal girdiler, geçim kaynakları, yatırımlar ve su gibi kıt kaynakların

da boşa harcanmasına yol açmaktadır (Tadesse, 2020). Bu kayıpların minimize edilebilmesi için modern depolama altyapılarının kurulması ve ürünlerin biyotik faktörlerden korunması, sürdürülebilir bir gıda arzı için kritik bir gereklilik teşkil etmektedir. Tahılların günlük tüketilen gıdalara kıyasla daha uzun süre depolanabilmesi, öncelikle içerdikleri nem miktarının düşük (%10-14) olmasından kaynaklanmaktadır (Hoseney, 1986). Bununla birlikte, tahılların uzun süreli saklanmasında yalnızca düşük nem yeterli olmayıp, ürünlerin uygun koşullarda muhafaza edilmesi de büyük önem taşımaktadır. Depolama alanlarının haşere ve kemirgenlerden korunması ve sıcaklık ile nem koşullarının uygun düzeylerde kontrol edilmesi, depolama sürecinden beklenen yararın sağlanması açısından temel ön koşullardır (Kent ve Evers, 1994).

Depolama hataları veya uygun olmayan koşullarda depolama, ürün kayıplarına yol açarak doğrudan ülke ekonomisine de zarar vermektedir. Dolayısıyla, tahılların depolandığı ortamların sahip olması gereken teknik özelliklerin iyi bilinmesi ve depolama süreçlerinin bilinçli bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir (Dizlek, 2012). Bu doğrultuda, Türkiye'de tahıl depolaması için çeşitli depolar kullanılmakta olup, bu tesislerin yönetimi büyük ölçüde Toprak Mahsulleri Ofisinin sorumluluğundadır (Şişman ve Keskin, 2021). Ayrıca, 5300 sayılı Tarım Ürünleri Lisanslı Depoculuk Kanunu ile modern depolama altyapısı teşvik edilerek, üreticilerin ürünlerini kayıtlı ve sağlıklı ortamlarda muhafaza etmeleri sağlanmaktadır (Aslan, 2022).

Ülkemizde ağırlıklı olarak dikey çelik silo, beton silo, yatay çelik silo, ambar, modern açık yığın depolama ünitesi (MAYDÜ) adı verilen depolar kullanılmaktadır (Şişman ve Keskin, 2021). Dikey çelik silolar, depolama alanı saç olup beton zemin üzerine yapılan dikey silolardır (Şekil 2). Beton silolar, betondan yapılan dikey silolardır (Şekil 3, 4). Yatay çelik silolar beton zemin üzerine saç aksam kullanılarak yatay şekilde kurulan depolardır (Şekil 5). Ambar, her yerde karşılaşılabilen adi bir depodur (Şekil 6). Açık yığın, toprak üzerine serilen polietilenin (Trakya'da altına saman serilir) üzerine ürün konulup, tekrar üzeri polietilenle örtülüp, onun üzerine de 15-30 cm toprak atılarak yapılan depolama şeklidir (Şekil 7).

Türkiye'de tahıl depolama amacıyla MAYDÜ yaygın biçimde kullanılmaktadır. MAYDÜ'lerin başlıca avantajları; düşük maliyetli olmaları, ihtiyaç duyulan konumda kolayca kurulabilmeleri, doldurma ve boşaltma işlemlerinin pratikliği, bakım ve onarım giderlerinin düşük olması ve depolama koşullarının belirli ölçüde denetlenebilmesi sayesinde ürünün kalite ve tazeliğinin korunmasına katkı sağlamalarıdır. TS 192973'e göre MAYDÜ, "tabanı beton, asfalt, sıkıştırılmış dolgu malzemesi veya parke taşlarından yapılan, çevresi 120 cm yüksekliğinde çelik saçla çevrilen ve üzeri örtülerle kapatılan depolama ünitesi" olarak tanımlanmaktadır (Şişman ve Keskin, 2021).

Bu üniteler oval veya dairesel biçimde inşa edilir ve kapasiteleri 1.000-10.000 ton arasında değişir (Şekil 8). Silo bag depolama sistemi de Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 2. Dikey Çelik Silo



Şekil 3. Eski Beton Silo



Şekil 4. Modern Liman Silosu



Şekil 5. Yatay Çelik Silo



Şekil 6. Ambar



Şekil 7. Modern Açık Yığın Depolama Ünitesi



Şekil 8. Açık Yığın



Şekil 9. Silo Bag

DEPO ZARARLILARININ GENEL YAŞAYIŞI ve GENEL ZARARLARI

Bitkisel ve hayvansal kaynaklı depolanmış ürünlerde 600'den fazla böcek türü, 70 güve türü ve 355 akar türü kayıplara neden olmaktadır (Tadesse, 2020). Depolanmış tahıl ürünlerdeki kayıpların büyüklüğü ülkeye, ürüne ve depolama koşullarına göre büyük farklılık göstermektedir; küresel ölçekte %9-40 arasında değişen oranlar bildirilmekte, FAO ve Dünya Bankası kaynaklı tahminler tahıl kayıplarını yaklaşık %20-30 olarak vermektedir (Tadesse, 2020). Dünya ortalaması olarak böcekler için %5, kemirgenler için %2, küf ve mikotoksinler için %5-30 oranında kayıp rapor edilmiştir (Rajendran, 2002). Ülkemizde ise

depolanan tahıl ürünlerinde kabul edilen %10'luk kaybın %5'inin böceklerden, %2'sinin hastalık etmenlerinden, %3'ünün ise fare, kuş ve diğer çevre faktörlerinden kaynaklandığı belirtilmektedir (Erdoğan ve Gürkan, 1995).

Depolanmış ürünlerle beslenen zararlı böcekler, doğrudan ağırlık kayıplarına yol açmanın yanı sıra ürünlerin besin değerini ve tohumluk özelliklerini de olumsuz etkiler. Ayrıca, böceklerin beslenme sırasında salgıladığı maddeler, vücut artıkları ve dışkıları; insanlarda alerji ve astım gibi sağlık sorunlarına neden olabilir. Zararlı popülasyonlarının artmasıyla depolama ortamındaki nem ve sıcaklık yükselir; bunun sonucunda ürünlerde küflenme, kızışma ve kokuşma görülebilir. Bu ürünlerin tüketilmesi, insan ve hayvan sağlığı açısından önemli riskler oluşturabilir (Toğantimur ve Özder, 2019).

Ekonomik açıdan önem taşıyan depolanmış tahıl ürün zararlıları arasında buğday biti (*Sitophilus granarius*) ve un biti (*Tribolium castaneum*) öne çıkmaktadır. *S. granarius*'un erginleri tanelerde delikler açar; larvaları ise tane içinde beslenir. Bu zarar, depolanmış ürünlerin miktarını ve kalitesini düşürmenin yanı sıra kirlenmesine ve bozulmasına da yol açar. Benzer şekilde, çok çeşitli depolanmış gıda ürünlerini istila eden *T. castaneum*, %77'ye varan fiziksel hasara neden olabilen ve ürün kalitesini düşüren toksik kinonlar üreten yıkıcı bir sekonder zararlı olarak kabul edilmektedir. Bu etkiler ürünleri insan tüketimine uygunsuz hâle getirebilir (Evlice vd., 2026).

Depo böcekleri beslenme alışkanlıklarına göre "primer/birincil zararlılar" ve "sekonder/ikincil zararlılar" olarak sınıflandırılır (Srivastava ve Subramanian, 2016). Primer zararlılar çoğunlukla sağlam taneleri istila ederek zarar verir. Bu zararlılar tahıl yığınında ciddi hasara yol açabilir ve popülasyonları iyice yerleşene kadar fark edilmedikleri takdirde kontrolleri güçtür. Bu nedenle, istilalarını ve verdikleri zararı önlemek amacıyla izleme çalışmaları gereklidir. Pirinç biti, ekin kambur biti, buğday biti ve arpa güvesi primer zararlılara örnek olarak verilebilir (Anonim, 2008). Sekonder beslenenler/zararlılar ise genellikle "kepek böcekleri" olarak adlandırılır; çünkü primer zararlıların veya başka etmenlerin daha önce zarar verdiği tanelere yerleşip çoğalırlar (Bell, 2014). Kırık taneler, kalıntılar veya nem oranı yüksek yabancı ot tohumları üzerinde varlıklarını sürdürürler. Sekonder zararlılara ise ekin kara böceği, testereli böcek, kırma biti, küçük kırma biti ve un kurdu örnek olarak gösterilebilir (Anonim, 2008). Sekonder zararlıların yaşam evreleri ürün yığınında görülebildiğinden, bunların yol açtığı hasar kolayca tespit edilebilir. Bu ikincil zararlıların bazıları aynı zamanda küf/mantar ile beslenen türlerdir. Varlıkları ve metabolik atıklarıyla tahılı kirletir; bu durum, ortamda nem birikimine (dışkı ve yoğunlaşan ısı kaynaklı) ve küf gelişimine yol açar. Dolayısıyla, küf gelişimi tahıl bozulmasının son aşamasını gösterir. Birçok durumda, beslenme alışkanlıkları farklı olduğundan ve aynı anda yaşamlarını sürdürebildiklerinden, ürün partisinde birden fazla böcek türü bulunabilir. Belirli bir böceğin varlığı,

depolanan tahılın türüne ve deponun bulunduğu bölgeye de bağlıdır (Guru vd., 2022).

Çiftlik düzeyindeki depolarda böcek bulaşması; böcek hareketlerinin, topaklanmış tanelerin ve depo duvarında ya da tabanında kümelenmiş böceklerin izlenmesiyle genel olarak belirlenebilir. Özellikle; plastik çukur tuzaklar, tarama, eleme yöntemleri ile değerlendirmelerin yanı sıra tanelerin ağırlık, renk, koku ve besin kalitesi analizleri genellikle gerçekleştirilmektedir. Buna ek olarak; karbondioksit (CO_2) tayini, gazların tepe boşluğu (headspace) analizleri, tane örneklerinden kitin analizi ve tane sıcaklığının ölçülmesi, depolanmış ürün zararlısı böceklerin tespitine yönelik yenilikçi yaklaşımlardır (Guru vd., 2022).

BAZI ÖNEMLİ DEPO ZARARLILARI ve MÜCADELE YÖNTEMLERİ

Buğday Biti (*S. granarius* L.) (Coleoptera: Curculionidae)

Kozmopolit bir türdür ve dünyanın dört bir yanında görülür. Başlıca konukçuları buğday, pirinç, arpa, yulaf ve mısır olmak üzere çeşitli tahıllardır (Ahmad vd., 2022).

Tanınması: Ergin böceklerin boyu 2,5-5,0 mm arasında değişiklik gösterse de, genellikle 3-4 mm civarındadır. Genç dönemde kırmızımsı kahverengidir, daha sonra siyahımsı kahverengidir (Şekil 10). Vücutları çok sayıda çukurcukla kaplıdır. Ağız hortumludur, hortum dibinde de dirsekli antenler bulunur. Böcek formunda alt kanatlar körelmiş olduğundan uçamaz. Beyaz veya açık kahverengi olan larva ise 2,5-3,0 mm boyunda, bacaksız ve daima kıvrık durur (Anonim, 2008; Abolarinwa vd., 2022).



Şekil 10. Ergin *S. granarius* (Ahmad vd., 2022)

***Biyolojisi ve Ekolojisi*:** Ergin dişi, tahıl tanesinde bir delik açarak içine yumurta bırakır ve deliği havayla temas ettiğinde hızla sertleşen bir sıvıyla kapatır. Bir dişi 300-500 kadar yumurta bırakabilir. Erginler iki yıldan fazla yaşayabilir. Yumurta, oda sıcaklığında yaklaşık bir haftada açılır. Larva, tanenin içine girerek burada beslenir ve pupa olur. Kışı tahıl tanelerinin içinde ergin veya larva olarak geçirir. Erginler ayrıca depo çatlak ve yarıklarında da kışlayabilir. Kışın depolarda görülen düşük sıcaklıklara karşı erginler çok dayanıklıdırlar; 5 °C'nin altında hareketsizleşirler, -15 °C'ye kadar soğuğa dayanabilirler. 5 °C'nin üzerinde aktifleşir, 12 °C'den sonra çoğalmaya başlar; 39 °C'de ölümler görülür. Yüksek neme karşı da oldukça dayanıklıdırlar. Gıdasızlığa uzun süre dayanabilir; 5-6 °C'de bir yıl, 18-20 °C'de ise iki ay aç kalabilirler. Boş ambarlarda bile uzun süre varlıklarını sürdürebilirler. Erginler kümelenme eğilimindedir; ışıktan, gürültüden ve hareketten kaçarlar. Depo koşulları, yıl boyunca çoğalmalarına elverişlidir; kışın çoğalma yavaşlasa da devam eder. Yılda 2-5 döl verirler (Anonim, 1990).

Zararı: Tahıllara büyük zarar veren en ciddi zararlılardan biridir. Hasat edilip depolanan tahıllarda yol açtığı büyük hasar nedeniyle ürün verimini ciddi oranda düşürür; zararlının beslendiği tanelerde delikler oluşur (Ahmad vd., 2022). Yoğun popülasyonlar üründe kızışmaya neden olur, sonunda ürün gıda maddesi olarak kullanılamaz hale gelmektedir (Özgür, 1999) (Şekil 11).

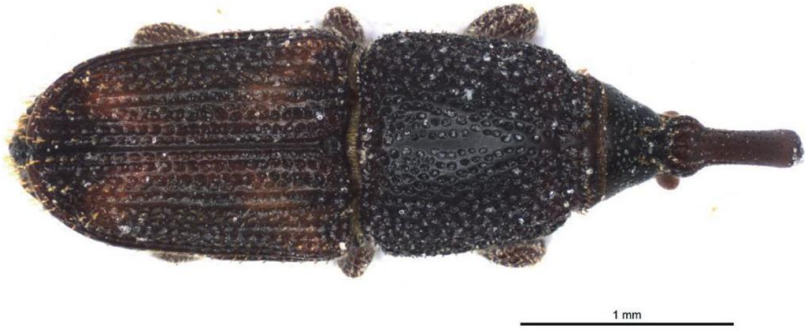


Şekil 11. Buğdayda *S. granarius* kaynaklı zarar durumu (Ahmad vd., 2022)

Pirinç Biti (*S. oryzae* L.) (Coleoptera: Curculionidae)

Pirinç biti sıcak ve nemli iklim koşullarını tercih eder ve kozmopolit bir yayılıma sahiptir. Hem larva hem de ergin döneminde ciddi zarara yol açarak önemli ekonomik kayıplara neden olabilir. Pirinç biti; pirinç, buğday, darı, arpa, mısır, sorgum ve kuru fasulye gibi ürünlerin yanı sıra pamuk, kuruyemiş, un, makarna, kurutulmuş çiçekler ve bitkiler, dekoratif süs eşyaları, depolanan giysiler, ekmek ve diğer tahıl ürünlerine de zarar verir. Bu ürünler depolanırken hem nitelik hem de nicelik kaybı meydana gelir (Ahmad vd., 2022).

Tanınması: Ergin ve larvası, buğday bitinin ergin ve larvasına benzer (Şekil 12). Yalnız ergin arka kanatlara sahiptir ve uçucudur. Buğday bitinden az daha küçüktür (2,5-4,0 mm) ve daha açık renklidir. Ergin rengi kırmızımsı esmer ile kahverengi arasında değişir. Baş kısmında, ucunda ağız parçalarının yer aldığı uzun bir hortum vardır. Pronotum ve kın kanatlar üzerinde uzunca derin noktalar bulunur. Protoraksta ise oldukça sık nokta şeklinde çukurluklar bulunur. Kın kanatları üzerinde dört tane kırmızımtırak sarı leke vardır (Şekil 13). Pirinç biti erginleri, iyi gelişmiş zar kanatları ile uçma yeteneğine sahiptir. Yumurtalar parlak beyaz renktedir. Larva beyaz sarımsı renkte ve bacaksızdır. Başları kahverengi olup daima kıvrık olarak dururlar. Pupa önce beyaz, sonra sarımsı renkli olup, 3,5-4,5 mm boyundadır (Anonim, 1990; Anonim, 2008).



Şekil 12. Ergin *S. oryzae* (Ahmad vd., 2022)

Biyolojisi ve Ekolojisi: Pupa döneminden çıkan erginler bir hafta sonra çiftleşir ve yumurta bırakmaya başlar. Yumurtalarını genellikle tanenin embriyo kısmına yakın yerlere ağız parçalarıyla açtıkları deliklere bırakırlar. Ergin dişi bu deliği ağzından salgıladığı bir madde ile kapatır. Larva ve pupa dönemini tane içinde geçirir. Erginler 6-8 ay yaşarlar ve bu süre içinde 120-280 yumurta bırakırlar. Yılda 5-6 döl verirler (Anonim, 1990; Anonim, 2008).

Zararı: Bu zararlının hem larva hem de ergin evreleri son derece zararlıdır; larva tanenin içine girerek orada yaşamaya ve beslenmeye başlar. Ergin ise tanede meydana gelen 1,5 mm çapında ve yuvarlak bir delikten dışarı çıkar ve taneyi dıştan yer. Ağır zarar durumunda, larva ve ergin endospermi tamamıyla tüketir; geriye yalnızca tanenin parçalanmış kabukları kalır. Üründe kızışma ve küflenmeye de sebep olur (Esin, 1990).



Şekil 131. *S. granarius* (sol) ve *S. oryzae* (sağ) Arasındaki Farklılıklar

Arpa Güvesi (*Sitotroga cerealella* Olivier) (Lepidoptera: Gelechiidae)

İlk kez 1973 yılında Fransa'nın Angoumois bölgesinde zararlı olarak tespit edilmiştir. Dünyanın her yerinde hem tarladaki tahıllara hem de depolanmış tahıllara doğrudan zarar veren, küçük, sarı-kahverengi bir güvedir. Arpa, buğday, mısır, çeltik, sorgum ve inci darısı başlıca konukçuları arasındadır (Ahmad vd., 2022).

Tanınması: Erginlerde ön kanatlar soluk kahverengidir. Uç yarısında küçük siyah noktalar bulunur, arka kanatta kanat dibinden kanat ortasına doğru uzanan bir beyaz şerit vardır (Şekil 14). Kanatlar ince uzun ve uca doğru sivrilmektedir. Kanat kenarındaki püsküller uzundur. Kanat açıklığı 12-14 mm'dir. Ergin dişi 5-7 mm, erkek ise 4-5 mm boyundadır. Antenler vücuttan uzundur (Anonim, 1990; Anonim, 2008). Yumurta önce gri-beyaz, sonraları kırmızımsı renkte ve elips biçimindedir. Larva beyaz veya pembemsi renkte ve kıllı vücutludur. Pupa parlak saman rengindedir ve 4.5-5 mm uzunluğundadır (Anonim, 2008).



Şekil 14. Ergin *S. cerealella*

Biyolojisi ve Ekolojisi: Ürüne daha çok tarlada bulaşır. Mayıs ayında ambarları terk eden güveler çiftleşir ve yumurtalarını tarlada tahıl tanelerinin üzerine veya içine bırakır. Ambarda da dişiler yumurtalarını tanelerin üzerine bırakarak yaşam döngülerini sürdürürler. Dişiler, başlangıçta beyaz olan ancak daha sonra kırmızımsı bir renk alan yaklaşık 150-350 yumurta bırakır. Yumurtadan çıkan larva tahıl tanesinin içine girip beslenmeye başlar; ardından geri dönerek girdiği açıklığın üzerini ipeksi bir ağla örer, bu da zararlının yerinin tespit edilmesini zorlaştırır. Gelişini tamamlayan larvalar tane içerisinde pupa olurlar. Olgunlaşan erginler ise, tanenin içine açtıkları yuvarlak deliklerden dışarı çıkarak döngülerini sürdürürler. Yılda 3-4 döl verirler (Anonim 1990; Anonim 2008; Ahmad vd., 2022).

Zararı: Tahılların primer zararlısıdır. Hem depoda hem tarlada zarar oluşturur (Anonim, 1990). Yüksek nemli ortamlarda larvalar tarafından taneler üzerinde oluşturulan ipeksi ağlar, ürünün sağlıksız bir görünüm kazanmasına, küf gelişimine ve kötü bir koku oluşumuna neden olur (Salim vd., 2023). Ayrıca, zararlının larvaları, tahıl tanelerinin besin içeriğini tüketerek hem tane ağırlığında ciddi düşüşlere hem de besin değerinde azalmaya yol açmaktadır (Elbehery ve Ibrahim, 2024).

Ekin Kambur Biti (*Rhyzopertha dominica*) (Coleoptera: Bostrichidae)

Anavatanı Hindistan olan bu zararlı, günümüzde dünyanın dört bir yanına yayılmıştır. Başlangıçta esas olarak depolanmış buğdayda görülen bu zararlı, günümüzde tüm tahıl ürünlerini etkileyen bir tür olarak bilinmektedir. Zararını, hem larva hem de ergin evrelerinde bitki dokusunun içine girip galeriler açarak meydana getirir (Ahmad vd., 2022).

Tanınması: Erginler yaklaşık 2,5-3,0 mm uzunluğunda, silindirik vücut yapısına ve koyu kahverengi, parlak bir dış iskelete sahiptir; baş kısmı pronotumun altında gizlenmiş olup, yukarıdan bakıldığında görünmez (Şekil 15) (Adhikari ve Dabhi, 2025). Yumurta, pembe renkli ve armut biçimindedir. Larva ise beyaz renkli olup, 5 mm boyundadır. Pupa ise önce beyaz, sonra kahverengidir (Anonim, 2008).



Şekil 15. Ergin *R. dominica* (Xue vd., 2026)

Biyolojisi ve Ekolojisi: *R. dominica*'nın yaşam döngüsü, ergin dişilerin çiftleşmeden kısa bir süre sonra yumurta bırakmasıyla başlar. Tipik olarak, her bir dişi üreme dönemi boyunca 300-500 arasında yumurta bırakabilir. Yumurtalar açıldığında larvalar ortaya çıkar ve tahıla zarar veren beslenme faaliyetlerine

başlar. Larva tahıl tanelerinin içine girer ya da erginlerin açtığı deliklerden dökülen un ve küçük parçacıklarla beslenir. Tane içinde pupa evresine geçen bu larva, daha sonra ergin böceklere dönüşür ve açtığı deliklerden dışarı çıkar. Yılda 3-4 döl verir (Anonim, 2008; Yaraşır vd., 2024).

Zararı: Depolanmış ürünlerdeki ekonomik kayıplar açısından büyük önem taşıyan bu zararlı, özellikle buğday tanelerinde larva ve ergin dönemlerinde yoğun beslenme faaliyetleri göstererek ciddi ağırlık kaybına yol açmaktadır (Erdoğan ve Gürkan, 1995). Erginler genellikle iyi uçucudur; bu sayede bir depodan diğerine kolayca geçebilirler. Erginler önemli miktarda dışkı ve kalıntı üreterek, tükettiklerinden çok daha fazla ürünün bozulmasına neden olurlar (Ahmad vd., 2022).

Kırma Biti (*T. confusum* Jacquelin du Val) ve Un Biti (*T. castaneum* Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae)

Kırma biti kozmopolit bir tür olup, anavatanı Afrika'dır ve genellikle daha serin bölgelerde bulunur. Un biti ise tüm dünyada bulunur. Kırma biti un değirmenleri, tahıl ambarları, depolar, buğday tarlaları, kurutulmuş çiçekler, tohumlar veya kurutulmuş müze örneklerinde yaygın olarak görülür. Un biti ise tahıl, un, yulaf ezmesi ve pirinç kepeği dahil olmak üzere tahıl ürünlerinin ciddi bir zararlısıdır. Zarar verebileceği diğer ürünler arasında yağlı tohumlar, yağ küspesi, kuruyemişler, kuru meyveler, baharatlar, çikolata ve hatta hayvan kemikleri yer alır (Ahmad vd., 2022).

Tanınması: Ergin parlak koyu kırmızı-kahverengi renklidir ve 3,5-4,0 mm uzunluğundadır. Yassı vücut şekline sahip olan böceğin baş ve göğüs bölgesi sık noktalıdır. Kın kanatların üzeri ise boyuna ince çizgilidir. Bu iki türü birbirinden ayıran en temel morfolojik karakter, başın yan taraflarındaki gözlerin arka kısmında bulunan şakak çıkıntısının yapısıdır. Şakak çıkıntısı, kırma bitinde göz hizasını aşarken, un bitinde aşmaz. Diğer bir özellik ise antenlerin uç kısımlarındaki lobların yapısı olup, kırma bitinde bu loblar kademeli olarak genişlerken, un bitinde daha belirgin bir topuz şekli oluşturur (Şekil 16, 17). Yumurta beyaz renklidir. Larvalar olgunlaştığında 5-7 mm boyunda, sarımsı krem rengi bir hal alır. Pupa önce beyaz, sonra sarı renge dönüşür (Anonim, 1990; Anonim, 2008).



Şekil 16. Ergin *T. confusum* (Ahmad vd., 2022)

Biyolojisi ve Ekolojisi: Erginlerin yaşam süresi ortalama bir yıl olup, 3-4 yıla kadar da yaşadığı bildirilmiştir. Bir dişi ömrü boyunca 300-400 kadar yumurta bırakır. Larva beş gömlek değiştirdikten sonra pupa olur. Gıda ortamına bırakılan yumurtalar, kabuklarında yapışkan bir madde bulunması nedeniyle gıda ile örtülüdür. Normal koşullarda gelişme süresi 40-60 gündür. Her iki tür de yılda 3-4 döl verir (Anonim, 2008).



Şekil 17. Ergin *T. castaneum* (Ahmad vd., 2022)

Zararı: İkincil bir zararlı olarak özellikle kırılmış taneler, un ve diğer öğütülmüş tahıl ürünleri üzerinde beslenmeyi tercih eder (Vadivambal vd., 2007). Bu zararlılar genellikle hoş olmayan bir koku yayarlar ve varlıkları küf oluşumunu da teşvik eder (Ahmad vd., 2022; Alkan vd., 2026). Ayrıca bu zararlı tür, geniş bir sıcaklık aralığında üreyebilmesi ve düşük bağıl nem koşullarında dahi hayatta kalabilmesi sayesinde küresel ölçekte ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır (Tiring, 2025).

Bunların dışında tahıllarda kapra böceği (*Trogoderma granarium*), boynuzlu böcek (*Gnatocerus cornutus*), testereli böcek (*Oryzaephilus surinamensis*), un kurdu (*Tenebrio molitor*), ekin kara ambar böceği (*Tenebroides mauritanicus*), küçük kırma biti (*Cryptolestes ferrugineus*), pirinç kırma biti (*Latheticus oryzae*), değirmen güvesi (*Ephestia kuehniella*), un güvesi (*Pyralis farinalis*), kuru meyve güvesi (*Plodia interpunctella*) ve un akarı (*Acarus siro*) gibi zararlılar da zarar yapmakatdır (Anonim, 2008).

Depo Zararlıları ile Mücadele Yöntemleri

Hububat zararlıları ürüne farklı yollarla bulaşabilir. Bazı zararlılar depolama alanında bulunur ve ürün depoya alındıktan sonra ürüne geçer; bazıları ise ürüne hasat sonrasında bulaşarak depoda zarar vermeyi sürdürür. Bunun yanı sıra, depoda veya üründe başlangıçta zararlı bulunmasa da, zararlılar uçarak ya da çeşitli vektörler aracılığıyla depoya veya ürüne taşınabilir. Bu tür bulaşma ve zararların önlenmesinde temiz mahsulün temiz depolama alanlarına alınması ve depolama süresince uygun koşullarda muhafaza edilmesi önem taşır. Ürünün depolanması planlanırken mücadele yöntemleri önceden belirlenerek uygulanmalıdır. Farklı hububat zararlısı türleri aynı ortamda bulunduğunda ürüne birlikte zarar verebildiğinden, mücadele programları tüm zararlı türlerini hedef alacak biçimde düzenlenmelidir (Anonim, 2008).

Depolanmış ürün zararlılarında tek başına kimyasal mücadele; fosfin, klorpirifos, malation ve piretroitlerin tekrarlı kullanımına bağlı direnç gelişimi, hedef dışı canlılara etkiler ve kalıntıya yönelik artan tüketici talebi nedeniyle giderek sürdürülemez bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Phillips ve Throne, 2009; Rajkumar vd., 2019). Bu nedenle önleme, zararlı popülasyonunun izlenmesi ve izleme verilerine dayalı karar vermeyi birleştiren entegre zararlı yönetimi yaklaşımı benimsenmektedir; izleme sonuçları eşik değerin altında kaldığı sürece sanitasyon ve önleyici uygulamalara devam edilir, eşik aşıldığında fümigasyon gibi kesin mücadele yöntemlerine başvurulur (Edde ve Phillips, 2022). Sanitasyon bu programların temeli ve ilk savunma hattı olarak kabul edilmekte (Morrison vd., 2019), sıcaklık yönetimi ile doğal düşmanlardan yararlanma ise en umut verici biyolojik temelli araçlar arasında değerlendirilmektedir (Ali, 2024). Depolanmış ürün zararlılarıyla mücadele yöntemleri, entegre zararlı yönetimi yaklaşımı çerçevesinde aşağıda özetlenmiştir (Ahmad vd., 2022):

Örnekleme ve İzleme:

- Zararlı popülasyonunu ve ekonomik zarar eşiğini takip etmek için belirli aralıklarla (örneğin 20 °C üzerindeki sıcaklıklarda 25-30 günde bir) ardışık örnekleme yapılır.
- Popülasyon tahmini için mutlak sayım (kg başına böcek sayısı), işaretle-sal-yakala yöntemi veya nispi sayım teknikleri uygulanır.
- Yapışkan, yemli, delikli prob veya feromonlu tuzak sistemleri kullanılır.

Önleyici Tedbirler ve Hijyen:

- Ürünlerin zamanında (tam olgunlaştığında) hasat edilmesi, kurutulması ve temiz depolara konulması ilk temel önlemdir.
- Yeni ürünler konulmadan önce depoların, siloların ve ekipmanların süpürge veya vakumla temizlenerek eski ürün kalıntılarından, tozdan ve ağlardan arındırılması gerekir.
- Çelik ve beton silolar gibi sağlam depolama yapıları tercih edilmeli, taşıma çuvalları depo alanından uzak tutulmalıdır.

Fiziksel ve Mekanik Yöntemler:

- Sıcaklık ve Havalandırma Kontrolü: Zararlıların gelişimini engellemek veya onları öldürmek için düşük sıcaklıklar (-4 °C ile 0 °C arası) veya havalandırma (aeration) ile nem/sıcaklık dengesi sağlanır.
- Hermetik (Havasız) Depolama ve Oksijen Düşürme: Depo ortamında oksijen seviyesinin düşürülmesi zararlılarda boğulmaya yol açarak öldürücü etki yapar.
- Mekanik Eleme ve Temizleme: Döner elekler, aspiratörler ve hava akımları ile böcekler, döküntüler ve kırık taneler ayrıştırılır. Güneşte kurutma, dondurma ve vakumlu temizlik de fiziksel uygulamalar arasındadır.

Organik ve Bitkisel Mücadele:

- Organik Ajanlar: *Bacillus thuringiensis* bakterisi (özellikle güve larvalarına karşı), doğal pyrethrum ve böcek kutikulasını keserek dehidrasyonla ölüme yol açan diyatomlu toprak kullanılır.

- Bitkisel Uçucu Bileşikler: Neem/tespih ağacı, sarımsak ve çeşitli bitkisel uçucu yağlar/özütler; büyüme düzenleyici, uzaklaştırıcı (repellent), beslenmeyi

engelleyici (antifeedant), yumurta öldürücü (ovicidal) ve kısırlaştırıcı (chemosterilant) etki gösterir.

Biyolojik Mücadele:

- Zararlı popülasyonunu baskılamak için parazitoit arılar (*Theocolax elegans*, *Trichogramma* spp.) ve avcı böcekler veya akarlar kullanılır.

Feromon Uygulamaları:

- Eşey veya toplanma feromonları içeren tuzaklar yardımıyla böcekler çekilerek yakalanır ve popülasyon artışı engellenir.

Kimyasal Mücadele ve Fumigasyon:

- Fumigasyon: Gaz geçirmez depolarda fosfin gibi gaz haline geçen kimyasallar uygulanır.

- Yüzey İlaçlaması: Boş depoların duvar, taban ve tavanları Malathion veya DDVP gibi insektisitlerle ilaçlanır; doğrudan gıda ürünlerinin üzerine kimyasal püskürtülmemesi vurgulanmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Depolanmış ürünlerde gerçekleşen ürün kayıpları, ağırlıklı olarak Coleoptera ve Lepidoptera takımlarına ait zararlılardan kaynaklanmaktadır. Bu zararlıların başında pirinç biti, ekin kambur biti, buğday biti gelmektedir. Depolanmış ürün zararlıları, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ürünlerin geleneksel yöntemlerle saklanması nedeniyle hem niceliksel hem de niteliksel açıdan ağır kayıplara yol açmaktadır. Hasat sonrası süreçte gerçekleşen bu zararlar, küresel gıda güvenliğini ve ekonomik istikrarı doğrudan tehdit eden boyutlara ulaşmaktadır. Kimyasal pestisitlerin tek başına ve kontrolsüz kullanımı; direnç gelişimi, toksisite, kimyasal kalıntı problemleri ve çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle sürdürülebilir bir çözüm sunmamaktadır. Bu nedenle depolanmış ürün zararlılarıyla mücadelede başarı, yalnızca tek bir yönteme odaklanmak yerine, kültürel, biyolojik ve kimyasal uygulamaların bir bütünlük içinde yönetilmesine bağlıdır.

Sonuç olarak, geleneksel depolama alışkanlıklarının modern entegre zararlı yönetimi ilkeleriyle dönüştürülmesi, gıdaların besin değerini ve ticari kalitesini korumak için hayati önem taşımaktadır. Çok yönlü ve sürdürülebilir bir yönetim politikası, hasat sonrası kayıplarını azaltarak küresel gıda arzının güvence altına alınmasına temel katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Abolarinwa, O., Oyewale, R. O., Bolajoko, M. H., Isah, C., Mamudu, A. Y., ve Ibrahim, H. M. (2022). Morphometric identification of maize weevils (*Sitophilus* spp.) in FCT-ABUJA, Nigeria. *Science Heritage Journal*, *6*(1), 1-5. https://doi.org/10.26480/gws.01.2022.01.05

Adhikari, V., & Dabhi, M. V. (2025). Bionomics and morphometric study of rhyzopertha dominica fabricius on stored wheat. *Journal of Experimental Agriculture International*, *47*(7), 426-434. https://doi.org/10.9734/jeai/2025/v47i73583

Ahmad, R., Hassan, S., Ahmad, S., Nighat, S., Devi, Y. K., Javeed, K., Usmani, S., Ansari, M. J., Erturk, S., Alkan, M., & Hussain, B. (2022). Stored grain pests and current advances for their management. In Md. Ahiduzzaman (Ed.), *Postharvest Technology - Recent Advances, New Perspectives and Applications*. IntechOpen eBooks. https://doi.org/10.5772/intechopen.101503

Ali, A. M. (2024). Implementation of environmentally friendly methods for the management of stored product insects. *Plant Protection*, *8*(2), 351-363. https://doi.org/10.33804/pp.008.02.5154

Alkan, M., Evlice, E., Ertürk, S., Karakoç, Ö. C., Yücel, Y. Y., Bağdat, R. B., Tüfekçi, A. R., & Yırtıcı, Ü. (2026). Biological activities of *Tanacetum* sp. essential oils on *Tribolium castaneum* (Herbst, 1797) (Coleoptera: Tenebrionidae) and *Sitophilus granarius* (Linnaeus, 1758) (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research*, *117*, 103001. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2026.103001

Anonim. (1990). *Alım ve Muhafaza İşleri İzahnamesi. 1*, 131-249, Toprak Mahsulleri Ofisi Genel Müdürlüğü, Ankara.

Anonim. (2008). Zirai mücadele teknik talimatları. T.*C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, Bitki, Sağlığı Araştırmaları Daire Başkanlığı.* 1, 211-226. https://www.tarimorman.gov.tr/tagem/menu/28/yayinlar_veriler

Aslan, M. (2022). Tarımsal ürün pazarında, lisanslı depoların etkinliğinin artırılması, ihracat ve finansman olanaklarının genişletilmesi: Vergi hukukunda maliyetsiz öneriler. *Uluslararası Sosyal Siyasal ve Mali Araştırmalar Dergisi*, *2*(2), 55-79.

Bacaksiz, M. A., & Uysal, S. (2019). Tarımsal kalkınmada devletçi politikaların önemi: Türkiye'de 1930-1939 dönemi için bir değerlendirme. *Uluslararası Ekonomi İşletme ve Politika Dergisi*, *3*(1), 19-36. https://doi.org/10.29216/ueip.523770

Bell, C. H. (2014). Pest control of stored food products: insects and mites. In H.L.M. Lelieveld, J.T. Holah, D. Napper (Eds.) *Hygiene in Food Processing*, 494-538, Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9780857098634.3.494

Dizlek, H. (2012). Tahılların depolanmasında etkili olan başlıca etmenler. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, *7*(2), 48-59.

Edde, P. A., & Phillips, T. W. (2022). Integrated pest management strategies for cigarette beetle control in the tobacco ındustry - A mini review. *Contributions to Tobacco & Nicotine Research*, *31*(2), 90-100. https://doi.org/10.2478/cttr-2022-0009

Elbehery, H. H., & Ibrahim, S. S. (2024). Potential fumigant toxicity of essential oils against *Sitotroga cerealella* (Olivier) (Lepidoptera: Gelechiidae) and its egg parasitoid *Trichogramma evanescens* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Scientific Reports*, *14*(1), 6253. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56611-3

Erdemci, İ., Aktaş, H., & Karaman, M. (2021). Bazı fakültatif buğday genotiplerinin farklı çevrelere tepkileri. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, *58*(3), 421-430. https://doi.org/10.20289/zfdergi.728602

Erdoğan, P., & Gürkan, O. (1995). *Ephestia kuehniella* Zell.(Lep.: Pyralidae) ile *Rhyzopertha dominica* F.(Col.: Bostrychidae)'nın laboratuvar koşullarında gelişmeleri ve rekabetleri üzerinde araştırmalar. *Bitki Koruma Bülteni*, *35*, 1-2.

Ertürk, S., Alkan, M., & Evlice, E. (2023). Depolanmış ürün zararlısı böceklerle mücadelede bir alternatif: Diyatom toprağı. In A. M. Bozdoğan & N. Yarpuz Bozdoğan (Eds.), *Ziraat, Orman ve Su Ürünleri Alanında Akademik Araştırma ve Derlemeler,* 517-555, Platanus Publishing.

Esin, T. (1990). *Depolanan Kuru Tarımsal Ürünlere Arız Olan Hastalık ve Zararlılar*. Toprak Mahsulleri Ofisi, 688 s., Ankara.

Evlice, E., Alkan, M., Karakoç, Ö. C., Ertürk, S., Bahtiyarca, R., Yücel, Y. Y., Tüfekçi, A. R., & Yırtıcı, Ü. (2026). Bioactivity of *Artemisia dracunculus* and *A. absinthium* essential oils against stored product ınsect pests and root-knot nematodes. *Insects*, *17*(8), 837. https://doi.org/10.3390/insects17080837

FaoStat. (2026). *Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations*. https://www.fao.org/faostat/en/#home (Erişim tarihi:10.10.2026).

Guru, P. N., Mridula, D., Dukare, A., Ghodki, B. M., Paschapur, A. U., Samal, I., Raj, M. N., Padala, V. K., Rajashekhar, M., & Subbanna, A. R. N. S. (2022). A comprehensive review on advances in storage pest management: Current scenario and future prospects. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *6*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.993341

Hoseney, R. C. (1986). *Principles of cereal science and technology. A general reference on cereal foods.* AACC International, Inc., USA.

Kaya, M. (2020). Anadolu kültüründen dünya kültürüne ambarlar. *Ege Coğrafya Dergisi*, *29*(2), 321-344. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1251483

Kent, N. L., & Evers, A. D. (1994). Kent's technology of cereals. In *Woodhead Publishing Limited eBooks*. https://doi.org/10.1533/9781855736603

Morrison, W. R., Bruce, A. B., Wilkins, R. V., Albin, C. E., & Arthur, F. H. (2019). Sanitation improves stored product insect pest management. *Insects*, *10*(3), 77. https://doi.org/10.3390/insects10030077

Özgür, A. F. (1999). *Depolanmış Ürün Zararlıları*. Ç.Ü. Ziraat Fakültesi Ders Kitabı.

Phillips, T. W., & Throne, J. E. (2009). Biorational approaches to managing stored-product insects. *Annual Review of Entomology*, *55*(1), 375-397. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.54.110807.090451

Rajendran, S. (2002). Postharvest pest losses. *Encyclopedia of Pest Management*, 654-656.

Rajkumar, V., Gunasekaran, C., Christy, I. K., Dharmaraj, J., Chinnaraj, P., & Paul, C. A. (2019). Toxicity, antifeedant and biochemical efficacy of *Mentha piperita* L. essential oil and their major constituents against stored grain pest. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *156*, 138-144. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.02.016

Ribeiro, A. S. F. (2016). Património Vernacular Construído - O beiral, o espigueiro e a eira: formas, usos e contextos. In *Open Repository of the University of Porto (University of Porto)*. Universidade do Porto. https://doi.org/10.34626/bqzd-7683

Salim, M., Ullah, I., Saljoqi, A. U. R., Gökçe, A., Ahmad, S., Almutairi, M. H., Sayed, A. A., Aleya, L., Abdel-Daim, M. M., & Shah, M. (2023). Life table study of *Sitotroga cerealella* on different cereals and its implications on the performance of the egg parasitoid (*Trichogramma chilonis*) under laboratory conditions. *Scientific Reports*, *13*(1), 10961. https://doi.org/10.1038/s41598-023-37852-0

Şişman, C. B., & Keskin, A. K. (2021). Buğday depolamasında modern açık yığın depolama ünitesi (MAYDÜ) kullanımı. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, *9*(9), 1731-1734. https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i9.1731-1734.4652

Srivastava, C., & Subramanian, S. (2016). Storage insect pests and their damage symptoms: an overview. *Indian Journal of Entomology*, *78*, 53. https://doi.org/10.5958/0974-8172.2016.00025.0

Tadesse, M. (2020). Post-harvest loss of stored grain, its causes and reduction strategies. *Food Science and Quality Management, 96*, 26-35. https://doi.org/10.7176/fsqm/96-04

Tiring, G. (2025). Chemical profile and repellent effects of two essential oils on *Tribolium confusum* Jacquelin du Val, 1863 (Coleoptera: Tenebrionidae). *Mediterranean Agricultural Sciences*, *38*(2), 63-67. https://doi.org/10.29136/mediterranean.1728389

Toğantimur, O., & Özder, N. (2019). Edirne ilinde depolanmış buğday ve un fabrikalarında saptanan zararlı böcekler üzerine araştırmalar. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, *16*(2), 192-201. https://doi.org/10.33462/jotaf.539332

Vadivambal, R., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2007). Wheat disinfestation using microwave energy. *Journal of Stored Products Research*, *43*(4), 508-514. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2007.01.007

Xue, D., Duanmu, H., LI, F., & Wu, Y. (2026). Chromosome-level genome assembly and annotation of the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) (Coleoptera: Bostrycidae). *Scientific Data*, *13*(1). https://doi.org/10.1038/s41597-026-07190-7

Yaraşır, O. N., Bütüner, A. K., & Susurluk, H. (2024). Recent advances on the potential control of *Rhyzopertha dominica* Fab. (Coleoptera: Bostrichidae). *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, *38*(2), 449-456. https://doi.org/10.20479/bursauludagziraat.1523649

Yetkin, M. S., & Atakan, E. (2022). Mersin İli, Tarsus ve Akdeniz ilçelerinde depolanmış buğday ve mısır zararlılarının belirlenmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, *59*(3), 471-483. https://doi.org/10.20289/zfdergi.1071199

BÖLÜM 20

Ekmeklik Buğdayda Başak Fertilitesi ve Çiçekçik Kayıpları: Tane Sayısının Oluşumu, Genetik Kontrolü ve Islah Stratejileri

Yavuz Balmuk [1]
Cemal Şermet[2]

[1] Dr., Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Samsun, Türkiye
ORCID: 0009-0005-8604-4286
2 Dr., Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Samsun, Türkiye
ORCID: 0000-0002-3428-6022

1. GİRİŞ

Birim alan tane verimi, başak sayısı, başak başına tane sayısı ve ortalama tane ağırlığının birlikte oluşturduğu biyolojik sonucun ifadesidir. Bu bileşenler arasında başak başına tane sayısı, hem genotipin gelişim programına hem de başağın sapa kalkma dönemindeki kaynak kullanımına bağlıdır. Sadece daha fazla başakçık veya primordiyum oluşturmanın verimi otomatik artırmadığı, oluşturulan çiçekçiklerin önemli bölümünün fertiliteye ulaşamamasından kaynaklanır (González ve ark., 2011; Slafer ve ark., 2015).

Bu derlemenin hazırlanma gerekçesi, başakta gözlenen nihai tane sayısının yalnızca oluşturulan çiçekçik taslaklarının sayısıyla açıklanamamasıdır. Başak mimarisi, çiçekçiklerin gelişim boyunca sağkalımı, döllenme ve tane tutumu birbirinden ayrılarak incelenmelidir. Bu ayrım, tane sayısını artırmaya yönelik seleksiyonun hangi gelişim basamağına odaklanacağını belirlemek açısından önem taşır (González ve ark., 2011; Slafer ve ark., 2015).

Marchese ve ark. (2026b) araştırması, farklı ıslah dönemlerinden çeşitleri karşılaştırmış ve modern çeşitlerde daha yüksek tane sayısının maksimum çiçekçik primordiyumundan çok, primordiyumların daha yüksek oranda fertil çiçekçiğe dönüşmesiyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, ıslahçının hedefi "daha çok başlangıç primordiyumu" yerine "kaybı azaltılmış üretken başak" olarak tanımlamasını gerektirebilir.

Çiçekçik fertilitesine odaklanan güncel yaklaşımda biyolojik sonuç ile onun belirleyicileri birbirinden ayrılır. Metrekarede başak sayısı, başakta tane sayısı ve ortalama tane ağırlığı verimin birbirine bağlı fakat özdeş olmayan bileşenleridir. Başakta çiçekçik taslaklarının çok sayıda oluşması, hasada aynı sayıda tane taşınacağı anlamına gelmez. Çiçekçiklerin gelişim boyunca yaşaması, tozlanma anındaki işlevsel fertilite ve daha sonra tane oluşumunun sürmesi ayrı darboğazlardır (González ve ark., 2011; Marchese ve ark., 2026b).

Bu nedenle bölümün ana hipotezi, verim artışı bakımından 'daha fazla çiçekçik başlatmak' kadar 'başlatılan çiçekçiklerin sağkalımını artırmanın' da araştırılması gerektiğidir. Uygun yaklaşım, genetik ve fizyolojik açıklamaların aynı deneme materyalinde birleştirilmesidir. Tek bir başak örneğinden elde edilen fertillik puanı, bütün parselin tane verimi potansiyelini temsil ettiği varsayılarak yorumlanmamalıdır.

2. BAŞAKTA GELİŞİM BASAMAKLARI VE KAVRAMLAR

Buğday başağının verim potansiyeli farklı biyolojik sayım düzeylerinde incelenmelidir: (i) başakçık sayısı, (ii) her başakçıktaki başlatılmış çiçekçik primordiyumu sayısı, (iii) çiçeklenme evresinde fertil olgunluğa erişmiş çiçekçik sayısı, (iv) döllenme sonrası gerçek tane sayısı. Bu düzeylerin birbirine

karıştırılması hem deneysel karşılaştırmayı hem de genetik yorumları zayıflatır. “Fertil çiçekçik” ifadesi morfolojik olgunluk ölçütlerine göre tanımlanmalı; yalnızca çiçekçik sayımıyla eşitlenmemelidir.

Başakçığın başak eksenine en yakın çiçekçikleri genellikle gelişim bakımından daha ileri; distal konumdaki çiçekçikler ise kaynak rekabetine ve gelişimsel kayıplara daha açıktır. Başak içindeki bazal, orta ve apikal bölgeler de aynı kayıp desenini göstermez. Bu nedenle gelişim örneklemeleri yalnızca başağın orta kısmına dayandırılırsa genotipin bütün başak kapasitesi eksik tanımlanır (Ferrante ve ark., 2013a; 2013b).

Zadoks gelişim evreleri, başak gelişiminin saha kayıtları için yararlı bir başlangıç olsa da çiçekçik taslaklarının tam morfolojik durumunu tek başına vermez. Laboratuvarda ayrılmış başakçıklarda çiçekçiklerin konum ve gelişim sınıfları, tarla başaklanma tarihi ile birlikte belgelenebilir. Orta başakçıklardaki güçlü gelişmiş çiçekçiklerin durumu ile başağın alt ve üst kesimlerindeki gerileme örüntüsü aynı olmayabilir. Bu nedenle yalnızca 'başak başına çiçekçik sayısı' yerine başak içi konumsal profil oluşturmak daha açıklayıcı olabilir.

Fertil çiçekçik ile tane bağlayan çiçekçik kavramlarını ayırmak gerekir: antese sırasında morfolojik olarak fertil kabul edilen çiçekçik, daha sonra abiyotik stres veya döllenme problemleri nedeniyle tane oluşturmayabilir. Tane oluşumundaki sonraki kayıplar da olgun tanenin ağırlığından ayrı izlenmelidir. Sonuçlarda 'fertil çiçekçik oranı', 'tane bağlama yüzdesi' ve 'hasatta dolu tane sayısı' farklı paydalara sahip göstergeler olarak raporlanmalıdır.

Tablo 1. Tane sayısı oluşumunun aşamaları ve önerilen ölçümler.

Aşama	**Ölçülen değişken**	**Temel yorum**
Başakçık oluşumu	Başak başına başakçık sayısı	Başak mimarisi
Primordiyum üretimi	Maksimum çiçekçik sayısı	Çiçekçik oluşturma kapasitesi
Çiçeklenme	Fertil çiçekçik sayısı	Çiçekçik sağkalımı
Hasat	Tane sayısı	Gerçek tane tutumu
Verim değerlendirmesi	Birim alan verimi, bin tane ağırlığı	Islah değeri

Kaynak: González ve ark. (2011), Slafer ve ark. (2015) ve Marchese ve ark. (2026b) temel alınarak yazarlar tarafından düzenlenmiştir.

3. ÇİÇEKÇİK SAĞKALIMI VE ANTESE ÖNCESİ BAŞAK BÜYÜMESİ

Sapa kalkma ile çiçeklenme arasındaki dönemde başak biyokütlesine yönlendirilen asimilatların düzeyi, genç çiçekçiklerin gelişim hızını ve yaşama olasılığını etkiler. González ve ark. (2011), antese öncesi başak büyümesi ile çiçekçik sağkalımı arasındaki ilişkiyi göstererek kaynak rekabetinin önemini ortaya koymuştur. Başakların daha fazla kaynak alması, özellikle sınırda gelişen çiçekçiklerin fertil olgunluğa erişmesini sağlayabilir.

Slafer ve ark. (2015) tarafından tartışılan "meyveye dönüşüm etkinliği" (fruiting efficiency), çiçeklenme döneminde başağa yatırılan kuru madde başına oluşan tane sayısını anlamak için kullanışlı bir fizyolojik göstergedir. Bununla birlikte bu oran, verimin diğer bileşenlerinden bağımsız kesin bir üstünlük ölçütü değildir. Bazı koşullarda çok yüksek tane bağlama kapasitesinin daha küçük tanelerle sonuçlanması olasılığı da birlikte değerlendirilmelidir (Ferrante ve ark., 2015).

Bicego ve arkadaşları (2024), Fransa ve İspanya'da incelenen materyalde gölgeleme ve seyreltme uygulamalarıyla kaynak erişimini değiştirmiş; başakçık veya kardeş başlangıç sayısından ziyade oluşturulan yapıların hayatta kalmasının tane sayısındaki plastisiteyi daha iyi açıkladığını bildirmiştir. Özellikle başağın taban kısmındaki çiçekçiklerin çevresel kaynak değişimine duyarlı olabilmesi dikkat çekicidir. Bu çalışma kontrollü genotip ve uygulamalara dayandığı için sonuçların bütün çeşitlere değişmeden genellenmesi uygun değildir.

Kaynak arzı ve gelişim süresinin çiçekçik sağkalımına etkileri her zaman aynı yönde olmayabilir. Örneğin fotosentetik ürünlerin artması başak büyümesini destekleyebilirken gelişim evresinin kısalması çiçekçiklerin tamamlanma süresini azaltabilir. Bu nedenle verim potansiyelinin yorumunda antese öncesi başak kuru ağırlığı, başak büyüme süresi ve antese sırasındaki fertil çiçekçik sayısının birlikte incelenmesi yararlıdır (Slafer ve ark., 2015).

Backhaus ve arkadaşları (2023), başağın bazal kısmındaki başakçıkların gecikmiş gelişimini ve yüksek çiçekçik abortusu eğilimini birlikte incelemiştir. Araştırmada bazal başakçıklardaki düşük tane tutumunun yalnızca başak ekseni boyunca daha az asimilat bulunmasıyla açıklanamayacağı; gelişimsel yaş ve çiçekçiklerin abortus öncesindeki ilerleme durumunun önemli olduğu gösterilmiştir. Bu sonuç başak içi kaynak dağılımına ilişkin yorumlarda gelişimsel heterojenliğin de ayrıca ölçülmesini gerektirir.

4. AZOT, SU VE IŞIK REJİMİNİN ETKİLERİ

Ferrante ve ark. (2013a), makarnalık buğday çeşitlerinde farklı azot düzeylerini karşılaştırarak gelişmekte olan distal çiçekçiklerin kaynak arzına duyarlı olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, çevre etkisinin yalnızca gübreleme sonrası başak iriliğinde değil, hangi çiçekçiğin hayatta kaldığında da aranması

gerektiğini gösterir. Ancak makarnalık buğdayda tespit edilen tepki miktarlarının ekmeklik buğday için doğrudan aynı olacağı varsayılamaz.

