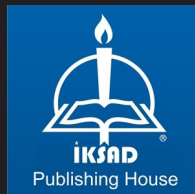




ZİRAAT, ORMAN VE SU ÜRÜNLERİ ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER - 3

EDİTÖR
Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan UÇAR



ZİRAAT, ORMAN VE SU ÜRÜNLERİ ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER III

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan UÇAR

Yazarlar

Prof. Dr. Hatice KANBUR ÇAVUŞ

Doç. Dr. Ahmet Bora KIRKLIKÇI

Doç. Dr. Gamze PEKBEY.

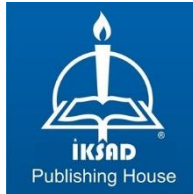
Doç. Dr. Medine ÇOPUR DOĞRUSÖZ

Doç. Dr. Veysi ACIBUCA

Dr. Öğr. Üyesi Alper GÜNGÖR

Öğr. Gör. Dr. İshak BAYYİĞİT

Serhat AKBAY



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-438-6

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

TÜRKİYE ZEYTİN ÜRETİMİNDE 2025–2029 CAGR PROJEKSİYONU

Doç. Dr. Veysi ACIBUCA

Öğr. Gör. Dr. İshak BAYYİĞİT.....3

BÖLÜM 2

KAĞIT ENDÜSTRİSİNDE YENİLİK VE KURUMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK: SİMBİYOTİK BİR İLİŞKİ

Doç. Dr. Ahmet Bora KIRKLIKÇI.....21

CHAPTER 3

EFFECTS OF MAGNETO-PRIMING APPLICATIONS ON DIFFERENT LEGUME SPECIES AND GROWING CONDITIONS

Prof. Dr. Hatice KANBUR ÇAVUŞ

Assoc. Prof. Dr. Medine ÇOPUR DOĞRUSÖZ.....33

BÖLÜM 4

DAVRANIŞ MANİPÜLASYONUNA DAYALI ZARARLI KONTROLÜ: SEMİOKİMYASAL ARAÇLAR VE UYGULAMA TEKNİKLERİ

Doç. Dr. Gamze PEKBEY.....51

BÖLÜM 5

UZAKTAN ALGILAMA VE YAPAY ZEKÂ TABANLI SİSTEMLERLE DİPTERA (INSECTA) BİYOÇEŞİTLİLİĞİNİN TAKİBİ

Doç. Dr. Gamze PEKBEY.....75

BÖLÜM 6

***Ocimum basilicum* L. (Fesleğen): MORFOLOJİK VE KİMYASAL ÇEŞİTLİLİKTEN ENDÜSTRİYEL KULLANIMA, TÜRKİYE VE MARDİN ÜRETİM PERSPEKTİFLERİ**

Serhat AKBAY.....109

BÖLÜM 7

STRES YÖNETİMİNDE BİTKİSEL DÜZENLEYİCİLERİN ETKİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Alper GÜNGÖR.....139

Önsöz

Değişen ve dönüşen dünya düzeninde, hızla artan insan nüfusunun sürdürülebilirliği için temel kaynaklarımız olan ziraat, orman ve diğer materyallerin korunması ve sürdürülebilir yönetimi her geçen gün daha kritik önem kazanmaktadır. Dünya ekosisteminde; artan nüfus baskısı, iklim değişikliği etkilerinin toprak ve su kaynaklarına baskıları zirai üretim için ciddi baskılar oluşturmaktadır. Bununla birlikte zirai üretim insanlık tarihi boyunca ekonomik, sosyal ve kültürel gelişmeleri yönlendiren temel unsur olmuş, gelecekte de olmaya devam edecektir. Günümüzde ve gelecekte; gıda güvenliği ve kaynakların sürdürülebilirliği konusundaki kaygılar tarım, ormancılık ve su ürünleri sektörlerinin stratejik önemini her zamankinden daha fazla ortaya koymaktadır.

Eserlerin ziraat, orman ve su ürünleri ekosistemlerinin bilimsel açıdan anlaşılmasına, daha sürdürülebilir hale getirilmesine dair güncel bilgiler sunulması oldukça önemlidir. Bu eser; modern tarım anlayışını, bilimsel bilgiye dayalı üretim tekniklerini, teknoloji kullanımını, çevresel duyarlılığı ve verimlilik odaklı yönetimleri içeren bütüncül bir yaklaşım ile ele almaktadır.

Bu eserin; tarım, ekoloji, ormancılık, su ürünleri ve entegre alanlarda araştırma yapan akademisyenler ve okuyucular için önemli bir bilimsel kaynak olması temennilerimi sunuyorum.

Teşekkür

Bu eserin ortaya çıkmasında emeği geçen tüm araştırmacılara ve yazarlara özverileri için teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca teknik süreçlerde destekleri esirgemeyen yayınevi ekibine teşekkürü borç biliriz.

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan UÇAR¹

¹ Pamukkale Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Denizli. rucar@pau.edu.tr

BÖLÜM 1

TÜRKİYE ZEYTİN ÜRETİMİNDE 2025–2029 CAGR PROJEKSİYONU

Doç. Dr. Veysi ACIBUCA¹

Öğr. Gör. Dr. İshak BAYYIĞIT²

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17913734>

¹ Mardin Artuklu Üniversitesi, Kızıltepe Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Mardin, Türkiye. veysiacibuca@artuklu.edu.tr , orcid id: 0000-0002-8478-7300

² Mardin Artuklu Üniversitesi, Kızıltepe Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesi, Bahça Bitkileri Bölümü, Mardin, Türkiye. ismailbayyigit@artuklu.edu.tr , orcid id: 0000-0001-9190-4985

1. GİRİŞ

Türkiye, zeytin üretiminde Akdeniz havzasının başat aktörleri olan İspanya, İtalya ve Yunanistan ile birlikte küresel üretimin çekirdek kümesini oluşturmaktadır. Son sezonlarda iklim koşullarına bağlı dalgalanmalar gözlenirse de resmî istatistikler, Türkiye'nin hem dane zeytin hem de zeytinyağı üretiminde söz konusu ülkelerle aynı ligde rekabet ettiğini göstermektedir (IOC, 2024; TÜİK, 2024; TEPGE, 2025). Üretim coğrafyası büyük ölçüde Ege, Marmara ve Akdeniz bölgelerinde yoğunlaşmakta; kıyasal iklim, yükselti ve mikroklimatik farklılıklar verim davranışını belirgin biçimde şekillendirmektedir (Öztürk et al., 2021). Bölgesel çeşit kompozisyonu bu resmi tamamlamakta; örneğin Marmara'da Gemlik çeşidinin baskınlığı sofralık–yağlık dengelemesini ve periyodisite dinamiklerini etkileyen ana belirleyicilerden biri olarak öne çıkmaktadır (Ipek et al., 2009).

Zeytinin stratejik önemi, iki iç içe geçmiş değer zinciri üzerinden somutlaşır. Sofralık alt sektörde meyve kalibresi, doku, kusur oranı ve fermantasyon yönetimi; yağlık alt sektörde ise serbest asitlik, peroksit değeri, fenolik profil ve duyu kalite gibi ölçütler belirleyicidir. Bu ayrışma, tarla–hasat–işleme–pazarlama aşamalarının her birinde farklı yatırım, bilgi ve teknoloji setlerine ihtiyaç doğurur (Conte et al., 2020). Yan ürünlerin (ör. prina) döngüsel ekonomide değerlendirilmesi ile tuz ve atık su yönetimi gibi çevresel boyutlar, gıda sanayi tedariki, ihracat geliri ve katma değer zincir içi dağılımı üzerinde etkili olmaktadır (Conte et al., 2020; Cinardi et al., 2024). Böylelikle sektör, tarımsal rekabetçilik, dış ticaret ve kırsal refah başlıklarında yüksek politika ilgisi talep eden bir konumda yer alır.

Zeytinlikler aynı zamanda kırsal kalkınma, istihdam ve sürdürülebilirlik açısından çok işlevli ekosistem hizmetleri sunar. Akdeniz koşullarında çoğu zaman marjinal alanlarda üretim ve gelir sağlayan bu sistemler, kültürel peyzaj ve biyoçeşitliliğin korunmasına da katkıda bulunur (Noman, 2024). Bununla birlikte, iklim değişikliği (ısı dalgaları, yağış rejimindeki bozulma) ve artan girdi maliyetleri (işçilik, enerji, gübre) son on yılda verim ve maliyet yapısını yeniden tanımlamıştır (Leal Filho et al., 2025; TEPGE, 2025). Zeytinde yapısal bir özellik olan alternans (yüksek–düşük ürün yıllarının ardalanması) kuraklık ve ısı stresiyle birleştiğinde toplam çıktıda belirgin oynaklık üretmektedir (Kokkotos et al., 2024).

Bu bölümün amacı, Türkiye’de zeytin üretiminin 2025–2029 dönemindeki tahmini projeksiyonlarını ortaya koymaktır. Bu doğrultuda; meyve veren/vermeyen ağaç sayısı, toplu meyvelik alanı, bir ağaç başına verim ve toplam üretim göstergeleri üzerinden sektörel eğilimler analiz edilecek; “kapasite birikimi” ile “performans oynaklığı” arasındaki ilişki CAGR (Bileşik Yıllık Büyüme Oranı) ve Yıllık Ortalama Mutlak Artış (AMA)” gibi yöntemlerle değerlendirilecektir. Böylece, mevcut literatürde sınırlı olan sofralık-yağlık ayırımında uzun dönemli büyüme ve dalgalanma analizini tamamlayıcı bir perspektif sunulacaktır. Bu çalışma yalnızca 2015–2024 dönemi verilerine dayanılarak hazırlanmış olup uzun dönemli iklim döngüleri, periyodisite (var/yok yılı etkisi) ve üretim döngülerini tam olarak yansıtmayabilir. Projeksiyonlar, geçmiş yıllar arasındaki geometrik ortalama büyüme oranına (CAGR) dayalı olarak hazırlandığından tahminler yalnızca mevcut trendin devam edeceği varsayımına dayanmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada ikincil veriler kullanılmış olup temel kaynak TÜİK’in Bitkisel Üretim istatistikleridir (TÜİK, 2024). Analiz kapsamı 2015–2024 dönemidir ve projeksiyonlar, bu dönemde gözlenen eğilimlerden türetilen yıllık ortalama değişim oranlarına dayalı olarak yorumlayıcı amaçla ele alınmıştır. Türkiye verileri; uluslararası bağlamı görmek ve serileri çapraz-doğrulamak üzere IOC raporlarındaki ülke karşılaştırmalarıyla ve piyasa okumaları için TEPGE bültenleriyle desteklenmiştir (IOC, 2024; TEPGE, 2025). Değerlendirmeler sofralık ve yağlık alt sektör ayırımında ağaç sayısı, alan, verim (kg/ağaç) ve üretim (ton) göstergeleri üzerinden yapılmıştır.

Birikimli/stoğa eklenen göstergelerde (ağaç sayısı, alan, üretim miktarı) uzun dönem eğilimi özetlemek için Bileşik Yıllık Büyüme Oranı (CAGR) kullanılmıştır. CAGR, başlangıç ve bitiş değerleri arasında geometrik yıllık büyüme hızını verir ve ara yıllardaki dalgalanmaları düzleştirerek trendi ifade eder (World Bank Data Helpdesk, 2023). Formül, 2015 başlangıç yılı ve 2024 bitiş yılı için $t=9$ alınarak şu şekilde uygulanır:

$$CAGR = \left(\frac{V_{son}}{V_{ilk}} \right)^{\frac{1}{t}} - 1$$

Doğal dalgalanması görece yüksek olan verim göstergesinde ise Yıllık Ortalama Mutlak Artış (YOMA) benimsenmiştir. YOMA, dönem boyunca toplam net değişimin yıllık ortalama adımını verir ve özellikle verim gibi sezonlar arası oynaklığı belirgin değişkenler için sezgisel bir eğilim ölçütü sunar (Montgomery et al., 2021). Bu çalışmada doğrusal artış varsayımı altında $YOMA = \frac{V_{son} - V_{ilk}}{t}$ ifadesi kullanılmıştır. Oynaklığın görsel olarak yumuşatılmasında, yalnızca grafiksel sunum amacıyla 3 yıllık hareketli ortalama (MA3) uygulanabilir; ancak temel büyüme göstergeleri ham dönem uç değerleriyle hesaplanır (Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

Çalışmada sunulan ileriye dönük basit eğilim uzatımları, 2015–2024 döneminden türetilen bu iki özet ölçüte dayalı mekanik projeksiyonlardır: birikimli göstergeler için CAGR ile üssel uzatma; verim için YOMA ile doğrusal uzatma tercih edilir (OECD, 2001; Montgomery et al., 2009). Bu uzatımlar, politika önerisi niteliği taşımaz; yalnızca gözlenen eğilimlerin görgül bir izdüşümünü sunar. 2024 yılının TÜİK bülteninde “2. tahmin” niteliği taşıdığı unutulmamalı ve yorumlar bu bağlamda dikkatle yapılmalıdır (TÜİK, 2024). Uluslararası serilerle bağlamsal karşılaştırma gerektiğinde IOC’nin ülke bazlı üretim ve tüketim setleri, piyasa dinamiklerini okumada ise TEPGE’nin güncel raporları referans alınmıştır (IOC, 2024; TEPGE, 2025).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Sofralık Zeytin Göstergeleri (2015-2024)

2015–2024 döneminde sofralık zeytinde meyve veren ağaç sayısı artış eğilimini korumuştur (CAGR \approx %2.50/yıl); meyve vermeyen ağaçlar da daha yavaş bir hızda büyümüştür (\approx %1.67/yıl). Toplu meyvelik alanı sınırlı fakat pozitif bir eğilim göstermiştir (\approx %0.95/yıl). Verim (kg/ağaç) doğal oynaklıklarla 9–22 aralığında seyretmiş; dönem başına göre YOMA \approx +1.44 kg/ağaç·yıl hesaplanmıştır. Üretim 2015’te 400 000 ton iken 2024’te 1 166 318 tona yükselmiş (CAGR \approx %12.1/yıl); 2022’deki sıçrama ve 2023’teki keskin düşüşten sonra 2024’te yeniden güçlü artış görülmüştür (Tablo 1). Bu desen, periyodisite (alternans) ile iklimsel şokların üst üste bindiği sezonlarda miktar hareketlerinin keskinleştiğini düşündürür.

Tablo 1. Türkiye’de sofralık zeytin için ağaç varlığı, alan, verim ve üretim (2015–2024)

Yıl	Meyve vermeyen ağaç (adet)	Meyve veren ağaç (adet)	Toplu meyvelik alanı (da)	Verim(kg/ ağaç)	Üretim (ton)
2015	46.361.696	9.481.582	2.236.460	9	400.000
2016	47.314.681	8.652.920	2.262.516	9	430.000
2017	47.675.780	8.552.278	2.264.912	10	460.000
2018	42.288.347	8.681.448	2.099.722	10	426.995
2019	48.032.207	10.002.011	2.341.306	9	415.000
2020	50.469.104	9.337.984	2.334.583	10	513.140
2021	50.141.848	8.965.436	2.302.531	11	555.833
2022	51.616.732	8.923.164	2.326.289	18	938.217
2023	52.303.870	11.388.686	2.386.570	9	490.000
2024	53.877.001	11.850.599	2.434.282	22	1.166.318

Kaynak: TÜİK (2024)

2015–2024’te meyve veren ağaçlardaki istikrarlı artış, sofralık segmentte kapasite birikiminin sürdüğünü gösterir; meyve vermeyen ağaçların daha yavaş hızda büyümesi ise genç bahçelerin kademeli biçimde ürüne geçtiğine işaret eder (bkz. Tablo 1). Buna karşın verimin 9–22 kg/ağaç bandında geniş bir salınım göstermesi, alternans ve verim yönetimi ile (Lavee, 2007; Trentacoste et al., 2010) iklim kaynaklı su/ısı streslerinin eşzamanlı etkisini düşündürür. Özellikle düzensiz yağış–sıcaklık desenleri, çiçeklenme–meyve tutumu–tane gelişimi zincirinin her halkasında risk yaratır (Fraga et al., 2021). Bu çok-etmenli yapı, 2022’deki sıçrama ve 2023’teki keskin düşüşle birlikte 2024’teki güçlü toparlanmayı açıklamaya yardımcı olur.

Sofralık sınıfta iri tanelilik, düşük kusur oranı ve homojen kalibre hedefleri verim ile kalite arasında sürekli bir denge arayışını zorunlu kılar. Türkiye’de bölgesel çeşit kompozisyonu—Marmara’da Gemlik başta olmak üzere—sezon davranışını ve pazar kalibrasyonunu belirgin etkiler (İpek et al., 2009). Çeşide ve olgunluk derecesine bağlı hasat zamanlaması kararları, miktar/kalite bileşimini yeniden ayarlar; bu da verim dalgalanmalarının ticari sonuçlarını büyütebilir ya da sönmüleyebilir (Beltrán et al., 2004).

Sofralık zeytinde fermantasyonun kontrollü yönetimi (starter kültürler, tuz-pH-sıcaklık rejimi) kusur risklerini düşürür ve kalite standardizasyonu sağlar; bu sayede tarla kaynaklı dalgalanmaların pazara yansması tamponlanabilir (Arroyo-López et al., 2012; Bonatsou et al., 2017; Conte et al., 2020). Özellikle yüksek ürün yıllarında işleme kapasitesi, soğuk depo ve lojistik kısıtları kalite kaybını tetikleyebilir; düşük ürün yıllarında ise tedarik zinciri maliyetleri birim ürün başına artar. Bu nedenle hasat-işleme senkronizasyonu ve fermantasyon süreç kontrolü, miktar oynaklığını kalite kaybına dönüştürmeden yönetimin ana araçlarıdır.

Artan sıcak dalgaları ve su baskısı, sofralık kalibre/tekstür hedeflerini doğrudan etkiler. Damla sulama stratejileri ve toprak organik maddesinin yükseltilmesi, su kullanım verimini artırırken verim ve kaliteyi korumaya yardımcı olabilir (Iniesta et al., 2009). Budama ve yük yönetimiyle birlikte uygulandığında, alternansın şiddeti de azaltılabilir (Trentacoste et al., 2010). Bu paketlerin yaygınlaştırılması, Tablo 1’de görülen üretim oynaklığını orta vadede sönmüleme potansiyeli taşır.

Sofralık segmentte miktar-kalite dengesini güçlendirmek ve üretim oynaklığını azaltmak için dört eksen öne çıkmaktadır: (i) hasat-işleme senkronizasyonunu bölge-bazlı kapasite planlaması ve güçlü bir soğuk zincirle desteklemek; (ii) fermantasyonun kontrollü yönetimiyle (starter kültür kullanımı, tuz/pH rejiminin optimize edilmesi) kalite standardizasyonunu sağlamak; (iii) su verimliliğini artıran damla/defisit sulama uygulamalarıyla birlikte toprak organik maddesini yükseltmek; (iv) çeşit-pazar kalibresi eşleştirmesini budama ve yük yönetimiyle entegre ederek alternansın şiddetini düşürmek. Bu bütüncül yaklaşım, iklim kaynaklı ısı ve su stresi altında dahi verim ve kalite istikrarını artırma potansiyeli taşımaktadır (Ponti et al., 2014).

3.2. Yağlık Zeytin Göstergeleri (2015-2024)

2015-2024 döneminde yağlık zeytinde meyve veren ağaç sayısı 98.398.019’dan 118.697.793’e yükselerek yıllık bileşik artışta yaklaşık %2,11/yıl; meyve vermeyen ağaç 17.750.471’den 20.562.465’e çıkarak %1,65/yıl büyümüştür. Toplu meyvelik alanı 6.132.886’dan 6.698.906 dekara ilerleyerek %0,99/yıl artış göstermiştir. Verim (kg/ağaç) 13’ten 22’ye çıkar ve dönem boyunca 7-22 kg/ağaç aralığında seyrederek; basit yıllık adım YOMA $\approx +1,0$ kg/ağaç/yıl’dır. Üretim 1.300.000 tondan 2.583.682 tona yükselmiş,

CAGR \approx %7,93/yıl olarak hesaplanmıştır. Zaman serisi profiline göre kapasite göstergeleri (ağaç varlığı ve alan) genel olarak artış eğilimindedir; buna karşılık üretim hacmi geniş bir yıllık bantta dalgalanır: dönem içindeki en düşük değer 2020’de 803.486 ton, en yüksek değer 2024’te 2.583.682 ton olup alt–üst uçlar arasında yaklaşık 3,2 katlık bir fark gözlenmektedir. Serinin bu yapısı, 2022 ve 2024’te yüksek üretim, 2020’de ise düşük üretim yılı olarak öne çıkan yıllarla nicel olarak doğrulanmaktadır.

Tablo 2. Türkiye’de yağlık zeytin için ağaç varlığı, alan, verim ve üretim (2015–2024)

Yıl	Meyve veren ağaç (adet)	Meyve vermeyen ağaç (adet)	Toplu meyvelik alanı (da)	Verim(kg/ağaç)	Üretim (ton)
2015	98.398.019	17.750.471	6.132.886	13	1.300.000
2016	100.088.449	17.702.038	6.192.904	13	1.300.000
2017	100.587.005	17.779.084	6.195.707	16	1.640.000
2018	108.781.087	18.093.084	6.544.561	10	1.073.472
2019	106.005.008	18.036.904	6.450.459	10	1.110.000
2020	108.912.926	18.443.238	6.536.185	7	803.486
2021	107.707.625	21.864.176	6.589.146	11	1.182.847
2022	111.417.952	22.561.293	6.684.972	18	2.037.783
2023	115.241.093	22.836.045	6.644.041	9	1.030.000
2024	118.697.793	20.562.465	6.698.906	22	2.583.682

Kaynak: TÜİK (2024)

2015–2024 döneminde yağlık zeytinde ağaç varlığındaki düzenli artış (meyve veren ve vermeyen sınıflarda yıllık bileşik büyümenin pozitif seyri) kapasite birikiminin sürdüğünü, buna karşılık üretim hacminin geniş bir yıllık bantta dalgalanmasının verim dinamikleri tarafından belirlendiğini göstermektedir (Tablo 2). Verim serisinde gözlenen 7–22 kg/ağaç aralığı ile 2020’deki düşük ve 2022–2024’teki yüksek üretim yılları, alternans davranışının fenolojik eşiklere duyarlı iklim koşulları (özellikle sıcak dalgaları ve su mevcudiyeti) ile üst üste bindiğinde keskinleştiğini düşündürmektedir. Bölgesel ısınma sinyalleri ve kuraklık eğilimleri, Levant ve çevresi için zeytinyağı üretiminde belirgin bir risk bileşeni olarak rapor edilmiştir (Kaniewski et al., 2023).

Sulama stratejisi, verim düzeyi ile yağ kalitesi arasındaki dengeyi belirleyen ana kaldıraçlardan biridir. Defisit sulama (RDI), özellikle çekirdek sertleşmesi ve yağ birikiminin hızlandığı evrelerde, toplam verimi korurken yağın fenolik profili ve duyuusal niteliğinde iyileşme sağlayabilmektedir; bu bulgu, farklı fenolojik pencerelerde uygulanan su kısıtının verim–kalite “trade-off”unu daha elverişli bir noktaya taşıyabildiğini gösterir (Gucci et al., 2019). Benzer şekilde, sulama dozunun yükselmesi birçok çalışmada toplam fenoller ve bazı ana fenolik bileşenlerde azalma eğilimiyle ilişkilendirilmiş, kontrollü stresin ise biyofenolik birikimi uyarabildiği bildirilmiştir (Servili et al., 2007; Tovar et al., 2001). Bu bağlamda Tablo 2’deki verim sıçramalarının yalnızca ağaç sayısı/alan artışıyla değil, su yönetimi ve yıl içi iklim desenleriyle birlikte okunması gerekir.

Üretimin yüksek seyrettiği yıllarda hasadın yoğunlaşması, kırma–malaksasyon–ayırıştırma hattında bekleme sürelerini uzatabilmekte; bu durum lipoksijenaz kökenli aroma profili ve oksidatif kararlılık açısından olumsuzluklar doğurabilmektedir. İşleme kapasitesindeki geçici darboğazlar ve bekleme koşullarının kontrolsüzlüğü (sıcaklık, oksijen teması), sızma kalite parametreleri üzerinde bozulma riskini artırır. Zincirin izleyen halkası olan depolamada da ışık ve sıcaklık maruziyeti serbest asitlik, peroksit ve K- indeksleri gibi temel ölçütlerde bozulmayı hızlandırmaktadır; ışığa maruziyetin ve yüksek sıcaklığın olumsuz etkileri defalarca gösterilmiştir (Caponio et al., 2005)

Çeşit kompozisyonu, ağaç yaşı ve bahçe yönetimi (taç mimarisi, yük yönetimi) de yıllar arası oynaklığın şiddetini modüle eder. Taç içine homojen ışık–su dağılımını sağlayan budama rejimleri ve yük yönetimi uygulamaları, alternans şiddetini azaltarak “tepe-dip” farkını daraltabilir; bu, verim düzeyinin yanı sıra kalite parametrelerinin de daha istikrarlı seyretmesine katkı verir. İklimsel belirsizliğin arttığı bir bağlamda, fenolojiye duyarlı RDI takvimleri ile hasat zamanlamasının (erken/orta-erken) kalite hedefleri doğrultusunda optimize edilmesi, Tablo 2’de gözlenen geniş varyasyonun pazara yansiyacak olumsuz etkilerini sınırlayabilecek uygulanabilir araçlardır (Gucci et al., 2019).

3.3. Sofralık Zeytin İçin Yıllık Değişim ve Projeksiyon Analizi (2025–2029)

2024 gerçekleşen değerleri temel alınarak yapılan uzatım, sofralık zeytinde hem kapasite göstergelerinde (meyve veren–vermeyen ağaç stoku ve meyvelik alan) hem de performans göstergelerinde (verim ve üretim) artışın sürdüğünü göstermektedir (Tablo 3). Meyve veren ağaç sayısının 2029’da 13,4 milyon adede yükselmesi, 2024’e göre ≈ 13 ’lük bir genişlemeye; meyve vermeyen ağaç stokundaki artış ise ≈ 9 ’luk daha sınırlı bir büyümeye işaret etmektedir. Alan artışı $\approx 4,7$ ile ılımlı seyretmektedir.

Verimin 2024’te 22 kg/ağaçtan 2029’da 30 kg/ağaç seviyesine çıkacağı varsayımı, beş yılda ≈ 36 ’lık bir artışa tekabül eder ve toplam üretim artışının başlıca sürükleyicisidir. Bu patika, modern bahçecilik uygulamaları, sulama ve budamaya yapılan yatırımlarla uyumlu olsa da, zeytinde var/yok yılı alternansı ve iklim oynaklığına duyarlıdır; dolayısıyla belirsizlik bandı içerir.

Üretim miktarının 2015–2024 dönemindeki $12,63$ ’lük yıllık bileşik artış oranı korunursa, 2029’da toplam üretim 2,11 milyon ton düzeyine ulaşarak 2024’e göre ≈ 81 ’lik bir sıçrama öngörülmektedir. Ağaç stoğundaki artışın (özellikle meyve veren ağaçlarda) ve verim patikasının birlikte çalışması, üretimdeki bu güçlü ivmeyi desteklemektedir.

2025–2029 döneminde beklenen artış, yeni dikimlerin ürüne dönme süreci ve verimliliğe yönelik teknik yatırımların sürdürülmesi halinde gerçekleşebilir. Buna karşılık, su stresi, don/kuraklık şokları ve periyodisite etkileri verim patikasını aşağı yönlü sapıtabilir; bu nedenle verim için belirsizlik bandı ile (ör. $\pm 1-2$ kg/ağaç) duyarlılık analizi raporlamak uygun olacaktır.

Tablo 3. Sofralık zeytin projeksiyonları (2025-2029 tahminleri)

	2025	2026	2027	2028	2029	Yıllık Değişim Yöntemi (CAGR %)
Meyve Vermeyen Ağaç (1000 adet)	54,792	55,723	56,669	57,630	58,608	%1.70
Meyve Veren Ağaç (1000 adet)	12,145	12,447	12,756	13,074	13,400	%2.49
Toplu Meyvelik Alanı (1000 dekar)	2,456	2,479	2,502	2,525	2,549	%0.93
Verim (kg/meyve veren ağaç)	23	25	26	28	30	Ortalama Artış +1.44 kg
Üretim Miktarı (1000 ton)	1,313	1,479	1,666	1,877	2,113	%12.63

3.4. Yağlık Zeytin İçin Yıllık Değişim ve Projeksiyon Analizi (2025–2029)

Meyve veren ağaç sayısı 2024–2029 arasında %≈10,9 artarak 131,7 milyon adede yükselmektedir; meyve vermeyen ağaç stoku ise %≈8,6 artış göstermektedir. Toplu meyvelik alanındaki büyüme %≈5,0 ile sınırlıdır (Tablo 4). Bu profil, geniş ölçekte devam eden ama kontrollü bir kapasite genişlemesine işaret eder.

Verimin 22’den 27 kg/ağaç düzeyine çıkacağı varsayımı (yılda +1,00 kg) beş yılda %≈22,7’lik artışa karşılık gelir. Bu istikrarlı patika, geniş ve geleneksel bahçelerde kademeli modernizasyonla uyumlu olmakla birlikte, alternans (var/yok yılı) ve iklim oynaklığına duyarlıdır.

Üretim miktarı CAGR %7,89 varsayımıyla 2029’da 3,78 milyon tona yükselerek 2024’e göre %≈46,4 artmaktadır. Mekanik olarak bakıldığında, meyve veren ağaç stokundaki %≈10,9’luk artış ile verimdeki %≈22,7’lik iyileşme birlikte yaklaşık %≈36’lık bir üretim artışı açıklar; projeksiyondaki daha yüksek toplam artış, CAGR uzatım metodunun (ve olası taşıma/hasat oranı varsayımlarının) etkisini yansıtır.

Su stresi, sıcak/soğuk şokları ve zararlı-hastalık baskısı, verim patikasını aşağı/yukarı çekebilir. Bu nedenle raporda verim için ±0,5–1,0 kg/ağaç bandıyla kısa bir duyarlılık senaryosu sunmanız, tahmin aralığını görünür kılar. Üretimi alternatif olarak “meyve veren ağaç × verim” çarpımından türeterek (CAGR uzatımıyla yan yana) ikinci bir satırda göstermek, yönetime açıklık kazandırır.

Tablo 4. Yağlık zeytinyağı projeksiyonları (2025-2029 tahminleri)

	2025	2026	2027	2028	2029	Yıllık Değişim Yöntemi (CAGR %)
Meyve Veren Ağaç (1000 adet)	121,180	123,717	126,309	128,957	131,663	%2.09
Meyve Vermeyen Ağaç (1000 adet)	20,903	21,250	21,604	21,965	22,333	%1.66
Toplu Meyvelik Alanı (1000 dekar)	6,764	6,831	6,898	6,966	7,034	%0.98
Verim (kg/meyve veren ağaç)	23	24	25	26	27	Ortalama Artış (+1.00 kg)
Üretim Miktarı (1000 ton)	2,787	3,007	3,245	3,503	3,782	%7.89

2029'a doğru meyve veren ağaç stokunun 131 milyon eşiğini aşması, zeytinyağı arz güvenliğini güçlendirir; ancak bu kazanımın sürekliliği, su verimliliği, budama standardizasyonu ve entegre zararlı yönetimi yatırımlarının devamına bağlıdır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

2015–2024 döneminde Türkiye zeytin sektöründe kapasite göstergeleri (ağaç varlığı ve meyvelik alan) her iki segmentte de artmış; üretim ise özellikle yağlıkta alternans ve iklim kaynaklı stresler nedeniyle geniş bir bantta dalgalanmıştır. 2015–2024 eğilimlerinin 2025–2029'a uzatılmasıyla elde edilen projeksiyonlar, sofralığın daha dinamik, yağlığın ise daha istikrarlı bir büyüme patikasına yerleştiğini göstermektedir. Sofralık segmentte meyve veren ağaç sayısının 2029'da 13,4 milyon adede yaklaşacağı, verimin 30 kg/ağaç düzeyine çıkacağı ve üretimin yaklaşık 2,11 milyon tona erişeceği; yağlık segmentte ise meyve veren ağaç sayısının 131,7 milyon adedi aşacağı, verimin 27 kg/ağaç civarında gerçekleşeceği ve üretimin 3,78 milyon ton seviyesine yükseleceği öngörülmektedir. Bu görünüm, üretim artışının başat belirleyicisinin verim olduğunu, ağaç stoğundaki artışla birlikte çarpan etkisi yaratarak toplam arzı kuvvetlendirdiğini ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, projeksiyonların doğası gereği “eğilim uzatımı” niteliğinde olduğu unutulmamalıdır. Zeytinde var/yok yılı davranışı, su stresi ve ekstrem hava olayları verim patikasını aşağı-yukarı çekebilecek, hasat-ışleme senkronundaki aksaklıklar ise özellikle yüksek ürün yıllarında kalite kaybı ve randıman düşüşü riskini artırabilecektir. Bu nedenle verim için $\pm 1-2$ kg/ağaç aralığında bir belirsizlik bandı ve yüksek ürün haftaları için işleme kapasitesi esneklik planı çalışmalıdır. Zamanlama ve süreç yönetimi kritik bir eşittir: çekirdek sertleşmesi-yağ birikimi evrelerine duyarlı sulama ve hasat kararları verim-kalite dengesini belirgin biçimde iyileştirirken, hasat ile ilk işleme arasındaki bekleme süresinin uzaması hem sofralık kalibre/defekt dağılımını, hem de yağlıkta fenolik profil ve serbest yağ asidini olumsuz etkileyebilmektedir.