2024 tarihli bir tarla çalışması, kardeşlenme ve çiçekçik gelişimindeki plastisitenin, tane sayısını oluşturan yapıların başlangıç üretiminden çok, mevcut yapıların sağkalımı üzerinden açıklanabileceğini göstermiştir. Yine 2024 tarihli Guo ve ark. çalışmasında fotoperiyot düzeninin başak büyümesi ve fertil çiçekçik sayısıyla bağlantılı transkriptomik tepkileri gösterilmiştir. Bu araştırmalar, ıslah taramalarının fenoloji farkını kontrol ederek yürütülmesi gerektiğini destekler.

Çiçeklenme öncesi sıcaklık stresi, gelişen başakçıklarda çiçekçik ölümü ve tane sayısı kaybı doğurabilir. Ancak zarar derecesi sıcaklık, süre, genotip ve uygulanan evreye bağlıdır. Tek bir "kritik derece" bütün materyali açıklamayacağı için stres maruziyeti, gerçek bitki gelişim evresiyle birlikte raporlanmalıdır.

Azotun etkisi yalnızca vejetatif büyümenin artması değildir; başağa kaynak dağılımını, kardeş sağkalımını ve çiçekçik gelişim hızını da değiştirebilir. Bununla birlikte yüksek azot dozu her koşulda yüksek çiçekçik fertilitesi anlamına gelmez. Eğer su kısıtı varsa ilave büyüme, gelişim sonlarına doğru daha güçlü kaynak rekabeti yaratabilir. Bu nedenle azot × su × genotip etkileşiminin kontrol edilmesi gerekir (Ferrante ve ark., 2013a).

Guo ve arkadaşları (2024), farklı ışık rejimlerinin başak büyümesini ve çiçekçik gelişimini birlikte değiştirebildiğini göstermiştir. Uzun gün uygulamasının belirli gelişim evrelerini kısaltırken asimilat birikimini ve fertil çiçekçik sayısını azaltabildiği; ışık niteliğindeki değişimin ise farklı yanıtlar üretebildiği araştırılmıştır. Bu sonuçlar, kontrollü ortam deneylerinin ışık süresi kadar spektral bileşiminin de belirtilmesini gerektirir; tek bir deneyden tarla düzeyinde doğrudan reçete üretilemez.

Stres zamanlaması özellikle önemlidir. Benzer su eksikliği, çiçekçik taslaklarının oluştuğu erken evrede başka, en yüksek abortus riskinin gözlendiği geç başak büyümesi evresinde başka sonuçlar doğurabilir. Bu yüzden 'kuraklık uygulandı' açıklaması tek başına yetersizdir; kök bölgesi su durumu, stresin başlangıç-bitiş tarihi ve gelişim evresi birlikte bildirilmelidir.

5. GENETİK DÜZENLEME: GNI-A1, WAPO-A1 VE ÇOK GENLİ MİMARİ

Sakuma ve ark. (2019), GNI1'in buğday çiçekçik fertilitesini sınırlandıran bir homeobox düzenleyici olduğunu göstermiştir. GNI-A1 genindeki işlevi azaltan varyasyon ve susturma yaklaşımları fertil çiçekçik ve başakçık başına tane sayısını artırmıştır. Ancak tek bir genin farklı materyallerde verim üzerinde aynı büyüklükte yarar sağlayacağı düşünülmemelidir; tane ağırlığı ve yetiştirme çevresiyle olası etkileşimler ayrıca incelenmelidir.

Kuzay ve ark. (2022), kromozom 7AL üzerindeki başak başına başakçık sayısıyla ilişkili önemli QTL'nin nedensel geninin WAPO-A1 olduğunu raporlamıştır. WAPO-A1 doğrudan başakçık sayısı mimarisine, GNI-A1 ise fertil çiçekçik gelişimine ilişkin bulgular sunduğundan bu iki hedef biyolojik olarak birbirinin eş anlamlısı değildir. Islah programında başakçık üretimi, çiçekçik sağkalımı ve tane tutumu ayrı fenotipler olarak tutulmalıdır.

Bu çalışma için PLOS Genetics tarafından 2023 yılında bir "Expression of Concern" (editoryal endişe bildirimi) yayımlanmıştır. Bildirimde, özgün makaledeki bazı gen ekspresyon verilerinde manipülasyon tespit edildiği, ilgili veri ve şekillerin güvenilir olmadığı, buna karşılık tekrarlanan deneylerden sonra derginin düzeltilmiş makalenin temel bulgularının arkasında durduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla WAPO-A1 ile ilgili sonuçlar aktarılırken özgün çalışmanın güncellenmiş sürümü ve bu bildirim birlikte dikkate alınmalıdır (The PLOS Genetics Editors, 2023).

Başak fertilitesinin genetik yapısı, çoğu koşulda birden fazla lokusun küçük etkileri ve güçlü çevre bağımlılığı nedeniyle karmaşıktır. Bu nedenle genotiplemenin ön koşulu, fenotipin doğru tanımlanmasıdır. Birim alan verimiyle ilişkilendirilmeyen tek başak göstergelerinin aşırı yorumlanmasından kaçınılmalıdır.

Islah açısından bu iki gen bölgesi arasında olası tamamlayıcılık araştırılabilir; ancak 'birleştirmek kesinlikle yüksek verim verir' biçiminde bir çıkarım bilimsel olarak güçlü değildir. Allel etkisinin genetik arka planı, başaklanma zamanı, bitki boyu ve çevre koşullarıyla birlikte değerlendirilmesi gerekir. Aynı allelin farklı popülasyonlarda büyüklük ve hatta yön bakımından farklı sonuç verebilmesi, fenotipik doğrulamayı zorunlu kılar.

Tablo 2. Genetik ve fizyolojik araştırmaların farklı hedefleri.

Araştırma/Gen	**Öncelikli fenotip**	**Kaynak**
GNI-A1	Fertil çiçekçik ve tane/başakçık	Sakuma ve ark., 2019
WAPO-A1	Başak başına başakçık sayısı	Kuzay ve ark., 2022
Başak asimilat arzı	Çiçekçik sağkalımı	González ve ark., 2011
Genetik ilerleme	Modern çeşitlerde sağkalım	Marchese ve ark., 2026b

Kaynak: Sakuma ve ark. (2019), Kuzay ve ark. (2022), González ve ark. (2011) ve Marchese ve ark. (2026b) temel alınarak hazırlanmıştır. Kuzay ve ark. (2022) için editoryal endişe bildirimi bulunmaktadır (The PLOS Genetics Editors, 2023).

6. GÜNCEL ARAŞTIRMALAR: BAŞAK FERTİLİTESİNDE GENETİK İLERLEME

Marchese ve ark. (2026b), İspanya'da iki tarla denemesinde farklı ıslah dönemlerine ait 11 çeşitte çiçekçik primordiyumu gelişimini sapa kalkmadan çiçeklenmeye kadar yüksek sıklıkla izlemiştir. Çalışmada maksimum başlatılmış primordiyum sayısının farklı dönem çeşitleri arasında benzer olmasına karşılık modern çeşitlerde fertil çiçekçik ve tane sayısının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma özellikle orta ve uç başak bölgelerindeki çiçekçik sağkalımını vurgulamaktadır.

Araştırmacılar modern çeşitlerde başak başına fertil çiçekçik sayısında yaklaşık %15 ve tane sayısında yaklaşık %26 artış raporlamış; birim alandaki tane sayısındaki farkın önemli bölümünü (%59) çiçeklenme dönemi fertil çiçekçik sayısıyla ilişkilendirmiştir. Bu oranlar söz konusu denemenin sonuçlarıdır; evrensel artış katsayıları olarak kullanılmamalıdır. Güncel literatür, başağa kaynak yönlendirme ve distal çiçekçik kayıplarını azaltmanın yeni verim kazanımları için test edilebilir hedefler olduğunu düşündürmektedir.

Aynı araştırma grubunun 2026 tarihli bir diğer çalışması, karşıt yetiştirme koşullarında genetik verim kazanımlarını ve fizyolojik belirleyicilerini inceleyerek tane sayısı ve başak fertilitesinin verim değişimlerini açıklamada tane ağırlığından daha öne çıkabildiğini göstermiştir (Marchese ve ark., 2026a). Araştırmalar birlikte değerlendirildiğinde yalnızca olgun tane ölçümlerine odaklanan seleksiyonun biyolojik neden-sonuç ilişkilerini tümüyle açığa çıkaramayacağı anlaşılır.

7. FENOTİPLEME YÖNTEMLERİ VE VERİ STANDARDİZASYONU

Önerilen saha protokolünde her genotip için aynı gelişimsel evrede işaretlenmiş ana sap başakları belirlenir; başakçıklar bazal–orta–apikal bölgelere ayrılır. Sapa kalkma başlangıcından çiçeklenmeye kadar seçilmiş tarihlerde örnekleme yapılarak başlatılmış primordiyumlar ve gelişim evreleri mikroskopla kaydedilir. Çiçeklenmede fertil çiçekçik sayımı, hasatta aynı konumlara karşılık gelen tane sayımı yapılır. Bu yaklaşım doğrudan çiçekçik sağkalımı ve tane tutumunu birbirinden ayırmaya hizmet eder.

Çiçekçik sağkalımı, tane tutumu ve meyveye dönüşüm etkinliği aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\text{Çiçekçik sağkalımı (\%)} = (\text{FÇ} / \text{MP}) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Tane tutumu (\%)} = (\text{T} / \text{FÇ}) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Meyveye dönüşüm etkinliği} = \text{T} / \text{BKA} \quad (3)$$

Burada FÇ antese dönemindeki fertil çiçekçik sayısını, MP gelişim sürecinde ulaşılan maksimum çiçekçik primordiyumu sayısını, T hasatta oluşan tane

sayısını, BKA ise antese dönemindeki başak kuru ağırlığını (g) ifade eder. Meyveye dönüşüm etkinliğinin birimi tane g^{-1} olarak verilir. Pay ve payda aynı biyolojik örnekleme ölçeğini temsil etmelidir. Tahrip edici gelişim örneklemelerinde MP, aynı genotip ve eşdeğer gelişim koşullarında yetişmiş bağımsız başaklardan tahmin edilir.

Gelişen başak küçükken yapılan ölçümler yoğun iş gücü gerektirir. Bu nedenle yüksek verimli ön taramalarda olgun başakta tane sayısı, başakçık sayısı ve başak kuru ağırlığı kullanılabilir; fakat bunların çiçekçik kaybının doğrudan ölçümü olmadıkları metinde ve veri tabanında işaretlenmelidir. Gelişim düzeyindeki incelemeler seçilmiş alt panelde yürütülebilir.

Fenotiplemede örnek sayısı kadar örnekleme birimi de önemlidir. Bir parselden tesadüfi seçilen az sayıda başakta elde edilen morfolojik skor, başak yoğunluğu ve bitki içi pozisyon değişimini yeterince temsil etmeyebilir. İdeal bir protokolde seçilen başak sayısı, başağın hangi saplardan alındığı, inceleme günü, başakçık kesiti, çiçekçik pozisyonu ve laboratuvar sınıflandırma ölçütleri raporlanır. Farklı değerlendiriciler kullanılıyorsa kör tekrar puanlama ve gözlemci uyumu incelenebilir.

Görüntü işleme sistemleri ve dijital mikroskopi, zaman alan çiçekçik ölçümlerini standardize etme potansiyeli taşır. Buna karşın görüntü sınıflandırıcısının 'fertil' kararını gerçek tane bağlama ile ilişkilendirecek referans veri olmadan otomatik sayı üretmesi sınırlıdır. Çiçekçik düzeyindeki testler, parsel verim analizi, başak sayısı ve bin tane ağırlığı gibi klasik parametrelerle birlikte yürütüldüğünde daha anlamlıdır.

8. TÜRKİYE'DEKİ ARAŞTIRMA BİRİKİMİ VE SINIRLAR

Türkiye'de verim bileşenleri üzerinde çok sayıda tarla denemesi vardır. Akın ve ark. (2017), Türkiye'deki ilkbahar buğdaylarının uzun dönemli verim ilerlemesini değerlendirirken birim alandaki başak ve başak başına tane sayısındaki kazanımları raporlamıştır. Koç ve Olgun (2021) ise Konya koşullarında farklı kökenli yerel materyal ve modern hatların başak başına tane sayısında farklılaştığını göstermiştir. Bu yayınlar tane sayısı ıslahı için değerli olmakla birlikte, doğrudan çiçekçik primordiyumu kaybını ölçen deneyler olarak yorumlanmamalıdır.

Gelecekteki Türkiye çalışmaları bakımından açık boşluk, tarla koşullarında başakçık bölgesine göre gelişim seyri ile taneye dönüşen çiçekçik oranının doğrudan izlenmesidir. Orta Karadeniz gibi yağışlı ve geçici streslerin görülebildiği çevrelerde, aynı genotip panelinin farklı ekim ve sıcaklık pencerelerinde değerlendirilmesi fizyolojik mekanizmaların ayrıştırılmasına yardımcı olabilir. Bu, mevcut kaynakların doğrudan sonucu değil, önerilen bir araştırma gündemidir.

9. ISLAH PROGRAMLARI İÇİN ÖNERİLEN ÇERÇEVE

Birinci aşamada genotiplerin verim, başak sayısı, başakçık sayısı, başak başına tane sayısı ve bin tane ağırlığı çok çevreli denemelerde birlikte ölçülür. İkinci aşamada tane sayısı bakımından yüksek fakat tane ağırlığı veya stabilitesi olumsuz olmayan hatlar seçilir. Üçüncü aşamada küçük alt panel için çiçekçik primordiyum sayısı–fertil çiçekçik sayısı–tane tutumu zinciri ayrıntılı takip edilir. Dördüncü aşamada genetik markörler ancak ilgili popülasyonda fenotipik değerleri doğrulandıktan sonra karar destek aracı olarak kullanılır.

Bu yaklaşımda seleksiyon başarısı tek başaktaki maksimum tane sayısıyla değil, birim alan tane veriminde ve çevreler arası tutarlılıkta elde edilen kazanımlarla doğrulanmalıdır. Tane sayısı artışının bin tane ağırlığındaki potansiyel azalmayla dengelenip dengelenmediği de zorunlu kontrol değişkenidir.

Türkiye koşullarında farklı rakım ve sıcaklık örüntüsüne sahip lokasyonlarda başakçık konumsal haritalaması yürütülmesi, yerel seleksiyon açısından bilgi sağlayabilir. Bununla birlikte bölümde yeni bir sonuç iddia edilmemektedir: başak içi ölüm oranı ile verim kararlılığının doğrudan ilişkisini belirlemek için tasarlanmış, eşlenik gelişim dönemi örneklemeli yeni deneylere gereksinim vardır.

Wang ve arkadaşlarının (2026) çok kaynaklı analizi, buğdayda fotosentetik kaynak ve tane oluşum kapasitesi arasındaki ilişkilerin çevre ve yönetim koşullarına duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Başak fertilitesi yönünden başarılı bir hat, tane dolumuna yeterli asimilat sağlayamadığında tane ağırlığı kaybı yaşayabilir. Bu nedenle yüksek fertil çiçekçik sayısına sahip hatlar, tam tane dolumu ve verim kararlılığıyla birlikte doğrulanmalıdır. Çalışma doğrudan belirli bir GNI-A1 veya WAPO-A1 alleli için evrensel verim kazancı kanıtı olarak kullanılmamalıdır.

10. SONUÇ

Başak fertilitesi, yalnızca başağın morfolojik büyüklüğü değil, başlamış çiçekçiklerin ne kadarının üretken çiçekçiğe ve taneye dönüştüğünün toplam sonucudur. 2026 literatürünün de işaret ettiği gibi, modern verim kazanımlarının bir bileşeni çiçekçik sağkalımındaki ilerlemedir. Türkiye'de başak başına tane sayısına ilişkin güçlü tarla araştırma birikimini, ayrıntılı çiçekçik gelişim kayıtları ve genetik analizlerle birleştirmek yeni, spesifik ve doğrudan ıslaha dönük araştırma fırsatları sağlayabilir.

ETİK BEYAN

Bu çalışma, daha önce yayımlanmış bilimsel literatürün değerlendirilmesine dayanan bir derlemedir. İnsan veya hayvanlar üzerinde yeni bir araştırma gerçekleştirilmediğinden etik kurul onayı gerekmemektedir.

KAYNAKÇA

Akın, B., Sohail, Q., Ünsal, R., Dinçer, M. N., Demir, L., Geren, H., ... Morgounov, A. (2017). Genetic gains in grain yield in spring wheat in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 41*(2), 103–112. doi:10.3906/tar-1611-50

Backhaus, A. E., Griffiths, C., Vergara-Cruces, A., Simmonds, J., Lee, R., Morris, R. J., & Uauy, C. (2023). Delayed development of basal spikelets in wheat explains their increased floret abortion and rudimentary nature. *Journal of Experimental Botany, 74*(17), 5088–5103. doi:10.1093/jxb/erad233

Bicego, B., Savin, R., Girousse, C., Allard, V., & Slafer, G. A. (2024). Tillering and floret development dynamics in wheat cultivars of contrasting spike fertility plasticity. *Field Crops Research, 319*, 109654. doi:10.1016/j.fcr.2024.109654

Ferrante, A., Savin, R., & Slafer, G. A. (2013a). Floret development and grain setting differences between modern durum wheats under contrasting nitrogen availability. *Journal of Experimental Botany, 64*(1), 169–184. doi:10.1093/jxb/ers320

Ferrante, A., Savin, R., & Slafer, G. A. (2013b). Is floret primordia death triggered by floret development in durum wheat? *Journal of Experimental Botany, 64*(10), 2859–2869. doi:10.1093/jxb/ert129

Ferrante, A., Savin, R., & Slafer, G. A. (2015). Relationship between fruiting efficiency and grain weight in durum wheat. *Field Crops Research, 177*, 109–116. doi:10.1016/j.fcr.2015.03.009

González, F. G., Miralles, D. J., & Slafer, G. A. (2011). Wheat floret survival as related to pre-anthesis spike growth. *Journal of Experimental Botany, 62*(14), 4889–4901. doi:10.1093/jxb/err182

Guo, X., Zhang, Z., Li, J., Zhang, S., Sun, W., Xiao, X., ... Zhang, Y. (2024). Phenotypic and transcriptome profiling of spikes reveals the regulation of light regimens on spike growth and fertile floret number in wheat. *Plant, Cell & Environment, 47*(5), 1575–1591. doi:10.1111/pce.14832

Koç, E., & Olgun, M. (2021). Yakın dönemde Türkiye, İran ve Afganistan'da toplanan yerel buğdayların ve modern buğday germplazmalarının agronomik performansları. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi, 14*(1), 39–50. https://bibad.gen.tr/index.php/bibad/article/view/383

Kuzay, S., Lin, H., Li, C., Chen, S., Woods, D. P., Zhang, J., ... Dubcovsky, J. (2022). WAPO-A1 is the causal gene of the 7AL QTL for spikelet number per spike in wheat. *PLOS Genetics, 18*(1), e1009747. doi:10.1371/journal.pgen.1009747

Marchese, S. I., Slafer, G. A., Savin, R., Aparicio, N., & Tamagno, S. (2026a). Genetic gains in wheat yield and its physiological determinants under contrasting growing conditions. *European Journal of Agronomy, 180*, 128258. doi:10.1016/j.eja.2026.128258

Marchese, S. I., Slafer, G. A., Savin, R., & Tamagno, S. (2026b). Genetic gains in wheat spike fertility and associated floret development attributes. *European Journal of Agronomy, 180*, 128200. doi:10.1016/j.eja.2026.128200

Sakuma, S., Golan, G., Guo, Z., Ogawa, T., Tagiri, A., Sugimoto, K., ... Komatsuda, T. (2019). Unleashing floret fertility in wheat through the mutation of a homeobox gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 116*(11), 5182–5187. doi:10.1073/pnas.1815465116

Slafer, G. A., Elia, M., Savin, R., García, G. A., Terrile, I. I., Ferrante, A., ... González, F. G. (2015). Fruiting efficiency: An alternative trait to further rise wheat yield. *Food and Energy Security, 4*(2), 92–109. doi:10.1002/fes3.59

The PLOS Genetics Editors (2023). Expression of Concern: WAPO-A1 is the causal gene of the 7AL QTL for spikelet number per spike in wheat. *PLOS Genetics, 19*(12), e1011096. doi:10.1371/journal.pgen.1011096

Wang, T.-C., Moritz, A., Mabrouk, M., Villar Alegría, E., Arinalp, B., Ganji, E., ... Chen, T.-W. (2026). Plasticity of source-sink dynamics contributes to wheat yield stability. *Nature Communications, 17*, 3781. doi:10.1038/s41467-026-72330-x

BÖLÜM 21

Bıldırcın Ürünlerinin Fonksiyonel Gıda Potansiyeli ve Endüstriyel İşlenmesi

***Muhlis Macit*[1]**

[1] Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Zootekni Bölümü
0000-0002-5055-1156

1. GİRİŞ

Kümes hayvancılığı endüstrisi, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, dünya tarım sektörünün önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Yüksek verimlilik özellikleriyle dikkatleri üzerine çeken ve bu endüstrinin bir dalı olarak gün geçtikçe gelişen bıldırcın yetiştiriciliği, hem et hem de yumurta üretiminde çeşitlilik arz etmektedir. Bu sektör, hayvansal protein yetersizliğinin giderilmesine katkısı, mevcut üretim sistemleriyle yüksek uyum kapasitesi ve düşük gelirli toplumsal kesimlere ekonomik destek sağlaması sayesinde gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkelerde hızla yaygınlaşmaktadır. Bu sektör aynı zamanda hayvansal protein arz-talep dengesi arasındaki açığı kapatmak için protein üretim kaynaklarını çeşitlendirmeye, güçlendirmeye ve sürdürülebilir hale getirmeye yardımcı olabilecek alternatif üretim alanıdır. Ancak besleme problemleri, düşük yumurta verimi ve karkas ağırlığı, bireysel tercihler ve pazara erişim gibi biyolojik ve ekonomik dezavantajlar üretimi kısıtlamaktadır.

Ülkeler arasında bıldırcın populasyonları ve ırk dağılımı bakımından geniş farklılıklar mevcuttur. Japon bıldırcını Avrupa ve Amerika'da et, Asya'da ise yumurta üretiminde öne çıkarken *Bobwhite* ve White Breasted genotipleri etlik, British Range, English White, Manchurian Golden, Pharaoh ve Tuxedo gibi ırklar ise yumurta üretiminde değerlidir (Arya et al., 2018; Altine et al., 2016; Vargas-Sánchez et al., 2019; Minvielle, 2004).

Bıldırcın ürünleri küresel ölçekte hâlâ sınırlı kabul görse de Avrupa ve Asya'da geleneksel gıda olarak popülerliği artmaktadır. Yüksek protein, düşük yağ ve kolesterol içeriği ile mineral ve vitamin zenginliği sayesinde yumurtası hem besleyici bir kaynak hem de endüstriyel gıda uygulamalarında işlevsel bileşen olarak değerlendirilmektedir (Velioğlu, 2019).

Küresel üretim istatistikleri sınırlı olmakla birlikte Çin en büyük üretici konumundadır. Doğu Asya toplam üretimde önemli paya sahiptir; ABD, Brezilya ve bazı Avrupa ülkeleri de önde gelen üreticiler arasındadır. Dünya genelinde bıldırcınlar sofralık yumurtaların yaklaşık %10'unu ve kümes hayvanı üretiminin %0,2'sini temsil etmektedir. Türkiye'de bıldırcın yetiştiriciliği 1970'lerden itibaren akademik amaçla, 1980'lerden itibaren ise ticari olarak başlamış olmasına rağmen damızlık işletmelerin azlığı ve ıslah çalışmalarındaki eksiklikler nedeniyle üretim düşük verimli hatlarla sürdürülmektedir. Buna rağmen düşük yatırım maliyeti, adaptasyon kabiliyeti, yüksek besin değeri ve kârlı pazar ağı sayesinde bıldırcın yetiştiriciliği, özellikle yumurtasıyla, hem sağlıklı beslenme hem de fonksiyonel gıda açısından stratejik bir fırsat sunmaktadır (Mnisi et al., 2023; Gülüm et al., 2019).

Kuş yumurtası, embriyonun gelişimi için gerekli tüm besin maddelerini içeren kapalı bir biyolojik besindir. Embriyonik süreç boyunca gerçekleşen fizyolojik olaylar, sınırları belirlenmiş bu yapı içerisinde meydana gelir. Kalın ve sert kabukla çevrili yumurta, dış ortamdan ek besin almadığı gibi metabolik atıklarını

da dışarıya aktaramaz. Embriyonun enerji ve besin madde ihtiyaçları yumurta oluşumu sırasında iç yapıya dahil edilir. Gelişim sürecinde ortaya çıkan metabolik ürünler ise yavru çıkışına kadar sistem içinde tutulur. Bununla birlikte kabuk üzerindeki mikroskobik porlar aracılığıyla yalnızca gaz değişimi gerçekleşir. Oksijen difüzyonla içeri girerken karbondioksit ve su dışarıya atılır. Bu özellikleri sayesinde kuş yumurtaları, embriyonik gelişim mekanizmalarının incelenmesinde ideal bir araştırma materyali olarak kabul edilmektedir (Balkan & Karakaş, 2007).

Yumurtalar önemli biyolojik fonksiyonlara sahip besin maddeleri içerir. Araştırmalar yumurta proteininin yüksek biyoyararlanıma sahip olduğunu ve besin kalitesinin diğer gıdalarla karşılaştırıldığında daha yüksek değer taşıdığını ortaya koymuştur (Marques et al., 2011). Kuş yumurtası, embriyonal gelişimin sağlanması için gerekli protein, lipid, vitamin ve mineral bileşenlerini bütüncül bir şekilde en uygun miktar ve oranda barındırmakla birlikte, büyüme düzenleyicileri ve immünolojik savunma faktörleri açısından da zengin bir biyolojik matriks niteliği taşımaktadır. Bu nedenle yumurta hem besinsel hem de biyofonksiyonel açıdan embriyo için vazgeçilmez bir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Yumurta ve yumurta bileşenlerinin antioksidanlar, antimikrobiyaller, immünomodülatörler ve antikanser gibi biyolojik işlevleri ve aktiviteleri olan çok sayıda yapısal öğe içermeleri nedeniyle insan sağlığı ile hastalıkların önlenmesi ve tedavisi için önemli potansiyele sahiptir (Sigolo et al., 2019).

Tavuk yumurtası tüketimi günümüz dünyasında en yüksek seviyede olsa da diğer kanatlı türlerin yumurtaları da giderek popüler hale gelmektedir. Japon bıldırcın yumurtaları üzerine çalışmalar hız kesmeden devam etmekte ve yumurta kısımlarının özellikleri, kimyasal kompozisyonu ve besin değerini aydınlatmaya yönelik araştırmalar sürdürülmektedir. Yumurtaların besin değeri ve fonksiyonel özellikleri onları önemli bir hayvansal protein kaynağı yapmakla birlikte yumurta tüketimi, yüksek kolesterol içeriği nedeniyle koroner kalp hastalığına yol açtığı düşünülerek sıklıkla bazı sağlık sorunlarından sorumlu tutulmaktadır (Tolik et al., 2014). Büyüme ve gelişim süreçleri için gerekli birçok temel besin maddesini içeren bıldırcın yumurtası özellikle çocuk beslenmesinde vazgeçilmez bir yere sahiptir. Protein ve amino asit içeriği diğer yumurta türlerine kıyasla daha yüksek düzeyde bulunmakta, ayrıca bağışıklık sistemini destekleyici potansiyel etkiler sunduğu bildirilmektedir. Yuvarlak şekle sahip bıldırcın yumurtaları tat ve aroma açısından tavuk yumurtasına benzerlik gösterir. Çiğ veya haşlanmış biçimde tüketilebilmekte, yemeklerde ve salatalarda kullanım alanı bulmaktadır. Rafadan olarak ya da süt ve bal ile karıştırılarak tüketilmesi ise geleneksel olarak önerilen yöntemler arasında yer almaktadır. Bıldırcın yumurtası, yüksek protein, esansiyel amino asitler, vitaminler ve mineraller içeren zengin besin profili ile değerli bir gıda maddesidir. Besin madde kompozisyonu ve antioksidan özellikleri

sayesinde bağışıklık fonksiyonunu geliştirmek ve kronik hastalık riskini azaltmak gibi çeşitli sağlık faydaları ile ilişkilendirilmiştir (Tokuşoğlu, 2006).

Besinsel anlamda, bir adet bıldırcın yumurtası 14 kalori ve 1.2 g protein içerirken bir adet tavuk yumurtası 75 kalori ve 6 gram protein ihtiva eder. Protein, 100 g bıldırcın yumurtasının %13'ünü, tavuk yumurtasının ise %11'ini oluşturur. Bıldırcın yumurtasının B_1 vitamini içeriği tavuk yumurtasına göre 6 kat, B_2 vitamini 15 kat, A vitamini 2 kat, demir ve potasyum içeriği 7-8 kat ve fosfor 5 kat daha fazladır. Kolesterol düzeyi tavuk yumurtasına kıyasla daha yüksek olmakla birlikte LDL düzeyi düşük, HDL düzeyi ise yüksektir. Bu anlamda kalp ve damar sağlığı açısından faydalı olan bıldırcın yumurtasının düzenli tüketilmesi, birçok hastalığa karşı vücut direncini önemli düzeyde yükseltmektedir. Literatür bildirişleri, bıldırcın yumurtasının hem esansiyel hem de esansiyel olmayan besin maddeleri açısından zengin bir içerik sunduğunu ve bu bileşenlerin büyük çoğunluğunun insan sağlığı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Ortalama enerji değeri 156.50 kcal/100 g olup bu miktar insan vücudunda organların işlevlerinin sürdürülmesi ve metabolik süreçlerin desteklenmesi için kullanılmaktadır. Besinsel faydalar arasında anti-kanser özellikler ve tümöral büyümeyi baskılama potansiyeli öne çıkmaktadır. Ayrıca yaşlanma süreçlerinin yavaşlatılması, bağışıklık sisteminin güçlendirilmesi ve hemoglobin sentezinin desteklenmesi yoluyla aneminin önlenmesine katkı sağlanması dikkat çekmektedir. Literatürde yer alan çeşitli raporlara göre bıldırcın yumurtası, gastrit ve mide ülseri gibi gastrointestinal rahatsızlıkların tedavisinde de yararlı olabilecek bir gıda olarak değerlendirilmektedir (**Tunsaringkarn et al., 2013).**

Etin beslenmedeki temel işlevi, yüksek biyolojik değere sahip protein sağlamasıdır. Yaklaşık olarak %17-22 arasında değişen et proteinlerinin sindirim ve absorpsiyon oranı (% 98) oldukça yüksektir. Bıldırcın eti piliç etine kıyasla daha yumuşak ve koyu renkli olup daha fazla protein ve daha az yağ içermektedir (Demirhan & Şahinler, 2022; Kubad, 2023). Yüksek biyolojik değerinden dolayı birçok ülkede alternatif ve kabul gören bir protein kaynağı olan bıldırcın eti, besinsel üstünlüklerine rağmen sınırlı üretim, yüksek fiyat, küçük karkas boyutu ve piyasada az bulunabilirlik gibi faktörler nedeniyle talebi tam olarak karşılayamamaktadır. Bıldırcın eti, etlik piliç etine karşı rekabetçi bir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Bazı araştırmalar, bıldırcın etinin kalite açısından tavuk etine eşdeğer veya daha üstün olabileceğini göstermektedir **(**Awan et al., 2017).

Bıldırcın etinin lezzet ve beslenme açısından değerli özellikleri, tüketici ilgisinin artmasında belirleyici olmaktadır. Etin bileşimi ve kalitesi hayvanın tür, yaş, cinsiyeti, beslenme durumu, yemin kompozisyonu, bakım ve idare şartları ile kas dokusunun özelliklerine bağlı olarak değişmektedir **(Demirhan et al., 2020).**

Yüksek protein, mineral ve vitamin düzeyi ve düşük yağ içeriğiyle öne çıkan bıldırcın eti, diğer kanatlı türleri ve çiftlik hayvanların etlerine benzer veya üstün özelliklere sahiptir. Göğüs eti, tavuk, hindi, ördek ve bıldırcın gibi kümes hayvanlarında en değerli kas dokusu olarak kabul edilmektedir. Türler arasındaki genetik farklılıklar ve kas lifi bileşimindeki varyasyonlar, göğüs kasının yapısal özelliklerini ve dolayısıyla etin besin değerini ve kalite parametrelerini etkilemektedir **(Quaresma et al., 2022).** Bıldırcın göğüs eti, protein (% 23.2'ye karşı % 22.6) ve su (% 74.9'a karşı % 71.7) içeriği bakımından etlik piliç göğüs etiyle benzer düzeyde olup daha yüksek mineral madde (%0.98'e karşı % 1.27) ve yağ (% 1.65'e karşı % 2.99) içermektedir **(Kokoszyński et al., 2024**). Bıldırcın göğüs etinde protein oranı ortalama % 23 iken, but etinde % 20.7'dir. Yağ içeriği bakımından ise but eti (% 3.4), göğüs etine (% 2.4) göre daha yüksek değerler ortaya koymuştur. Etlik bıldırcınlarda derisiz et oranı ise % 60-62 olarak belirlenmiştir **(**Lukanov & Pavlova, 2020). Bıldırcın eti, değerli tat ve besin özelliklerinin yanı sıra düşük yağ içeriği ve diğer kümes hayvanlarından farklı protein-karbonhidrat oranı nedeniyle diyet gıdası olarak kabul edilmektedir. Enerji değeri (134 Kalori/100 g) tavuk etine kıyasla (183 Kalori/100 g) daha düşüktür (Gartovannaya et al., 2020).

Bıldırcın eti ve yumurtasının fonksiyonel gıda niteliği, yalnızca toplam protein ve yağ miktarıyla değil, lipid sınıfları ve yağ asidi dağılımı ile de değerlendirilmelidir. Güncel lipidomik yaklaşım, bu ürünlerin besin madde kompozisyonunun daha ayrıntılı tanımlanmasına imkân vermektedir. Bununla birlikte 'süper gıda' ifadesi, insan sağlığı üzerinde klinik olarak kanıtlanmış üstünlük anlamında kullanılmamalı; karşılaştırmalar porsiyon büyüklüğü, toplam diyet ve hedef tüketici grubu dikkate alınarak yapılmalıdır (**Bialek et al., 2026**).

BILDIRCIN KÖKENLİ FONKSİYONEL ÜRÜN GELİŞTİRME VE ENDÜSTRİYEL İŞLEME

Fonksiyonel gıdalara yönelik artan talep, sürdürülebilir hayvansal protein kaynaklarına duyulan ihtiyaç ve farklı lezzet arayışlarına hitap eden gastronomi pazarlarının genişlemesi, bıldırcın kökenli ürünlere gösterilen ilgiyi kayda değer ölçüde artırmıştır. Bununla birlikte sektör; sınırlı sayıda ıslah edilmiş hat, yetersiz teknolojik gelişim, kamu politikalarındaki eksiklikler ve zayıf ticari entegrasyon gibi yapısal sorunlarla karşı karşıya olup, küresel ölçekte üretimin büyük kısmı resmî kayıt sistemlerinden yoksun küçük işletmeler tarafından gerçekleştirilmektedir **(Carrillo-García et al., 2025).**

Kanatlı etleri ve ürünlerinin beslenme ve ülke ekonomisi açısından stratejik bir değer taşıdığı herkes tarafından kabul edilmektedir. Bu nedenle tüketiminin artırılabilmesi için ürün çeşitliliğinin geliştirilmesi gerektiği de ifade edilmektedir. Et ve et ürünleri içerisinde özellikle kaplamalı ürünlerin tüketiminde artış eğilimi gözlenmektedir. Bıldırcın ise hâlihazırda çoğunlukla yumurta üretimi amacıyla yetiştirilmekte olup piyasada et formunda yalnızca

bütün bıldırcın karkası olarak satışa sunulmaktadır. Ancak bıldırcının kaplamalı ürünlerde hammadde olarak kullanılması durumunda, bu ürünün talep gören diğer gıda kategorileri içerisinde yer alabileceği bir kısım araştırmalarda ifade edilmektedir **(**Gülüm et al., 2019).

Bıldırcın eti, kızartma ve kavurma gibi farklı pişirme yöntemleriyle değerlendirilebilecek geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sığır ve tavuk etine alternatif olarak, çeşitli un türleriyle köfte üretiminde başarıyla kullanılabilmektedir. Ayrıca farklı tariflerde hazır et, salamura edilmiş et ve tandır bıldırcını olarak ta değerlendirilebilmektedir **(Mishra & Shukla, 2014).** Bugün, dünya pazarının kümes hayvanı ürünlerinin kalite ve güvenliği ile ürün yelpazesinin genişletilmesine yönelik talepleri artmıştır. Yerel işletmelerin değişen şartlara uyum sağlayarak geleneksel kümes hayvanı ürünleriyle birlikte ürün yelpazesini genişletmesinde fayda vardır. Bu bağlamda bıldırcın yetiştiriciliği, bıldırcın yumurtası ve eti gibi yüksek besin değerine sahip diyetik ürünlerin üretimi yoluyla bu yelpazeyi genişletmeye imkân tanır **(Glinkina et al., 2020).**

Bıldırcın ürün yelpazesi:

- içi temizlenmiş bıldırcın karkasları ve işlenmiş ürünleri,

- yarı mamül doğal, tuzlanmış, marine edilmiş, baharatlanmış ürünleri,

- kıyma, köfte, kroket vb kıyılmış yarı mamül ürünleri,

- karaciğer, kalp, boyun gibi sakatat ürünlerini kapsar.

Bunlara ek olarak, bebek ve özel gıda ürünlerinin üretiminde bıldırcın eti kullanılmaktadır.

Diğer taraftan, bıldırcın etinden sosis (BES), tavuk etinden sosis (TES) ve ticari sosis (TS); bıldırcın etinden köfte (BEK), tavuk etinden köfte (TEK) ve ticari köfte (TK); bıldırcın etinden nugget (BEN), tavuk etinden nugget (TEN) ve ticari nugget (TN) şeklinde farklı ürünler hazırlanarak mukayeseli araştırmalar yapılmıştır. Sonuçlar, bıldırcın etinden hazırlanan ürünlerde protein ve kül miktarının en fazla, yağ oranının ise en düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bıldırcın etinden hazırlanan tüm ürünler yüksek miktarda K, Ca, Mg, P, Fe, Zn, Se ve A vitamini içermiştir. Bıldırcın ürünlerinde en yüksek beğeni/değer köftede, ardından nugget ve sosis ürünlerinde gözlenmiştir. Hem bıldırcın hem tavuk etinden hazırlanan sosis ürünleri ticari ürünlere kıyasla en yüksek vitamin E içeriğine sahip olduğu, bunu nugget ve köftenin izlediği görülmüştür. Sonuçlar ayrıca bıldırcın etinden hazırlanan ürünlerde pişirme kaybının azaldığını, tavuk etinden hazırlanan kontrol ve ticari ürünlerde ise daha fazla olduğunu, BEK'nin su tutma kapasitesinin (WHC) arttığını, BES ve BEN'ın ise plastisitesinin yükseldiğini göstermiştir. Tüm ürünler panelistler tarafından kabul görmüş, yalnız ürünler arasında çok az farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Tavuk

etinden sosis (TES) renk, tat, koku, doku ve genel beğeni açısından BES ve TS'e kıyasla en yüksek puanı almıştır **(Farag et al., 2021).**

Bıldırcın eti ve yumurtası üzerine yapılan duyusal özelliklerle ilgili çalışmada, hem bıldırcın köftesi hem de salamura bıldırcın yumurtalarının renk, tat, koku, doku ve genel kabulünü içeren organoleptik özellikleri incelenmiştir. Bıldırcın yumurtası tavuk yumurtasının değerlendirilmesine benzer şekilde uygulama alanı bulduğu gibi, küçük boyutları ve çekici görünümleri nedeniyle bıldırcın yumurtaları genellikle özel amaçlar için de kullanılır. Bunlar arasında yumurtaların salamura edilerek tüketime sunulması uygulama alanlarından biri olmakla beraber turşusu yapılan bıldırcın yumurtaları özgün bir ürün niteliği taşımaktadır. Turşular, işlenmiş gıdalar arasında önemli bir yere sahiptir. Bıldırcının (*Coturnix coturnix japonica*) artan popülaritesi, küçük ve renkli bıldırcın yumurtalarının turşu formunda değerlendirilmesi için uygun bir potansiyel sunmaktadır (Bayomy et al., 2017).

Bıldırcın etinin muhafazası ve ileri ürün geliştirme süreçleri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Asya'da, taze bıldırcın ürünlerinin yanı sıra, bıldırcın konserveleri geleneksel olarak soğuk depolama tesislerinin eksik olduğu yerlerde hazırlanıp pazarlanmıştır. Günümüzde, fonksiyonel bıldırcın eti gıda ürünleri piyasada satılmakta olup yüksek kalite ve besin değeri göstergelerine sahip özgün ürünlerin üretimi için temel oluşturmaktadır (Glinkina et al., 2020).

Bıldırcın etinden üretilen köfte ve salamura yumurtaların duyusal özelliklerinin değerlendirildiği araştırma bulguları Tablo 1'de sunulmuştur. Genel olarak ürünler panelistlerce iyi düzeyde beğenilmiştir (Bayomy et al., 2017).

Tablo 1. Bıldırcın köftesi ve salamura bıldırcın yumurtasının duyusal özellikleri[1]

Özellikler	Bıldırcın köftesi	Salamura bıldırcın yumurtası
Renk	4.7	4.2
Koku	5.0	4.0
Tat	4.5	4.5
Lezzet	4.3	4.3
Tekstür	4.3	4.1
Genel Kabul Edilebilirlik	4.5	4.2

1: Hedonik beğeni skalası (1-5: 1: kötü, 2: az, 3: orta, 4: iyi, 5: çok iyi.)

Fonksiyonel gıdalar ve nutrasötiklere yönelik artan ilgi, zengin besin ve biyoaktif profiliyle tanınan bıldırcın yumurtası tozu gibi terapötik özellik taşıyan doğal ürünlere dikkatleri çekmiştir. Son zamanlarda bıldırcın ürünlerinin tüketimini, erişimini ve muhafazasını artırmak üzere endüstriyel işlemden

geçirilerek bıldırcın yumurtası tozu üretilmiştir. Bıldırcın yumurtasının raf ömrü oda sıcaklığında yaklaşık 30 gün, buzdolabında ise 3 aya kadardır (Białek et al., 2026). Bıldırcın yumurtası tozu (BYT)'nun besin değerini, terapötik faydalarını ve farmasötik uygulamalarını değerlendirirken aynı zamanda sürdürülebilirliğini ve klinik kullanım potansiyelini de göz önünde bulunduran çalışmalar yapılmıştır (Sonji & Sonji, 2026).

Yumurta tozu üretimi: Yumurta tozu, likit yumurtanın kurutulması (liyofilizasyon) ve köpük-bant (foam-mat) kurutma gibi yöntemlerle üretilmekte olup her yöntem farklı fonksiyonel özellikler kazandırmaktadır. Likit dondurularak kurutulan tozların, rehidrasyon kapasitesi bakımından öne çıktığı ve bıldırcın yumurtası tozunun gıda bileşeni olarak güçlü bir potansiyel taşıdığı vurgulanmıştır (Moreira et al., 2022). Japon bıldırcını ve beyaz Leghorn tavuğu yumurtasından elde edilen dondurularak kurutulmuş tozların karşılaştırıldığı çalışmada, tüm tozların protein içeriğinin 91.13-97.03 g/100 g arasında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca bıldırcın tozlarının tavuk muadillerine kıyasla daha yüksek mineral ve esansiyel amino asit, daha düşük yağ içerdiği bildirilmiştir. Bıldırcın tozları test edilen tüm pH değerlerinde daha yüksek protein çözünürlüğü, daha yüksek emülsiyon aktivite ve stabilite indeksleri ile daha iyi köpük oluşturma ve stabilite kapasitesi sergilemiştir (Kudre et al., 2018).

Yumurta sarısı tozu üretiminde sıcak hava ve mikrodalga kurutmanın uygun olmadığı, püskürtmeli kurutma için optimum koşulların besleme sıcaklığı 50 °C, besleme hızı 8 mL/dk, giriş hava sıcaklığı 180-200 °C ve dönüş hızı 15.000-18.000 dev/dk olduğu bildirilmiştir. Vakumlu kurutmada 50 °C'de 0.06 MPa, soğuk kurutmada ise 6 mm yumurta sarısı kalınlığı ve 20 Pa kurutma basıncı önerilmiştir (Chen, 2005). Dondurularak kurutulmuş bıldırcın yumurtası tozunun, yüksek neme (%81) maruz bırakılıp farklı esnek ambalajlarda (düşük yoğunluklu polietilen, polipropilen, pigmentli polipropilen) 59 günlük stabilitesi incelenmiş ve bıldırcın yumurtası tozunun üretimi, stabilitesi ve ambalajlanması konusunda literatürün hâlâ sınırlı olduğuna vurgu yapılmıştır (Nunes et al., 2021).

Bıldırcın yumurtası tozu (BYT) proteinler, esansiyel amino asitler, vitaminler, mineraller ve biyoaktif bileşikler açısından zengindir. Bilimsel çalışmalar bunun oksidatif stres, kronik enflamasyon ve immün sistem bozukluklarının kontrolünde rol oynayabilecek antioksidan, anti-enflamatuar ve immünomodülatör potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu ürünün fizikokimyasal özellikleri biyoyararlanımı artırabilir ve yenilikçi ilaç taşıma sistemlerini destekleyebilir **(**Sonji & Sonji, 2026).

Terapötik ve fonksiyonel özellikler: Bıldırcın yumurtasının alerji karşıtı kullanımı dikkat çekici bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Araştırmalar bıldırcın yumurtası ovomukoidi ile tavuk yumurtası ovomukoidi arasındaki homolojinin %77 olduğunu, yumurta ovomukoidinin 9 epitopundan 8'inde bıldırcın ovomukoidindekinden farklı amino asitlerin bulunduğunu göstermiştir. Tripsin

inhibisyon aktivitesi sergileyen rekombinant bıldırcın ovomukoidi yumurta alerjisi olan hastaların serumuna spesifik olarak bağlanmamış ve hücre degranülasyonunu anlamlı biçimde inhibe etmiştir. Bu bulgular, bıldırcın ovomukoidinin anti-alerjik potansiyele sahip olduğuna işaret etmektedir (Hao et al., 2022). Çift kör, plasebo kontrollü bir klinik çalışmada, bıldırcın yumurtası içeren tescilli bir karışımın standart alerjen provokasyonu sonrası nazal inspiratuar tepe akımını iyileştirerek semptomları azalttığı ve çalışmaya katılan 43 sağlıklı denekte herhangi bir yan etki gözlenmediği bildirilmiştir (Benichou et al., 2014). Farelerde yer fıstığı kaynaklı eozinofilik özofajit benzeri gıda alerjisi modelinde ise bıldırcın yumurtası homojenatının PAR-2 sinyal yolunu modüle ederek alerjik yanıtı hafiflettiği belirlenmiştir (Lianto et al., 2018). Bıldırcın yumurtasının ovomukoid ve ovoinhibitör gibi protein fraksiyonları serin proteaz inhibitörü olarak işlev gördüğü ve klinik çalışmalarda alerjik rinit semptomlarının ürün alımından yaklaşık 15 dakika sonra hafiflediği rapor edilmiştir (Dyankova et al., 2024).

Bu umut verici özelliklere rağmen, BYT'nun terapötik ve farmasötik entegrasyonunu destekleyen bilimsel kanıtlar-biyoaktif bileşik kaynağı veya ilaç taşıma bileşeni olarak rolü dahil-sınırlı ve ağırlıklı olarak preklinik düzeydedir (Sonji & Sonji, 2026).

Bıldırcın köftesi, nugget, sosis, salamura yumurta ve yumurta tozu gibi ürünlerde başarılı bir ticarileşme yalnızca besin bileşimine bağlı değildir. Duyusal kabul, raf ömrü, ambalaj, porsiyonlama, açık alerjen bildirimi ve soğuk zincir kontrolü ürün geliştirme sürecinin ayrılmaz unsurlarıdır. Bu nedenle yeni ürün çalışmalarında fizikokimyasal ve mikrobiyolojik analizler, tüketici testi ve ekonomik fizibilite ile birlikte planlanmalıdır (Carrillo-García et al., 2025).

Entansif kümes hayvancılığı ürünleri arasında bıldırcın eti ve yumurtası, doğal ve fonksiyonel gıda imajı ile öne çıkmakta ve sağlıklı, fonksiyonel gıdaları veya geleneksel tıpla ilişkilendirilen ürünleri tercih eden orta ve yüksek gelirli bireylerin sayısı artmaktadır. Bu olumlu imajın korunması veya geliştirilmesi hâlinde ürünlere yönelik talebin artacağı açıktır. Bu nedenle ürün kalitesini iyileştirmeye yönelik besleme stratejilerinin ekonomik ve fonksiyonel sonuçlarını birlikte ele alan araştırma sayısını artırmanın yanı sıra beslenme ve sağlık boyutuyla da bu türden ürünlerin toplumun tüm kesimlerinin taleplerine sunulması adına arz ve talep noktasında üretim planlamaları yapılarak tüketici farkındalığı oluşturulmalıdır. Bu yaklaşımlar, bıldırcın ürünlerinin geleneksel tüketim kalıplarının ötesine taşınmasına ve fonksiyonel gıda pazarında daha güçlü bir konum kazanmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Altine, S., Sabo, M.. Muhammad, N. N., Abubakar, A. and Saulawa, L. A. (2016). Basic nutrient requirements of the domestic quails under tropical conditions: A review. *World Scientific News* 49 (2), 223-235.

Arya, K., Gupta, R. and Saxena,V.L. (2018). Quail Survey: Elaborative Information And Its Prospects. *Research Journal of Lifa Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences* (RJLBPCS), August 4(4) 197-209. DOI: 10.26479/2018.0404.16 s/k,

Awan, F. N., Shah, A. H., Soomro, A. H., Barahm, G. S., & Tunio, S. G. (2017). Carcass yield and physico-chemical characteristics of Japanese quail meat. *Advances in Agriculture and Animal Sciences*, 33(1), 111-120.

Balkan, M., & Karakaş, R. (2007). Bıldırcın (*Coturnix coturnix japonica*) yumurtalarına ilişkin bazı özellikler. *Dicle Üniversitesi, Ziya Gökalp Eğitim Fakültesi Dergisi*, (8), 112-118.

Bayomy, H.M., Rozan, M.A. and Mohammed, G.M. (2017). Nutritional Composition of Quail Meatballs and Quail Pickled Eggs. *J Nutr Food Sci* 7: 584. doi:10.4172/2155-9600.1000584.

Benichou, A., Armanet, M., Bussière, A., Chevreau, N., Cardot, J., & Tétard, J. (2014). A proprietary blend of quail egg for the attenuation of nasal provocation with a standardized allergenic challenge: a randomized, double-blind, placebo-controlled study. *Food Science & Nutrition*, 2(6), 655–663. https://doi.org/10.1002/fsn3.147

Białek, M., Wojtak, W., Czauderna, M., Zaworski, K., & Białek, A. (2026). Lipidomic insight into eggs and meat of quail (*Coturnix japonica*) as potential "superfoods". *Molecules*, 31(3), 407.

Carrillo-García, T., Cid-Martínez, A., Rosas-Espejel, M., Aguilar-Toalá, J., Arce-Vázquez, M., Álvarez-Cisneros, Y. M., Flores-López, M. L., & Cruz-Monterrosa, R. G. (2025). Evolving coturniculture: production challengesand market opportunities in alternative quailfarming. *Agro Productividad*.

Chen, J. (2005). Study on processing technology of quail egg yolk powder. *Food Science and Technology International*. https://en.cnki.com.cn/Article _en/CJFDTOTAL-SSPJ 200506014.htm

Demirhan, S. A., & Şahinler, N. (2022). Bazı hayvansal ürünlerin beslenme ve sağlık açısından önemi. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 10, 2696-2700.

Dyankova, S., Doneva, M., Solak, A., Miteva, D. A., Nacheva, I., Loginovska, K., & Solakov, N. (2024). Physicochemical studies and electrophoretic profile of

freeze-dried quail eggs. *BIO Web of Conferences*, 102, 1003. https://doi.org/10.1051/bioconf/202410201003

Farag, M.M., Abd-El-Aziz, N.A. and Ali, A.M. (2021). Preparing and evaluation of new nutritious products from quail meat. *Food and Nutrition Sciences*, 12, 889-898. https://doi.org/10.4236/fns.2021.129066.

Gartovannaya, E., Ivanova, K., & Denisovich, Y. (2020). The impact of quail breeding conditions at private farmsteads on meat quality. *In E3S Web of Conferences* (Vol. 203, p. 01012). EDP Sciences.

Glinkina, I. M., Kashirina, N. A., & Ponomareva, I. N. (2020, January). Qualitative analysis of quail meat of various genotypes. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 422, No. 1, p. 012063). IOP Publishing.

Gülüm, L., Akoğlu, İ. T., & Akoğlu, A. (2019). Bıldırcın nugget üretimi ve depolama satbilitesinin belirlenmesi- *GIDA: The Journal of Food*, 44(6), 954-968.

Hao, M., Yang, S., Han, S., & Che, H. (2022). The amino acids differences in epitopes may promote the different allergenicity of ovomucoid derived from hen eggs and quail eggs. *Food Science and Human Wellness*, 12(3), 861–870. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.09.028

Kokoszyński, D., Żochowska-Kujawska, J., Kotowicz, M., Wegner, M., Arpášová, H., Włodarczyk, K., ... & Cebulska, A. (2024). Carcass characteristics, physicochemical traits, texture and microstructure of young and spent quails meat. *Poultry Science*, 103(7), 103763.

Kubad, E. (2023). Bıldırcınlarda nar kabuğu ekstraktı ile prebiyotiğin birlikte kullanılmasının besi performansı ve bazı kan parametreleri üzerine etkileri. Doktora Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*.

Kudre, T. G., Bejjanki, S. K., Kanwate, B. W., & Sakhare, P. Z. (2018). Comparative study on physicochemical and functional properties of egg powders from Japanese quail and white Leghorn chicken. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 957–972. https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1466320

Lianto, P., Han, S., Li, X., Ogutu, F. O., Zhang, Y., Fan, Z., & Che, H. (2018). Quail egg homogenate alleviates food allergy induced eosinophilic esophagitis like disease through modulating PAR-2 transduction pathway in peanut sensitized mice. *Scientific Reports*, 8(1), 1049. https://doi.org/10.1038/s41598-018-19309-x

Lukanov, H., & Pavlova, I. (2020). Domestication changes in Japanese quail (*Coturnix japonica*): a review. *World's Poultry Science Journal*, 76(4), 787-801.

Marques, R. H., Gravena, R. A., Silva, J. D. T. D., Roccon, J., Picarelli, J., Hada, F. H., Queiroz, S.A.D. & Moraes, V. M. B. (2011). Effect of supplementation

of diets for quails with vitamins A, D and E on performance of the birds and quality and enrichment of eggs. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40(6), 1222-1232.

Minvielle, F. (2004). The future of Japanese quail for research and production, *World's Poultry Science Journal*, 60:4, 500-507, DOI: 10.1079/WPS200433.

Mishra Priti and Shukla Satish, (2014). Quail Farming: An Introduction. *Int. J. Of Life Sciences,* 2(2): 190-193.

Mnisi CM, Oyeagu CE, Akuru EA, Ruzvidzo O and Lewu FB. (2023). Sorghum, millet and cassava as alternative dietary energy sources for sustainable quail production – A review. *Front. Anim. Sc*i. 4:1066388. doi: 10.3389/fanim.2023.1066388.

Moreira, C. A., Zotarelli, M. F., & Lima, M. de. (2022). Characterization of quail egg powders obtained by liquid egg drying and foam-mat drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(4), 1810–1820. https://doi.org/10.1002/jsfa.12406

Nunes, M. A., Moreira, C. A., Soares, L. S., Zotarelli, M. F., & Lima, M. de. (2021). Stability evaluation of quail egg powder obtained by freeze-drying. *Research Society and Development,* 10(14). https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.20930

Quaresma, M. A. G., Antunes, I. C., Ferreira, B. G., Parada, A., Elias, A., Barros, M., Santos, C., Partidário, A., Mourato, M. & Roseiro, L. C. (2022). The composition of the lipid, protein and mineral fractions of quail breast meat obtained from wild and farmed specimens of Common quail (*Coturnix coturnix*) and farmed Japanese quail (*Coturnix japonica domestica*). *Poultry Science*, 101(1), 101505.

Sigolo, S., Khazaei, R., Seidavi, A., Gallo, A. and Prandini, A. (2019). Effects of supra-nutritional levels of vitamin E and vitamin C on growth performance and egg production traits of Japanese quails, *Italian Journal of Animal Science*, 18:1, 480-487, DOI: 10.1080/1828051X.2018.1539628.

Sonji, G. M., & Sonji, N. M. (2026). Systematic review: Quail egg powder: Nutraceutical, therapeutic, pharmaceutical, and sustainability potential. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, 19(1), 3-40.

Tokuşoğlu, Ö. (2006). The quality properties and saturated and unsaturated fatty acid profiles of quail egg: the alterations of fatty acids with process effects. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 57(7-8), 537-545.

Tolik, D., Poawska, E., Charuta, A., Nowaczewski, S., & Cooper, R. (2014). Characteristics of egg parts, chemical composition and nutritive value of Japanese quail eggs–a review. *Folia Biologica* (Kraków), 62(4), 287-292.

Tunsaringkarn, T., Tungjaroenchai, and W. Siriwong, W. (2013). Nutrient Benefits of Quail (Coturnix Coturnix Japonica) Eggs. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3 (5), 1-8.

Vargas-Sánchez, R. D., Ibarra-Arias, F. J., Torres-Martínez, B. M., Sánchez-Escalante, A., and Torrescano-Urrutia, G. R. (2019). Use of natural ingredients in Japanese quail diet and their effect on carcass and meat quality-A review. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 32 (11), p 1641-1656. https://doi.org/10.5713/ajas.18.0800.

Velioğlu, S. (2019). Liyofilize bıldırcın yumurtası, yumurta beyazı ve yumurta sarısının köpük oluşturma ve emülsifikasyon özelliklerinin belirlenmesi. *GIDA*, 44(5), 919-931.

BÖLÜM 22

Yem Kalitesi, Hijyeni ve Olası Tehlikeler

Ezgi Şenses[1]
Berkay Erdoğmuş[2]
Arda Çelik[3]

[1] Arş. Gör., Kurum Bilgisi: Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Bursa, Türkiye, ORCID: 0000-0003-3707-6415
[2] Arş. Gör., Kurum Bilgisi: Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Bursa, Türkiye, ORCID: 0009-0006-1661-4332
[3] Doç. Dr., Kurum Bilgisi: Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Bursa, Türkiye, ORCID: 0000-0002-0955-4371

1. Giriş

Yemler, hayvansal üretimde hayvanların yaşamını sürdürmesi, büyüme ve gelişmenin sağlanması, sağlığın korunması ve üretim performansının desteklenmesi için gerekli besin maddelerinin başlıca kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bir yemin hayvan besleme açısından uygunluğu, besin maddelerini yeterli ve dengeli miktarlarda içermesiyle tek başına garanti edilemez (Glencross, 2020; Erdaw, 2023). Yemin besin madde içeriğinin yanı sıra fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri ile üretim, depolama, taşıma ve kullanım süreçlerinde maruz kalabileceği tehlikeler de yem kalitesi ve güvenliğinin belirlenmesinde önem taşımaktadır (FAO, 2004; FAO ve IFIF, 2010). Bu nedenle yem kalitesi ve yem güvenliği; hayvan sağlığı ve performansının yanı sıra hayvansal ürünlerin güvenliği ve dolayısıyla tüketici sağlığı açısından da büyük önem taşımaktadır (FAO/WHO, 2007; FAO/WHO, 2019).

Yem hammaddeleri ve karma yemler; üretim, işleme, depolama, taşıma ve hayvana ulaştırılma aşamalarında biyolojik, kimyasal ve fiziksel tehlikelere maruz kalabilmekte ve bu tehlikeler yem güvenliği açısından potansiyel risk oluşturabilmektedir (van der Fels-Klerx ve ark., 2024; Sapkota ve ark., 2007). Bu nedenle yem kalitesinin ve güvenliğinin korunmasında hammadde özelliklerinin yanı sıra üretim teknolojisi, hijyen koşulları, depolama süresi ve koşulları, taşıma uygulamaları ve işletme yönetimi de önemli rol oynamaktadır (Huss ve ark., 2018; Olson ve ark., 2023; van der Fels-Klerx ve ark., 2024).

Bu bölümde yem kalitesi ve yem hijyeninin temel unsurları ile yemlerde karşılaşılabilecek başlıca biyolojik, kimyasal ve fiziksel tehlikeler ele alınacaktır. Ayrıca mikotoksinlerin özellikleri ve oksidatif bozulmaya bağlı kalite kayıpları üzerinde durularak yem kalitesi ile yem güvenliği arasındaki ilişki değerlendirilecektir. Bu kapsamda, yem güvenliğinin yönetiminde temel oluşturan tehlikelerin tanımlanması, kaynaklarının belirlenmesi ve potansiyel etkilerinin anlaşılmasına yönelik bilgiler sunulacaktır.

2. Yem Kalitesi

Yem kalitesi, besin madde bileşimi, sindirilebilirlik, fiziksel özellikler, işleme özellikleri ve güvenilirlik gibi çeşitli özelliklerin birlikte değerlendirildiği çok boyutlu bir kavramdır (Coleman ve Moore, 2003; Glencross ve ark., 2020). Bu nedenle yem kalitesi yalnızca belirli bir besin maddesinin miktarı üzerinden değerlendirilmemeli; yemin besin maddelerinin hayvan tarafından kullanılabilirliği, bileşiminin homojenliği, fiziksel özellikleri, depolama stabilitesi ve istenmeyen maddeler açısından güvenilirliği ile birlikte ele alınmalıdır (FAO, 2004).

Yem hammaddelerinin kimyasal bileşimleri önemli ölçüde değişkenlik göstermekte olup, bu değişkenlik; hammaddenin botanik ve genetik özellikleri,

yetiştirme koşulları, hasat dönemi, toprak ve iklim koşulları, coğrafi kökeni, işleme yöntemi ve depolama koşulları gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir (Glencross ve ark., 2020). Nitekim yem üretiminde kullanılan aynı yem hammaddesinin farklı partileri arasında kuru madde, ham protein, yağ, lif, mineral madde ve enerji düzeyleri bakımından farklılıklar gözlenebilmektedir. Bu nedenle yem formülasyonunda yalnızca ortalama besin madde değerlerinin kullanılması, özellikle değişkenliği yüksek hammaddelerde, hedeflenen besin madde düzeylerinden sapma riskini artırabilmektedir (Gizzi ve Givens, 2004; FAO, 2004).

Üretilen yemin besin madde içeriğinin yüksek olması, tek başına yüksek kaliteli bir yem üretildiği anlamına gelmemektedir. Özellikle protein kalitesinin değerlendirilmesinde, protein miktarının yanı sıra amino asit bileşimi ve amino asitlerin sindirilebilirliği önemli ölçütlerdir. Benzer şekilde, bir yem hammaddesindeki toplam fosfor içeriği, hayvan tarafından kullanılabilecek fosfor miktarını doğrudan yansıtmayabilmektedir. Fosforun besinsel değerinin değerlendirilmesinde fosforun sindirilebilirliği ve biyoyararlanımının dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle yem kalitesinin değerlendirilmesinde toplam besin madde düzeyleriyle beraber sindirilebilirlik, besin maddelerinin kullanılabilirliği ve biyoyararlanım gibi özelliklerin de dikkate alınması gerekmektedir (Glencross ve ark., 2020; Lee ve ark., 2023).

2.1. Fiziksel Yem Kalitesi

Yemin fiziksel özellikleri; yem tüketimi, besin maddelerinin yem içerisinde homojen dağılımı ve üretim, taşıma ve depolama süreçlerinde yem bütünlüğünün korunması açısından önem taşımaktadır. Partikül büyüklüğü ve dağılımı, nem içeriği, yoğunluk, akışkanlık, pelet dayanıklılığı, ince partikül (fines) oranı ve karışım homojenliği, fiziksel yem kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılan başlıca özelliklerdir (Thomas ve van der Poel, 2020).

Yem partikül büyüklüğü ve fiziksel formu, yem tüketimi ve yemden yararlanmayı etkileyen önemli faktörlerdir (Vukmirović ve ark., 2017; Abdollahi ve ark., 2013). Peletlenmiş yemlerde ise pelet dayanıklılığı, üretim, taşıma ve dağıtım sırasında meydana gelebilecek parçalanmanın ve ince partikül oluşumunun kontrolü açısından önem taşımaktadır (Thomas ve van der Poel, 1996; Thomas ve ark., 1997). Mekanik stres sonucunda peletlerin parçalanması, ince partikül oranının artmasına ve yem içerisindeki fiziksel yapının değişmesine neden olabilmektedir. Aşırı miktarda ince partikül oluşumu ise hayvanların yem partiküllerini seçmesine ve tüketilen yemin başlangıçta formüle edilen besin madde bileşiminden farklılaşmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle yeterli pelet dayanıklılığının sağlanması, partikül dağılımının korunması ve hayvanlara daha homojen bir rasyon sunulması açısından önemlidir (Abdollahi ve ark., 2013; Thomas ve van der Poel, 1996).

Yem homojenliği, fiziksel ve besinsel kalitenin önemli göstergelerinden biridir. Özellikle vitaminler, mineraller, amino asitler ve yem katkı maddeleri gibi düşük miktarlarda kullanılan bileşenlerin yem içerisinde homojen şekilde dağılması gerekmektedir. Yetersiz karıştırma, bileşenlerin segregasyonu veya taşıma ve depolama sırasında partiküllerin ayrışması, rasyon içerisindeki besin maddesi konsantrasyonlarında farklılıklara yol açabilmektedir. Bu durum aynı gruptaki hayvanların farklı miktarlarda besin maddesi tüketmesine neden olabilir (FAO, 2010). Bu nedenle karıştırma etkinliğinin değerlendirilmesi ve nihai ürün homojenliğinin sağlanması, yem kalite kontrolünün önemli unsurlarıdır (FAO, 2010).

2.2. Kimyasal Yem Kalitesi

Kimyasal yem kalitesinin değerlendirilmesinde kuru madde, ham protein, ham yağ, ham kül ve lif fraksiyonları gibi temel besin maddelerinin yanı sıra enerji, amino asitler, makro ve iz mineraller ile gerektiğinde nişasta ve şeker gibi bileşenler dikkate alınmaktadır (McDonald ve ark., 2022; Mertens, 2002; NASEM, 2021). Bu analizler, yem hammaddelerinin besin madde bileşimindeki değişkenliğin belirlenmesi ve rasyonların doğru şekilde formüle edilmesi açısından önem taşımaktadır (FAO, 2011).

Kimyasal analizlerin güvenilirliği; numunenin yemi temsil etmesi, uygun numune alma ve hazırlama işlemleri, kullanılan analitik yöntemin uygunluğu ve laboratuvar kalite güvence uygulamalarına bağlıdır (FAO, 2011; AOAC International, 2023). Özellikle yemlerin heterojen yapısı nedeniyle numune alma hataları, doğru gerçekleştirilen analizlerde dahi gerçek yem bileşiminin belirlenmesini engelleyebilmektedir. Bu nedenle kimyasal analizlerin yanı sıra temsili numune alma ve doğrulanmış analitik yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Nitekim güncel çalışmalar, numune alma kaynaklı hataların yem analiz sonuçlarında önemli değişkenlik oluşturabildiğini göstermektedir (Thiex & Ramsey, 2023).

Yem hammaddelerindeki besin madde bileşimi değişkenliğinin dikkate alınmaması, rasyonların hedeflenen besin madde düzeylerinden sapmasına neden olabilmektedir. Özellikle protein, amino asit ve mineral içeriklerindeki farklılıklar rasyonun besin madde yoğunluğunu etkileyebilmektedir (Dale ve ark., 1995; Pesti, 2009). Bu nedenle hammaddelerin düzenli olarak analiz edilmesi ve formülasyon değerlerinin gerektiğinde güncellenmesi, yem kalitesinin ve rasyon doğruluğunun korunması açısından önemlidir (FAO, 2004).

2.3. Besinsel Kalite ve Besin Maddelerinin Kullanılabilirliği

Besinsel yem kalitesi, yemde bulunan besin maddelerinin miktarının yanı sıra bunların sindirilebilirliği, kullanılabilirliği ve biyoyararlanımını da kapsamaktadır. Bir besin maddesinin yemde bulunması, hayvan tarafından tamamen sindirileceği veya metabolik olarak kullanılabileceği anlamına

gelmemektedir (McDonald ve ark., 2022; Stein ve ark., 2007). Özellikle protein ve amino asitlerin değerlendirilmesinde toplam içerikten ziyade sindirilebilir amino asit düzeylerinin dikkate alınması, rasyonların daha doğru formüle edilmesini sağlamaktadır (Stein ve ark., 2007; Ravindran, 2020).

Protein kalitesinde ham protein miktarının yanı sıra esansiyel amino asitlerin düzeyi, dengesi ve sindirilebilirliği önemlidir. Kanatlılarda lizin, metiyonin, treonin, triptofan, valin, izolösin ve lösin gibi amino asitlerin yeterli ve dengeli düzeylerde bulunması büyüme ve protein sentezi açısından önem taşımaktadır (Parsons, 1996; Wu, 2014; Ravindran, 2020). Benzer şekilde, minerallerin toplam konsantrasyonu hayvanın gerçek mineral kullanımını tek başına göstermemekte; mineralin kimyasal formu, çözünürlüğü, diğer bileşenlerle etkileşimi ve biyoyararlanımı da dikkate alınmalıdır. Özellikle fitat gibi antinutrisyonel bileşikler mineral kullanımını sınırlandırabilmektedir (Świątkiewicz ve ark., 2014).

Bu nedenle yem kalitesi değerlendirilirken toplam besin maddesi → sindirilebilir besin maddesi → kullanılabilir besin maddesi yaklaşımı benimsenmeli; rasyon formülasyonunda yalnızca toplam besin madde düzeyleri değil, bunların hayvan tarafından ne ölçüde değerlendirilebildiği de dikkate alınmalıdır (FAO, 2004; McDonald ve ark., 2022).

2.4. Yem Kalitesinde Değişkenlik

Yem hammaddelerinin besin madde bileşimi; genetik özellikler, yetiştirme ve iklim koşulları, toprak özellikleri, hasat zamanı, üretim bölgesi ve depolama gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (FAO, 2004; McDonald ve ark., 2022). Aynı hammaddenin farklı kaynaklardan veya dönemlerden temin edilmesi, ham protein, yağ, lif, mineral ve diğer besin maddelerinin düzeylerinde farklılıklara yol açabilmektedir. Bu değişkenliğin dikkate alınmaması, rasyonların hedeflenen besin madde düzeylerinden sapmasına ve hayvanların gereksinimlerinin altında veya üzerinde besin maddesi tüketmesine neden olabilmektedir (Pesti, 2009).

Bu nedenle yem fabrikalarında hammadde kabulü sırasında uygun kalite kontrol prosedürlerinin uygulanması ve risk durumuna göre kimyasal, mikrobiyolojik ve toksikolojik analizlerin gerçekleştirilmesi önemlidir. Analiz sonuçlarının formülasyonda kullanılması, hammaddelerin gerçek bileşiminin dikkate alınmasına ve rasyonların hedeflenen besin madde düzeylerine daha doğru şekilde uyarlanmasına katkı sağlamaktadır (FAO, 2011; ISO 22000, 2018).

2.5. Yem Kalitesi ile Yem Güvenliği Arasındaki İlişki

Yem kalitesi ve yem güvenliği; hayvan sağlığı, performansı ve hayvansal ürünlerin güvenilirliği açısından birbirini tamamlayan kavramlardır. Besin madde bileşimi yeterli olan bir yem, mikotoksinler, patojen mikroorganizmalar, ağır metaller veya diğer biyolojik, kimyasal ve fiziksel tehlikeler açısından risk

taşıyorsa güvenli kabul edilemez. Benzer şekilde, güvenli bir yem de hayvanın besin madde gereksinimlerini karşılamıyorsa besinsel açıdan yeterli değildir (FAO, 2010). Bu nedenle yem kalite ve güvenliği, hammadde temininden üretim, depolama, taşıma ve hayvana sunuma kadar tüm üretim zinciri boyunca birlikte ele alınmalı ve olası tehlikeler bu aşamaların tamamında kontrol edilmelidir (FAO, 2008).

3. Yem Hijyeni

Yem hijyeni, yemlerin üretim, işleme, depolama, taşıma ve hayvanlara sunulması sırasında biyolojik, kimyasal ve fiziksel tehlikelerin önlenmesi ve kontrol edilmesine yönelik uygulamaları kapsamaktadır. Temel amaç, yem zincirinin farklı aşamalarında ortaya çıkabilecek tehlikeleri kontrol ederek hayvan sağlığı ve performansı ile hayvansal gıdaların güvenliğini sağlamaktır (FAO, 2010; Codex Alimentarius Commission, 2024). Bu nedenle yem hijyeni yalnızca yem fabrikasındaki temizlik uygulamalarıyla sınırlı olmayıp, hammadde temininden hayvana sunuma kadar tüm yem zincirini kapsamaktadır.

Yem hijyeninin sağlanmasında hammadde hijyeni, üretim tesisi ve ekipman temizliği, personel hijyeni, çapraz bulaşmanın önlenmesi ile depolama ve taşıma koşullarının kontrolü önem taşımaktadır. Kodeks Alimentarius yaklaşımı, yem ve yem hammaddelerinin tedarik, işleme, depolama ve dağıtım aşamalarında kontaminasyonun önlenmesini ve iyi üretim uygulamalarının uygulanmasını temel almaktadır (FAO, 2010; Codex Alimentarius Commission, 2024).

3.1. Yem Hammaddelerinde Hijyen

Yem hammaddeleri, yem güvenliği açısından üretim zincirinin ilk önemli kontrol noktalarındandır. Tahıllar, yağlı tohumlar, protein kaynakları ve hayvansal yan ürünler; üretim, hasat, işleme, depolama ve taşıma sırasında biyolojik ve kimyasal tehlikelere maruz kalabilmektedir. Özellikle yüksek nem ve uygun olmayan depolama koşulları, küf gelişimi ve mikotoksin oluşumu açısından risk oluşturmaktadır (EFSA, 2026; Pleadin ve ark., 2015).

Hammadde kabulünde tedarikçi ve kaynak güvenilirliği ile fiziksel görünüm, koku, nem ve yabancı madde varlığı değerlendirilmelidir. Risk durumuna göre mikotoksinler, mikrobiyolojik kontaminantlar, ağır metaller ve diğer istenmeyen maddeler açısından numune alma ve analizler gerçekleştirilmelidir. Kodeks Alimentarius yaklaşımı da yem hammaddelerinin güvenilir kaynaklardan temin edilmesini ve risk temelli protokollerle kontrol edilmesini önermektedir (Codex Alimentarius Commission, 2024; FAO, 2011).

3.2. Yem Fabrikalarında Hijyen

Yem fabrikalarında hijyen uygulamaları; hammaddelerin kabulünden üretim, depolama ve nihai ürünün sevkine kadar tüm üretim hattını kapsamalıdır. Tesis ve ekipmanların hijyenik tasarımı, temizlik ve bakım programları, haşere ve toz

kontrolü, personel hijyeni ve atık yönetimi bu sistemin temel unsurlarıdır (FAO, 2010; Codex Alimentarius Commission, 2024). Özellikle Salmonella gibi patojenlerin kontrolünde, kontaminasyonun tesise girişinin önlenmesi, üretim ortamında mikroorganizmaların çoğalmasını kolaylaştıran koşulların azaltılması ve üretim hattının düzenli olarak izlenmesi önem taşımaktadır (Parker ve ark., 2022).

Üretim ekipmanlarında yem kalıntıları ve toz birikimi, mikroorganizmaların kalıcılığını ve yayılımını kolaylaştırabilmektedir. Bu nedenle elevatör, konveyör, mikser, peletleme ve soğutma sistemleri gibi ekipmanlarda düzenli temizlik ve bakım uygulanmalı; özellikle temizlenmesi zor bölgelerde organik materyal birikimi önlenmelidir (FAO, 2010; Codex Alimentarius Commission, 2024). Temizlik programları, yalnızca görünür kirlerin uzaklaştırılmasını değil, mikrobiyolojik kontaminasyonun ve yeniden bulaşmanın önlenmesini hedeflemelidir.

Tesis tasarımında temiz ve kirli alanların ayrılması, hammadde ve ürün akışlarının kontrolü, personel ve araç hareketlerinin düzenlenmesi, toz oluşumunun azaltılması ve haşere girişinin önlenmesi çapraz bulaşma riskinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024). Bu kapsamda havalandırma ve toz kontrol sistemlerinin uygun şekilde tasarlanması ve bakımlarının yapılması da önemlidir.

Temizlik ve dezenfeksiyon uygulamaları yem güvenliğini riske atmayacak şekilde yürütülmelidir. Temizlik maddelerinin yemle temas etmesi önlenmeli ve yaş temizlik sonrasında yemle temas eden ekipmanların yeterince kurutulması sağlanmalıdır (FAO, 2010; Codex Alimentarius Commission, 2024). Böylece üretim hattında kontaminasyon ve çapraz bulaşma riski en aza indirilebilir.

3.3. Personel ve Ekipman Hijyeni

Yem üretiminde çalışan personel, kontaminasyonun işletme içerisinde taşınmasında rol oynayabileceğinden, kişisel hijyen ve yem güvenliği konusunda eğitilmeli ve üretim alanlarında uygun koruyucu kıyafet kullanmalıdır (Codex Alimentarius Commission, 2024).

Ekipman hijyeni, özellikle mikrobiyolojik kontaminasyon ve çapraz bulaşmanın kontrolü açısından önemlidir. Ekipmanlarda biriken yem kalıntıları ve toz, mikroorganizmaların kalıcılığını ve sonraki üretimlere taşınmasını kolaylaştırabilmektedir (Parker ve ark., 2022). Bu nedenle ekipmanların temizlik ve bakım sıklığı; üretim programı, ürünlerin risk özellikleri ve çapraz bulaşma olasılığı dikkate alınarak belirlenmelidir (Codex Alimentarius Commission, 2024).

3.4. Çapraz Bulaşma

Çapraz bulaşma, bir yem veya yem hammaddesinde bulunan biyolojik, kimyasal ya da fiziksel bir tehlikenin başka bir yem veya hammaddeye taşınmasıdır. Yem fabrikalarında özellikle patojen mikroorganizmalar, veteriner ilaçları ve bazı yem katkı maddelerinin üretim hattı aracılığıyla sonraki ürünlere taşınması önemli bir risk oluşturmaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024; Parker ve ark., 2022).

Çapraz bulaşma; ortak ekipman kullanımı, yem kalıntıları ve toz birikimi, yetersiz temizlik, taşıma sistemleri ve personel hareketleri gibi yollarla ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle üretim sıralamasının riskler dikkate alınarak planlanması, ekipmanların uygun şekilde temizlenmesi ve kritik noktaların kontrol edilmesi önemlidir. Özellikle veteriner ilacı veya belirli yem katkı maddeleri içeren yemlerde üretim sıralaması, flushing (hat temizleme) ve fiziksel temizlik gibi uygulamalar çapraz bulaşmanın kontrolünde kullanılmalıdır (Codex Alimentarius Commission, 2024).

3.5. Mikrobiyolojik Hijyen

Yemlerde başta Salmonella spp. olmak üzere çeşitli patojen mikroorganizmalar mikrobiyolojik tehlike oluşturabilmektedir. Özellikle kontamine hammaddeler, yem fabrikası ortamı ve yetersiz hijyen koşulları bu riskin ortaya çıkmasında rol oynamaktadır (FAO, 2010; Parker ve ark., 2022).

Mikrobiyolojik kontaminasyonun kontrolünde hammadde seçimi, tesis hijyeni, uygun ısıl işlem, yeniden kontaminasyonun önlenmesi ve depolama koşulları birlikte değerlendirilmelidir. Isıl işlem sonrasında yeniden bulaşmanın önlenmesi ve üretim hattında temiz ve kirli alanların ayrılması özellikle önemlidir (Codex Alimentarius Commission, 2024; FAO, 2010).

Mikrobiyolojik risklerin kontrolünde yalnızca nihai ürün analizine güvenilmemeli; hammadde kontrolü, proses kontrolü ve çevresel izleme gibi önleyici uygulamalar da kullanılmalıdır. Bu yaklaşım, üretim hattındaki potansiyel kontaminasyon kaynaklarının daha etkin biçimde belirlenmesine ve kontrol edilmesine katkı sağlamaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024; FAO, 2010).

3.6. Depolama Sırasında Hijyen

Yemlerin depolanması sırasında nem, sıcaklık, depolama süresi ve haşereler yem hijyeni ve kalitesini etkileyen başlıca faktörlerdir. Özellikle yüksek nem ve uygun olmayan sıcaklık koşulları fungal gelişimi ve mikotoksin oluşumu açısından risk oluşturmaktadır. Bu nedenle kuru yem ve yem hammaddelerinin kuru tutulması, bozulma ve mikrobiyal gelişmenin önlenmesi açısından önemlidir (Tolosa ve ark., 2021).

Depolama alanları temiz, kuru ve yeterli havalandırmaya sahip olmalı; yemlerin zeminle doğrudan teması önlenmeli ve haşere kontrolü sağlanmalıdır. Ayrıca stokların uygun şekilde yönetilmesi ve depolama süresinin kontrol edilmesi, kalite kayıplarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024). Depolama süresince sıcaklık ve nem koşullarının izlenmesi, başlangıçta güvenli olan yemlerin zaman içerisinde mikrobiyolojik veya kimyasal açıdan riskli hale gelmesinin önlenmesi açısından önemlidir. Bu nedenle yem hijyeni, üretim sonrasında depolama sürecinde de devam ettirilmesi gereken bir kontrol süreci olarak değerlendirilmelidir.

3.7. Taşıma ve Çiftlik Düzeyinde Yem Hijyeni

Yemlerin taşınması sırasında araçların temizliği, yükleme ve boşaltma işlemleri ile ürünün nem, sıcaklık ve çevresel koşullardan korunması yem güvenliği açısından önemlidir. Daha önce farklı amaçlarla kullanılmış araçlarda yeterli temizlik yapılmadan yem taşınması, çapraz bulaşma riskini artırmaktadır. Çiftlik düzeyinde yem depoları, silolar, yemlikler ve taşıma ekipmanları düzenli olarak temizlenmeli; yemlerin kemirgen, kuş, böcek ve diğer zararlılarla teması önlenmelidir. Su sızıntısı, yoğuşma, yüksek nem ve sıcaklık artışı gibi koşullar kontrol edilmeli; yem kalıntılarının birikmesini ve eski yemden yeni yeme bulaşmayı önlemek amacıyla depolama alanları ve ekipmanlar düzenli olarak temizlenmelidir (Codex Alimentarius Commission, 2024).

3.8. İyi Hijyen Uygulamaları ve İyi Üretim Uygulamaları

Yem hijyeninin sürdürülebilir şekilde yönetilebilmesi için işletmelerde yazılı, uygulanabilir ve izlenebilir prosedürlerin oluşturulması gerekmektedir. İyi Hijyen Uygulamaları (GHP); temizlik, personel hijyeni, haşere kontrolü ve kontaminasyonun önlenmesine yönelik temel koşulları kapsarken, İyi Üretim Uygulamaları (GMP) üretim süreçlerinin belirlenen kalite ve güvenlik kriterlerine uygun yürütülmesini amaçlamaktadır. GHP ve GMP, HACCP (Tehlike Analizi ve Kritik Kontrol Noktaları) sisteminin uygulanması için gerekli temel altyapıyı oluşturur. Bu nedenle yem güvenliği yönetiminde ön koşul programlarının oluşturulması ve uygulanması, ardından HACCP yaklaşımının tehlikelerin kontrolüne yönelik olarak sisteme entegre edilmesi gerekmektedir (FAO, 2010; Codex Alimentarius Commission, 2024).

4. Yemlerde Biyolojik Tehlikeler

Yemlerde biyolojik tehlikeler; bakteri, virüs, parazit, küf ve diğer patojen mikroorganizmaları kapsamakta ve hayvan sağlığı ile performansını, dolaylı olarak da insan sağlığını etkilemektedir. Bu tehlikeler hammadde, üretim, depolama ve taşıma gibi yem zincirinin farklı aşamalarında ortaya çıkabilmekte ve özellikle mikrobiyolojik kontaminasyon ile çapraz bulaşma yoluyla yayılabilmektedir (Olson ve ark., 2023).

Yem güvenliği açısından mikroorganizmaların kendisi biyolojik, ürettikleri mikotoksinler ise kimyasal tehlike olarak değerlendirilir. Örneğin küfler biyolojik tehlike oluştururken, aflatoksin, deoksinivalenol (DON), zearalenon ve fumonisinler gibi küf metabolitleri kimyasal tehlike niteliğindedir. Bu ayrım, tehlike analizi ve HACCP uygulamalarının doğru yapılandırılması açısından oldukça önemlidir (Tolosa ve ark., 2021).

4.1. Bakteriyel Kontaminasyon

Bakteriler, yem güvenliği açısından önemli biyolojik tehlikeler arasında yer almakta ve yem hammaddelerinin üretiminden depolama, taşıma ve yemlik aşamasına kadar farklı noktalarda kontaminasyona neden olmaktadır. Özellikle Salmonella spp. yem hammaddeleri ve nihai yemlerde önemli bir mikrobiyolojik tehlike olarak değerlendirilmektedir (Olson ve ark., 2023; Sargeant ve ark., 2021). Isıl işlem uygulanmış yemlerde işlem sonrasında meydana gelebilecek yeniden kontaminasyon da yem güvenliği açısından önem taşımaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024; Parker ve ark., 2022).

Yem kaynaklı bakteriyel tehlikeler, hayvan sağlığının yanı sıra zoonotik etkenlerin hayvanlara ve hayvansal gıda zincirine taşınması açısından da önemlidir. Bu nedenle hammadde kontrolü, uygun ısıl işlem, çevresel hijyen ve yeniden kontaminasyonun önlenmesi, bakteriyel risklerin kontrolünde temel uygulamalardır (Codex Alimentarius Commission, 2024; Sargeant ve ark., 2021).

4.1.1. *Salmonella* spp.

Salmonella spp., yemlerdeki önemli biyolojik tehlikelerden biridir. Kontaminasyon; yem hammaddeleri, üretim ortamı ve ekipmanlar aracılığıyla ortaya çıkabilmekte ve özellikle hayvansal kökenli hammaddelerde daha yüksek risk gösterebilmektedir (Sargeant ve ark., 2021). Isıl işlem bakteriyel yükün azaltılmasında etkili olmakla birlikte, özellikle soğutma ve işlem sonrası aşamalarda yeniden kontaminasyon meydana gelebilmektedir (Parker ve ark., 2022).

Salmonella kontrolünde hammadde tedarikinin ve kabulünün risk temelli yürütülmesi, uygun ısıl işlem, üretim sonrası yeniden bulaşmanın önlenmesi, çevresel hijyen ve düzenli mikrobiyolojik izlemenin birlikte uygulanması gerekmektedir. Yalnızca nihai ürün analizine dayalı kontrol yerine, üretim zincirinin farklı aşamalarında proses ve çevresel izlemenin yapılması daha kapsamlı bir kontrol yaklaşımı sağlamaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024).

4.1.2. *Escherichia coli*

Escherichia coli (E. coli), hayvanların gastrointestinal sisteminde doğal olarak bulunabilen bir bakteri olup, bazı patojenik suşları hayvan ve insan sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Bu nedenle yem güvenliği açısından E. coli

değerlendirilirken suşların patojenik özellikleri, kontaminasyon kaynağı ve hedef hayvan türü dikkate alınmalıdır (Olson ve ark., 2023).

Yemlerde E. coli varlığı genellikle fekal bulaşma, yetersiz hijyen, kontamine materyaller ve üretim veya depolama sırasında meydana gelen bulaşma ile ilişkilidir. E. coli fekal kontaminasyonun değerlendirilmesinde mikrobiyolojik gösterge olarak kullanılabilmekle birlikte, varlığı tek başına patojenik bir suşun veya hastalık riskinin göstergesi değildir (Edberg ve ark., 2012). Bu nedenle kontrolünde hammadde kalitesi, personel ve ekipman hijyeni ile çevresel koşullar birlikte değerlendirilmelidir (Olson ve ark., 2023).

4.1.3. *Clostridium* spp.

Clostridium türleri, spor oluşturabilmeleri nedeniyle yem hijyeni açısından önem taşıyan bakteriler arasındadır. Özellikle Clostridium perfringens ve belirli koşullarda Clostridium botulinum, hayvan sağlığı açısından dikkate alınması gereken biyolojik tehlikelerdir. Sporların çevresel koşullara dayanıklı olması, bu bakterilerin yem ve üretim ortamlarında kalıcılığını artırmaktadır (Olson ve ark., 2023).

4.2. Küfler ve Mayalar

Küf ve mayalar, özellikle yüksek nem, uygun olmayan sıcaklık, yetersiz havalandırma ve uzun süreli depolama koşullarında yem hammaddelerinde gelişebilen mikroorganizmalardır. Tahıllar, yağlı tohumlar ve bunların yan ürünleri, depolama koşullarına bağlı olarak küf gelişimi açısından risk taşıyan yem materyalleridir. Küf ve maya gelişimi, yemlerde fiziksel ve duyusal değişikliklere ve bazı durumlarda besin maddesi kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenle nem, sıcaklık, su aktivitesi ve depolama süresinin kontrolü yem kalitesinin korunmasında önemlidir (Bryden, 2012; Tolosa ve ark., 2021).

Küf kontaminasyonunun yem güvenliği açısından önemli sonuçlarından biri, bazı küflerin uygun koşullarda mikotoksin üretebilmesidir. Bununla birlikte, küf kontaminasyonu ile mikotoksin kontaminasyonu birbirinden ayrı değerlendirilmelidir. Küflerin yem materyalinde bulunması mikrobiyolojik bir kalite ve güvenlik sorunu oluştururken, bunların ürettiği mikotoksinler yemlerde kimyasal tehlike oluşturan toksik metabolitlerdir. Ayrıca, canlı küf bulunmaması daha önce oluşmuş mikotoksinlerin de bulunmadığı anlamına gelmemektedir. Bu nedenle uygun depolama koşullarının sağlanması ve küf gelişiminin önlenmesi, hem mikrobiyolojik kalitenin korunması hem de mikotoksin oluşumu riskinin azaltılması açısından önem taşımaktadır (EFSA, 2026; Tolosa ve ark., 2021).

Mayalar ise genellikle doğrudan patojenik bir risk oluşturmamakla birlikte, yemlerin mikrobiyolojik kalitesi ve depolama koşullarının değerlendirilmesinde dikkate alınmaktadır. Özellikle yüksek nem ve uygun olmayan depolama koşulları, maya ve küf gelişimini kolaylaştırarak yemlerde bozulma ve kalite kayıplarına katkıda bulunabilir. Bu nedenle değerlendirmede yalnızca

mikroorganizmaların varlığı değil, kontaminasyon düzeyi, yem materyalinin özellikleri ve depolama koşulları birlikte ele alınmalıdır (Bryden, 2012).

4.3. Biyolojik Tehlikelerin Yem Zincirine Giriş Noktaları

Biyolojik tehlikeler yem zincirinin farklı aşamalarında ortaya çıkmaktadır. Bitkisel yem hammaddelerinde kontaminasyon tarlada, hasat sırasında veya hasat sonrasında meydana gelebilirken, hayvansal kaynaklı hammaddelerde başlangıçtaki mikrobiyolojik yük önemli bir risk oluşturabilmektedir. Yem fabrikalarında ise ekipman, personel, toz ve üretim ortamı yoluyla çapraz bulaşma meydana gelebilmektedir (Sargeant ve ark., 2021). Bu nedenle biyolojik tehlikelerin kontrolü yalnızca son ürün analizlerine dayandırılmamalıdır. Hammadde tedarikinden başlayarak üretim, depolama, taşıma ve çiftlikte yem kullanımına kadar tüm aşamalarda önleyici ve risk temelli kontrol uygulamalarının yürütülmesi gerekmektedir. Kodeks Alimentarius yaklaşımı, yem zincirinin farklı aşamalarında biyolojik, kimyasal ve fiziksel tehlikelerin dikkate alınmasını ve uygun iyi uygulamalarla kontrol edilmesini öngörmektedir (Codex Alimentarius Commission, 2024).

4.4. Biyolojik Tehlikelerin Kontrolü

Yemlerde biyolojik tehlikelerin kontrolünde temel amaç, kontaminasyonun önlenmesi ve mevcut mikrobiyolojik yükün güvenli düzeylere indirilmesidir. Bu kapsamda güvenilir yem hammaddelerinin tedariki, hammadde kabulünde risk temelli kontrollerin yapılması, uygun üretim ve ısıl işlem koşullarının uygulanması, üretim sonrası yeniden kontaminasyonun önlenmesi, ekipman ve üretim alanlarının temizliği, haşere kontrolü, uygun depolama ve taşıma koşullarının sağlanması, mikrobiyolojik izleme ve çapraz bulaşmanın önlenmesi birlikte ele alınmalıdır. Bu uygulamaların İyi Hijyen Uygulamaları (GHP), İyi Üretim Uygulamaları (GMP) ve gerektiğinde HACCP temelli risk yönetimiyle desteklenmesi yem güvenliği açısından önem taşımaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024; FAO & IFIF, 2010).

Mikrobiyolojik kontaminasyonun yem içerisinde homojen dağılmayabileceği dikkate alındığında, temsil edici numune alma büyük önem taşımaktadır. Uygun olmayan numune alma, laboratuvar analizleri doğru gerçekleştirilse dahi gerçek kontaminasyon düzeyinin yanlış değerlendirilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle mikrobiyolojik analizlerin güvenilirliği; numune alma, numunenin taşınması ve muhafazası, analiz yönteminin uygunluğu, laboratuvar kalite kontrolü ve sonuçların yorumlanması gibi aşamaların birlikte değerlendirilmesine bağlıdır (FAO & IFIF, 2010; Sargeant ve ark., 2021).

5. Yemlerde Mikotoksinler

Mikotoksinler, başta Aspergillus, Fusarium ve Penicillium olmak üzere çeşitli filamentöz küfler tarafından üretilen ve hayvan sağlığı ile performansını olumsuz etkileyebilen toksik ikincil metabolitlerdir. Yem hammaddelerinde mikotoksin

oluşumu; bitkinin gelişme dönemi, hasat koşulları, sıcaklık ve nem, zararlıların neden olduğu hasarlar ile hasat sonrası depolama koşullarından etkilenmektedir. Bu nedenle mikotoksinler yalnızca depolama sırasında ortaya çıkan bir sorun olarak değerlendirilmemeli; tarla koşullarından başlayarak hasat, işleme ve depolamaya kadar tüm üretim zinciri boyunca ele alınmalıdır (Bryden, 2012; Gruber-Dorninger ve ark., 2019; Tolosa ve ark., 2021). Güncel değerlendirmeler de sıcaklık ve nemin fungal gelişim ve mikotoksin oluşumunda önemli rol oynadığını göstermektedir (EFSA, 2026).

Mikotoksinlerin önemli bir özelliği, onları üreten küflerin yem içerisinde bulunmasının zorunlu olmamasıdır. Küf gelişimi sırasında oluşan mikotoksinler, küf gelişimi daha sonra ortadan kalksa dahi yem hammaddesinde kalabilmektedir. Bu nedenle yalnızca görünür küf gelişiminin değerlendirilmesi, mikotoksin riskinin belirlenmesi için yeterli değildir. Ayrıca mikotoksinlerin yem materyali içerisinde homojen dağılmayabilmesi, güvenilir risk değerlendirmesi için uygun numune alma ve analitik yöntemlerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır (FAO, 2011; Codex Alimentarius Commission, 2017).

Mikotoksinler yem güvenliği kapsamında kimyasal tehlikeler olarak değerlendirilmelidir. Küf organizmasının kendisi biyolojik bir tehlike oluşturabilirken, küf tarafından üretilen mikotoksinler kimyasal tehlike niteliğindedir. Bu ayrım, HACCP temelli tehlike analizinde tehlikenin doğru tanımlanması ve uygun kontrol önlemlerinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024; EFSA, 2026).

5.1. Mikotoksin Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Mikotoksin oluşumu tek bir faktöre bağlı olmayıp, çevresel ve teknolojik koşulların birlikte etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Özellikle yüksek nem ve su aktivitesi, uygun sıcaklık, oksijen varlığı, uzun depolama süresi ile mekanik veya böcek kaynaklı tane hasarları küf gelişimini ve buna bağlı mikotoksin oluşumunu artırmaktadır. Bununla birlikte farklı küf türlerinin gelişme ve toksin üretme koşulları birbirinden farklı olduğundan, tüm mikotoksinler için tek bir sıcaklık veya nem sınırı belirlemek mümkün değildir (Magan ve ark., 2010; Codex Alimentarius Commission, 2017).

Hasat öncesinde bitkilerin kuraklık, aşırı yağış, böcek zararı ve diğer stres faktörlerine maruz kalması kontaminasyon riskini artırmaktadır. Hasat sırasında tanelerin mekanik olarak zarar görmesi küflerin gelişimini kolaylaştırabilir. Hasat sonrasında ise ürünün yeterince kurutulmaması, yüksek nem altında depolama, sıcaklık değişimleri ve yetersiz havalandırma mikotoksin riskini artırabilmektedir. Bu nedenle mikotoksinlerin kontrolünde GAP, uygun kurutma ve depolama koşulları ile GMP birlikte uygulanmalıdır (Codex Alimentarius Commission, 2017; Channaiah & Maier, 2014; Udoh ve ark., 2000).

5.2. Başlıca Mikotoksinler

Yem hammaddelerinde çok sayıda mikotoksin bulunabilmesine rağmen, hayvan besleme ve yem güvenliği açısından en fazla önem taşıyanlar arasında aflatoksinler, trikotesenler [özellikle deoksinivalenol (DON) ve T-2/HT-2 toksinleri], zearalenon (ZEN), fumonisinler ve okratoksin-A (OTA) yer almaktadır. Bu mikotoksinler farklı fungal türler tarafından üretilmekte ve özellikle tahıllar ile tahıl yan ürünleri gibi yem hammaddelerinde yaygın olarak bulunabilmektedir (Tolosa ve ark., 2021; EFSA, 2026).

Mikotoksin riskinin değerlendirilmesinde yalnızca tek bir toksinin varlığı değil, aynı yem materyalinde birden fazla mikotoksinin birlikte bulunması da dikkate alınmalıdır. Çoklu mikotoksin kontaminasyonunun yem hammaddelerinde yaygın olduğu ve birlikte maruziyetin hayvan sağlığı açısından dikkate alınması gerekmektedir (Tolosa ve ark., 2021; Stoev, 2024). EFSA'nın güncel veri toplama çalışmalarında aflatoksinler, OTA, DON ve modifiye formları, ZEN, fumonisinler, T-2/HT-2 toksinleri, ergot alkaloidleri ve çeşitli diğer mikotoksinler ayrı gruplar halinde izlenmektedir (EFSA, 2026).

5.2.1. Aflatoksinler

Aflatoksinler, başlıca Aspergillus flavus ve A. parasiticus tarafından üretilen ve yem-gıda güvenliği açısından önem taşıyan mikotoksinlerdir. Bunlar arasında aflatoksin B1 (AFB1) en önemli bileşiklerden biridir. Özellikle mısır, yağlı tohumlar ve bunların yan ürünleri aflatoksin kontaminasyonu açısından riskli yem hammaddeleridir (EFSA, 2020; Tolosa ve ark., 2021).

AFB1'in metabolize olarak hayvansal ürünlere taşınabilmesi, mikotoksinlerin yalnızca hayvan sağlığı değil, gıda güvenliği açısından da değerlendirilmesini gerektirir. Süt sığırlarında AFB1 metaboliti olan aflatoksin M1'in (AFM1) süte geçmesi bu durumun önemli bir örneğidir. Kanatlılarda da AFB1 ve metabolitlerinin yumurta ve dokulara taşınabildiği bildirilmiştir. Bu nedenle yem kaynaklı kontaminasyonun değerlendirilmesinde hayvansal ürünlere taşınma (carry-over) da dikkate alınmalıdır (EFSA, 2020).

5.2.2. Deoksinivalenol (DON)

Deoksinivalenol (DON), başlıca Fusarium türleri tarafından üretilen ve özellikle tahıl bazlı yem hammaddelerinde yaygın olarak bulunan bir trikotensendir. Buğday, arpa, mısır ve bunların yan ürünleri DON açısından izlenmesi gereken önemli yem hammaddeleridir (EFSA, 2017; Tolosa ve ark., 2021). DON maruziyeti; yem tüketiminde azalma, canlı ağırlık artışında gerileme ve gastrointestinal sistem fonksiyonlarında bozulma ile ilişkilendirilmektedir. Etkilerin şiddeti; maruziyet düzeyi ve süresi, hayvan türü ve yaşı, beslenme durumu ve diğer mikotoksinlerle eş zamanlı maruziyet gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir (Awad ve ark., 2013; Pierron ve ark., 2016).

DON'un yem güvenliği açısından önemli bir diğer özelliği, serbest DON'un yanı sıra bitkiler tarafından oluşturulan glikozitler ve diğer konjuge formlar gibi

modifiye DON formlarının da yem hammaddelerinde bulunabilmesidir. Bu formlar bazı analitik yöntemlerle doğrudan belirlenemediğinden, yalnızca serbest DON düzeyinin ölçülmesi toplam maruziyetin eksik değerlendirilmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle risk değerlendirmelerinde uygun olduğunda modifiye DON formlarının da dikkate alınması önerilmektedir (EFSA, 2017).

5.2.3. Zearalenon (ZEN)

Zearalenon (ZEN), başlıca Fusarium türleri tarafından üretilen ve östrojen benzeri aktivitesi nedeniyle özellikle üreme sistemi üzerindeki etkileri açısından önem taşıyan bir mikotoksindir. Tahıllar ve tahıl yan ürünlerinde bulunabilen ZEN'in toksikolojik etkileri; hayvan türü, yaş, cinsiyet, maruziyet düzeyi ve süresine bağlı olarak değişmektedir (Zinedine ve ark., 2007; Tolosa ve ark., 2021).

5.2.4. Fumonisinler

Fumonisinler, başlıca Fusarium türleri tarafından üretilen ve özellikle mısır ile mısır yan ürünlerinde bulunan mikotoksinlerdir. Fumonisin B1 (FB1), bu grubun en yaygın ve toksikolojik açıdan en fazla araştırılan üyelerinden biridir (EFSA, 2018; Tolosa ve ark., 2021).

Fumonisinlerin toksik etkileri, başta sfingolipid metabolizmasının bozulması olmak üzere hücresel lipid metabolizmasındaki değişikliklerle ilişkilendirilmektedir. Hayvan türleri arasındaki duyarlılık farklılıkları nedeniyle etkiler değişebilmekte; kanatlılarda yüksek düzeyli maruziyet yem tüketimi ve büyüme performansında gerilemenin yanı sıra gastrointestinal sistem üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Voss ve ark., 2007).

5.2.5. Okratoksin A (OTA)

Okratoksin A (OTA), özellikle Aspergillus ve Penicillium türleri tarafından üretilebilen ve tahıllar ile çeşitli yem hammaddelerinde bulunabilen önemli bir mikotoksindir. OTA, özellikle nefrotoksik etkileri nedeniyle hayvan sağlığı ve yem güvenliği açısından önem taşımaktadır (EFSA, 2020; Tolosa ve ark., 2021). Etkilerin şiddeti; maruziyet düzeyi ve süresi ile hayvanın yaşı, türü ve genel duyarlılığı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir (Stoev, 2010; EFSA, 2020).

5.2.6. T-2 ve HT-2 Toksinleri

T-2 ve HT-2 toksinleri, başta Fusarium türleri tarafından üretilen A tipi trikotesenler arasında yer almaktadır. Özellikle tahıl ve tahıl ürünlerinde bulunabilen bu toksinler, yüksek toksisiteleri nedeniyle yem güvenliği açısından önem taşımaktadır (Li ve ark., 2022; Fodor ve ark., 2024). T-2 ve HT-2 toksinleri ile ilgili değerlendirmelerde yalnızca ana toksinlerin değil, modifiye formların da dikkate alınması giderek önem kazanmaktadır. EFSA'nın güncel kontaminant

izleme yaklaşımında T-2 ve HT-2 toksinleri ile bunların modifiye formları ayrı bir mikotoksin grubu olarak izlenmektedir (EFSA, 2026).

5.3. Mikotoksinlerin Kontrolü

Mikotoksinlerle mücadelede temel yaklaşım, toksin oluştuktan sonra yemden uzaklaştırılmasından ziyade kontaminasyonun oluşmasını ve yayılmasını önlemektir. Bu kapsamda hasat öncesi ve hasat uygulamalarının yanı sıra uygun kurutma, depolama ve yem üretim koşullarının birlikte uygulanması önerilmektedir (Şekil 1; Codex Alimentarius, 2017; Bryden, 2012).

Hasat öncesi ve hasat aşaması	**Hasat sonrası ve depolama aşaması**	**Yem fabrikası ve yemleme aşaması**
• Uygun çeşit ve üretim materyalinin seçilmesi, • Bitki stresinin ve zararlıların kontrol edilmesi, • Uygun hasat zamanının belirlenmesi, • Hasat sırasında tane hasarının en aza indirilmesi, • Küflenmiş, kontamine veya aşırı zarar görmüş materyalin ayrılması.	• Ürünün güvenli nem düzeyine kadar kurutulması, • Depolama alanlarının temiz ve kuru tutulması, • Sıcaklık ve nem koşullarının izlenmesi, • Yeterli havalandırmanın sağlanması, • Böcek ve kemirgen kontrolünün yapılması, • Uzun süreli ve uygun olmayan depolamanın önlenmesi.	• Hammaddelerin risk esaslı kabul ve kontrolünün yapılması, • Gerektiğinde düzenli mikotoksin analizi gerçekleştirilmesi, • Kontamine hammaddelerin ayrılması ve mevzuata uygun şekilde değerlendirilmesi, • Uygun depolama ve üretim koşullarının sağlanması, • Yem formülasyonunda mikotoksin kontaminasyon düzeylerinin dikkate alınması • Gerektiğinde uygun risk azaltma veya detoksifikasyon stratejilerinin değerlendirilmesi.

Şekil 1. Mikotoksin kontrolünde kritik aşamalar

Etkin bir kontrol programı; önleme, izleme, uygun numune alma ve analiz, risk değerlendirmesi ve yem yönetiminin birlikte uygulanmasına dayanmalıdır. Kontamine hammaddelerin kullanımına ilişkin kararlar ise yalnızca analiz

sonuçlarına değil, ilgili mevzuat, hayvan türü, mikotoksinin türü ve maruziyet düzeyi gibi faktörlere göre değerlendirilmelidir (Codex Alimentarius, 2017).