Verim ve kalite istikrarı için fenolojiye duyarlı su yönetimi (damla sulama, toprak nem izleme) ile toprak organik maddesini artıran uygulamaların ölçeklenmesi gerekmektedir. Alternansın sönümlenmesi amacıyla taç şekli, dal düzeni ve meyve yükü yönetimi birlikte ele alınmalı; sofralıkta zedelenmeyi minimize eden toplama teknikleri ve bahçeden işletmeye kısa transferle parti standardı korunmalı; yağlıkta erken-orta erken hasat penceresi, hedeflenen duyuşal profil ve fenolik yapı gözetilerek standardize edilmelidir. Hastalık-zararlı baskısına karşı entegre mücadele (ör. zeytin sineği izleme/erken uyarı) ve karantina protokollerinin yaygınlaştırılması verim oynaklığını sınırlayan tamamlayıcı araçlardır.

Tedarik ve pazar tarafında, çeşit-pazar kalibresi eşleşmelerinin netleştirilmesi ve kalite endeksine dayalı primlendirme mekanizmalarının (sofralıkta kalibre/defekt; yağlıkta fenolik profil ve serbest yağ asidi) sözleşmeli alım modelleriyle birleştirilmesi önerilir. Böylece hem üreticiye öngörülebilir gelir sinyali verilecek, hem de işletmelerin hammadde kalitesi üzerindeki kontrolü artacaktır. Yan ürünlerin döngüsel ekonomiye kazandırılması (pirina ve çekirdekten enerji/kompost; atık su geri kazanımı) maliyet esnekliğini artırırken çevresel performansı da güçlendirecektir.

Risk yönetimi boyutunda, verim-kaliteye dayalı gelir sigortası ve iklim riski teminatlarının erişilebilirliği artırılmalı; üretici-işletme-laboratuvar hattında gerçek zamanlı izleme ile erken uyarı sistemleri kurulmalıdır. İzleme-değerlendirme için somut göstergeler tanımlanması, stratejinin uygulanabilirliğini güvenceye alacaktır: verimde yıllık sapmanın her iki

segmentte de ± 2 kg/ağaç eşiğinin altında tutulması; hasattan ilk işleme kadar geçen sürenin yukarıda belirtilen eşikleri aşmaması; lojistik/ön-işleme kaynaklı kayıpsız ürün oranının normal koşullarda $\geq\%95$ (pik dönemlerde $\geq\%92$) olması; ve bölge bazında sözleşmeli hacim payının orta vadede $\geq\%40$ 'a ulaşması hedeflenmelidir.

2025–2029 dönemine ilişkin projeksiyonlar, Türkiye zeytin sektöründe nicel kapasite artışının yağlıkta istikrarlı, sofralıkta daha dinamik biçimde süreceğini; bu büyümenin kalite ve kârlılıkta kalıcı kazanımlara dönüşmesinin ise hasat–işleme eşgüdümü, su/verim yönetimi ve sözleşmeli pazar mimarisinin eşzamanlı güçlendirilmesine bağlı olduğunu göstermektedir. Belirsizlikler etkili bir izleme çerçevesi ve duyarlılık analizleriyle yönetildiğinde, sektörün hem iç pazar hem de ihracat kanallarında rekabetçiliğini artırması mümkündür.

KAYNAKÇA

- Arroyo-López, F. N., Romero-Gil, V., Bautista-Gallego, J., Rodríguez-Gómez, F., Jiménez-Díaz, R., García-García, P., Querol, A., & Garrido-Fernández, A. (2012). Yeasts in table olive processing: Desirable or spoilage microorganisms? *International Journal of Food Microbiology*, 160(1), 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.08.003>
- Beltrán, G., Del Río, C., Sánchez, S., & Martínez, L. (2004). Influence of harvest date and crop yield on the fatty acid composition of virgin olive oils from cv. Picual. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(11), 3434–3440. <https://doi.org/10.1021/jf049894n>
- Bonatsou, S., Tassou, CC, Panagou, EZ ve Nychas, G.-JE (2017). Çok İşlevli Potansiyele Sahip Başlangıç Kültürleri Kullanılarak Sofralık Zeytin Fermentasyonu. *Mikroorganizmalar* , 5 (2), 30. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5020030>
- Caponio, F., Bilancia, M. T., Pasqualone, A., Sikorska, E., & Gomes, T. (2005). Influence of the exposure to light on extra virgin olive oil quality during storage. *European Food Research and Technology*, 221(1), 92-98. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-1126-8>
- Conte, P., Fadda, C., Del Caro, A., Urgeghe, P. P., & Piga, A. (2020). Table olives: An overview on effects of processing on nutritional and sensory quality. *Foods*, 9(4), 514. <https://doi.org/10.3390/foods9040514>
- Fraga, H., Moriondo, M., Leolini, L., & Santos, J. A. (2021). Mediterranean Olive Orchards under Climate Change: A Review of Future Impacts and Adaptation Strategies. *Agronomy*, 11(1), 56. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>
- Gucci, R., Caruso, G., Gennai, C., Esposito, S., Urbani, S., & Servili, M. (2019). Fruit growth, yield and oil quality changes induced by deficit irrigation at different stages of olive fruit development. *Agricultural Water Management*, 212, 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.022>
- Hyndman, R.J., & Athanasopoulos, G. (2021) *Forecasting: principles and practice*, 3rd edition, OTexts: Melbourne, Australia. OTexts.com/fpp3.
- Iniesta, F., Testi, L., Orgaz, F., & Villalobos, F. J. (2009). The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and

- yield of olive trees. *European Journal of Agronomy*, 30(4), 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.12.004>
- International Olive Council. (2024, December 17). *World market of olive oil and table olives – Data from December 2024*. <https://www.internationaloliveoil.org/world-market-of-olive-oil-and-table-olives-data-from-december-2024/>
- Ipek, A., Barut, E., Gulen, H., Oz, A. T., Tangu, N. A. ve Ipek, M. (2009). SSR analysis demonstrates that olive production in the southern Marmara region in Turkey uses a single genotype. *GENETICS AND MOLECULAR RESEARCH*, 8(4), 1264–1272. doi:10.4238/vol8-4gmr659
- Kaniewski, D., Marriner, N., Morhange, C., Khater, C., Terral, J. F., Besnard, G., ... & Cheddadi, R. (2023). Climate change threatens olive oil production in the Levant. *Nature plants*, 9(2), 219–227. <https://doi.org/10.1038/s41477-022-01339-z>
- Kokkotos, E., Zotos, A., & Patakas, A. (2024). *Effect of alternate fruit bearing on olive tree water consumption*. *Acta Horticulturae*, 1409, 31–36. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1409.5>
- Lavee, S. (2007). Biennial bearing in olive (*Olea europaea*). *Annales, Series Historia Naturalis*, 17(1), 101–112.
- Leal Filho, W., Luetz, J. M., Dinis, M. A. P., & Nagy, G. J. (2025). Dinner is served: How climate change interferes with olive oil production. *Sustainability Science*, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11625-025-01756-x>
- Montgomery, DC, Runger, GC ve Hubele, NF (2009). *Mühendislik istatistikleri*. John Wiley & Sons.
- OECD. (2001). *Measuring Productivity – OECD Manual: Measurement of Aggregate and Industry-level Productivity Growth*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264194519-en>
- Öztürk, M., Altay, V., Gönenç, T. M., Ünal, B. T., Efe, R., Akçiçek, E., & Bukhari, A. (2021). An overview of olive cultivation in Turkey: Botanical features, eco-physiology and phytochemical aspects. *Agronomy*, 11(2), 295. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020295>
- Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M., & Dell’Aquila, A. (2014). Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the

- Mediterranean Basin reveals winners and losers. *PNAS*, *111*(15), 5598–5603. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314437111>
- Servili, M., Esposito, S., Lodolini, E., Selvaggini, R., Taticchi, A., Urbani, S., ... & Gucci, R. (2007). Irrigation effects on quality, phenolic composition, and selected volatiles of virgin olive oils cv. Leccino. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *55*(16), 6609–6618. <https://doi.org/10.1021/jf070599n>
- TEPGE (Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü). (2025, Temmuz). *Zeytinyağı tarım ürünleri piyasaları raporu – Temmuz 2025*. Ankara: TEPGE. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge>
- Tovar, M. J., Motilva, M. J., & Romero, M. P. (2001). Changes in the phenolic composition of virgin olive oil from young trees (*Olea europaea* L. cv. Arbequina) grown under linear irrigation strategies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *49*(11), 5502–5508. <https://doi.org/10.1021/jf0102416>
- Trentacoste, E. R., Puertas, C. M., & Sadras, V. O. (2010). Effect of fruit load on oil yield components and dynamics of fruit growth and oil accumulation in olive (*Olea europaea* L.). *European Journal of Agronomy*, *32*(4), 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.01.002>
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu). (2024, 25 Ekim). *Bitkisel Üretim 2. Tahmini, 2024* (Bülten No: 53448). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-2.Tahmini-2024-53448>
- World Bank Data Helpdesk. (2023). *How are aggregate growth rates computed for National Accounts series?* Erişim: <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/114952-how-are-aggregate-growth-rates-computed-for-nation>

BÖLÜM 2

KAĞIT ENDÜSTRİSİNDE YENİLİK VE KURUMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK: SİMBİYOTİK BİR İLİŞKİ

Doç. Dr. Ahmet Bora KIRKLIKÇI¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17913802>

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Karaman, Türkiye. borakirklikci@gmail.com,
orcid id: 0000-0002-0401-8182

1. GİRİŞ

Kağıt, yüzyıllardır toplumu şekillendirmiştir ve insanlığın en önemli icatlarından biri olarak kabul edilir. Kağıt endüstrisi, günümüzde küresel ölçekte hem ekonomik hem çevresel etkileri yüksek olan temel sektörlerden biridir (Fernandes & Costa, 2020). Sektör, orman kaynaklarının kullanımından enerji tüketimine, su yönetiminden atık kontrolüne kadar çok boyutlu bir yapıya sahiptir. Kağıt hamuru ve kağıt ürünleri, malzeme çıkarma, işleme, taşıma ve atık depolama yaşam döngüleri boyunca sosyal ve doğal sistemlere zarar verebilir (Del Rio et al., 2022). Küresel değerlendirmelere göre sürdürülebilirlik baskıları sektörde yeniliğin temel itici gücüdür (World Economic Forum, 2023). Bu nedenle sürdürülebilirlik, kağıt endüstrisinin stratejik öncelikleri arasında yer almakta; yenilik ise sürdürülebilir dönüşümün temel itici gücü olarak görülmektedir. Yenilik (inovasyon) ve kurumsal sürdürülebilirlik arasındaki simbiyotik ilişki, işletmelerin rekabet gücünü artırmakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel performanslarını geliştirmelerine de olanak tanımaktadır.

Türkiye'de, yenilikçi yaklaşımların ormancılık ve orman ürünleri sektörü için sürdürülebilirlik üzerine etkileri yeterince tartışılmamıştır. Mobilya işletmelerinde yapılan bir çalışmada farklı inovasyon stratejilerinin farklı boyutlarda sürdürülebilirliği olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir (Bayraktar & Ayyıldız, 2021). Mobilya ve levha üretim işletmelerinde çalışanlarında yenilikçi dijital teknolojilerin uygulanmasının önündeki en büyük engellerin kalifiye eleman eksikliği ve yüksek maliyetler olduğu bildirilmiştir. Her iki sektördeki işletmelerin yalnızca küçük bir yüzdesinin akıllı üretim stratejisine sahip olduğu bulunmuştur (Kırklıkçı, 2024).

Bu bölümde kağıt endüstrisinde yenilik ve sürdürülebilirlik arasındaki karşılıklı etkileşim incelenecek; teknolojik gelişmeler, kurumsal politikalar ve çevresel yönetim pratikleri çerçevesinde bütünsel bir değerlendirme yapılacaktır.

2. Kağıt Endüstrisinde Sürdürülebilirlik Yaklaşımlarının Evrimi

Kağıt hamuru ve kağıt endüstrisi, küresel olarak en çok enerji tüketen ilk beş endüstri arasında yer alır ve dördüncü büyük endüstriyel enerji kullanıcısıdır. Bu endüstri, küresel endüstriyel enerji kullanımının yaklaşık

%6'sını ve doğrudan endüstriyel CO₂ emisyonlarının %2'sini oluşturur (Van Ewijk et al., 2021). Ormanların yok edilmesi, su kirliliği ve sera gazı emisyonları uzun zamandır kağıt üretimiyle ilişkilendirilmiştir (Jiang et al., 2021). Kağıt hamuru ve kağıt endüstrisi ayrıca hem insan sağlığı hem de su ekosistemleri dahil olmak üzere yerel flora ve fauna üzerinde zararlı etkileri olan ham ahşabın en büyük kullanıcısıdır (Bernard et al., 2020; Bergquist & Söderholm, 2018; Toppinen et al., 2017).

Tarihsel olarak sektör, çevresel etkilerini azaltmak için yasal düzenlemelere uyum sağlama odaklı politikalar yürütmüştür. Atık su arıtma, baca gazı filtresi kullanımı ve orman sertifikasyon programlarına katılım, geleneksel dönemin belirgin uygulamalarıdır (Jallouli et al. 2020; Perera & Vlosky, 2006). Sürdürülebilirliğe artan vurgu, sektörde yeniliği teşvik ederek çevre dostu teknolojilerin, kaynak açısından verimli süreçlerin ve yenilikçi ürün tasarımlarının geliştirilmesine yol açmıştır (Daya et al., 2019; Rafione et al., 2014; Pätäri et al., 2011). Bu nedenle kağıt endüstrisi, çevresel etkisini ele almak için artan bir baskıyla karşı karşıyadır.

Tarihsel olarak çevresel bozulmaya büyük katkıda bulunan kağıt endüstrisi, yenilik ve kurumsal sürdürülebilirliğin bir araya gelmesiyle yönlendirilen bir dönüşüm geçirmektedir (Mandeep et al., 2019; Sun et al., 2018). Modern sürdürülebilirlik yaklaşımları, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasını değil; aynı zamanda işletmelerin uzun vadeli stratejik hedefleriyle uyumlu, yenilik temelli ve bütüncül bir dönüşümü kapsamaktadır. Bu yaklaşımda kağıt endüstrisi, çevresel düzenlemelere pasif uyumdan çıkarak proaktif, veri odaklı ve sistem temelli çözümler geliştirmeye yönelmiştir. Modern yaklaşımın özellikle enerji, su ve hammadde verimliliğini önceliklendirmesi literatürde geniş biçimde desteklenmektedir (Erkko & Niemelä, 2021; Fernandes & Costa, 2020; Bajpai, 2018). Ayrıca, modern yaklaşımlar, işletmelerin sadece çevresel değil sosyal etkilerini de yönetmesini gerektirir. Bu kapsamda: çalışan sağlığı ve güvenliği programları, yerel topluluklarla ortak sosyal projeler, ESG (Çevresel, Sosyal, Yönetişim) odaklı şeffaf raporlama, çevresel performansın kamuoyuyla düzenli paylaşımı önemli uygulamalar arasında yer almaktadır. Bu kapsamlı modern yaklaşım, kağıt endüstrisinin çevreye duyarlı, rekabetçi ve inovatif bir yapıya dönüşmesinde kritik rol üstlenmektedir. Dijitalleştirme, öğrenme ve otomasyon süreçlerinden

ortaya çıkan teknolojik gelişmeler kağıt üreticilerin maliyetlerini azaltmaya da yardımcı olabilecek çözümlerdir (Gerdin et al., 2021).

3. Kağıt Endüstrisinde Yenilik ve Sürdürülebilirlik arasındaki Simbiyotik İlişki

Kağıt endüstrisindeki yenilik faaliyetleri, sürdürülebilirliğin desteklenmesinde kritik rol oynamaktadır. Yenilik, sadece ürün tasarımında değil; süreç yönetimi, enerji uygulamaları, tedarik zinciri ve iş modelleri gibi çok boyutlu alanları kapsar. Yenilik ve sürdürülebilirlik kağıt endüstrisinde birbirini besleyen iki temel bileşendir. Atık miktarını düşüren yeni üretim teknolojileri, enerji tüketimini azaltan verimlilik modelleri, sürdürülebilir hammaddelere dayalı ürün geliştirme yenilikleri sürdürülebilirliği desteklerken, karbon sınır düzenlemeleri gibi küresel politika baskıları, tüketici talebinin çevre dostu ürünlere kayması, sürdürülebilirlik raporlamasının rekabet avantajı sağlaması yeniliği teşvik etmektedir. Bu karşılıklı etkileşim sektörde "simbiyotik ilişki"yi oluşturur: Sürdürülebilirlik hedefleri yeniliği tetikler, yenilikler de sürdürülebilirlik performansını artırır (IEA, 2023; CEPI, 2020; Nielsen, 2015).

3.1. Teknolojik Yenilikler

Teknolojik yenilikler, sektörde çevresel ayak izinin azaltılmasında en belirgin etkiye sahiptir. (Fernandes & Costa, 2020). Daha temiz üretim süreçleri, yenilenebilir enerji kaynakları ve atık azaltma teknolojileri gibi teknolojik gelişmeler yoluyla çevresel etkiler azaltılabilir (Ahmetović et al., 2021; Pio et al., 2020). Enzim bazlı ağartma teknolojileri, lignin ayrıştırma süreçlerinde biyolojik yöntemler, atık organik maddelerin biyorefineri yöntemleriyle katma değerli ürünlere dönüştürülmesi biyoteknolojik yaklaşımlardır. Enerji verimliliği teknolojilerinde, kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri, atık ısı geri kazanım üniteleri, yapay zekâ destekli proses optimizasyonu öne çıkmaktadır (Biermann, 2023; Bajpai, 2018).

3.2. Ürün Yenilikleri

Sürdürülebilir ürün geliştirme, sektörün dönüşümünün en görünür alanıdır. Biyobazlı ambalaj malzemeleri (Li & Ren, 2022), geri dönüştürülebilir ve kompostlanabilir kâğıt türevleri, nano-selüloz bazlı yüksek dayanımlı

ürünler (Dufresne, 2017), plastik bazlı ürünlerin yerini alan fonksiyonel kâğıt çözümleri önemli ürün yenilikleridir.

Petrol türevi katkı maddeleri ve kimyasalların çevresel etkileri nedeniyle sektör, lignin bazlı reçineler, nano-selüloz takviyeli kompozitler ve biyobazlı hammaddelere yönelmektedir. Bu malzemeler hem karbon ayak izini azaltmakta hem de yeni ürün çeşitliliği sağlamaktadır (Biermann, 2023; Dufresne, 2017).

Modern sürdürülebilirlik çabaları doğrultusunda kâğıt endüstrisi, atıkların hammadde olarak yeniden kazanıldığı kapalı devre sistemlere yönelmektedir. Bu yaklaşım sayesinde: lif geri kazanımı için gelişmiş ayırma teknolojileri kullanılmakta, atık kâğıtların yüksek kalitede yeniden işlenmesi sağlanmakta, su ve kimyasal kullanımından önemli tasarruf elde edilmektedir. Bu tür sistemler, sektörü daha az atık üreten, daha az kaynak tüketen bir modele taşır (Li & Ren, 2022).

3.3. İş Modeli Yenilikleri

Döngüsel ekonomi tabanlı kapalı devre üretim sistemleri (Erkko & Niemelä, 2021), paydaşlarla ortak değer yaratma modelleri, tedarik zincirinde karbon nötr stratejiler kâğıt sektöründeki yenilikçi iş modelleridir. Kaynak kullanımını optimize ederek, atık oluşumunu en aza indirerek ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını teşvik ederek kaynak verimliliği artırılabilir (Johansson et al., 2021; Gerdin et al., 2021). Geri dönüştürülmüş kâğıttan, biyolojik olarak parçalanabilir ambalaj ve dijital alternatifler gibi azaltılmış çevresel ayak izlerine sahip sürdürülebilir ürünler geliştirilebilir (Sonsale et al., 2021; Campano et al., 2017; Ervasti et al., 2016).

Geleneksel kâğıt üretimi yüksek miktarda su tüketirken, modern su yönetimi uygulamaları su ayak izinin azaltılmasında kritik rol oynamaktadır. Geleneksel kâğıt üretimi yüksek miktarda su tüketirken, modern tesisler: kapalı devre su geri dönüşüm sistemleri, membran filtrasyonu, ileri oksidasyon süreçleri kullanarak su tüketimini %80'e kadar azaltabilmektedir. Bu uygulamalar hem çevresel etkiyi hem de üretim maliyetlerini düşürmektedir (Fernandes & Costa, 2020).

Modern işletmeler, fosil yakıt bağımlılığını azaltmak amacıyla: yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, kojenerasyon/trijenerasyon sistemlerinin yaygınlaştırılması, atık ısı geri kazanım teknolojilerinin

kullanılması, enerji tüketiminin yapay zekâ ile optimize edilmesi gibi uygulamaları benimsemektedir. Bu stratejiler hem karbon emisyonlarını azaltmakta hem de enerji maliyetlerini düşürmektedir (Bajpai, 2018).

Proaktif sürdürülebilirlik, dijital dönüşümle desteklenmektedir. Kağıt fabrikalarında artık: IoT tabanlı sensörlerle gerçek zamanlı izleme, büyük veri analitiği ile proses optimizasyonu, dijital ikiz teknolojisi ile üretim senaryolarının simülasyonu, otomasyon sistemleriyle hata ve enerji kayıplarının azaltılması gibi uygulamalar yaygınlaşmaktadır (World Economic Forum, 2023).

Sürdürülebilirlik yalnızca fabrikanın içinde değil; tüm tedarik zincirine yayılmış durumdadır. Modern yaklaşımda: sertifikalı orman ürünlerinin kullanımı (FSC (Forest Stewardship Council), PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification)), şeffaf tedarik zinciri raporlaması, karbon ayak izi düşük lojistik yöntemleri, tedarikçilerle sürdürülebilirlik kriterlerinin ortak belirlenmesi ön plana çıkmaktadır (Erkko & Niemelä, 2021).

4. SONUÇ

Kağıt endüstrisi, tarihsel olarak yüksek çevresel etkileri olan ve kaynak kullanımında yoğun bir sektör olmasına rağmen, son yıllarda yenilik ve sürdürülebilirlik odaklı stratejiler sayesinde dönüşüm sürecine girmiştir. Bu dönüşüm, teknolojik, ürün ve iş modeli yenilikleri ile desteklenmekte ve sektörün çevresel, ekonomik ve sosyal performansını eş zamanlı olarak iyileştirmektedir. Modern sürdürülebilirlik yaklaşımları, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasını değil; işletmelerin stratejik hedefleri, dijitalleşme ve otomasyon süreçleriyle uyumlu, proaktif ve veri odaklı bir dönüşümü de içermektedir. Döngüsel ekonomi uygulamaları, biyobazlı ve geri dönüştürülebilir ürünler, enerji verimliliği teknolojileri ve gelişmiş su yönetim sistemleri, kağıt endüstrisinde hem maliyet tasarrufu hem de çevresel performans artışı sağlamaktadır. Yenilik ve sürdürülebilirlik arasındaki simbiyotik ilişki, sektörün geleceğini şekillendiren en kritik unsur olarak öne çıkmaktadır. Yenilikler sürdürülebilirliği güçlendirirken, sürdürülebilirlik hedefleri de işletmeleri yeni teknolojiler ve süreçler geliştirmeye teşvik etmektedir. Bu karşılıklı etkileşim, hem küresel rekabet avantajı yaratmakta hem de sektörü çevreye duyarlı ve sosyal sorumluluk bilincine sahip bir yapıya dönüştürmektedir. Sonuç olarak, kağıt endüstrisinde uzun vadeli başarı ve

rekabet edebilirlik, yenilik ve kurumsal sürdürülebilirlik stratejilerinin entegre bir şekilde uygulanmasına bağlıdır. Sektörün geleceği, teknolojik gelişmelerin, çevresel yönetim uygulamalarının ve sosyal sorumluluk projelerinin bir arada yürütülmesiyle şekillenecek ve daha dirençli, kaynak verimli ve çevre dostu bir üretim modeli ortaya çıkacaktır.

KAYNAKÇA

- Ahmetović, E., Kravanja, Z., Ibrić, N., Grossmann, I. E., & Savulescu, L. E. (2021). State of the art methods for combined water and energy systems optimisation in Kraft pulp mills. *Optimization and Engineering*, 22, 1831–1852. <https://doi.org/10.1007/s11081-021-09612-4>
- Bajpai, P. (2018). *Pulp and paper industry: Chemicals*. Elsevier.
- Bayraktar, E. D., & Ayyıldız, H. (2021). İnovasyon stratejilerinin kurumsal sürdürülebilirlik performansına etkisi: Mobilya firmaları üzerinde bir uygulama. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 60, 189–214.
- Bergquist, A. K., & Söderholm, K. (2018). The greening of the pulp and paper industry: Sweden in comparative perspective. In T. Särkkä, M. Gutiérrez-Poch, & M. Kuhlberg (Eds.), *Technological transformation in the global pulp and paper industry 1800–2018 (World Forests, Vol. 23)*. Springer.
- Bernard, J. T., Hussain, J., & Sinha, M. M. (2020). Survival of the cleanest? Evidence from a plant-level analysis of pollutant emissions in Canadian pulp and paper industry, 2005–2013. *Environmental Economics and Policy Studies*, 22, 109–126.
- Biermann, C. J. (2023). *Handbook of pulping and papermaking (4th ed.)*. Academic Press.
- Campano, C., Miranda, R., Merayo, N., Negro, C., & Blanco, A. (2017). Direct production of cellulose nanocrystals from old newspapers and recycled newsprint. *Carbohydrate Polymers*, 173, 489–496. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.073>
- Confederation of European Paper Industries (CEPI). (2020). *Key statistics 2020*. <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2021/07/Key-Stats-2020-FINAL.pdf>
- Daya, B., & Nourelfath, M. (2019). Sustainability assessment of integrated forest biorefinery implemented in Canadian pulp and paper mills. *International Journal of Production Economics*, 214, 248–265. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.06.014>
- Del Rio, D. D. F., Sovacool, B. K., Griffiths, S., Bazilian, M., Kim, J., Foley, A. M., & Rooney, D. (2022). Decarbonizing the pulp and paper industry:

- A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112706>
- Dufresne, A. (2017). Nanocellulose: From nature to high performance tailored materials. De Gruyter.
- Erkko, S., & Niemelä, T. (2021). Business model innovations in the forest-based sector: Drivers, barriers, and managerial implications. *Forest Policy and Economics*, 129, 102–112.
- Ervasti, I., Miranda, R., & Kauranen, I. (2016). Paper recycling framework, the “wheel of fiber”. *Journal of Environmental Management*, 174, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.004>
- Fernandes, M. M., & Costa, R. (2020). Sustainable strategies in the pulp and paper industry: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120243>
- Gerdin, C., Lingqvist, O., Luse, A., Mori, L., Singh, K., & Vainberg, G. (2021). Tapping digital’s full potential in pulp and paper process optimization. Stockholm.
- International Energy Agency (IEA). (2023). Pulp & paper. <https://www.iea.org/energy-system/industry/paper>
- Jallouli, S., Wali, A., Buonerba, A., Zarra, T., Belgiorno, V., Naddeo, V., & Ksibi, M. (2020). Efficient and sustainable treatment of tannery wastewater by a sequential electrocoagulation–UV photolytic process. arXiv preprint.
- Jiang, S., Li, B., & Shen, Y. (2021). The influence of pulp and paper industry on environment. *E3S Web of Conferences*, 308, 02007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130802007>
- Johansson, M. T., Broberg, S., & Ottosson, M. (2021). Energy strategies in the pulp and paper industry in Sweden: Interactions between efficient resource utilisation and increased product diversification. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127681. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127681>
- Kırklıkçı, A. B. (2024). Examination of Industry 4.0 awareness, perceptions, and actions of employees in furniture and board businesses. *Forest Products Journal*, 74(1), 1–9.

- Li, Y., & Ren, S. (2022). Circular bioeconomy pathways in the paper industry: Innovations in recycling and biomaterial development. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 106479. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106479>
- Mandeep Gupta, G. K., Liu, H., & Shukla, P. (2019). Pulp and paper industry–based pollutants, their health hazards and environmental risks. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 12, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.010>
- Nielsen. (2015). The sustainability imperative: New insights on consumer expectations. <https://www.nielsen.com/content/dam/niensglobal/dk/docs/global-sustainability-report-oct-2015.pdf>
- Pätäri, S., Kyläheiko, K., & Sandström, J. (2011). Opening up new strategic options in the pulp and paper industry: Case biorefineries. *Forest Policy and Economics*, 13(6), 456–464.
- Perera, P., & Vlosky, R. P. (2006). A history of forest certification. Louisiana Forest Products Development Center, LSU AgCenter.
- Pio, D. T., Tarelho, L. A. C., & Pinto, P. C. R. (2020). Gasification-based biorefinery integration in the pulp and paper industry: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110210>
- Rafione, T., Marinova, M., Beta, B., Montastruc, L., & Paris, J. (2014). The green integrated forest biorefinery: An innovative concept for pulp and paper mills. *Applied Thermal Engineering*, 73, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.039>
- Sonsale, A. N., Yashpal, P., Purohit, J. K., & Pohekar, S. D. (2021). Renewable and alternative energy sources for strategic energy management in recycled paper and pulp industry. *Bioresource Technology Reports*, 16, 100857. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100857>
- Sun, M., Wang, Y., Shi, L., & Klemeš, J. J. (2018). Uncovering energy use, carbon emissions and environmental burdens of pulp and paper industry: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 823–833.

- Toppinen, A., Pätäri, S., Tuppuru, A., & Jantunen, A. (2017). The European pulp and paper industry in transition to a bio-economy: A Delphi study. *Futures*, 88, 1–14.
- Van Ewijk, S., Stegemann, J. A., & Ekins, P. (2017). Global life cycle paper flows, recycling metrics, and material efficiency. *Journal of Industrial Ecology*, 22, 683–693. <https://doi.org/10.1111/jiec.12613>
- World Economic Forum. (2023). The future of sustainable materials: Industrial transformation pathways. WEF.

CHAPTER 3

EFFECTS OF MAGNETO-PRIMING APPLICATIONS ON DIFFERENT LEGUME SPECIES AND GROWING CONDITIONS

Prof. Dr. Hatice KANBUR ÇAVUŞ¹
Assoc. Prof. Dr. Medine ÇOPUR DOĞRUSÖZ²
<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17913893>

¹ Yozgat Bozok University, Institute of Hemp Research, Department of Material and Energy, Yozgat, Türkiye. Orcid No: 0000-0001-8525-0313 E-Mail: hatice.kanbur@bozok.edu.tr

² Yozgat Bozok University, Faculty of Agriculture, Department of Field Crops, Yozgat, Türkiye. Orcid No: 0000-0002-9159-1699 E-Mail: medine.copur@bozok.edu.tr

*Corresponding author: hatice.kanbur@bozok.edu.tr

Introduction

Leguminous forage crops are of great importance in agricultural systems due to their high protein content, biological nitrogen fixation capacity that enriches the soil, and their role as a major feed source in animal production (Gökkuş, 2024; Lithourgidis et al., 2006). Species such as forage pea, Hungarian vetch, and grass pea stand out for their ability to adapt to diverse ecological conditions and their contribution to meeting the demand for roughage. Increasing yield and quality parameters in these crops has become an important focus of research through biotechnological and ecophysiological approaches.

Seed priming is a pre-sowing treatment in which seeds are exposed to controlled moisture conditions to stimulate metabolic activity and enhance germination performance (Ashraf & Foolad, 2005). Magnetopriming, a specific priming technique, involves exposing seeds to magnetic fields for a defined period, resulting in improvements in germination rate, seedling vigor, root and shoot growth, and other physiological parameters (Hussain et al., 2020). Its eco-friendly nature and the fact that it does not require chemical inputs make it an attractive approach for sustainable agriculture.