5.4. Mikotoksin Analizleri ve Numune Alma

Mikotoksin kontaminasyonunun yem veya hammadde içerisinde homojen dağılmaması, güvenilir analizlerin önündeki önemli sorunlardan biridir. Küf gelişiminin belirli bölgelerde yoğunlaşabilmesi nedeniyle küçük bir numune tüm partiyi temsil edemeyeceğinden, güvenilir değerlendirme için doğru analitik yöntemin yanı sıra temsil edici numune alma, uygun numune hazırlama ve homojenleştirme kritik öneme sahiptir (FAO, 2011; Codex Alimentarius, 2017).

Mikotoksin analizlerinde hızlı tarama ve doğrulayıcı analitik yöntemler birlikte kullanılabilmektedir. Hızlı testler hammadde kabulü ve rutin kontrollerde çok sayıda numunenin kısa sürede değerlendirilmesini sağlarken, doğrulayıcı yöntemler daha yüksek analitik güvenilirlik gerektiren durumlarda kullanılmaktadır. Özellikle sıvı kromatografisi-tandem kütle spektrometrisi (LC-MS/MS), aynı numunede birden fazla mikotoksinin duyarlı ve seçici biçimde belirlenmesine olanak sağlayan önemli bir yöntemdir (Sulyok ve ark., 2020; Tolosa ve ark., 2021).

Analiz sonuçlarının yorumlanmasında ölçülen mikotoksin konsantrasyonunun yanı sıra numunenin temsil gücü, yöntemin performansı, ölçüm belirsizliği, mikotoksinin türü ve düzeyi, hayvan türü ve yemleme koşulları ile ilgili mevzuat ve bilimsel rehberler birlikte değerlendirilmelidir. Bu nedenle mikotoksin risk değerlendirmesi, numune alma aşamasından analitik sonuçların yorumlanmasına kadar bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir (FAO, 2011; Codex Alimentarius, 2017).

6. Yemlerde Kimyasal Tehlikeler

Yemlerde kimyasal tehlikeler; hayvan ve insan sağlığı ile hayvansal üretim açısından risk oluşturabilecek toksik veya istenmeyen maddeleri kapsamaktadır. Bu maddeler yem hammaddelerinin doğal bileşiminden kaynaklanabileceği gibi çevresel kirlilik, tarımsal uygulamalar, yem üretimi, depolama ve taşıma süreçlerinde de yeme bulaşabilmektedir. Bu nedenle kimyasal tehlikelerin yem zincirinin farklı aşamalarında risk temelli olarak izlenmesi önem taşımaktadır (FAO, 2019; van der Fels-Klerx ve ark., 2024).

Yemlerde önem taşıyan başlıca kimyasal kontaminantlar arasında mikotoksinler, ağır metaller, pestisit kalıntıları, dioksinler, poliklorlu bifeniller (PCB'ler), bitkisel toksinler, nitrat ve nitritler, PFAS ve bazı proses kontaminantları bulunmaktadır. Bazı kimyasal maddeler hayvana geçtikten sonra dokularda birikebilir veya metabolitleri hayvansal ürünlere taşınabilir. Bu nedenle yem kaynaklı kimyasal kontaminasyon yalnızca hayvan sağlığı açısından değil, et, süt ve yumurta gibi hayvansal ürünlerin güvenliği ve dolayısıyla insan

sağlığı açısından da değerlendirilmelidir (FAO, 2019; van der Fels-Klerx ve ark., 2024).

6.1. Ağır Metaller

Ağır metaller, yem güvenliği açısından önemli inorganik kimyasal kontaminantlar arasında yer almaktadır. Özellikle kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), cıva (Hg) ve arsenik (As) yem ve gıda zinciri açısından önem taşımaktadır. Bu elementler doğal kaynakların yanı sıra madencilik, sanayi, fosil yakıt kullanımı, gübreler ve kirlenmiş toprak ve su gibi antropojenik kaynaklardan çevreye yayılabilmektedir. Kirlenmiş toprak ve su ile temas eden yem bitkileri tarafından alınarak yem ve gıda zincirine taşınmaktadır (EFSA, 2026; van der Fels-Klerx ve ark., 2024; Naidu ve ark., 2025).

Ağır metallerin toksik etkileri; elementin türü ve kimyasal formu, maruziyet düzeyi ve süresi ile hayvanın yaşı ve duyarlılığına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle Pb, Cd, Hg ve As maruziyetinin oksidatif stres ile birlikte böbrek ve karaciğer fonksiyonları, nörolojik süreçler, bağışıklık ve üretim performansı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği bildirilmektedir (Afzal ve ark., 2024). Toksikolojik etkileri ise elementin kimyasal formu, maruziyet düzeyi ve süresi ile hayvanın türü ve duyarlılığına bağlı olarak değişmektedir. Başlıca özellikler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Yemlere bulaşabilecek ağır metaller

Kontaminant	**Başlıca kaynaklar / yem zincirine geçiş**	**Başlıca toksik etkiler**	**Yem güvenliği açısından temel yaklaşım**
Kurşun (Pb)	Kirlenmiş toprak ve su, mineral kaynaklar, endüstriyel faaliyetler ve atık materyaller; kirlenmiş toprakta yetişen yem bitkileri	Sinir sistemi, hematopoietik sistem ve böbrekler üzerinde toksik etkiler; kronik maruziyette dokularda birikim ve oksidatif stres	Riskli bölgelerden elde edilen yem hammaddelerinin kontrolü ve Pb düzeylerinin izlenmesi (Afzal ve ark., 2024; Khan ve ark., 2024)
Kadmiyum (Cd)	Toprak ve mineral kaynaklar; özellikle fosfatlı gübreler ve mineral girdiler; toprak-bitki geçişi	Özellikle böbrek hasarı ve kemik metabolizmasında bozulma; kronik maruziyette biyobirikim	Mineral yem katkıları ve hammaddelerin kaynağının kontrolü, yemlerde Cd düzeylerinin izlenmesi (EFSA, 2009)

Civa (Hg)	Özellikle balık unu, balık yağı ve diğer sucul kaynaklı hammaddeler; sucul organizmalarda biyobirikim ve biyomagnifikasyon	Özellikle metilcıvada nörotoksisite; toksik etki kimyasal forma göre değişmektedir	Sucul kaynaklı hammaddelerin kontrolü ve mümkün olduğunda cıvanın kimyasal formlarının değerlendirilmesi (EFSA, 2012)
Arsenik (As)	Doğal toprak ve su kaynakları; endüstriyel ve tarımsal faaliyetler; kirlenmiş toprak ve sulama suyundan bitkilere geçiş	Toksisite kimyasal forma bağlıdır; özellikle inorganik arsenik [As(III), As(V)] önem taşımaktadır	Yem hammaddelerinin kaynak ve kontaminasyon açısından kontrolü; özellikle inorganik As düzeylerinin izlenmesi (EFSA, 2024; Mondal ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2024)

6.2. Pestisit Kalıntıları

Pestisitler tarımsal üretimde yabancı ot, zararlı böcek ve fungal hastalıkların kontrolünde yaygın olarak kullanılmakta ve uygulama sonrasında yem hammaddelerinde kalıntı bırakabilmektedir. Özellikle tahıllar, yağlı tohumlar ve bunların yan ürünleri pestisit kalıntıları açısından izlenmesi gereken hammaddelerdir. Nitekim Giugliano ve ark. (2024), 2019–2023 yılları arasında inceledikleri yem örneklerinin önemli bir bölümünde pestisit kalıntıları saptamış; tahıl kökenli yemlerde özellikle pirimifos-metil, deltametrin, sipermetrin ve azoksistrobin gibi bileşiklerin yaygın olduğunu bildirmiştir. Avrupa yem zincirine ilişkin güncel değerlendirmeler de pestisit kalıntılarının özellikle mısır, arpa, ayçiçeği tohumu, tahıllar, yağlı tohumlar ve bunların yan ürünlerinde bulunabildiğini göstermektedir (van der Fels-Klerx et al., 2024).

Pestisit kalıntılarının yem zincirindeki düzeyi; bileşiğin kimyasal özellikleri, kullanım şekli, uygulama dozu, hasat öncesi bekleme süresi ve hammaddenin işlenmesi gibi birçok faktöre bağlıdır. İşleme bazı pestisitlerin konsantrasyonunu azaltabilse de bu etki bileşiğin özelliklerine ve uygulanan işlemin niteliğine göre değişmektedir. Bu nedenle yem hammaddelerinin yalnızca üretim aşamasında değil, hasat, depolama ve işleme süreçlerinde de izlenmesi önem taşımaktadır (van der Fels-Klerx et al., 2024).

Pestisit kalıntıları yalnızca hayvan sağlığı açısından değil, bazı bileşiklerin hayvansal ürünlere taşınabilmesi nedeniyle insan sağlığı açısından da önemlidir. Özellikle kalıcı ve lipofilik pestisitlerin yem yoluyla alınması sonucunda et, süt ve yumurta gibi hayvansal ürünlerde birikim ve transfer görülebilmektedir. Bununla birlikte, bu durum pestisitin kimyasal özelliklerine ve hayvandaki

metabolizmasına bağlı olarak değişmektedir (Jia et al., 2024; van der Fels-Klerx et al., 2024). Bu nedenle yemlerde pestisit kalıntılarının izlenmesi, hem hayvan sağlığının hem de hayvansal gıda güvenliğinin korunması açısından önemli bir yem güvenliği uygulamasıdır.

6.3. Veteriner İlaçları ve Yem Katkılarından Kaynaklanan Riskler

Bazı veteriner ilaçları ve yem katkı maddeleri yem aracılığıyla hayvanlara uygulanabilmektedir. Bu maddelerin güvenli kullanımı; doğru dozun belirlenmesi, hedef türe uygunluk, kullanım süresi ve mevzuata uygun olmalıdır. Özellikle gıda amaçlı yetiştirilen hayvanlarda hatalı kullanım veya uygun olmayan uygulama, hayvansal ürünlerde istenmeyen kalıntılara yol açabilir. Bu nedenle veteriner ilaçları için maksimum kalıntı limitlerinin (MRL) ve gerekli bekleme sürelerinin dikkate alınması, hem hayvan hem de insan sağlığının korunması açısından önemlidir (FAO, 2019; FAO/WHO JECFA, 2024). FAO ve WHO, yem üretimi ve taşınması sırasında veteriner ilaçlarının istem dışı taşınmasının et, süt ve yumurta gibi hayvansal ürünlere kalıntı transferine neden olabileceğini bildirmektedir.

Yem fabrikalarında önemli bir diğer risk, ilaçlı yemlerden sonraki yemlere veteriner ilaçlarının istem dışı taşınmasıdır (carry-over). Özellikle ortak ekipmanların kullanılması, yetersiz temizlik, toz oluşumu ve uygun olmayan üretim sıralaması bu tür çapraz bulaşmayı artırabilmektedir. Taşınan ilaç miktarı; aktif maddenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, ekipman tasarımı ve üretim prosesine bağlı olarak değişebilmektedir (Akoto & Maier, 2023).

Bu risklerin kontrolü açısından Avrupa Birliği'nde önemli düzenlemeler yapılmıştır. Komisyon Delegasyon Tüzüğü (EU) 2024/1229, 24 antimikrobiyal aktif madde için hedef dışı yemlerde izin verilen spesifik maksimum çapraz bulaşma düzeylerini ve analiz yöntemlerini belirlemiştir. Ayrıca Avrupa Komisyonu tarafından 19 Mart 2026'da, yemlerde homojenlik ve çapraz bulaşmanın değerlendirilmesine yönelik bir kılavuz yayımlanmış; kılavuzda örnekleme, analitik yöntemler, mikro-izleyicilerin kullanımı, test sıklığı ve kabul kriterleri gibi uygulamalara ilişkin ölçütler açıklanmıştır. Bu nedenle veteriner ilaçlarının yem üretimindeki istem dışı taşınmasının önlenmesi, yem güvenliği ve hayvansal gıda güvenliği sistemlerinin temel unsurlarından biridir.

6.4. Dioksinler ve Poliklorlu Bifeniller (PCB'ler)

Dioksinler [poliklorlu dibenzo-p-dioksinler (PCDD'ler) ve poliklorlu dibenzofuranlar (PCDF'ler)] ile dioksin-benzeri poliklorlu bifeniller (DL-PCB'ler), çevrede kalıcı, lipofilik ve biyolojik olarak birikebilen önemli kimyasal kontaminantlardır. Dioksinler özellikle bazı endüstriyel ve termal işlemlerde istenmeyen yan ürünler olarak oluşurken, PCB'ler geçmişte çok sayıda endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmıştır. Geçmişteki emisyonlar büyük ölçüde azaltılmış olmakla birlikte, bu bileşiklerin çevredeki kalıcılığı

nedeniyle yem ve gıda zincirine yönelik kontaminasyon riski devam etmektedir (EFSA, 2026).

Yem zincirine giriş; çevresel kontaminasyonun yanı sıra kirlenmiş yağlar, balık unu ve balık yağı, bitkisel yağlar ve yan ürünler, mineral kaynaklar ve uygun olmayan yakıtlarla gerçekleştirilen kurutma işlemleri gibi farklı yollarla gerçekleşmektedir. Özellikle balık yağı, balık unu, hayvansal yağlar ve bazı yağlı yem hammaddeleri dioksin ve PCB kontaminasyonu açısından dikkatle izlenmelidir. Avrupa yem zincirine ilişkin güncel risk değerlendirmesinde dioksinler ve PCB'ler, izlenmesi gereken yüksek öncelikli kimyasal tehlikeler arasında sınıflandırılmıştır (van der Fels-Klerx et al., 2024).

6.5. Doğal Toksinler

Bazı yem hammaddeleri, bitkilerin doğal savunma mekanizmalarının bir parçası olarak sentezlediği veya doğal olarak bünyesinde bulundurduğu toksik bileşikler içermektedir. Bu bileşikler yem zincirine özellikle toksik bitkilerin yem hammaddelerine karışması veya doğal olarak toksik bileşikler içeren bitkisel materyallerin kullanılması yoluyla girmektedir. Doğal toksinler arasında pirrolizidin, tropan ve kuinolizidin alkaloidleri, glikoalkaloidler, glukozinolatlar, siyanogenik bileşikler, gossypol ve teobromin gibi çok farklı kimyasal gruplar bulunmaktadır (EFSA, 2025, 2026).

Doğal toksinlerin etkileri bileşiğin kimyasal yapısına, konsantrasyonuna ve maruz kalan hayvan türüne göre değişmektedir. Bazı bileşikler antinutrisyonel özellik göstererek besin maddelerinin sindirimi ve kullanımını olumsuz etkilerken, bazıları sinir sistemi, karaciğer veya diğer organlar üzerinde doğrudan toksik etkilere neden olabilmektedir. Örneğin siyanogenik bileşikler, hidroliz sonucunda hidrojen siyanür açığa çıkararak akut toksisiteye yol açabilir. Gossypol ise özellikle pamuk tohumu ve pamuk tohumu küspesi kullanımında hayvan sağlığı açısından önem taşımakta; uzun süreli maruziyet karaciğer hasarı, üreme bozuklukları ve immünolojik etkilerle ilişkilendirilmektedir (Cope, 2025; Gadelha ve ark., 2014). Benzer şekilde, kolza ve diğer Brassica kökenli yemlerde bulunan glukozinolatların parçalanma ürünleri tiroid fonksiyonlarını etkileyebilmekte ve yüksek düzeylerde yem tüketimi ile büyüme performansını olumsuz etkileyebilmektedir (Tripathi ve Mishra, 2007; Mawson ve ark., 1994).

Bu nedenle yem hammaddelerinin güvenlik değerlendirmesinde yalnızca besin madde bileşiminin değil, doğal olarak bulunabilecek toksik bileşiklerin de dikkate alınması gerekir. Riskin kontrolünde uygun hammadde seçimi, toksik bitkilerin yemlere karışmasının önlenmesi, gerektiğinde uygun işleme yöntemlerinin kullanılması ve riskli hammaddelerin izlenmesi önem taşımaktadır. EFSA'nın yem ve gıdalardaki kimyasal tehlikelere ilişkin değerlendirmelerinde doğal toksinler, hayvan ve insan sağlığı açısından dikkate alınması gereken önemli tehlike grupları arasında yer almaktadır (EFSA, 2026).

6.6. Nitrat, Nitrit ve Diğer İnorganik Kontaminantlar

Nitrat ve nitritler yem ve yem hammaddelerinde çevresel koşullar, bitki metabolizması ve tarımsal uygulamalara bağlı olarak bulunabilmektedir. Özellikle azotlu gübreleme, bitkinin azot metabolizması ve çevresel stres koşulları bitkilerde nitrat birikimini etkileyebilmektedir. Nitrat ve nitritler, EFSA'nın 2026 yılı kimyasal kontaminant veri toplama programında yemlerde izlenen inorganik kontaminantlar arasında yer almaktadır (EFSA, 2026).

Nitrat ve nitritlerin toksik etkileri hayvan türüne ve maruziyet düzeyine göre değişmektedir. Özellikle ruminantlarda rumen mikroorganizmaları tarafından nitratın nitrite indirgenmesi toksisite açısından önem taşımaktadır. Oluşan nitrit hemoglobini methemoglobine dönüştürerek oksijen taşıma kapasitesini azaltmakta ve yüksek maruziyetlerde methemoglobinemi, hipoksi ve buna bağlı klinik belirtilere neden olabilmektedir. Bu nedenle nitrat ve nitritler özellikle yüksek nitrat içerebilen kaba yemler ve diğer yem hammaddeleri açısından önem taşımaktadır (EFSA, 2020).

Risk yönetiminde özellikle nitrat birikimi açısından risk taşıyan yem hammaddelerinin uygun şekilde analiz edilmesi, hammadde kalitesinin izlenmesi ve gerektiğinde rasyon formülasyonunda dikkate alınması önemlidir.

6.7. Proses Kaynaklı Kontaminantlar

Yemlerin işlenmesi sırasında uygulanan ısıl işlemler, kurutma ve diğer teknolojik prosesler, hammaddelerin kimyasal bileşiminde değişikliklere yol açarak istenmeyen bileşiklerin oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle yem güvenliği yalnızca hammaddelerin başlangıçtaki kontaminasyonlarıyla sınırlı olmayıp, üretim ve işleme koşullarından kaynaklanabilecek kimyasal riskleri de kapsamaktadır. Proses kontaminantları, üretim veya işleme sırasında kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşabilen bileşikler olarak tanımlanmaktadır (EFSA, 2026).

Bu bileşiklerin oluşumu; kullanılan hammaddenin bileşimi, uygulanan işlem türü, sıcaklık, işlem süresi, nem ve diğer proses koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. EFSA'nın 2026 yılı kimyasal kontaminant veri toplama programında proses kontaminantları arasında furan ve türevleri, akrilamid, 3-MCPD ve esterleri, glisidil esterler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) ve etil karbamat yer almaktadır (EFSA, 2026).

Bu nedenle yem üretiminde proses koşullarının uygun şekilde kontrol edilmesi, yalnızca besin maddelerinin korunması ve ürün kalitesinin sağlanması açısından değil, proses kaynaklı istenmeyen kimyasal bileşiklerin oluşumunun sınırlandırılması açısından da önemlidir. Özellikle ısıl işlem ve kurutma koşullarının hammadde özellikleri dikkate alınarak optimize edilmesi, proses kaynaklı kontaminant oluşumunun azaltılmasına katkı sağlayabilir.

6.8. Kimyasal Tehlikelerin Hayvansal Ürünlere Taşınması

Yem kaynaklı kimyasal tehlikelerin önemli bir özelliği, bazı kontaminantların hayvan organizmasında birikmesi veya metabolitlerinin hayvansal ürünlere geçebilmesidir. Bu durum özellikle çevrede kalıcı, biyolojik olarak birikebilen ve yağ dokusuna afinitesi yüksek bazı kontaminantlar açısından önem taşımaktadır. Bununla birlikte, yemden hayvansal ürünlere transfer düzeyi kimyasalın özelliklerine ve hayvanın biyolojik süreçlerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir (van der Fels-Klerx et al., 2024).

Yem → hayvan → hayvansal ürün şeklindeki geçiş, yem güvenliği ile gıda güvenliği arasındaki doğrudan ilişkiyi ortaya koymaktadır. FAO/WHO, yemlerde bulunan tehlikelerin hayvansal kaynaklı gıdalara taşınmasını yem güvenliği ve gıda güvenliği açısından önemli bir risk olarak değerlendirmektedir. Özellikle yemlerde bulunan veteriner ilaç kalıntılarının et, süt ve yumurta gibi hayvansal ürünlere geçebilmesi, insan sağlığı açısından ayrıca önem taşımaktadır (FAO & WHO, 2019).

Yemden hayvansal ürünlere transfer; kimyasalın emilimi, metabolizması, dağılımı ve atılımının yanı sıra hayvan türü, maruziyet düzeyi ve ürünün niteliğine bağlıdır. Bu nedenle kimyasal tehlikelerin kontrolünde yalnızca yemin güvenliğinin sağlanması yeterli olmayıp, kontaminantın hayvan organizmasındaki kaderi ve yenilebilir dokulara veya ürünlere olası transferinin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle et, süt, yumurta ve balık gibi hayvansal ürünler açısından bu yaklaşım, yemden gıdaya risk değerlendirmesinin temel unsurlarından biridir (van der Fels-Klerx et al., 2024).

6.9. Kimyasal Tehlikelerin Kontrolü

Kimyasal tehlikelerin kontrolünde temel yaklaşım, kontaminasyon kaynaklarının belirlenmesi ve tehlikelerin yem zincirine girişinin mümkün olduğunca erken aşamada önlenmesidir. Bu nedenle yem güvenliği yalnızca son ürün analizine dayanmamalı; hammadde temini, üretim, işleme, depolama, taşıma ve kullanım aşamalarının tamamını kapsayan risk esaslı bir kontrol yaklaşımı benimsenmelidir (FAO, 2019; Codex Alimentarius, 2024). Yemlerdeki tehlikeler hammaddelerden kaynaklanabileceği gibi üretim, işleme, depolama ve taşıma sırasında da ortaya çıkabilmektedir.

Bu kapsamda;

•güvenilir tedarikçilerden hammadde temini ve tedarikçi kontrolü,

•hammadde kaynağı ve üretim koşullarının izlenebilirliğinin sağlanması,

•riskli hammaddeler için risk esaslı analiz ve izleme programlarının uygulanması,

•ağır metaller, pestisitler, mikotoksinler, doğal toksinler, dioksin ve PCB'ler ile diğer kimyasal kontaminantların uygun yöntemlerle kontrol edilmesi,

•veteriner ilaçlarının mevzuata uygun kullanılması ve kimyasal çapraz bulaşmanın önlenmesi,

•depolama ve taşıma koşullarında kontaminasyon kaynaklarının kontrol edilmesi,

•güvenilir ve doğrulanmış analiz yöntemlerinin kullanılması,

•analiz sonuçlarının ilgili mevzuat ve risk değerlendirmesi çerçevesinde yorumlanması

gerekmektedir. Bu uygulamaların bütüncül olarak yürütülmesi, kimyasal tehlikelerin yem zincirinin erken aşamalarında belirlenmesi ve kontrol edilmesine katkı sağlamaktadır (Codex Alimentarius, 2024).

Kimyasal kontaminantların kontrolünde yalnızca son ürün analizine dayalı yaklaşım yeterli değildir. Risk esaslı hammadde seçimi, tedarikçi yönetimi, proses kontrolü, izlenebilirlik, uygun örnekleme ve düzenli analizlerin birlikte yürütülmesi gerekmektedir. Codex'in yem risk değerlendirmesine ilişkin rehberleri de tehlikelerin oluşumu, maruziyet ve risk düzeyinin dikkate alınarak kontrol önceliklerinin belirlenmesini desteklemektedir.

Günümüzde kimyasal kontaminantların oluşum verilerinin sistematik olarak toplanması da risk değerlendirmesinin önemli bir bileşenidir. EFSA'nın 2026 yılı veri toplama programı; inorganik kontaminantlar, mikotoksinler, bitkisel toksinler, dioksin ve PCB'ler, proses kontaminantları, pestisitler ve diğer organik kontaminantlar dahil geniş bir kimyasal tehlike grubunu kapsamaktadır (EFSA, 2026).

7. Yemlerde Fiziksel Tehlikeler

Yemlerde fiziksel tehlikeler, yem veya yem hammaddelerine karışabilen ve hayvanlarda yaralanma, sindirim sistemi hasarı, boğulma veya diğer mekanik etkilere yol açabilen yabancı maddeleri ifade etmektedir. Biyolojik ve kimyasal tehlikelerle birlikte yem güvenliğinin temel tehlike gruplarından birini oluşturan fiziksel tehlikeler; üretim ve hasat, yem fabrikasındaki işleme süreçleri, ekipmanların kullanımı ve bakımı, depolama, taşıma ve çiftlikte yemleme sırasında yeme bulaşabilmektedir (FAO & WHO, 2019; Codex Alimentarius Commission, 2024).

Başlıca fiziksel tehlikeler arasında metal parçaları, tel, taş, cam, plastik, kırılmış ekipman parçaları ve diğer yabancı maddeler bulunmaktadır. Codex'in Code of Practice on Good Animal Feeding dokümanında da kırılmış iğneler, makine parçaları ve diğer yabancı maddeler fiziksel tehlikeler kapsamında

değerlendirilmekte ve yem zincirinin farklı aşamalarında kontrol edilmeleri önerilmektedir (Codex Alimentarius Commission, 2024).

Fiziksel tehlikelerin başlıca etkileri hayvan sağlığı ve refahı üzerinde ortaya çıkmakla birlikte, bazı fiziksel yabancı maddeler hayvansal ürünlerin güvenliği açısından da önem taşıyabilmektedir. Bu nedenle fiziksel tehlikelerin kontrolünde yem hammaddelerinin kabulünden başlayarak üretim, depolama, taşıma ve çiftlikte kullanım aşamalarının tamamında yabancı madde girişinin önlenmesi, ekipmanların düzenli kontrolü ve uygun eleme, mıknatıs veya diğer fiziksel ayırma sistemlerinin kullanılması önemlidir. Kontrol önlemlerinin tehlikenin kaynağına mümkün olduğunca yakın aşamada uygulanması, fiziksel risklerin azaltılmasında temel bir yaklaşımdır (FAO & WHO, 2019; Codex Alimentarius Commission, 2024).

7.1. Başlıca Fiziksel Tehlikeler

Yemlerde karşılaşılabilecek fiziksel tehlikeler farklı üretim ve işleme aşamalarından kaynaklanabilmektedir. Başlıca fiziksel yabancı maddeler arasında metal parçaları, tel, vida, somun, perçin, makine parçaları, taş, kum, cam, plastik, kauçuk, ahşap parçaları ve ambalaj materyalleri bulunmaktadır. Bu maddeler özellikle hasat, taşıma, depolama ve yem üretiminde kullanılan ekipmanların aşınması veya hasar görmesi sonucunda yeme karışabilmektedir (Codex Alimentarius Commission, 2024).

Fiziksel yabancı maddelerin oluşturduğu risk, materyalin boyutuna, sertliğine, şekline ve keskinliğine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle keskin veya sert parçalar ağız boşluğu, yemek borusu ve gastrointestinal sistemde yaralanmalara; büyük parçalar ise tıkanma veya boğulmaya neden olabilmektedir. Bu nedenle fiziksel yabancı maddelerin yem zincirine girişinin önlenmesi ve yem üretim sürecinde uygun fiziksel ayırma ve kontrol sistemleriyle uzaklaştırılması hayvan sağlığı ve refahı açısından önem taşımaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024).

Tablo 2. Yemlerde karşılaşılabilecek başlıca fiziksel tehlikeler, kaynakları ve kontrol yöntemleri

Fiziksel tehlike	**Olası kaynak**	**Olası etkiler**	**Temel kontrol yöntemleri**
Metal parçaları	Makine aşınması, kırılan vida, tel, elek veya ekipman parçaları	Ağız ve gastrointestinal sistemde yaralanma	Mıknatıs, metal dedektörü, ekipman bakımı
Cam	Aydınlatma elemanları, cm kaplar, kırılan parçalar	Kesilme ve doku hasarı	Koruyucu kapaklar, görsel kontrol, kırılabilir materyallerin sınırlandırılması

Taş ve çakıl	Tarla, hasat ve ham madde toplama	Ağız ve sindirim sistemi hasarı	Eleme, temizleme, ham madde kontrolü
Plastik	Ambalaj, ekipman ve taşıma materyalleri	Boğulma ve gastrointestinal hasar	Ambalaj kontrolü, görsel kontrol, ekipman bakımı
Kauçuk	Conta, taşıma sistemleri ve ekipman	Yabancı cisim oluşumu, sindirim sistemi riski	Ekipman kontrolü ve periyodik bakım
Ahsaşp	Palet, kasa ve yapı materyalleri	Kesilme veya yabancı cisim riski	Palet ve depolama alanı kontrolü
Tel, vida, somun	Ekipman, bakım çalışmaları	Keskin cisim kaynaklı yaralanmalar	Bakım sonrası kontrol, mıknatıs ve metal dedektörü

Bu tehlikelerin önemi yalnızca materyalin türüne değil, aynı zamanda parçanın boyutuna, şekline, sertliğine ve keskinliğine de bağlıdır. Özellikle sivri veya keskin metal, cam ve sert plastik parçaları daha yüksek mekanik yaralanma potansiyeline sahiptir.

7.2. Metal Kontaminasyonu

Metal parçaları yemlerde karşılaşılan önemli fiziksel yabancı maddeler arasında yer almaktadır. Öğütücüler, mikserler, helezonlar, elevatörler, peletleme ekipmanları ve diğer mekanik sistemlerde meydana gelen aşınma veya kırılmalar metal parçalarının yeme karışmasına neden olabilir. Ayrıca bakım ve onarım sırasında kullanılan vida, somun, tel ve benzeri materyaller de potansiyel kontaminasyon kaynaklarıdır (Codex Alimentarius Commission, 2024).

Metal kontaminasyonunun kontrolünde mıknatıslar, elekler ve metal dedektörleri kullanılabilmektedir. Bununla birlikte, tespit sistemleri kontaminasyonu önleyen uygulamaların yerine geçmemekte; düzenli ekipman bakımı, aşınan parçaların zamanında değiştirilmesi ve bakım sonrasında proses hattının kontrolüyle birlikte uygulanmalıdır. Metal dedektörleri ve diğer tespit sistemleri, özellikle prosesin üst aşamalarındaki önleyici kontrolleri tamamlayan araçlar olarak değerlendirilmelidir (Codex Alimentarius Commission, 2024; Nuutinen, 2023).

7.3. Cam, Taş, Plastik ve Diğer Yabancı Maddeler

Cam, taş, plastik, kauçuk ve ahşap gibi materyaller de yem zincirinde fiziksel tehlike oluşturabilmektedir. Cam parçaları kırılabilir aydınlatma elemanları, kaplar veya ekipmanlardan; taş, kum ve çakıl tarla ve hasat kaynaklı hammaddelerden; plastik ve kauçuk ise ambalaj materyalleri, taşıma sistemleri, contalar ve ekipmanların aşınmasından kaynaklanabilmektedir. Bu tür yabancı maddelerin oluşumu veya yeme karışması, üretim, işleme, depolama ve taşıma aşamalarındaki ekipman ve uygulamalarla ilişkili olabilmektedir (Codex Alimentarius Commission, 2024).

Avrupa Birliği RASFF bildirimlerinin 2020–2023 dönemini inceleyen bir çalışmada cam, metal, plastik, kemik ve böcekler başlıca bildirilen fiziksel yabancı madde grupları arasında yer almıştır. Bu bulgular, fiziksel tehlikelerin yalnızca üretim aşamasına özgü olmadığını ve gıda-yem zincirinin farklı noktalarında ortaya çıkabildiğini göstermektedir (Prata, 2024).

7.4. Fiziksel Tehlikelerin Yem Zincirine Giriş Noktaları

Fiziksel kontaminasyon yem zincirinin farklı aşamalarında ortaya çıkabilmektedir. Başlıca kritik noktalar şunlardır:

- **Hammadde kabulü:** Taş, metal, plastik ve diğer yabancı maddelerin kontrolü,
- **Temizleme ve eleme:** Tarla kaynaklı yabancı maddelerin uzaklaştırılması,
- **Öğütme ve karıştırma:** Ekipman aşınması ve kırılmalarının kontrolü,
- **Peletleme:** Makine parçaları ve metal aşınmasının izlenmesi,
- **Taşıma sistemleri:** Helezon, elevatör ve konveyörlerin kontrolü,
- **Paketleme:** Ambalaj materyallerinin yeme karışmasının önlenmesi,
- **Depolama:** Yapısal materyaller ve depolama ekipmanlarından kaynaklanabilecek kontaminasyonun önlenmesi,
- **Çiftlikte kullanım:** Yemlik, silo ve taşıma ekipmanlarının düzenli kontrolü.

Codex'in Code of Practice on Good Animal Feeding dokümanı, yem ve yem hammaddelerinin üretim, elleçleme, depolama ve taşıma sırasında fiziksel, kimyasal ve biyolojik kontaminasyondan korunmasını temel bir gereklilik olarak tanımlamaktadır (Codex Alimentarius Commission, 2024).

7.5. Fiziksel Tehlikelerin Önlenmesi ve Kontrolü

Fiziksel tehlikelerin kontrolünde temel yaklaşım, kontaminasyonun oluşmasını önlemek ve ortaya çıkabilecek yabancı maddeleri mümkün olduğunca erken aşamada uzaklaştırmaktır. Bu kapsamda hammadde kabulü, tedarikçi kontrolü, düzenli ekipman bakımı, temizlik uygulamaları ve proses içi kontrol sistemleri birlikte uygulanmalıdır (Codex Alimentarius Commission, 2024).

Elek ve temizleme sistemleri taş ve iri yabancı maddelerin uzaklaştırılmasında, mıknatıslar demir içeren metal parçalarının tutulmasında, metal dedektörleri ise son üründe bulunabilecek metal parçalarının tespitinde kullanılabilir. Bununla birlikte, tespit sistemleri önleyici kontrollerin yerine

geçmemekte; fiziksel tehlike riskini azaltan üst akış uygulamalarıyla birlikte kullanılmalıdır (Nuutinen, 2023).

Ekipmanların koruyucu bakımı da fiziksel kontaminasyonun önlenmesinde temel uygulamalardandır. Hareketli parçalar, bağlantı elemanları ve aşınma veya kırılma riski bulunan ekipmanlar düzenli olarak kontrol edilmeli; bakım ve onarım sonrasında hatta vida, tel, alet veya başka bir yabancı materyalin bırakılmadığı doğrulanmalıdır (Codex Alimentarius Commission, 2024; Nuutinen, 2023).

7.6. Fiziksel Tehlikelerin İzlenmesi ve Doğrulanması

Fiziksel tehlikelerin kontrolü, yem güvenliği sisteminde HACCP temelli tehlike analizi ve kontrol uygulamaları kapsamında ele alınabilir. Tehlike analizinde fiziksel yabancı maddenin kaynağı, meydana gelme olasılığı ve hayvan sağlığı açısından oluşturabileceği sonuçlar değerlendirilmelidir. Codex, uygun olduğu durumlarda GMP ve HACCP temelli yaklaşımların yem güvenliğinin sağlanmasında kullanılmasını önermektedir (Codex Alimentarius Commission, 2024).

İzleme faaliyetlerinde;

- eleklerin bütünlüğü,
- mıknatısların temizliği ve işlevselliği,
- metal dedektörlerinin çalışma performansı,
- ekipmanların mekanik durumu,
- hammadde ve son ürünlerin fiziksel görünümü,
- bakım ve temizlik kayıtları,
- yabancı madde tespitleri ve şikâyetleri

düzenli olarak kontrol edilmelidir. Tespit sistemlerinin performansı yalnızca cihazın çalışıyor olmasıyla değil, düzenli test, bakım ve doğrulama uygulamalarıyla değerlendirilmelidir (Nuutinen, 2023).

Bir fiziksel kontaminasyon tespit edildiğinde yalnızca kontamine yemin uzaklaştırılması yeterli değildir. Kontaminasyonun kaynağının belirlenmesi ve kök neden analizinin yapılması, benzer olayların tekrarlanmasını önleyecek düzeltici ve önleyici faaliyetlerin geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Böylece fiziksel tehlikelerin kontrolü son ürünün incelenmesiyle sınırlı kalmayıp, tehlikenin kaynağına yönelik proaktif bir yem güvenliği yaklaşımına dönüştürülmektedir.

8. 8. Yemlerde Oksidatif Bozulma ve Kalite Kayıpları

Yemlerde oksidatif bozulma, özellikle yağ ve yağ içeren hammaddelerin depolanması sırasında ortaya çıkan ve yemlerin besinsel değerini, duyusal özelliklerini ve hayvan performansını olumsuz etkileyebilen önemli bir kalite problemidir. Lipid oksidasyonu özellikle doymamış yağ asitlerinin oksijenle reaksiyona girmesiyle başlamakta; süreçte hidroperoksitler gibi primer oksidasyon ürünleri, bunların parçalanması sonucunda ise aldehit, keton ve diğer sekonder ürünler oluşmaktadır. Bu bileşikler yemin istenmeyen koku ve tada sahip olmasına, besin maddelerinin kullanılabilirliğinin azalmasına ve hayvanlarda oksidatif stres oluşmasına katkıda bulunabilmektedir (Shurson et al., 2015; Shurson et al., 2021; Kerr et al., 2026).

Özellikle çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) bakımından zengin yağlar oksidasyona daha duyarlıdır. Sıcaklık, oksijen, ışık, nem, geçiş metalleri ve depolama süresi gibi çevresel ve teknolojik faktörler oksidasyonun hızını etkileyebilmektedir. Bu nedenle yağ ve yağ bakımından zengin hammaddelerin kalite kontrolünde yalnızca kimyasal bileşim değil, oksidatif stabilite de dikkate alınmalıdır (Shurson et al., 2015; López-Hernández et al., 2026).

8.1. Lipid Oksidasyonunun Mekanizması

Lipid oksidasyonu genel olarak başlama, ilerleme ve parçalanma aşamalarından oluşan zincirleme bir reaksiyondur. İlk aşamada doymamış yağ asitlerinden lipid radikalleri oluşmakta, bunların oksijenle reaksiyona girmesi sonucunda peroksil radikalleri ve hidroperoksitler meydana gelmektedir. Hidroperoksitler primer oksidasyon ürünleri olup daha ileri aşamalarda aldehitler, ketonlar ve diğer sekonder ürünlere parçalanmaktadır. Özellikle aldehitler, lipid oksidasyonunun ileri aşamalarında oluşan biyolojik olarak reaktif bileşikler arasında yer almaktadır (Shurson et al., 2015; Kerr et al., 2026).

Oksidasyon ürünleri proteinler ve diğer biyomoleküllerle de reaksiyona girebilmekte ve bu durum bazı besin maddelerinin kullanılabilirliğinin azalmasına katkıda bulunabilmektedir. Dolayısıyla lipid oksidasyonu yalnızca yağ kalitesini değil, yemin genel besinsel değerini de etkileyebilen bir süreçtir (Shurson et al., 2021; López-Hernández et al., 2026).

8.2. Oksidatif Bozulmayı Etkileyen Faktörler

Yemlerde oksidasyonun hızı hammadde özellikleri ile depolama ve çevre koşullarının birlikte etkisiyle belirlenmektedir. Başlıca faktörler şunlardır:

- **Yağ asidi kompozisyonu:** Doymamış ve özellikle PUFA oranının artması oksidatif duyarlılığı artırır.
- **Sıcaklık:** Yükselen sıcaklık oksidatif reaksiyonları hızlandırabilir.
- **Oksijen:** Oksidasyonun gerçekleşmesi için temel faktördür.

- Işık: Özellikle ışığa duyarlı yağlarda oksidasyonu hızlandırabilir.
- **Geçiş metalleri:** Demir ve bakır gibi metaller oksidatif reaksiyonları katalizleyebilir.
- **Nem:** Özellikle uygun olmayan depolama koşullarında mikrobiyal gelişme ve diğer kalite kayıplarını kolaylaştırabilir.
- **Depolama süresi:** Uygun olmayan koşullarda süre uzadıkça oksidatif bozulma riski artabilir.

Bu nedenle oksidatif stabilitenin korunması yalnızca antioksidan kullanımına değil, hammadde kalitesi, depolama koşulları ve oksijene maruziyetin birlikte yönetilmesine bağlıdır (Shurson et al., 2015; López-Hernández et al., 2026).

8.3. Oksidatif Bozulmanın Yem Kalitesi ve Hayvan Performansı Üzerindeki Etkileri

Lipid oksidasyonu yemlerin lezzetliliğini, enerji değerini ve bazı besin maddelerinin kullanılabilirliğini azaltabilmektedir. Oksidasyona duyarlı A ve E vitaminleri de bu süreçten etkilenebilmektedir. İleri düzeyde oksidasyon sonucunda oluşan reaktif bileşikler proteinler, vitaminler ve diğer biyomoleküllerle etkileşerek yemin besinsel değerinin azalmasına katkıda bulunabilmektedir (Shurson et al., 2021; López-Hernández et al., 2026).

Peroksidize lipidlerin hayvan performansı üzerindeki etkilerini inceleyen 29 yayının meta-analizinde, kanatlı ve domuzlarda peroksidize lipidlerin kullanımının ortalama canlı ağırlık artışında %5, yem tüketiminde %3 ve yemden yararlanma etkinliğinde %2 azalmaya neden olduğu bildirilmiştir. Ayrıca plazma veya serum E vitamini düzeylerinin azaldığı ve TBARS düzeylerinin arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte etkilerin büyüklüğünün lipid kaynağı, yağ asidi profili ve oksidasyon koşullarına göre değişebildiği vurgulanmıştır (Hung et al., 2017).

Bu nedenle oksidatif bozulma yalnızca bir yem kalite problemi değil, aynı zamanda yem tüketimi, besin maddelerinin değerlendirilmesi ve hayvan performansı açısından ekonomik sonuçları bulunan bir sorundur.

8.4. Yemlerde Oksidasyonun Belirlenmesinde Kullanılan Analizler

Lipid oksidasyonunun değerlendirilmesinde farklı oksidasyon ürünlerini veya oksidatif stabiliteyi yansıtan birden fazla analitik yöntem kullanılmaktadır. Başlıca göstergeler peroksit sayısı (PV), TBARS ve p-anisidin değeri (p-AV) olup, bunların birlikte değerlendirilmesi oksidasyonun farklı aşamaları hakkında daha kapsamlı bilgi sağlamaktadır (Shurson et al., 2015; Kerr et al., 2026).

8.5. Antioksidanların Kullanımı

Lipid oksidasyonunun kontrolünde antioksidanlar önemli bir araçtır. Antioksidanlar serbest radikal oluşumunu veya zincirleme oksidatif reaksiyonları sınırlandırarak yağların ve yağ içeren yem hammaddelerinin oksidatif stabilitesinin korunmasına katkıda bulunabilmektedir. Tokoferoller gibi doğal antioksidanların yanı sıra, yem ve yem hammaddelerinde mevzuata uygun farklı sentetik antioksidanlar da kullanılabilmektedir.

Antioksidanların etkinliği yağın bileşimi, oksidasyon düzeyi, depolama koşulları ve kullanılan antioksidanın özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte antioksidanlar oluşmuş oksidasyon ürünlerini ortadan kaldırmaz; esas olarak oksidasyonun başlamasını veya ilerlemesini geciktirmek amacıyla kullanılır. Bu nedenle ileri düzeyde okside olmuş yağların kalitesini yalnızca antioksidan ilavesiyle düzeltmek mümkün değildir (Shurson et al., 2015; Shurson et al., 2021).

8.6. Depolama ve Taşıma Sırasında Oksidatif Bozulmanın Önlenmesi

Yağlar ve yağ bakımından zengin hammaddeler mümkün olduğunca serin, kuru, temiz, ışık ve oksijen maruziyetinin sınırlandırıldığı koşullarda depolanmalıdır. Sıcaklık ve nemin izlenmesi, ambalaj bütünlüğünün korunması ve gereğinden uzun depolama sürelerinden kaçınılması oksidatif bozulmanın sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır.

Özellikle PUFA bakımından zengin hammaddelerde oksidatif stabilite daha dikkatli izlenmelidir. Ayrıca hammaddenin üretimden yem fabrikasına ve son kullanıma kadar maruz kaldığı sıcaklık, oksijen ve ışık koşulları birlikte değerlendirilmelidir. Bu nedenle oksidatif kalite yönetimi yalnızca depolama aşamasında değil, üretim–taşıma–depolama zincirinin tamamında ele alınmalıdır (Shurson et al., 2015; López-Hernández et al., 2026).

8.7. Oksidatif Bozulmanın Yem Güvenliği Açısından Önemi

Oksidatif bozulma öncelikle bir yem kalite problemi olmakla birlikte, ileri oksidasyon sonucunda oluşan bazı reaktif bileşiklerin hayvan sağlığı ve performansı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmesi nedeniyle yem güvenliğiyle de ilişkilidir. Bu nedenle özellikle yüksek yağ içeren hammaddelerin kalite değerlendirmesinde kimyasal bileşimin yanı sıra oksidatif stabilitenin de dikkate alınması gerekir (Kerr et al., 2026; López-Hernández et al., 2026).

Sonuç olarak oksidatif bozulmanın yönetiminde yalnızca antioksidan kullanımına veya tek bir analitik parametreye dayalı yaklaşım yerine; kaliteli hammadde seçimi, uygun depolama ve taşıma koşulları, oksidasyon göstergelerinin birlikte izlenmesi ve gerektiğinde mevzuata uygun antioksidan kullanımı bütüncül olarak ele alınmalıdır.

9. SONUÇ

Yem kalitesi ve yem güvenliği; besin madde içeriğinin yanı sıra biyolojik, kimyasal ve fiziksel tehlikelerin birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok boyutlu kavramlardır. Güvenli yem üretimi, hammaddeden başlayarak üretim, depolama ve taşıma süreçlerinin tamamında risklerin kontrol edilmesine dayanır.

Bu kapsamda patojenler, mikotoksinler, pestisit ve veteriner ilaç kalıntıları, ağır metaller, dioksinler ve fiziksel yabancı maddeler başlıca riskleri oluşturmaktadır. Bu tehlikelerin kaynağında önlenmesi; uygun hammadde seçimi, hijyenik üretim, çapraz bulaşmanın önlenmesi, uygun depolama koşulları ve etkin izleme uygulamalarıyla mümkündür.

Özellikle nem ve sıcaklık kontrolü mikrobiyal gelişimin ve küf oluşumunun önlenmesinde; uygun numune alma ve analiz yöntemleri ise mikotoksin ve diğer kontaminantların doğru şekilde değerlendirilmesinde önem taşımaktadır. Yağ içeriği yüksek yemlerde oksidatif bozulmanın kontrolü de besin değerinin ve yem kalitesinin korunması açısından gereklidir.

Sonuç olarak, yem güvenliği; hammadde seçiminden son ürüne kadar tüm yem zincirini kapsayan, tehlikelerin kaynağında önlenmesine dayalı bütüncül bir risk yönetimi yaklaşımı ile sağlanabilir. Bu yaklaşım, yem kalitesinin korunmasının yanı sıra hayvan sağlığının, performansının ve elde edilen hayvansal ürünlerin güvenliğinin sürdürülebilmesi için temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

Abdollahi, M. R., Ravindran, V., & Svihus, B. (2013). Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value. Animal Feed Science and Technology, 179, 1–23.

Afzal, A., & Mahreen, N. (2024). Emerging insights into the impacts of heavy metals exposure on health, reproductive and productive performance of livestock. Frontiers in Pharmacology, 15, 1375137. https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1375137

Akoto, E. Y., & Maier, D. E. (2023). The mechanism of drug carryover in feed manufacturing as a function of drug properties and equipment design—A brief review. Agriculture, 13(9), 1834. https://doi.org/10.3390/agriculture13091834

AOAC International. (2023). Official methods of analysis of AOAC International (22nd ed.). AOAC International.

Awad, W. A., Ghareeb, K., Böhm, J., & Zentek, J. (2013). The toxicological impacts of the Fusarium mycotoxin deoxynivalenol in poultry flocks with special reference to immunotoxicity. Toxins, 5(5), 912–925. https://doi.org/10.3390/toxins5050912

Bryden, W. L. (2012). Mycotoxin contamination of the feed supply chain: Implications for animal productivity and feed security. Animal Feed Science and Technology, 173(1–2), 134–158. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.12.014

Channaiah, L. H., & Maier, D. E. (2014). Best stored maize management practices for the prevention of mycotoxin contamination. In J. F. Leslie & A. F. Logrieco (Eds.), Mycotoxin reduction in grain chains (pp. 78–88). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118832790.ch6

Codex Alimentarius Commission. (2013). Guidelines on the application of risk assessment for feed (CXG 80-2013). FAO/WHO.

Codex Alimentarius Commission. (2017). Code of practice for the prevention and reduction of mycotoxin contamination in cereals (CXC 51-2003). FAO/WHO.

Codex Alimentarius Commission. (2024). Code of practice on good animal feeding (CXC 54-2004). FAO/WHO.

Coleman, S. W., & Moore, J. E. (2003). Feed quality and animal performance. Field Crops Research, 84(1–2), 17–29. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00138-2

Cope, R. B. (2025). Cottonseed toxicity. In R. C. Gupta (Ed.), Veterinary toxicology: Basic and clinical principles (4th ed., pp. 973–986). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-29007-7.00068-6

Edberg, S. C., Rice, E. W., Karlin, R. J., & Allen, M. J. (2000). Escherichia coli: The best biological drinking water indicator for public health protection. Journal of Applied Microbiology, 88(S1), 106S–116S. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2000.tb05338.x

EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2012). Scientific opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. EFSA Journal, 10(12), 2985. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2985

European Commission. (2024). Commission Delegated Regulation (EU) 2024/1229 of 20 February 2024 supplementing Regulation (EU) 2019/4 by establishing specific maximum levels of cross-contamination of antimicrobial active substances in non-target feed and methods of analysis for these substances in feed. Official Journal of the European Union.

European Commission. (2026). Guidance document for the evaluation of homogeneity of feed and the cross-contamination (C/2026/1724). Official Journal of the European Union, C/2026/1807.

European Food Safety Authority. (2009). Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on cadmium in food. EFSA Journal, 7(3), 980. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.98

European Food Safety Authority. (2011). Scientific opinion on the risks for public health related to the presence of zearalenone in food. EFSA Journal, 9(6), 2197. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2197

European Food Safety Authority. (2017). Risks to human and animal health related to the presence of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms in food and feed. EFSA Journal, 15(9), 4718.

European Food Safety Authority. (2018). Appropriateness to set a group health-based guidance value for fumonisins and their modified forms. EFSA Journal, 16(2), 5172. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5172

European Food Safety Authority. (2020a). Risk assessment of aflatoxins in food. EFSA Journal, 18(3), e06040. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6040

European Food Safety Authority. (2020b). Risk assessment of nitrate and nitrite in feed. EFSA Journal, 18(11), 6290. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6290

European Food Safety Authority. (2020c). Risk assessment of ochratoxin A in food. EFSA Journal, 18(5), 6113. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6113

European Food Safety Authority. (2024). Update of the risk assessment of inorganic arsenic in food. EFSA Journal, 22(1), e8488. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8488

European Food Safety Authority. (2025). Risks for animal health related to the presence of tropane alkaloids in feed. EFSA Journal, 23(2).

European Food Safety Authority. (2026a). Annual call for continuous collection of chemical contaminants occurrence data in food and feed—2026. EFSA.

European Food Safety Authority. (2026b). Chemical contaminants in food and feed. EFSA.

European Food Safety Authority. (2026c). Mycotoxins. EFSA.

European Food Safety Authority. (2026d). Update of the risk assessment of dioxins and dioxin-like PCBs in feed and food. EFSA Journal, 24(6), e10103. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2026.10103

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2004). Assessing quality and safety of animal feeds (FAO Animal Production and Health Paper No. 160). FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). Quality assurance for animal feed analysis laboratories (FAO Animal Production and Health Manual No. 14). FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). Hazards associated with animal feed. FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, & International Feed Industry Federation. (2010). Good practices for the feed industry: Implementing the Codex Alimentarius Code of Practice on Good Animal Feeding (FAO Animal Production and Health Manual No. 9). FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, & World Health Organization. (2007). Animal feed impact on food safety: Report of the FAO/WHO Expert Meeting, FAO Headquarters, Rome, 8–12 October 2007. FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, & World Health Organization. (2019). Carry-over in feed and transfer from feed to food of unavoidable and unintended residues of approved veterinary drugs: Report of the Joint FAO/WHO Expert Meeting, Rome, 8–10 January 2019. FAO Animal Production and Health Report No. 13.

FAO/WHO Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. (2024). Residues of some veterinary drugs in foods and animals: Online database. FAO/WHO.

Fodor, J., Pósa, A., & Szabó, A. (2024). Pathological consequences, metabolism and toxic effects of trichothecene T-2 toxin in poultry. Poultry Science, 103(3), 103471. https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103471

Gadelha, I. C. N., Fonseca, N. B. S., Oloris, S. C. S., Melo, M. M., & Soto-Blanco, B. (2014). Gossypol toxicity from cottonseed products. The Scientific World Journal, 2014, Article 231635. https://doi.org/10.1155/2014/231635

Giugliano, R., Armenio, V., Savio, V., Vaccaro, E., Ciccotelli, V., & Vivaldi, B. (2024). Monitoring of non-maximum-residue-level pesticides in animal feed: A study from 2019 to 2023. Toxics, 12(9), 680. https://doi.org/10.3390/toxics12090680

Gizzi, G., & Givens, D. I. (2004). Variability in feed composition and its impact on animal production. In G. M. R. D'Mello (Ed.), Assessing quality and safety of animal feeds (FAO Animal Production and Health Paper No. 160). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Glencross, B. D. (2020). A feed is still only as good as its ingredients: An update on the nutritional research strategies for the optimal evaluation of ingredients for aquaculture feeds. Aquaculture Nutrition, 26(6), 1871–1883. https://doi.org/10.1111/anu.13138

Gruber-Dorninger, C., Jenkins, T., & Schatzmayr, G. (2019). Global mycotoxin occurrence in feed: A ten-year survey. Toxins, 11(7), 375. https://doi.org/10.3390/toxins11070375

Hung, Y. T., Hanson, A. R., Shurson, G. C., & Urriola, P. E. (2017). Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. Animal Feed Science and Technology, 231, 47–58. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.06.013

Huss, A., Cochrane, R., Muckey, M., & Jones, C. (2018). Animal feed mill biosecurity. In Food and feed safety systems and analysis (pp. 63–81). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811835-1.00004-X

International Organization for Standardization. (2018). ISO 22000:2018: Food safety management systems—Requirements for any organization in the food chain. ISO.

Jia, Q., Liao, G.-Q., Chen, L., Qian, Y.-Z., Yan, X., & Qiu, J. (2024). Pesticide residues in animal-derived food: Current state and perspectives. Food Chemistry, 438, 137974. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137974

Kerr, B. J., Hung, Y. T., Chen, C., & Shurson, G. C. (2026). Aldehydes are key for assessing dietary lipid oxidation and subsequent effects on pig growth performance. Journal of Animal Science, 104, skaf407. https://doi.org/10.1093/jas/skaf407

Kerr, B. J., Kellner, T. A., & Shurson, G. C. (2015). Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. Journal of Animal Science and Biotechnology, 6, 30. https://doi.org/10.1186/s40104-015-0028-x

Khan, Z. I., Hussain, M. I., Ahmad, K., Naeem, M., Ali, A. M., Elshikh, M. S., Zaman, Q. U., Iqbal, K., Muscolo, A., & Yang, H.-H. (2024). Toxicity and bioassimilation of lead and nickel in farm ruminants fed on diversified forage crops grown on contaminated soil. Ecotoxicology and Environmental Safety, 283, 116812. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116812

Lee, S. A., Lopez, D. A., & Stein, H. H. (2023). Mineral composition and phosphorus digestibility in feed phosphates fed to pigs and poultry. Animal Bioscience, 36(2), 167–174. https://doi.org/10.5713/ab.22.0322

Li, S.-J., Zhang, G., Xue, B., Ding, Q., Han, L., Huang, J.-C., Wu, F., Li, C., & Yang, C. (2022). Toxicity and detoxification of T-2 toxin in poultry. Food and Chemical Toxicology, 169, 113392. https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113392

Lopez, D. A., Lee, S. A., & Stein, H. H. (2022). Effects of microbial phytase on standardized total tract digestibility of phosphorus in feed phosphates fed to growing pigs. Journal of Animal Science, 100(12), skac350. https://doi.org/10.1093/jas/skac350

López-Hernández, L. H., Ordaz-Ochoa, G., Fondevila, M., & Pérez-Alvarado, M. A. (2026). Characterization and schematic modeling of oxidized fat use in swine feeding: Metabolic and productive consequences—A review. Animals, 16(4), 578. https://doi.org/10.3390/ani16040578

Magan, N., Medina, A., & Aldred, D. (2011). Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre- and postharvest. Plant Pathology, 60(1), 150–163. https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02412.x

Mawson, R., Heaney, R. K., Zdunczyk, Z., & Kozłowska, H. (1994). Rapeseed meal-glucosinolates and their antinutritional effects. Part 4. Goitrogenicity and internal organs abnormalities in animals. Nahrung, 38(2), 178–191. https://doi.org/10.1002/food.19940380210

McDonald, P., Greenhalgh, J. F. D., Morgan, C. A., Edwards, R. A., Sinclair, L. A., & Wilkinson, R. G. (2022). Animal nutrition (8th ed.). Pearson.

Mertens, D. R. (2002). Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beakers or crucibles: Collaborative study. Journal of AOAC International, 85(6), 1217–1240. https://doi.org/10.1093/jaoac/85.6.1217

Mondal, R., Majumdar, A., Sarkar, S., Goswami, C., Joardar, M., Das, A., Mukhopadhyay, P. K., & Roychowdhury, T. (2024). An extensive review of arsenic dynamics and its distribution in soil-aqueous-rice plant systems in South and Southeast Asia with bibliographic and meta-data analysis. Chemosphere, 352, 141460. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141460

Naidu, R., Biswas, B., Nuruzzaman, M., et al. (2025). Bioremediation of heavy metal(loid)s in agricultural soils and crops. Nature Reviews Bioengineering, 3, 1005–1018. https://doi.org/10.1038/s44222-025-00345-y

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2012). Nutrient requirements of swine (11th rev. ed.). The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/13298

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). Nutrient requirements of dairy cattle: Eighth revised edition. The National Academies Press.

Nuutinen, M. (2023). Detection of physical hazards. In Food safety management (2nd ed., pp. 475–493). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820013-1.00035-8

Olson, E. G., Grenda, T., Ghosh, A., & Ricke, S. C. (2023). Microbial pathogen contamination of animal feed. In Present knowledge in food safety: A risk-based approach through the food chain (pp. 378–393). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819470-6.00023-8

Parker, E. M., Valcanis, M., Edwards, L. J., Andersson, P., Mollenkopf, D. F., & Wittum, T. E. (2022). Antimicrobial-resistant Salmonella is detected more frequently in feed milling equipment than in raw feed components or processed animal feed. Australian Veterinary Journal, 100(5), 213–219. https://doi.org/10.1111/avj.13146

Payros, D., Alassane-Kpembi, I., Pierron, A., Loiseau, N., Pinton, P., & Oswald, I. P. (2016). Toxicology of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms. Archives of Toxicology, 90(12), 2931–2957. https://doi.org/10.1007/s00204-016-1826-4

Pesti, G. M. (2009). Impact of dietary nutrient requirements of poultry on feed formulation and ingredient selection. Journal of Applied Poultry Research, 18(3), 477–485.

Pierron, A., Mimoun, S., Murate, L. S., Loiseau, N., Lippi, Y., Bracarense, A.-P. F. L., Liaubet, L., Schatzmayr, G., Berthiller, F., Moll, W.-D., & Oswald, I. P. (2016). Intestinal toxicity of the masked mycotoxin deoxynivalenol-3-β-D-glucoside. Archives of Toxicology, 90(8), 2037–2046. https://doi.org/10.1007/s00204-015-1592-8

Pleadin, J. (2015). Mycotoxins in grains and feed—Contamination and toxic effect in animals. Biotechnology in Animal Husbandry, 31(4), 441–456. https://doi.org/10.2298/BAH1504441P

Prata, J. C. (2024). (Micro)plastic foreign bodies in food and feed: Notifications in the European Union. Microplastics, 3(4), 742–754. https://doi.org/10.3390/microplastics3040046

Ravindran, V. (2020). Poultry feed availability and nutrition in developing countries. Poultry Science, 99, 12–20.

Sapkota, A. R., Lefferts, L. Y., McKenzie, S., & Walker, P. (2007). What do we feed to food-production animals? A review of animal feed ingredients and their potential impacts on human health. Environmental Health Perspectives, 115(5), 663–670. https://doi.org/10.1289/ehp.9760

Sargeant, J. M., Totton, S. C., Plishka, M., & Vriezen, E. R. (2021). Salmonella in animal feeds: A scoping review. Frontiers in Veterinary Science, 8, 727495. https://doi.org/10.3389/fvets.2021.727495

Shurson, G. C., Hung, Y. T., Jang, J. C., & Urriola, P. E. (2021). Measures matter—Determining the true nutri-physiological value of feed ingredients for swine. Animals, 11(5), 1259. https://doi.org/10.3390/ani11051259

Shurson, G. C., Kerr, B. J., & Hanson, A. R. (2015). Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. Journal of Animal Science and Biotechnology, 6, 10. https://doi.org/10.1186/s40104-015-0005

Stein, H. H., Fuller, M. F., Moughan, P. J., Sève, B., Mosenthin, R., Jansman, A. J. M., Fernández, J. A., & de Lange, C. F. M. (2007). Definition of apparent, true, and standardized ileal digestibility of amino acids in pigs. Livestock Science, 109(1–3), 282–285. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.01.019

Stoev, S. D. (2010). Food safety and increasing hazard of mycotoxins in animal feed. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 50(6), 469–486. https://doi.org/10.1080/10408390802145440

Stoev, S. D. (2024). Food security, underestimated hazard of joint mycotoxin exposure and management of the risk of mycotoxin contamination. Food Control, 159, 110235. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110235

Sulyok, M., Stadler, D., Steiner, D., & Krska, R. (2020). Validation of an LC-MS/MS-based dilute-and-shoot approach for the quantification of >500 mycotoxins and other secondary metabolites in food crops: Challenges and solutions. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 412, 2607–2620. https://doi.org/10.1007/s00216-020-02489-9

Świątkiewicz, S., Arczewska-Włosek, A., & Józefiak, D. (2014). The efficacy of dietary phytase in poultry nutrition—A review. Annals of Animal Science, 14(1), 5–21.

Thiex, N. J., & Ramsey, C. A. (2023). Piloting a proficiency testing program for laboratory sampling of animal feed materials. Journal of AOAC International, 106(2), 472–483. https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsac117

Thomas, M., & van der Poel, A. F. B. (1996). Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. Animal Feed Science and Technology, 61, 89–112. https://doi.org/10.1016/0377-8401(96)00949-2

Thomas, M., van Zuilichem, D. J., & van der Poel, A. F. B. (1997). Physical quality of pelleted animal feed 2. Contribution of processes and its conditions. Animal Feed Science and Technology, 64, 173–192. https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)01058-9

Thomas, M., & van der Poel, A. F. B. (2020). Fundamental factors in feed manufacturing: Towards a unifying conditioning/pelleting framework. Animal Feed Science and Technology, 268, 114612. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114612

Tolosa, J., Rodríguez-Carrasco, Y., Ruiz, M. J., & Vila-Donat, P. (2021). Multi-mycotoxin occurrence in feed, metabolism and carry-over to animal-derived food products: A review. Food and Chemical Toxicology, 158, 112661. https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112661

Tripathi, M. K., & Mishra, A. S. (2007). Glucosinolates in animal nutrition: A review. Animal F.

Udoh, J. M., Cardwell, K. F., & Ikotun, T. (2000). Storage structures and aflatoxin content of maize in five agroecological zones of Nigeria. Journal of Stored Products Research, 36(2), 187–201. https://doi.org/10.1016/S0022-474X(99)00042-9

van der Fels-Klerx, H. J., van Asselt, E. D., van Leeuwen, S. P. J., Dorgelo, F. O., & Hoek-van den Hil, E. F. (2024). Prioritization of chemical food safety hazards in the European feed supply chain. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 23(6), e70025. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70025

van der Poel, A. F. B., Abdollahi, M. R., Cheng, H., Colovic, R., den Hartog, L. A., Miladinovic, D., Page, G., Sijssens, K., Smillie, J. F., Thomas, M., Wang, W., Yu, P., & Hendriks, W. H. (2020). Future directions of animal feed technology research to meet the challenges of a changing world. Animal Feed Science and Technology, 270, 114692. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114692

Voss, K. A., Smith, G. W., & Haschek, W. M. (2007). Fumonisins: Toxicokinetics, mechanism of action and toxicity. Animal Feed Science and Technology, 137(3–4), 299–325. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.06.007

Vukmirović, D., Čolović, R., Rakita, S., Brlek, T., Đuragić, O., & Solà-Oriol, D. (2017). Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition—A review. Animal Feed Science and Technology, 233, 133–144. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.06.016

Vukmirović, D., Fišteš, A., Lević, J., Čolović, R., Rakić, D., Brlek, T., & Banjac, V. (2017). Possibilities for preservation of coarse particles in pelleting process to improve feed quality characteristics. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 101(5), 857–867. https://doi.org/10.1111/jpn.12489

Wu, G. (2014). Dietary requirements of synthesizable amino acids by animals: A paradigm shift in protein nutrition. Journal of Animal Science and Biotechnology, 5, 34.

Zhang, S., Zhang, J., Niu, L., Chen, Q., Zhou, Q., Xiao, N., Man, J., Ma, J., Wei, C., Zhang, S., Luo, Y., et al. (2024). Escalating arsenic contamination throughout Chinese soils. Nature Sustainability, 7, 766–775. https://doi.org/10.1038/s41893-024-01341-7

Zinedine, A., Soriano, J. M., Juan, C., & Moll, M. (2007). Review on the toxicity, occurrence, metabolism, detoxification, regulations and intake of zearalenone: An oestrogenic mycotoxin. Food and Chemical Toxicology, 45(1), 1–18. https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.07.030

BÖLÜM 23

Manda Yetiştiriciliğinde Termal Stres (Sıcaklık ve Soğuk Stresi): Besleme, Fizyolojik Yanıtlar ve Azaltma Stratejileri

Ayşe Şen[1]
Fisun Koç[2]

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-9486-1992
[2] Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-5978-9232

1. Giriş

Manda (*Bubalus bubalis*), başta Asya olmak üzere Akdeniz havzası ve dünyanın farklı bölgelerinde süt, et ve diğer hayvansal ürünlerin elde edilmesinde kullanılan önemli bir çiftlik hayvanıdır. Su mandaları genel olarak nehir ve bataklık mandaları şeklinde sınıflandırılmakta, süt üretimi bakımından özellikle nehir mandaları ön plana çıkmaktadır (Uğurlu, 2017). Dünya genelinde Murrah, Nili-Ravi ve İtalyan Akdeniz mandası yüksek süt verimleri nedeniyle yaygın olarak yetiştirilen genotipler arasında yer almaktadır.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarında vurgulandığı üzere, küresel ortalama sıcaklıklardaki artış ve aşırı sıcak hava dalgalarının sıklığındaki yükseliş, önümüzdeki yıllarda hayvansal üretim sistemlerini daha da güçlü şekilde etkilemesi beklenen bir eğilimdir. Bu durum, manda gibi nispeten sınırlı sayıda araştırma kaynağına sahip türlerde dahi sıcaklık stresi konusunun öncelikli bir araştırma ve uygulama alanı haline gelmesini gerekli kılmaktadır (Thornton, Nelson, Mayberry ve Herrero, 2022).

Manda sütü, yüksek yağ ve protein içeriği nedeniyle özellikle peynir üretiminde değerli bir hammaddedir (Garau, Manis, Scano ve Caboni, 2021). İtalyan Akdeniz mandalarında süt üretiminin yoğun olarak gerçekleştirildiği sistemlerde mısır silajı, konsantre yemler, kuru ot ve saman içeren toplam karma rasyonlar (TKR) yaygın biçimde kullanılmaktadır (Tufarelli, Dario ve Laudadio, 2008; Uğurlu, 2017).

Manda yetiştiriciliğinin sürdürülebilirliği açısından çevresel sıcaklık önemli bir belirleyicidir. İklim değişikliğiyle birlikte sıcaklıkların artması, aşırı sıcak hava olaylarının daha sık görülmesi ve su kaynaklarına erişimin zorlaşması, hayvanların çevresel stres yükünü artırmaktadır. Sıcaklık stresi, hayvanın metabolik veya çevresel kaynaklı ısıyı yeterince uzaklaştıramaması sonucunda ortaya çıkan bir durumdur (Napolitano vd., 2023).

Mandalar sıcak ve nemli iklimlere önemli ölçüde adapte olmuş hayvanlar olmakla birlikte, bu durum sıcaklık stresine karşı tamamen dirençli oldukları anlamına gelmemektedir. Özellikle yüksek sıcaklığın yüksek nem ve doğrudan güneş radyasyonu ile birleştiği koşullarda termoregülasyon güçleşmekte ve üretim performansı olumsuz etkilenmektedir (Marai ve Haeeb, 2010).

Modern manda yetiştiriciliğinde sıcaklık stresi, tek başına bir çevre problemi değil, besleme, hayvan davranışı, süt üretimi, üreme, sağlık ve refahı birlikte etkileyen çok faktörlü bir üretim sorunu olarak ele alınmalıdır. Bu bölümün amacı, manda yetiştiriciliğinde sıcaklık stresinin oluşum mekanizmalarını, fizyolojik ve davranışsal yansımalarını, besleme ve üretim performansı üzerindeki etkilerini, ıslah ve yönetim açısından değerlendirilme biçimlerini güncel literatür ışığında geniş bir çerçevede ele almak ve bu sayede araştırmacılara ve saha uygulayıcılarına kapsamlı bir başvuru kaynağı sunmaktır.

2. Dünyada ve Türkiye'de Manda Yetiştiriciliği ve Sıcaklık Stresinin Sektörel Önemi

Dünya manda popülasyonu günümüzde yaklaşık 200 milyon başa yaklaşmakta olup büyük çoğunluğu Güney ve Güneydoğu Asya'da, özellikle Hindistan, Pakistan ve Çin'de yetiştirilmektedir. Nehir mandaları (2n=50 kromozom) yüksek süt verimi potansiyeliyle (ortalama 1400-1500 kg laktasyon) öne çıkarken, bataklık mandaları (2n=48 kromozom) daha çok iş gücü amaçlı kullanılmakta ve daha düşük süt verimine (ortalama 600 kg) sahiptir (Uğurlu, 2017).

Türkiye'de yetiştirilen mandalar, Akdeniz mandası grubunun bir alt tipi olan Anadolu mandası olarak adlandırılmakta ve başta Orta Karadeniz Bölgesi (Samsun, Tokat, Amasya, Çorum) olmak üzere Doğu Anadolu, Marmara ve Ege bölgelerinde yetiştiriciliği sürdürülmektedir (Uğurlu, 2017). Türkiye'de manda popülasyonu 1961 yılında yaklaşık 1 milyon 140 bin baş iken, entansif sığır yetiştiriciliğine geçiş ve verim odaklı tercihler nedeniyle 2022 yılı itibarıyla yaklaşık 170-185 bin başa gerilemiştir (Özdemir ve Çınar, 2023). 'Anadolu Mandasının Halk Elinde Islah Projesi' gibi devlet destekli çalışmalarla son yıllarda bazı illerde manda sayısında belirgin artışlar kaydedilmiştir (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, t.y.; Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK], 2023).

Sıcaklık stresi artık tropikal ve subtropikal manda üretim bölgeleriyle sınırlı bir sorun değildir; Türkiye'nin de içinde bulunduğu Akdeniz iklim kuşağında da giderek daha kritik bir üretim faktörü hâline gelmektedir. Özellikle yaz aylarında Orta Karadeniz ve İç Anadolu'da görülen yüksek sıcaklık-nem kombinasyonları, sınırlı sayıdaki Anadolu mandası popülasyonunun sürdürülebilirliği açısından ilave bir risk oluşturmaktadır. Manda ıslahına yönelik ulusal projelerin sıcaklık stresi yönetimini de kapsayacak şekilde genişletilmesi hem hayvan refahı hem de bu genetik kaynağın korunması bakımından önem taşımaktadır (Napolitano vd., 2023).

3. Mandalarda Sıcaklık Stresinin Oluşumu

3.1. Termonötral bölge ve sıcaklık stresi

Termonötral bölge, hayvanın vücut homeostazisini koruyabilmek için metabolik enerji harcamasını önemli ölçüde artırmasına gerek olmayan çevresel sıcaklık aralığıdır. Çevre sıcaklığının üst kritik sıcaklığın üzerine çıkması durumunda hayvanın vücut sıcaklığını sabit tutabilmek için termoregülasyon mekanizmalarını aktive etmesi gerekir. Mandalarda sıcaklık stresinin şiddetini belirleyen tek etken hava sıcaklığı değildir; bağıl nem, güneş radyasyonu, hava hareketi ve diğer çevresel faktörler de hayvanın toplam ısı yükünü belirler. Bu yüzden değerlendirmede sıcaklığı tek başına ölçmek yerine, sıcaklık ve nemi birlikte ele almak gerekir (Mishra, 2021).

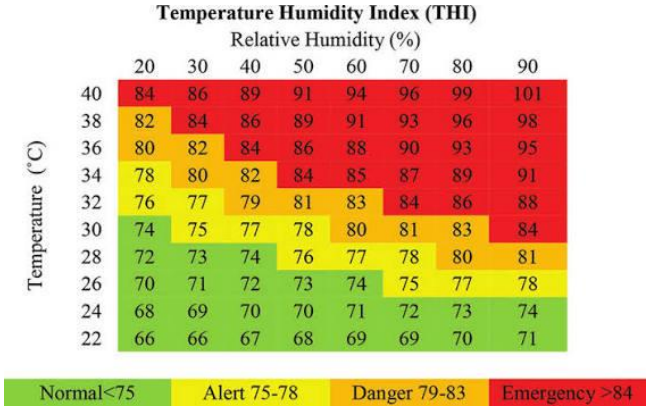
3.2. Sıcaklık-nem indeksi

THI, çevre sıcaklığı ile bağıl nemi tek bir değer altında birleştirerek hayvanların termal stres düzeylerinin değerlendirilmesini sağlayan pratik bir göstergedir.

Mandalarda THI sınıflandırması kaynaklara göre farklılık gösterebilmekle birlikte, genel olarak:

- **THI < 72:** stres yok veya konfor koşulları,
- **THI 72–78/79:** hafif sıcaklık stresi,
- **THI 79/80–88/89:** orta düzey sıcaklık stresi,
- **THI ≥ 89/90:** şiddetli sıcaklık stresi

şeklinde değerlendirilebilmektedir (Şekil 1). Bununla birlikte, eşik değerlerin ırk, yaş, laktasyon dönemi, verim düzeyi ve mikroklimaya göre değişebileceği dikkate alınmalıdır.



Şekil 1. Sıcaklık-nem indeksi (THI)
Kaynak: Whittier, 1993

Özellikle sütçü mandalarda THI'nin yükselmesiyle birlikte süt veriminde düşüş görülebilmektedir. Bazı araştırmalarda maksimum THI'nin 72'nin üzerine çıkmasının süt verimindeki azalmayı başlattığı, daha belirgin üretim kayıplarının ise yaklaşık 74 ve üzerindeki değerlerde ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Mishra, 2021).

Farklı çalışmalarda kullanılan THI eşik değerleri arasında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar, çalışılan genotip, iklim bölgesi ve THI hesaplama formülündeki küçük değişikliklerden kaynaklanabilmektedir. Tablo 1'de bazı kaynaklarda kullanılan sınıflandırmalar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Farklı kaynaklarda kullanılan THI sınıflandırma eşiklerinin karşılaştırılması

Kaynak	Stres yok	Hafif stres	Orta düzey stres	Şiddetli/kritik stres
Choudhary ve Sirohi (2019)	< 72	72-78/79	79/80-88/89	≥ 89/90
Ismail, Aly, Farag, Kamel ve Fahim (2026)	56,7-73,2	73,2-75,4	75,4-80,3	≥ 80,3 (kritik)
Mishra (2021)	< 72	72-74	74-79	> 79
Umar vd. (2021)	< 68	68-72	73-76	≥ 77 (şiddetli)

4. Mandaların Sıcaklık Stresinin Davranışsal Etkileri

Mandaların sıcaklık stresine yanıtı; davranışsal, fizyolojik, nöroendokrin ve genetik mekanizmaların birlikte çalışmasıyla gerçekleşmektedir. Bu mekanizmalar, hayvanın vücut sıcaklığını mümkün olduğunca sabit tutmasına ve çevresel ısı yüküne uyum sağlamasına yardımcı olur (Ismail vd., 2026).

Mandalar sıcaklık stresine karşı hem fizyolojik hem de belirgin davranışsal yanıtlar göstermektedir (Yáñez-Pizaña vd., 2020).

Sıcaklık stresinin başlangıcında;

- yem tüketim süresi ve miktarı azalabilmekte,
- su tüketimi artabilmekte,
- ruminasyon süresi değişebilmekte,
- ayakta kalma süresi artabilmekte,
- yatma süresi değişebilmekte,
- gölge arama davranışı artabilmekte,
- suya girme ve çamurda yatma davranışı artabilmektedir.

Sıcaklık stresi altında fan ve püskürtme uygulamalarının yatma ve geviş getirme sürelerini destekleyebildiği gözlenmiştir. Çamurda yatma, mandaların su veya çamur içinde yatması şeklindeki doğal termoregülasyon davranışıdır. Manda derisinin koyu renkli olması, seyrek kıl örtüsü ve sınırlı terleme kapasitesi nedeniyle bu davranış özellikle sıcak ve nemli koşullarda önem kazanmaktadır. Evaporasyon yoluyla ısı kaybını kolaylaştırmakta ve rektal sıcaklık ile solunum sayısının düşmesine yardımcı olabilmektedir. Bazı araştırmalarda su içinde

yatmanın duş uygulamalarına göre termoregülasyon açısından daha etkili olduğu gözlenmiştir (Aggarwal ve Singh, 2008).

Sıcak iklimlerde manda yetiştiriciliğinin planlanmasında doğal su kaynaklarının veya uygun tasarlanmış su havuzlarının bulunması, bir refah uygulamasından öte, üretim ve verim açısından da bir gerekliliktir (Petrocchi Jasinski, Evangelista, Basiricò ve Bernabucci, 2023).

4.1. Kuru madde tüketiminde değişim

Sıcaklık stresinin en önemli sonuçlarından biri yem tüketimindeki azalmadır. Çevre sıcaklığının yükselmesiyle mandalarda kuru madde tüketiminin azalması, hayvanın metabolik ısı üretimini sınırlandırmaya yönelik adaptif bir yanıt olarak değerlendirilmektedir. Sıcaklık stresinin özellikle yüksek verimli mandalarda kuru madde tüketimini belirgin biçimde azaltabildiği bildirilmiştir. Bazı çalışmalarda yaz aylarında kuru madde tüketiminde %40'a kadar azalma rapor edilmiştir. Ayrıca sıcaklık stresi altında büyüyen mandalarda canlı ağırlık artışının da azaldığı belirtilmektedir (Verma vd., 2022). Kuru madde tüketiminin azalması, sıcaklık stresinin besleme açısından oluşturduğu temel sorunu meydana getirir. Hayvan daha az yem tüketirken bakım ve termoregülasyon gereksinimleri devam ettiğinden, enerji dengesini koruması zorlaşmaktadır (Mishra, 2021).

4.2. Su tüketimi

Sıcaklık stresinde su tüketiminin artması, hayvanın ısı düzenleme mekanizmalarının doğal bir parçasıdır. Artan solunum, terleme ve diğer yollarla oluşan su kaybının karşılanabilmesi için su tüketimi artmaktadır (Mishra, 2021). Sıcak dönemlerde mandaların önünde sürekli, temiz, taze ve kolay ulaşılabilir su bulundurulması ve suya erişimin kolaylaştırılması, sıcaklık stresinin etkilerini azaltmak için en önemli etmenlerdendir (Michigan State University Extension, 2023). Nitekim sıcak ve nemli dönemlerde laktasyondaki mandalarda günlük içme suyu tüketiminin kışa kıyasla %50'nin üzerinde artabildiği bildirilmiştir (Sharma vd., 2016).

4.3. Solunum sayısı

Solunum sayısı, mandalarda sıcaklık stresinin sahada değerlendirilmesinde kolay ve düşük maliyetli göstergelerden biridir. THI'nin yükselmesiyle solunum sayısında belirgin artış görülmektedir. Bu artış, hayvanın solunum yoluyla ısı kaybını artırmaya çalışmasının bir sonucudur. Solunum sayısındaki artışın ileri düzeyde olması, hayvanın mevcut çevresel ısı yükünü uzaklaştırmakta zorlandığını ve solunum yoluyla evaporatif soğutmaya daha fazla bağımlı hale geldiğini göstermektedir (Mishra, 2021). Örneğin 27-35°C ortam sıcaklığına maruz kalan mandalarda solunum sayısının dakikada 26'dan 87'ye kadar yükselebildiği bildirilmiştir (Napolitano vd., 2023).

4.4. Rektal sıcaklık

Rektal sıcaklık, hayvanın vücut sıcaklığını değerlendirmede kullanılan önemli göstergelerden biridir. Sıcaklık stresine maruz kalan mandalarda rektal sıcaklık genel olarak yükselmekte, ancak sonuçların ırk, yaş, çevre ve yönetim koşullarına göre değişebildiği bildirilmektedir. Doğrudan güneş radyasyonu altında rektal sıcaklığın daha fazla yükselmesi, gölgelendirme uygulamalarının önemini ortaya koymaktadır. Örneğin aynı THI düzeyinde gölgede bulunan mandalarda rektal sıcaklığın daha iyi korunabildiği bildirilmiştir (Brcko vd., 2020; Mishra, 2021). Örneğin 27-35°C ortam sıcaklığına maruz kalan mandalarda rektal sıcaklığın 39,71°C'ye kadar yükselebildiği bildirilmiştir (Napolitano vd., 2023).

4.5. Kalp atım sayısı ve deri sıcaklığı

Sıcaklık stresinde kalp atım sayısı, periferal kan akımının artırılması ve ısının vücut yüzeyine taşınması nedeniyle değişebilmektedir. Ancak literatürde kalp atım hızına ilişkin sonuçlar rektal sıcaklık ve solunum sayısına göre daha değişkendir. Bu farklılıklar ırk, yaş, laktasyon dönemi ve çevresel koşullardan kaynaklanabilmektedir. Deri sıcaklığındaki artış ise vücut içindeki ısının periferal dokulara taşınarak çevreye aktarılmasıyla ilişkilidir (Mishra, 2021). Bir çalışmada, gölgesiz açık barınakta tutulan mandalarda nabız hızının (60,91 atım dk^{-1}), gölgeli ve fanlı barınaktakilere (52,52 atım dk^{-1}) kıyasla belirgin şekilde yüksek olduğu bildirilmiştir (Napolitano vd., 2023).

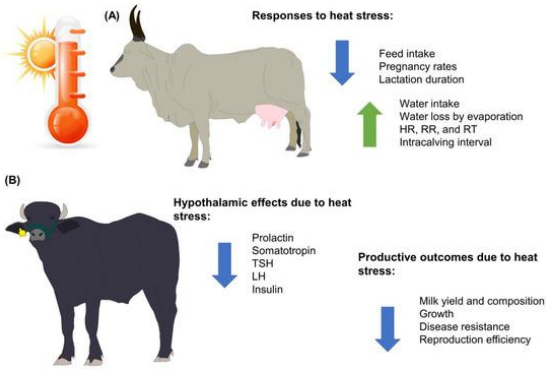
5. Sıcaklık Stresinin Metabolik, Hormonal ve Bağışıklık Sistemi Üzerine Etkileri

Sıcaklık stresi, hayvanlarda nöroendokrin sistemi aktive etmektedir. Hipotalamus-hipofiz-adrenal eksenin aktivasyonu sonucunda kortizol gibi stres hormonlarının düzeyi değişmektedir. Kortizol, sıcaklık stresine karşı metabolik adaptasyonun önemli göstergelerinden biridir (Ismail vd., 2026).

Çalışmalarda sıcaklık stresi altında manda plazma kortizol düzeylerinin arttığı, buna karşılık fan, sprinkler veya wallowing gibi soğutma uygulamalarının kortizol düzeylerini azaltabildiği gözlenmiştir (Petrocchi Jasinski vd., 2023). Aynı çalışmada, gölgesiz barınaktaki mandalarda serum kortizol düzeyinin (4,94 ng mL^{-1}), gölgeli ve fanlı barınaktakilere (3,31 ng mL^{-1}) kıyasla daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Napolitano vd., 2023).

Sıcaklık stresinin tiroid hormonları, insülin, büyüme hormonu ve prolaktin gibi hormonlarda da değişikliklere neden olabildiği bildirilmektedir (Li vd., 2020). Bu hormonal değişiklikler, enerji metabolizmasının üretimden yaşamın sürdürülmesine doğru yeniden yönlendirilmesinde rol oynayabilir. Tiroid hormonları (T3, T4) düzeylerindeki azalma, bazal metabolizma hızının düşürülerek endojen ısı üretiminin sınırlandırılmasına yönelik adaptif bir yanıt olarak yorumlanmaktadır. Büyüme hormonu ve insülin benzeri büyüme faktörü-1 (IGF-1) düzeylerindeki değişimler, enerjinin büyüme ve üretimden ziyade

termoregülasyon ve temel yaşamsal fonksiyonların sürdürülmesine yönlendirilmesiyle ilişkilendirilmektedir (Ismail vd., 2026; Li vd., 2020) (Şekil 2).



Şekil 2. Sıcaklık stresinin *Bos* ve *Bubalus* cinsi sığırlar üzerindeki başlıca etkileri. (A) *Bos* cinsi (sığır) hayvanlarda tepkiler; (B) *Bubalus* cinsi (manda) hayvanlarda hipotalamik hormon düzeyleri ve üretim çıktıları üzerindeki etkiler.
Kaynak: Napolitano vd., 2023

5.1. Kan metabolik parametrelerindeki değişimler

Sıcaklık stresi altında enerji dengesinin bozulmasıyla birlikte kan glikoz düzeyinin azaldığı, buna karşılık serbest yağ asitleri (NEFA) ve beta-hidroksibütirat (BHBA) gibi negatif enerji dengesi göstergelerinin yükselebildiği bildirilmektedir (Li vd., 2021). Bu değişimler, kuru madde tüketimindeki azalmayla birlikte hayvanın vücut yağ rezervlerini mobilize ederek enerji açığını kapatmaya çalıştığının bir işareti olarak yorumlanmaktadır. Plazma protein ve üre azotu düzeylerinde de sıcaklık stresine bağlı değişimler gözlenebilmektedir. Bu durum hem rasyonun protein/enerji dengesinin hem de karaciğer fonksiyonlarının sıcaklık stresinden etkilenebildiğine işaret etmektedir. Bu bulgular ışığında sıcak dönemlerde düzenli kan biyokimyası takibi, sürü düzeyinde metabolik durumun erken değerlendirilmesinde yararlı bir araç olabilir (Ismail vd., 2026; Li vd., 2021).

5.2. Bağışıklık sistemi üzerine etkiler

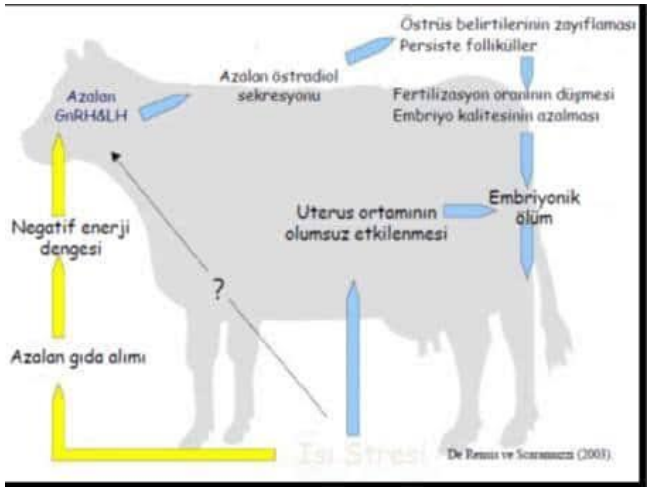
Sıcaklık stresi, hormonal değişimlerin yanı sıra hayvanın bağışıklık fonksiyonlarını da etkilemektedir. Uzun süreli sıcaklık stresine bağlı kortizol yükselmesinin bağışıklık sisteminde baskılayıcı bir etki oluşturabildiği, bunun da hayvanların enfeksiyöz hastalıklara duyarlılığını artırabildiği bildirilmektedir. Bu yüzden sıcak dönemlerde sürü sağlığı takibinde üretim parametrelerinin yanı sıra hastalık insidansı ve bağışıklıkla ilişkili göstergelerin izlenmesi de önerilmektedir (Thornton vd., 2022).

6. Sıcaklık Stresinin Üreme Performansına Etkisi

Sıcaklık stresi, süt üretiminin yanı sıra manda üreme performansı üzerinde de önemli etkilere yol açmaktadır. Yüksek sıcaklık koşullarında kızgınlık belirtilerinin daha az belirgin hâle gelmesi, ovaryum aktivitesinin etkilenmesi ve döl veriminde düşüşler meydana gelebilmektedir. Sıcaklık stresinin uzun süre devam ettiği işletmelerde bu yüzden günlük süt veriminin yanı sıra gebelik oranı, doğum aralığı, kızgınlık gösterme ve postpartum üreme performansı gibi parametrelerin de izlenmesi gerekir (Marai ve Haeeb, 2010).

Gebelik döneminde yaşanan sıcaklık stresinin yalnızca o dönemki performansla sınırlı kalmayabileceği, doğacak yavrunun doğum ağırlığı, bağışıklık gelişimi ve ileriki laktasyon performansını da olumsuz etkileyebileceği (taşınım etkisi) sığır üzerinde yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Bu bulgunun mandalarda da dikkate alınması, kuru dönem ve gebelik sonu yönetiminin sıcaklık stresi açısından planlanmasını gerekli kılmaktadır (Toledo, Dahl ve De Vries, 2022).

Sıcaklık stresinin üreme üzerindeki etkileri yalnızca dişi hayvanlarla sınırlı değildir. Boğalarda da sperma kalitesi (motilite, morfolojik anormallikler) sıcak dönemlerde olumsuz etkilenebilmektedir, ancak ejakulat hacmi üzerindeki etkiler literatürde daha değişken sonuçlar göstermektedir (Petrocchi Jasinski vd., 2023). Ayrıca in vitro embriyo üretimi (OPU-IVEP) uygulamalarının, oosit kalitesinin görece daha iyi olduğu serin dönemlerde gerçekleştirilip embriyoların sıcak dönemde transfer edilmesi, sıcaklık stresinin üreme performansı üzerindeki olumsuz etkilerini aşmaya yönelik pratik bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Di Francesco vd., 2012).



Şekil 3. Sıcaklık stresinin manda üreme fizyolojisi üzerindeki etki mekanizması
Kaynak: De Rensis ve Scaramuzzi, 2003

7. Rumen Fonksiyonları ve Fermantasyon Üzerine Etkiler

Sıcaklık stresi hayvanın davranışsal ve fizyolojik yanıtlarının yanında, rumen ortamını ve fermantasyon karakteristiklerini de etkilemektedir. Çevre sıcaklığının artmasıyla toplam uçucu yağ asidi (VFA) üretiminin azaldığı ve rumen pH'ında değişiklikler meydana geldiği bildirilmektedir (Yadav, Singh, Verma, Dutta ve Sejian, 2013). Ayrıca sindirim kanalında geçiş hızı ve alıkonma süresinin değişmesi, besin madde sindirilebilirliğini de olumsuz etkileyebilmektedir.

Mandalarda yürütülen bir çalışmada sıcaklık stresi altındaki hayvanlarda rumen sıvısında asetik asit ve bütirik asit düzeylerinin azaldığı, rumen mikrobiyal profilinde de belirgin değişimler meydana geldiği gösterilmiştir (Wang vd., 2022). Benzer şekilde malaklar üzerinde yürütülen başka bir çalışmada, sıcaklık stresine maruz kalan hayvanlarda kuru madde sindirilebilirliği ve VFA konsantrasyonunun olumsuz etkilendiği ortaya konmuştur (Yadav vd., 2022).

Rumen mikrobiyotasındaki bu değişimlerin, sıcaklık stresi altında gözlenen kuru madde tüketimindeki azalma ve süt yağı oranındaki düşüşle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Sıcak dönemlerde rasyon formülasyonunda enerji ve lif düzeyinin yanı sıra, rumen fermantasyonunu destekleyici katkı maddelerinin (maya kültürü, tamponlayıcı ajanlar gibi) kullanımı da değerlendirilmelidir (Wang vd., 2022).

Bu bulgular, sıcak dönemlerde rasyonda kolay fermente olabilen karbonhidrat kaynaklarının payının dikkatli şekilde sınırlandırılmasının ve yeterli fiziksel etkili lif sağlanmasının, rumen asidozu riskinin azaltılması açısından önem taşıdığını göstermektedir (Yadav vd., 2013).

8. Sıcaklık Stresinin Süt Verimi ve Süt Kompozisyonuna Etkisi

Sıcaklık stresinin manda süt üretimi üzerindeki etkisi; yem tüketimi, enerji dengesi, hormonal değişimler ve metabolik adaptasyonların birlikte bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bazı uzun dönemli çalışmalarda yaz aylarında manda süt veriminin kış dönemine göre önemli ölçüde düşük olduğu gözlenmiştir. Örneğin Murrah mandalarında kış dönemindeki 305 günlük süt veriminin yaz döneminden daha yüksek olduğu ve THI'nin 74'ten 83'e yükselmesiyle günlük süt veriminin azaldığı bildirilmiştir (Mishra, 2021).

Sıcaklık stresinin süt verimi üzerindeki etkisinin genotipe göre farklılık gösterebildiği de görülmektedir. Tropikal çevreye daha fazla adapte olmuş genotiplerde üretim kaybı daha sınırlı olabilirken, Akdeniz kökenli genotiplerde sıcaklık stresine duyarlılık daha belirgin olabilmektedir (Carabaño, Ramón, Menéndez-Buxadera, Molina ve Díaz, 2019).

8.1. Süt yağı

Süt yağı, sıcaklık stresinden etkilenebilen önemli süt bileşenlerinden biridir. Literatürde sonuçlar tam olarak uyumlu olmamakla birlikte, birçok çalışmada sıcak koşullarda süt yağ oranının azaldığı gözlenmektedir. Murrah mandalarında THI'deki her bir birimlik artışa karşılık süt yağ oranında yaklaşık 0,047 puanlık azalma bildirilen çalışmalar bulunmaktadır (Mishra, 2021).

Bu değişim, sıcaklık stresine bağlı olarak yem tüketiminin, rumen fermentasyonunun ve enerji metabolizmasının değişmesiyle ilişkili olabilir (Wang vd., 2022).

8.2. Süt proteini

Süt proteinine ilişkin sonuçlar daha değişkendir. Bazı çalışmalarda sıcaklık stresinin süt protein oranını değiştirmediği, bazı araştırmalarda ise özellikle yüksek THI değerlerinde protein oranının azaldığı tespit edilmiştir. Bu farklılık, sıcaklık stresinin yanı sıra laktasyon dönemi, besleme, genotip ve işletme koşullarının süt proteinini birlikte etkilemesiyle açıklanabilir (Costa vd., 2020; Mishra, 2021).

8.3. Laktoz

Laktoz bakımından araştırma sonuçları farklılık göstermektedir. Bazı çalışmalarda THI yükseldikçe laktoz oranının azaldığı, bazı çalışmalarda ise yaz döneminde daha yüksek laktoz oranları elde edildiği bildirilmiştir. Manda sütünde laktoz değişiminin yalnızca sıcaklık stresiyle açıklanması yerine çevresel ve fizyolojik faktörlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Costa vd., 2020; Mishra, 2021).

8.4. Süt kalitesi ve peynir verimine yansımalar

Manda sütünün yüksek yağ ve protein içeriği, özellikle ‘mozzarella di bufala’ gibi katma değerli peynir üretiminde önemli bir hammadde özelliği taşımaktadır. Sıcaklık stresine bağlı süt yağı ve protein oranındaki azalmalar, ham süt veriminin ötesinde peynir verimi ve pıhtılaşma özelliklerinde de olumsuzluklara yol açabilmektedir. Sıcak dönemlerde süt kompozisyonundaki değişimlerinin hem üretim hem de işleme aşamalarının izlenmesi önerilmektedir (Petrocchi Jasinski vd., 2023).

9. Farklı Fizyolojik Dönemlerde Sıcaklık Stresi Yönetimi

9.1. Kuru dönem ve geçiş dönemi

Sıcaklık stresi yönetimi laktasyondaki hayvanlar üzerinden ele alındığında, kuru dönem ve geçiş dönemindeki sıcaklık stresinin de bir sonraki laktasyon performansı üzerinde belirleyici etkileri bulunduğu görülmektedir. Sığırlarda yapılan çalışmalarda sıcaklık stresinin, kuru dönemde hayvanlarda meme bezi involüsyon ve yeniden gelişim süreçlerinin olumsuz etkilediği, hepatik

metabolizma ve hücresel bağışıklık fonksiyonlarını baskılandığı ve bir sonraki laktasyonda süt verimini azalttığı görülmektedir (Do Amaral vd., 2011; Tao vd., 2011). Bu bulguların manda işletmelerine de uyarlanması, kuru dönem yönetiminin sıcak aylara denk gelmesi durumunda strese yönelik işletme yönetiminde önlemlerin alınmasını gerektirmektedir. Geçiş dönemi (doğum öncesi ve sonrası yaklaşık üç haftalık dönem), hayvanın metabolik olarak en hassas olduğu evredir. Bu dönemde sıcaklık stresine ek olarak maruziyet, gestasyon süresinin kısalmasına, doğum ağırlığının düşmesine ve postpartum bağışıklık/üreme performansının zayıflamasına yol açabilmektedir (Fabris vd., 2019). Bu yüzden manda işletmelerinde kuru dönem ve geçiş dönemindeki hayvanların da laktasyondaki hayvanlarla eşdeğer düzeyde gölgelendirme ve soğutma imkânlarına erişimi sağlanmalıdır.

9.2. Erken, orta ve geç laktasyon dönemi

Sıcaklık stresine duyarlılık laktasyon dönemine göre de farklılık göstermektedir. Erken laktasyondaki yüksek verimli mandalarda metabolik ısı üretimi daha fazla olduğundan sıcaklık stresine duyarlılık artabilirken, geç laktasyon döneminde düşen verimle birlikte bu duyarlılığın nispeten azaldığı gözlenmektedir. Bu farklılık, rasyon enerji yoğunluğu ve soğutma uygulamalarının laktasyon dönemine göre kademeli olarak planlanmasını gerekli kılmaktadır (Fabris vd., 2019).

9.3. Genç hayvanlarda (malak ve düve) sıcaklık stresi

Sıcaklık stresi yönetimi genellikle sağmal ve gebe hayvanlar üzerinden ele alınmakla birlikte, malak ve düve dönemi de bakım ve besleme açısından dikkat gerektirmektedir. Genç hayvanlarda termoregülasyon mekanizmaları tam olarak olgunlaşmamış olduğundan, yüksek sıcaklık-nem koşullarına maruz kalınması büyüme performansını, bağışıklık gelişimini ve ilerideki üreme ve verim potansiyelini olumsuz etkileyebilmektedir (Gabr, 2025). Malak barınaklarında da yeterli gölgelendirme, havalandırma ve temiz su erişiminin sağlanması, sadece sağmal grubu değil tüm yaş gruplarını kapsayan bir sıcaklık stresi yönetim planının parçası olmalıdır. Özellikle sütten kesim öncesi dönemde yaşanan sıcaklık stresinin, hayvanın ilk laktasyon performansına kadar uzanan olumsuz etkileri olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Gabr, 2025; Ismail vd., 2026).

10. Sıcaklık Stresi ve Manda Beslemesi

Sıcaklık stresinin besleme üzerindeki temel etkisi, yem tüketiminin azalması ve buna bağlı olarak besin madde alımının düşmesidir. Çevre sıcaklığının yükselmesiyle hayvan metabolik ısı üretimini azaltmak amacıyla yem tüketimini baskılayabilmektedir. Bu durum özellikle yüksek verimli sağmal mandalarda önemlidir. Çünkü süt üretimi için gerekli enerji ve besin maddelerinin alınması azalırken, termoregülasyon için gereken enerji harcaması devam etmektedir (Mishra, 2021).

10.1. Rasyonun düzenlenmesi

Sıcaklık stresinde kuru madde tüketimi azaldığından, rasyonun birim kuru madde başına sağladığı besin madde yoğunluğunun uygun şekilde düzenlenmesi önemlidir. Ancak enerji yoğunluğunun artırılması yapılırken rumen sağlığı ve fiziksel etkili lif gereksinimi göz ardı edilmemelidir (Yadav vd., 2013).

Rasyonun;

- yeterli enerji,
- uygun düzeyde fiziksel etkili lif,
- dengeli protein,
- yeterli mineral,
- uygun vitamin düzeyi

sağlaması gerekmektedir.

10.2. Yemleme zamanı

Sıcaklık stresinin yoğun olduğu dönemlerde yemlemenin günün daha serin saatlerine kaydırılması, yem tüketiminin desteklenmesine yardımcı olabilmektedir. Özellikle akşam ve gece saatlerinde yem tüketiminin artırılması, hayvanların yüksek çevre sıcaklığının baskılayıcı etkisini azaltabilir (Michigan State University Extension, 2023).

10.3. Toplam karma rasyon yönetimi

Toplam karma rasyon (TKR), mandalarda besin maddelerinin daha homojen alınmasını sağlamak açısından önemli bir yemleme sistemidir. Sıcaklık stresi koşullarında ise rasyon formülasyonunun yanı sıra yemin fiziksel özellikleri, yemlikte kalma süresi ve yem seçimi de önem kazanmaktadır. Yemin yemlikte uzun süre kalması, özellikle sıcak ve nemli koşullarda fiziksel ve kimyasal özelliklerin değişmesine neden olabilir. Bu nedenle sıcaklık stresinin yoğun olduğu dönemlerde TKR'nin tazeliğinin korunması, yemlik yönetiminin sıkılaştırılması ve yem artıklarının kontrol edilmesi gerekir (Aggarwal ve Upadhyay, 2013).

10.4. Rasyona sıcaklık stresine karşı destekleyici katkı maddelerinin eklenmesi

Sıcaklık stresi koşullarında rasyona eklenen bazı katkı maddeleri, kuru madde tüketimindeki azalmanın ve metabolik dengesizliklerin telafi edilmesine katkı sağlayabilmektedir. Sodyum bikarbonat ve potasyum karbonat gibi tamponlayıcı ajanlar, artan solunum sayısına bağlı asit-baz dengesizliğinin (respiratuar alkaloz) telafi edilmesine ve rumen pH'ının stabilize edilmesine yardımcı olmaktadır (Aggarwal ve Upadhyay, 2013; Schneider, Beede, Wilcox ve Collier, 1984)

Betain, hücresel ozmotik dengenin korunmasında rol oynayan bir metil grubu vericisidir. Sıcaklık stresi koşullarında rasyona eklenmesinin kuru madde tüketimi ve süt verimi üzerinde olumlu etkiler oluşturabildiği bildirilmektedir (Abhijith, Dunshea, Chauhan, Sejian ve DiGiacomo, 2024). Organik krom desteğinin ise insülin duyarlılığını artırarak enerji metabolizmasını desteklediği ve sıcaklık stresi altındaki hayvanlarda performans kaybını sınırlandırabildiği ileri sürülmektedir (Aggarwal ve Upadhyay, 2013; Rezaei-Ahvanooei vd., 2026). Örneğin sığırlarda günlük 15 g betain desteğinin süt verimini yaklaşık 1,0 kg gün^{-1} artırdığı bildirilmiştir (Abhijith vd., 2024).

Niasin (B3 vitamini) desteğinin periferik vazodilatasyonu artırarak ısı kaybını kolaylaştırabileceği, maya kültürü (*Saccharomyces cerevisiae*) katkısının ise rumen fermantasyonunu stabilize ederek sıcaklık stresi altında sindirim etkinliğinin korunmasına katkı sağlayabileceği bildirilmektedir (Chen, Yang ve Dong, 2019; Du vd., 2022). Bu katkı maddelerinin etkinliği rasyonun genel bileşimine, çevresel stres düzeyine ve hayvanın fizyolojik durumuna bağlı olarak değişebildiğinden, işletmeye özgü değerlendirme yapılması önerilmektedir (Aggarwal ve Upadhyay, 2013).

11. Su Tüketimi ve Su Kalitesi Yönetimi

Su, mandalarda sıcaklık stresiyle mücadelede besleme kadar kritik bir unsurdur. Evaporatif ısı kaybının (solunum, deri buharlaşması) sürdürülebilmesi doğrudan yeterli su alımına bağlıdır. Sıcak ve nemli koşullarda laktasyondaki mandalarda günlük içme suyu tüketiminin kışa kıyasla %50'nin üzerinde artabildiği tespit edilmiştir. Bu artışın süt verimi, kuru madde tüketimi, maksimum çevre sıcaklığı ve rasyonun kuru madde oranıyla ilişkili olduğu, bu değişkenler temel alınarak geliştirilen tahmin denklemleriyle günlük su gereksiniminin öngörülebileceği gösterilmiştir. Su tüketiminin miktarı kadar suyun kalitesi de üretim performansı açısından belirleyicidir. Sudaki toplam çözünmüş katı madde (TDS) düzeyinin belirli bir eşiği aşması durumunda hem su hem de kuru madde tüketiminin azaldığı, büyüme performansının olumsuz etkilendiği bildirilmiştir (Sharma, Kundu, Tariq, Kewalramani ve Yadav, 2017). Özellikle yüksek sıcaklık dönemlerinde su kaynaklarının mineral içeriğinin de düzenli olarak izlenmesi önerilmektedir (Sharma vd., 2016).

Uygulamada, soğutma sistemlerinin (gölgelendirme, fan, sprinkler) kullanıldığı işletmelerde toplam su tüketiminin, aktif termoregülasyon ihtiyacı azaldığından, soğutmasız işletmelere kıyasla daha düşük düzeyde seyredebildiği gözlenmiştir (Sharma vd., 2016). Bu bulgu, su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde barınak ve gölgelendirme planlamalarının hayvan konforunun yanı sıra su kullanım verimliliği açısından da değerlendirilmesi gerektiğine göstermektedir. Mandalara sıcak dönemlerde günün her saatinde erişilebilir, temiz, serin ve yeterli kapasiteli suluk sistemlerinin sağlanması, sürü yönetiminin vazgeçilmez bir bileşeni olmalıdır.

Tablo 2. Farklı fizyolojik gruplarda mevsime göre yaklaşık günlük su tüketim aralıkları

Fizyolojik grup	Kış dönemi (L gün^{-1})	Yaz dönemi / sıcaklık stresi (L gün^{-1})
Kuru dönem mandası	40-60	60-90
Orta verimli sağmal manda	60-80	100-140
Yüksek verimli sağmal manda	80-100	130-170

Kaynak: Sharma vd., 2016

12. Sıcaklık Stresini Azaltma Stratejileri

Sıcaklık stresinin kontrolünde tek bir uygulamaya bağlı kalmak yerine besleme, su, barınak, soğutma ve yönetim bileşenlerini bir arada ele alan bir yaklaşım benimsenmelidir.