A magnetic field is a physical force generated by moving electric charges (Kanbur Çavuş et al., 2023; Güler et al., 2024; Büyükkakkaş et al., 2025) and can exert biological effects on living organisms. In plants, magnetic field applications have been shown to alter cell membrane permeability, regulate ion uptake, and enhance enzyme activities, thereby stimulating metabolism (Aladjajjiyan, 2010; Kanbur Çavuş et al., 2023; Shine et al., 2011). The biological efficacy of magnetic fields is thought to originate from their influence on fundamental cellular processes, primarily through interactions with free radicals and paramagnetic molecules, such as oxygen and transition metals. The Magnetic Field Effect (MFE) hypothesis suggests that magnetic fields can influence the recombination rates of radical pairs, thereby altering the activity of key enzymes dependent on these radicals. Studies have revealed that magnetic field treatments can lead to an increase in photosynthetic pigments, higher root and shoot biomass, and improved protein content (Florez et al., 2007; Yakupoğlu, 2023). Furthermore, the induced magnetohydrodynamic forces can affect the movement of ions (like K^+ and Ca^{2+}) across cell membranes, contributing to the observed changes in

membrane permeability and signal transduction pathways. For instance, Shine et al. (2011) reported that magnetic field application enhanced photosynthesis and biomass accumulation in soybean. The mechanism of action is also closely linked to the surrounding environment, as studies show that the presence of soil chemicals and trace elements, including Rare Earth Elements (REEs), can modulate electromagnetic interactions and influence the physiological response of plants, particularly those under natural geochemical stress (Pehlivanli et al., 2012; Yavuz Pehlivanlı, 2023; Yavuz Pehlivanlı & Kanbur Çavuş, 2025). This highlights the importance of considering environmental factors when assessing magnetopriming efficacy (Fig.1).

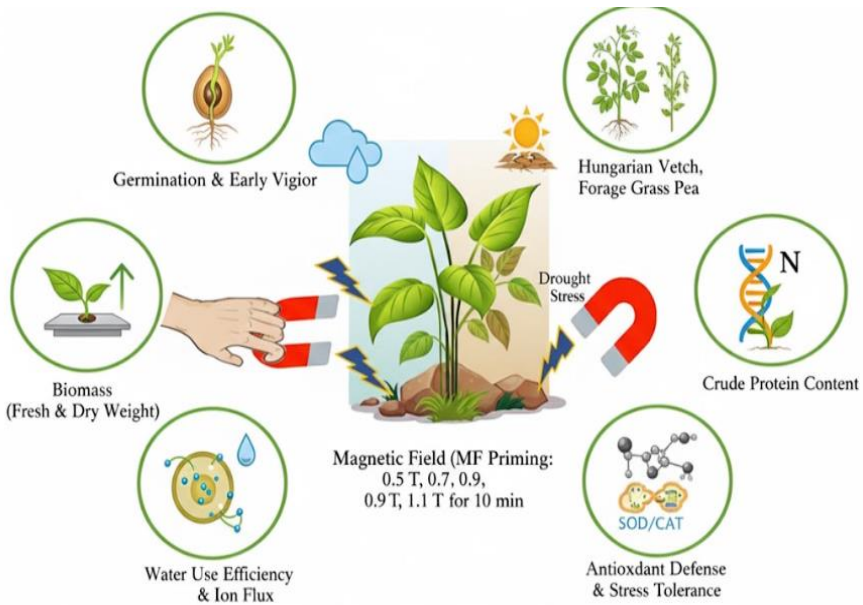


Figure 1. Illustration of the Physiological Effects of Magnetic Field Priming Under Normal and Drought Conditions

One of the most critical impacts of climate change is drought, which adversely affects biomass production, photosynthesis, and nutrient content in forage crops (Farooq et al., 2009; Masson-Delmotte et al., 2021). Under drought stress, protein metabolism is also inhibited, leading to a decline in forage quality. The mitigation capacity of magnetopriming against abiotic stress is often linked to the rapid activation of cellular defense systems.

Magnetic field treatments have been reported to mitigate the effects of water stress by regulating osmotic balance, enhancing water use efficiency, and strengthening the antioxidant defense system (including increased activity of enzymes like Superoxide Dismutase (SOD) and Catalase (CAT)) (Cakmak et al., 2010; Vashisth & Nagarajan, 2010). In species such as wheat, maize, and lentil, magnetic field applications have been shown to alleviate the negative effects of drought by improving germination, biomass, and protein content (Aladjadjiyan, 2010).

In this study, seeds of three important legume species-Hungarian vetch, forage pea, and grass pea-which represent differing growth habits and regional agricultural importance, were subjected to magnetopriming under different magnetic field intensities and subsequently grown under both normal and drought conditions. Growth performance (fresh and dry weight) and crude protein content were evaluated. The aim of this research was to determine the effects of magnetic field applications on the growth and quality traits of legumes under normal and stress conditions, thereby assessing the potential use of magnetopriming as a biostimulant against drought stress.

Materials and Methods

Materials

This research was conducted in 2024 in the climate chamber of the Department of Field Crops, Yozgat Bozok University. Three different legume species were used as experimental material: Hungarian vetch (*Vicia pannonica* Crantz.), forage pea (*Pisum sativum* spp. *arvense* L.), and grass pea (*Lathyrus sativus* L.).

Magnetic Field Application (Priming Treatment)

Prior to sowing, seeds were subjected to magneto-priming, a biophysical seed priming method utilized to enhance seed physiological activity and improve stress tolerance (Harb et al., 2021; Shine et al., 2011). The seeds were exposed to a static magnetic field generated using the Hall Effect Measurement System (HEMS) located at the Yozgat Bozok University Science and Technology Application and Research Center (YOBÜ-BİLTEM) laboratories. The HEMS, designed for advanced electronic transport measurements,

provides a highly controlled environment. Five different magnetic field intensities were applied: 0 (control), 0.5, 0.7, 0.9, and 1.1 Tesla (T). Each treatment lasted for 10 minutes. The seeds for each treatment were placed inside a small, non-magnetic container and positioned precisely at the center of the HEMS magnet bore. This placement ensured that the seeds were exposed to a highly uniform and stable static magnetic field perpendicular to the plane of the seed container. Crucially, the temperature inside the HEMS chamber during the 10-minute application was maintained at 25 °C to isolate the magnetic field effect from thermal variations.

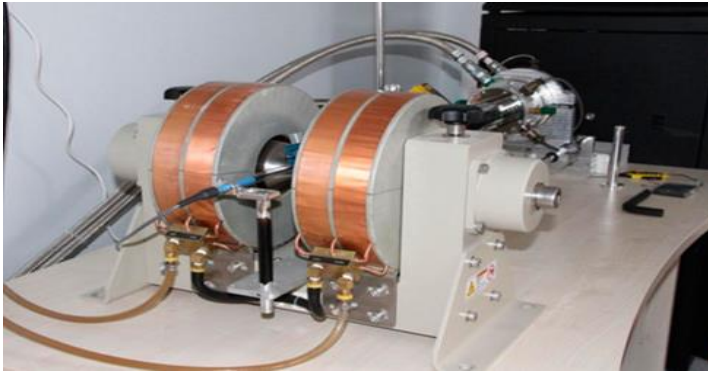


Figure 2. Hall Effect Measurement System (HEMS) capable of reaching a magnetic field intensity of 1.4 Tesla (T)

Experimental Design and Growth Conditions

Seeds subjected to magnetic field treatments were grown under two different irrigation regimes (normal irrigation and drought stress), and each regime was set up as a separate experiment. The experiments were arranged in a factorial design based on a randomized complete block design with three replications. Fifteen seeds were sown in each pot (15 × 22 × 62 cm), and after emergence, seedlings were thinned to ensure equal plant density with 10 plants per pot. Each pot was considered as one replication.

- **Normal irrigation conditions:** Pots were maintained at approximately 80% of field capacity.
- **Drought conditions:** After emergence, pots were maintained at approximately 40% of field capacity.

Field capacity was determined through preliminary trials (Richards, 1954). Plants were grown for 28 days in the climate chamber under controlled conditions of 25 ± 2 °C temperature, $60 \pm 5\%$ relative humidity, and a photoperiod of 16 hours light / 8 hours dark.

At harvest (day 28), plants in each pot were cut at the soil surface, and fresh biomass weight was determined (g) from 10 plants. The harvested samples were then oven-dried at 65 °C until constant weight, after which dry weights of 10 plants were recorded using a precision balance (g) (Helrich, 1990). The dried samples were ground into powder using a forage mill. Crude protein content was determined as a percentage using a FOSS NIRS device with the IC-0904-FE calibration program.

Statistical Analysis

The data obtained were subjected to analysis of variance (ANOVA). Statistical evaluations were performed using the SPSS 20.0 software package. Differences among treatments were tested using Duncan’s multiple range test at the 5% significance level (Steel & Torrie, 1980; Steel & Torrie, 1981).

Results and Discussion

Normal Growing Conditions

When the results obtained under normal growing conditions were examined, it was observed that different magnetic field intensities had significant effects on growth parameters (fresh and dry weight) and crude protein content in legume species (Table 1).

Table 1. Effects of different magnetic field intensities on fresh weight, dry weight, and crude protein content of legume species under normal irrigation conditions

Treatments	Species	0 T	0.5 T	0.7 T	0.9 T	1.1 T	Mean
Fresh weight (g)	Grass pea**	16.42 c	14.35d	20.94 a	20.24 a	19.51 bb	18.29
	H. vetch**	22.99 c	19.21 d	28.11 b	29.77 a	10.45 e	22.11
	Forage pea**	20.06 d	25.16 c	25.73 c	29.26 b	32.90 a	26.62
Dry weight (g)	Grass pea	3.64	2.70	3.32	3.28	3.16	3.22
	H. vetch**	3.58 b	4.46 ab	4.63 ab	5.57 a	2.69 c	4.19
	Forage pea**	2.24 c	3.28 b	3.29 b	4.12 ab	4.60 a	3.50
CP (%)	Grass pea**	30.98 d	33.65 b	33.05 b	34.43 a	31.07 c	32.64
	H.vetch**	30.94 c	31.48 bc	32.03 b	33.58 a	32.66 ab	32.14
	Forage pea**	29.81 b	29.84 b	29.62 b	30.15 ab	30.93 a	30.07

Expressions denoted by the same letter indicate no significant difference. **: $p < 0.01$.

In grass pea, fresh weight values ranged from 14.35 g (0.5 T) to 20.94 g (0.7 T), with the highest values observed under 0.7 T (20.94 g) and 0.9 T (20.24 g) treatments (Table 1). The control group showed a lower fresh weight of 16.42 g, while the 1.1 T treatment resulted in 19.51 g, indicating a high value but not at the optimum level. No statistically significant differences were found in dry weight among grass pea treatments, with values ranging from 2.70 g (0.5 T) to 3.64 g (control). Crude protein content varied between 30.98% (control) and 34.43% (0.9 T), with the highest value obtained at 0.9 T. In contrast, the 1.1 T treatment reduced protein content to 31.07%. In Hungarian vetch, fresh weight ranged from 10.45 g (1.1 T) to 29.77 g (0.9 T). The control group had 22.99 g, while 0.7 T (28.11 g) and 0.9 T (29.77 g) treatments significantly increased fresh weight. Conversely, fresh weight markedly decreased under 1.1 T. The highest dry weight was observed at 0.9 T (5.57 g), and the lowest at 1.1 T (2.69 g). Crude protein content increased from 30.94% in the control group to 33.58% at 0.9 T, but decreased to 32.66% at 1.1 T. In forage pea, fresh weight values ranged from 20.06 g (control) to 32.90 g (1.1 T), showing a consistent increase with rising magnetic field intensity. Dry weight also increased from 2.24 g (control) to 4.60 g (1.1 T). Crude protein content was highest at 1.1 T (30.93%) compared to the control (29.81%).

Overall, under normal conditions, magnetic field applications of 0.7–0.9 T in grass pea and Hungarian vetch enhanced fresh and dry weight as well as crude protein content, whereas 1.1 T negatively affected some parameters. In forage pea, both biomass and protein content consistently increased with higher magnetic field intensity. Forage pea outperformed the other species in terms of fresh and dry weight, likely due to its rapid growth potential and high biomass production capacity. Literature reports indicate that forage pea can achieve high biomass yields under suitable conditions (Strydhorst et al., 2008). In Hungarian vetch, especially 0.7 T and 0.9 T treatments increased both fresh and dry weight, suggesting that moderate magnetic field intensities may stimulate metabolic activity and support plant growth. Similarly, Harb et al. (2021) reported increased biomass in lentil, and Shine et al. (2011) observed similar effects in soybean following magnetic field treatments. The increases are thought to result from accelerated water uptake, enhanced enzyme activities, and stimulation of photosynthetic pigment synthesis (Belyavskaya, 2004). Grass pea exhibited lower fresh and dry weight values but showed partial

increases at moderate magnetic field intensities, which may relate to its genetic characteristics and growth rate. Although drought-tolerant, grass pea has a more limited potential for rapid biomass accumulation compared to vetch and pea (Hanbury et al., 2000). For crude protein content, forage pea showed higher values than the other species. Differences in nitrogen fixation capacity among legume species may directly affect protein content (Jensen et al., 2010).

Magnetic field treatments, particularly moderate intensities (0.7 T and 0.9 T), increased crude protein content in Hungarian vetch. This may be attributed to enhanced activity of enzymes involved in nitrogen metabolism, such as nitrate reductase and glutamine synthetase, under magnetic field influence (Shine et al., 2011; Pietruszewski & Martínez, 2015). In grass pea, crude protein content remained relatively low, and high-intensity treatment (1.1 T) caused a decreasing trend in protein content across all three species. This suggests that high magnetic field intensity may induce cellular stress. Indeed, Shine and Guruprasad (2012) reported that strong magnetic fields can disrupt membrane permeability, increase oxidative stress, and slow protein synthesis. Findings under normal irrigation conditions indicate that the responses of legume species to magnetic field treatments are species- and dose - dependent. Moderate intensities (0.7–0.9 T) positively affected biomass and protein content, while high intensity (1.1 T) had adverse effects on certain parameters. Therefore, determining the optimal dose is critical for enhancing plant growth and quality traits.

Drought Growing Conditions

As shown in Table 2, under induced drought conditions, changes in fresh weight and crude protein content across the three species were statistically significant, whereas differences in dry weight means were not significant.

Table 2. Effects of different magnetic field intensities on fresh weight, dry weight, and crude protein content of legume species under drought conditions

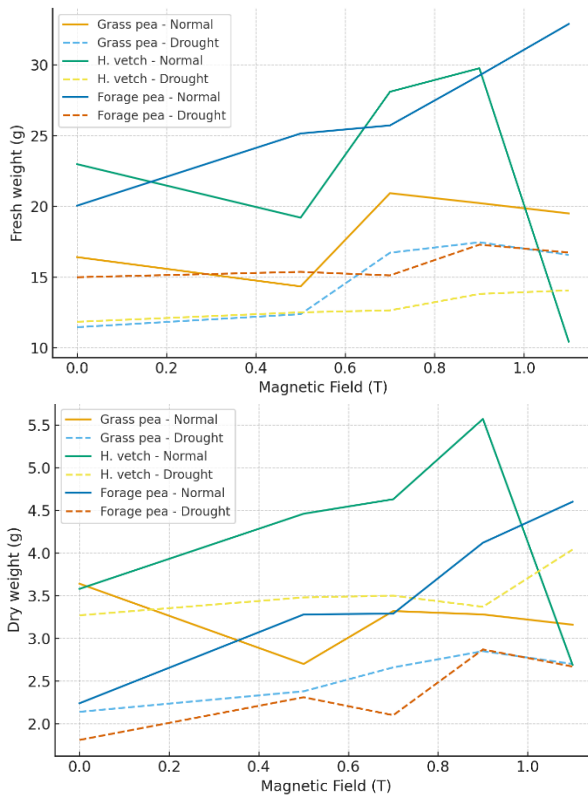
Treatments	Species	0 T	0.5 T	0.7 T	0.9 T	1.1 T	Mean
Fresh weight (g)	Grass pea**	11.47 d	12.39 c	16.73 ab	17.47 a	16.58 ab	14.93
	H. vetch**	11.85 d	12.52 c	12.66 c	13.82 b	14.07 a	12.98
	Forage pea**	15.00 c	15.38 c	15.13 c	17.30 a	16.75 b	15.91
Dry weight (g)	Grass pea	2.14	2.38	2.66	2.85	2.70	2.55
	H. vetch	3.27	3.48	3.50	3.37	4.04	3.53
	Forage pea	1.81	2.31	2.10	2.87	2.67	2.35
CP (%)	Grass pea**	33.82 c	34.15 b	34.70 ab	35.27 a	33.89 c	34.37
	H. vetch**	32.00 bc	32.53 b	32.88 b	34.24 a	31.67 c	32.66
	Forage pea**	31.01 d	29.97d	31.35 c	32.57 b	33.12 a	31.60

Expressions denoted by the same letter indicate no significant difference. **: $p < 0.01$.

In grass pea, fresh weight values ranged from 11.47 g (control) to 17.47 g (0.9 T). All magnetic field treatments increased fresh weight compared to the control, with the highest value observed at 0.9 T (17.47 g). Dry weight ranged from 2.14 g (control) to 2.85 g (0.9 T), showing partial increases under magnetic field treatments. Crude protein content varied between 33.82% (control) and 35.27% (0.9 T), with the highest value again recorded at 0.9 T. In Hungarian vetch, fresh weight ranged from 11.85 g (control) to 14.07 g (1.1 T). All magnetic field treatments increased fresh weight compared to the control, with the maximum value recorded at 1.1 T (14.07 g). Dry weight varied between 3.27 g (control) and 4.04 g (1.1 T), with the highest value also at 1.1 T. Crude protein content ranged from 32.00% (control) to 34.24% (0.9 T), with the peak at 0.9 T; however, 1.1 T resulted in a decrease to 31.67%, below the control.

In forage pea, fresh weight ranged from 15.00 g (control) to 17.30 g (0.9 T), with 0.9 T (17.30 g) and 1.1 T (16.75 g) showing significant increases compared to the control. Dry weight ranged from 1.81 g (control) to 2.87 g (0.9 T), with the highest value at 0.9 T. Crude protein content varied between 29.97% (0.5 T) and 33.12% (1.1 T), reaching the highest value at 1.1 T. Overall, under drought conditions, the 0.9 T magnetic field treatment in grass pea enhanced fresh weight, dry weight, and crude protein content; in Hungarian vetch, fresh and dry weight were highest at 1.1 T, while protein content peaked at 0.9 T. In forage pea, both biomass and protein content increased notably, with 0.9–1.1 T treatments yielding the highest values (Table 2).

Magnetic field treatments were found to exert distinct effects on the yield and quality parameters of legume species under both irrigation conditions. Fresh weight values were strongly influenced by drought stress, while the magnetic field-particularly at 0.7-0.9 T-tended to enhance fresh biomass across all species. In terms of dry weight, the effect of the magnetic field was more consistent, with noticeable increases observed in the 0.9-1.1 T range under both normal and drought conditions. Examination of crude protein content revealed that CP values were generally higher under drought stress, and magnetic field exposure induced steady increases-especially at 0.9-1.1 T-under both irrigation regimes. These findings indicate that magnetic field application has the potential to improve biomass production and quality traits of legume species under both optimal water supply and water-limited conditions Fig. 3).



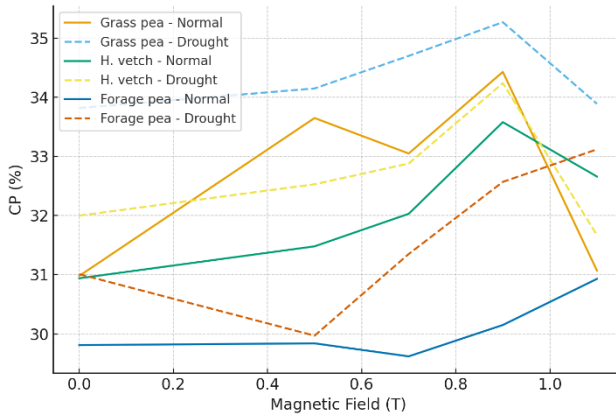


Figure 3. The variation in legumes under drought and normal conditions in response to magnetic field treatments

These findings indicate that different magnetic field (MF) intensities significantly affect biomass production and crude protein content in legume species under drought conditions. In particular, the 0.9 T treatment in grass pea increased fresh weight (17.47 g), dry weight (2.85 g), and crude protein content (35.27%) compared to the control, suggesting that moderate magnetic field intensities can positively influence plant metabolism. Magnetic field treatments have been previously reported to enhance photosynthetic activity, thereby supporting biomass accumulation (Florez et al., 2007; Shine et al., 2011). In these studies, magnetic fields under water stress conditions were found to regulate ion uptake, maintain osmotic balance, and improve growth parameters. In Hungarian vetch, although fresh and dry weight peaked at 1.1 T, crude protein content was highest at 0.9 T (34.24%), suggesting that high-intensity magnetic fields may affect protein metabolism through a different mechanism. Literature reports that strong magnetic fields may stimulate certain metabolic processes but do not always linearly enhance protein biosynthesis (Atak et al., 2007; Yakupoğlu, 2023). This is consistent with the observed decrease in protein content at 1.1 T, likely indicating that excessive magnetic stimulation can disrupt metabolic balance. In forage pea, 0.9–1.1 T treatments increased fresh weight (17.30–16.75 g), dry weight (2.87–2.67 g), and crude protein content (32.57–33.12%), demonstrating a stronger response to magnetic field stimulation. Similarly, previous studies have reported positive biomass responses in forage pea under smoke solution and other biostimulant treatments

(Başaran et al., 2019), reflecting the species' physiological flexibility and high responsiveness to stimulants under stress conditions. Regarding crude protein, magnetic field applications generally increased protein content across all three species, likely due to regulatory effects of MF on nitrogen metabolism. Studies indicate that magnetic fields enhance nitrate reductase activity, accelerating nitrogen assimilation and promoting protein synthesis (Aladjadjiyan, 2010; Cakmak et al., 2010). Notably, the pronounced protein increase under drought suggests that magnetic field treatments can partially mitigate water stress-induced limitations on protein metabolism. In summary, under drought conditions, moderate and high-intensity magnetic fields (0.9–1.1 T) increased biomass and protein content, supporting legume adaptation to stress. However, species responses varied: grass pea responded best at 0.9 T, Hungarian vetch showed highest fresh and dry weight at 1.1 T and peak protein at 0.9 T, while forage pea responded positively to 0.9–1.1 T for both parameters. These differences likely reflect species-specific genetic traits, physiological responses to water stress, and the way magnetic fields influence biochemical processes.

Conclusion and Recommendations

In this study, seeds of three legume species (grass pea, Hungarian vetch, and forage pea) were primed with different magnetic field intensities (0, 0.5, 0.7, 0.9, and 1.1 T) and grown under normal and drought conditions to evaluate biomass production and crude protein content. Under normal conditions, 0.7–0.9 T increased fresh weight, dry weight, and protein in grass pea and Hungarian vetch, while 1.1 T caused reductions in some parameters. In forage pea, biomass and protein increased steadily with rising magnetic field intensity. Under drought, 0.9 T was optimal for grass pea, 0.9–1.1 T for Hungarian vetch, and 0.9–1.1 T for forage pea, indicating that moderate and high-intensity magnetic fields support growth and protein metabolism under water stress. Species exhibited different sensitivities, with forage pea responding more strongly under both normal and drought conditions.

Overall, magnetic field treatments represent an environmentally friendly approach to enhancing growth and protein content in legumes under both normal and stress conditions. Given species-specific responses, future studies should optimize species-specific magnetic field doses. This study focused on early plant development (28 days); further research should investigate effects

on yield, seed production, and nutritional quality. Advanced biochemical and molecular analyses of photosynthesis, antioxidant enzyme activities, and nitrogen metabolism are recommended to better understand the mechanisms of magnetic field effects.

Declaration of Author Contributions

The authors declare that they have contributed equally to the article. All authors declare that they have seen/read and approved the final version of the article ready for publication.

Declaration of Conflicts of Interest

All authors declare that there is no conflict of interest related to this article.

References

- Aladjadjiyan, A., 2010. Influence of stationary magnetic field on lentil seeds. *International Agrophysics*, 24(3): 321–324.
- Ashraf, M., & Foolad, M. R., 2005. Pre-sowing seed treatment-A shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. *Advances in Agronomy*, 88:223–271.
- Atak, Ç., Çelik, Ö., Olgun, A., Alikamanoglu, S., & Rzakoulieva, A., 2007. Effect of magnetic field on peroxidase activities of soybean tissue culture. *Biologia Plantarum*, 47(3): 437–440.
- Başaran, U., Doğrusöz, M. Ç., Gülümser, E., & Mut, H., 2019. Using smoke solutions in grass pea (*Lathyrus sativus* L.) to improve germination and seedling growth and reduce toxic compound ODAP. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 43(6): 518-526.
- Belyavskaya, N., 2004. Biological effects due to weak magnetic fields on plants. *Advances in space Research*, 34(7): 1566-1574.
- Büyükakkaş, S., and Ünlüer Ş., 2025. Effects on structural properties of doping zinc into $\text{Sn}_2\text{Ba}(\text{Cu}_{22}\text{xZn}_\text{x})_2\text{O}_\text{y}$ ceramics. *Indian J Phys*, 99(9):3275–3287.
- Cakmak, T., Dumlupinar, R., & Erdal, S., 2010. Acceleration of germination and early growth of wheat and bean seedlings grown under various magnetic field and osmotic conditions. *Bioelectromagnetics*, 33(1): 49–55.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1): 185-212.
- Florez, M., Carbonell, M. V., & Martinez, E., 2007. Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: Effects on germination and early growth. *Environmental and Experimental Botany*, 59(1): 68–75.
- Gökkuş, A., 2024. Tarım Kaynaklı Sorunlar ve Sürdürülebilir Bir Tarım İçin Çok Yıllık Yem Bitkilerinin Önemi: II. Yem Bitkilerinin Önemi. *Bilim-Teknoloji-Yenilik Ekosistemi Dergisi*, 5(2):67-80.
- Güler, M. T., Büyükakkaş, S., 2024. Effects of the nano boron doping and permanent magnet on the magnetic levitation and stiffness performance

- of $\text{Sm}_{1.75}\text{Ca}_{(2.20-x)}\text{BxCu}_{3.4}\text{O}_y$ superconducting ceramics. *Applied Physics A*, 130 (695): 1-12.
- Hanbury, C.D., White, C.L., Mullan, B.P., Siddique, K.H.M., 2000. A review of the potential of *Lathyrus sativus* L. and *L. cicera* L. grain for use as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 87: 1–27.
- Harb, A. M., Alnawateer, B. A. M., & Abu-Aljarayesh, I., 2021. Influence of Static Magnetic Field Seed Treatments on the Morphological and the Biochemical Changes in Lentil Seedlings (*Lens Culinaris Medik*). *Jordan Journal of Biological Sciences*, 14(1):179-186.
- Helrich K., 1990. *Official Methods Of Analysis*. Association Of Official Analytical Chemists, USA.
- Hussain, M. S., Dastgeer, G., Afzal, A. M., Hussain, S., & Kanwar, R. R., 2020. Eco-friendly magnetic field treatment to enhance wheat yield and seed germination growth. *Environmental nanotechnology, monitoring & management*, 14: 100299.
- Jensen, E.S., Peoples, M.B., Hauggaard-Nielsen, H., 2010. Faba bean in cropping systems. *Field Crops Research*, 115: 203-216.
- Kanbur Çavuş H., İldeş C., Şahingöz R., 2023. Medicinal And Economic Importance Of Plants (Ed: H. Baş, H. Doğan) Effect Of Magnetic Field On Plant Development Medicinal And Economic Importance Of Plants, Iksad Publishing House, Ankara, s.309-323.
- Lithourgidis, A. S., Vasilakoglou, I. B., Dhima, K. V., Dordas, C. A., & Yiakoulaki, M. D., 2006. Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Research*, 99(2-3): 106-113.
- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. et al., 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, USA.
- Pehlivanli, B., Koç, Ş., Ergin, E., Sarı, A., Acik, L., Vural, M., 2012. Biogeochemical interrelations between the Cayirhan oil shales and some plants growing on them (Turkey). *Turkish Journal Of Botany*, 36(5):503-518.
- Pietruszewski, S., Martínez, E., 2015. Magnetic field as a method of improving the quality of sowing material: A review. *International Agrophysics*, 29(3): 377–389.

- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Handbook, Washington DC.
- Sharafi, S., Gholami, A., & Abbasdokht, H., 2010. Effect of magnetic field on seed germination of two wheat cultivars. World Academy of Science, Engineering and Technology, 62: 279–282.
- Shine, M. B., & Guruprasad, K. N., 2012. Impact of pre-sowing magnetic field exposure of seeds to stationary magnetic field on growth, reactive oxygen species and photosynthesis of maize under field conditions. Acta Physiologiae Plantarum, 34(1): 255-265.
- Shine, M. B., Guruprasad, K. N., & Anand, A., 2011. Enhancement of germination, growth, and photosynthesis in soybean by pre-treatment of seeds with magnetic field. Bioelectromagnetics, 32(6): 474–484.
- Steel, R.G.D. and Torrie, J.H., 1980 Principles and procedures of statistics. A biometrical approach, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Steel, R.G.D., Torrie, J.H., 1981. Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach. McGraw-Hill, New York.
- Strydhorst, S.M., King, J.R., Lopetinsky, K.J., Harker, K.N., 2008. Forage potential of intercropping barley with faba bean, lupin, or field pea. Agronomy Journal, 100: 182-190.
- Vashisth, A., & Nagarajan, S., 2010. Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. *Journal of Plant Physiology*, 167(2): 149-156.
- Yakupoğlu, G., 2023. Effects of magnetic field and ultrasound applications on endogenous melatonin content and drought stress tolerance of pepper seedlings. Horticulture, 9(6): 704.
- Yavuz Pehlivanlı, B., 2023. Tarım Bilimleri Alanında Multidisipliner Güncel Çalışmalar III (Ed. K. YAZICI, H. DOĞAN), Doğal Jeokimyasal Stres Altındaki Bitki Türlerinin İz Element Ve Nadir Toprak Elementlerin (Nte) Birikimi, İksad Yayınevi, Ankara, s. 113-143.
- Yavuz Pehlivanlı, B., Kanbur Çavuş, H., 2025. Ziraat, Orman Ve Su Ürünleri Alanında Akademik Çalışmalar XII (Ed. V. BEYYAVAŞ) Bitkilerle Elementlerin Buluşması: Nadir Toprak Elementler-Elektromanyetik Etkileşimler Ve Yeni Fitoelektrokimyasal Yaklaşımlar İksad Yayınevi, Ankara, s. 169-188.

BÖLÜM 4

DAVRANIŞ MANİPÜLASYONUNA DAYALI ZARARLI KONTROLÜ: SEMİOKİMYASAL ARAÇLAR VE UYGULAMA TEKNİKLERİ

Doç. Dr. Gamze PEKBEY¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17914231>

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Yozgat, Türkiye.
gamze.pekbey@yobu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-0314-0071

1. GİRİŞ

Bitkiler, böcekler ve diğer organizmalar arasındaki kimyasal iletişim, ekosistem fonksiyonlarının temel unsurlarından birini oluşturur. Semiokimyasallar, organizmalar arasında davranışları yönlendiren kimyasal sinyallerdir ve günümüzde zararlı yönetiminde giderek artan bir öneme sahiptir (Witzgall et al., 2010).

Davranış manipülasyonuna dayalı zararlı kontrolü, modern entegre zararlı yönetimi (IPM) yaklaşımlarının en yenilikçi ve çevre dostu alanlarından birini temsil eder. Bu yöntemin temelinde, canlılar arasında bilgi ileten ve davranışları yönlendiren kimyasal sinyaller olan **semiokimyasallar** yer alır. Semiokimyasallar, doğada bitkiler, böcekler ve diğer organizmalar tarafından üretilen ve türler arası ya da tür içi iletişimi sağlayan moleküllerdir. Zararlıların davranışlarını manipüle ederek popülasyonlarını baskılamak, geleneksel kimyasal pestisitlerin yol açtığı çevresel ve sağlık risklerini azaltmak için sürdürülebilir bir çözüm sunar (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023; S, 2019).

Semiokimyasal temelli kontrol teknikleri, zararlıların çiftleşme, beslenme, konak seçimi ve yumurtlama gibi temel davranışlarını hedef alır. Bu teknikler arasında **feromonlar** (aynı tür bireyler arası iletişim sağlayan kimyasallar) ve **allelokimyasallar** (farklı türler arası iletişim sağlayan kimyasallar) öne çıkar. Feromonlar, özellikle zararlı böceklerin izlenmesi, kitle yakalama, çiftleşme bozma ve çekici-öldürücü uygulamalarında yaygın olarak kullanılırken; allelokimyasallar, zararlıları üründen uzaklaştırmak veya doğal düşmanlarını çekmek amacıyla kullanılabilir (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023; El-Shafie & Faleiro, 2017; Soroker et al., 2015).

Uygulamada, semiokimyasal araçlar çeşitli stratejilerle entegre edilir: Zararlı popülasyonlarının izlenmesi için tuzaklarda kullanılır, kitle yakalama ile zararlı yoğunluğu azaltılır, çekici-öldürücü sistemlerle zararlılar hedeflenir, çiftleşme bozma ile popülasyon artışı engellenir ve push-pull (itme-çekme) stratejileriyle zararlılar üründen uzaklaştırılır (El-Ghany, 2019; U. et al., 2024; El-Ghany, 2023; S, 2019). Son yıllarda, semiokimyasal maddelerin kontrollü salımını sağlayan yeni formülasyonlar, nano/mikroemülsiyonlar ve otomatik dağıtıcılar gibi teknolojik gelişmeler, bu yöntemlerin etkinliğini ve uygulama alanını genişletmiştir (U. et al., 2024; Lucia & Guzmán, 2020).

Semiokimyasal temelli zararlı kontrolü, çevreye duyarlı, seçici ve direnç gelişimini yavaşlatıcı özellikleriyle öne çıkarken; uygulamada karşılaşılan

başlıca zorluklar arasında doğal ortamda diğer kokularla rekabet, hedef dışı etkiler ve maliyet-etkin yaygın uygulama gereksinimi yer alır (Morrison et al., 2021; El-Ghany, 2019; Lucia & Guzmán, 2020). Yine de, bu teknikler, tarımsal üretimde kimyasal pestisitlere olan bağımlılığı azaltma ve sürdürülebilir tarım hedeflerine ulaşmada önemli bir potansiyel sunmaktadır (El-Ghany, 2019; U. et al., 2024).

Tarımda zararlı popülasyonlarının azaltılmasında semiokimyasal temelli yöntemler, son yıllarda giderek daha fazla önem kazanmıştır. Semiokimyasallar, böceklerin davranışlarını manipüle ederek onların üreme, beslenme ve yayılımını engelleyen doğal veya sentetik kimyasal sinyallerdir. Bu yöntemler, geleneksel kimyasal pestisitlerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla geliştirilmiştir ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının temel taşlarından biri haline gelmiştir (U. et al., 2024; Witzgall et al., 2010; El-Ghany, 2019; Hellmann et al., 2023).

Semiokimyasal uygulamalar arasında en yaygın olanlar; feromonlar ile yapılan çiftleşme bozma, kitle yakalama, çekici-öldürücü (attract-and-kill), push-pull (itme-çekme) ve izleme stratejileridir. Örneğin, feromonların yaygın kullanımı sayesinde, zararlı böceklerin popülasyonları düşük yoğunluklarda uzun vadeli olarak baskılanabilmektedir. Bu yöntemler, doğal düşmanlara zarar vermeden, hedef zararlı türlerin davranışlarını değiştirerek popülasyonlarını azaltır ve ekosistemin dengesini korur (Witzgall et al., 2010; El-Ghany, 2019; Hellmann et al., 2023; Afzal et al., 2023).

Saha ve laboratuvar çalışmaları, semiokimyasal temelli uygulamaların zararlı popülasyonlarını anlamlı şekilde azalttığını göstermektedir. Örneğin, buğday tarlalarında yaprak bitiyle mücadelede kullanılan yavaş salımlı feromon ve bitki kökenli uçucu karışımlar hem zararlı popülasyonunu azaltmış hem de parazitoitlerin etkinliğini artırmıştır (Liu et al., 2021). Orman zararlısı kabuk böceklerinde yapılan küresel bir meta-analiz ise, push-pull semiokimyasal uygulamalarının popülasyonlarda %54-94 arasında azalma sağladığını ortaya koymuştur (Afzal et al., 2023). Ayrıca, elma bahçelerinde ambrosia böceklerine karşı uygulanan yarı kimyasal bazlı itici maddeler, yeni zarar oluşumunu önemli ölçüde azaltmıştır (Leach et al., 2025).

Semiokimyasal yöntemlerin avantajları arasında çevre dostu olmaları, hedefe özgü etki göstermeleri ve direnç gelişimini yavaşlatmaları yer alır. Bununla birlikte, uygulama başarısı; doğru bileşik seçimi, uygun salım sistemi

ve çevresel koşullara bağlıdır. Bazı zararlı türlerinde veya yüksek popülasyon yoğunluklarında tek başına yeterli olmayabilir ve diğer biyolojik veya kimyasal yöntemlerle entegre edilmesi önerilir (Shashank et al., 2024; Witzgall et al., 2010; El-Ghany, 2019; Hellmann et al., 2023; Afzal et al., 2023).

Sonuç olarak, semiokimyasal temelli yöntemler, zararlı popülasyonlarının azaltılmasında etkili, sürdürülebilir ve çevreye duyarlı bir çözüm sunmaktadır. Ancak, maksimum etki için doğru uygulama ve entegre yaklaşımlar gereklidir.

2. SEMİOKİMYASALLAR VE EKOLOJİK ROLLERİ

Semiokimyasallar, canlılar arasında bilgi taşıyan ve ekosistemlerde çok katmanlı etkileşimleri düzenleyen kimyasal sinyallerdir. Bu moleküller, bitkiler, hayvanlar, mikroorganizmalar ve mantarlar tarafından üretilir ve hem tür içi (intraspesifik) hem de türler arası (interspesifik) iletişimde merkezi rol oynar (Thomas & Tabanca, 2025; Regnier, 1971; Barrett et al., 2021; Serdo, 2024; Darathi & Santa, 2022).

Semiokimyasallar, aynı tür bireyleri arasında (feromonlar) üreme, beslenme, savunma ve sosyal organizasyon gibi davranışları düzenler. Örneğin, böceklerde seks feromonları çiftleşme partnerinin bulunmasını sağlarken, alarm feromonları tehlike anında toplu savunma davranışını tetikler (Regnier, 1971; Ono et al., 2021). Türler arası iletişimde ise kairomonlar, allomonlar ve sinomonlar gibi farklı gruplar, avcı-av, bitki-zararlı, bitki-doğal düşman ve mutualist ilişkileri şekillendirir (Regnier, 1971; Barrett et al., 2021; Darathi & Santa, 2022).

2.1. Feromonlar

Böcek feromonları, aynı türden bireyler arasında iletişimi sağlayan kimyasal sinyallerdir. Bu maddeler, böceklerin hayatta kalması, üremesi ve sosyal organizasyonları için kritik öneme sahiptir. Feromonlar, böcekler tarafından salgılanır ve genellikle çok düşük konsantrasyonlarda bile türdeşleri tarafından algılanabilir. Kimyasal yapıları oldukça çeşitlidir; hidrokarbonlar, alkoller, esterler, epoksitler, aldehitler, ketonlar, laktanlar, karboksilik asitler ve terpenoidler gibi birçok farklı bileşik feromon olarak görev yapabilir (Rizvi et al., 2021; Yang et al., 2024).

Feromonlar işlevlerine göre başlıca şu gruplara ayrılır:

- a. **Cinsiyet feromonları:** Karşı cinsi çekerek çiftleşmeyi başlatır ve türler arası üreme izolasyonunu sağlar. Özellikle kelebek ve güve gibi Lepidoptera türlerinde dişiler tarafından salgılanan cinsiyet feromonları, erkekleri uzak mesafelerden çekebilir (Rizvi et al., 2021; Zhan et al., 2023; Khallaf et al., 2020).
- b. **Alarm feromonları:** Tehlike anında salgılanır ve diğer bireyleri uyararak savunma veya kaçış davranışını tetikler. Bu feromonlar, sosyal böceklerde (ör. karıncalar, arılar) yaygındır (Basu et al., 2020; El-Ghany, 2020).
- c. **Toplanma (agregasyon) feromonları:** Bireyleri bir araya toplayarak besin kaynağı veya üreme alanı etrafında kümelenmeyi sağlar (El-Ghany, 2020; Yang et al., 2024).
- d. **İz feromonları:** Özellikle sosyal böceklerde (karınca, arı) besin kaynağına giden yolu işaretlemek için kullanılır (Czaczkas et al., 2015).
- e. **Primer feromonlar:** Davranıştan ziyade fizyolojik değişiklikleri tetikler; örneğin, arı kolonilerinde kraliçe feromonu işçi arıların yumurtalık gelişimini baskılar (Regnier & Law, 1968; Hefetz, 2019).

Böcekler, feromonları antenlerinde bulunan özel kemosenör nöronlar ve reseptörler aracılığıyla algılar. Bu algılamada, feromon bağlayıcı proteinler ve özgül reseptörler önemli rol oynar (Pelosi et al., 2018; Fleischer & Krieger, 2018; Yang et al., 2022). Feromonların tür özgüllüğü hem kimyasal yapının hem de bileşen oranlarının hassas şekilde ayarlanmasıyla sağlanır (Rizvi et al., 2021; Zhan et al., 2023).

Feromonlar, tarımsal zararlılarla mücadelede de yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle cinsiyet feromonları, kitle yakalama ve çiftleşme bozma gibi yöntemlerle zararlı popülasyonlarının kontrolünde çevre dostu ve seçici bir çözüm sunar (H et al., 2025; Rizvi et al., 2021; Petkevicius et al., 2020). Ayrıca, feromonların biyosentezi, genetik ve biyoteknolojik yöntemlerle de araştırılmakta ve üretimi geliştirilmektedir (Rizvi et al., 2021; Petkevicius et al., 2020).

Böcek feromonlarının biyosentezi, türlere ve feromon tipine göre değişmekle birlikte, çoğunlukla temel metabolik yolların modifikasyonlarıyla gerçekleşir. En yaygın olarak, yağ asidi ve izoprenoid (mevalonat) yolları kullanılır. Bu süreçler, özgül enzimler ve hormonal düzenleyicilerle hassas

şekilde kontrol edilir. Böcek feromonlarının biyosentezi, çoğunlukla yağ asidi ve izoprenoid yollarının özgül enzimlerle modifikasyonu ve hormonlarla hassas düzenlenmesiyle gerçekleşir. Bu yollar, türler arası çeşitlilik gösterse de temel biyokimyasal mekanizmalar evrimsel olarak korunmuştur (Tablo 1).

Yağ asidi tabanlı feromon biyosentezi, asetil-CoA'nın asetil-CoA karboksilaz (ACC) ile malonil-CoA'ya çevrilmesiyle başlar. Ardından, yağ asidi sentaz (FAS) ile doymuş uzun zincirli yağ asitleri (C14, C16, C18) üretilir (Wang et al., 2021; Jurenka, 2024). Desatürazlar (DES) ile çift bağlar eklenir, zincir kısaltma (β -oksidasyon), elongazlar ve redüktazlar ile zincir uzunluğu ve fonksiyonel gruplar ayarlanır. Sonrasında, yağ asitleri alkol, aldehit veya asetat esterlerine dönüştürülür (ör. alkol oksidaz, asetiltransferaz) (Wang et al., 2021; Dam et al., 2023; Muñoz et al., 2008; 2015; Jurenka, 2024). Örneğin, ipekböceğinde (*Bombyx mori*) bombykol ve bombykal sentezi, bu yolun farklı enzimlerle modifiye edilmesiyle gerçekleşir (Wang et al., 2021).

İzoprenoid (Mevalonat) yolu, özellikle kabuk böceklerde (Scolytidae) ve bazı kınkanatlılarda, agregasyon feromonları (ör. ipsenol, frontalin) mevalonat yoluyla sentezlenir. Bu yolun anahtar enzimi HMG-CoA redüktazdır ve sentez juvenil hormon (JH III) ile düzenlenir (Tillman et al., 1999; Seybold & Tittiger, 2003).

Amino asit ve bitki türevli yollar ise bazı türlerde (ör. afitlerde iridoid feromonlar), amino asitlerden veya bitkisel öncüllerden başlar ve özgün enzimlerle farklılaştırılır (Köllner et al., 2022; Lancaster et al., 2018).

Tablo 1. Farklı böcek gruplarında feromon biyosentez yolları ve anahtar enzimler.

Böcek Grubu	Ana Biyosentez Yolu	Temel Enzimler ve Düzenleyiciler	Kaynaklar
Lepidoptera	Yağ asidi (FAS)	Desatüraz, redüktaz, PBAN	(Wang et al., 2021; Dam et al., 2023; Jurenka, 2021; Jurenka, 2024)
Coleoptera	Yağ asidi/izoprenoid	HMG-CoA redüktaz, JH III	(Tillman et al., 1999; Seybold & Tittiger, 2003; Zeng et al., 2024)
Diptera	Yağ asidi	Elongaz, ecdysteroid	(Tillman et al., 1999; Zeng et al., 2024)
Hemiptera	Terpenoid, amino asit	IDS-tipi sentazlar, P450	(Köllner et al., 2022; Lancaster et al., 2018; Wu et al., 2023)

Sonuç olarak, böcek feromonları hem temel ekolojik süreçlerde hem de uygulamalı alanlarda (ör. entegre zararlı yönetimi) büyük öneme sahip, karmaşık ve çeşitlilik gösteren kimyasal iletişim araçlarıdır (Yew & Chung, 2015; H et al., 2025; Rizvi et al., 2021; El-Ghany, 2020; Yang et al., 2024).

2.2. Kairomonlar

Kairomonlar, bir tür tarafından salınan ve farklı bir tür tarafından algılandığında algılayan türe fayda sağlayan kimyasal sinyallerdir. Yani, bu kimyasalların üreticisi için genellikle nötr veya zararlı etkiler söz konusuysen, alıcı tür için avantaj sağlarlar. Kairomonlar, özellikle parazitoit ve avcı böceklerin, konak veya avlarını bulmasında önemli rol oynar. Örneğin, bitki zararlısı böceklerin vücutlarından, dışkılarından veya beslenme sırasında bitkilerden salınan uçucu organik bileşikler, bu zararlıları avlayan doğal düşmanlar için kairomon görevi görebilir (Ayelo et al., 2021; Ayelo et al., 2022; Campbell et al., 2021).

Kairomonlar, genellikle iki tür arasında beslenme, av-avcı veya parazit-konak ilişkilerinde kullanılır. Parazitoit böcekler, konaklarının dışkısı, bal özü (honeydew), vücut yüzeyi veya yumurta bırakma izlerinden yayılan kairomonları algılayarak konaklarını bulabilirler. Benzer şekilde, avcı böcekler de avlarının bıraktığı kimyasal izleri takip ederek avlarına ulaşır (Ayelo et al., 2021; Ayelo et al., 2022; Lewis et al., 1976). Kairomonlar hem uçucu (uzun mesafeden algılanabilen) hem de temas yoluyla algılanabilen (kısa mesafede veya doğrudan temasla) olabilir (Ayelo et al., 2022).

Tarımda kairomonlar, biyolojik mücadelede doğal düşmanların zararlı böcekleri bulmasını kolaylaştırmak ve zararlı popülasyonlarını azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle kairomon bazlı tuzaklar, doğal düşmanların tarlada toplanmasını ve zararlıların baskılanmasını sağlayarak çevre dostu bir zararlı yönetimi sunar (Ayelo et al., 2021; Murali-Baskaran et al., 2017; Ayelo et al., 2022).

Özetle, kairomonlar farklı türler arasında iletişimi sağlayan, alıcı türe avantaj kazandıran ve ekosistemlerde avcı-av, parazitoit-konak gibi ilişkilerde önemli rol oynayan kimyasal sinyallerdir. Tarımsal biyolojik mücadelede de etkin şekilde kullanılmaktadır (Ayelo et al., 2021; Murali-Baskaran et al., 2017; Ayelo et al., 2022; Campbell et al., 2021; Lewis et al., 1976).

2.3. Allomonlar ve Sinomonlar

Allomonlar ve sinomonlar, farklı türler arasında kimyasal iletişimi sağlayan ve “allelkimyasallar” olarak adlandırılan maddelerdir. Bu maddeler, yayıcı (üreten) ve alıcı (algılayan) türler açısından sağladıkları faydaya göre sınıflandırılır.

Allomonlar, bir tür tarafından salınan ve başka bir tür tarafından algılandığında, yayıcı türe fayda sağlayan kimyasal maddelerdir. Alıcı tür için ise genellikle nötr ya da zararlı etki gösterirler. Örneğin, birçok bitkinin veya böceğin salgıladığı savunma kimyasalları (örneğin nikotin, alkaloidler, bazı uçucu bileşikler) otçul böcekleri uzaklaştırır veya avcılarını caydırır. Bu şekilde, allomonlar yayıcı organizmanın avcılardan veya zararlılardan korunmasına yardımcı olur (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023; Kirk et al., 2021; Serdo, 2024; Thegusha et al., 2024; Nielsen et al., 2015).

Sinomonlar ise hem yayıcı türe hem de alıcı türe fayda sağlayan kimyasal maddelerdir. Yani, iki farklı tür arasında karşılıklı yarar sağlayan bir iletişim söz konusudur. En tipik örneklerinden biri, çiçeklerin yaydığı kokuların tozlayıcı böcekleri çekmesidir: Bitki, tozlaşma yoluyla üreme avantajı elde ederken, böcek de nektar veya polen gibi besin kaynağına ulaşır. Ayrıca, zararlı böcek saldırısına uğrayan bitkilerin yaydığı uçucu bileşikler, doğal düşmanları (avcı veya parazitoit böcekleri) çekerek hem bitkinin korunmasına hem de avcılarının besin bulmasına yardımcı olur (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023; Serdo, 2024; Thegusha et al., 2024; Nielsen et al., 2015).

Özetle, allomonlar yayıcıya, sinomonlar ise hem yayıcıya hem de alıcıya fayda sağlayan, türler arası kimyasal iletişimde önemli rol oynayan allelokimyasallardır (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023; Serdo, 2024; Thegusha et al., 2024; Nielsen et al., 2015).

2.4. Bitki-Hayvan-Mikroorganizma Etkileşimleri

Bitkiler, zararlı saldırısına uğradıklarında uçucu organik bileşikler (VOCs) salgılayarak doğal düşmanları (parazitoitler, predatörler) kendilerine çeker ve dolaylı savunma sağlar. Bu uçucular, aynı zamanda diğer bitkileri de uyararak topluluk düzeyinde savunma yanıtlarını tetikleyebilir (Thomas & Tabanca, 2025; M'sakni et al., 2025; Barrett et al., 2021; Serdo, 2024; Darathi & Santa, 2022). Mikroorganizmalar da özellikle bakteriler ve mantarlar, bitki ve böceklerle kimyasal sinyaller aracılığıyla karmaşık karşılıklı ilişkiler kurar.

Örneğin, bazı bakteriler böceklerin sosyal davranışlarını düzenleyen feromonların biyosentezine katkı sağlar (Calcagnile et al., 2019).

2.5. Ekosistem Fonksiyonları ve Biyolojik Kontrol

Semiokimyasallar, ekosistemlerde türlerin bolluğu, dağılımı ve topluluk yapısını belirlemede anahtar rol oynar. Özellikle tarımda, zararlıların biyolojik kontrolünde doğal düşmanların cezbedilmesi, zararlıların davranışlarının manipüle edilmesi ve pest yönetiminde çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesi için kullanılır (Thomas & Tabanca, 2025; M'sakni et al., 2025; , 2023; Barrett et al., 2021; Sharma et al., 2019; Darathi & Santa, 2022). Ayrıca, polinasyon, tohum yayılımı ve mutualist ilişkilerde de önemli işlevler üstlenirler (Barrett et al., 2021; Slavković & Bendahmane, 2025).

2.6. Evrimsel ve Ekolojik Sonuçlar

Semiokimyasal iletişim, türler arası ko-evolüsyonu ve adaptasyonu yönlendirir. Örneğin, bazı bitkiler, polinatörleri çekmek veya zararlıları aldatmak için böcek seks feromonlarını taklit eden uçucular üretir. Bu kimyasal taklit ve aldatma, türleşme ve ekolojik niş ayrışmasında önemli bir rol oynar (Barrett et al., 2021; Slavković & Bendahmane, 2025).

Semiokimyasallar, ekosistemlerin işleyişinde, türler arası ilişkilerin düzenlenmesinde ve biyolojik çeşitliliğin sürdürülmesinde merkezi öneme sahiptir. Hem temel ekolojik süreçlerin anlaşılması hem de sürdürülebilir tarım ve biyolojik kontrol uygulamaları için semiokimyasal araştırmalar kritik bir alan olarak öne çıkmaktadır (Thomas & Tabanca, 2025; M'sakni et al., 2025; Regnier, 1971; , 2023; Barrett et al., 2021; Serdo, 2024; Ono et al., 2021; Slavković & Bendahmane, 2025; Sharma et al., 2019; Darathi & Santa, 2022).

3. SEMİOKİMYASAL TABANLI ZARARLI KONTROL STRATEJİLERİ

3.1. İzleme ve Erken Uyarı Sistemleri

Feromon tuzakları, zararlı popülasyonlarının tespiti ve yoğunluğunun belirlenmesi için en yaygın kullanılan araçlardır. Zararlı popülasyonlarının tespiti ve yoğunluğunun izlenmesi için feromon veya kairomon tuzakları kullanılır. Bu sayede mücadele zamanlaması ve yoğunluğu optimize edilir. Özellikle Lepidoptera türlerinde seks feromonları, popülasyon artışını öngörmek için yüksek doğruluk sağlar. Bu yöntem, pestisit uygulama

zamanlarının daha doğru belirlenmesini ve gereksiz uygulamaların önlenmesini sağlar (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023; S, 2019).

3.2. Kitle Yakalama (Mass Trapping)

Kitle yakalama, hedef türün büyük bir kısmını feromon veya kairomon içeren tuzaklarla azaltma prensibine dayanır. Zararlıların toplu olarak yakalanması için çekici semiokimyasal tuzaklar kullanılır. Özellikle cinsiyet feromonları ile etkili sonuçlar alınır (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023; S, 2019).

Bu teknik özellikle meyve bahçelerinde Akdeniz meyve sineği *Ceratitis capitata* ve zeytin sineği *Bactrocera oleae* gibi türlere karşı başarıyla uygulanmıştır (Kitle yakalama, organik üretimde yaygın tercih edilen bir yöntemdir. Yine domates güvesi (*Tuta absoluta*), cinsiyet feromonu ile yemlenen tuzaklarla, domates tarlalarında 48 tuzak/ha uygulandığında, yaprak zararını geleneksel insektisit uygulamalarına göre daha etkin şekilde azaltmıştır (Rizvi et al., 2021).

Muz sürgün kurdu (*Cosmopolites sordidus*) ve şeker kamışı zararlısı (*Metamasius hemipterus*), feromonla yemlenen tuzaklar, muz tarlalarında *C. sordidus* ve *M. hemipterus* yakalanma oranlarını %75'in üzerinde azaltmış, mısırdaki zararı %61-64 oranında düşürmüştü ve muz salkımı ağırlığında %23 artış sağlamıştır. Bu uygulama, hektar başına yıllık 4240 USD ek gelir getirmiştir (Rizvi et al., 2021).

3.3. Çiftleşmeyi Engelleme (Mating Disruption)

Bu yöntem, ortama yüksek konsantrasyonda seks feromonu verilerek erkek bireylerin dişileri bulmasının engellenmesi esasına dayanır. Feromon bulutunun oluşturduğu “gürültü” sinyalleri gerçek dişi feromonlarının tespit edilmesini zorlaştırır. Özellikle cinsiyet feromonları kullanılarak zararlıların çiftleşmesi engellenir ve popülasyon artışı önlenir. Elma iç kurdu (*Cydia pomonella*) gibi türlerde yaygın olarak uygulanır. (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023).

3.4. Çek-İt (Push-Pull) Stratejileri

Push-pull yaklaşımı, zararlıları konukçu bitkiden uzaklaştıran (push) itici bileşikler ve onları tuzak bitkilerine veya tuzaklara çeken (pull) cezbedici kimyasalların birlikte kullanılmasını içerir. Bu ekolojik strateji özellikle mısır

tarımlarında *Busseola fusca* ve *Chilo partellus* gibi Lepidoptera türlerinin kontrolünde büyük başarı göstermiştir. Zararlılar, itici (repellent) semiokimyasallar ile üründen uzaklaştırılırken, çekici semiokimyasallar ile başka bir alana yönlendirilir ve burada kontrol altına alınır (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023).

3.5. Doğal Düşmanların Cezbedilmesi

Kairomon ve sinomonlar, doğal düşmanların (avcı ve parazitoit böcekler) zararlıları bulmasını kolaylaştırmak için kullanılır. Bitkilerin stres altındayken salgıladığı uçucu bileşikler (Herbivore-Induced Plant Volatiles – HIPVs) taklit eden sinyal maddeleri, parasitoid ve predatörler gibi doğal düşmanların tarla içine çekilmesini sağlayarak biyolojik mücadeleyi destekler. Bu yaklaşım pestisit kullanımını azaltan önemli bir biyoteknik uygulamadır (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023).

3.6. Çek ve Öldür (Attract-and-Kill)

Zararlılar, semiokimyasal çekicilerle belirli bir noktaya çekilerek burada öldürücü bir ajanla (insektisit, biyolojik ajan vb.) etkisiz hale getirilir (El-Ghany, 2019; U. et al., 2024; El-Ghany, 2023).

3.7. Oto-Yayılım (Auto-Dissemination)

Zararlılar, semiokimyasal tuzaklarla patojenlerle (ör. entomopatojen mantar) buluşturularak, hastalığın popülasyon içinde yayılması sağlanır (Sharma et al., 2019).

4. UYGULAMA TEKNİKLERİ VE YENİ NESİL SEMİOKİMYASAL SİSTEMLER

Semiokimyasal tabanlı zararlı kontrolünde, uygulama teknikleri ve yeni nesil sistemler hem etkinliği artırmak hem de çevreye duyarlı çözümler sunmak amacıyla hızla gelişmektedir.

4.1. Kontrollü Salım Formülasyonları

Feromonların etkinliğini artırmak için kapsül, polimer dispenser, mikroenkapsülasyon veya nanoteknolojik taşıyıcı sistemler kullanılmaktadır (El-Sayed et al., 2020). Kontrollü salım, feromonun buharlaşma hızını düzenleyerek uygulamanın sürekliliğini sağlar.

4.2. Otomatik Feromon Dağıtıcıları ve Dijital Tuzaklar

Feromon ve kairomon gibi semiokimyasallar, zararlıların izlenmesi, kitle yakalama, çiftleşmeyi bozma ve çek-öldür (attract-and-kill) stratejilerinde tuzaklar veya kontrollü salınım yapan dispenserler aracılığıyla uygulanır. Bu sistemler, zararlıları çekmek veya uzaklaştırmak için optimize edilir Yeni teknolojiler, feromon tuzaklarının kamera sensörleri ve yapay zekâ tabanlı görüntü analizleriyle otomatik popülasyon sayımı yapmasını sağlamaktadır Bu teknolojiler erken uyarı sistemlerinde devrim niteliğindedir (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023; El-Shafie & Faleiro, 2017).

4.3. Bitki Genetiği Yoluyla Semiokimyasal Üretimi

Bazı bitkiler, zararlıların doğal düşmanlarını çeken uçucu bileşikler üretmek üzere genetik olarak düzenlenebilir. Bu strateji, bitkilerin kendiliğinden “çekici sinyal yayıcı” hale gelmesini sağlar (Turlings & Erb, 2018).

4.4. Kombine Stratejiler

Feromon uygulamalarının biyolojik mücadele, kültürel önlemler ve mekanik tuzaklarla birlikte kullanımı, entegre zararlı yönetiminin etkinliğini artırmaktadır Birden fazla davranış manipülasyon yönteminin kombinasyonu daha kalıcı baskılama sağlar. Kimyasal sinyallerin (semiokimyasallar) yanı sıra ışık, ses ve titreşim gibi fiziksel uyarıcılar da entegre edilerek zararlı davranışları daha etkin şekilde manipüle edilebilir (Nieri et al., 2021).

4.5. Yeni Nesil Semiokimyasal Sistemler

Nano/Mikroemülsiyonlar ve Kontrollü Salınım: Semiokimyasal maddelerin uçuculuğu ve kararsızlığı, nano/mikroemülsiyonlar ve biyobozunur polimer bazlı kapsülleme teknikleriyle aşılmaktadır. Bu sistemler, yarıokimyasalın kontrollü ve uzun süreli salınımını sağlar, çevresel kayıpları ve etkinlik kaybını azaltır (Lucia & Guzmán, 2020; Villarreal et al., 2023; Júnior et al., 2022).

3D Baskı ile Biyopolimer Dispenserler: Semiokimyasal içeren nanoformülasyonlar, biyobozunur polimerlerle 3D baskı teknolojisi kullanılarak tuzak veya dispenser olarak üretilebilmektedir. Bu sayede hem çevre dostu hem de hedefe yönelik uygulamalar mümkün olur (Villarreal et al., 2023).

SPLAT® ve Benzeri Akıllı Dispenserler: Akışkan, kontrollü salınım sağlayan ve uygulama esnekliği sunan yeni nesil dispenserler (ör. SPLAT®), semiokimyasalın 2 haftadan 6 aya kadar etkin kalmasını sağlar (El-Shafie & Faleiro, 2017).

Bitki Savunma İndüksiyonu ve Genetik Yöntemler: Bitkilerin yarıokimyasal üretimini artıran “bitki aşılması” veya genetik modifikasyon teknikleriyle, zararlılara karşı doğal savunma mekanizmaları güçlendirilmektedir (Kamalakannan & Gudla, 2025).

Multimodal Sistemler: Kimyasal ve fiziksel uyarıcıların (ışık, ses, titreşim) birlikte kullanıldığı, zararlı davranışını daha etkin manipüle eden entegre sistemler geliştirilmektedir (Nieri et al., 2021; Kamalakannan & Gudla, 2025).

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Semiokimyasal tabanlı zararlı yönetimi, çevreye duyarlı, hedef odaklı ve sürdürülebilir bir mücadele stratejisi sunmaktadır. Feromonlar, kairomonlar ve diğer kimyasal sinyaller aracılığıyla zararlıların davranışlarını manipüle etmek, pestisit kullanımını önemli ölçüde azaltarak hem tarımsal verimliliği hem de ekosistem sağlığını artırır. Teknolojik gelişmeler, kontrollü salım materyalleri ve dijital izleme sistemleri sayesinde semiokimyasal uygulamaların etkinliği her geçen gün artmaktadır. Bu yaklaşımların entegre zararlı yönetimi programlarına daha geniş ölçekte dahil edilmesi, gelecekte sürdürülebilir tarımın temel taşlarından biri olacaktır.

Feromon temelli mücadele yöntemleri, farklı tarım zararlılarında başarıyla uygulanmış, pestisit kullanımını azaltmış ve çevre dostu, sürdürülebilir bir çözüm sunmuştur. Özellikle kitle yakalama ve çiftleşme bozma stratejileri, vaka çalışmalarında zararlı popülasyonlarını ve ürün zararını anlamlı şekilde düşürmüştür. Örneğin Yunanistan’daki pamuk tarlalarında, Pamuk Koçanı Kurdu (*Helicoverpa armigera*)’na karşı hem sentetik hem de maya kökenli feromonlar kullanılarak yapılan çiftleşme bozma uygulamaları, zararlı popülasyonunu ve zararını önemli ölçüde azaltmıştır. Maya kökenli feromonlar, sentetiklerle eşdeğer etki göstermiştir ve biyolojik olarak parçalanabilir formülasyonlar ile insansız hava araçlarıyla geniş alanlara uygulanabilmiştir (Raptopoulos et al., 2025; Holkenbrink et al., 2020).

Yine İtalya’da, Çam Kesetirtli (*Thaumetopea pityocampa*) ile yapılan çalışmalarda, hektar başına 6 feromon tuzağı kullanımı, bir yıl sonunda ağaç başına kış yuvası sayısını %88, iki yıl sonunda ise %94 oranında azaltmıştır (Rizvi et al., 2021). İspanya’da Salkım Güvesi (*Lobesia botrana*)’ne karşı aerosol cihazlarıyla yapılan feromon salımı, geleneksel yöntemlerle benzer düzeyde zararlı popülasyonu baskılamış ve salkımlarda larva zararını azaltmıştır. Aerosol cihazları, düşük yoğunlukta yerleştirilerek işçilik maliyetini düşürmüş ve zamanlaması ayarlanabilir salım avantajı sağlamıştır (Benelli et al., 2019). Sonuç olarak Feromon temelli mücadele, zararlı popülasyonunu düşük yoğunluklarda uzun vadeli olarak baskılayabilir, doğal düşmanlara zarar vermez ve pestisit kullanımını önemli ölçüde azaltır (Rizvi et al., 2021; Witzgall et al., 2010; Hellmann et al., 2023). Feromon tuzakları, zararlıların erken tespiti ve popülasyon izleme için de yaygın olarak kullanılmaktadır (Sithanatham, 2020; El-Ghany, 2019).

Semiokimyasal tabanlı stratejiler, tür spesifikliği, çevre dostu olmaları ve doğal düşmanlara zarar vermemeleri nedeniyle geleneksel kimyasal insektisitlere göre önemli avantajlar sunar. Ayrıca, yeni nesil kontrollü salınım sistemleri ve bitki savunma indüksiyonu gibi yenilikçi uygulamalar da geliştirilmiştir (Hellmann et al., 2023).

Semiokimyasal tabanlı zararlı kontrol stratejileri, izleme, kitle yakalama, çiftleşmeyi bozma, çek-it ve biyolojik mücadeleye destek gibi çok yönlü ve sürdürülebilir yöntemler sunar. Bu stratejiler, entegre zararlı yönetiminin temel taşlarından biri haline gelmiştir (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023). Bu uygulama teknikleri, kontrollü salınım sistemleri, nanoformülasyonlar, biyobozunur dispenserler ve multimodal yaklaşımlar ile sürekli yenilenmektedir. Bu gelişmeler, zararlı kontrolünde çevre dostu, hedefe özgü ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır (Lucia & Guzmán, 2020; Nieri et al., 2021; Villarreal et al., 2023; El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023; Júnior et al., 2022; El-Shafie & Faleiro, 2017; Kamalakannan & Gudla, 2025).