12.1. Gölgelendirme

Gölgelendirme, güneş radyasyonundan kaynaklanan ısı yükünün azaltılmasında temel uygulamalardan biridir. Özellikle açık barınak sistemlerinde yeterli gölgelik alan sağlanması, doğrudan güneş ışığına maruz kalmayı azaltarak termal yükün düşürülmesine katkı sağlamaktadır (Michigan State University Extension, 2023).

12.2. Fan kullanımı

Fanlar, hava hareketini artırarak konvektif ve evaporatif ısı kaybını desteklemektedir. Özellikle sprinkler ile birlikte kullanıldığında daha etkili bir soğutma sağlanabilmektedir (Michigan State University Extension, 2023).

12.3. Sprinkler sistemleri

Sprinkler uygulaması, hayvanın deri yüzeyini ıslatarak evaporatif soğutmayı artırmaktadır. Fan ile birlikte kullanılması, ıslanan yüzeyden buharlaşmanın hızlandırılması nedeniyle daha etkili olabilir (Michigan State University Extension, 2023).

12.4. Çamurda yatma havuz sistemleri

Mandalarda doğal wallowing (mandaların çamur veya su içinde yatma ve batma) davranışının desteklenmesi sıcaklık stresinin azaltılması açısından özel öneme sahiptir. Literatürde havuz veya su içinde yatmanın, bazı koşullarda duş uygulamasından daha etkili bir termoregülasyon sağladığı bildirilmektedir (Petrocchi Jasinski vd., 2023).

12.5. Barınak tasarımı ve yönetimi

Soğutma ekipmanlarının etkinliği büyük ölçüde barınağın yapısal tasarımına bağlıdır. Serbest gezinmeli barınaklarda uzun eksenin doğu-batı yönünde konumlandırılması, çatının gün boyunca daha geniş bir gölge alanı oluşturmasına yardımcı olmaktadır. Açık yan duvarlar ve mahya havalandırması ile doğal hava akımının desteklenmesi önerilmektedir (Michigan State University Extension, 2023). Çatı malzemesinin açık renkli ve yansıtıcı olması, güneş radyasyonunun emilimini azaltarak barınak içi sıcaklığın düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

Açık barınak sistemlerinde gölgelik yapıların kuzey-güney yönünde konumlandırılması, gölgenin gün içinde daha geniş bir alana yayılmasına ve zeminin kuru kalarak mastitis riskini artıran çamurlaşmanın önlenmesine yardımcı olmaktadır. Barınak tasarımı, fan ve sprinkler gibi aktif soğutma sistemleriyle birlikte değerlendirildiğinde sıcaklık stresinin azaltılmasında daha kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca barınak zemininin kolay temizlenebilir ve kaymayı önleyici özellikte olması, ıslak ve çamurlu zeminlerde artabilecek ayak ve meme sağlığı sorunlarının önlenmesi açısından soğutma sistemleriyle birlikte değerlendirilmesi gereken tamamlayıcı bir unsurdur (Aggarwal ve Upadhyay, 2013).

12.6. Besleme stratejileri

Sıcaklık stresinin yoğun olduğu dönemlerde;

1. yemlerin günün serin saatlerinde verilmesi,
2. TKR'nin taze tutulması,
3. yemlik artıklarının düzenli uzaklaştırılması,
4. yeterli fiziksel etkili lif sağlanması,
5. rasyon enerji yoğunluğunun uygun şekilde düzenlenmesi,
6. mineral ve vitamin dengesinin korunması,
7. yeterli su sağlanması

öncelikli uygulamalar arasında yer almalıdır.

Güncel derlemelerde sıcaklık stresinin azaltılması amacıyla vitamin, mineral ve antioksidanların yanı sıra rasyonun lif ve protein içeriğinin düzenlenmesi de önerilmektedir (Petrocchi Jasinski vd., 2023).

13. Sıcaklık Stresinin İzlenmesinde Teknolojik Yaklaşımlar

Son yıllarda hassas hayvancılık (precision livestock farming, PLF) yaklaşımları, sıcaklık stresinin erken belirlenmesinde geleneksel gözleme dayalı yöntemlerin ötesine geçen fırsatlar sunmaktadır. Giyilebilir sensörler (yaka, kulak küpesi veya bolus tipi) aracılığıyla vücut sıcaklığı, solunum sayısı,

ruminasyon süresi ve aktivite düzeyi gibi parametrelerin sürekli ve bireysel düzeyde izlenmesi mümkün hâle gelmiştir (Shu, Wang, Guo ve Bindelle, 2021).

Kızılötesi termografi, temassız ve stressiz bir ölçüm yöntemi olarak deri yüzey sıcaklığının haritalanmasını sağlamakta, özellikle göz ve kulak bölgesindeki sıcaklık değişimlerinin erken sıcaklık stresi belirtisi olarak kullanılabileceği bildirilmektedir (Brcko vd., 2020). Rumen bolusu tipi sensörler ise iç vücut sıcaklığını doğrudan ölçerek ateş ve sıcaklık stresi ayrımını daha güvenilir şekilde yapabilmekte, aynı zamanda su ve yem tüketim değişimleri de yansıtabilmektedir.

Bu sensörlerden elde edilen verilerin yapay zeka tabanlı algoritmalarla işlenerek çiftçilere mobil uygulamalar üzerinden gerçek zamanlı uyarılar sunulması yönünde çalışmalar hız kazanmıştır. Bu tür karar destek sistemlerinin, özellikle işgücünün sınırlı olduğu aile işletmelerinde sıcaklık stresine zamanında müdahale edilmesini kolaylaştırması beklenmektedir. Bu teknolojilerin manda işletmelerinde yaygınlaşması, özellikle büyük ölçekli işletmelerde bireysel düzeyde erken müdahaleyi mümkün kılarak sıcaklık stresi kaynaklı üretim kayıplarının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Ancak maliyet, saha koşullarına uyarlanabilirlik ve manda davranışına özgü kalibrasyon ihtiyaçları, bu teknolojilerin manda yetiştiriciliğinde yaygın uygulamaya geçişindeki başlıca kısıtlar arasında yer almaktadır (Shu vd., 2021).

14. Irklar Arası Termotolerans Farklılıkları ve Islah Açısından Değerlendirme

Sıcaklık stresine duyarlılık, manda genotipleri arasında önemli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, ıslah programlarının planlanmasında dikkate alınması gereken pratik bir saha gözlemidir. Örneğin İtalyan Akdeniz mandasının, Mısır mandası ve Nili-Ravi× Murrah melezlerine kıyasla sıcaklık stresine karşı daha düşük tolerans gösterdiği bildirilmiştir (Petrocchi Jasinski vd., 2023); ırklar arası termotolerans ve süt verimi farklılıklarına ilişkin karşılaştırmalı veriler Tablo 3'te özetlenmiştir. Tropikal ve subtropikal kökenli genotiplerin, ılıman iklim kökenli genotiplere göre sıcak ve nemli koşullara daha iyi adapte olduğu genel bir eğilim olarak kabul edilmektedir. Deri rengi, kıl örtüsünün seyrekliği ve uzunluğu gibi fenotipik özellikler termal strese duyarlılıkla ilişkilendirilmektedir. Açık renkli ve kısa, seyrek kıl örtüsüne sahip hayvanların sıcaklık stresine daha iyi adapte olduğu bildirilmektedir.

Sığırlarda yürütülen kapsamlı çalışmalar, bu tür fenotipik özelliklerin ırk seçiminde ve saha düzeyinde damızlık seçiminde pratik bir gösterge olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Manda ıslahında termotolerans ile süt verimi arasındaki ilişkinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Sığır ıslahı alanındaki çalışmalar, yüksek verimli hayvanların metabolik ısı üretiminin daha fazla olması nedeniyle sıcaklık stresine karşı daha duyarlı olabildiğini göstermektedir. Bu sebeple yalnızca verim odaklı seleksiyon yerine,

termotolerans ve verim özelliklerini birlikte gözeten dengeli bir ıslah yaklaşımı önerilmektedir. Manda yetiştiriciliğinde bu yaklaşım genomik seleksiyon araçlarına girmeden, saha düzeyinde ırk ve hat tercihleri, melezleme stratejileri ve fenotipik damızlık seçim kriterleri üzerinden uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır (Carabaño vd., 2019).

Tablo 3. Bazı manda ırklarında/genotiplerinde termotolerans ve süt verimi karşılaştırması

Irk / Genotip	Köken / Alt grup	Termotolerans düzeyi	Laktasyon süt verimi (yaklaşık)
Murrah	Hindistan, nehir mandası	Orta-yüksek	1800-2500 kg
Nili-Ravi	Pakistan, nehir mandası	Orta	1500-2000 kg
İtalyan Akdeniz mandası	İtalya, nehir mandası	Düşük-orta	2200-2500 kg
Mısır mandası	Mısır, Akdeniz alt grubu	Yüksek	1500-1800 kg
Anadolu mandası	Türkiye, Akdeniz alt grubu	Orta	800-1000 kg

Kaynak: Petrocchi Jasinski vd., 2023; Uğurlu, 2017

15. Mandalarda Soğuk Stresi

Mandalar genel olarak sıcak ve nemli iklimlere adapte olmuş hayvanlar olarak bilinmekle birlikte, yetiştiriciliğin soğuk iklim kuşaklarına (örneğin Kanada, Doğu Avrupa ve Türkiye'nin iç ve doğu bölgeleri gibi) doğru genişlemesi, soğuk stresinin de dikkate alınması gereken bir çevresel faktör haline gelmesine yol açmıştır. Mandaların soğuğa toleransının sanıldığından daha yüksek olduğu bildirilmekle birlikte, bu tolerans ani sıcaklık düşüşleri, rüzgar ve nem bir araya geldiğinde üretim performansını olumsuz etkileyebilmektedir (Marai ve Haeeb, 2010; Yáñez-Pizaña vd., 2020).

15.1. Soğuk stresinin oluşumu ve alt kritik sıcaklık

Termonötral bölgenin alt sınırı olan alt kritik sıcaklık, hayvanın vücut ısısını sabit tutabilmek için metabolik ısı üretimini artırmaya başladığı eşik değeri ifade etmektedir. Farklı kaynaklarda mandalar için termonötral bölgenin yaklaşık 13-24°C aralığında, bağıl nemin ise %55-60 arasında olduğu bildirilmektedir (Napolitano vd., 2023). Çevre sıcaklığının bu alt sınırın altına düşmesi durumunda hayvan, artan ısı kaybını telafi etmek amacıyla metabolik ısı üretimini yükseltmek zorunda kalmaktadır.

Soğuk stresinin şiddeti yalnızca hava sıcaklığıyla değil, rüzgar hızı, nem ve barınak koşullarıyla da yakından ilişkilidir. Özellikle rüzgarın oluşturduğu 'hissedilen sıcaklık' düşüşü, gerçek hava sıcaklığından bağımsız olarak hayvan üzerinde ilave bir soğuk yükü oluşturabilmektedir (Kim, Ghassemi Nejad ve Lee, 2023; Yáñez-Pizaña vd., 2020).

15.2. Soğuk stresine fizyolojik ve davranışsal yanıtlar

Soğuk stresi altında mandalarda periferik vazokonstriksiyon (damar daralması) devreye girerek vücut yüzeyinden ısı kaybının azaltılması hedeflenmektedir. Bunu titreme (shivering) ve titremesiz termogenez gibi ek ısı üretim mekanizmaları izleyebilmektedir. Özellikle yeni doğan malaklarda bu mekanizmaların erken dönemde etkin şekilde çalışabilmesi hayatta kalma açısından kritik önem taşımaktadır (Yáñez-Pizaña vd., 2020).

Hormonal düzeyde, soğuk stresi koşullarında tiroid hormonları (T3, T4) düzeylerinin (sıcaklık stresinde gözlenen azalmanın aksine) yükselebildiği, bu durumun bazal metabolizma hızını artırarak ısı üretimini desteklediği bildirilmektedir. Murrah malaklarında doğumda soğuk iklim koşullarında yüksek T3 ve T4 düzeyleri gözlenmesi, yeni doğanların bu koşullara uyum sağlama çabasının bir göstergesi olarak yorumlanmaktadır (Mota-Rojas vd., 2023).

Davranışsal olarak soğuk stresi altındaki mandalarda yatma süresinin değişebildiği, barınak zemininin kalitesine bağlı olarak dinlenme davranışının farklılaşabildiği, soğuk ve rüzgarlı koşullarda hayvanların bir araya toplanma (gruplaşma) davranışı gösterebildiği bildirilmektedir (Kim vd., 2023; Yáñez-Pizaña vd., 2020).

15.3. Soğuk stresinin besleme ve üretim performansına etkileri

Soğuk stresi altında artan metabolik ısı üretimi ihtiyacı, hayvanın enerji gereksiniminin yükselmesine yol açmaktadır. Bazı çalışmalarda mandaların soğuk dönemlerde daha yüksek metabolik hızı sürdürebilmek amacıyla yem tüketimini artırdığı ortaya konmuştur. Ancak aynı zamanda soğuk ve rüzgarlı koşullarda yemleme, geviş getirme ve otlama davranışlarının kısıtlanabildiği, bunun da net enerji dengesini karmaşık hale getirdiği vurgulanmaktadır (Kim vd., 2023).

Süt verimi açısından, THI'nin belirli bir alt eşiğin (yaklaşık 59) altına düşmesi durumunda da süt veriminde azalma gözlenebildiği gözlenmektedir. Bu durum sıcaklık stresine kıyasla daha az araştırılmış, mandaların sadece yüksek sıcaklıklara değil, aşırı düşük sıcaklıklara karşı da duyarlı olduğunu göstermektedir (Marai ve Haeeb, 2010).

İçme suyu sıcaklığının da soğuk dönemlerde üretim performansı üzerinde etkili olabileceği, aşırı soğuk suyun tüketiminin sınırlı kalabileceği ve bunun da dolaylı olarak kuru madde tüketimini etkileyebileceği bildirilmektedir. Soğuk

iklim bölgelerindeki işletmelerde içme suyu sıcaklığının ölçülü şekilde yönetilmesi önerilmektedir (Yáñez-Pizaña vd., 2020).

15.4. Soğuk stresini azaltma stratejileri

Soğuk stresinin azaltılmasında öncelikli yaklaşım, hayvanları rüzgar ve ani sıcaklık düşüşlerinden koruyacak uygun barınak yapılarının sağlanmasıdır. Kanada gibi soğuk iklimli bölgelerde yürütülen manda işletmeciliği örneklerinde, hayvanların kış aylarında kapalı, yarı kapalı ahırlarda barındırılarak ani sıcaklık değişimlerinden korunduğu bildirilmektedir (Yáñez-Pizaña vd., 2020).

Kuru, temiz ve yeterli kalınlıkta altlık malzemesi kullanımı, hem yatma konforunu artırmakta hem de zeminden kaynaklanan ısı kaybını sınırlandırmaktadır. Barınak duvarlarının yalıtımlı olması ve rüzgar kesici yapıların (rüzgarlık, çit, ağaçlandırma) kullanılması, özellikle açık, yarı açık barınak sistemlerinde rüzgarın oluşturduğu soğutma etkisinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Yáñez-Pizaña vd., 2020).

Besleme açısından, soğuk dönemlerde rasyon enerji yoğunluğunun artan gereksinimlere göre yükseltilmesi, özellikle geviş getirmeyi destekleyici kaliteli kaba yem sağlanması önerilmektedir. Çünkü rumen fermantasyonu sırasında açığa çıkan ısı, hayvan için doğal bir 'iç ısıtma' kaynağı olarak da işlev görmektedir. Ayrıca içme suyunun donmasının önlenmesi ve aşırı soğuk olmayan bir sıcaklıkta sunulması, su ve dolayısıyla kuru madde tüketiminin sürdürülmesi açısından önemlidir (Yáñez-Pizaña vd., 2020).

Genç hayvanlarda (yeni doğan malaklar) soğuk stresine karşı özel önlemler alınması gerekmektedir. Doğumdan hemen sonra kuru bir ortamda tutulma, yeterli ve zamanında kolostrum alımının sağlanması ve gerektiğinde ek ısıtma kaynaklarının (kızılötesi lamba gibi) kullanılması, yeni doğan döneminde hipotermi riskinin azaltılmasına yardımcı olabilir (Mota-Rojas vd., 2023).

16. Sürdürülebilir Manda Yetiştiriciliğinde Entegre Yaklaşım

İklim değişikliği koşullarında manda işletmelerinin başarısı, sıcaklık stresinin yalnızca ortaya çıktıktan sonra azaltılmasına değil, önceden tahmin edilmesine ve yönetilmesine bağlıdır.

Bu kapsamda işletmelerde:

Çevresel izleme → THI hesaplama → hayvan davranışlarının izlenmesi → fizyolojik göstergelerin değerlendirilmesi → yem ve su yönetimi → soğutma uygulamalarının devreye alınması → süt verimi ve kompozisyonunun izlenmesi ile sürekli bir yönetim döngüsü oluşturulmalıdır (Mylostyvyi ve Izhboldina, 2025).

17. Ekonomik Boyut

Sıcaklık stresinin manda yetiştiriciliğine getirdiği yük fizyolojik ve üretim odaklı olmanın ötesinde, önemli bir ekonomik boyut da taşımaktadır. Süt sığırcılığı sektöründe yapılan kapsamlı bir değerlendirmede, sıcaklık stresinden kaynaklanan üretim kayıplarının sektörel ölçekte yüz milyonlarca dolara ulaşabildiği bildirilmektedir. Uygulanan soğutma sistemlerinin yatırım ve işletme maliyetlerinin, önlenen üretim kaybına kıyasla genellikle ekonomik açıdan avantajlı olduğu gösterilmiştir (St-Pierre, Cobanov ve Schnitkey, 2003). Örneğin ABD süt sığırcılığı sektöründe sıcaklık stresine bağlı üretim kayıplarının yıllık yaklaşık 1,5 milyar dolara (bazı tahminlerde 2,26 milyar dolara kadar) ulaştığı bildirilmiştir (Napolitano vd., 2023).

Benzer şekilde kuru dönemde soğutulmayan hayvanlarda yıllık ekonomik kaybın hayvan başına belirgin düzeyde arttığı, buna karşılık kuru dönem boyunca sağlanan soğutmanın hem o laktasyondaki hem de takip eden laktasyondaki süt verimini olumlu etkilediği bildirilmiştir (Toledo vd., 2022). Bu bulgular, manda işletmelerinde soğutma yatırımlarının hayvan refahının yanı sıra işletme karlılığı açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Örneğin kuru dönemde sıcaklık stresine maruz kalan düvelerin, soğutulan düvelere kıyasla bir sonraki laktasyonda günde yaklaşık 2-5 kg daha az süt verdiği bildirilmiştir (Toledo vd., 2022).

Tablo 4. Sıcaklık stresini azaltma uygulamalarının göreli maliyet-fayda değerlendirmesi

Uygulama	Yaklaşık göreli maliyet	Beklenen fayda
Doğal gölgelendirme (ağaçlandırma)	Düşük	Orta düzey ısı yükü azaltımı
Yapay gölgelik / çatı iyileştirmesi	Orta	Belirgin ısı yükü azaltımı
Fan sistemi	Orta	Konvektif soğutma desteği
Sprinkler + fan kombinasyonu	Orta-yüksek	Yüksek düzey soğutma etkisi
Çamur/su havuzu	Düşük-orta	Doğal davranışla yüksek soğutma etkisi
Sensör/PLF sistemleri	Yüksek (başlangıç yatırımı)	Erken müdahale, uzun vadeli verim koruması

Kaynak: St-Pierre vd., 2003; Toledo vd., 2022

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, manda popülasyonunun sınırlı sayıda olması ve büyük ölçüde küçük ve orta ölçekli aile işletmeleri tarafından sürdürülmesi, sıcaklık stresi kaynaklı kayıpların büyük sığır işletmelerine kıyasla daha sınırlı sermaye ile telafi edilmeye çalışıldığı anlamına gelmektedir. Bu yüzden düşük maliyetli soğutma uygulamalarının (gölgelendirme, doğal su kaynaklarının/çamur havuzlarının değerlendirilmesi) yaygınlaştırılması, Türkiye'deki manda işletmelerinin sıcaklık stresine karşı dayanıklılığının artırılmasında hem ekonomik hem de pratik açıdan öncelikli bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir (Saner, Engindeniz, Adanacıoğlu, Güler ve Şengül, 2022).

Sonuç

Manda yetiştiriciliğinde sıcaklık stresinin tek bir disiplinle sınırlı kalmayan, yetiştirme, besleme, ıslah, fizyoloji, üreme ve işletme yönetiminin, disiplinlerarası bir yaklaşımla birlikte ele alınması gerekmektedir.

Manda yetiştiriciliğinde sıcaklık stresi (ve daha sınırlı ölçüde soğuk stresi), hayvanın fizyolojik dengesini bozmanın ötesinde yem tüketimi, su tüketimi, rumen fonksiyonları, süt verimi, süt kompozisyonu, üreme performansı ve hayvan refahını etkileyen çok boyutlu bir problemdir.

Mandaların sıcak ve nemli iklimlere adaptasyon yetenekleri yüksek olsa da özellikle yüksek sıcaklık ile yüksek nemin ve doğrudan güneş radyasyonunun birlikte bulunduğu koşullarda termoregülasyon kapasitesi zorlanmaktadır. Koyu renkli deri, seyrek kıl örtüsü ve düşük terleme kapasitesi nedeniyle özellikle doğrudan güneş altında ısı yükünün artması önem taşımaktadır.

THI, işletmelerde sıcaklık stresinin pratik olarak izlenmesinde kullanılabilecek önemli bir göstergedir. Ancak yalnızca THI değerinin değerlendirilmesi yeterli değildir. Solunum sayısı, rektal sıcaklık, deri sıcaklığı, yem ve su tüketimi, yatma davranışı ve süt verimindeki değişimler birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle solunum sayısının THI artışına paralel olarak yükselmesi, sahada sıcaklık stresinin erken belirlenmesi açısından pratik bir gösterge olarak öne çıkmaktadır.

Besleme açısından en temel sorun, sıcaklık stresinin kuru madde tüketimini azaltmasıdır. Sıcak dönemlerde rasyonun kimyasal bileşiminin yanı sıra yemleme zamanı, TKR'nin tazeliği, fiziksel etkili lif düzeyi ve yemlik yönetiminin birlikte ele alınması gerekir.

Manda işletmelerinde sıcaklık stresinin azaltılmasında gölgelendirme, fan, püskürtme ve özellikle çamur banyoları ve havuz sistemleri önemli araçlardır. Güncel değerlendirmeler, uygun soğutma sistemlerinin süt üretimi, üreme performansı ve hayvan refahı üzerindeki sıcaklık kaynaklı kayıpları azaltabildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, manda yetiştiriciliğindeki başarı, yüksek genetik potansiyele sahip hayvanların yetiştirilmesinin ötesinde, iklim koşullarına duyarlı besleme, çevresel izleme, erken stres tespiti ve etkin soğutma yönetiminin bütünleştirilmesine bağlı olacaktır. Ayrıca sıcaklık stresine yönelik çalışmaların ağırlıklı olarak sığır türünde yapılmış olması, mandalarda konuyla ilgili çalışmaların arttırılmasına yönelik bir potansiyel sunmaktadır. İklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleştiği günümüzde, sıcaklık stresinin yönetimi sürdürülebilir ve yüksek verimli manda yetiştiriciliğinin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Manda, sıcaklık stresi, soğuk stresi, termal konfor bölgesi, THI, besleme, yetiştirme, süt verimi, süt kompozisyonu

Kaynakça

Abhijith, A., Dunshea, F. R., Chauhan, S. S., Sejian, V., & DiGiacomo, K. (2024). A meta-analysis of the effects of dietary betaine on milk production, growth performance, and carcass traits of ruminants. *Animals, 14*(12), 1756. https://doi.org/10.3390/ani14121756

Aggarwal, A., & Singh, M. (2008). Changes in skin and rectal temperature in lactating buffaloes provided with showers and wallowing during hot-dry season. *Tropical Animal Health and Production, 40*(3), 223–228. https://doi.org/10.1007/s11250-007-9084-3

Aggarwal, A., & Upadhyay, R. (2013). Shelter management for alleviation of heat stress in cows and buffaloes. In A. Aggarwal & R. Upadhyay (Eds.), *Heat stress and animal productivity* (pp. 169–183). New Delhi: Springer.

Brcko, C. C., Silva, J. A. R., Martorano, L. G., Vilela, R. A., Nahúm, B. S., Silva, A. G. M., Barbosa, A. V. C., Bezerra, A. S., & Lourenço Júnior, J. B. (2020). Infrared thermography to assess thermoregulatory reactions of female buffaloes in a humid tropical environment. *Frontiers in Veterinary Science, 7*, 180. https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00180

Carabaño, M. J., Ramón, M., Menéndez-Buxadera, A., Molina, A., & Díaz, C. (2019). Selecting for heat tolerance. *Animal Frontiers, 9*(1), 62–68.

Chen, J., Yang, Z., & Dong, G. (2019). Niacin nutrition and rumen-protected niacin supplementation in dairy cows: An updated review. *British Journal of Nutrition, 122*(10), 1103–1112. https://doi.org/10.1017/S0007114519002216

Choudhary, B. B., & Sirohi, S. (2019). Sensitivity of buffaloes (*Bubalus bubalis*) to heat stress. *Journal of Dairy Research, 86*(4), 399–405. https://doi.org/10.1017/S0022029919000773

Costa, A., De Marchi, M., Battisti, S., Guarducci, M., Amatiste, S., Bitonti, G., Borghese, A., & Boselli, C. (2020). On the effect of the temperature-humidity index on buffalo bulk milk composition and coagulation traits. *Frontiers in Veterinary Science, 7*, 577758. https://doi.org/10.3389/fvets.2020.577758

De Rensis, F., & Scaramuzzi, R. J. (2003). Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow: A review. *Theriogenology, 60*(6), 1139–1151. https://doi.org/10.1016/S0093-691X(03)00126-2

Di Francesco, S., Novoa, M. V. S., Vecchio, D., Neglia, G., Boccia, L., Campanile, G., Zicarelli, L., & Gasparrini, B. (2012). Ovum pick-up and in vitro embryo production (OPU-IVEP) in Mediterranean Italian buffalo performed in different seasons. *Theriogenology, 77*(1), 148–154.

Do Amaral, B. C., Connor, E. E., Tao, S., Hayen, M. J., Bubolz, J. W., & Dahl, G. E. (2011). Heat stress abatement during the dry period influences metabolic gene expression and improves immune status in the transition period of dairy cows. *Journal of Dairy Science, 94*(1), 86–96.

Du, D., Feng, L., Chen, P., Jiang, W., Zhang, Y., Liu, W., Zhai, R., & Hu, Z. (2022). Effects of *Saccharomyces cerevisiae* cultures on performance and immune performance of dairy cows during heat stress. *Frontiers in Veterinary Science, 9*, 851184. https://doi.org/10.3389/fvets.2022.851184

Fabris, T. F., Laporta, J., Skibiel, A. L., Corra, F. N., Senn, B. D., Wohlgemuth, S. E., & Dahl, G. E. (2019). Effect of heat stress during early, late, and entire dry period on dairy cattle. *Journal of Dairy Science, 102*(6), 5647–5656. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15721

Gabr, A. A. (2025). Effects of late gestation heat stress in buffalo heifers on postnatal growth, thermoregulatory, and suckling behavior responses of their newborn calves under subtropical environment. *Tropical Animal Health and Production, 57*(4). https://doi.org/10.1007/s11250-025-04514-4

Garau, V., Manis, C., Scano, P., & Caboni, P. (2021). Compositional characteristics of Mediterranean buffalo milk and whey. *Dairy, 2*(3), 469–488. https://doi.org/10.3390/dairy2030038

Ismail, E. M., Aly, A. M., Farag, H. S., Kamel, S., & Fahim, K. M. (2026). Heat stress in dairy buffalo: Biometeorological, molecular, and adaptive strategies for climate change resilience in subtropical regions. *Veterinary Research Communications*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s11259-025-11009-y

Kim, W. S., Ghassemi Nejad, J., & Lee, H. G. (2023). Impact of cold stress on physiological, endocrinological, immunological, metabolic, and behavioral changes of beef cattle at different stages of growth. *Animals, 13*(6), 1073. https://doi.org/10.3390/ani13061073

Li, M., Hassan, F., Guo, Y., Tang, Z., Liang, X., Xie, F., Peng, L., & Yang, C. (2020). Seasonal dynamics of physiological, oxidative and metabolic responses in non-lactating Nili-Ravi buffaloes under hot and humid climate. *Frontiers in Veterinary Science, 7*, 622. https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00622

Li, M., Hassan, F.-u., Tang, Z., Guo, Y., Liang, X., Peng, L., Xie, H., & Yang, C. (2021). Physiological, oxidative and metabolic responses of lactating water buffaloes to tropical climate of South China. Veterinary Medicine and Science, 7(5), 1696–1706. https://doi.org/10.1002/vms3.570

Marai, I. F. M., & Haeeb, A. A. M. (2010). Buffalo's biological functions as affected by heat stress: A review. *Livestock Science, 127*, 89–109.

Michigan State University Extension. (2023). *Practical heat stress abatement strategies for dairy cows*. Erişim adresi

https://www.canr.msu.edu/news/seven_practical_heat_stress_abatement_strategies

Mishra, S. R. (2021). Thermoregulatory responses in riverine buffaloes against heat stress: An updated review. *Journal of Thermal Biology, 96*, 102844. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102844

Mota-Rojas, D., Braghieri, A., Ghezzi, M., Ceriani, M. C., Martínez-Burnes, J., Lendez, P. A., Pereira, A. M. F., Lezama-García, K., Domínguez-Oliva, A., Casas-Alvarado, A., Sabia, E., Pacelli, C., & Napolitano, F. (2023). Strategies and mechanisms of thermal compensation in newborn water buffaloes. *Animals, 13*(13), 2161. https://doi.org/10.3390/ani13132161

Mylostyvyi, R., & Izhboldina, O. (2025). An integrated approach using temperature-humidity index, productivity, and welfare indicators for herd-level heat stress assessment in dairy cows. *Animals, 15*(22), 3341. https://doi.org/10.3390/ani15223341

Napolitano, F., De Rosa, G., Chay-Canul, A., Álvarez-Macías, A., Pereira, A. M. F., Bragaglio, A., Mora-Medina, P., Rodríguez-González, D., García-Herrera, R., Hernández-Ávalos, I., Domínguez-Oliva, A., Pacelli, C., Sabia, E., Casas-Alvarado, A., Reyes-Sotelo, B., & Braghieri, A. (2023). The challenge of global warming in water buffalo farming: Physiological and behavioral aspects and strategies to face heat stress. *Animals, 13*(19), 3103. https://doi.org/10.3390/ani13193103

Özdemir, M., & Çınar, M. U. (2023, Ekim). *Türkiye'de manda yetiştiriciliğinin projeksiyonu: 2023–2032 yılları*. 13. Ulusal Zootekni Bilim Kongresi'nde sunulan sözlü bildiri, Ankara, Türkiye.

Petrocchi Jasinski, F., Evangelista, C., Basiricò, L., & Bernabucci, U. (2023). Responses of dairy buffalo to heat stress conditions and mitigation strategies: A review. *Animals, 13*, 1260.

Rezaei-Ahvanooei, M. R., Lamanna, M., Colleluori, R., Formigoni, A., Norouzian, M. A., Assadi-Alamouti, A., & Cavallini, D. (2026). Effects of microminerals on performance and metabolic adaptation in heat-stressed dairy cows: A review. *Biological Trace Element Research, 204*(5), 3504–3521. https://doi.org/10.1007/s12011-025-04911-8

Saner, G., Engindeniz, S., Adanacıoğlu, H., Güler, D., & Şengül, Z. (2022). Manda yetiştiriciliğinin ekonomik yönü üzerine bir analiz: Balıkesir ili örneği. *Hayvansal Üretim, 63*(1), 35–46. https://doi.org/10.29185/hayuretim.978601

Schneider, P. L., Beede, D. K., Wilcox, C. J., & Collier, R. J. (1984). Influence of dietary sodium and potassium bicarbonate and total potassium on heat-stressed lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science, 67*(11), 2546–2553. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81611-2

Sharma, A., Kundu, S. S., Tariq, H., Kewalramani, N., & Yadav, R. K. (2017). Impact of total dissolved solids in drinking water on nutrient utilisation and growth performance of Murrah buffalo calves. *Livestock Science, 198*, 17–23. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.02.002

Sharma, A., Kundu, S. S., Tariq, H., Mahesh, M. S., Gautam, S., & Singh, S. (2016). Predicting water intake of lactating riverine buffaloes under tropical climate. *Livestock Science, 191*, 187–194.

Shu, H., Wang, W., Guo, L., & Bindelle, J. (2021). Recent advances on early detection of heat strain in dairy cows using animal-based indicators: A review. *Animals, 11*(4), 980.

St-Pierre, N. R., Cobanov, B., & Schnitkey, G. (2003). Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of Dairy Science, 86*(E Suppl.), E52–E77.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (t.y.). *Anadolu Mandasının Halk Elinde Islahı Projesi*. Erişim adresi https://www.tarimtv.gov.tr/tr/video-detay/mandalar-koruma-altnda-2779

Tao, S., Bubolz, J. W., do Amaral, B. C., Thompson, I. M., Hayen, M. J., Johnson, S. E., & Dahl, G. E. (2011). Effect of heat stress during the dry period on mammary gland development. *Journal of Dairy Science, 94*(12), 5976–5986.

Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M. (2022). Impacts of heat stress on global cattle production during the 21st century: A modelling study. *The Lancet Planetary Health, 6*(3), e192–e201.

Toledo, I. M., Dahl, G. E., & De Vries, A. (2022). Dairy cattle management and housing for warm environments. *Livestock Science, 255*, 104802.

Tufarelli, V., Dario, M., & Laudadio, V. (2008). Diet composition and milk characteristics of Mediterranean water buffaloes reared in Southeastern Italy during spring season. *Livestock Research for Rural Development, 20*(10), 165.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). *Hayvancılık istatistikleri, büyükbaş hayvan varlığı*. Erişim adresi https://www.tuik.gov.tr

Uğurlu, M. (2017). Dünyada ve Türkiye'de manda yetiştiriciliği, manda ırkları ve verim özellikleri. *Turkiye Klinikleri Journal of Animal Nutrition & Nutritional Diseases-Special Topics, 3*(2), 77–83.

Umar, S. I. U., Konwar, D., Khan, A., Bhat, M. A., Javid, F., Jeelani, R., Nabi, B., Najar, A. A., Kumar, D., & Brahma, B. (2021). Delineation of temperature-humidity index (THI) as indicator of heat stress in riverine buffaloes (*Bubalus bubalis*) of a sub-tropical Indian region. *Cell Stress & Chaperones, 26*(4), 657–669. https://doi.org/10.1007/s12192-021-01209-1

Verma, K. K., Singh, M., Narwaria, U. S., Patel, B. H. M., Verma, M. R., & Bharti, P. K. (2022). Microclimate modification in Murrah buffalo (*Bubalus bubalis*) heifers during summer: Effect on intake, growth and hematobiochemistry. *Journal of Thermal Biology, 104*, 103163. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103163

Yadav, B., Singh, G., Verma, A. K., Dutta, N., & Sejian, V. (2013). Impact of heat stress on rumen functions. *Veterinary World, 6*(12), 992–996.

Yadav, S., et al. (2022). Effect of heat stress on rumen microbial diversity and fermentation pattern in buffalo. *Advances in Gut & Microbiome Research, 2022*, 1248398.

Yáñez-Pizaña, A., de la Cruz-Cruz, L. A., Tarazona-Morales, A., Roldan-Santiago, P., Ballesteros-Rodea, G., Pineda-Reyes, R., & Orozco-Gregorio, H. (2020). Physiological and behavioral changes of water buffalo in hot and cold systems: Review. *Journal of Buffalo Science, 9*, 110–120. https://doi.org/10.6000/1927-520X.2020.09.13

Wang, Z., Niu, K., Rushdi, H. E., Zhang, M., Fu, T., Gao, T., Yang, L., Liu, S., & Lin, F. (2022). Heat stress induces shifts in the rumen bacteria and metabolome of buffalo. *Animals, 12*(10), 1300. https://doi.org/10.3390/ani12101300

Whittier, J. C. (1993). *Temperature-humidity index chart*. Columbia, MO: University of Missouri Extension.

BÖLÜM 24

Düşük Kaliteli Kaba Yemlerin (Saman) Besin Değerinin Artırılması: Geleneksel ve Yenilikçi Yaklaşımlar

***Fisun Koç*[1]**

[1] Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-5978-9232

Giriş

Dünya genelinde hayvansal üretimin sürdürülebilir biçimde artırılabilmesi, yalnızca yüksek kaliteli yem kaynaklarının kullanımına değil, aynı zamanda tarımsal üretim sonucunda ortaya çıkan düşük kaliteli yan ürünlerin etkin biçimde değerlendirilmesine de bağlıdır. Tahıl samanları bu açıdan önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Buğday, arpa, yulaf, çavdar, tritikale ve pirinç gibi tahılların tane hasadından sonra geriye kalan sap ve yaprak kısımlarından oluşan samanlar, büyük miktarlarda elde edilmeleri, uzun süre depolanabilmeleri ve çoğu bölgede kolay erişilebilir olmaları nedeniyle özellikle ruminant beslemede değerlendirilmektedir (Turgut, 2008; Abdi ve Kılıç, 2018). Bununla birlikte, samanların yüksek miktarda üretiliyor olması onların besleme değerinin de yüksek olduğu anlamına gelmemektedir. Samanın kullanımını sınırlayan temel faktörler; düşük ham protein ve enerji içeriği, yüksek nötral çözücülerde çözünmeyen lif (NDF) ve asit çözücülerde çözünmeyen lif (ADF) düzeyleri, yüksek lignifikasyon, düşük kolay fermente olabilir karbonhidrat miktarı, düşük mineral kullanılabilirliği ve bazı samanlarda yüksek silika içeriğidir (Sarnklong vd., 2010; Wang vd., 2022).

Ruminantlar selüloz ve hemiselüloz gibi yapısal karbonhidratlardan rumen mikroorganizmaları aracılığıyla yararlanabilmekle birlikte, bitki hücre duvarının karmaşık yapısı bu potansiyel kullanımın önünde önemli bir engel oluşturmaktadır. Özellikle lignin, selüloz ve hemiselülozun mikrobiyal enzimlere erişimini sınırlandırarak hücre duvarının parçalanabilirliğini azaltmaktadır. Bu nedenle samanların besleme değerinin artırılmasına yönelik uygulamalarda temel yaklaşım, yalnızca lif miktarını azaltmak değil, hücre duvarı bileşenlerinin rumen mikroorganizmaları tarafından daha etkin kullanılmasını sağlamaktır (Tekce ve Gül, 2014). Samanların yem değerini artırmak ve rasyonlarda etkin bir şekilde kullanabilmek için çeşitli yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar; fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerdir (Eser, 2016). Bu derlemede, ruminant beslemede kullanılan samanların besin değerini ve sindirilebilirliğini artırmada uygulanan muamele yöntemleri hakkında bilgiler sunulmuştur.

2. Samanın Kimyasal Yapısı ve Besin Değerini Sınırlayan Faktörler

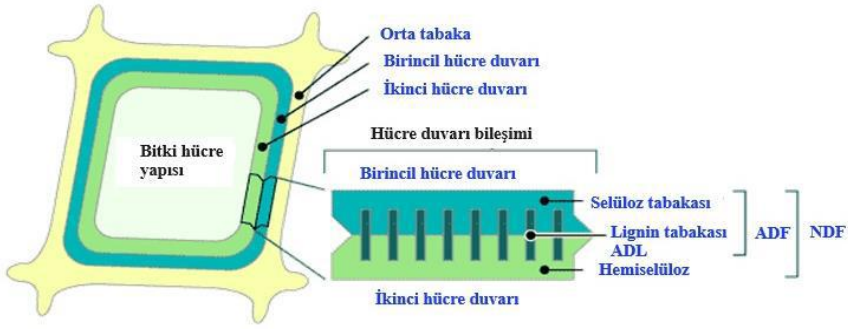
2.1. Samanın Kimyasal Kompozisyonu

Samanın kimyasal kompozisyonu bitkinin türü ve çeşidi, yetiştirme bölgesi, iklim, toprak özellikleri, gübreleme düzeyi, gelişme dönemi, hasat zamanı, kurutma yöntemi ve depolama koşullarından etkilenmektedir. Aynı bitki türüne ait samanlar arasında bile ham protein (HP), NDF, ADF, lignin, kül ve sindirilebilirlik bakımından önemli farklılıklar görülebilmektedir. Bitkinin olgunlaşmasıyla yapısal karbonhidratların ve lignifikasyonun artması, hücre içeriğinin göreceli olarak azalması ve sonuç olarak yemin sindirilebilirliğinin düşmesi söz konusudur (Van Soest, 1994; Wang vd., 2022). Samanların değerlendirilmesinde geleneksel ham besin maddesi analizleri önemli olmakla

birlikte tek başına yeterli değildir. Kuru madde, ham protein, ham yağ, ham kül ve ham selüloz gibi analizlerin yanı sıra NDF, ADF ve ADL analizlerinin yapılması, samanın lif yapısının daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasını sağlar. NDF; esas olarak hemiselüloz, selüloz ve lignin fraksiyonlarını, ADF ise başlıca selüloz ve lignin fraksiyonlarını temsil etmektedir. Bu nedenle NDF ve ADF değerleri, yemin fiziksel yapısı, rumen doluluğu ve potansiyel sindirilebilirliği hakkında önemli bilgiler sağlar (Beauchemin ve Yang, 2005).

2.2. Hücre Duvarını Oluşturan Bileşenlerin Yapısı

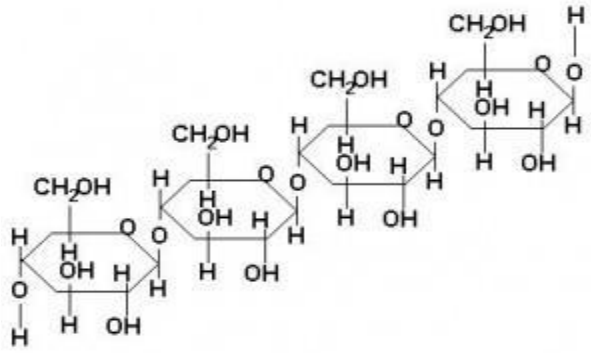
Bitki hücre duvarı temel olarak selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşan karmaşık bir lignoselülozik yapıdadır (Şekil 1). Bu bileşenlerin miktarı kadar birbirleriyle olan kimyasal ve fiziksel ilişkileri de samanın rumende parçalanabilirliğini belirlemektedir (Moore ve Jung, 2001).



Şekil 1. Bitki hücre duvarı yapısı

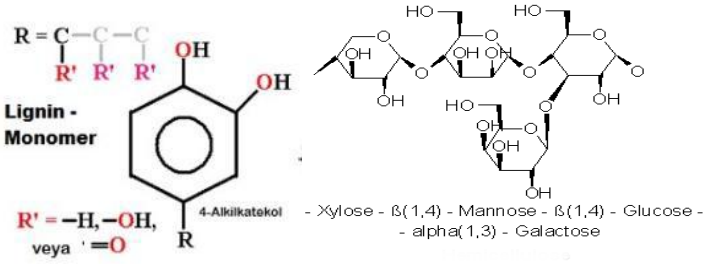
Selüloz, bitki hücre duvarlarında en bol bulunan bileşenidir. Basit yapısı β-1,4 glikozit bağlarla bağlı uzun ve doğrusal bir polimerden oluşmaktadır. Bir başka anlatımla selüloz, β-1,4 glikozit bağları ile bağlanmış glikoz moleküllerinden oluşan homojen bir glikoz polimeridir. Selüloz oranı bitki kuru maddesinde %20-60 arasında değişmektedir (Kalkan, 2008).

Selülozun düz, doğrusal zincir konfigürasyonu, düz zincir polimerlerinin içinde (molekül içi, glikoz kalıntıları arasında) ve iplikler arasında (moleküller arası) meydana gelen yoğun hidrojen bağı ile mikrofibriller olarak bilinen sıkıca paketlenmiş tabakaların oluşumuna izin verdiği bir yapıdan oluşmaktadır (White vd., 2014). Selülozun yapısındaki yüksek derecede H bağı, selüloza sertlik ve hidrolize karşı direnç kazanmaktadır. Bu yapı bitki yapısı ve savunması için önemlidir. Aynı zamanda rumende mikrobiyal sindirim hızını ve kapasitesini engellediği bildirilmektedir (Bayer vd., 1998; White vd., 2014). Rumende bulunan mikroorganizmalar sentezledikleri enzimlerle, yemlerdeki selülozu parçalayarak uçucu yağ asitlerine, karbondioksite ve metan gazına dönüştürerek enerji açığa çıkartırlar (Kirchgessner, 1985).



Şekil 2. Selülozun kimyasal yapısı

Hemiselüloz, farklı pentoz ve heksozlardan oluşan heterojen polisakkaritler grubudur. Selüloza göre daha amorf bir yapıya sahip olduğundan genellikle daha kolay parçalanabilir. Ancak hemiselülozun lignin ve diğer hücre duvarı bileşenleriyle oluşturduğu bağlantılar, bu fraksiyonun rumen mikroorganizmaları tarafından kullanımını azaltabilmektedir.

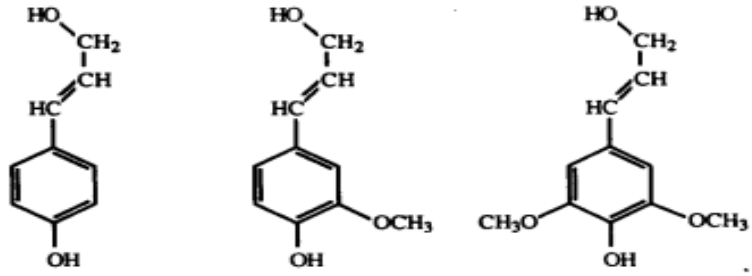


Şekil 3. Hemiselülozun kimyasal yapısı

Hemiselüloz selülozik olmayan yapısal polisakkarittir. Hemiselüloz, 5 ve 6 karbonlu heterojen bir polisakkarittir ve ksiloz, arabinoz, mannoz, galaktoz ve glikoz gibi β-1,4 glikozit bağları ile bağlanır. Hemiselüloz amorf, rastgele dallanmış bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte, selüloz mikrofibrillerini bağlayan ve saran karmaşık bir matris oluşturarak mikrobiyal sindirimi daha da engellediği bildirilmektedir (White vd., 2014). Hemiselüloz, mannanlar, ksilanlar ve ksiloglukanlar gibi pentozlar da dahil olmak üzere, çeşitli şekerlerden oluşur, ancak tek tek şekerlerin analizle ölçülmesi yerine nötr ve asit deterjan lif (fiber) çözeltileri ekstraksiyonu ile daha yaygın olarak ölçülmektedir. Pektinler de benzer şekilde karakterize edilir ve oksalik asitlerde çözünürken, hemiselüloz alkali deterjanla ekstrakte edilebilmektedir (Jung, 2012).

Lignin, yüksek çapraz bağlı moleküllerden oluşan karmaşık bir makromoleküldür. Monolignoller olarak adlandırılan ligninin ana bileşenleri üç p-hidroksisinnamoil alkol monomeridir: p-kumaril alkol, koniferil alkol ve sinapil alkol, üç ana lignin molekülü (H-(p-hidroksifenil), S-(syringyl) ve G-(guaiacyl)-lignin) üretmek için biyokimyasal yollarla modifiye edilir (Cesarino

vd., 2012). Tümü fenilalanin amino asidinden türetilen bu monolignoller, fenilpropanoid yolu ile lignini oluşturmaktadırlar. Ligninin hem kimyasal bileşimi hem de toplam konsantrasyonu yemlerin sindirilebilirliğini olumsuz etkileyebilir (Moore ve Jung, 2001; Shreck, 2013). Lignin, çekirdek veya çekirdek olmayan lignin olarak sınıflandırılmaktadır. Çekirdek ligninin, karbonhidrat sindirimini fenilpropanoid birimlerden oluştuğu için düşünülmektedir. Çekirdek ignin aynı zamanda hidrofobiktir, bu da bitki hücre duvarlarını korur ve mikropların bitki hücre duvarına bağlanmasını azaltmaktadır (Shreck, 2013). Çekirdek olmayan lignin, hemiselüloza kovalent olarak bağlanan fenolikleri (tipik olarak ferulik ve p-kumarik) içermektedir ve hücre duvarı sindirimini düşürmektedir (Jung ve Deetz, 1993).



Şekil 4. Ligninin kimyasal yapısı

3. Samanın Besin Değerinin Artırılmasında Kullanılan Yöntemler

3.1. Fiziksel Yöntemlerle Muamele

Tarımsal artıkların, özellikle tahıl samanlarının ruminant beslemesinde daha etkin kullanılabilmesi amacıyla uygulanan ön işlemler arasında fiziksel yöntemler önemli bir yere sahiptir (Sarnklong vd., 2010). Fiziksel ön işlemlerin temel amacı, samanın hücre duvarı yapısını değiştirerek rumen mikroorganizmalarının substrata erişimini kolaylaştırmaktır. Bu kapsamda kıyma, doğrama, öğütme, peletleme, ekstrüzyon, hidrotermal işlem, sıcak su uygulaması, buhar uygulaması, buhar patlatma, mikrodalga, ultrasonik işlem ve ışınlama gibi farklı tekniklerden yararlanılmaktadır. Bu uygulamalar sırasında materyalin partikül büyüklüğü azaltılabilmekte, yüzey alanı artırılabilmekte, lif yapısı gevşetilebilmekte ve bazı durumlarda hücre duvarı bileşenleri arasındaki fiziksel bağlantılar zayıflatılabilmektedir (Sarnklong vd., 2010; Du vd., 2019). Bununla birlikte fiziksel işlemlerin samanın besleme değerini artırmadaki etkisi, uygulanan yöntemin niteliğine ve işlem şiddetine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle yalnızca partikül büyüklüğünün azaltılması, lignin ile yapısal karbonhidratlar arasındaki kimyasal ilişkileri tamamen ortadan kaldırmadığından, fiziksel işlemlerin etkisi kimyasal veya biyolojik yöntemlere göre daha sınırlı kalabilmektedir. Ayrıca yüksek enerji tüketimi, ekipman

gereksinimi ve işlem maliyetleri, ileri fiziksel yöntemlerin işletme koşullarında kullanımını sınırlayabilmektedir (Sarnklong vd.,2010).

3.1.1. Kıyma, Doğrama ve Öğütme

Kıyma ve doğrama, samanın fiziksel olarak işlenmesinde en basit ve yaygın yöntemler arasında yer almaktadır. Bu işlemlerle samanın uzunluğu azaltılmakta, materyalin yemlikte taşınması ve diğer yem maddeleriyle homojen şekilde karıştırılması kolaylaşmaktadır. Özellikle toplam rasyon karışımlarında uzun saman partiküllerinin seçilmesi veya yemlikte ayrışması, hayvanların rasyon bileşenlerini seçerek tüketmesine neden olabilmektedir. Uygun düzeyde kıyılmış saman kullanılması, rasyonun fiziksel homojenliğini artırarak bu tür seçim davranışlarının sınırlanmasına katkı sağlayabilmektedir.Öğütme işleminde ise kıyma işlemine göre daha küçük partiküller elde edilmekte ve materyalin toplam yüzey alanı artırılmaktadır. Böylece rumen mikroorganizmalarının yem partiküllerine tutunabileceği yüzey genişlemekte ve selüloz ile hemiselülozun mikrobiyal enzimlerle temas olasılığı artmaktadır. Bu durum özellikle yüksek lif içeren samanların ruminal parçalanma hızının artırılmasına katkı sağlayabilmektedir (Sarnklong vd., 2010).

Ancak partikül büyüklüğünün azaltılması her koşulda olumlu bir sonuç vermemektedir. Ruminantlarda yem partikül büyüklüğü yalnızca sindirim açısından değil, çiğneme, geviş getirme, tükürük salgısı, rumen pH'sı ve rumen içeriğinin retansiyon süresi açısından da önem taşımaktadır. Çok ince öğütülmüş kaba yemlerin kullanılması fiziksel olarak etkili NDF miktarını azaltarak geviş getirme aktivitesini sınırlayabilir ve rumen ortamında pH düşüşü riskini artırabilir. Bu nedenle samanın mümkün olduğunca küçük partiküllere öğütülmesi yerine, hayvan türü ve rasyonun diğer bileşenleri dikkate alınarak uygun partikül büyüklüğünün belirlenmesi gerekmektedir. Maulfair vd. (2011), süt sığırlarında rasyon partikül büyüklüğündeki değişikliklerin rumen ve dışkı partikül özelliklerini etkilediğini ve partikül büyüklüğünün sindirim süreçleri üzerinde önemli bir rol oynadığını bildirmiştir. Benzer şekilde pirinç samanı üzerinde gerçekleştirilen bir RUSITEC çalışmasında, partikül büyüklüğünün rumen fermantasyonu, besin maddelerinin kaybolma oranı ve mikrobiyal topluluk üzerinde etkili olduğu ortaya konmuştur (Li vd., 2023). Bu sonuçlar, fiziksel işlemlerde temel hedefin yalnızca partikül boyutunu küçültmek değil, rumen fermantasyonunu ve hayvan sağlığını destekleyecek optimum fiziksel yapıyı oluşturmak olması gerektiğini göstermektedir.

3.2.2. Peletleme

Peletleme, samanın fiziksel özelliklerini ve yemleme etkinliğini geliştirmek amacıyla kullanılan diğer önemli bir yöntemdir. İşlem sırasında öğütülmüş yem materyali basınç ve çoğunlukla buharla sıkıştırılarak daha yoğun ve homojen bir forma dönüştürülmektedir. Böylece samanın hacimsel yoğunluğu artmakta, depolama ve taşıma kolaylaşmakta ve mekanik kayıplar azaltılabilmektedir.