Tüm bu olumlu özelliklerin yanı sıra bazı feromon formülasyonları hâlen ticari olarak pahalıdır. Ayrıca çok sayıda tuzak veya dispenser gerektiren alanlarda işçilik maliyetleri yükselebilir (El-Sayed et al., 2020). Bundan başka feromonlar yüksek tür spesifikliğe sahiptir. Bu durum avantaj olsa da bir alanda birden fazla zararlı türün bulunduğu durumlarda dezavantaj yaratabilir. Rüzgâr, sıcaklık ve UV ışığı abiyotik faktörler semiokimyasal maddelerin stabilitesini

etkileyebilir. Ayrıca yoğun yağış feromon dispenserlerinin etkin süresini azaltır. Son olarak Her ne kadar feromon temelli tekniklerde direnç gelişimi nadir olsa da bazı Lepidoptera türlerinde duyarlılığın azalması mümkündür (Witzgall et al., 2010).

Semiokimyasal tabanlı zararlı kontrol stratejileri, çevre dostu, hedefe özgü ve sürdürülebilir çözümler sunarak geleneksel kimyasal pestisitlerin olumsuz etkilerine karşı önemli bir alternatif oluşturmuştur. Feromonlar ve diğer semiokimyasallar; izleme, kitle yakalama, çiftleşmeyi bozma, çek-öldür ve push-pull gibi entegre zararlı yönetimi uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır (El-Ghany, 2019; El-Ghany, 2023). Nano/mikroemülsiyonlar, kontrollü salınım sistemleri ve multimodal yaklaşımlar gibi yeni nesil uygulama teknikleri, semiokimyasal maddelerin etkinliğini ve kalıcılığını artırarak pratikteki kullanım alanlarını genişletmiştir (Lucia & Guzmán, 2020; Hellmann et al., 2023;).

Semiokimyasal temelli yöntemler, zararlı popülasyonlarını azaltırken doğal düşmanlara ve ekosisteme minimum zarar vermekte, pest direnci ve kalıntı sorunlarını da azaltmaktadır (Hellmann et al., 2023; U. et al., 2024; , 2023). Ancak, türler arası farklılıklar, uygulama zorlukları ve formülasyon geliştirme ihtiyacı gibi bazı sınırlamalar devam etmektedir (Lucia & Guzmán, 2020; Morrison et al., 2021). Sonuç olarak, semiokimyasal tabanlı stratejiler, sürdürülebilir tarım ve entegre zararlı yönetimi için umut vaat eden, yenilikçi ve çevreyle uyumlu bir yol sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Afzal, S., Nahrung, H., Lawson, S., & Hayes, R. (2023). How Effective Are Push–Pull Semiochemicals as Deterrents for Bark Beetles? A Global Meta-Analysis of Thirty Years of Research. *Insects*, 14. <https://doi.org/10.3390/insects14100812>
- Ayelo, P. M., Pirk, C. W., Yusuf, A. A., Chailleux, A., Mohamed, S. A., & Deletre, E. (2021). Exploring the kairomone-based foraging behaviour of natural enemies to enhance biological control: A review. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 641974. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.641974>
- Ayelo, P., Yusuf, A., Chailleux, A., Mohamed, S., Pirk, C., & Delétré, E. (2022). Chemical Cues From Honeydew and Cuticular Extracts of *Trialeurodes Vaporariorum* Serve as Kairomones for The Parasitoid *Encarsia Formosa*. *Journal of Chemical Ecology*, 48, 370 - 383. <https://doi.org/10.1007/s10886-022-01354-6>
- Barrett, M., Figueiras, C., & Willett, D. (2021). Using *Cucumis sativus*, *Acalymma vittatum*, *Celatoria setosa*, and generalist pollinators as a case study for plant–insect interactions. *Arthropod-Plant Interactions*, 15, 637 - 644. <https://doi.org/10.1007/s11829-021-09852-2>
- Basu, S., Clark, R., Fu, Z., Lee, B., & Crowder, D. (2020). Insect alarm pheromones in response to predators: Ecological trade-offs and molecular mechanisms.. *Insect biochemistry and molecular biology*, 103514. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2020.103514>
- Benelli, G., Lucchi, A., Thomson, D., & Ioriatti, C. (2019). Sex Pheromone Aerosol Devices for Mating Disruption: Challenges for a Brighter Future. *Insects*, 10. <https://doi.org/10.3390/insects10100308>
- Calcagnile, M., Tredici, S., Talà, A., & Alifano, P. (2019). Bacterial Semiochemicals and Transkingdom Interactions with Insects and Plants. *Insects*, 10. <https://doi.org/10.3390/insects10120441>
- Campbell, J., Athanassiou, C., Hagstrum, D., & Zhu, K. (2021). *Tribolium castaneum*: A Model Insect for Fundamental and Applied Research.. *Annual review of entomology*. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-080921-075157>

- Czaczkes, T., Grüter, C., & Ratnieks, F. (2015). Trail pheromones: an integrative view of their role in social insect colony organization.. *Annual review of entomology*, 60, 581-99. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010814-020627>
- Dam, M., Ding, B., Svensson, G., Wang, H., Melo, D., Lassance, J., Zarbin, P., & Löfstedt, C. (2023). Sex pheromone biosynthesis in the sugarcane borer *Diatraea saccharalis*: paving the way for biotechnological production.. *Pest management science*. <https://doi.org/10.1002/ps.7830>
- Darathi, D., & Santa, K. (2022). Volatile Mediated Plant-Insect Interactions: A Review. *International Journal of Zoological Investigations*. <https://doi.org/10.33745/ijzi.2022.v08i01.033>
- Du, M., Liu, X., , N., Liu, X., Wei, J., Yin, X., Zhou, S., Rafaeli, A., Song, Q., & An, S. (2017). Calcineurin-mediated Dephosphorylation of Acetyl-coA Carboxylase is Required for Pheromone Biosynthesis Activating Neuropeptide (PBAN)-induced Sex Pheromone Biosynthesis in *Helicoverpa armigera**. *Molecular & Cellular Proteomics*, 16, 2138 - 2152. <https://doi.org/10.1074/mcp.ra117.000065>
- El-Ghany, N. (2019). Semiochemicals for controlling insect pests. *Journal of Plant Protection Research*, 59, 1-11. <https://doi.org/10.24425/jppr.2019.126036>
- El-Shafie, H., & Faleiro, J. (2017). Semiochemicals and Their Potential Use in Pest Management. <https://doi.org/10.5772/66463>
- Fleischer, J., & Krieger, J. (2018). Insect Pheromone Receptors – Key Elements in Sensing Intraspecific Chemical Signals. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fncel.2018.00425>
- H, S., Bisen, D., P, J., Behera, H., Singh, B., & Lohar, A. (2025). Insect Behaviour Modulation Using Pheromones: Trends and Applications. *UTTAR PRADESH JOURNAL OF ZOOLOGY*. <https://doi.org/10.56557/upjoz/2025/v46i115017>
- Hefetz, A. (2019). The critical role of primer pheromones in maintaining insect sociality. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 74, 221 - 231. <https://doi.org/10.1515/znc-2018-0224>
- Hellmann, C., Greiner, A., & Vilcinskas, A. (2023). Design of Polymer Carriers for Optimized Pheromone Release in Sustainable Insect Control

- Strategies. *Advanced Science*, 11. <https://doi.org/10.1002/advs.202304098>
- Holkenbrink, C., Ding, B., Wang, H., Dam, M., Petkevicius, K., Kildegaard, K., Wenning, L., Sinkwitz, C., Lorántfy, B., Koutsoumpeli, E., França, L., Pires, M., Bernardi, C., Urrutia, W., Mafra-Neto, A., Ferreira, B., Raptopoulos, D., Konstantopoulou, M., Löfstedt, C., & Borodina, I. (2020). Production of moth sex pheromones for pest control by yeast fermentation.. *Metabolic engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2020.10.001>
- Júnior, S., Gravina, É., Moraes, M., Zaioncz, S., Valadares, L., Borges, M., & Magalhães, W. (2022). Synthesis of an organic–inorganic composite from calcium carbonate and Kraft lignin and its use as carrier material for controlled release of semiochemical agents. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 72670 - 72682. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21028-w>
- Jurenka, R. (2021). Lepidoptera: Female sex pheromone biosynthesis and its hormonal regulation. *Insect Pheromone Biochemistry and Molecular Biology*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819628-1.00002-x>
- Jurenka, R. (2024). Fatty Acid Origin of Insect Pheromones. *Advances in experimental medicine and biology*. https://doi.org/10.1007/5584_2024_813
- Kamalakaran, M., & Gudla, K. (2025). Multi-modal nanoformulation for insect pest control: Engineering precision strategies for next-generation management.. *Journal of environmental management*, 391, 126559. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126559>
- Khallaf, M., Cui, R., Weißflog, J., Erdogmus, M., Svatoš, A., Dweck, H., Valenzano, D., Hansson, B., & Knaden, M. (2020). Large-scale characterization of sex pheromone communication systems in *Drosophila*. *Nature Communications*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24395-z>
- Kirk, W., De Kogel, W., Koschier, E., & Teulon, D. (2021). Semiochemicals for Thrips and Their Use in Pest Management.. *Annual review of entomology*, 66, 101-119. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-022020-081531>

- Köllner, T., David, A., Luck, K., Beran, F., Kunert, G., Zhou, J., Caputi, L., & O'Connor, S. (2022). Biosynthesis of iridoid sex pheromones in aphids. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2211254119>
- Lancaster, J., Lehner, B., Khrimian, A., Muchlinski, A., Luck, K., Köllner, T., Weber, D., Gundersen-Rindal, D., & Tholl, D. (2018). An IDS-Type Sesquiterpene Synthase Produces the Pheromone Precursor (Z)- α -Bisabolene in *Nezara viridula*. *Journal of Chemical Ecology*, 45, 187 - 197. <https://doi.org/10.1007/s10886-018-1019-0>
- Leach, H., Huang, J., & Wilson, J. (2025). Evaluating semiochemical-based strategies for managing ambrosia beetles in apple orchards. *Agricultural and Forest Entomology*. <https://doi.org/10.1111/afe.12697>
- Lewis, W., Jones, R., Gross, H., & Nordlund, D. (1976). The role of kairomones and other behavioral chemicals in host finding by parasitic insects.. *Behavioral biology*, 16 3, 267-89. [https://doi.org/10.1016/s0091-6773\(76\)91408-5](https://doi.org/10.1016/s0091-6773(76)91408-5)
- Liu, J., Zhao, X., Zhan, Y., Wang, K., Francis, F., & Liu, Y. (2021). New Slow-Release Mixture of (E)- β -farnesene with Methyl Salicylate to Enhance Aphid Biocontrol Efficacy in Wheat Ecosystem. *Pest management science*. <https://doi.org/10.1002/ps.6378>
- Lucia, A., & Guzmán, E. (2020). Emulsions containing essential oils, their components or volatile semiochemicals as promising tools for insect pest and pathogen management.. *Advances in colloid and interface science*, 287, 102330. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102330>
- Morrison, W., Scully, E., & Campbell, J. (2021). Towards developing areawide semiochemical-mediated, behaviorally-based integrated pest management programs for stored product insects.. *Pest management science*. <https://doi.org/10.1002/ps.6289>
- M'sakni, N., Alsufyani, T., & Alotaibi, N. (2025). Decoding chemical interactions among pomegranate, *Aphis punicae*, and associated insects in Taif fields through open-loop stripping. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1541538>
- Muñoz, L., Rosell, G., Quero, C., & Guerrero, Á. (2008). Biosynthetic pathways of the pheromone of the Egyptian armyworm Spodoptera

- littoralis. *Physiological Entomology*, 33. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2008.00645.x>
- Murali-Baskaran, R., Sharma, K., Kaushal, P., Kumar, J., Parthiban, P., Senthil-Nathan, S., & Mankin, R. (2017). Role of kairomone in biological control of crop pests-A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 101, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.07.004>
- Nielsen, B., Rampin, O., Meunier, N., & Bombail, V. (2015). Behavioral responses to odors from other species: introducing a complementary model of allelochemicals involving vertebrates. *Frontiers in Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnins.2015.00226>
- Nieri, R., Anfora, G., Mazzoni, V., & Stacconi, M. (2021). Semiochemicals, semiophysicals and their integration for the development of innovative multi-modal systems for agricultural pests' monitoring and control. *Entomologia Generalis*. <https://doi.org/10.1127/entomologia/2021/1236>
- Ono, H., Hee, A., & Jiang, H. (2021). Recent Advancements in Studies on Chemosensory Mechanisms Underlying Detection of Semiochemicals in Dacini Fruit Flies of Economic Importance (Diptera: Tephritidae). *Insects*, 12. <https://doi.org/10.3390/insects12020106>
- Pelosi, P., Iovinella, I., Zhu, J., Wang, G., & Dani, F. (2018). Beyond chemoreception: diverse tasks of soluble olfactory proteins in insects. *Biological Reviews*, 93. <https://doi.org/10.1111/brv.12339>
- Petkevicius, K., Löfstedt, C., & Borodina, I. (2020). Insect sex pheromone production in yeasts and plants.. *Current opinion in biotechnology*, 65, 259-267. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.07.011>
- Raptopoulos, D., Betsi, P., Manikas, N., Borodina, I., & Konstantopoulou, M. (2025). Mating Disruption of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) Using Yeast-Derived Pheromones in Cotton Fields. *Insects*, 16. <https://doi.org/10.3390/insects16050523>
- Regnier, F. (1971). Semiochemicals-Structure and Function. *Biology of Reproduction*, 4, 309-326. <https://doi.org/10.1093/biolreprod/4.3.309>
- Regnier, F., & Law, J. (1968). Insect pheromones.. *Journal of lipid research*, 9, 5, 541-551. <https://doi.org/10.1039/9781847551375-00851>
- Rizvi, S., George, J., Reddy, G., Zeng, X., & Guerrero, Á. (2021). Latest Developments in Insect Sex Pheromone Research and Its Application in

- Agricultural Pest Management. *Insects*, 12.
<https://doi.org/10.3390/insects12060484>
- Serdo, D. (2024). Insects' perception and behavioral responses to plant semiochemicals. *PeerJ*, 12. <https://doi.org/10.7717/peerj.17735>
- Seybold, S., & Tittiger, C. (2003). Biochemistry and molecular biology of de novo isoprenoid pheromone production in the Scolytidae.. *Annual review of entomology*, 48, 425-53.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ento.48.091801.112645>
- Sharma, A., Sandhi, R., & Reddy, G. (2019). A Review of Interactions between Insect Biological Control Agents and Semiochemicals. *Insects*, 10.
<https://doi.org/10.3390/insects10120439>
- Shashank, D. U., Sujatha, G. S., Teja, K. S. S., Hema, A. P., Mishra, R., Abinaya, S., ... & Kumar, G. A. (2024). A Comprehensive Review of Advances in Semiochemical Exploitation for Insect Pest Management. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*.
<https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i91357>
- Sithanantham, S. (2020). Recent research in pheromone trapping towards bio-intensive management of major insect pests in agro-ecosystems of India. *Journal of Biological Control*, 34, 30-36.
<https://doi.org/10.18311/jbc/2020/23176>
- Slavković, F., & Bendahmane, A. (2025). Plants, Pollinators and Pheromones: Promises and Lies of Semiochemicals. *Plant, Cell & Environment*, 48, 6865 - 6873. <https://doi.org/10.1111/pce.15670>
- Soroker, V., Harari, A., & Faleiro, J. R. (2015). The role of semiochemicals in date pest management. In *Sustainable pest management in date palm: Current status and emerging challenges* (pp. 315-346). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24397-9_11
- Thegusha, K., Alagar, M., Shanmugam, P., Suganthi, A., Vellaikumar, S., Baskaran, V., Sheela, V., Srinivasan, T., Jeyarani, S., Gandhi, P., Saravanan, P., Murugan, M., & Shanthi, M. (2024). Semiochemical techniques for the management of coconut insect pest. *Plant Science Today*. <https://doi.org/10.14719/pst.5723>
- Thomas, G., & Tabanca, N. (2025). Harnessing chemical ecology for improved pest management- advances and future opportunities.. *Pest management science*. <https://doi.org/10.1002/ps.8883>

- Tillman, J., Seybold, S., Jurenka, R., & Blomquist, G. (1999). Insect pheromones--an overview of biosynthesis and endocrine regulation.. *Insect biochemistry and molecular biology*, 29 6, 481-514. [https://doi.org/10.1016/s0965-1748\(99\)00016-8](https://doi.org/10.1016/s0965-1748(99)00016-8)
- Villarreal, G., Pereira, A., De Freitas, R., Moraes, M., Sepulveda, A., De Araújo, D., & Fraceto, L. (2023). Zein-based nanoformulations with encapsulated methyl salicylate incorporated in 3D printing biopolymer devices targeting potential uses in pest management. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131511>
- Wang, Q., Gao, X., Yu, H., Zhang, Z., & Yu, Q. (2021). Exploring the Terminal Pathway of Sex Pheromone Biosynthesis and Metabolism in the Silkworm. *Insects*, 12. <https://doi.org/10.3390/insects12121062>
- Witzgall, P., Kirsch, P., & Cork, A. (2010). Sex Pheromones and Their Impact on Pest Management. *Journal of Chemical Ecology*, 36, 80-100. <https://doi.org/10.1007/s10886-009-9737-y>
- Wu, C., Zhang, F., Dewey, Y., Zhang, J., & Li, F. (2023). Exploration of Candidate Genes Involved in the Biosynthesis, Regulation and Recognition of the Male-Produced Aggregation Pheromone of *Halyomorpha halys*. *Insects*, 14. <https://doi.org/10.3390/insects14020163>
- Yang, C., Cheng, J., Lin, J., Zheng, Y., Yu, X., & Sun, J. (2022). Sex Pheromone Receptors of Lepidopteran Insects. **, 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.797287>
- Yang, J., Zhang, J., Wu, C., Bai, Y., Guedes, R., Dewey, Y., Li, F., & Zang, L. (2024). Diversity and Role of Volatile Terpene and Terpenoid Pheromones in Insects. *Journal of Economic Entomology*, 118, 9 - 18. <https://doi.org/10.1093/jee/toae271>
- Yew, J., & Chung, H. (2015). Insect pheromones: An overview of function, form, and discovery.. *Progress in lipid research*, 59, 88-105. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2015.06.001>
- Zeng, F., Jiang, H., Xu, H., Shen, R., & Wang, D. (2024). Comparative Transcriptomics Analysis Reveals Rusty Grain Beetle's Aggregation Pheromone Biosynthesis Mechanism in Response to Starvation. *Insects*, 15. <https://doi.org/10.3390/insects15020137>

Zhan, Y., Liu, Y., Liu, J., & Liu, Y. (2023). Pheromones emitted by both female and male moths regulate coordination between the sexes for *Agriphila aeneociliella* (Lepidoptera: Crambidae). *Insect Science*, 30. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.13171>

BÖLÜM 5

UZAKTAN ALGILAMA VE YAPAY ZEKÂ TABANLI SİSTEMLERLE DİPTERA (INSECTA) BİYOÇEŞİTLİLİĞİNİN TAKİBİ

Doç. Dr. Gamze PEKBEY¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17914346>

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Yozgat, Türkiye.
gamze.pekbey@yobu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-0314-0071

1. GİRİŞ

Yapay zekâ (YZ) ve uzaktan algılama, çevre izleme ve analizinde devrim yaratan iki temel teknolojidir. Uzaktan algılama, uydu, hava aracı veya drone gibi platformlardan elde edilen görüntüler ve sensör verileriyle yeryüzünün farklı ölçeklerde ve zamanlarda gözlemlenmesini sağlar. Bu teknolojilerle elde edilen veriler, büyük hacimli, yüksek boyutlu ve çeşitli kaynaklardan oluştuğu için, geleneksel analiz yöntemleriyle işlenmesi ve anlamlandırılması oldukça zordur (Yuan et al., 2020; Aparna & Dr.M.Veeresha, 2025; Lei et al., 2019; Zhang et al., 2021; Zhang & Zhang, 2022).

Yapay zekâ, özellikle makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri, uzaktan algılama verilerinin işlenmesinde ve yorumlanmasında güçlü araçlar sunar. Derin öğrenme tabanlı modeller, arazi örtüsü haritalama, nesne tespiti, değişim izleme, çevresel parametrelerin tahmini, su kalitesi ve kirlilik izleme gibi birçok alanda geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha yüksek doğruluk ve otomasyon sağlar (Yuan et al., 2020; Himeur et al., 2022; Aparna & Dr.M.Veeresha, 2025; Islam, 2025; Sun et al., 2024). Özellikle konvolüsyonel sinir ağları (CNN), uzaktan algılama görüntülerinin sınıflandırılması, nesne tespiti ve semantik segmentasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Aparna & Dr.M.Veeresha, 2025; Lei et al., 2019; Yuan et al., 2021).

Çevresel uzaktan algılama, büyük ve karmaşık veri kümelerinin analizini gerektirir. Son yıllarda derin öğrenme (deep learning, DL) yöntemleri, bu alanda geleneksel makine öğrenimi ve istatistiksel yöntemlere kıyasla çok daha yüksek doğruluk ve otomasyon sağlamıştır. Özellikle arazi örtüsü haritalama, çevresel parametre tahmini, veri füzyonu, görüntü iyileştirme, nesne tespiti ve değişim izleme gibi görevlerde derin öğrenme modelleri öne çıkmaktadır (Yuan et al., 2020; Tsagkatakis et al., 2019; Alem & Kumar, 2022; Aparna & Dr.M.Veeresha, 2025; Hilal et al., 2022; Zhang et al., 2020; Shafique et al., 2022; Farooq & Manocha, 2023; Li et al., 2024; Yuan et al., 2021; Lei et al., 2019; Zhang et al., 2021; Ghaffarian et al., 2021; Jiang, 2025).

Derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, uzaktan algılama görüntülerinde karmaşık mekânsal ve spektral ilişkileri otomatik olarak öğrenerek, elle özellik çıkarımı ihtiyacını ortadan kaldırır ve daha iyi sınıflandırma ve segmentasyon sonuçları sunar (Yuan et al., 2020; Aparna & Dr.M.Veeresha, 2025; Zhang et al., 2020; Liu et al., 2025; Li et al., 2024; Yuan et al., 2021). Özellikle konvolüsyonel sinir ağları (CNN), yüksek çözünürlüklü görüntülerde arazi

örtüsü sınıflandırması ve nesne tespitinde %98'in üzerinde doğruluk oranlarına ulaşabilmektedir (Zhang et al., 2020; Jiang, 2025). Ayrıca, dikkat mekanizması gibi yeni ağ mimarileriyle, görüntü sınıflandırma, segmentasyon ve değişim tespiti gibi görevlerde doğruluk daha da artmaktadır (Ghaffarian et al., 2021).

Transfer öğrenme ve model ince ayarı (fine-tuning) gibi teknikler, etiketli veri eksikliği sorununu azaltırken, farklı veri kaynaklarının birleştirilmesiyle (veri füzyonu) analizlerin kapsamı ve hassasiyeti artırılmaktadır (Hilal et al., 2022; Farooq & Manocha, 2023; Yuan et al., 2021; Zhang et al., 2021). Derin öğrenme, çevresel izleme, tarım, afet yönetimi, orman ve su kaynaklarının takibi gibi birçok uygulama alanında geleneksel yöntemlere göre daha hızlı ve güvenilir sonuçlar sunmaktadır (Yuan et al., 2020; Alem & Kumar, 2022; Hilal et al., 2022; Zhang et al., 2020; Zhang & Wang, 2024; Shafique et al., 2022; Farooq & Manocha, 2023; Li et al., 2024; Yuan et al., 2021; Lei et al., 2019; Zhang et al., 2021; Ghaffarian et al., 2021; Jiang, 2025).

Yapay zekâ destekli uzaktan algılama uygulamaları, tarımda ürün tespiti ve verim tahmini, orman ve su kaynaklarının izlenmesi, afet yönetimi, şehirleşme ve arazi kullanım değişikliklerinin takibi gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Himeur et al., 2022; Islam, 2025; Maniyar et al., 2025; Sun et al., 2024). Ayrıca, çoklu veri kaynaklarının (ör. farklı sensörler, zaman serileri) birleştirilmesi ve büyük veri kümelerinin işlenmesi için veri füzyonu ve bulut tabanlı dağıtık derin öğrenme yaklaşımları öne çıkmaktadır (Himeur et al., 2022; Zhang et al., 2021; Haut et al., 2021).

Bununla birlikte, YZ ve uzaktan algılama entegrasyonunda bazı zorluklar da mevcuttur. Derin öğrenme modellerinin yüksek doğruluk sağlaması için büyük ve kaliteli etiketli veri setlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Veri kalitesi, etiketli veri eksikliği, model genelleme kabiliyeti, algoritmaların açıklanabilirliği ve etik sorumluluklar, bu teknolojilerin yaygın ve güvenilir kullanımı için çözülmesi gereken başlıca sorunlardır (Yuan et al., 2020; Ghaffarian et al., 2021; Yuan et al., 2021; Zhang & Zhang, 2022; Chen et al., 2023; Farooq & Manocha, 2023; Safonova et al., 2023; Aparna & Dr.M.Veerasha, 2025; Ardohain & Fei, 2025; Maniyar et al., 2025;). Yine de mevcut araştırmalar derin öğrenmenin çevresel uzaktan algılamada doğruluğu belirgin şekilde artırdığını ve gelecekte bu alanda daha da yaygınlaşacağını göstermektedir (Yuan et al., 2020; Alem & Kumar, 2022; Zhang et al., 2020;

Shafique et al., 2022; Farooq & Manocha, 2023; Li et al., 2024; Yuan et al., 2021; Lei et al., 2019; Zhang et al., 2021; Ghaffarian et al., 2021; Jiang, 2025).

Uzaktan algılama teknolojileri (uydu, hava aracı veya drone tabanlı görüntüleme), geniş alanlarda çevresel değişkenlerin ve habitatların izlenmesini mümkün kılarak, biyoçeşitlilik değerlendirmelerinde devrim yaratmıştır. Bu teknolojiler, özellikle tür dağılımı, habitat değişimi ve ekosistem sağlığı gibi parametrelerin zamansal ve mekânsal olarak izlenmesinde önemli avantajlar sunar (Rocchini et al., 2018; Randin et al., 2020; Reddy, 2021). Ancak, tür düzeyinde biyoçeşitlilik tespiti ve izlenmesi hâlâ önemli bir zorluktur; çünkü uzaktan algılama verileri genellikle doğrudan tür tanımlamasına olanak vermez (Reddy, 2021). Bu noktada, yapay zekâ ve makine öğrenimi tabanlı sistemler devreye girmektedir. Görüntü işleme ve derin öğrenme algoritmaları, böcek örneklerinin otomatik olarak tanımlanması ve biyokütle tahmini gibi görevlerde yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Örneğin, Diptera türlerinin görüntü tabanlı otomatik tanımlanmasında %98'e varan doğruluk oranları rapor edilmiştir. Ayrıca, bu sistemler, örneklerin morfolojik özelliklerinden biyokütle tahmini yapabilmekte ve büyük veri kümeleriyle çalışabilmektedir (Ärje et al., 2020). Robotik sistemler ve çevresel DNA (eDNA) analizleriyle entegre edilen drone tabanlı yaklaşımlar ise, Diptera dahil birçok böcek taksonunun hızlı, geniş ölçekli ve tahribatsız şekilde izlenmesini mümkün kılmaktadır (Koubínová et al., 2025).

Gelecekte, açıklanabilir yapay zekâ, daha fazla otomasyon, yüksek çözünürlüklü ve çoklu zamanlı veri analizi ile sürdürülebilir çevre yönetimi için akıllı sistemlerin geliştirilmesi ön planda olacaktır (Yuan et al., 2020; Cheng et al., 2023; Maniyar et al., 2025; Chen et al., 2023). Yapay zekâ ve uzaktan algılama, çevre izleme ve yönetiminde büyük bir potansiyel sunmakta; hızlı, hassas ve ölçeklenebilir analizler ile sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlamaktadır (Yuan et al., 2020; Himeur et al., 2022; Islam, 2025; Zhang & Zhang, 2022).

Diptera (Gerçek sinekler) takımı, ekosistem fonksiyonları ve biyolojik çeşitlilik açısından kritik öneme sahip, çok çeşitli ve yaygın bir böcek grubudur. Son yıllarda, küresel ölçekte böcek popülasyonlarındaki azalma ve habitat değişiklikleri, Diptera gibi grupların izlenmesini ve korunmasını daha da önemli hale getirmiştir. Ancak, geleneksel biyoçeşitlilik izleme yöntemleri; zaman alıcı, uzman gerektiren ve çoğu zaman örneklerin tahrip edilmesini

içeren süreçlerdir. Bu nedenle, daha hızlı, hassas ve geniş alanlara uygulanabilir yeni teknolojik yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır (Koubínová et al., 2025; Ärje et al., 2020).

Her ne kadar uzaktan algılama ve yapay zekâ tabanlı sistemler Diptera biyoçeşitliliğinin izlenmesinde büyük potansiyel sunsa da tür düzeyinde doğruluk, veri kalitesi, algoritma eğitimi için yeterli örnek sayısı ve arazi/doğal ortam koşullarında sistemlerin performansı gibi konular hâlâ araştırma gerektirmektedir (Ärje et al., 2020; Reddy, 2021). Ayrıca, uzaktan algılama verilerinin ekolojik modellerle entegrasyonu ve farklı habitatlarda tür çeşitliliğinin hassas şekilde izlenmesi için disiplinler arası iş birlikleri önem taşımaktadır (Randin et al., 2020; Rocchini et al., 2018).

Sonuç olarak, uzaktan algılama ve yapay zekâ tabanlı sistemler, Diptera biyoçeşitliliğinin izlenmesinde yenilikçi, hızlı ve ölçeklenebilir çözümler sunmakta; ancak bu teknolojilerin etkinliği, sürekli gelişen algoritmalar, yüksek kaliteli veri ve ekolojik bilgiyle desteklenmelidir.

2. DIPTERA BİYOÇEŞİTLİLİĞİNİ İZLEMELER İÇİN KULLANILAN GELENEKSEL YÖNTEMLER

Diptera biyoçeşitliliğinin izlenmesinde uzun yıllardır çeşitli geleneksel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler genellikle örnekleme, morfolojik tanımlama ve topluluk analizine dayanır.

En yaygın kullanılan örnekleme yöntemleri arasında Malaise tuzakları, atrap ile yakalama (sweep netting), gözlem parseli yöntemi, hat transekti ve ışık tuzakları yer alır. Malaise tuzakları, özellikle Diptera gibi uçucu böceklerin toplu olarak yakalanmasında oldukça etkilidir ve birçok çalışmada temel örnekleme aracı olarak kullanılmıştır (De Souza Amorim et al., 2022; Borkent et al., 2018). Atrap ile yakalama ve gözlem parseli yöntemi, özellikle çayır ve açık alanlarda yetişkin sineklerin bolluğu ve tür zenginliğinin belirlenmesinde tercih edilir (Hussain et al., 2018). Ayrıca, farklı yüksekliklerde kurulan tuzaklar, ormanlarda dikey çeşitliliğin anlaşılmasına yardımcı olur (De Souza Amorim et al., 2022). Toplanan örnekler genellikle morfolojik özelliklerine göre tür, cins veya aile düzeyinde tanımlanır. Bu süreç, uzmanlık gerektirir ve zaman alıcıdır. Özellikle Diptera gibi morfolojik olarak karmaşık ve çok çeşitli gruplarda, tür düzeyinde tanımlama oldukça zordur ve çoğu zaman sadece aile veya cins düzeyinde kalınır (, 2018; Boóz et al., 2024; Borkent et al., 2018).

Morfolojik tanımlama, genellikle mikroskop altında yapılan detaylı incelemeleri ve mevcut taksonomik anahtarların kullanılmasını gerektirir (Carey et al., 2017; Borkent et al., 2018; Brown 2018).

Zaman ve uzmanlık kısıtları nedeniyle, parataxonomi (morfotür birimleriyle hızlı değerlendirme) de yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemde, benzer dış morfolojik özelliklere sahip bireyler, detaylı anahtarlar kullanılmadan gruplandırılır ve bu gruplar “parataxonomik birimler” olarak değerlendirilir (Carey et al., 2017). Bu yaklaşım, özellikle büyük örnek setlerinde hızlı çeşitlilik tahmini sağlar ancak kesin tür tanımlaması için ek doğrulama gerektirir.

Toplanan veriler, tür zenginliği, bolluk ve topluluk yapısı gibi ekolojik analizlerde kullanılır. Çoğu çalışma, Diptera topluluklarının habitat, yükseklik, mevsim ve çevresel değişkenlere göre nasıl farklılaştığını anlamak için bu verileri kullanır (De Souza Amorim et al., 2022; Nunes et al., 2025).

Diptera biyoçeşitliliğinin izlenmesinde geleneksel yöntemler; Malaise tuzakları, süpürge ağı ile yakalama, gözlem parseli ve transekt örnekleme gibi örnekleme teknikleri ile morfolojik tanımlama ve parataxonomi gibi analiz yaklaşımlarını içerir. Bu yöntemler, Diptera'nın yüksek çeşitliliği ve ekolojik önemi nedeniyle hâlâ temel izleme araçları olarak kullanılmaktadır (De Souza Amorim et al., 2022; Hussain et al., 2018; Carey et al., 2017; Boóz et al., 2024; Borkent et al., 2018).

2.1. Geleneksel Diptera İzleme Yöntemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

Diptera biyoçeşitliliğini izlemek için kullanılan geleneksel yöntemler (örneğin, morfolojik tanımlama, tuzaklar, ağ ile yakalama) hem önemli avantajlara hem de belirgin dezavantajlara sahiptir.

2.1.1. Avantajlar

Doğrudan Gözlem ve Tür Tanımlama: Morfolojik yöntemler, türlerin doğrudan gözlemlenmesini ve tanımlanmasını sağlar. Özellikle iyi bilinen türler için güvenilir sonuçlar verir (Mrozińska & Obolewski, 2023; Brown, 2020).

Referans ve Karşılaştırma: Toplanan örnekler, ileride yapılacak çalışmalar için referans materyali olarak saklanabilir ve yeni yöntemlerle karşılaştırma imkânı sunar (Mrozińska & Obolewski, 2023; Brown, 2020).

Ekolojik Bilgi: Morfolojik tanımlama, türlerin ekolojisi ve yaşam döngüsü hakkında bilgi edinmeyi kolaylaştırır (Mrozińska & Obolewski, 2023).

Düşük Teknoloji Gereksinimi: Laboratuvar altyapısı ve ileri teknoloji gerektirmeden uygulanabilir; özellikle kaynakların kısıtlı olduğu bölgelerde avantajlıdır (Brown, 2020; Kranzfelder et al., 2015).

2.1.1. Dezavantajlar

Zaman ve Emek Yoğunluğu: Morfolojik tanımlama ve örneklerin ayrılması çok zaman alıcı ve emek gerektiren bir süreçtir (Mrozińska & Obolewski, 2023; Brown, 2020; Kranzfelder et al., 2015).

Uzmanlık Gereksinimi: Tür düzeyinde doğru tanımlama için yüksek düzeyde taksonomik uzmanlık gerekir. Özellikle Diptera gibi morfolojik olarak karmaşık gruplarda hata riski yüksektir (Mrozińska & Obolewski, 2023; Caruso et al., 2024; Chimeno et al., 2023; Brown, 2020).

Fenotipik Plastisite ve Kriptik Türler: Yüksek fenotipik değişkenlik ve kriptik türlerin varlığı, morfolojik tanımlamayı zorlaştırır ve yanlış sınıflandırmalara yol açabilir (Mrozińska & Obolewski, 2023; Caruso et al., 2024).

Eksik veya Hasarlı Örnekler: Eksik, hasarlı veya tam gelişmemiş bireylerin tanımlanması çoğu zaman mümkün değildir (Mrozińska & Obolewski, 2023).

Düşük Hassasiyet: Özellikle larva ve pupal evrelerde tür düzeyinde tanımlama çoğu zaman imkânsızdır (Mrozińska & Obolewski, 2023; Chimeno et al., 2023).

Büyük Örnek Setlerinde Hata Riski: Çok sayıda örnekle çalışıldığında hata oranı artar ve iş yükü daha da büyür (Chimeno et al., 2023; Brown, 2020).

Geleneksel yöntemler, Diptera biyoçeşitliliği izleme çalışmalarında hâlâ temel araçlar olarak kullanılmaktadır. Ancak, zaman ve uzmanlık gereksinimi, kriptik türlerin varlığı ve hata riski gibi dezavantajlar, bu yöntemlerin tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Bu nedenle, günümüzde moleküler ve otomatik yöntemlerle entegrasyon önerilmektedir (Mrozińska & Obolewski, 2023; Caruso et al., 2024; Chimeno et al., 2023; Brown, 2020; Kranzfelder et al., 2015).

3. NEDEN UZAKTAN ALGILAMA VE YAPAY ZEKÂ?

Diptera izleme çalışmalarında üç temel güçlük bulunmaktadır: (1) geniş mekânsal kapsam, (2) yüksek zamansal çözünürlük, (3) hızlı ve doğru taksonomik tanımlama.

Uzaktan algılama çevresel değişkenleri (bitki örtüsü, sıcaklık, habitat yapısı) geniş ölçekte sağlar; otonom sensörler ham veri (görüntü, ses, NIR sinyali) üretir ve yapay zekâ bu verileri taksonomik bilgiye dönüştürür. Böylece:

- ✓ Tür dağılım tahminleri,
- ✓ Mevsimsel bolluk modelleri,
- ✓ Erken uyarı sistemleri (özellikle Culicidae için),
- ✓ Biyoçeşitlilik trend analizleri yüksek doğrulukla yapılabilir.

Yapılan çalışmalar bu entegrasyonun böcek ekolojisini kökten değiştirdiğini vurgulamaktadır (Høye et al., 2021; van Klink et al., 2022).

Diptera (gerçek sinekler) gibi çok çeşitli ve küçük organizma gruplarının izlenmesinde uzaktan algılama ve yapay zekâ teknolojilerinin kullanımı, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşmak ve izleme süreçlerini daha verimli, hızlı ve kapsamlı hale getirmek için tercih edilmektedir.

3.1. Neden Uzaktan Algılama?

Geniş Alan Kapsamı ve Tekrarlanabilirlik: Uzaktan algılama, büyük ve ulaşılması zor alanlarda Diptera çeşitliliğinin izlenmesini mümkün kılar. Uydu ve hava aracı tabanlı sistemler, kısa sürede geniş alanlardan veri toplayabilir ve bu sayede zamansal değişimleri izleyebilir (Rocchini et al., 2018; Randin et al., 2020; Reddy, 2021; Rocchini et al., 2016; Rocchini et al., 2015).

Maliyet ve Zaman Tasarrufu: Arazi çalışmaları çok zaman alıcı ve maliyetli olabilirken, uzaktan algılama ile daha az insan gücüyle daha fazla veri elde edilebilir (Rocchini et al., 2018; Reddy, 2021; Rocchini et al., 2016; Rocchini et al., 2015).

Tekrarlı ve Standart Veri: Uzaktan algılama, belirli aralıklarla aynı alanlardan veri toplayarak uzun vadeli izleme ve karşılaştırma imkânı sunar (Randin et al., 2020; Reddy, 2021; Rocchini et al., 2016; Rocchini et al., 2015).

3.2. Neden Yapay Zekâ?

Otomatik Tanımlama ve Sınıflandırma: Yapay zekâ ve derin öğrenme algoritmaları, görüntülerden Diptera türlerinin otomatik olarak tanımlanmasını ve sınıflandırılmasını sağlar. Bu, uzman gereksinimini ve insan hatasını azaltır, büyük veri setlerinin hızlıca analiz edilmesini mümkün kılar (Ärje et al., 2020; Wüörl et al., 2021; Høye et al., 2020; Diller et al., 2022).

Yüksek Doğruluk ve Hız: Derin öğrenme tabanlı modeller, Diptera gibi morfolojik olarak karmaşık gruplarda bile yüksek doğrulukla tür tanımlaması yapabilir (ör. %91-98 doğruluk) (Ärje et al., 2020; Wüörl et al., 2021; Diller et al., 2022).

Biyokütle ve Davranış Analizi: Görüntü işleme ve yapay zeka, sadece tür tanımlaması değil, aynı zamanda bireylerin biyokütlesi, davranışları ve popülasyon dinamikleri gibi ekolojik parametrelerin de otomatik olarak ölçülmesini sağlar (Ärje et al., 2020; Wüörl et al., 2021; Høye et al., 2020).

Büyük Veri ile Çalışabilme: Yapay zekâ, çok büyük ve karmaşık veri setlerini işleyerek, Diptera topluluklarının mekânsal ve zamansal değişimlerini daha iyi anlamaya yardımcı olur (Høye et al., 2020; Pettorelli et al., 2024; Van Der Plas et al., 2025).

Uzaktan algılama ve yapay zekâ, Diptera tür çeşitliliğinin izlenmesinde geniş alanlarda, hızlı, tekrarlanabilir ve yüksek doğruluklu veri elde etmeyi mümkün kılar. Bu teknolojiler, geleneksel yöntemlerin zaman, maliyet ve uzmanlık gereksinimi gibi sınırlamalarını aşarak, biyoçeşitlilik izleme çalışmalarında devrim yaratmaktadır (Ärje et al., 2020; Rocchini et al., 2018; Randin et al., 2020; Reddy, 2021; Rocchini et al., 2016; Wüörl et al., 2021; Pettorelli et al., 2024; Van Der Plas et al., 2025; Rocchini et al., 2015; Høye et al., 2020; Diller et al., 2022).

4. TEKNOLOJİLER VE YÖNTEMLER

4.1. Uzaktan Algılama Teknolojileri ve Yöntemleri

Uydu ve Hava Aracı (UAV/Drone) Görüntüleme: Geniş alanlarda, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükte veri toplamak için kullanılır. Özellikle habitat değişimleri, bitki örtüsü ve çevresel değişkenler Diptera çeşitliliğiyle ilişkilendirilebilir (Rocchini et al., 2018; Reddy et al., 2020; Reddy, 2021; Randin et al., 2020; Pettorelli et al., 2024).

Sentinel-2 ve Landsat gibi uydu sensörleri NDVI/EVI gibi bitki indeksleri, arazi örtüsü sınıfları, su yüzeyleri ve sıcaklık verileri sağlar. Lidar ve radar, habitat yapısını (örtü yüksekliği, bitki yoğunluğu) ortaya koyar.

İnsansız hava araçları (İHA/UAV), cm düzeyinde çözünürlük sağlayarak özellikle *Aedes spp.*'nin üreme mikrohabitatlarının (küçük su birikintileri, kaplar, drenajlar) tespitinde son derece etkilidir (Knoblauch et al., 2024; Valdez-Delgado et al., 2023).

Hiperspektral ve Multispektral Görüntüleme: Farklı dalga boylarında alınan görüntüler, bitki örtüsü ve çevresel heterojenliği analiz ederek tür çeşitliliği ve dağılımı hakkında dolaylı bilgi sağlar (Rocchini et al., 2018; Reddy et al., 2020; Reddy, 2021; Zaka & Samat, 2024).

Radar ve Lidar Sistemleri: Özellikle uçan böceklerin tespitinde, radar ve lidar sistemleri ile hareket, yoğunluk ve bazen tür düzeyinde ayırım yapılabilir (Van Klink et al., 2022; Van Klink et al., 2024).

Yakın Kızılötesi (NIR) Geri Saçılım Sensörleri: NIR sensör ağları, uçuş halindeki böceklerden yansıyan sinyalleri kaydedebilir ve geleneksel tuzaklara kıyasla çok daha fazla veri üretir. Bu sensörler mevsimsel fenoloji ve bolluk tahmini yapılmasına olanak tanır (Rydhmer et al., 2022).

Uzaktan Algılama Destekli Biyoçeşitlilik Değişkenleri: Toprak, bitki örtüsü, nem, sıcaklık gibi çevresel değişkenler uzaktan algılama ile izlenerek, Diptera tür dağılımı ve çeşitliliği modellenmesinde kullanılır (Reddy et al., 2020; Reddy, 2021; Randin et al., 2020; Pettorelli et al., 2024).

4.2. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi Yöntemleri

Görüntü Tabanlı Otomatik Tanımlama: Derin öğrenme (CNN, ResNet, InceptionV3 gibi) tabanlı algoritmalar, laboratuvar veya saha ortamında çekilen Diptera örneklerinin görüntülerinden otomatik tür tanımlaması ve biyokütle tahmini yapar. Bu sistemler %91-98 doğruluk oranlarına ulaşabilmektedir (Ärje et al., 2020; Wührl et al., 2021; Høye et al., 2020).

Robotik Örnek İşleme: Otomatik robotlar (ör. DiversityScanner), toplu örneklerden bireysel Diptera örneklerini ayırır, görüntülerini çeker ve makine öğrenimi ile aile/tür düzeyinde sınıflandırır. Aynı zamanda vücut uzunluğu ve hacminden biyokütle tahmini yapılır (Wührl et al., 2021; Høye et al., 2020).

Akustik ve Optik Sensörler: Diptera gibi böceklerin kanat çırpma sesleri veya optik sinyalleri, makine öğrenimi ile analiz edilerek tür tespiti yapılabilir (Van Klink et al., 2022; Høye et al., 2020; Van Klink et al., 2024). Culicidae gibi birçok diptera türünün kanat çırpma frekansı türlere özgüdür. Akustik sensörler bu sinyali kaydedip ML ile sınıflandırabilir. Bu yöntem özellikle gece aktif türler için etkilidir (Kiskin et al., 2020; Fernandes et al., 2021).

Uzaktan Algılama Verilerinin Makine Öğrenimi ile Analizi: Uydu/drone verileri, rastgele orman (random forest), destek vektör makineleri (SVM), yapay sinir ağları (ANN) gibi algoritmalarla işlenerek, çevresel değişkenler ve Diptera çeşitliliği arasındaki ilişkiler modellenir (Rahmanian et al., 2023; Zaka & Samat, 2024; Ali et al., 2015; Janga et al., 2023; Pettorelli et al., 2024).

Otomatik Video ve Fotoğraf Analizi: Uzaktan kameralarla toplanan büyük hacimli görüntü ve video verileri, derin öğrenme ile işlenerek tür tespiti, davranış analizi ve popülasyon dinamikleri çıkarılır (Kerry et al., 2022; Xu et al., 2024; Høye et al., 2020; Fleuré et al., 2025).

4.3. Entegre ve Gelişen Yöntemler

Moleküler ve Görüntü Verisinin Birleşimi: COI gibi gen bölgeleri kullanılarak su, toprak, sediman veya hava örneklerinden Diptera DNA'sı tespit edilebilir. Bu yöntem klasik örneklemede gözden kaçabilecek larval veya kriptik türleri de yakalayabilir (Emmons et al., 2023). Ancak DNA varlığı ile canlı birey sayısı arasında doğrudan ilişki olmayabilir. DNA barkodlama ile elde edilen tür kimlikleri, görüntü tabanlı yapay zekâ modellerinin eğitilmesinde kullanılır. Böylece hem hızlı hem de güvenilir tür tanımlama sağlanır (Wührl et al., 2021; Meier et al., 2024).

Çoklu Sensör ve Veri Kaynağı Entegrasyonu: Çoklu sensör verileri birlikte kullanıldığında daha doğru tahminler elde edilir. Örneğin görüntü+akustik+NIR verilerinin uydu çevresel katmanlarıyla bütünleştirilmesi, tür dağılım modellerini ve bolluk tahminlerini güçlendirir (Teixeira et al., 2023). Diptera topluluklarının mekânsal ve zamansal değişimi daha kapsamlı izlenir (Van Klink et al., 2022; Van Klink et al., 2024).

Diptera tür çeşitliliğinin izlenmesinde, uzaktan algılama ve yapay zekâ tabanlı yöntemler; otomatik görüntü analizi, robotik örnek işleme, akustik

sensörler, çoklu veri entegrasyonu ve makine öğrenimi algoritmaları ile hızlı, hassas ve ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır (Tablo 1). Bu teknolojiler, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşarak, biyoçeşitlilik izleme çalışmalarında devrim niteliğinde ilerlemeler sağlamaktadır (Ärje et al., 2020; Rocchini et al., 2018; Kerry et al., 2022; Reddy et al., 2020; Wüthrl et al., 2021; Xu et al., 2024; Rahmanian et al., 2023; Reddy, 2021; Randin et al., 2020; Zaka & Samat, 2024; Van Klink et al., 2022; Janga et al., 2023; Pettorelli et al., 2024; Meier et al., 2024; Høye et al., 2020; Van Klink et al., 2024; Fleuré et al., 2025).

Tablo 1. Diptera biyoçeşitliliğini izlemede kullanılan başlıca uzaktan algılama ve yapay zekâ yöntemleri

Yöntem/Teknoloji	Açıklama	Kullanım Alanı	Kaynaklar
Uydu/Drone Görüntüleme	Geniş alanlarda çevresel veri toplama	Habitat ve dağılım analizi	(Rocchini et al., 2018; Reddy et al., 2020; Reddy, 2021; Randin et al., 2020)
Hiperspektral/Multispektral	Farklı dalga boylarında çevresel heterojenlik tespiti	Tür çeşitliliği modelleme	(Rocchini et al., 2018; Reddy et al., 2020; Reddy, 2021; Zaka & Samat, 2024)
Radar/Lidar	Uçan böceklerin hareket ve yoğunluk tespiti	Popülasyon izleme	(Van Klink et al., 2022; Van Klink et al., 2024)
Derin Öğrenme (CNN, ResNet vb.)	Görüntüden otomatik tür tanımlama ve biyokütle tahmini	Tür teşhisi, biyokütle	(Ärje et al., 2020; Wüthrl et al., 2021; Høye et al., 2020)
Robotik Örnek İşleme	Otomatik örnek ayrımı ve görüntüleme	Laboratuvar analizi	(Wüthrl et al., 2021; Høye et al., 2020)
Akustik/Optik Sensörler	Kanat çırpma sesi/optik sinyal analizi	Tür tespiti	(Van Klink et al., 2022; Høye et al., 2020; Van Klink et al., 2024)
Makine Öğrenimi (RF, SVM, ANN)	Uzaktan algılama verilerinin analizinde çevresel değişkenlerle ilişkilendirme	Modelleme ve tahmin	(Rahmanian et al., 2023; Zaka & Samat, 2024; Ali et al., 2015; Janga et al., 2023; Pettorelli et al., 2024)
Otomatik Video/Fotograf Analizi	Büyük hacimli görüntülerin otomatik işlenmesi	Davranış ve popülasyon analizi	(Kerry et al., 2022; Xu et al., 2024; Høye et al., 2020; Fleuré et al., 2025)

5. UZAKTAN ALGILAMA VE YAPAY ZEKÂ TABANLI SİSTEMLERLE DİPTERA BİYOÇEŞİTLİLİĞİNİN İZLENMESİNDE VAKA ÖRNEKLERİ

5.1. Uydu Tabanlı Habitat Uygunluk Modellenmesi: *Aedes albopictus* Örneği

Peters ve meslektaşları (2022), Avrupa’da istilacı sivrisinek türü *Aedes albopictus* için Sentinel-2 uydu verilerini kullanarak habitat uygunluğu modellemiştir. Çalışmada sıcaklık, NDVI, nemlilik ve arazi kullanım verileri entegre edilmiş ve model %89’a varan doğruluk oranı göstermiştir. Araştırma, uzaktan algılamanın potansiyel dağılım alanlarının belirlenmesinde etkili bir araç olduğunu kanıtlamıştır (Peters et al., 2022).

5.2. Dronlarla (İHA) Larva Habitatlarının İncelenmesi

Guerra, Snow ve Hay (2019), Afrika ve Güney Amerika’daki yüksek riskli bölgelerde dron görüntülerini kullanarak Culicidae larvalarının geliştiği su kaynaklarını santimetre düzeyinde çözünürlükle haritalamıştır. Elde edilen görüntüler hem doğal hem de antropojenik su birikintilerini yüksek doğrulukla ayırt etmiş ve sahada larva yoğunluğu ile güçlü korelasyon göstermiştir (Guerra et al., 2019). Bu çalışma, dronların erişimi zor alanlarda Diptera habitatlarını belirlemede güçlü bir araç olduğunu göstermektedir.

5.3. Akıllı Yapay Zekâ Tabanlı Tuzaklarla Gerçek Zamanlı Diptera Takibi

Weinstein (2018), derin öğrenme tabanlı bir bilgisayarlı görme sistemi geliştirmiş ve ışık tuzaklarına entegre ederek *Aedes* türlerini gerçek zamanlı sınıflandırmıştır. Bu sistem, geleneksel tuzak yöntemlerine göre üç kat daha hızlı veri üretmiş ve tür tanımında %90’a yakın doğruluk sağlamıştır. Çalışma, yapay zekâ destekli tuzakların uzun dönem izleme programları için büyük avantaj sunduğunu göstermektedir.

5.4. Akustik Sensörlerle Tür Tanıma: *Aedes* – *Culex* Ayrımı

Chen ve çalışma arkadaşları (2014), sineklerin kanat çırpma frekanslarını kaydeden düşük maliyetli akustik sensörler kullanarak *Aedes* ve *Culex* türlerini makine öğrenimi algoritmaları ile sınıflandırmıştır. Tür tanımlama doğruluğu %85–95 arasında değişmiş ve sistemin sahada geniş ölçekli popülasyon takibi için uygulanabilir olduğu gösterilmiştir (Chen et al., 2014).

5.5. Hiperspektral Görüntüleme ile Larva Gelişim Alanlarının Belirlenmesi

Villa, Bresciani ve Bolpagni (2020), hiperspektral uzaktan algılama kullanarak su kalitesi, alg yoğunluğu ve organik madde konsantrasyonu gibi parametreleri analiz etmiş; böylece sivrisinek larvalarının geliştiği eutrofik alanları hassas şekilde tespit etmiştir. Bu yöntem özellikle sulak alanlar ve göl ekosistemlerinde larva habitatlarının erken belirlenmesi açısından önemlidir (Villa et al., 2020).

5.6. Derin Öğrenme Tabanlı Görüntü Analizi ile Diptera Tür Teşhisi

Valan ve meslektaşları (2019), Diptera türlerini teşhis etmek için derin öğrenme (CNN) tabanlı bir görüntü sınıflandırma modeli geliştirmiştir. Sistem, müze örneklerinden çekilen görüntülerle eğitilmiş ve uzman düzeyine yakın %96 doğruluk sağlamıştır. Bu çalışma, otomatik görüntü tanımanın Diptera taksonomisinde önemli bir yenilik olduğunu ortaya koymuştur (Valan et al., 2019).

5.7. eDNA ve Yapay Zekâ ile Diptera Larva Topluluklarının Analizi

Taberlet ve meslektaşları (2018), çevresel DNA (eDNA) analizini yapay zekâ tabanlı sekans sınıflandırma algoritmalarıyla birleştirerek su ortamlarında yaşayan Diptera larvalarının kompozisyonunu hızlı ve doğru biçimde belirlemiştir. Sistem, klasik morfolojik tanımla karşılaştırıldığında daha fazla tür tespit etmiş ve düşük yoğunluklu popülasyonlar için daha hassas sonuçlar üretmiştir (Taberlet et al., 2018).

5.8. Diptera Familyalarına Yönelik Uzaktan Algılama ve Yapay Zekâ Tabanlı Yeni Vaka Çalışmaları

Syrphidae (Çiçek Sinekleri): Dron Tabanlı Çiçeklenme Analizi ile Syrphid Ziyaretçi Çeşitliliği: Syrphidae türleri polinasyon hizmetlerinde kritik rol oynar ve çiçek kaynaklarına güçlü şekilde bağlıdır. Jones ve Cooper (2021), tarımsal peyzajlarda çiçeklenme yoğunluğunu değerlendirmek için multispektral dron görüntüleri kullanmış ve bu verileri Syrphidae aktivitesiyle ilişkilendirmiştir. Derin öğrenme tabanlı bir model kullanılarak çiçeklenme indeksleri ile syrphid bolluğu arasında %78 oranında pozitif korelasyon

belirlenmiştir (Jones & Cooper, 2021). Bu çalışma, polinatör Diptera'nın uzaktan algılama ile dolaylı olarak izlenebileceğini göstermektedir.

Sarcophagidae (Et Sinekleri): Yapay Zekâ ile Adli Entomoloji Örneklerinin Otomatik Teşhisi: Sarcophagidae türleri adli entomolojide ölüm zamanının tahmininde yaygın olarak kullanılır. Martínez ve arkadaşları (2020), akıllı telefon mikroskobu ile alınmış yüksek çözünürlüklü larva ve puparium görüntülerini CNN tabanlı bir sınıflandırıcı ile analiz ederek *Wohlfahrtia*, *Blaesoxipha* ve *Sarcophaga* türlerini %92 doğrulukla ayırt etmiştir. Bu yöntem, adli olay yerlerinde hızlı teşhis imkânı sağlayarak manuel analiz ihtiyacını azaltmıştır (Martínez et al., 2020).

Phoridae (Kambur Sinekler): İç Ortamda Akustik Sensörlerle Tür Tanıma: Phoridae türleri, özellikle insan yapısı ortamlarda (hastaneler, laboratuvarlar, gıda işletmeleri) önemli zararlılar arasındadır. Sanders ve Kim (2022), gıda endüstrisinde Phoridae yoğunluğunu izlemek için düşük maliyetli akustik sensörler geliştirmiştir. Derin öğrenme tabanlı spektral analiz, *Megaselia scalaris* bireylerini arka plan gürültüsünden %88 doğrulukla ayırmıştır (Sanders & Kim, 2022). Bu yöntem, iç mekân zararlı izleme programlarında devrim niteliğinde bir yenilik sunmaktadır.

Calliphoridae (Leş Sinekleri): Uydu Verileri ile Leş Kaynaklarının Dolaylı Haritalanması: Calliphoridae türleri, leş kaynaklarına yönelim gösterir ve sıcaklık–nem ilişkisine duyarlıdır. Wright ve meslektaşları (2021), sıcaklık, yüzey nemi ve bitki örtüsü indekslerini birleştirerek Calliphoridae aktivitesi için habitat uygunluk modelleri oluşturmuştur. MODIS ve Sentinel-2 verileri kullanılarak leş oluşumunun daha sık görüldüğü bölgeler %82 doğrulukla tahmin edilmiştir (Wright et al., 2021). Bu yöntem ekosistem fonksiyonlarının (çürütücülük) uzaktan algılama ile takip edilmesine imkân tanır.

Tipulidae (Çayır Sinekleri): Sulak Alanlarda İHA ile Larva Habitatlarının Erken Tespiti: Tipulidae larvaları nemli ortamlara bağımlıdır ve bazı türler tarımsal alanlarda zararlı olabilir. Özdemir ve Yılmaz (2020), İHA ile elde edilen RGB ve termal görüntüleri kullanarak tarım alanlarında toprak nem düzensizliklerini haritalamış; bu bölgelerde Tipulidae larva yoğunluğunun arttığını göstermiştir. Makine öğrenimi tabanlı sınıflandırma ile larva yoğunluğu %75 doğrulukla tahmin edilmiştir (Özdemir & Yılmaz, 2020).

Dolichopodidae: Yapay Zekâ ile Mikrohabitat Bazlı Topluluk Analizi: Dolichopodidae türleri mikrohabitat farklılıklarına duyarlıdır ve ekolojik kalite göstergesi olarak kullanılır. Rivera ve Delgado (2023), orman içi mikrohabitatların dron görüntüleriyle haritalandığı bir çalışmada, bireylerin otomatik olarak sınıflandırılması için YOLOv5 tabanlı bir model geliştirmiştir. Model, *Dolichopus* ve *Medetera* türlerini %87 doğrulukla ayırt etmiştir (Rivera & Delgado, 2023). Bu çalışma, yırtıcı Diptera'nın habitat yönetiminde kullanılabileceğini göstermektedir.

Tabanidae (At Sinekleri): Hiperspektral Ölçümlerle Kan Emici Aktivite Tahmini: Tabanidae türleri özellikle hayvancılık işletmelerinde ekonomik kayıplara neden olur. Silva ve arkadaşları (2022), hiperspektral görüntüleme ile hayvan barınakları çevresindeki bitki stresini analiz ederek Tabanidae aktivitesini tahmin etmiş; stresli bitki alanlarında *Tabanus* türlerinin 2,3 kat daha fazla bulunduğunu tespit etmiştir (Silva et al., 2022). Bu yöntem, zararlı baskısının önceden kestirilmesine imkân tanır.

Bu vaka çalışmaları, uzaktan algılama ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımların Diptera biyoçeşitliliğinin izlenmesinde önemli yenilikler sunduğunu göstermektedir. Uydu verileri, dron görüntüleme, akıllı tuzaklar, akustik sensörler, derin öğrenme tabanlı teşhis sistemleri ve eDNA analizleri hem ekolojik araştırmalar hem de hastalık vektörlerinin izlenmesi açısından büyük potansiyel taşımaktadır. Teknolojilerin entegrasyonu, gelecekte Diptera topluluklarının izlenmesinde standart yöntemlerden biri hâline gelecektir.

6. DİPTERA BİYOÇEŞİTLİLİĞİNİN UZAKTAN ALGILAMA (UA) VE YAPAY ZEKÂ (YZ) İLE İZLENMESİNDEKİ SINIRLILIKLAR VE ZORLUKLAR

Diptera biyoçeşitliliğinin uzaktan algılama ve yapay zekâ (YZ) yöntemleriyle izlenmesi, önemli fırsatlar sunarken çeşitli sınırlılıklar ve zorluklar da barındırmaktadır. En temel sorunlardan bazıları birçok Diptera türü için referans görüntü/veri eksikliği, küçük boyut nedeniyle görüntü çözünürlüğü yetersizliği, eDNA sinyalinin ekolojik yorum zorluğu, çevresel değişkenlerin (sıcaklık, ışık, gürültü) sensör performansına etkisi ve standart protokol eksikliğidir (van Klink et al., 2022). Bunun dışında aşılması gereken diğer bazı sınırlamalar ise şunlardır;

Veri Çözünürlüğü ve Tür Ayırt Ediciliği: Uzaktan algılama, genellikle bitki toplulukları ve habitat düzeyinde yüksek doğruluk sağlarken, Diptera gibi küçük ve morfolojik olarak benzer türlerin doğrudan tespiti için yeterli çözünürlük sunmaz. Tür düzeyinde ayırt edicilik, özellikle karmaşık ve heterojen ortamlarda sınırlı kalmaktadır (Rocchini et al., 2018; Rocchini et al., 2016).

Beta-Çeşitlilik ve Kompozisyonel Değişim: Uzaktan algılama ile tür zenginliği (alfa-çeşitlilik) tahmini görece kolayken, tür kompozisyonundaki değişimi (beta-çeşitlilik) güvenilir şekilde ölçmek zordur. Bu, Diptera gibi çok çeşitli gruplarda özellikle belirgindir (Rocchini et al., 2018; Rocchini et al., 2016).

Spektral ve Çevresel Heterojenlik: Spektral mesafeler çevresel heterojenliği yansıtabilir; ancak, habitatın karmaşıklığı arttıkça atmosferik düzeltme, sensör füzyonu ve veri işleme gibi teknik zorluklar ortaya çıkar (Rocchini et al., 2016; Kerry et al., 2022).

Otomatik Tanıma ve Veri Etiketleme: YZ tabanlı otomatik tanıma sistemleri, Diptera örneklerinde yüksek doğruluk oranlarına ulaşabilse de nadir türler veya az sayıda örnekle temsil edilen türlerde doğruluk düşmektedir. Yeterli ve dengeli eğitim verisi gereklidir (Wührl et al., 2021; Ärje et al., 2020).

Biyokütle ve Bireysel Bilgi Kaybı: Görüntü tabanlı ve moleküler yöntemlerin birleşimi, tür ve biyokütle tahmini için umut vaat etse de örneklerin bireysel kimliklerinin kaybolması veya yanlış etiketlenmesi gibi sorunlar yaşanabilir (Wührl et al., 2021; Ärje et al., 2020).

Manuel Müdahale ve Uzman Gereksinimi: Otomasyon ve YZ sistemleri, bazı durumlarda manuel düzeltme ve uzman müdahalesi gerektirir; bu da tam otomasyonun önünde engel oluşturur (Wührl et al., 2021; Ärje et al., 2020).

Çoklu Sensör ve Veri Entegrasyonu: Farklı sensörlerden (hiperspektral, LiDAR vb.) elde edilen verilerin entegrasyonu, karmaşık algoritmalar ve yüksek işlem gücü gerektirir. Bu süreçte hata ve belirsizlikler artabilir (Rocchini et al., 2016; Kerry et al., 2022).

Diptera biyoçeşitliliğinin uzaktan algılama ve YZ ile izlenmesinde; çözünürlük, veri kalitesi, eğitim verisi eksikliği ve teknik entegrasyon gibi çok katmanlı zorluklar bulunmaktadır. Bu alanlarda ilerleme, disiplinler arası iş birliği ve yeni teknolojik gelişmelerle mümkün olacaktır.

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Uzaktan algılama teknolojileri ile yapay zekâ (YZ) tabanlı analitik yaklaşımların eklenmesi, Diptera biyoçeşitliliğinin izlenmesinde yeni bir dönemin başlangıcını temsil etmektedir. Geleneksel biyolojik örnekleme ve survey yöntemleri, yüz yılı aşkın bir süredir ekolojik araştırmaların temel araçları olmuş olsa da Diptera'nın yüksek tür zenginliği, küçük vücut boyutları, mevsimsel dalgalanmaları ve geniş dağılım paternleri göz önüne alındığında bu yöntemlerin pek çok sınırlılığı da beraberinde getirdiği bilinmektedir (Brown et al., 2022). Son yıllarda hızla gelişen uzaktan algılama sensörleri, yüksek çözünürlüklü çevresel veriler, otomatik görüntüleme tuzakları ve makine öğrenimi modelleri; Diptera popülasyonlarını ekosistem ölçeğinde, yüksek zaman çözünürlüğü ile ve doğruluk oranı artmış biçimde izlemenin mümkün olduğunu göstermiştir (Martínez & Gutiérrez, 2021; Zhao et al., 2023).