Özellikle düşük yoğunluklu samanların peletlenmesi, birim hacimde taşınan kuru madde miktarının artırılması bakımından önemli avantaj sağlamaktadır. Bunun yanı sıra peletleme, saman ile diğer yem maddelerinin homojen şekilde karıştırılmasına ve hayvanların yem bileşenlerini seçmesinin azaltılmasına katkıda bulunabilmektedir (Gürsoy, 2023). Peletlemenin besin maddelerinin sindirilebilirliği üzerindeki etkisi ise işlem koşullarına ve yem materyalinin özelliklerine bağlıdır. Peletleme sırasında meydana gelen basınç, sürtünme ve ısı, yem materyalinin fiziksel özelliklerinde değişiklik oluşturabilmektedir. Bununla birlikte saman gibi yüksek yapısal karbonhidrat içeren materyallerde peletlemenin etkisinin tahıl bazlı yemlerdeki etkiden farklı olması beklenmektedir. Bu nedenle peletleme, saman açısından öncelikle yemleme, depolama, taşıma ve rasyon homojenliği avantajları sağlayan bir işlem olarak değerlendirilmelidir (Karabıyık vd., 2018).

3.2.3. Ekstrüzyon ve Hidrotermal İşlemler

Ekstrüzyon, sıcaklık, nem, basınç ve mekanik kesme kuvvetlerinin birlikte kullanıldığı ileri bir fiziksel işlem yöntemidir. Materyalin kısa süre içerisinde yüksek sıcaklık ve basınca maruz bırakılması ve ardından basıncın hızla düşürülmesi, hücre duvarının fiziksel yapısında değişikliklere neden olabilmektedir. Bu durum lignoselülozik materyalde selüloz ve hemiselülozun daha erişilebilir hale gelmesine katkı sağlayabilmektedir. Hidrotermal işlemler ve sıcak su uygulamaları ise kimyasal madde kullanılmadan lignoselülozik yapının gevşetilmesine yönelik yöntemlerdir. Bu uygulamalarda yüksek sıcaklık ve suyun birlikte etkisiyle özellikle hemiselüloz fraksiyonunun çözünürlüğü artabilmekte ve selüloz lifleri daha erişilebilir hale gelebilmektedir. Kimyasal madde kullanımının azaltılması, bu yöntemlerin çevresel açıdan önemli bir avantajıdır. Bununla birlikte hidrotermal ve ekstrüzyon işlemlerinde sıcaklık ve işlem süresinin aşırı artırılması, karbonhidratların parçalanmasına ve istenmeyen bileşiklerin oluşmasına neden olabilmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık koşullarında furfural ve 5-hidroksimetilfurfural gibi bileşiklerin oluşması, sonraki mikrobiyal fermantasyon süreçlerini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle işlem şiddetinin, lignoselülozik yapının parçalanması ile besin maddelerinin korunması arasında optimum denge sağlayacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Du vd., 2019).

3.2.4. Buhar Uygulaması ve Buhar Patlatma

Buhar uygulaması ve özellikle buhar patlatma (steam explosion), lignoselülozik materyallerin yapısal özelliklerinin değiştirilmesinde kullanılan ileri fiziksel ön işlem teknikleridir. Buhar patlatma işleminde saman yüksek sıcaklık ve basınç altında belirli bir süre tutulmakta, daha sonra ani basınç düşüşüne maruz bırakılmaktadır. Basınçtaki ani değişim, hücre duvarında fiziksel parçalanmaya neden olmakta ve özellikle hemiselülozun çözünmesini kolaylaştırmaktadır. Bunun sonucunda selüloz liflerinin rumen

mikroorganizmaları tarafından kullanılabilirliği artabilmektedir (Du vd., 2019). Buhar patlatmanın samanın ruminal kullanımını geliştirmedeki etkisi, işlem koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Buğday samanı üzerinde yapılan çalışmalarda uygun işlem koşullarının selüloz ve hemiselülozun mikrobiyal erişilebilirliğini artırdığı ve ruminal fermantasyonu olumlu yönde etkileyebildiği bildirilmiştir (Kalkan ve Karabulut, 2003).

3.2.5. Mikrodalga Uygulamaları

Mikrodalga uygulamaları, lignoselülozik materyallerin yapısal özelliklerinin değiştirilmesi ve ön işlem etkinliğinin artırılması amacıyla araştırılan alternatif fiziksel yöntemlerden biridir. Mikrodalga enerjisi, materyaldeki polar moleküller ve iyonlarla etkileşerek dipol rotasyonu ve iyonik iletim yoluyla hızlı ve hacimsel ısınmaya neden olabilmektedir. Bu özellik, geleneksel ısıtma yöntemlerinden farklı olarak ısının materyal içerisinde daha hızlı oluşmasını sağlayarak lignoselülozik yapının parçalanmasına ve selüloz ile hemiselüloz fraksiyonlarının daha erişilebilir hâle gelmesine katkıda bulunabilmektedir (Janker-Obermeier vd., 2012; Singh vd., 2014). Mikrodalga uygulamalarının etkinliği; mikrodalga gücü, uygulama süresi, materyalin nem içeriği, partikül büyüklüğü, sıcaklık, kullanılan çözücü veya kimyasal madde ve lignoselülozik materyalin başlangıç kompozisyonu gibi birçok faktöre bağlıdır. Özellikle nem içeriği, mikrodalga enerjisinin absorpsiyonu ve materyal içerisinde ısının oluşumu açısından önemli bir faktördür. Bu nedenle işlem koşullarının materyalin özelliklerine göre optimize edilmesi gerekmektedir (Gallego-García vd., 2023). Mikrodalga işlemlerinin alkali uygulamalarla kombine edilmesi**,** lignoselülozik yapının parçalanmasını ve lignin ile hemiselülozun uzaklaştırılmasını daha ileri düzeye taşıyabilmektedir. Özellikle buğday samanı üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, mikrodalga destekli NaOH uygulamasının hemiselüloz ve ligninin çözündürülmesinde etkili olduğu ve uygulama şiddetinin lignin uzaklaştırılması üzerinde önemli rol oynadığı bildirilmiştir (Janker-Obermeier vd., 2012). Pirinç samanında gerçekleştirilen araştırmalarda da mikrodalga-alkali kombinasyonunun yalnızca alkali uygulamasına kıyasla daha kısa işlem süresinde lignin ve hemiselüloz uzaklaştırılmasını ve enzimatik hidroliz etkinliğini artırabildiği gösterilmiştir (Zhu vd., 2005; Singh vd., 2014). Bununla birlikte, mikrodalga ön işlemlerinin etkinliği kullanılan işlem koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. Aşırı işlem şiddeti, enerji tüketiminin artması, istenmeyen parçalanma ürünlerinin oluşması ve proses maliyetlerinin yükselmesi gibi olumsuzluklara neden olabilir. Ayrıca mikrodalga uygulamalarının büyük ölçeğe taşınmasında enerji aktarımı, sıcaklık dağılımının homojenliği ve proses kontrolü önemli sınırlılıklar oluşturmaktadır (Gallego-García vd., 2023).

3.2.6. Işınlama Teknikleri

Gama ışını uygulamaları, lignoselülozik materyallerin yapısal direncini azaltmak ve selülozik fraksiyonların daha erişilebilir hâle getirilmesini sağlamak

amacıyla araştırılan fiziksel ön işlem yöntemlerinden biridir. İyonlaştırıcı radyasyon, lignoselülozik materyalde serbest radikallerin oluşmasına ve özellikle selüloz, hemiselüloz ve lignin yapısındaki kimyasal bağların parçalanmasına neden olabilmektedir. Bu süreç, lif yapısında yapısal değişimlere ve enzimlerin veya diğer kimyasal ajanların erişebileceği yüzey alanının artmasına katkı sağlayabilmektedir. Buğday samanı üzerinde yapılan araştırmalarda gama ışını uygulamasının samanın yapısal bütünlüğünü değiştirdiği, parçalanabilirliğini artırdığı ve uygulama dozuna bağlı olarak enzimatik hidrolizi etkilediği bildirilmiştir (Yang vd., 2008).Gama ışını uygulamasının etkinliği büyük ölçüde absorbe edilen radyasyon dozuna bağlıdır. Yang vd. (2008), Co-60 gama ışını ile farklı dozlarda muamele edilen buğday samanında radyasyon dozunun artmasına bağlı olarak ağırlık kaybının ve materyalin kırılganlığının arttığını, öğütme sonrasında partikül boyutunun daha küçük fraksiyonlara doğru kaydığını ve bunun enzimatik hidroliz üzerinde etkili olduğunu bildirmiştir. Bu sonuçlar, gama ışını uygulamasının yalnızca kimyasal kompozisyonu değil, aynı zamanda samanın fiziksel yapısını ve sonraki parçalama işlemlerine duyarlılığını da değiştirebildiğini göstermektedir.

Gama ışını uygulamasının alkali ön işlemlerle birlikte kullanılması**,** lignoselülozik materyalin parçalanmasını daha da artırabilmektedir. Buğday samanı üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, gama ışını ile NaOH uygulamasının birlikte kullanılmasının hemiselüloz ve ligninin çözünmesini artırdığı, ayrıca enzimlerin ulaşabileceği yüzey alanını genişlettiği bildirilmiştir. Özellikle 100 kGy gama ışını uygulamasının ardından %2 NaOH ile 1 saatlik işlemin, indirgen şeker verimini önemli düzeyde artırdığı ve alkali tüketimini azaltabildiği belirlenmiştir (Yin ve Wang, 2016). Benzer şekilde Shen vd. (2009), buğday samanında gama ışını ve alkali çözeltinin birlikte uygulanmasının sinerjik bir etki oluşturduğunu ve gama ışını uygulamasının gerekli alkali konsantrasyonunu ve ön işlem süresini azaltabildiğini bildirmiştir.

3.2.7. Ultrasonik İşlemler

Ultrasonik uygulamalar, lignoselülozik materyallerin yapısal direncini azaltmak ve ön işlem etkinliğini artırmak amacıyla araştırılan fiziksel yöntemlerden biridir. Ultrasonik dalgaların sıvı ortamda oluşturduğu akustik kavitasyon, ardışık basınç değişimleri sonucunda mikro kabarcıkların oluşmasına ve bunların hızla çökmesine neden olmaktadır. Kavitasyon sırasında meydana gelen mikrojetler, şok dalgaları ve lokal basınç değişimleri, lignoselülozik materyalin yüzeyinde erozyon, partikül boyutunda küçülme ve hücre duvarı yapısında fiziksel değişikliklere yol açabilmektedir. Bu etkiler, lignin–karbonhidrat matriksinin parçalanmasını ve selülozik yapıların enzimler tarafından erişilebilirliğinin artırılmasını sağlayabilmektedir (Bussemaker ve Zhang, 2013; Bundhoo ve Mohee, 2018).

Ultrasonik uygulamaların etkinliği; ultrasonik frekans, uygulama süresi, enerji yoğunluğu, materyalin konsantrasyonu, çözücü ortamı ve reaktör geometrisi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Özellikle ultrasonik işlemin alkali, asidik veya oksidatif uygulamalarla birlikte gerçekleştirilmesi, lignoselülozik yapının parçalanmasını ve kimyasal maddelerin materyal içerisine transferini kolaylaştırabilmektedir. Literatürde ultrasonik uygulamaların alkali işlemlerle birlikte kullanılmasının ligninin uzaklaştırılması ve karbonhidratların enzimatik hidrolize erişilebilirliği üzerinde olumlu etkiler oluşturabildiğini bildirilmektedir (Bussemaker ve Zhang, 2013; Kälkäjä vd., 2025). Buğday samanı üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, ultrasonik işlemin farklı oksidatif ön işlemlerle birlikte uygulanması incelenmiş ve ultrasonik uygulamanın kimyasal ön işlemlerin bazı özelliklerini değiştirebildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte, araştırmada ultrasonik işlemin bazı koşullarda delignifikasyon etkinliğini azaltabildiği ve bunun ligninin yeniden yoğunlaşmasıyla ilişkili olabileceği belirtilmiştir. Bu sonuçlar, ultrasonik uygulamaların etkisinin yalnızca işlem uygulanıp uygulanmamasına değil, kullanılan kimyasal ortam ve işlem koşullarına da bağlı olduğunu göstermektedir (Bussemaker vd., 2013). Ultrasonik uygulamalar ayrıca enzimatik hidroliz aşamasının etkinliğini artırmak amacıyla da kullanılabilmektedir. Ultrasonik enerji, lignoselülozik materyalin yapısal rijitliğini azaltarak kütle transfer direncini düşürebilmekte ve böylece enzimlerin substrata erişimini kolaylaştırabilmektedir. Bu nedenle ultrasonik işlemler, özellikle kimyasal veya enzimatik ön işlemlerle kombine bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir (Bussemaker ve Zhang, 2013). Kälkäjä vd. (2025) kimyasal veya enzim destekli ultrasonik ön işlemlerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği; proses yoğunluğu, enerji tüketimi, reaktör tasarımı ve ölçek büyütme açısından ele alınmış ve ultrasonik teknolojilerin özellikle diğer ön işlem yöntemlerini destekleyici veya tamamlayıcı bir teknoloji olarak geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle ultrasonik işlemlerin samanların ruminant beslemesinde kullanımında, yalnızca lignoselülozik yapının parçalanması değil, işlem maliyeti, enerji girdisi, yem değerindeki değişimler ve büyük miktarlardaki materyalin homojen olarak işlenebilmesi birlikte değerlendirilmelidir.

4. Kimyasal Yöntemle Muamele

Düşük kaliteli kaba yemlerin, özellikle tahıl samanlarının, besleme değerinin artırılmasında kimyasal muameleler uzun yıllardır kullanılan etkili ön işlem yöntemlerinden biridir. Kimyasal muameleler lignin-karbonhidrat bağlarını zayıflatarak veya parçalayarak hücre duvarının yapısını gevşetmekte, ligninin bir bölümünü uzaklaştırmakta ve lif fraksiyonlarının ruminal parçalanabilirliğini artırabilmektedir (Moss vd., 1990; Chandra vd., 2007; Jönsson ve Martín, 2016). Kimyasal yöntemlerin etkinliği; kullanılan kimyasal maddenin türü ve konsantrasyonu, uygulama sıcaklığı, işlem süresi, materyalin nem içeriği, partikül büyüklüğü ve samanın başlangıç lignin düzeyi gibi birçok faktöre

bağlıdır. Bu nedenle aynı kimyasal uygulamanın farklı saman türlerinde aynı düzeyde sonuç vermesi beklenmemektedir. Özellikle lignin içeriği yüksek ve sindirilebilirliği düşük materyallerde kimyasal muameleye verilen yanıtın daha belirgin olabileceği bildirilmektedir (Jönsson ve Martín, 2016). Kimyasal yöntemler genel olarak alkali, asidik ve oksidatif uygulamalar şeklinde sınıflandırılmaktadır.

4.1. Alkali Muamele

Alkali uygulamalar, samanların kimyasal olarak işlenmesinde en yaygın ve etkili yöntemler arasında yer almaktadır. Bu amaçla başlıca sodyum hidroksit (NaOH), kalsiyum hidroksit [$Ca(OH)_2$], amonyak (NH_3) ve üre kullanılmaktadır. Alkali maddeler, özellikle lignin ile hemiselüloz ve selüloz arasındaki ester bağlarının parçalanmasını kolaylaştırmakta, hücre duvarında şişmeye neden olmakta ve lignoselülozik matriksin geçirgenliğini artırmaktadır. Böylece rumen mikroorganizmalarının yapısal karbonhidratlara ulaşması kolaylaşmaktadır (Jönsson ve Martín, 2016). Alkali işlemlerin asidik uygulamalara göre önemli avantajlarından biri, tarımsal artıkların delignifikasyonunda etkili olmaları ve uygun koşullarda yapısal karbonhidrat kayıplarının daha sınırlı kalabilmesidir. Bununla birlikte, kullanılan alkali maddenin türüne göre işlem maliyeti, güvenlik, çevresel etki ve işlem sonrası materyalin mineral kompozisyonundaki değişiklikler önemli sınırlılıklar oluşturabilmektedir (Maulfair vd., 2011).

4.1.1. Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit, lignoselülozik materyallerin delignifikasyonunda oldukça etkili bir alkalidir. NaOH uygulaması sırasında lignin-karbonhidrat bağlarının parçalanması ve hemiselülozun kısmen çözünmesi sonucunda hücre duvarının rumen mikroorganizmaları tarafından parçalanabilirliği artabilmektedir. Bunun sonucunda kuru madde ve organik madde sindirilebilirliğinde önemli iyileşmeler sağlanabilmektedir (Chandra vd., 2007). Moss vd. (1990), buğday, arpa ve yulaf samanlarının kuru madde başına 45 kg NaOH/ton düzeyinde muamele edilmesinin sindirilebilirlik ve enerji değerini artırdığını bildirmiştir. Araştırmada, NaOH uygulaması sonucunda sindirilebilir organik madde miktarının 161 g/kg kuru madde, sindirilebilir enerji içeriğinin ise 2,42 MJ/kg kuru madde arttığı; hemiselüloz içeriğinin azaldığı belirlenmiştir. Bu bulgular, NaOH uygulamasının düşük kaliteli tahıl samanlarının besleme değerinin iyileştirilmesinde etkili olabileceğini göstermektedir (Moss vd., 1990). Arpa samanı üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada Bachmann vd. (2022), NaOH ve üre uygulamalarının etkilerini karşılaştırmıştır. Araştırmada, samanın *in vitro* organik madde sindirilebilirliği kontrol grubunda 0,31 iken NaOH uygulamasıyla 0,51'e yükselmiş ve bu artış istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Üre uygulamasında ise sindirilebilirlik 0,41 olarak belirlenmiş, ancak kontrol grubuna kıyasla gözlenen artış istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p> 0,05$). Bununla birlikte, samanın toplam karma rasyon (TKR) içerisinde

kullanıldığı *in vitro* deneylerde uygulamaların organik madde sindirilebilirliği ve gaz üretimi üzerinde belirgin bir etkisi saptanmamıştır. Buna karşılık, NaOH uygulanmış saman içeren rasyonun hayvanlarda belirlenen toplam sindirilebilirliğinde bazı lif fraksiyonları bakımından artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar, kimyasal muamelelerin etkilerinin değerlendirilmesinde yalnızca işlenmiş samanın değil, samanın rasyon içerisindeki kullanımının ve ölçülen sindirilebilirlik göstergesinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Bachmann vd., 2022). Bununla birlikte NaOH kullanımının bazı önemli dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek düzeylerde NaOH kullanılması samanın sodyum ve kül içeriğini artırabilmekte, dolayısıyla işlem görmüş materyalin rasyona katılım düzeyinin belirlenmesinde mineral dengesi dikkate alınmalıdır. Ayrıca NaOH'ın yüksek korozif özelliği iş güvenliği açısından dikkat gerektirmekte, işlem sonrasında ortaya çıkan atıkların ve yıkama sularının uygun şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bu nedenlerle NaOH, yüksek delignifikasyon kapasitesine rağmen özellikle doğrudan çiftlik koşullarındaki uygulamalarda dikkatle değerlendirilmelidir.

4.1.2. Kalsiyum Hidroksit

Kalsiyum hidroksit [$Ca(OH)_2$], sodyum hidroksite alternatif olarak kullanılan önemli bir alkali maddedir. Kalsiyum hidroksit lignoselülozik yapıdaki bağların parçalanmasını ve hücre duvarı bileşenlerinin rumen mikroorganizmaları tarafından daha erişilebilir hâle gelmesini sağlayarak samanın sindirilebilirliğini artırabilmektedir (Zaman vd., 1994; Zaman ve Owen, 1995). $Ca(OH)_2$ uygulamasının etkinliği; uygulama düzeyi, nem içeriği, işlem süresi ve sıcaklık gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Arpa samanı üzerinde yapılan çalışmalarda $Ca(OH)_2$ düzeyinin artırılmasının *in vitro* organik madde sindirilebilirliğinde doğrusal bir artış sağlayabildiği bildirilmiştir (Zaman vd., 1994). Çeltik samanında gerçekleştirilen çalışmalarda ise $Ca(OH)_2$ ve üre uygulamalarının organik madde tüketimi ve sindirilebilirliğini artırabildiği, ayrıca $Ca(OH)_2$ uygulamasının lif fraksiyonlarının parçalanmasında etkili olduğu bildirilmiştir (Nguyen Xuan Trach vd., 2001).

4.1.3. Üre ile Muamele

Üre ile muamele, tahıl samanlarının besleme değerinin artırılmasında kullanılan pratik ve ekonomik kimyasal yöntemlerden biridir. Üre, saman içerisindeki üreaz enziminin etkisiyle hidrolize olarak amonyak oluşturmakta ve oluşan amonyak lignoselülozik yapı üzerinde alkali etki göstermektedir. Amonyak, özellikle lignin ile yapısal karbonhidratlar arasındaki bağların parçalanmasına veya zayıflamasına katkıda bulunarak hücre duvarının şişmesini ve selüloz ile hemiselülozun rumen mikroorganizmaları tarafından daha erişilebilir hâle gelmesini sağlayabilmektedir (Sundstøl ve Owen, 1984; Nguyen Xuan Trach vd., 2001). Üre uygulamasının önemli avantajlarından biri, samanın yapısal özelliklerini değiştirmesinin yanı sıra samanın azot içeriğini de

artırmasıdır**.** Bu nedenle üre ile muamele, düşük ham protein içeriğine sahip tahıl samanlarının hem lifli fraksiyonlarının kullanımını hem de rumen mikroorganizmaları açısından azot arzını iyileştirebilmektedir. Bununla birlikte uygulamanın etkinliği; samanın türü, başlangıç nem içeriği, kullanılan üre miktarı, sıcaklık ve işlem süresi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Tahıl samanlarının amonyak veya üre ile muamelesinde yaklaşık %3–5 üre düzeyleri yaygın olarak kullanılmakla birlikte, optimum uygulama koşullarının samanın özelliklerine göre belirlenmesi gerekmektedir (Sundstøl ve Owen, 1984; Nguyen Xuan Trach vd., 2001).

Üre ile muamelede nem içeriği önemli bir işlem faktörüdür**.** Yeterli nem, ürenin hidrolizini ve oluşan amonyağın saman dokusu içerisinde yayılmasını kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte aşırı nem, işlem sırasında amonyak kayıplarını artırabileceğinden uygulama etkinliğini azaltabilmektedir. Benzer şekilde sıcaklık, ürenin amonyağa dönüşüm hızını ve amonyağın lignoselülozik materyalle reaksiyonunu etkileyebilmektedir. Daha yüksek sıcaklıklar işlemi hızlandırabilmekle birlikte, özellikle uygun olmayan koşullarda amonyak kayıplarının artmasına neden olabilmektedir (Saadullah vd., 1981). Üre veya amonyak ile muamele edilmiş samanların hayvan beslemesinde kullanımının kuru madde tüketimi, organik madde sindirilebilirliği ve rumen fermantasyonu üzerinde olumlu etkiler oluşturabildiği bildirilmektedir (Satter ve Slyter, 1974; Graham, ve Aman, 1997). Üre uygulamasında işlem dozunun gereğinden fazla artırılması ise her zaman ilave bir besleme avantajı sağlamayabilir. Yüksek üre düzeyleri, işlem sonrasında amonyak kayıplarının artmasına ve azot kullanım etkinliğinin azalmasına neden olabilmektedir. Ayrıca işlem görmüş materyalin hayvanlara sunulmasında kalıntı amonyak düzeyi ve rasyonun toplam azot dengesi dikkate alınmalıdır. Bu nedenle üre ile muamele koşullarının samanın kimyasal yapısı, nem içeriği, depolama süresi ve hayvanın besin gereksinimleri dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir.

4.1.4. Amonyakla Muamele

Amonyakla muamele, düşük kaliteli samanların besleme değerinin artırılmasında uzun yıllardır kullanılan kimyasal ön işlem yöntemlerinden biridir. Amonyak (NH_3), lignoselülozik materyale doğrudan nüfuz ederek hücre duvarı bileşenleri arasındaki etkileşimleri değiştirebilmekte ve özellikle lignin–karbonhidrat komplekslerinin parçalanabilirliğini artırabilmektedir. Bu değişimler, selüloz ve hemiselülozun rumen mikroorganizmaları tarafından daha kolay erişilebilir hâle gelmesine ve dolayısıyla samanın sindirim hızının ve potansiyel olarak sindirilebilir fraksiyonunun artmasına katkı sağlamaktadır (Satter ve Slyte, 1974).

Amonyakla muamelenin önemli sonuçlarından biri de samanın azot içeriğinin artmasıdır**.** İşlem sırasında amonyağın bir bölümü materyal tarafından tutulmakta ve böylece muamele edilmiş samanın ham protein/azot içeriği yükselmektedir.

Sundstøl (1984), amonyak muamelesinin samanın organik madde sindirilebilirliğini genel olarak yaklaşık %8-12 oranında artırabildiğini ve aynı zamanda samanın azot içeriğinde belirgin artış sağlayabildiğini bildirmiştir. Ma vd., (2020), amonyaklaştırılmış çeltik samanında ham protein içeriğinin arttığını ve *in vitro* kuru madde ile NDF sindirilebilirliğinin iyileştiğini bildirmiştir. Buğday samanı üzerinde gerçekleştirilen *in vivo* çalışmalarda da amonyak uygulamasının besleme değerini artırabildiği gösterilmiştir. Jewell ve Campling (1986), sulu amonyakla muamele edilen buğday samanında azot içeriğinin yaklaşık iki katına çıktığını ve saman tüketimi ile organik madde sindirilebilirliğinin arttığını bildirmiştir. Benzer şekilde, Herrera-Saldana vd. (1983), amonyakla muamele edilen buğday samanında ham protein ve *in vitro* kuru madde sindirilebilirliğinin kontrol samanına göre önemli ölçüde yükseldiğini belirlemiştir. Amonyak uygulamasının etkinliği; **a**monyak düzeyi, materyalin nem içeriği, sıcaklık, uygulama süresi ve samanın başlangıç kimyasal kompozisyonu gibi faktörlere bağlıdır. Özellikle işlem sırasında amonyağın saman içerisinde tutulması ve lignoselülozik yapı ile yeterli süre etkileşime girmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle uygulama koşullarının saman türüne göre optimize edilmesi gerekmektedir. Örneğin buğday ve arpa samanlarının yaklaşık %3 amonyak ile muamele edildiği bir çalışmada, organik madde sindirilebilirliğinde ortalama %11,2'lik artış sağlanmış; ancak uygulamanın etkisinin samanın başlangıç kalitesine ve işlem koşullarına bağlı olarak değiştiği bildirilmiştir (Herrera-Saldana vd. 1983; Cottyn ve De Boever, 1988).

4.2. Asidik Muamele

Asidik ön işlemler, lignoselülozik materyallerin yapısında özellikle hemiselülozun hidrolizini ve çözünmesini artırmak amacıyla uygulanan kimyasal yöntemlerdir. Bu amaçla başta sülfürik asit (H_2SO_4) ve hidroklorik asit (HCl) olmak üzere çeşitli mineral asitler ile formik, asetik ve diğer organik asitlerden yararlanılabilmektedir. Asit katalizli koşullarda hücre duvarındaki hemiselülozik polisakkaritlerin hidrolizi hızlanmakta, bunun sonucunda ksilan ve diğer hemiselüloz fraksiyonlarının bir bölümü çözünerek selülozun enzimatik veya mikrobiyal olarak erişilebilirliği artabilmektedir. Asidik ön işlemin etkinliği; asidin türü ve konsantrasyonunun yanı sıra sıcaklık, işlem süresi, nem düzeyi ve materyalin başlangıç kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir (Gu vd., 2021). Asidik işlemlerin temel avantajlarından biri, hemiselüloz fraksiyonu üzerinde yüksek etkinlik göstermeleri ve lignoselülozik yapının daha sonraki hidroliz aşamalarına hazırlanmasına katkı sağlamalarıdır. Bununla birlikte, mineral asitlerin yüksek konsantrasyonlarda kullanılması ekipmanlarda korozyona, işlem güvenliği açısından risklere ve işlem sonrasında nötralizasyon gereksinimine neden olabilmektedir. Ayrıca işlem şiddetinin aşırı artırılması, açığa çıkan pentoz ve heksozların daha ileri parçalanmasına yol açarak furfural ve 5-hidroksimetilfurfural**)** gibi bileşiklerin oluşumunu artırabilmektedir. Söz konusu bileşikler, mikroorganizmaların gelişimini ve

fermentatif faaliyetlerini olumsuz etkileyebildiğinden, özellikle ön işlem görmüş materyalin mikrobiyal fermantasyonda veya rumen ortamında değerlendirilmesi durumunda önem taşımaktadır (Jose vd., 2022). Asidik ön işlemlerde işlem şiddetinin kontrol edilmesi bu nedenle kritik öneme sahiptir. Nitekim seyreltik sülfürik asitle gerçekleştirilen çalışmalarda, sıcaklık ve asit konsantrasyonundaki değişimlerin hemiselülozun çözünmesi ile selülozun daha sonraki enzimatik parçalanabilirliği üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu bildirilmiştir (Gu vd., 2021). Bu durum, asit konsantrasyonu ve sıcaklığın gereğinden fazla artırılmasının her zaman daha yüksek biyolojik yararlanım sağlamayacağını göstermektedir. Son yıllarda mineral asitlere alternatif olarak organik asitlerle ön işlem uygulamaları da araştırılmaktadır. Formik, asetik, oksalik, sitrik ve maleik asit gibi organik asitler, lignoselülozik materyallerin fraksiyonlanması ve özellikle hemiselülozun çözündürülmesi amacıyla kullanılabilmektedir. Organik asitlerin etkinliği kullanılan asidin kimyasal yapısına, konsantrasyonuna, sıcaklığa ve işlem süresine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin formik asitle buğday samanının ön işlemine yönelik çalışmalar, işlem şiddetinin hemiselüloz ve lignin çözünmesi ile karbonhidratların geri kazanımı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir (Dong vd., 2015; Liu vd., 2022).

4.3. Oksidatif Muamele

Oksidatif ön işlemler, lignoselülozik materyallerin yapısındaki özellikle ligninin oksidatif olarak parçalanmasını veya yapısal olarak değiştirilmesini sağlayarak selüloz ve hemiselülozun erişilebilirliğini artırmayı amaçlayan kimyasal yöntemlerdir. Bu amaçla ozon (O_3), hidrojen peroksit (H_2O_2), perasetik asit ve çeşitli ileri oksidasyon sistemleri kullanılabilmektedir. Oksidatif ön işlemlerin temel etkisi, lignin yapısının parçalanması veya modifiye edilmesi sonucunda hücre duvarındaki lignin kaynaklı fiziksel engelin ve enzimlerin lignine non-produktif bağlanmasının azaltılmasıdır. Böylece selülozun enzimatik hidrolizi ve mikrobiyal parçalanabilirliği artırılabilmektedir (Zhou vd., 2023). Ozon, lignoselülozik materyallerde özellikle ligninin aromatik yapıları üzerinde etkili olan güçlü bir oksitleyicidir. Ozonlama sırasında ligninin yapısal bileşenlerinde oksidatif değişimler meydana gelmekte ve bunun sonucunda lignin içeriği ve ligninin karbonhidratlarla oluşturduğu yapısal engeller azalabilmektedir. Bu durum, selülozun enzimatik olarak parçalanabilirliğini artırmaktadır. Buğday ve çavdar samanı üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, ozon ön işleminin asit çözünmeyen lignin içeriğini azalttığı ve selüloz kaybının oldukça düşük düzeylerde kaldığı bildirilmiştir. Bununla birlikte, ozonlama etkinliğinin nem içeriği, partikül büyüklüğü, ozon konsantrasyonu, ozon-hava akış oranı ve materyalin özelliklerine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir (Talebnia vd., 2009). Ozonun bir diğer önemli özelliği, uygun işlem koşullarında lignine karşı göreceli olarak seçici davranabilmesidir. Bu nedenle selülozun korunması açısından avantaj sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, ozonun yüksek reaktivitesi nedeniyle işlem koşullarının dikkatli şekilde kontrol edilmesi

gerekmektedir. Ozonlama sırasında lignin yapısında meydana gelen değişimler buğday samanının enzimatik parçalanabilirliğini artırırken, işlem şiddetinin artırılması lignin ve hemiselülozun çözünmesi üzerinde de etkili olabilmektedir. Bu nedenle ozon miktarı, nem düzeyi ve işlem süresi arasındaki dengenin sağlanması önem taşımaktadır (Talebnia vd.,2009; Zhou vd.,2023). Hidrojen peroksit (H_2O_2) ise özellikle alkali ortamda uygulandığında etkili bir oksidatif ön işlem maddesi olarak değerlendirilmektedir. Alkali hidrojen peroksit uygulamalarında H_2O_2'nin parçalanması sonucunda oluşan reaktif oksijen türleri ligninin çeşitli fonksiyonel gruplarıyla reaksiyona girerek lignin çözünmesini ve delignifikasyonu artırabilmektedir. Bu süreç sonucunda ligninin selüloz yüzeyindeki fiziksel engelleyici etkisi azalmakta ve selülozun enzimatik hidrolizi kolaylaşmaktadır. Alkali hidrojen peroksit ön işlemlerinin düşük sıcaklık ve basınç koşullarında gerçekleştirilebilmesi ve polisakkaritlerin önemli bir bölümünün korunabilmesi yöntemin başlıca avantajları arasında yer almaktadır (Ho vd., 2019; Zhou vd., 2023). Bununla birlikte, oksidatif ön işlemlerin bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Özellikle oksidantların maliyeti**,** işlem koşullarının kontrolü ve yüksek oksidant dozlarında yapısal karbonhidratların da oksidatif parçalanmaya uğrayabilmesi önemli hususlardır (Ho vd., 2019; Zhou vd., 2023).

5. Biyolojik Yöntemle Muamele

Biyolojik yöntemler; lignoselülozik materyalin mikroorganizmalar, mikroorganizmaların ürettiği enzimler veya kontrollü mikrobiyal fermantasyon süreçleri aracılığıyla yapısal olarak değiştirilmesine dayanmaktadır. Bu uygulamaların temel amacı, bitki hücre duvarında lignin, selüloz ve hemiselüloz arasında bulunan kompleks yapının parçalanması veya zayıflatılması ve böylece yapısal karbonhidratların rumen mikroorganizmaları tarafından daha kolay kullanılabilir hâle getirilmesidir. Özellikle beyaz çürükçül mantarlar tarafından gerçekleştirilen biyolojik delignifikasyon ile fibroolitik enzim uygulamaları, düşük kaliteli kaba yemlerin sindirilebilirliğinin artırılması açısından dikkat çekmektedir (van Kuijk vd., 2015; Nayan vd.,2020). Biyolojik yöntemlerin önemli avantajlarından biri, uygun koşullar altında lignoselülozik yapının kimyasal madde kullanımını sınırlı tutarak modifiye edilebilmesidir. Bu durum, kimyasal işlemlerde ortaya çıkabilen yüksek alkali veya asit tüketimi, nötralizasyon gereksinimi ve atık yönetimi gibi sorunların azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Ayrıca tarımsal artıkların yem kaynağına dönüştürülmesi, kaynakların daha etkin kullanılmasına ve döngüsel biyoekonomik yaklaşımının desteklenmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte biyolojik işlemlerin etkinliği; kullanılan mikroorganizmanın tür ve suşuna, substratın kimyasal bileşimine, nem düzeyine, sıcaklığa, pH'ya, oksijen koşullarına ve işlem süresine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Özellikle fungal uygulamalarda işlem süresinin uzun olması, mikrobiyal kontaminasyon riski ve proses koşullarının standardize edilmesindeki güçlükler yöntemin ticari kullanımını sınırlayan başlıca faktörlerdir (van Kuijk vd., 2015).

Biyolojik ön işlemler genel olarak mantar temelli uygulamalar, bakteriyel uygulamalar, enzimatik uygulamalar ve kontrollü mikrobiyal fermantasyon şeklinde değerlendirilebilir. Bunlar içerisinde özellikle beyaz çürükçül mantarlarla gerçekleştirilen katı hâl fermantasyonu, lignoselülozik materyallerin yem değerinin artırılması açısından en fazla araştırılan uygulamalardan biridir.

5.1. Beyaz Çürükçül Mantarlarla Muamele

Beyaz çürükçül mantarlar, lignoselülozik materyallerde lignini parçalayabilme yetenekleri nedeniyle biyolojik ön işlemler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bu mantarlar başta lignin peroksidaz ve mangan peroksidaz olmak üzere çeşitli ligninolitik enzimler üreterek ligninin karmaşık yapısının parçalanmasına veya yapısal olarak değiştirilmesine katkı sağlamaktadır. Lignin yapısındaki bu değişimler, selüloz ve hemiselülozun rumen mikroorganizmaları tarafından erişilebilirliğini artırabilmekte ve dolayısıyla yapısal karbonhidratların parçalanabilirliğini geliştirebilmektedir (Isroi vd., 2011; van Kuijk vd., 2015). Beyaz çürükçül mantarlar içerisinde *Pleurotus, Ceriporiopsis, Phanerochaete* ve *Lentinula* cinslerine ait bazı türlerin lignini, selüloz ve hemiselüloza kıyasla daha seçici biçimde parçalayabildiği bildirilmektedir. Bu seçici delignifikasyon özelliği, ruminant beslemede biyolojik ön işlemin başarısı açısından önemlidir. Çünkü ön işlemin temel amacı yalnızca lignin içeriğini azaltmak değil, aynı zamvea selüloz ve hemiselülozun mümkün olduğunca korunarak rumen mikroorganizmalarının kullanımına daha fazla sunulmasını sağlamaktır (van Kuijk vd., 2015; Nayan vd., 2020). Tuyen vd. (2012) tarafından buğday samanı üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, farklı beyaz çürükçül mantarların lignin parçalama ve rumen fermentasyonu üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Çalışmada bazı mantarların lignin içeriğinde %63'e kadar azalma sağlayabildiği, ancak lignin kaybının bazı uygulamalarda hemiselüloz kaybıyla da birlikte gerçekleştiği bildirilmiştir. *Ceriporiopsis subvermispora* ile 49 gün süreyle muamele edilen buğday samanında toplam gaz üretiminin 200 mL/g organik maddeden 309 mL/g organik maddeye yükseldiği belirlenmiştir. Araştırmacılar, lignini yapısal karbonhidratlara kıyasla daha seçici biçimde parçalayan mantarların rumen fermentasyonunu geliştirme açısından daha yüksek potansiyele sahip olduğunu bildirmiştir (Tuyen vd., 2012).

Biyolojik ön işlemlerde uygulama başarısını belirleyen önemli faktörlerden biri de mikroorganizmanın suş özellikleridir**.** Aynı tür içerisinde farklı suşların lignin parçalama kapasitesi, büyüme hızı, enzim aktivitesi ve selüloz kaybına neden olma düzeyleri birbirinden farklı olabilmektedir. Nayan vd. (2020), farklı *C. subvermispora* suşlarının buğday samanının *in vitro* gaz üretimi üzerindeki etkilerini karşılaştırmış ve suşlar arasında belirgin farklılıklar bulunduğunu bildirmiştir. Çalışmada CS1 suşunun farklı buğday samanı partilerinde *in vitro* gaz üretimini %27,7–47,6 oranında artırabildiği belirlenmiştir. *Pleurotus ostreatus* ve *Pleurotus eryngii* gibi beyaz çürükçül mantarlar, farklı

lignoselülozik tarımsal artıkların biyolojik ön işleminde ve yem değerinin iyileştirilmesinde araştırılmaktadır. Bu mantarlar, lakkaz ve peroksidazlar gibi hücre dışı ligninolitik enzimler aracılığıyla lignin yapısını parçalayabilmekte ve uygun koşullarda bitki hücre duvarı bileşenlerinin erişilebilirliğini artırabilmektedir. Bununla birlikte, biyolojik ön işlemin *in vitro* sindirilebilirlik veya rumen fermentasyonu üzerindeki etkisi; mantar türüne, kullanılan substrata ve uygulama süresine bağlı olarak değişmektedir (van Kuijk vd., 2015a, 2015b). Beyaz çürükçül mantarların lignini parçalamanın yanı sıra selüloz ve hemiselülozu da karbon ve enerji kaynağı olarak kullanabilmesi, biyolojik ön işlemlerin temel sınırlılıklarından biridir. Bu nedenle başarılı bir uygulamada amaç, yalnızca yüksek lignin uzaklaştırma oranına ulaşmak değil, ligninin mümkün olduğunca seçici biçimde parçalanmasını sağlayarak yapısal karbonhidrat kayıplarını en aza indirmektir (van Kuijk vd., 2015a; van Kuijk vd., 2015b). Beyaz çürükçül mantarlarla gerçekleştirilen biyolojik ön işlemlerde yaygın olarak katı hâl fermantasyonu kullanılmaktadır. Bu yöntemde kıyılmış veya öğütülmüş saman, seçilen fungal suşun gelişmesine uygun nem düzeyine getirildikten sonra inoküle edilmekte ve kontrollü sıcaklık, nem ve oksijen koşullarında belirli bir süre inkübe edilmektedir. İnkübasyon süresince mantar miselleri substratı kolonize ederek lignoselülozik yapıyı enzimatik faaliyetleri aracılığıyla değiştirmektedir. Bununla birlikte, işlem süresinin gereğinden fazla uzatılması, mantarın ligninin yanı sıra selüloz ve hemiselülozu da kullanmasına ve buna bağlı olarak kuru madde ile yapısal karbonhidrat kayıplarının artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle biyolojik ön işlemlerde maksimum lignin kaybının gerçekleştiği sürenin değil, işlem sonucunda net yem değerindeki iyileşmenin en yüksek olduğu optimum sürenin belirlenmesi temel hedef olmalıdır (Tuyen vd., 2012; Nayan vd., 2020).

5.2. *Trichoderma* Türleri ile Muamele

Biyolojik ön işlemlerde beyaz çürükçül mantarların yanı sıra *Trichoderma* cinsine ait mikroorganizmalar da önemli bir potansiyele sahiptir. *Trichoderma* türleri özellikle selülaz, β-glukozidaz, ksilanaz ve diğer hidrolitik enzimleri üretme yetenekleri nedeniyle lignoselülozik materyallerin biyolojik olarak parçalanmasında araştırılmaktadır. Bununla birlikte *Trichoderma* uygulamalarının beyaz çürükçül mantarlarda olduğu gibi doğrudan ve seçici bir delignifikasyon yöntemi olarak değerlendirilmesi doğru değildir. Bu mikroorganizmaların temel katkısı, selüloz ve hemiselülozun parçalanmasında görev alan hidrolitik enzimlerin üretimi yoluyla yapısal karbonhidratların erişilebilirliğini ve parçalanabilirliğini artırmaktır (Jayasekara ve Ratnayake, 2019; Kumla vd., 2020). Özellikle *Trichoderma reesei*, yüksek selülaz ve hemiselülaz aktivitesi nedeniyle fibroolitik enzim üretiminde önemli bir biyolojik kaynak olarak değerlendirilmektedir (Magaço vd., 2020). Bu nedenle *Trichoderma* uygulamalarında yalnızca lignin düzeyindeki değişimlerin değil, NDF, ADF ve hemiselüloz fraksiyonları ile birlikte *in vitro* gaz üretimi, organik

madde sindirilebilirliği ve enerji değerlerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Uygulamanın etkinliği kullanılan suş, inokulum düzeyi, substratın nem içeriği, inkübasyon süresi ve başlangıç kimyasal bileşimine bağlı olarak değişebilmektedir.

5.3. Bakteriyel Uygulamalar ve Laktik Asit Bakterileri

Bakteriyel uygulamalar, lignoselülozik materyalin doğrudan parçalanması veya kontrollü fermantasyon yoluyla korunması olmak üzere farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Selülolitik ve hemiselülolitik bakteriler hücre duvarı polisakkaritlerinin parçalanmasına katkı sağlarken, laktik asit bakterileri (LAB) özellikle silaj fermantasyonunun yönlendirilmesi ve yem materyalinin korunması açısından önem taşımaktadır. Laktik asit bakterileri, suda çözünebilir karbonhidratları laktik aside dönüştürerek ortam pH'sının hızla düşmesini sağlar. Böylece enterobakteriler, klostridiler ve diğer istenmeyen mikroorganizmaların gelişimi sınırlveırılarak kuru madde ve besin maddesi kayıpları azaltılabilmektedir. *Lactiplantibacillus plantarum, Pediococcus pentosaceus, Pediococcus acidilactici* ve *Lacticaseibacillus buchneri* silaj biyoteknolojisinde yaygın olarak araştırılan türler arasındadır. Homofermentatif LAB hızlı laktik asit üretimi ve pH düşüşü açısından öne çıkarken, heterofermentatif LAB özellikle aerobik stabilitenin geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Muck vd., 2018). Bu nedenle LAB uygulamalarının beyaz çürükçül mantarlarla gerçekleştirilen biyolojik delignifikasyondan ayrılması gerekmektedir. LAB'nin temel etkisi lignini doğrudan parçalamaktan ziyade, uygun nem ve fermente olabilir karbonhidrat koşullarında kontrollü fermantasyon sağlayarak yem materyalinin korunması ve fermantasyon kalitesinin geliştirilmesidir. Özellikle samanların silajlanmasında LAB uygulamasının başarısı, materyalin başlangıç kuru madde ve suda çözünebilir karbonhidrat düzeyleri ile yakından ilişkilidir (Eser, 2016).

5.4. Eksojen Fibroolitik Enzimlerle Muamele

Biyolojik yöntemlerin bir diğer önemli grubunu dışarıdan uygulanan fibroolitik enzimler oluşturmaktadır. Selülaz, hemiselülaz, ksilanaz, β-glukanaz, pektinaz ve β-glukozidaz gibi enzimler hücre duvarının farklı polisakkarit bileşenleri üzerinde etki göstermektedir. Selülazlar selülozun parçalanmasını kolaylaştırırken, ksilanazlar hemiselülozun önemli bir bileşeni olan ksilanın hidrolizinde rol oynamaktadır. Enzimlerin birlikte kullanılması, hücre duvarı bileşenleri arasındaki etkileşimlerin azaltılmasına ve potansiyel olarak sindirilebilir lif fraksiyonlarının rumen mikroorganizmalarına daha fazla açılmasına katkı sağlayabilmektedir (Tirado-González vd., 2021). Eksojen fibroolitik enzimlerin ruminant beslemedeki etkilerine ilişkin sistematik değerlendirmelerde, uygulamaların önemli bir bölümünde kuru madde, NDF ve ADF parçalanabilirliği, *in vitro* gaz üretimi veya bazı hayvansal performans göstergelerinde olumlu sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir. Bununla birlikte enzim uygulamalarının sonuçları; yem materyalinin özellikleri, enzim tipi ve

aktivitesi, uygulama dozu, rasyonun kaba yem oranı ve uygulama yöntemine bağlı olarak değişmektedir (Tirado-González vd., 2021). Enzimlerin etkinliği yalnızca kullanılan enzimin özelliklerine değil, enzim-substrat etkileşimine de bağlıdır. Arriola vd. (2017), hayvan performansı açısından değerlendirildiğinde ise eksojen fibroolitik enzimlerin etkileri lif sindirimindeki sonuçlar kadar tutarlı değildir. Süt sığırlarında yapılan bir meta-analizde, eksojen fibroolitik enzimlerin toplam kuru madde ve NDF sindirilebilirliğinde sınırlı düzeyde iyileşme sağlayabildiği ve süt veriminde küçük bir artış oluşturabildiği bildirilmiştir. Bununla birlikte çalışmalar arasındaki yüksek heterojenlik, enzim uygulamalarının her rasyon ve hayvan grubunda aynı düzeyde yanıt oluşturmadığını göstermektedir (Arriola vd., 2017).

Sonuç

Tahıl samanları, düşük besin değerlerine karşın yüksek miktarda bulunmaları ve düşük maliyetleri nedeniyle ruminant beslemede önemli bir potansiyele sahiptir. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik ön işlemler, lignoselülozik yapıyı değiştirerek samanların sindirilebilirliğini ve besin maddelerinden yararlanılmasını artırabilmektedir. Bununla birlikte, yöntemin başarısı yalnızca lignin uzaklaştırma düzeyiyle değil, yapısal karbonhidratların korunması, besin maddesi kayıpları, işlem maliyeti, çevresel etkiler ve hayvan performansı ile birlikte değerlendirilmelidir. Bu nedenle gelecekte, düşük maliyetli, çevre dostu ve işletme koşullarında uygulanabilir biyolojik ve kombine ön işlem teknolojilerinin geliştirilmesi, samanların sürdürülebilir ruminant beslemede daha etkin kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Abdi, A. M., & Kılıç, Ü. (2018). Effect of lignin peroxidase enzyme on feed values of different straws. KSU Journal of Agriculture ve Nature, 21(3), 374–384. https://doi.org/10.18016/ksudobil.346585.

Arriola, K. G., Oliveira, A. S., Ma, Z. X., Lean, I. J., Giurcanu, M. C., & Adesogan, A. T. (2017). A meta-analysis on the effect of dietary application of exogenous fibrolytic enzymes on the performance of dairy cows. Journal of Dairy Science, 100(6), 4513–4527. https://doi.org/10.3168/jds.2016-12103.

Bachmann, M., Martens, S. D., Le Brech, Y., Kervern, G., Bayreuther, R., Steinhöfel, O., & Zeyner, A. (2022). Physicochemical characterisation of barley straw treated with sodium hydroxide or urea and its digestibility and *in vitro* fermentability in ruminants. Scientific Reports, 12, Article 20530. https://doi.org/10.1038/s41598-022-24738-w.

Bayer, E. A., Chanzy, H., Lamed, R., & Shoham, Y. (1998). Cellulose, cellulases and cellulosomes. Current Opinion in Structural Biology, 8(5), 548–557. https://doi.org/10.1016/S0959-440X(98)80143-7.

Beauchemin, K. A., & Yang, W. Z. (2005). Effects of physically effective fiber on intake, chewing activity, ve ruminal acidosis for dairy cows fed diets based on corn silage. Journal of Dairy Science, 88(6), 2117–2129. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72888-5.

Bundhoo, Z. M. A., & Mohee, R. (2018). Ultrasound-assisted biological conversion of biomass ve waste materials to biofuels: A review. Ultrasonics Sonochemistry, 40, 298–313. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.07.025.

Bussemaker, M. J., & Mu, X. (2013). Ultrasound pretreatment of wheat straw in oxidative ve nonoxidative conditions aided with microwave heating. Industrial & Engineering Chemistry Research, 52(35), 12514–12522.

Cesarino, I., Araújo, P., Domingues Júnior, A. P., & Mazzafera, P. (2012). An overview of lignin metabolism ve its effect on biomass recalcitrance. Brazilian Journal of Botany, 35, 303–311. https://doi.org/10.1590/S0100-84042012000400003.

Chvera, R. P., Bura, R., Mabee, W. E., Berlin, A., Pan, X., & Saddler, J. N. (2007). Substrate pretreatment: The key to effective enzymatic hydrolysis of lignocellulosics? Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 108, 67–93. https://doi.org/10.1007/10_2007_064

Cottyn, B. G., & De Boever, J. L. (1988). Upgrading of straw by ammoniation. Animal Feed Science ve Technology, 21(2–4), 287–294. https://doi.org/10.1016/0377-8401(88)90108-3.

Di Fraia, A., Di Fraia, S., Sharmila, G. V., Banu, R. J., & Massarotti, N. (2024). Role of advanced oxidation processes in lignocellulose pretreatment towards biorefinery applications: A review on emerging trends ve economic considerations. Green Chemistry, 26(15), 8461–8496. https://doi.org/10.1039/D3GC05108K.

Dong, L., Zhao, X., & Liu, D. (2015). Kinetic modeling of atmospheric formic acid pretreatment of wheat straw with "potential degree of reaction" models. RSC Advances, 5, 20992–21000. https://doi.org/10.1039/C4RA14634D.

Du, C., Nan, X., Wang, K., Zhao, Y., & Xiong, B. (2019). Evaluation of the digestibility of steam-exploded wheat straw by ruminal fermentation, sugar yield ve microbial structure *in vitro.* RSC Advances, 9, 41775–41782. https://doi.org/10.1039/C9RA08167D

Eser, S. (2016). İnokulant ve enzim ilavesinin farklı samanların besleme değeri üzerine etkileri [Yüksek lisans tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Gallego-García, M., Moreno, A. D., Manzanares, P., Negro, M. J., & Duque, A. (2023). Recent advances on physical technologies for the pretreatment of food waste ve lignocellulosic residues. Bioresource Technology, 369, Article 128397. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128397.

Graham, H., & Aman, P. (1984). A comparison between degradation *in vitro* ve in sacco of constituents of untreated ve ammonia-treated barley straw. Animal Feed Science ve Technology, 10(2–3), 199–211. https://doi.org/10.1016/0377-8401(84)90009-9.

Gu, Y., Guo, J., Nawaz, A., Ul Haq, I., Zhou, X., & Xu, Y. (2021). Comprehensive investigation of multiple factors in sulfuric acid pretreatment on the enzymatic hydrolysis of waste straw cellulose. Bioresource Technology, 340, Article 125740. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125740.

Gürsoy, E. (2023). Samanların besin değeri ve sindirilebilirliğini artırma yöntemleri. Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 3(1), 160–169.

Herrera-Saldana, R., Church, D. C., & Kellems, R. O. (1983). Effect of ammoniation treatment of wheat straw *on in vitro* ve *in vivo* digestibility. Journal of Animal Science, 56(4), 938–942. https://doi.org/10.2527/jas1983.564938x.

Ho, M. C., Ong, V. Z., & Wu, T. Y. (2019). Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment ve valorization: A review. Renewable ve Sustainable Energy Reviews, 112, 75–86. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.082

Idowu, W., Pires, A. J. V., Teixeira, F. A., de Carvalho Reis, G., de Queiros, G. M., Machado, I. S., Vilasboas, M. E. F., & Sani, T. R. (2026). Ammoniation of low-quality roughages for dry-season ruminant feeding: A review. Tropical

Animal Health ve Production, 58(5), Article 344. https://doi.org/10.1007/s11250-026-05155-x.

Isroi, Millati, R., Syamsiah, S., Niklasson, C., Cahyanto, M. N., Lundquist, K., & Taherzadeh, M. J. (2011). Biological pretreatment of lignocelluloses with white-rot fungi ve its applications: A review. BioResources, 6(4), 5224–5259. https://doi.org/10.15376/biores.6.4.5224-5259.

Janker-Obermeier, I., Sieber, V., Faulstich, M., & Schieder, D. (2012). Solubilization of hemicellulose ve lignin from wheat straw through microwave-assisted alkali treatment. Industrial Crops ve Products, 39, 198–203. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.022.

Jayasekara, S., & Ratnayake, R. (2019). Microbial cellulases: An overview ve applications. In Cellulose. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.84531.

Jewell, S. N., & Campling, R. C. (1986). Aqueous ammonia treatment of wheat straw: Voluntary intake ve digestibility in cattle. Animal Feed Science ve Technology, 14(1–2), 81–93. https://doi.org/10.1016/0377-8401(86)90008-8.

Jose, D., Kitiborwornkul, N., & Sriariyanun, M. (2022). A review on chemical pretreatment methods of lignocellulosic biomass: Recent advances and progress. Applied Science and Engineering Progress. https://doi.org/10.14416/j.asep.2022.08.0.

Jönsson, L. J., & Martín, C. (2016). Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory by-products ve strategies for minimizing their effects. Bioresource Technology, 199, 103–112. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.009

Jung, H. G., & Deetz, D. A. (1993). Cell wall lignification ve degradability. In H. G. Jung, D. R. Buxton, R. D. Hatfield, & J. Ralph (Eds.), Forage cell wall structure ve digestibility (pp. 315–346). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, & Soil Science Society of America.

Jung, H. J. G. (2012). Forage digestibility: The intersection of cell wall lignification ve plant tissue anatomy. In Florida Ruminant Nutrition Symposium (pp. 162–174).

Kälkäjä, S., Lappalainen, K., Delattre, F., & Lévêque, J.-M. (2025). Current status of chemical- or enzyme-assisted ultrasonic pre-treatment processes for lignocellulosic biomass to assess industrialization progress: A review. Current Opinion in Chemical Engineering, 48, Article 101124. https://doi.org/10.1016/j.coche.2025.101124.

Kalkan, H. (2008). Fibrolitik enzimlerin buğday samanının besleme değeri üzerine etkileri [Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Kalkan, H., & Karabulut, A. (2003). Buhar ve asitle işlemenin mercimek samanının yem değeri üzerine etkisi. Turkish Journal of Veterinary ve Animal Sciences, 27, 1375–1381.

Karabıyık, A., Özcan, M. A., & Kılıç, U. (2018). The effects on forage quality of pelleting by using different additives of sugar beet head ve leaves. Black Sea Journal of Agriculture, 1(4), 117–121.

Kirchgessner, M. (1985). Hayvan besleme: Öğretim, öğrenim ve uygulama önerileri (A. Kılıç, Çev.). TÜBİTAK Yayınları.

Kumla, J., Suwannarach, N., Sujarit, K., Penkhrue, W., Kakumyan, P., Jatuwong, K., Vadthanarat, S., & Lumyong, S. (2020). Cultivation of mushrooms ve their lignocellulolytic enzyme production through the utilization of agro-industrial waste. Molecules, 25(12), Article 2811. https://doi.org/10.3390/molecules25122811.

Li, Z., Qiu, H., Lan, X., Wang, Z., Shen, W., Wan, F., Xiao, D., & He, J. (2023). Appropriate particle size of rice straw promoted rumen fermentation ve regulated bacterial microbiota in a rumen simulation technique system. Frontiers in Veterinary Science, 10, Article 1185191. https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1185191

Liu, B., Liu, L., Deng, B., Huang, C., Zhu, J., Liang, L., He, X., Wei, Y., Qin, C., Liang, C., Liu, S., & Yao, S. (2022). Application ve prospect of organic acid pretreatment in lignocellulosic biomass separation: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 222, 1400–1413. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.270

Ma, Y., Chen, X., Khan, M. Z., Xiao, J., Liu, S., Wang, J., He, Z., Li, C., & Cao, Z. (2020). The impact of ammoniation treatment on the chemical composition ve *in vitro* digestibility of rice straw in Chinese Holsteins. Animals, 10(10), Article 1854. https://doi.org/10.3390/ani10101854.

Maulfair, D. D., Fustini, M., & Heinrichs, A. J. (2011). Effect of varying total mixed ration particle size on rumen digesta ve fecal particle size ve digestibility in lactating dairy cows. Journal of Dairy Science, 94(7), 3527–3536. https://doi.org/10.3168/jds.2010-3718.

Moore, K. J., & Jung, H. G. (2001). Lignin ve fiber digestion. Journal of Range Management, 54(4), 420–430. https://doi.org/10.2307/4003113.

Moss, A. R., Givens, D. I., & Everington, J. M. (1990). The effect of sodium hydroxide treatment on the chemical composition, digestibility ve digestible energy content of wheat, barley ve oat straws. Animal Feed Science ve Technology, 29(1–2), 73–87. https://doi.org/10.1016/0377-8401(90)90095-P.

Muck, R. E., Nadeau, E. M. G., McAllister, T. A., Contreras-Govea, F. E., Santos, M. C., & Kung, L., Jr. (2018). Silage review: Recent advances ve future uses of

silage additives. Journal of Dairy Science, 101(5), 3980–4000. https://doi.org/10.3168/jds.2017-13839.

Nayan, N., Sonnenberg, A. S. M., Baars, J. J. P., Hendriks, W. H., & Cone, J. W. (2019). Chemical changes ve increased degradability of wheat straw ve oak wood chips treated with the white rot fungi Ceriporiopsis subvermispora ve Lentinula edodes. Biomass ve Bioenergy, 105, 381–391. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.07.003.

Nguyen Xuan Trach, N., Mo, M., & Cu Xuan Dan, C. (2001). Effects of treatment of rice straw with lime ve/or urea on its intake, digestibility ve rumen liquor characteristics in cattle. Livestock Research for Rural Development, 13(4).

Saadullah, M., Haque, M., & Dolberg, F. (1981). Effectiveness of ammoniation through urea in improving the feeding value of rice straw. Bangladesh Journal of Agricultural Science, 8, 1–10.

Sarnklong, C., Cone, J. W., Pellikaan, W. F., & Hendriks, W. H. (2010). Utilization of rice straw ve different treatments to improve its feed value for ruminants: A review. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 23(5), 680–692. https://doi.org/10.5713/ajas.2010.80619

Satter, L. D., & Slyter, L. L. (1974). Effect of ammonia concentration on rumen microbial protein production *in vitro*. British Journal of Nutrition, 32(2), 199–208. https://doi.org/10.1079/BJN19740073

Shen, Z., Yang, C., Yu, G., & Wang, J. (2009). Pretreatment of wheat straw by γ-ray radiation ve alkali solution. Atomic Energy Science ve Technology, 43(4), 304–310. https://doi.org/10.7538/yzk.2009.43.04.0304.

Shreck, A. L. (2013). Use of alkaline treated crop residues as partial grain replacements for finishing cattle [Master's thesis, University of Nebraska–Lincoln].

Singh, R., Tiwari, S., Srivastava, M., & Shukla, A. (2014). Microwave assisted alkali pretreatment of rice straw for enhancing enzymatic digestibility. Journal of Energy, 2014, Article 483813. https://doi.org/10.1155/2014/483813.

Sundstøl, F. (1984). Ammonia treatment of straw: Methods for treatment ve feeding experience in Norway. Animal Feed Science ve Technology, 10(2–3), 173–187. https://doi.org/10.1016/0377-8401(84)90007-5

Sundstøl, F., & Owen, E. (Eds.). (1984). Straw ve other fibrous byproducts as feed: Proceedings of a workshop held at the Agricultural University of Norway, Ås, 24–28 March 1984. Elsevier.

Talebnia, F., Karakashev, D., & Angelidaki, I. (2009). Effect of ozonolysis pretreatment on enzymatic digestibility of wheat ve rye straw. Bioresource Technology, 100(4), 1608–1613. https://doi.org/10.1 016/j.biortech.2008.09. 012

Tekce, E., & Gül, M. (2014). Ruminant beslemede NDF ve ADF'nin önemi. Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi, 9(1), 63–73.

Tirado-González, D. N., Tirado-Estrada, G., Mirvea-Romero, L. A., Ramírez-Valverde, R., Medina-Cuéllar, S. E., & Salem, A. Z. M. (2021). Effects of addition of exogenous fibrolytic enzymes on digestibility ve milk ve meat production: A systematic review. Annals of Animal Science, 21(4), 1159–1192. https://doi.org/10.2478/aoas-2021-0001.

Turgut, L. (2008). Kimyasal muameleye tabi tutulan buğday ve arpa samanlarının rumende parçalanabilirliklerinin belirlenmesi. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 23(3), 183–189.

Tuyen, V. D., Cone, J. W., Baars, J. J. P., Sonnenberg, A. S. M., & Hendriks, W. H. (2012). Fungal strain ve incubation period affect chemical composition ve nutrient availability of wheat straw for rumen fermentation. Bioresource Technology, 111, 336–342. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.001

van Kuijk, S. J. A., Sonnenberg, A. S. M., Baars, J. J. P., Hendriks, W. H., & Cone, J. W. (2015a). Fungal treated lignocellulosic biomass as ruminant feed ingredient: A review. Biotechnology Advances, 33(1), 191–202. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.10.014

van Kuijk, S. J. A., Sonnenberg, A. S. M., Baars, J. J. P., Hendriks, W. H., & Cone, J. W. (2015b). Fungal treatment of lignocellulosic biomass: Importance of fungal species, colonization and time on chemical composition and *in vitro* rumen degradability. Animal Feed Science and Technology, 209, 40–50. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.07.026

Van Soest, P. J. (1994). Nutritional ecology of the ruminant (2nd ed.). Cornell University Press.

Wang, B., Sun, H., Wang, D., Liu, H., & Liu, J. (2022). Constraints on the utilization of cereal straw in lactating dairy cows: A review from the perspective of systems biology. Animal Nutrition, 9, 240–248. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2022.01.002.

White, B. A., Lamed, R., Bayer, E. A., & Flint, H. J. (2014). Biomass utilization by gut microbiomes. Annual Review of Microbiology, 68, 279–296. https://doi.org/10.1146/annurev-micro-092412-155618

Yang, C., Shen, Z., Yu, G., & Wang, J. (2008). Effect ve aftereffect of γ radiation pretreatment on enzymatic hydrolysis of wheat straw. Bioresource Technology, 99(14), 6240–6245. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.008

Yin, Y., & Wang, J. (2016). Enhancement of enzymatic hydrolysis of wheat straw by gamma irradiation–alkaline pretreatment. Radiation Physics ve Chemistry, 123, 63–67. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.02.021

Zaman, M. S., & Owen, E. (1995). The effect of calcium hydroxide ve urea treatment of barley straw on chemical composition ve digestibility *in vitro*. Animal Feed Science ve Technology, 51(1–2), 165–171. https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)00669-Z

Zaman, M. S., Owen, E., & Pike, D. J. (1994). The calculation method used for optimising conditions of treatment of barley straw with calcium hydroxide: Effects of level of calcium hydroxide ve urea, moisture, treatment time ve temperature on *in vitro* digestibility. Animal Feed Science ve Technology, 45(3–4), 271–282. https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90032-9

Zhou, Z., Ouyang, D., Liu, D., & Zhao, X. (2023). Oxidative pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis: Progress ve challenges. Bioresource Technology, 367, Article 128208. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128208.

Zhu, S., Wu, Y., Yu, Z., Liao, J., & Zhang, Y. (2005). Pretreatment by microwave/alkali of rice straw ve its enzymic hydrolysis. Process Biochemistry, 40(9), 3082–3086. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.03.016

BÖLÜM 25

Kentsel Yeşil Alanların Ekosistem Hizmetleri ve Sürdürülebilir Peyzaj Planlamasındaki Rolü

Handan Çakar[1]
Özlem Akat Saraçoğlu[2]

[1] Doç. Dr., Ege Üniversitesi, Bayındır Meslek Yüksekokulu Park ve Bahçe Bitkileri Bölümü, Peyzaj ve Süs Bitkileri Programı, /0000-0001-7209-5545
[2] Doç. Dr., Ege Üniversitesi, Bayındır Meslek Yüksekokulu Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Seracılık Programı, 0000-0003-1680-783X

1. Giriş

Kentleşme, nüfus artışı ve arazi kullanımındaki değişimler doğal çevre üzerinde önemli baskılar oluştururken, kentlerin ekolojik dengesinin korunmasına yönelik yaklaşımlar da giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle hızlı kentleşme süreciyle birlikte doğal alanların azalması, küresel ısınmayla birlikte yaşanan kuraklık, su kıtlığı, tuzluluk, geçirimsiz yüzeylerin artması ve çevresel sorunların çeşitlenmesi, kentsel yeşil alanların yalnızca rekreasyon amaçlı kullanılan mekânlar olmanın ötesinde değerlendirilmesini gerekli kılarak bitkilerin gelişimleri üzerinde de olumsuz etkiler yaratmaktadır (Akat Saraçoğlu & Akat, 2025; Çetinkale Demirkan & Akat, 2024; İlhan vd., 2024a). Özellikle su sıkıntısı çeken kentler öncelikli olmak üzere tüm dünyadaki tarımsal üretim alanlarında su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin sağlanması amacıyla ekolojik temelli ve sürdürülebilir planlama yaklaşımlarına duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır (Akat, 2020; İlhan vd., 2024b). Günümüzde yeşil alanlar, kent ekosisteminin önemli temel bileşenleri arasında yer aldığından çevresel, sosyal ve ekonomik yönleriyle kentlerin sürdürülebilir gelişimine katkı sağlayan önemli sistemler olarak kabul edilmektedir (Akgedik vd., 2025; Çiçek & Akat, 2025; Wentworth, 2016; Pickett vd., 2001).

Kentsel yeşil alanlar; hava kalitesinin iyileştirilmesi, mikroklimatik koşulların düzenlenmesi, gürültünün azaltılması, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi ve kullanıcıların fiziksel ile psikolojik iyilik hâlinin geliştirilmesi gibi çok yönlü katkılar sunmaktadır. Bunun yanı sıra bulundukları bölgeye rekreasyon olanakları sağlamaları, ekonomik, ekolojik ve sosyal katkılar sağlayarak etkileşimi desteklemeleri ve kent yaşamının estetik niteliğini artırmaları da bu alanların temel işlevleri arasında yer almaktadır (Çiçek vd., 2026; Sönmez, 2023; Çetinkale Demirkan, 2020; Tanfer, 2019; Zencirkıran, 2004).

Son yıllarda sürdürülebilir kentleşme anlayışının gelişmesiyle birlikte, kentsel yeşil alanların fiziksel varlığının yanı sıra kent ekosistemine sağladıkları hizmetler de ön plana çıkmıştır. Ekosistem hizmetleri yaklaşımı, doğal ve yarı doğal sistemlerin insan yaşamına sunduğu faydaların bütüncül olarak değerlendirilmesini esas almaktadır. Ayrıca, kentsel yeşil alanların çevresel, sosyal ve ekonomik katkılarının birlikte ele alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir peyzaj planlamasının bilimsel temellerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Bu kapsamda yeşil altyapı sistemi, ekosistem hizmetlerinin sürekliliğini destekleyen ve doğal-kültürel alanlar arasındaki bağlantıyı güçlendiren stratejik bir planlama aracı olarak karşımıza çıkmaktadır. Böylece kentlerin iklim değişikliğine uyum kapasitesinin artırılması, biyolojik çeşitliliğin korunması ve çevresel dayanıklılığın geliştirilmesine bazı katkılar sağlamaktadır (Akgedik vd., 2025; Aksoy & Arslan, 2022; Tülek & Ersoy Mirici, 2019). Kentsel yeşil alanların sunduğu ekosistem hizmetlerinin farklı boyutlarıyla ele alınması,

sürdürülebilir peyzaj planlama ve yönetim anlayışının geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

2. Kentsel Yeşil Alan Kavramı

Kentsel yeşil alanlar, kent dokusu içerisinde doğal ve yarı doğal özelliklerini koruyan, bireylerin rekreasyon gereksinimlerini karşılayan ve kent ekosisteminin sürekliliğine katkı sağlayan önemli açık alan sistemleridir. Bu alanlar yalnızca bitkisel düzenlemelerin yer aldığı fiziksel mekânlar olarak değil, aynı zamanda çevresel, sosyal ve ekonomik işlevleri bir arada yerine getiren bütüncül sistemler olarak da değerlendirilmektedir (Gold, 1980; Pamay, 1978).

Kentlerin planlı gelişiminde kentsel yeşil altyapı içerisinde değerlendirilerek oluşturulan açık yeşil alanlar, doğa ile olan bağın güçlenmesi, doğal dengelerin yeniden kurulması ve kent ekosistemlerinin iyileşmesi açısından önemli bir yere sahiptir (Çetinkale Demirkan & Akat Saraçoğlu, 2021). Yeşil kent dokusunun oluşturulmasına katkıda bulunan bu alanlar; ayrıca rekreasyonel aktivitelerin karşılanmasının yanında insan ve doğa arasında denge sağlamaktadır (Çöp & Akat, 2021). Parklar, rekreasyon alanları, kent ormanları, yeşil koridorlar ve diğer açık yeşil alanlar birlikte değerlendirildiğinde, kent içerisinde ekolojik sürekliliğin korunmasına ve yaşam kalitesinin artırılmasına hizmet eden bir yeşil altyapı sistemi oluşturmaktadır (Wentworth, 2016; Pickett vd., 2001). Yeşil altyapı sistemi, parklar, kent ormanları, yeşil koridorlar, sulak alanlar ve diğer doğal-kültürel alanların birbirleriyle bağlantılı biçimde planlanmasını esas almakta, böylece ekolojik süreçlerin sürekliliğini destekleyen çok işlevli bir sistem ortaya koymaktadır (Tülek & Ersoy Mirici, 2019).

Kentsel yeşil alanların planlanmasında yalnızca alan büyüklüğü veya kullanıcı kapasitesi gibi fiziksel ölçütlerin dikkate alınması yeterli değildir. Bu alanların kent içerisindeki dağılımı, birbirleriyle olan bağlantıları, erişilebilirlikleri ve üstlendikleri işlevler de planlama sürecinin önemli bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle çağdaş peyzaj planlama anlayışında yeşil alanlar, kentin ekolojik ve sosyal yapısıyla bütünleşik sistemler olarak ele alınmaktadır (Önder & Polat, 2012; Gül & Küçük, 2001).

Kentsel yeşil alanlar, kullanıcıların dinlenme, spor, sosyalleşme ve doğayla etkileşim kurma gereksinimlerini karşılamalarının yanında kentlerin çevresel kalitesinin artırılmasına da katkı sağlamaktadır. Bitkisel materyaller, geçirgen yüzeyler ve doğal yaşam ortamları oluşturmaları ile bu alanlar, kent ekosisteminin işleyişini destekleyen önemli unsurlar hâline gelmektedir. Dolayısıyla kentsel yeşil alanların planlanması, estetik ve rekreasyonel gereksinimlerin karşılanmasının yanı sıra sürdürülebilir kentleşme politikalarının ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmelidir (Zencirkıran, 2004; Wentworth, 2016).

Günümüzde kentsel yeşil alanların önemi, fiziksel varlıklarının yanı sıra sağladıkları ekosistem hizmetleriyle de açıklanmaktadır. Hava kalitesinin iyileştirilmesi, mikroklimatik koşulların düzenlenmesi, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi, karbon depolanması ve kullanıcıların refahının artırılması gibi çok yönlü katkılar, bu alanların kent yaşamındaki stratejik rolünü daha net bir biçimde ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, sürdürülebilir peyzaj planlamasında kentsel yeşil alanların sunduğu ekosistem hizmetlerinin bütüncül bir anlayışla değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu çerçevede kentsel yeşil alanların değerlendirilmesinde, alan büyüklükleri ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra kent ekosistemine sağladıkları hizmetler de temel ölçütler arasında yer almaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir peyzaj planlamasında yeşil alanların çok yönlü işlevlerinin birlikte ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Bu değerlendirmeler, kentsel yeşil alanların rekreasyon gereksinimlerini karşılayan ve kent ekosisteminin sürekliliğini destekleyen çok işlevli sistemler olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla yeşil alanların planlanması ve yönetiminde, fiziksel özelliklerinin yanı sıra sundukları ekosistem hizmetlerinin de birlikte değerlendirilmesi sürdürülebilir peyzaj planlamasının temel yaklaşımlarından biri olarak öne çıkmaktadır.

3. Kentsel Yeşil Alanların Ekosistem Hizmetleri

Kentsel yeşil alanlar, kent ekosisteminin işleyişine sağladıkları katkılar sayesinde çok yönlü ekosistem hizmetleri sunmaktadır. Bu hizmetler yalnızca doğal çevrenin korunmasına yönelik işlevlerden ibaret olmayıp, kent yaşamının çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarını da doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle günümüzde kentsel yeşil alanların değeri, kapladıkları alan büyüklüğü veya kullanıcı sayılarından çok, kent ekosistemine sağladıkları hizmetlerin niteliği ile değerlendirilmektedir (Wentworth, 2016; Pickett vd., 2001).

Ekosistem hizmetleri yalnızca ekolojik süreçlerin değerlendirilmesine değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal yararların birlikte ele alınmasına da olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle kent planlamasında ekolojik değerlerin karar verme süreçlerine aktarılmasını kolaylaştıran önemli bir planlama anlayışı olarak kabul edilmektedir (Çoban & Yücel, 2018).

Ekosistem hizmetleri anlayışı, doğal ve yarı doğal sistemlerin insan refahına sağladığı katkıları bütüncül bir bakış açısıyla ele almaktadır. Kentsel yeşil alanlar; hava kalitesinin iyileştirilmesi, iklimin düzenlenmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması, rekreasyon olanaklarının geliştirilmesi ve yaşam kalitesinin artırılması gibi çok sayıda hizmeti aynı anda sunabilmektedir. Bu yönüyle yeşil alanlar, sürdürülebilir kentleşme politikalarının temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Sönmez, 2023; Tanfer, 2019).

Ekosistem hizmetleri, yaygın olarak kullanılan Millennium Ecosystem Assessment (MEA) sınıflandırmasına göre tedarik, düzenleyici, destekleyici ve

kültürel hizmetler olmak üzere dört ana grupta ele alınmaktadır (Uçar, 2021). Bu çalışmada, kentsel yeşil alanların sürdürülebilir peyzaj planlamasındaki rolü temel alınarak düzenleyici, destekleyici ve kültürel ekosistem hizmetlerine odaklanılmış, doğrudan ürün ve kaynak sağlanmasına ilişkin tedarik hizmetleri çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

Düzenleyici hizmetler çevresel süreçlerin dengelenmesine, destekleyici hizmetler temel ekolojik süreçlerin ve doğal yaşamın devamlılığına, kültürel hizmetler ise bireylerin fiziksel ve psikolojik iyilik hâlleri ile sosyal ve rekreasyonel gereksinimlerine katkı sağlamaktadır. Birbirleriyle ilişkili olan bu hizmetlerin birlikte değerlendirilmesi, kentsel yeşil alanların çok yönlü işlevlerinin anlaşılması ve sürdürülebilir peyzaj planlamasının çevresel ve toplumsal hedeflerine ulaşılması açısından önem taşımaktadır (Zencirkıran, 2004; Gold, 1980). Bu doğrultuda, kentsel yeşil alanların sunduğu düzenleyici, destekleyici ve kültürel ekosistem hizmetlerinin ayrı başlıklar altında ele alınması, bu alanların kent yaşamındaki çok yönlü rolünün daha kapsamlı biçimde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

3.1 Düzenleyici Ekosistem Hizmetleri

Düzenleyici ekosistem hizmetleri, doğal sistemlerin çevresel süreçleri dengelemesi ve yaşam koşullarının sürdürülebilirliğine katkı sağlaması bakımından en önemli ekosistem hizmetleri arasında yer almaktadır. Kentsel yeşil alanlar, sahip oldukları bitkisel doku sayesinde kent ekosisteminde meydana gelen birçok çevresel sorunun azaltılmasına katkıda bulunmakta ve doğal süreçlerin devamlılığını desteklemektedir (Wentworth, 2016; Pickett vd., 2001).

Kentsel alanlarda yoğun yapılaşma ve geçirimsiz yüzeylerin artması, hava sıcaklığının yükselmesine, hava dolaşımının azalmasına ve çevresel kalitenin olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır. Yeşil alanlar ise oluşturdukları bitki örtüsü sayesinde gölgeleme, evapotranspirasyon ve hava hareketlerinin düzenlenmesine katkı sağlayarak mikroklimatik koşulların iyileştirilmesinde önemli roller üstlenmektedir (Sönmez, 2023; Tanfer, 2019).

Bitkisel materyal, atmosferde bulunan çeşitli kirleticilerin tutulmasına katkı sağlayarak hava kalitesinin artırılmasına da destek olmaktadır. Yapraklar, dallar ve gövdelerin yüzeyleri, havadaki partiküller ile kirleticileri tutarak kentlerde daha sağlıklı yaşam alanlarının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra bitkilerin atmosferdeki karbondioksitin tutulmasına ve karbonun biyokütlede depolanmasına katkı sağlaması, iklimin dengelenmesi açısından önemli bir düzenleyici ekosistem hizmeti sunmaktadır (Zencirkıran, 2004; Sönmez, 2023).

Kentsel yeşil alanların bir diğer önemli düzenleyici işlevi ise gürültünün azaltılmasıdır. Bitkiler, ses dalgalarının emilmesi ve kırılması yoluyla özellikle yoğun trafik ve yapılaşmanın bulunduğu alanlarda çevresel gürültünün olumsuz etkilerini sınırlandırabilmektedir. Aynı zamanda rüzgârların yönlendirilmesi ve

hızlarının azaltılması gibi işlevler de yeşil alanların çevresel düzenleme kapasitesini artırmaktadır (Tanfer, 2019; Zencirkıran, 2004).

Bu yönüyle düzenleyici ekosistem hizmetleri, kentsel çevrede yalnızca doğal süreçlerin devamlılığını desteklemekle kalmamakta, aynı zamanda kentlerde yaşam kalitesinin artırılmasına ve çevresel sürdürülebilirliğin güçlendirilmesine de önemli katkılar sağlamaktadır. Özellikle yeşil altyapı sistemlerinin güçlendirilmesi, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması, yağmur suyu yönetimi, karbon depolama kapasitesinin artırılması ve iklim değişikliğine uyumun desteklenmesi açısından önemli bir planlama anlayışı olarak değerlendirilmektedir (Aksoy & Arslan, 2022). Bu nedenle sürdürülebilir peyzaj planlamasında yeşil alanların çevresel düzenleme işlevlerinin planlama kararlarına bütüncül biçimde yansıtılması büyük önem taşımaktadır.

Düzenleyici ekosistem hizmetleri, kentsel yeşil alanların çevresel sürdürülebilirliğe sağladığı katkının temelini oluşturmaktadır. Bu hizmetlerin etkin biçimde sürdürülebilmesi, bitki varlığının korunması ve yeşil alanların kent ölçeğinde planlı ve bütüncül bir sistem içerisinde değerlendirilmesine bağlı gerçekleşmektedir.

3.2 Destekleyici Ekosistem Hizmetleri

Destekleyici ekosistem hizmetleri, ekosistemlerin sürekliliğini sağlayan temel ekolojik süreçleri kapsamaktadır. Toprak oluşumu, besin ve su döngüleri, fotosentez ve birincil üretim gibi süreçler, ekosistemlerin işleyişinin sürdürülmesinde ve diğer ekosistem hizmetlerinin sağlanmasında temel rol oynamaktadır (Uçar, 2021). Bu hizmetler aynı zamanda biyolojik çeşitliliğin korunması ve doğal yaşam alanlarının devamlılığının sağlanması açısından da önem taşımaktadır. Kentsel yeşil alanlar, kentleşme baskısı altında parçalanan doğal alanlar arasında ekolojik bağlantılar oluşturarak ekolojik süreçlerin ve habitat sürekliliğinin desteklenmesine katkı sağlamaktadır (Pickett vd., 2001; Wentworth, 2016).

Kentlerde doğal yaşam alanlarının azalması, birçok bitki ve hayvan türü için habitat kaybına neden olmaktadır. Bu süreçte parklar, korular, yeşil koridorlar ve diğer açık yeşil alanlar flora ve fauna açısından yaşam alanı oluşturarak biyolojik çeşitliliğin korunmasına katkıda bulunmaktadır. Özellikle farklı bitki katmanlarının bulunduğu yeşil alanlar, kuşlar, böcekler ve diğer canlı grupları için beslenme, barınma ve üreme ortamı sağlayarak kent ekosisteminin ekolojik dengesini desteklemektedir (Sönmez, 2023; Zencirkıran, 2004). Bu doğrultuda kentsel yeşil alanlar, farklı canlı türlerine yaşam alanı sunmanın yanı sıra ekolojik süreçlerin sürekliliğini destekleyen ve kent ekosisteminin işleyişine katkı sağlayan önemli bileşenler olarak değerlendirilmelidir. Habitat sürekliliğinin korunması, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi ve ekolojik dengenin sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından yeşil alanların bütüncül bir planlama anlayışıyla ele alınması önem taşımaktadır.

Kentsel yeşil alanların birbirleriyle bağlantılı biçimde planlanması, habitat sürekliliğinin korunması açısından önemli bir planlama anlayışıdır. Birbirinden kopuk ve izole yeşil alanlar yerine, ekolojik bağlantılarla desteklenen yeşil altyapı sistemlerinin oluşturulması, türlerin hareketliliğini kolaylaştırmakta ve kent içerisindeki ekolojik sürekliliği güçlendirmektedir (Pickett vd., 2001; Wentworth, 2016). Ekolojik bağlantıların korunması yalnızca tür hareketliliğini kolaylaştırmamakta, aynı zamanda ekosistem hizmetlerinin mekânsal sürekliliğinin sağlanmasına da katkıda bulunmaktadır. Buna bağlı olarak, yeşil altyapının temel bileşenleri olan çekirdek alanlar, koridorlar ve tampon bölgelerin birlikte planlanması önerilmektedir (Tülek & Ersoy Mirici, 2019).

Destekleyici ekosistem hizmetleri, biyolojik çeşitliliğin korunmasının yanı sıra diğer ekosistem hizmetlerinin sürekliliğine de temel oluşturmaktadır. Sağlıklı ekolojik süreçlerin devamlılığı, düzenleyici ekosistem hizmetlerinin etkinliğini destekleyerek hava kalitesinin iyileştirilmesi ve mikroklimatik koşulların düzenlenmesi gibi çevresel katkıların sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır (Tanfer, 2019; Sönmez, 2023).

Bu çerçevede, sürdürülebilir peyzaj planlamasında yeşil alanların rekreasyonel kullanımları ile kent ekosistemine sağladıkları destekleyici hizmetler, planlama sürecinin temel bileşenleri olarak birlikte değerlendirilmelidir. Habitat sürekliliğini gözeten, biyolojik çeşitliliği destekleyen ve ekolojik bağlantıları güçlendiren planlama anlayışları, kentlerin çevresel dayanıklılığının artırılmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Sonuç olarak, destekleyici ekosistem hizmetlerinin korunması yalnızca mevcut ekolojik süreçlerin devamlılığını sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda düzenleyici ve kültürel ekosistem hizmetlerinin uzun dönemli sürdürülebilirliği için de temel oluşturmaktadır. Bu nedenle destekleyici hizmetlerin planlama kararlarında bütüncül bir anlayışla ele alınması büyük önem taşımaktadır.

3.3 Kültürel Ekosistem Hizmetleri

Kültürel ekosistem hizmetleri, doğal ve yarı doğal alanların bireylere sağladığı rekreasyonel, estetik, sosyal ve psikolojik katkıları kapsamaktadır. Kentsel yeşil alanlar, kent yaşamının yoğunluğu içerisinde bireylerin doğayla etkileşim kurmasına olanak sağlayan, dinlenme ve sosyalleşme gereksinimlerini karşılayan önemli yaşam alanlarıdır. Bu yönüyle yeşil alanlar, çevresel işlevlerinin yanı sıra toplumsal yaşam kalitesini destekleyen temel kentsel mekânlar olarak değerlendirilmektedir (Wentworth, 2016; Gold, 1980).

Kent parkları ve diğer yeşil alanlar, yürüyüş, spor, dinlenme ve açık hava etkinlikleri gibi rekreasyonel faaliyetlere olanak sağlayarak bireylerin fiziksel ve ruhsal iyilik hâllerinin desteklenmesine katkıda bulunmaktadır. Doğal çevreyle kurulan etkileşim, kent yaşamının neden olduğu stresin azaltılmasına yardımcı

olmakta, kullanıcıların doğaya yönelik farkındalıklarının gelişmesini ve çevresel değerleri benimsemelerini desteklemektedir (Sönmez, 2023; Zencirkıran, 2004).

Kentsel yeşil alanlar aynı zamanda farklı yaş ve sosyal gruplardan bireylerin bir araya gelmesine olanak sağlayan ortak kullanılan ortamlardır. Bu alanlar, sosyal etkileşimi artırarak toplumsal bütünleşmeye katkıda bulunmakta, kent kimliğinin oluşmasına ve kullanıcıların yaşadıkları çevreyle aidiyet bağı kurmalarına destek olmaktadır. Bu yönüyle kültürel ekosistem hizmetleri, bireysel ve toplumsal düzeyde önemli kazanımlar sağlamaktadır (Pickett vd., 2001; Gül & Küçük, 2001).

Yeşil alanların estetik nitelikleri de kültürel ekosistem hizmetlerinin önemli bileşenleri arasında yer almaktadır. Sürdürülebilir peyzaj tasarımlarında, bölgenin ekolojik koşullarına uygun daha çok doğal bitki türlerinin yer alması yer aldığı bitkisel düzenlemeler, doğal peyzaj elemanları ve açık yeşil alanların oluşturduğu görsel kalite, kullanıcıların mekân algısını olumlu yönde etkilemekte ve kentsel yaşam çevrelerinin çekiciliğini artırmaktadır (Çöp & Akat, 2021). Estetik açıdan nitelikli yeşil alanlar, kullanıcı memnuniyetini artırırken aynı zamanda kentlerin görsel kimliğinin güçlenmesine de katkı sağlamaktadır (Gold, 1980; Gül & Küçük, 2001).

Kültürel ekosistem hizmetleri, sürdürülebilir peyzaj planlamalarında çevresel hedeflerle toplumsal beklentiler arasında denge kurulmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle kentsel yeşil alanların planlanmasında ekolojik ölçütler ile kullanıcı gereksinimlerinin, rekreasyonel beklentilerin ve kültürel değerlerin birlikte ele alınması gerekmektedir. Böylece çevresel sürdürülebilirliğin yanı sıra sosyal sürdürülebilirliğin de desteklendiği daha yaşanabilir kentlerin oluşturulmasına katkılar sunulabilecektir.

Kültürel ekosistem hizmetleri, kentsel yeşil alanların çevresel işlevleri ile toplumsal gereksinimleri arasında önemli bir bağ oluşturmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir peyzaj planlamasında ekolojik hedeflerle kullanıcı beklentilerinin birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

4. Ekosistem Hizmetlerinin Sürdürülebilir Peyzaj Planlamasındaki Yeri

Sürdürülebilir peyzaj planlaması, doğal kaynakların korunmasını, ekolojik süreçlerin devamlılığını ve kullanıcı gereksinimlerinin dengeli biçimde karşılanmasını esas alan bütüncül bir planlama anlayışıdır. Bu yaklaşımda kentsel yeşil alanlar, rekreasyonel kullanımlarının yanı sıra kent ekosisteminin işleyişini destekleyen, çevresel kaliteyi artıran ve toplumsal refahı güçlendiren temel planlama bileşenleri olarak değerlendirilmektedir (Wentworth, 2016; Pickett vd., 2001).

Ekosistem hizmetleri yaklaşımı, sürdürülebilir peyzaj planlamasına çevresel, sosyal ve mekânsal ölçütlerin birlikte değerlendirilmesi olanağını sağlamaktadır. Düzenleyici ekosistem hizmetleri; çevresel kaliteyi desteklerken, destekleyici

hizmetler; biyolojik çeşitliliğin korunmasına ve ekolojik sürekliliğin sağlanmasına katkıda bulunmakta, kültürel ekosistem hizmetleri ise kullanıcıların rekreasyonel gereksinimlerini karşılayarak yaşam kalitesinin artırılmasını desteklemektedir. Bu hizmetlerin birbirini tamamlayan bir bütün olarak ele alınması, planlama kararlarının fiziksel mekân düzenlemeleriyle birlikte kent ekosisteminin sürdürülebilirliğini de destekleyecek biçimde oluşturulmasına olanak tanımaktadır (Sönmez, 2023; Gold, 1980). Ekosistem hizmetlerinin planlama sürecine etkin biçimde entegre edilebilmesi için bu hizmetlerin belirlenmesi, mekânsal olarak haritalandırılması ve plan kararlarında dikkate alınması gerekmektedir. Böylece planlama sürecinde yalnızca arazi kullanımı değil, ekolojik süreçlerin korunması ve doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimi de güvence altına alınabilmektedir (Yılmaz Kaya & Uzun, 2019). Bu yaklaşım, idari sınırlar yerine ekolojik sınırların dikkate alındığı, peyzaj bütünlüğünü esas alan planlama anlayışını desteklemektedir. Böylece doğal süreçler ile planlama kararları arasında daha güçlü bir ilişki kurulabilmektedir (Yılmaz Kaya & Uzun, 2019).

Ekosistem hizmetleri, yeşil alanların çevresel katkılarının belirlenmesine ve planlama ile tasarım kararlarının yönlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle yeşil alanların konumu, büyüklüğü, mekânsal dağılımı ve birbirleriyle olan ilişkileri, ekosistem hizmetlerinin etkin biçimde sunulabilmesi açısından birlikte değerlendirilmesi gereken temel planlama ölçütleri arasında yer almaktadır (Önder & Polat, 2012; Gül & Küçük, 2001).

Sürdürülebilir peyzaj planlamasında kentsel yeşil alanların birbirleriyle bağlantılı bir sistem oluşturacak şekilde planlanması, habitat sürekliliğinin korunması ve ekolojik süreçlerin desteklenmesi açısından önemli bir yaklaşımdır. Kent içerisinde oluşturulan yeşil koridorlar ve birbirleriyle bağlantılı yeşil alan sistemleri, biyolojik çeşitliliğin korunmasına ve düzenleyici ile destekleyici ekosistem hizmetlerinin sürekliliğine katkı sağlamaktadır. Bu planlama anlayışının önemli bileşenlerinden biri olan yeşil altyapı sistemleri, kentsel yeşil alanların kent bütünü içerisinde ekolojik bağlantılar kuran bütüncül bir sistem olarak değerlendirilmesini öngörmektedir. Bu doğrultuda yeşil altyapı bileşenlerinin güçlendirilmesi, ekolojik dengenin korunmasına, çevresel dayanıklılığın artırılmasına ve kent ekosisteminin sürdürülebilirliğine önemli katkılar sağlamaktadır. Dolayısıyla sürdürülebilir peyzaj planlamasında, kentsel yeşil alanların ekolojik bağlantıları destekleyen ve ekosistem hizmetlerinin sürekliliğine katkı sağlayan bütüncül bir sistem anlayışıyla ele alınması önem taşımaktadır.

Planlama sürecinde dikkate alınması gereken bir diğer önemli ölçüt ise yeşil alanların erişilebilirliği ve çok işlevli kullanım kapasitesidir. Kullanıcılar tarafından kolay ulaşılabilir yeşil alanlar, kültürel ekosistem hizmetlerinin etkinliğini artırırken rekreasyonel olanakların geliştirilmesine ve yaşam

kalitesinin yükseltilmesine katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra günümüzde sürdürülebilir peyzaj planlamasında yeşil alanlardan yalnızca tek bir işlevi yerine getirmesi beklenmemektedir. Aynı alanın biyolojik çeşitliliği desteklemesi, mikroklimayı düzenlemesi, rekreasyon olanakları sunması, estetik kalite oluşturması ve sosyal etkileşimi güçlendirmesi gibi çok yönlü işlevleri birlikte yerine getirmesi hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, ekosistem hizmetlerinin planlama kararlarına bütüncül biçimde yansıtılmasını sağlayan temel ilkelerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Bu doğrultuda sürdürülebilir peyzaj planlamasında, fiziksel alan düzenlemelerinin yanı sıra ekolojik bağlantıların güçlendirilmesi, habitat sürekliliğinin korunması ve kullanıcı gereksinimlerinin karşılanması da önem taşımaktadır. Planlama kararlarının, ekosistem hizmetlerinin uzun dönemli sürdürülebilirliğini destekleyen bütüncül anlayışlar doğrultusunda şekillendirilmesi gerekmektedir.

Bu çerçevede ekosistem hizmetleri, peyzaj planlama disiplinine yalnızca doğal kaynakların korunmasına yönelik bir bakış açısı kazandırmamakta, aynı zamanda çevresel, sosyal ve mekânsal hedeflerin birlikte değerlendirildiği bütüncül bir planlama anlayışı sunmaktadır. Kentsel yeşil alanların planlanması ve yönetiminin bu çerçevede şekillenmesi iklim değişikliği, hızlı kentleşme ve çevresel bozulma gibi güncel sorunlara karşı daha dirençli, yaşanabilir ve sürdürülebilir kentlerin oluşturulmasına önemli katkılar sağlayacaktır (Tanfer, 2019; Wentworth, 2016).

Bu değerlendirmeler, kentsel yeşil alanların çevresel kaliteyi artıran ve kent ekosisteminin işleyişine yön veren stratejik bileşenler olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Ekosistem hizmetlerinin planlama kararlarına bütüncül biçimde yansıtılması, yeşil alanların çevresel, sosyal ve mekânsal işlevlerini güçlendirerek sürdürülebilir peyzaj planlamasının temel hedeflerine ulaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Düzenleyici, destekleyici ve kültürel ekosistem hizmetleri birbirinden bağımsız süreçler olarak değil, sürdürülebilir peyzaj planlamasını birlikte şekillendiren tamamlayıcı bileşenler olarak değerlendirilmelidir. Bu hizmetlerin planlama kararlarına bütüncül biçimde yansıtılması, çevresel sürdürülebilirliğin güçlendirilmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması ve kullanıcı odaklı yeşil alan sistemlerinin oluşturulması açısından temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde son yıllarda yapılan çalışmalar, ekosistem hizmetlerinin yalnızca çevresel sürdürülebilirliğin değil, aynı zamanda ekonomik kalkınma, toplumsal refah ve iklim değişikliğine uyum politikalarının da önemli bileşenlerinden biri hâline geldiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle ekosistem hizmetlerinin planlama süreçlerine bütüncül biçimde entegre edilmesi, geleceğin dirençli ve yaşanabilir kentlerinin oluşturulmasında temel gerekliliklerden biri olarak değerlendirilmektedir (Çoban & Yücel, 2018; Aksoy & Arslan, 2022).

5. Genel Değerlendirme ve Sonuç

Kentsel yeşil alanlar, günümüzde rekreasyon gereksinimlerini karşılamanın yanı sıra kent ekosisteminin sürdürülebilirliğini destekleyen çok işlevli sistemler olarak değerlendirilmektedir. Kentleşmenin hızla artması, ekolojik dengenin bozulması ve iklim değişikliğinin yarattığı kuraklık riskleri ile çevresel sorunlar kentsel yeşil altyapı bileşenlerinde sürdürülebilir çözümlere duyulan ihtiyacın her geçen gün artırmasına neden olmuştur (Çakar vd., 2025). Literatürde bu tip alanların çevresel süreçlerinin düzenlenmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması ve bireylerin yaşam kalitesinin artırılması gibi çok yönlü katkılar sağladığı vurgulanmaktadır. Bu yönüyle kentsel yeşil alanlar, sürdürülebilir kentleşme politikalarının ve çağdaş peyzaj planlama anlayışlarının temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Wentworth, 2016; Pickett vd., 2001).

Bu çalışma kapsamında değerlendirilen literatür, kentsel yeşil alanların sunduğu ekosistem hizmetlerinin yalnızca çevresel yararlarla sınırlı olmadığını, aynı zamanda düzenleyici, destekleyici ve kültürel hizmetlerin birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Hava kalitesinin iyileştirilmesi, mikroklimatik koşulların düzenlenmesi, habitatların korunması, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi, rekreasyon olanaklarının geliştirilmesi ve toplumsal refahın artırılması gibi farklı hizmetler, kent ekosisteminin bütüncül işleyişine katkı sağlayan birbirini tamamlayan süreçlerdir (Sönmez, 2023; Zencirkıran, 2004).

Sürdürülebilir peyzaj planlamasında başarı, yeşil alan miktarlarının yanı sıra kent ölçeğindeki ekolojik bağlantılarının, işlevsel bütünlüğünün ve kullanıcı gereksinimlerinin birlikte değerlendirilmesine bağlıdır. Dolayısıyla, planlama sürecinde yeşil alanların mekânsal sürekliliği, erişilebilirliği, çok yönlü kullanım potansiyeli ve ekosistem hizmetleri dikkate alınarak karar verilmesi büyük önem taşımaktadır (Önder & Polat, 2012; Gül & Küçük, 2001).

Ekosistem hizmetleri, peyzaj planlama disiplinine yalnızca doğal kaynakların korunmasına yönelik bir bakış açısı kazandırmamakta, aynı zamanda çevresel, sosyal ve mekânsal hedeflerin dengeli biçimde değerlendirilmesini sağlayan bütüncül bir planlama çerçevesi sunmaktadır. Bu yaklaşım, kentlerin iklim değişikliği, hızlı kentleşme ve çevresel bozulma gibi güncel sorunlara karşı daha dirençli hâle gelmesine katkı sağlayacak planlama kararlarının geliştirilmesine de destek olmaktadır (Tanfer, 2019; Wentworth, 2016).

Sonuç olarak, kentsel yeşil alanların planlanması ve yönetiminde ekosistem hizmetlerinin temel bir değerlendirme ölçütü olarak benimsenmesi çevresel sürdürülebilirliğin güçlendirilmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması ve yaşam kalitesinin artırılması açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Bu doğrultuda kentsel yeşil alanlarda sürdürülebilir ve ekolojik yaklaşımlar ile doğaya duyarlı, kent ekosisteminin içerisinde yer alan, kendi kendini oluşturan ve değiştiren bir tasarım anlayışının benimsenmesi gerekmektedir (Akgedik vd., 2025).

Sürdürülebilir peyzaj planlama çalışmalarında, yeşil alanların fiziksel büyüklükleri ve rekreasyonel kullanımlarının yanı sıra kent ekosistemine sağladıkları çok yönlü hizmetlerin de planlama ve yönetim süreçlerine bütüncül biçimde entegre edilmesi gerekmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sürdürülebilir peyzaj planlamasında ekosistem hizmetlerinin planlama kararlarına bütüncül biçimde entegre edilmesi, yalnızca yeşil alanların çevresel işlevlerinin korunmasına değil, aynı zamanda kentlerin iklim değişikliğine uyum kapasitesinin artırılmasına, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesine ve toplum refahının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle gelecekte gerçekleştirilecek planlama ve yönetim çalışmalarında ekosistem hizmetlerinin karar verme süreçlerine sistematik biçimde entegre edilmesi önemli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Akat, H. (2020). Su tutucu polimer (SAP) uygulamalarının Anadolu sığla ağacı (*Liquidambar orientalis* Mill.) ve biberiye (*Rosmarinus officinalis* L.) türlerinde bitki gelişimi üzerine etkisi. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 8*(3), 721–727. doi:10.24925/turjaf.v8i3.721-727.3225

Akat Saraçoğlu, Ö., & Akat, H. (2025). Süs bitkileri yetiştiriciliğinde tuz stresini azaltmaya yönelik geliştirilen stratejiler. In A. Bayav & V. Pepe (Eds.), *Ziraat, orman ve su ürünleri alanında akademik çalışmalar XIII* (Bölüm 10, ss. 199–239). IKSAD Publishing House.

Akgedik, S. A., Akat, H., & Çetinkale Demirkan, G. (2025). Köyceğiz Kulak Mesire Alanı örneğinde su etkin uygulamaların irdelenmesi. *Bahçe, 54*(Özel Sayı 1), 183–191. doi:10.53471/bahce.1539319

Çakar, H., Akat Saraçoğlu, Ö., & Akat, H. (2025). Kentsel yeşil altyapıda sürdürülebilirlik yaklaşımı: Dikey bahçelerde kurakçıl bitkiler. In K. Özrenk & A. Bolat (Eds.), *Ziraat, orman ve su ürünleri alanında uluslararası akademik araştırma ve çalışmalar* (Bölüm 2, ss. 17–32). Serüven Yayınevi.

Çetinkale Demirkan, G. (2020). University students' use of campus open and green spaces and their satisfaction. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 57*(1), 39–52. doi:10.20289/zfdergi.587277

Çetinkale Demirkan, G., & Akat, H. (2024). Suyun sürdürülebilir kullanımı kapsamında kurakçıl peyzaj yaklaşımı değerlendirmeleri. In G. Çetinkale Demirkan (Ed.), *Mimarlık, planlama ve tasarımda güncel yaklaşımlar* (ss. 87–105). Bidge Yayınları.

Çetinkale Demirkan, G., & Akat Saraçoğlu, Ö. (2021). Hobi bahçeleri planlama ve ilkeleri. In İ. Yokaş & H. Akat (Eds.), *Pratik tarım uygulamaları* (Bölüm 9, ss. 452–471). Ankara: Efil Yayınevi.

Çiçek, K., & Akat, H. (2025). Peyzaj düzenleme alanlarında kuraklık stresine karşı geliştirilen stratejiler. In G. Bengisu & C. Demir (Eds.), *Ziraat, orman ve su ürünleri alanında akademik çalışmalar XIX* (Bölüm 9, ss. 229–274). IKSAD Publishing House.

Çiçek, K., Akat, H., & Çakar, H. (2026). Bir kentsel açık yeşil alanın sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi: Muğla/Ortaca 100. Yıl Cumhuriyet Parkı örneği. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research, 13*(132), 1046–107.

Çoban, A., & Yücel, M. (2018). Kent planlamasında ekosistem hizmetlerinin rolü. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6*(2), 444–454.

Çöp, S., & Akat, H. (2021). Kurakçıl peyzaj çalışmalarında bitkisel uygulamalar: Muğla-Sarıgerme Halk Plajı örneği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen*

Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(2), 263–277. doi:10.29048/makufebed.934101

Gold, S. M. (1980). *Recreation planning and design*. New York, NY: McGraw-Hill.

Gül, A., & Küçük, V. (2001). Kentsel açık-yeşil alanlar ve Isparta kenti örneğinde irdelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 2*(1), 27–48.

İlhan, Ö., Akat, H., & Akat Saraçoğlu, Ö. (2024a). Muğla ili Ortaca ilçesi'ndeki Kültür Park'ın kurakçıl peyzaj açısından irdelenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7*(4), 1754–1774. doi:10.47495/okufbed.1411072

İlhan, Ö., Akat, H., & Akat Saraçoğlu, Ö. (2024b). Kurakçıl peyzaja dönüşüm projesi kapsamında gerçekleştirilen bitkisel uygulamalar: Muğla-Ortaca ilçesi örneği. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research, 11*(104), 570–582. https://doi.org/10.5281/zenodo.10775371

Kamer Aksoy, O., & Arslan, E. S. (2022). Kentlerde iklim değişikliğinin olası etkilerinin azaltılmasında yeşil altyapı ve ekosistem hizmetlerinin rolü. *İnsan ve İnsan, 9*(33), 53–62. doi:10.29224/insanveinsan.1104391

Önder, S., & Polat, A. T. (2012). Kentsel açık-yeşil alanların kent yaşamındaki yeri ve önemi. *Kentsel peyzaj alanlarının oluşumu ve bakım esasları semineri, 19 Mayıs 2012, Konya* (ss. 73–96).

Pamay, B. (1978). *Kentsel peyzaj planlaması*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi, Park-Bahçe ve Peyzaj Mimarlığı Kürsüsü.

Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L., Grove, J. M., Nilon, C. H., Pouyat, R. V., Zipperer, W. C., & Costanza, R. (2001). Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics, 32*(1), 127–157. doi:10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114012

Sönmez, A. C. (2023). *Peyzaj özellikleri ve ekolojik tolerans bakımından peyzaj bitkilerinin değerlendirilmesi: Ankara Altınpark örneği* [Yüksek lisans tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi.

Tanfer, M. (2019). *İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Fakültesi Kampüsü bitki örtüsünün incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi.

Tülek, B., & Ersoy Mirici, M. (2019). Kentsel sistemlerde yeşil altyapı ve ekosistem hizmetleri. *PEYZAJ - Eğitim, Bilim, Kültür ve Sanat Dergisi, 1*(2), 1–11.

Uçar, E. S. (2021). *Kentsel yeşil alanların ekosistem hizmetleri kapsamında değerlendirilmesi: Üsküdar Fethipaşa Korusu örneği* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Üniversitesi.

Wentworth, J. (2016). *Green space and health*. Retrieved from http://researchbriefings.parliament.uk/ResearchBriefing/Summary/POST-PN-0538

Yılmaz Kaya, M., & Uzun, O. (2019). Ekosistem hizmetleri ve mekânsal planlama ilişkisinin peyzaj planlama çerçevesinde değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7*(3), 2166–2193. doi:10.29130/dubited.546496

Zencirkıran, M. (2004). *Bursa kent peyzajında kullanılan bitki türleri ve bu amaç için kullanılabilecek yerli ve yabancı orijinli bitkilerin saptanması* (Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi No. 2002/24). 307 s.