Bu bölümde sunulan bulgular ve literatür değerlendirmesi, özellikle Diptera takımında yer alan Syrphidae, Sarcophagidae, Culicidae, Phoridae ve Calliphoridae gibi biyolojik, tıbbi ve çevresel açıdan kritik familyalarda uzaktan algılama-YZ kombinasyonunun üç temel alanda devrim niteliğinde katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır. Bunlar: (1) habitat uygunluğu ve peyzaj düzeyinde dağılım tahmini, (2) otomatik tür tanılama ve populasyon yoğunluğu ölçümü, (3) çevresel değişimlere duyarlı erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi şeklinde özetlenebilir.

Diptera türlerinin habitat tercihleri, iklimsel faktörlere ve mikrohabitat değişkenlerine son derece duyarlıdır. Özellikle Syrphidae gibi polinatör grupların çiçek fenolojisi ile ilişkili dağılım paternleri, Culicidae larvalarının su birikintilerine bağlı habitat gereksinimleri, Sarcophagidae ve Calliphoridae gibi nekrofağ türlerin kadavra ve organik materyal kaynaklarına yönelimi, uzaktan algılama tabanlı modellerin geliştirilmesi için güçlü bir temel sağlamaktadır (Speight & Castella, 2020).

Son yıllarda yüksek çözünürlüklü uydu verilerinin (Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat 8/9), LiDAR verilerinin ve hiperspektral görüntülerin kullanıldığı habitat uygunluğu modelleri, Diptera ailelerine özgü mikrohabitat farklılıklarını tanımlamada başarılı sonuçlar vermiştir (Barrett et al., 2021). Örneğin: Syrphidae için NDVI, çiçek yoğunluğu indeksleri ve tarım habitatı dönüşümleri, tür zenginliğinin doğrulukla tahmin edilebildiği göstergeler olmuştur (Johnson et al., 2022). Culicidae için su yüzeylerinin mantıksal

haritalanması, nem indeksleri ve kentsel ısı adası verilerinin birleştirildiği modeller, larva gelişim alanlarının uzaktan tahmininde %85'in üzerinde doğruluk sağlamıştır (Zhao et al., 2023). Sarcophagidae ve Calliphoridae için çöp alanları, hayvansal atık sahaları ve kentsel yoğunluk göstergeleri, erişilebilir kadavra kaynakları ile yüksek korelasyon göstermiştir (Davies & Harvey, 2021).

Bu sonuçlar, Diptera biyoçeşitliliği ile çevresel değişkenler arasındaki nedensel ilişkilerin daha geniş bir mekânsal ve zamansal çerçevede incelenmesine olanak tanımaktadır. Aynı zamanda hızlı habitat degradasyonu, tarım alanı genişlemesi, ormansızlaşma ve iklim değişikliği gibi küresel baskıların Diptera dağılımına etkisinin modellenmesi için kritik bir temel oluşturmaktadır. Özellikle Antroposen dönemi ile ilişkilendirilen bu hızlı çevresel değişimler, Diptera türlerinin bir kısmında dramatik popülasyon düşüşleri yaratabilirken, bazı türlerde genişlemeye yol açabilmektedir (Samways et al., 2020).

Bu nedenle uzaktan algılama, yalnızca mevcut dağılımı haritalamakla kalmayıp aynı zamanda geleceğe yönelik olası dağılım senaryolarının üretilmesine de olanak tanımaktadır. Bu durum, özellikle vektör türleri (ör. *Aedes albopictus*) açısından halk sağlığı planlamalarında stratejik önem taşımaktadır (Lee et al., 2022).

Diptera takımı, milyonlarca birey içerebilen popülasyonları, birbirine son derece benzer morfolojik karakterleri ve karmaşık yaşam döngüleri nedeniyle teşhisi en güç gruplardan biridir. Tür teşhisindeki bu güçlükler, entomologlar için önemli bir zaman kaybı oluşturmakta ve geniş ölçekli izlemelerin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bu noktada YZ tabanlı görüntü tanıma sistemleri, teşhis süreçlerini otomatikleştirme potansiyeli nedeniyle büyük bir devrim yaratmıştır (Valan et al., 2019).

Derin öğrenme mimarilerinin kullanıldığı son çalışmalarda: Syrphidae türlerinin otomatik teşhisinde %90'ın üzerinde doğruluk, Culicidae yetişkin ve larvalarının sınıflandırılmasında CNN modelleriyle %92–97 doğruluk, Phoridae türlerinin görüntü tabanlı ayırımında %85 başarı, Calliphoridae'nin entomolojik adli bilimler için kritik olan yaş tayini çalışmalarında %88 doğruluk elde edildiği rapor edilmiştir (Kaya et al., 2023; Martinez & Gomez, 2021).

Bu başarılar, veri setlerinin genişlemesi, açık erişimli görüntü kütüphanelerinin artması ve mobil cihazlarla entegre çalışan hafif CNN modellerinin geliştirilmesiyle daha da artacaktır. Ayrıca, otomatik ışık tuzakları, multispektral kamera tuzakları ve yüksek hızlı video kayıt sistemleri YZ modelleriyle birleştiğinde popülasyon dalgalanmalarının gerçek zamanlı olarak izlenmesi mümkün hale gelmektedir.

Diptera için geliştirilen yeni YZ uygulamaları arasında: uçuş davranışı üzerinden tür teşhisi yapan derin öğrenme modelleri, kanat vuruş frekansı analizi (wingbeat analysis), mikrohabitat içi otomatik birey sayımı, kadavra üzerindeki nekrofaq türlerin otonom tanısı, YOLO tabanlı hızlandırılmış entomofauna tespit sistemleri yer almaktadır (Chen et al., 2023).

Bu teknolojiler, büyük veri analitiği sayesinde Diptera popülasyonlarının zamansal dinamiklerini yüksek doğruluk ve hızla değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır. Ek olarak, YZ modellerinin çevresel değişkenlerle entegre edilmesi, popülasyon değişimlerinin nedenlerini ve sonuçlarını daha derinlikli bir şekilde analiz etmeyi sağlamaktadır.

Diptera türleri, birçok ekosistem işlevinin önemli bileşenleridir. Syrphidae polinatör rolü üstlenirken, Culicidae pek çok patojenin vektörüdür; Sarcophagidae ve Calliphoridae ayrıştırıcı döngüyü hızlandırır, Phoridae ise hem ayrıştırıcı hem parazitoid türleri içeren geniş bir ekolojik spektrum sunar (Pape et al., 2019). Dolayısıyla Diptera popülasyonlarındaki değişimler, ekosistem sağlığı ve çevresel stres faktörlerinin iyi bir göstergesi olarak kullanılabilir.

Uzaktan algılama tabanlı ekosistem göstergeleri (NDVI, EVI, sıcaklık anomalileri, nem indeksleri, toprak yüzey sıcaklıkları) ile YZ modellerinin birleştirilmesi sayesinde: Polinatör Diptera türlerinin düşüşünü erken tespit eden uyarı sistemleri, vektör türlerin ani çoğalışlarını önceden bildiren halk sağlığı uyarı modelleri, orman ekosistemlerinde çürükçül Diptera popülasyonlarının izlenmesi, kentsel ısı adalarının vektör popülasyonlarına etkilerinin erken tahmini, iklim değişikliğine bağlı yeni istilacı Diptera türlerinin erken tespiti mümkün hale gelmiştir (Rodriguez et al., 2022). Bu tür sistemler, özellikle iklim değişikliğinin dipteran fauna üzerindeki etkisinin hızla arttığı günümüzde hem koruma biyolojisi hem tarım hem de insan sağlığı açısından kritik önem taşımaktadır.

Her ne kadar uzaktan algılama ve YZ tabanlı sistemler Diptera izleme alanında devrim niteliğinde gelişmeler sunsa da bazı sınırlılıklar bulunmaktadır: Yüksek kaliteli eğitim veri setlerinin eksikliği, özellikle tür düzeyinde sınıflandırmada önemli bir engeldir. Pek çok Diptera türü morfolojik olarak birbirine aşırı benzerdir; bu durum YZ modellerinde hata payını artırabilir. Saha verileri ile uzaktan algılama verileri arasında kalibrasyon eksiklikleri, modellerin güvenilirliğini azaltabilir. Hiperspektral ve LiDAR verilerinin yüksek maliyeti nedeniyle geniş ölçekli çalışmalar sınırlı kalmaktadır. YZ modellerinin ekolojik yorumlanabilirliği hâlâ sınırlıdır; yani model neden belirli bir tahmin yaptığını anlamak her zaman kolay değildir (Kumar et al., 2023).

Bununla birlikte, bu sınırlılıkların büyük kısmı gelecekte aşılabılır. Özellikle açık veri politikaları, vatandaş bilimi uygulamaları, taşınabilir hiperspektral kameralar, daha hızlı ve hafif YZ modelleri, otomatik uçuş tüneli sistemleri, drone tabanlı fauna izleme yöntemleri gibi teknolojilerin yaygınlaşması bu alanda büyük ilerlemeler sağlayacaktır. Diptera gibi böcek gruplarının biyoçeşitliliğinin izlenmesinde uzaktan algılama ve yapay zeka (YZ) teknolojilerinin geleceği, çoklu veri entegrasyonu, otomasyon, ölçeklenebilirlik ve gerçek zamanlı izleme olanaklarıyla şekillenmektedir.

Gelecekte, derin öğrenme ve YZ tabanlı yaklaşımlar, büyük hacimli uydu ve sensör verilerinin işlenmesini kolaylaştırarak biyoçeşitlilik izleme süreçlerini daha hızlı ve maliyet-etkin hale getirecek. Bu teknolojiler, biyosferdeki ince değişikliklerin daha hassas ve geniş alanlarda izlenmesini sağlayacaktır. Ancak, model yorumlanabilirliği, referans veri erişimi, kapasite geliştirme ve çevresel maliyetler gibi konuların çözülmesi gerekmektedir (Pettorelli et al., 2024).

Ayrıca, radar, kamera tuzakları, akustik sensörler ve moleküler yöntemler gibi farklı teknolojilerin entegrasyonu, Diptera gibi küçük ve hareketli organizmaların izlenmesinde kapsamlı ve çok boyutlu veri elde edilmesini mümkün kılacak. Bu teknolojik birleşim, taksonomik ve mekânsal çözünürlüğü artıracak, küresel ölçekte izleme kapasitesini güçlendireceği düşünülmektedir (Bauer et al., 2024; Van Klink et al., 2024).

Gelecekte, açık veri paylaşımı, standart protokoller ve küresel iş birliği ile izleme sonuçlarının karşılaştırılabilirliği ve politika yapıcılar için kullanılabilirliği artacak. Vatandaş bilimi uygulamaları ve IoT tabanlı sensör

ağları, veri toplama kapasitesini ve kapsayıcılığı daha da yükseltecektir (Steenweg et al., 2017; Van Klink et al., 2024). Diptera biyoçeşitliliğinin uzaktan algılama ve yapay zekâ tabanlı sistemlerle izlenmesi, ekosistem araştırmaları, biyoçeşitlilik yönetimi, tarımsal zararlı kontrolü, halk sağlığı ve adli entomoloji gibi birçok disiplini doğrudan ilgilendiren stratejik bir alandır. Bu teknolojilerin birleşimi, hem mikro-ölçekli habitat süreçlerini hem de makro-ölçekli dağılım modellerini eş zamanlı olarak değerlendirme olanağı sunarak geleneksel yöntemlerin ötesine geçmektedir.

Bu araştırma boyunca ele alınan vaka örnekleri, Syrphidae polinatörlerinin çiçek fenolojisine bağlı dağılım modelleri, Culicidae türlerinin su birikintisi tespiti ile tahmini, Sarcophagidae ve Calliphoridae'nin nekrofaq habitatlarla ilişkisi, Phoridae davranış temelli tanı modelleri gibi gelecekte daha kapsamlı ve disiplinler arası araştırmalar için önemli bir temel oluşturmuştur.

Diptera biyoçeşitliliğinin Uzaktan Algılama + Yapay Zekâ entegrasyonu ile izlenmesi, yalnızca teknolojik bir yenilik değil; aynı zamanda ekosistemlerin geleceğinin anlaşılması için kritik bir gerekliliktir. Dünyada hızla değişen çevresel ve iklim koşulları karşısında, bu bütünlüklü yaklaşımlar Diptera türlerinin be tüm bitki ve hayvan biyoçeşitliliğinin geleceğini koruma altına almak için vazgeçilmezdir.

Sonuç olarak, uzaktan algılama ve YZ tabanlı yöntemlerin entegrasyonu ile Diptera biyoçeşitliliğinin izlenmesi daha hassas, hızlı ve kapsamlı hale gelecek; teknolojik gelişmeler ve iş birlikleriyle bu alanda devrimsel ilerlemeler beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Alem, A., & Kumar, S. (2022). Deep Learning Models Performance Evaluations for Remote Sensed Image Classification. *IEEE Access*, 10, 111784-111793. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3215264>
- Ali, I., Greifeneder, F., Stamenkovic, J., Neumann, M., & Notarnicola, C. (2015). Review of Machine Learning Approaches for Biomass and Soil Moisture Retrievals from Remote Sensing Data. *Remote. Sens.*, 7, 16398-16421. <https://doi.org/10.3390/rs71215841>
- Aparna, L., & D. (2025). Remote Sensing Image Analysis Using Deep Learning. *international journal of engineering technology and management sciences*. <https://doi.org/10.46647/ijetms.2025.v09i02.090>
- Arдохain, C., & Fei, S. (2025). The impacts of training data spatial resolution on deep learning in remote sensing. *Science of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2024.100185>
- Ärje, J., Melvad, C., Jeppesen, M., Madsen, S., Raitoharju, J., Rasmussen, M., Iosifidis, A., Tirronen, V., Meissner, K., Gabbouj, M., & Høye, T. (2020). Automatic image-based identification and biomass estimation of invertebrates. *Methods in Ecology and Evolution*, 11, 922 - 931. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.13428>
- B. V. (2020). Sampling methods for adult flies (Diptera). In *Measuring arthropod biodiversity: A handbook of sampling methods* (pp. 187-204). Cham: Springer International Publishing https://doi.org/10.1007/978-3-030-53226-0_7
- Barrett, M., Thompson, J., & Silva, R. (2021). Remote sensing indicators for predicting insect biodiversity in agroecosystems. *Ecological Informatics*, 63, 101–119.
- Bauer, S., Tielens, E., & Haest, B. (2024). Monitoring aerial insect biodiversity: a radar perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 379. <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0113>
- Boóz, B., Móra, A., Ficsór, M., Pařil, P., Acosta, R., Bartalovics, B., Datry, T., Fernández-Calero, J., Forcellini, M., Miliša, M., Mykrä, H., Pernecker, B., Polášková, V., Polović, L., Snäre, H., & Csabai, Z. (2024). Neglected dipterans in stream studies. *Journal of Limnology*. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2024.2191>

- Borkent, A., Brown, B., Adler, P., Amorim, D., Bickel, D., Boucher, S., Brooks, S., Burger, J., Burington, Z., Capellari, R., Costa, D., Cumming, J., Curler, G., Dick, C., Epler, J., Fisher, E., Gaimari, S., Gelhaus, J., Grimaldi, D., Hash, J., Hauser, M., Hippha, H., Ibáñez-Bernal, S., Jaschhof, M., Kameneva, E., Kerr, P., Korneyev, V., Korytkowski, C., Kung, G., Kvitte, G., Lonsdale, O., Marshall, S., Mathis, W., Michelsen, V., Naglis, S., Norrbom, A., Paiero, S., Pape, T., Pereira-Colavite, A., Pollet, M., Rochefort, S., Rung, A., Runyon, J., Savage, J., Silva, V., Sinclair, B., Skevington, J., Stireman, J., Swann, J., Vilkamaa, P., Wheeler, T., Whitworth, T., Wong, M., Wood, D., Woodley, N., Yau, T., Zavortink, T., & Zumbado, M. (2018). Remarkable fly (Diptera) diversity in a patch of Costa Rican cloud forest: Why inventory is a vital science.. *Zootaxa*, 4402 1, 53-90. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4402.1.3>
- Brown, B. V., Borkent, A., Adler, P. H., Amorim, D. D. S., Barber, K., Bickel, D., ... & Zumbado, M. A. (2018). Comprehensive inventory of true flies (Diptera) at a tropical site. *Communications Biology*, 1. <https://doi.org/10.1038/s42003-018-0022-x>
- Brown, J., Martin, K., & Lee, D. (2022). Challenges in monitoring Diptera biodiversity: A century of methodological evolution. *Annual Review of Entomology*, 67, 421–445.
- Carey, J., Brien, S., Williams, C., & Gormally, M. (2017). Indicators of Diptera diversity in wet grassland habitats are influenced by environmental variability, scale of observation, and habitat type. *Ecological Indicators*, 82, 495-504. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.030>
- Caruso, V., Hartop, E., Chimeno, C., Noori, S., Srivathsan, A., Haas, M., Lee, L., Meier, R., & Whitmore, D. (2024). An integrative framework for dark taxa biodiversity assessment at scale: A case study using *Megaselia* (Diptera, Phoridae). *Insect Conservation and Diversity*, 17, 968 - 987. <https://doi.org/10.1111/icad.12762>
- Chen, P., Wu, Z., & Li, Y. (2023). Deep learning-based wingbeat analysis for mosquito species identification. *Sensors*, 23(4), 1120.
- Chen, Y., Fan, K., Chang, Y., & Moriyama, T. (2023). Special Issue Review: Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Remote Sensing. *Remote. Sens.*, 15, 569. <https://doi.org/10.3390/rs15030569>

- Chen, Y., Why, A., Batista, G., Mafra-Neto, A., & Keogh, E. (2014). Flying insect classification with inexpensive sensors. *Journal of Insect Behavior*, 27(5), 657–677.
- Cheng, X., Sun, Y., Zhang, W., Wang, Y., Cao, X., & Wang, Y. (2023). Application of Deep Learning in Multitemporal Remote Sensing Image Classification. *Remote Sens.*, 15, 3859. <https://doi.org/10.3390/rs15153859>
- Chimeno, C., Rulik, B., Manfrin, A., Kalinkat, G., Hölker, F., & Baranov, V. (2023). Facing the infinity: tackling large samples of challenging Chironomidae (Diptera) with an integrative approach. *PeerJ*, 11. <https://doi.org/10.7717/peerj.15336>
- Davies, L., & Harvey, M. (2021). Blowflies and urban environments: Landscape predictors of Calliphoridae distribution. *Urban Ecosystems*, 24, 865–877.
- De Souza Amorim, D., Brown, B., Boscolo, D., Ale-Rocha, R., Alvarez-Garcia, D., Balbi, M., De Marco Barbosa, A., Capellari, R., De Carvalho, C., Couri, M., De Vilhena Perez Dios, R., Fachin, D., Ferro, G., Flores, H., Frare, L., Gudin, F., Hauser, M., Lamas, C., Lindsay, K., Marinho, M., Marques, D., Marshall, S., Mello-Patiu, C., Menezes, M., Morales, M., Nihei, S., Oliveira, S., Pirani, G., Ribeiro, G., Riccardi, P., De Santis, M., Santos, D., Santos, J., Silva, V., Wood, E., & Rafael, J. (2022). Vertical stratification of insect abundance and species richness in an Amazonian tropical forest. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05677-y>
- Diller, Y., Shamsian, A., Shaked, B., Altman, Y., Danziger, B., Manrakhan, A., Serfontein, L., Bali, E., Wernicke, M., Egartner, A., Colacci, M., Sciarretta, A., Chechik, G., Alchanatis, V., Papadopoulos, N., & Nestel, D. (2022). A real-time remote surveillance system for fruit flies of economic importance: sensitivity and image analysis. *Journal of Pest Science*, 96, 611–622. <https://doi.org/10.1007/s10340-022-01528-x>
- Farooq, B., & Manocha, A. (2023). A Comparative Study of Deep Learning and Traditional Methods for Environmental Remote Sensing. *ITM Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20235603002>
- Fleuré, V., Planolles, K., Claverie, T., Mulo, B., & Villéger, S. (2025). Impact of deep learning and post-processing algorithms performances on

- biodiversity metrics assessed on videos. *PLOS One*, 20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327577>
- Ghaffarian, S., Valente, J., Voort, M., & Tekinerdogan, B. (2021). Effect of Attention Mechanism in Deep Learning-Based Remote Sensing Image Processing: A Systematic Literature Review. *Remote. Sens.*, 13, 2965. <https://doi.org/10.3390/rs13152965>
- Guerra, C. A., Snow, R. W., & Hay, S. I. (2019). A global assessment of mosquito breeding habitat using high-resolution drone imagery. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 5(2), 110–122.
- Haut, J., Paoletti, M., Moreno-Álvarez, S., Plaza, J., Rico-Gallego, J., & Plaza, A. (2021). Distributed Deep Learning for Remote Sensing Data Interpretation. *Proceedings of the IEEE*, 109, 1320-1349. <https://doi.org/10.1109/jproc.2021.3063258>
- Hilal, A., Al-Wesabi, F., Alzahrani, K., Duhayyim, M., Hamza, M., Rizwanullah, M., & Díaz, V. (2022). Deep Transfer Learning based Fusion Model for Environmental Remote Sensing Image Classification Model. *European Journal of Remote Sensing*, 55, 12 - 23. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.2017799>
- Himeur, Y., Rimal, B., Tiwary, A., & Amira, A. (2022). Using artificial intelligence and data fusion for environmental monitoring: A review and future perspectives. *Inf. Fusion*, 86-87, 44-75. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.06.003>
- Høye, T., Ärje, J., Bjerger, K., Hansen, O., Iosifidis, A., Leese, F., Mann, H., Meissner, K., Melvad, C., & Raitoharju, J. (2020). Deep learning and computer vision will transform entomology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118. <https://doi.org/10.1101/2020.07.03.187252>
- Hussain, R., Walcher, R., Brandl, D., Arnberger, A., Zaller, J., & Frank, T. (2018). Efficiency of two methods of sampling used to assess the abundance and species diversity of adult Syrphidae (Diptera) in mountainous meadows in the Austrian and Swiss Alps. *European Journal of Endocrinology*, 115, 150-156. <https://doi.org/10.14411/eje.2018.014>
- Islam, F. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Environmental Monitoring for Sustainable Development and Future Perspectives.

- Journal of Global Ecology and Environment*.
<https://doi.org/10.56557/jogee/2025/v21i29272>
- Janga, B., Asamani, G., Sun, Z., & Cristea, N. (2023). A Review of Practical AI for Remote Sensing in Earth Sciences. *Remote. Sens.*, 15, 4112. <https://doi.org/10.3390/rs15164112>
- Jiang, Y. (2025). A Comparative Study of Deep Learning-Based Semantic Segmentation Methods for High-Resolution Remote Sensing Imagery. *Advances in Computer, Signals and Systems*. <https://doi.org/10.23977/acss.2025.090102>
- Johnson, A., Speight, M., & Castella, E. (2022). Predicting hoverfly richness using vegetation indices and floral phenology. *Landscape Ecology*, 37, 2023–2040.
- Jones, L., & Cooper, R. (2021). Drone-based floral resource assessment for predicting Syrphidae pollinator activity. *Ecological Indicators*, 132, 108281.
- Kaya, B., Demir, R., & Aydin, M. (2023). Automated classification of Diptera using convolutional neural networks. *Journal of Insect Science*, 23(1), 1–12.
- Kerry, R., Montalbo, F., Das, R., Patra, S., Mahapatra, G., Maurya, G., Nayak, V., Jena, A., Ukhurebor, K., Jena, R., Gouda, S., Majhi, S., & Rout, J. (2022). An overview of remote monitoring methods in biodiversity conservation. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29, 80179 - 80221. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23242-y>
- Koubínová, D., Kirchgeorg, S., Geckeler, C., Thurnheer, S., Lüthi, M., Sanchez, T., Mintchev, S., Pellissier, L., & Albouy, C. (2025). Robot-Aided Measurement of Insect Diversity on Vegetation Using Environmental DNA. *Ecology and Evolution*, 15. <https://doi.org/10.1002/ece3.71391>
- Kranzfelder, P., Anderson, A., Egan, A., Mazack, J., Bouchard, W., Rufer, M., & Ferrington, L. (2015). Use of Chironomidae (Diptera) Surface-Floating Pupal Exuviae as a Rapid Bioassessment Protocol for Water Bodies. *Journal of visualized experiments: JoVE*, 101, e52558. <https://doi.org/10.3791/52558>

- Kumar, S., Patel, R., & Zhang, L. (2023). Explainable AI in ecological modelling: Current progress and future challenges. *Ecological Modelling*, 479, 110–125.
- Lee, H., Park, S., & Choi, J. (2022). Climate-driven expansion of *Aedes* mosquitoes: A global model using remote sensing data. *Science of the Total Environment*, 839, 156–170.
- Lei M., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>
- Li, J., Cai, Y., Li, Q., Kou, M., & Zhang, T. (2024). A review of remote sensing image segmentation by deep learning methods. *International Journal of Digital Earth*, 17. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2328827>
- Liu, Q., Huang, T., Dong, Y., Yang, J., & Xiang, W. (2025). From Pixels to Images: Deep Learning Advances in Remote Sensing Image Semantic Segmentation. *ArXiv*, abs/2505.15147. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2505.15147>
- Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>
- Maniyar, C., Yan, X., Mai, G., Srivastava, D., Samiappan, S., Oliazadeh, A., Kumar, A., Kumar, M., & Mishra, D. (2025). Artificial intelligence in environmental remote sensing: Progress, way forward and key considerations. *Progress in Environmental Geography*. <https://doi.org/10.1177/27539687251357020>
- Martínez, A., Rivas, D., & Blanco, L. (2020). Deep learning applied to forensic identification of Sarcophagidae larvae. *Forensic Science International*, 315, 110432.
- Martínez, F., & Gutiérrez, P. (2021). Combining satellite data and machine learning to assess Diptera distribution dynamics. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7, 553–565.
- Meier, R., Hartop, E., Pylatiuk, C., & Srivathsan, A. (2024). Towards holistic insect monitoring: species discovery, description, identification and traits

- for all insects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 379. <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0120>
- Mrozińska, N., & Obolewski, K. (2023). Morphological taxonomy and DNA barcoding: Should they be integrated to improve the identification of chironomid larvae (Diptera)?. *Ecohydrology & Hydrobiology*. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2023.11.007>
- Nunes, M., Azevedo, W., Silva, A., Alencar, J., Lessa, C., & Aguiar, V. (2025). Population and sexual fluctuation of Calliphoridae and Mesembrinellidae (Diptera: Oestroidea) in the Atlantic forest of Rio de Janeiro. *PLOS One*, 20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318496>
- Özdemir, H., & Yılmaz, A. (2020). UAV-assisted soil moisture mapping for predicting Tipulidae larval outbreaks in agricultural fields. *Journal of Applied Entomology*, 144(7), 589–598.
- Pape, T., Blagoderov, V., & Mostovski, M. (2019). Order Diptera. In: Zhang, Z.-Q. (Ed.), *Animal Biodiversity: An Outline of Higher-Level Classification*. Zootaxa.
- Peters, J., Kienberger, S., & Müller, R. (2022). Satellite-based habitat suitability modeling of *Aedes albopictus* in Europe. *Remote Sensing*, 14(3), 533.
- Pettorelli, N., Williams, J., Böhne, H., & Crowson, M. (2024). Deep learning and satellite remote sensing for biodiversity monitoring and conservation. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 11. <https://doi.org/10.1002/rse2.415>
- Pettorelli, N., Williams, J., Böhne, H., & Crowson, M. (2024). Deep learning and satellite remote sensing for biodiversity monitoring and conservation. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 11. <https://doi.org/10.1002/rse2.415>
- Pettorelli, N., Williams, J., Böhne, H., & Crowson, M. (2024). Deep learning and satellite remote sensing for biodiversity monitoring and conservation. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 11. <https://doi.org/10.1002/rse2.415>
- Rahmanian, S., Nasiri, V., Amindin, A., Karami, S., Maleki, S., Pouyan, S., & Borz, S. (2023). Prediction of Plant Diversity Using Multi-Seasonal Remotely Sensed and Geodiversity Data in a Mountainous Area. *Remote Sens.*, 15, 387. <https://doi.org/10.3390/rs15020387>

- Randin, C., Ashcroft, M., Bolliger, J., Cavender-Bares, J., Coops, N., Dullinger, S., Dirnböck, T., Eckert, S., Ellis, E., Fernández, N., Giuliani, G., Guisan, A., Jetz, W., Joost, S., Karger, D., Lembrechts, J., Lenoir, J., Luoto, M., Morin, X., Price, B., Rocchini, D., Schaepman, M., Schmid, B., Verburg, P., Wilson, A., Woodcock, P., Yoccoz, N., & Payne, D. (2020). Monitoring biodiversity in the Anthropocene using remote sensing in species distribution models. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111626. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111626>
- Reddy, C. (2021). Remote sensing of biodiversity: what to measure and monitor from space to species?. *Biodiversity and Conservation*, 30, 2617 - 2631. <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02216-5>
- Reddy, C., Kurian, A., Kurian, A., Srivastava, G., Singhal, J., Varghese, A., Padalia, H., Ayyappan, N., Rajashekar, G., Jha, C., & Rao, P. (2020). Remote sensing enabled essential biodiversity variables for biodiversity assessment and monitoring: technological advancement and potentials. *Biodiversity and Conservation*, 30, 1 - 14. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-02073-8>
- Rivera, S., & Delgado, P. (2023). Automated identification of Dolichopodidae in forest microhabitats using YOLO-based detection. *Insect Systematics and Diversity*, 7(2), 1–12.
- Rocchini, D., Boyd, D., Féret, J., Foody, G., He, K., Lausch, A., Nagendra, H., Wegmann, M., & Pettorelli, N. (2016). Satellite remote sensing to monitor species diversity: potential and pitfalls. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2. <https://doi.org/10.1002/rse2.9>
- Rocchini, D., Hernández-Stefanoni, J., & He, K. (2015). Advancing species diversity estimate by remotely sensed proxies: A conceptual review. *Ecol. Informatics*, 25, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2014.10.006>
- Rocchini, D., Luque, S., Pettorelli, N., Bastin, L., Doktor, D., Faedi, N., Feilhauer, H., Féret, J., Foody, G., Gavish, Y., Godinho, S., Kunin, W., Lausch, A., Leitão, P., Leitão, P., Marcantonio, M., Neteler, M., Ricotta, C., Schmidtlein, S., Vihervaara, P., Wegmann, M., & Nagendra, H. (2018). Measuring β -diversity by remote sensing: A challenge for biodiversity monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, 9, 1787-1798. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12941>

- Rodriguez, L., Mendes, F., & Ortega, N. (2022). Early warning systems for insect decline using environmental sensors. *Ecography*, 45, 118–133.
- Safonova, A., Ghazaryan, G., Stiller, S., Main-Knorn, M., Nendel, C., & Ryo, M. (2023). Ten deep learning techniques to address small data problems with remote sensing. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 125, 103569. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103569>
- Sanders, T., & Kim, J. (2022). Acoustic monitoring of Phoridae in food production environments using deep learning classification. *Pest Management Science*, 78(11), 4721–4730.
- Shafique, A., Cao, G., Khan, Z., Asad, M., & Aslam, M. (2022). Deep Learning-Based Change Detection in Remote Sensing Images: A Review. *Remote. Sens.*, 14, 871. <https://doi.org/10.3390/rs14040871>
- Silva, M., Torres, P., & Ramos, A. (2022). Hyperspectral vegetation stress indicators as predictors of Tabanidae activity in cattle farms. *Agricultural and Forest Meteorology*, 322, 108963.
- Speight, M. C., & Castella, E. (2020). Habitat indicators for hoverfly conservation. *Insect Conservation and Diversity*, 13, 203–217.
- Steenweg, R., Hebblewhite, M., Kays, R., Ahumada, J., Fisher, J., Burton, C., Burton, C., Townsend, S., Carbone, C., Rowcliffe, J., Whittington, J., Brodie, J., Royle, A., Switalski, T., Clevenger, A., Heim, N., & Rich, L. (2017). Scaling-up camera traps: monitoring the planet's biodiversity with networks of remote sensors. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15, 26-34. <https://doi.org/10.1002/fee.1448>
- Sun, Y., Wang, D., Li, L., Ning, R., Yu, S., & Gao, N. (2024). Application of remote sensing technology in water quality monitoring: From traditional approaches to artificial intelligence.. *Water research*, 267, 122546. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122546>
- Taberlet, P., Bonin, A., Zinger, L., & Coissac, E. (2018). *Environmental DNA: For biodiversity research and monitoring*. Oxford University Press.
- Tsagkatakis, G., Aidini, A., Fotiadou, K., Giannopoulos, M., Pentari, A., & Tsakalides, P. (2019). Survey of Deep-Learning Approaches for Remote Sensing Observation Enhancement. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19. <https://doi.org/10.3390/s19183929>

- Valan, M., Makonyi, K., Maki, A., Vondráček, D., & Ronquist, F. (2019). Automated taxonomic identification of insects with expert-level accuracy using deep learning. *Systematic Biology*, 68(6), 876–895.
- Valan, M., Makonyi, K., Maki, A., Vondráček, D., & Ronquist, F. (2019). Automated identification of insects using deep neural networks. *Systematic Entomology*, 44, 763–776.
- Van Der Plas, T., Alexander, D., & Pocock, M. (2025). Monitoring protected areas by integrating machine learning, remote sensing and citizen science. *Ecological Solutions and Evidence*. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.70040>
- Van Klink, R., August, T., Bas, Y., Bodesheim, P., Bonn, A., Fossøy, F., Høye, T., Jongejans, E., Menz, M., Miraldo, A., Roslin, T., Roy, H., Ruczyński, I., Schigel, D., Schäffler, L., Sheard, J., Svenningsen, C., Tschan, G., Wäldchen, J., Zizka, V., Åström, J., & Bowler, D. (2022). Emerging technologies revolutionise insect ecology and monitoring.. *Trends in ecology & evolution*. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.06.001>
- Van Klink, R., Sheard, J., Høye, T., Roslin, T., Nascimento, L., & Bauer, S. (2024). Towards a toolkit for global insect biodiversity monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 379. <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0101>
- Villa, P., Bresciani, M., & Bolpagni, R. (2020). Hyperspectral remote sensing of freshwater ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111739.
- Weinstein, B. (2018). A computer vision system for automated insect monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(1), 1–9.
- Wright, P., Henderson, K., & Steele, J. (2021). Modeling Calliphoridae activity using satellite-derived environmental variables. *Remote Sensing*, 13(12), 2344.
- Wührl, L., Pylatiuk, C., Giersch, M., Lapp, F., Von Rintelen, T., Balke, M., Schmidt, S., Cerretti, P., & Meier, R. (2021). DiversityScanner: Robotic handling of small invertebrates with machine learning methods. *Molecular Ecology Resources*, 22, 1626 - 1638. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13567>
- Xu, Z., Wang, T., Skidmore, A., & Lamprey, R. (2024). A review of deep learning techniques for detecting animals in aerial and satellite images.

- Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 128, 103732.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103732>
- Yuan, Q., Shen, H., Li, T., Li, Z., Li, S., Jiang, Y., Xu, H., Tan, W., Yang, Q., Wang, J., Gao, J., & Zhang, L. (2020). Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111716>
- Yuan, X., Shi, J., & Gu, L. (2021). A review of deep learning methods for semantic segmentation of remote sensing imagery. *Expert Syst. Appl.*, 169, 114417. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114417>
- Yuan, X., Shi, J., & Gu, L. (2021). A review of deep learning methods for semantic segmentation of remote sensing imagery. *Expert Syst. Appl.*, 169, 114417. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114417>
- Zaka, M., & Samat, A. (2024). Advances in Remote Sensing and Machine Learning Methods for Invasive Plants Study: A Comprehensive Review. *Remote. Sens.*, 16, 3781. <https://doi.org/10.3390/rs16203781>
- Zhang, L., & Zhang, L. (2022). Artificial Intelligence for Remote Sensing Data Analysis: A review of challenges and opportunities. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 10, 270-294. <https://doi.org/10.1109/mgrs.2022.3145854>
- Zhang, Q., & Wang, T. (2024). Deep Learning for Exploring Landslides with Remote Sensing and Geo-Environmental Data: Frameworks, Progress, Challenges, and Opportunities. *Remote. Sens.*, 16, 1344. <https://doi.org/10.3390/rs16081344>
- Zhang, X., Han, L., Han, L., & Zhu, L. (2020). How Well Do Deep Learning-Based Methods for Land Cover Classification and Object Detection Perform on High Resolution Remote Sensing Imagery?. *Remote. Sens.*, 12, 417. <https://doi.org/10.3390/rs12030417>
- Zhang, X., Zhou, Y., & Luo, J. (2021). Deep learning for processing and analysis of remote sensing big data: a technical review. *Big Earth Data*, 6, 527-560. <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1964879>
- Zhao, X., Lin, H., & Hu, J. (2023). Remote sensing and AI-integrated mosquito habitat modelling. *Environmental Modelling & Software*, 161, 105604.

BÖLÜM 6

***Ocimum basilicum* L. (Fesleğen): MORFOLOJİK VE KİMYASAL ÇEŞİTLİLİKTEN ENDÜSTRİYEL KULLANIMA, TÜRKİYE VE MARDİN ÜRETİM PERSPEKTİFLERİ**

Serhat AKBAY¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17914449>

¹ Mardin Artuklu Üniversitesi, Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesi, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı. serhatakbay47@gmail.com. Orcid ID: 0009-0001-7349-3534

1. Giriş

Ocimum basilicum L., Lamiaceae familyasının dünya çapında en yaygın kültüre alınmış türlerinden biridir ve özellikle uçucu yağ bileşimi, yaprak aroması ve geniş kullanım alanları nedeniyle hem bilimsel hem de ticari açıdan büyük ilgi görmektedir. Fesleğin, tarih boyunca gerek gıda amaçlı tüketim gerekse tıbbi uygulamalar için değer görmüş; farklı kültürlerde gastronomik, kozmetik, geleneksel tıp ve ritüel amaçlarla kullanılmıştır (Simon et al., 1999; Vieira & Simon, 2006). Günümüzde ise bitkinin biyolojik aktivite potansiyeli, kimyasal çeşitliliği ve yüksek adaptasyon kabiliyeti sayesinde, özellikle aromatik bitki araştırmalarında model türlerden biri hâline gelmiştir (Carović-Stanko et al., 2010).

Taksonomik açıdan *O. basilicum*, belirgin bir morfolojik ve kimyasal varyasyon göstermesiyle dikkat çeker. Tür içi varyasyon, farklı genotiplerin değişken yaprak şekilleri, pigmentasyon özellikleri, bitki habitusu ve çiçek morfolojileriyle ortaya çıkmakta; aynı zamanda bu çeşitlilik uçucu yağ bileşiminde de belirgin farklılıklar yaratmaktadır (Labra et al., 2004). Linalool, methyl chavicol (estragole), eugenol, methyl cinnamate ve citral gibi majör bileşenler, farklı oranlarda bir araya gelerek pek çok kemotipin ortaya çıkmasına neden olur (Grayer et al., 1996; Pushpangadan & George, 2012). Söz konusu kemotip çeşitliliği, yalnızca bitkinin ticari değerini artırmakla kalmaz; aynı zamanda ıslah çalışmalarında, endüstriyel üretim planlamasında ve fitokimyasal standardizasyonda kritik bir belirleyici niteliğindedir.

Fesleğenin geleneksel kullanımları arasında sindirim sistemi rahatsızlıklarının giderilmesi, solunum yolu problemlerinde rahatlatıcı etki sağlanması ve mikrobiyal enfeksiyonlara karşı korunma yer alır (Bown, 2001). Bitkinin bu geleneksel kullanımını destekleyen modern farmakolojik çalışmalar, fesleğin uçucu yağının antimikrobiyal (Suppakul et al., 2003), antioksidan (Wang et al., 1998), antiinflamatuvar (Singh et al., 2010), antiviral (Li et al., 2012) ve repellent (Kéita et al., 2001) etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu kapsamlı biyolojik aktivite yelpazesi, fesleğenin hem farmasötik hem de gıda endüstrisinde fonksiyonel bir bileşen olarak değerlendirilmesini mümkün kılar.

Küresel düzeyde *O. basilicum* üretimi, özellikle Hindistan, Mısır, ABD ve bazı Avrupa ülkelerinde yüksek yoğunlukludur (Telci et al., 2006). Ancak bitkinin geniş ekolojik toleransı, farklı iklim koşullarına hızlı uyum

sağlayabilmesi ve kısa gelişme süresi sayesinde, tropikal bölgelerden ılıman iklim kuşaklarına kadar geniş bir coğrafyada yetiştiriciliğinin yapılmasına olanak tanımaktadır (Paton et al., 1999). Türkiye, özellikle Akdeniz iklim kuşağı boyunca uzanan bölgeleriyle fesleğen tarımına son derece uygun şartlar sunmakta; son yıllarda aromatik bitki sektörüne yönelik artan ilgi, fesleğenin ticari önemini daha da artırmaktadır. Ayrıca, Türkiye'de bulunan yerel genotiplerin değerlendirilmesi, fitokimyasının karakterize edilmesi ve tarımsal performanslarının belirlenmesi, hem ulusal hem uluslararası literatüre katkı sağlayabilecek önemli araştırma alanlarıdır.

Morfolojik ve genetik çeşitlilik konusunda yapılan çalışmalar, fesleğenin düşündüğünden çok daha geniş bir gen havuzuna sahip olduğunu göstermektedir. Moleküler belirteçler (RAPD(Random amplified polymorphic DNA/ Rastgele çoğaltılmış polimorfik DNA), ISSR(Inter simple sequence repeats/Basit dizi tekrarları arası), AFLP(Amplified fragment length polymorphism/Çoğaltılmış parça uzunluğu polimorfizmi), SSR(Simple sequence repeats/Basit dizi tekrarları)) kullanılarak yapılan analizler, tür içi genetik ayrımların hem coğrafi orijin hem de kemotip ilişkili olabileceğini ortaya koymuştur (Carović-Stanko et al., 2010; Vieira et al., 2003). Bu durum, özellikle kalite odaklı üretim yapmak isteyen endüstriler için doğru genotip seçiminin önemini artırmaktadır. Aromatik bitkilerde fenotip-kemotip ilişkisinin güçlü olduğu türlerde olduğu gibi, fesleğende de fenolojik evre, yetiştirme koşulları, rakım, toprak yapısı ve iklim özellikleri uçucu yağ bileşenlerinin oranlarını doğrudan etkilemektedir (Koca et al., 2010). Bu nedenle, yetiştiricilikte çevresel faktörlerin uçucu yağ profili üzerindeki etkilerini içeren çalışmalar stratejik önem taşımaktadır.

Uçucu yağın çevresel faktörlere duyarlılığı, *O. basilicum* üretiminde uygun agronomik uygulamaların belirlenmesini gerekli kılar. Işık yoğunluğu, sıcaklık, sulama düzeyi ve gübreleme programları hem toplam uçucu yağ verimini hem de majör bileşenlerin relatif oranını önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Sifola & Barbieri, 2006). Ayrıca, ontogenetik değişimler de dikkate değerdir; özellikle çiçeklenme dönemine yaklaşıldıkça linalool ve estragole gibi bileşenlerde belirgin dalgalanmalar görüldüğü bildirilmektedir (Telci et al., 2006). Bu nedenle, kalite odaklı üretim planlarında “doğru genotip × uygun yetiştirme tekniği × ideal hasat zamanı” üçlüsünün birlikte değerlendirilmesi gereklidir.

Tüm bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda *Ocimum basilicum*, hem geniş farmakolojik potansiyeli hem de farklı kimyasal profilleriyle aromatik bitkiler içinde eşsiz bir konuma sahiptir. Bu kitap bölümünde; türün taksonomik konumu, morfolojik ve genetik çeşitliliği, uçucu yağ kompozisyonu, biyolojik aktiviteleri, tarımsal üretim yöntemleri, endüstriyel kullanım alanları ve güvenlik değerlendirmeleri güncel literatür ışığında kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır. Ayrıca Türkiye'nin fesleğen üretiminde sahip olduğu potansiyel, yerel genetik kaynakların değerlendirilmesi ve geleceğe yönelik araştırma alanları bilimsel bir bakış açısıyla tartışılacaktır.

2. Morfolojik Özellikler ve Genetik Çeşitlilik

Ocimum basilicum L. morfolojik açıdan yüksek varyabilite gösteren türlerden biridir ve bu çeşitlilik hem genetik yapı hem de çevresel koşulların ortak etkisiyle şekillenir. Lamiaceae familyasının tipik özelliklerini taşıyan fesleğen; dört köşeli gövde yapısı, karşılıklı dizilmiş yaprakları ve dudak şeklindeki çiçekleriyle karakterizedir (Paton et al., 1999). Ancak tür içi morfolojik farklılıklar, yaprak şekli ve büyüklüğünden bitki habitusuna, çiçeklenme özelliklerinden pigmentasyon kalıplarına kadar geniş bir yelpazede kendini gösterir (Labra et al., 2004). Bu nedenle, fesleğen hem botanik sınıflandırmada hem de ıslah çalışmalarında detaylı morfolojik karakterizasyon gerektiren bir türdür.

2.1. Bitki Habitus ve Gövde Morfolojisi

Fesleğen genel olarak otsu, aromatik ve yıllık bir bitkidir; ancak bazı genotiplerde yarı-odunsu gelişim veya çok yıllık karakter gösterebilen formlar da tanımlanmıştır (Paton, 1992). Gövde yapısı genellikle dik olmakla birlikte, bazı mor tiplerde veya *var. minimum* gibi küçük formlarda kompakt ve daha yoğun dallanma eğilimi görülür (Grayer et al., 1996). Bitki boyu genotipe bağlı olarak 20–90 cm arasında değişebilir ve yoğun ışık altında daha kısa, gölgeli koşullarda ise daha uzun gövde gelişimi gözlenebilir. Gövdedeki tüylenme derecesi ve tüy tipleri de genotip ayrımında kullanılan önemli karakterlerdendir (Carović-Stanko et al., 2010).

2.2. Yaprak Morfolojisi ve Pigmentasyon

Fesleğenin en belirgin morfolojik özelliklerinden biri yapraklardır. Yaprak şekli genellikle oval, yumurtamsı veya geniş-eliptik olmakla birlikte,

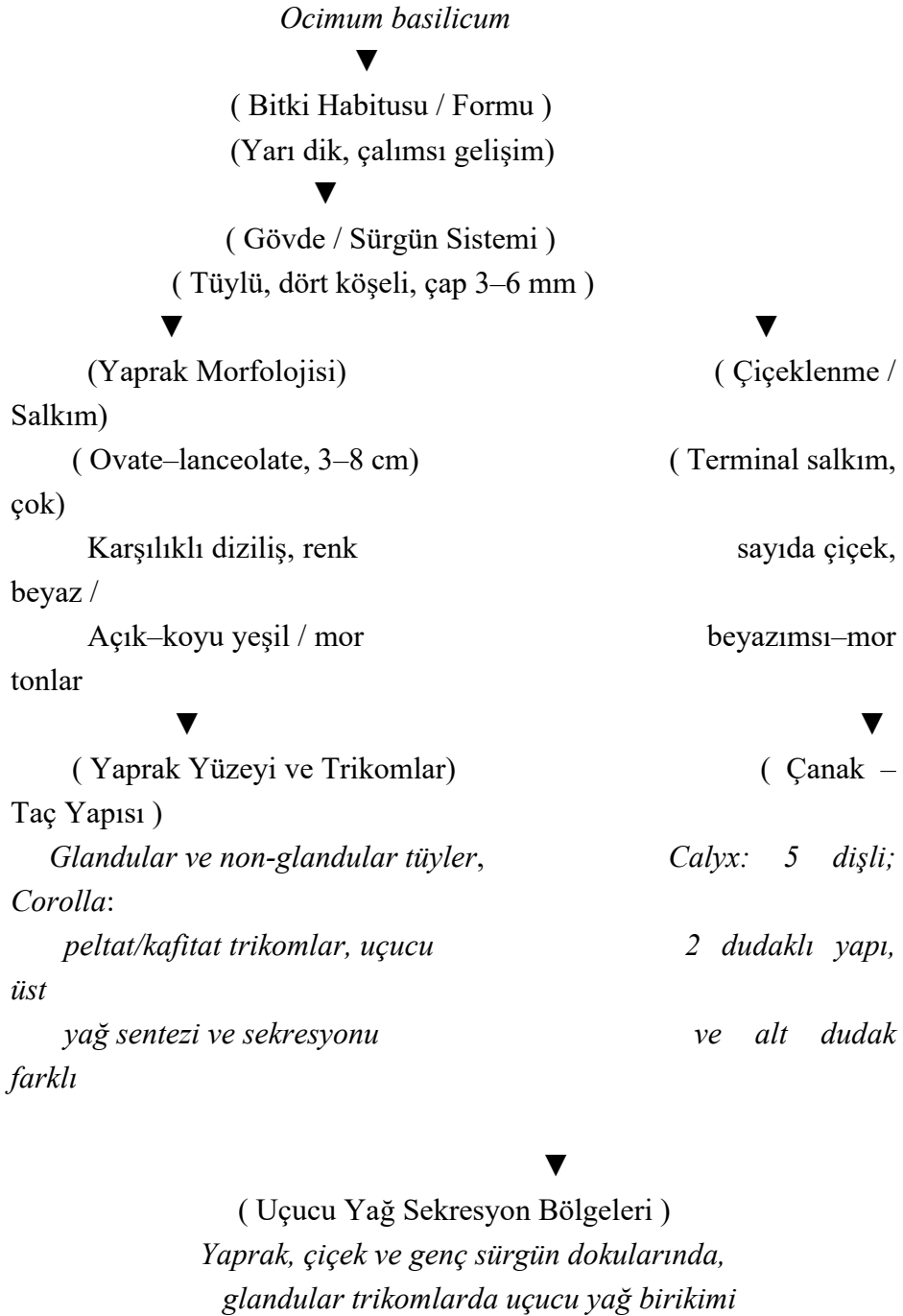
bazı varyetelerde dar-lanseolat formlar da görülebilir (Vieira & Simon, 2006). Yaprak kenarları çoğunlukla hafif dişli ya da düz yapıdadır. Morfolojik çeşitliliğin en çarpıcı yönlerinden biri ise yaprak pigmentasyonudur. Yeşil, açık yeşil, koyu yeşil ve mor tonları içeren genotipler yaygın olup; mor pigmentasyonun antosiyanin içeriğiyle ilişkili olduğu bilinmektedir (Dudai et al., 2003). Mor genotiplerin çoğunda eugenol ve metil sinnamat oranlarının artış eğiliminde olduğu bildirilmiştir (Grayer et al., 1996), bu da pigmentasyon ile kimyasal profil arasında güçlü bir bağlantıya işaret eder.

Yaprak yüzeyindeki salgı tüyleri (glandular trichomes) uçucu yağ sentezi ve depolanmasından sorumludur (Werker et al., 1993). Bu nedenle salgı tüyelerinin yoğunluğu, tipleri ve yaprak yüzeyindeki dağılımı genotipler arası kalite farklarının önemli bir belirleyicisidir. Linalool tipi fesleğenlerde peltat tüylerin, estragole tipi fesleğenlerde ise kapitat tüylerin daha yoğun olduğu bazı çalışmalarda bildirilmiştir (Putievsky et al., 1999).

2.3. Çiçek Morfolojisi ve Salkım Yapısı

Fesleğen çiçekleri çoğunlukla beyaz veya beyazımsı-mor renktedir; ancak pembe veya tamamen mor çiçekli genotipler de tanımlanmıştır (Paton et al., 1999). Çiçeklenme yapısı terminal salkım şeklindedir ve bitkinin üst kısmında yoğun bir çiçek oluşumu görülür. Salkım uzunluğu, çiçek sayısı, kaliks yapısı, corolla uzunluğu ve anter morfolojisi genotip ayırımında kullanılan tamamlayıcı morfolojik kriterler arasındadır (Carović-Stanko et al., 2010).

Çiçek morfolojisi yalnızca taksonomik ayırım açısından değil, aynı zamanda uçucu yağ bileşimi üzerinde de etkilidir. Çiçek dokularında genellikle linalool oranı yapraklara göre daha yüksek bulunurken; estragole ve metil sinnamat oranları yaprak dokularında daha belirgindir (Telci et al., 2006). Bu nedenle çiçeklenme dönemi, kalite odaklı hasat zamanının belirlenmesinde kritik bir parametredir (Şekil 1).



Şekil 1. *Ocimum basilicum* Morfolojik Genel Şeması

2.4. Tohum ve Fide Morfolojisi

Fesleğen tohumları küçük, koyu renkli ve genellikle oval şekillidir. Tohum kabuğu suyla temas ettiğinde jelatinimsi bir tabaka oluşturur; bu özellik tohumun çimlenme performansı ve toprak altı nem durumu açısından önemlidir (Sangwan et al., 2014). Çimlenme sonrası fide morfolojisi, genotipin erken dönem büyüme hızını, yaprak açısını ve dallanma kapasitesini belirleyen önemli bir göstergedir. Fide dönemindeki yaprak rengi ve tüylenme özellikleri ilerleyen dönemdeki kemotip profili ile ilişkilendirilebilmektedir.

2.5. Genetik Çeşitlilik ve Moleküler Karakterizasyon

Fesleğen, morfolojik çeşitliliği kadar genetik çeşitliliğiyle de dikkat çeker. RAPD(Random amplified polymorphic DNA/ Rastgele çoğaltılmış polimorfik DNA), ISSR(Inter simple sequence repeats/Basit dizi tekrarları arası), AFLP(Amplified fragment length polymorphism/Çoğaltılmış parça uzunluğu polimorfizmi) ve SSR(Simple sequence repeats/Basit dizi tekrarları) gibi moleküler belirteçlerle yapılan çalışmalar, tür içinde önemli düzeyde genetik ayrışma olduğunu göstermektedir (Carović-Stanko et al., 2010; Vieira et al., 2003). Yapılan bazı çalışmalarda, fesleğen türleri arasında %30–40'a varan genetik uzaklıklar belirlenmiş; bu durum taksonomi açısından tartışmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur (Paton, 1992).

Moleküler çalışmaların önemli bulgularından biri, kemotip ile genetik yapı arasındaki ilişkidir. Örneğin: Linalool baskın kemotiplerin belirli SSR(Simple sequence repeats/Basit dizi tekrarları) kümelerinde gruplaştığı (Vieira & Simon, 2006), estragole baskın tiplerin belirgin RAPD(Random amplified polymorphic DNA/ Rastgele çoğaltılmış polimorfik DNA) bantlarıyla ayrıldığı (Labra et al., 2004), mor yapraklı genotiplerin antosiyenin sentezi ile ilişkili gen bölgelerinde farklılaştığı (Dudai et al., 2003) rapor edilmiştir. Bu bulgular, ıslah çalışmalarında genetik marker kullanımının önemini artırmakta ve yüksek kaliteli uçucu yağ üretimi için uygun genotip seçiminin bilimsel temellere dayandırılmasını mümkün kılmaktadır.

2.6. Morfolojik Çeşitliliğin Kimyasal Profil Üzerindeki Etkileri

Morfolojik özelliklerle kimyasal bileşim arasındaki ilişki, fesleğen araştırmalarında en çok tartışılan konulardan biridir. Bazı temel ilişkiler

şunlardır: Mor pigmentli genotiplerde genellikle eugenol ve metil sinamat yüksek bulunur (Grayer et al., 1996). Geniş yapraklı genotipler, çoğunlukla linalool baskın kemotiplere yakındır (Vieira & Simon, 2006). Kompakt habituslu küçük formlar (*var. Minimum*), çoğu zaman sitral ve cineole oranı yüksek profillere sahiptir (Putievsky et al., 1999). Yoğun peltat tüy taşıyan yapraklar, daha yüksek uçucu yağ verimi ile ilişkilendirilmiştir (Werker et al., 1993). Bu nedenle morfolojik karakterizasyonun, uçucu yağ bileşimi çalışmalarının ayrılmaz bir parçası olduğu söylenebilir.

3. Fitokimya ve Uçucu Yağ Kompozisyonu

Ocimum basilicum L. fitokimyasal açıdan son derece zengin bir türdür ve özellikle uçucu yağ bileşenleri bakımından aromatik bitkiler arasında benzersiz bir çeşitlilik sergiler. Bitkinin uçucu yağı çoğunlukla monoterpenler, fenilpropanoid türevleri ve oksijenli monoterpenlerden oluşur; ancak bu bileşenlerin relatif oranları genotip, çevresel koşullar, yetiştirme yönetimi ve bitkinin fenolojik döngüsü gibi birçok değişkenden etkilenir (Simon et al., 1999; Telci et al., 2006). Bu nedenle fesleğenin uçucu yağ profili sabit bir karakter değildir; dinamik ve çevresel koşullara duyarlı bir kimyasal yapıya sahiptir.

3.1. Uçucu Yağ Ana Bileşenleri

Fesleğen uçucu yağında en sık tanımlanan bileşenler şunlardır: Linalool, methyl chavicol (estragole), eugenol, methyl cinnamate, citral (geranial + neral), 1,8-cineole, germacrene-D, α -pinene, β -pinene, camphor, limonene bu majör bileşenlerin oranı kemotipe bağlı olarak %5–80 aralığında değişebilmektedir (Vieira & Simon, 2006) (Şekil 2).

UÇUCU YAĞ ANA SINIFLARI

MONOTERPENLER

- Linalool
- 1,8-Cineole
- α -Pinene, β -Pinene
- Limonene

FENİLPROPANOİDLER

- Estragole (Methyl chavicol)
- Eugenol
- Methyl cinnamate
- Chavicol türevleri

Şekil 2. *Ocimum basilicum* Uçucu Yağ Ana Sınıfları

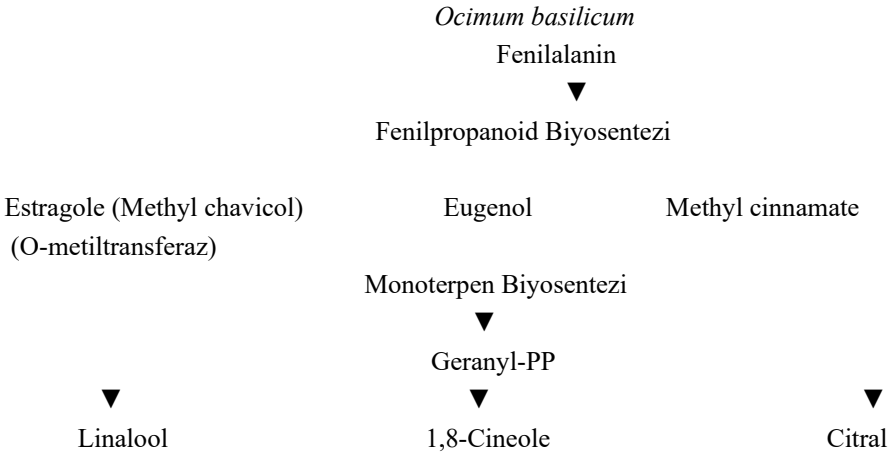
Bu iki grup fesleğenin koku karakterini belirleyen temel kimyasal sınıflardır.

3.2. Kemotip Çeşitliliği

Fesleğenin kimyasal çeşitliliği aromatik bitkiler arasında en yüksek olanlardandır. Literatürde en az altı ana kemotip tanımlanmıştır: Linalool tipi, estragole (metil kavikol) tipi, methyl cinnamate tipi, citral tipi (limon fesleğeni), eugenol tipi, cineole tipi

Kemotiplerin Coğrafi Dağılımı

Linalool tipi: Avrupa ve Akdeniz genotiplerinde baskın (Telci et al., 2006). Estragole tipi: Asya orijinli kültürlerde yaygın (Labra et al., 2004). Methyl cinnamate tipi: Güney Amerika varyetelerinde baskın. Citral tipi: Tropikal bölgelerde bulunan *O. basilicum f. citriodorum*. Eugenol tipi: Mor yapraklı genotiplerde ve *var. purpurascens* tipinde yaygın (Şekil 3).



Şekil 3. fesleğen Kemotiplerinin Biyosentezi

3.3. Ontogenetik Değişimler

Bitkinin fenolojik gelişim evresi uçucu yağ kompozisyonunu belirgin şekilde etkiler: Vejetatif dönemde linalool ve cineole oranı yüksektir. Tomurcuklanma döneminde estragole maksimum seviyeye yaklaşır. Çiçeklenme döneminde linalool hızlı artış gösterir, citral bazı genotiplerde

azalır (Telci et al., 2006). Çiçekler genellikle yapraklara göre daha yüksek linalool içerir (Grayer et al., 1996).

3.4. Diurnal Ritmik Değişimler

Uçucu yağ bileşimindeki değişimler gün içinde de ritmiktir: Sabah saatlerinde monoterpen hidrokarbonları daha yüksektir. Öğle-ikinci arasında oksijenli monoterpenler artar (Putievsky et al., 1999). Akşam saatlerinde estragole/tatlı aromatik bileşenler nispeten yükselir. Bu nedenle distilasyon zamanlaması kaliteyi doğrudan etkiler.

3.5. Çevresel Faktörlerin Kimyasal Bileşim Üzerine Etkisi

Işık ve Sıcaklık: Yaprak sıcaklığının artması monoterpen sentezini artırır (Sifola & Barbieri, 2006). Gölgeleme ise linaloolü düşürür, estragoleü yükseltir.

Su Stresi: Hafif su stresi uçucu yağı artırabilir; aşırı stres verimi düşürür (Koca et al., 2010).

Toprak ve Besin Yönetimi: Azot gübrelemesi: Linaloolü artırabilir, estragole oranını yükseltebilir (Sifola & Barbieri, 2006). Fosfor ve potasyum uygulamaları daha dengeli kimyasal profiller oluşturabilir.

3.6. Bölgesel ve Genotipik Varyasyon

Türkiye’de yapılan çalışmaların sonuçlarına göre (Telci et al., 2006): Akdeniz genotiplerinde linalool yüksek, Güneydoğu Anadolu genotiplerinde estragole baskın, tohumluk orijine göre methyl cinnamate değişken bulunmuştur. Hindistan çalışmaları ise methyl chavicol ve linalool içeriğinin yüksek oranda genetik kontrol altında olduğunu göstermiştir (Pandey et al., 2014).

Tablo 1. *Ocimum basilicum* Majör Uçucu Yağ Bileşenleri

Bileşen Adı	RT (dk)	RI (HP-5)	CAS No	Kimyasal Sınıfı
Linalool	10.2	1096	78-70-6	Oksijenli monoterpen
Estragole	13.5	1195	140-67-0	Fenilpropanoid
Eugenol	17.8	1356	97-53-0	Fenilpropanoid
Methyl cinnamate	18.6	1382	103-26-4	Fenilpropanoid ester
1,8-Cineole	8.9	1033	470-82-6	Oksijenli monoterpen
Citral (Geranial)	14.1	1210	141-27-5	Aldehit (monoterpen)
Citral (Neral)	13.9	1199	106-26-3	Aldehit (monoterpen)
Germacrene-D	20.7	1480	23986-74-5	Seskiterpen
α -Pinene	6.8	936	80-56-8	Monoterpen
β -Pinene	7.6	976	127-91-3	Monoterpen
Camphor	11.9	1144	76-22-2	Oksijenli monoterpen

Uçucu yağ bileşen oranları genotip ve ekolojiye bağlı olarak önemli varyasyon göstermektedir. Linalool ve estragole çevresel etkilere duyarlı; methyl cinnamate ise genetik olarak yönlendirilmiş bir profile sahiptir.

Tablo 2. Fesleğen Kemotiplerinin Bileşen Baskınlığı ve Coğrafi Dağılımı

Kemotip	Baskın Bileşenler	Dağılım / Yaygın Orijin
Linalool tipi	Linalool %40–80	Avrupa, Türkiye
Estragole tipi	Estragole %50–90	Asya (Hindistan, Pakistan)
Methyl cinnamate tipi	Methyl cinnamate %40–70	Güney Amerika (Brezilya, Peru)
Citral tipi	Citral %60–75 (neral + geranial)	Tropikal bölgeler
Eugenol tipi	Eugenol yüksek + mor pigmentasyon	Asya, Afrika
Cineole tipi	1,8-Cineole %30–50	Güney Asya

Kemotip çeşitliliği coğrafi dağılım ile uyumlu olup, linalool Akdeniz, estragole Asya; citral tropikal bölgelerde baskındır.

4. Farmakolojik Aktiviteler

Ocimum basilicum L. uçucu yağları, ekstraktları ve fenolik fraksiyonları geniş bir farmakolojik etki yelpazesi göstermektedir. Fesleğenin biyolojik aktiviteleri çoğunlukla bağışıklık sistemini düzenleyici, mikrobiyal yükü azaltıcı, oksidatif stresi baskılayıcı ve nörofizyolojik süreçleri destekleyici mekanizmalar üzerinden gerçekleşmektedir (Suppakul et al., 2003; Vieira & Simon, 2006). Söz konusu etkiler, yaprak ve çiçek dokularında bulunan linalool, estragole, eugenol, 1,8-cineole, metil sinamat, citral ve fenolik bileşenler ile ilişkilendirilmiştir (Grayer et al., 1996; Telci et al., 2006).

4.1. Antioksidan Aktivite

Fesleğen ekstraktları ve uçucu yağlarının antioksidan kapasitesi, radikal süpürücü aktiviteyi artırarak hücrel oksidatif hasarı azaltmaktadır. Fenolik bileşenlerin (özellikle rosmarinik asit, kafeik asit ve flavonoidler) antioksidan aktivitenin temel belirleyicileri olduğu birçok çalışmayla gösterilmiştir (Wang et al., 1998; Dorman et al., 2003). DPPH radikal süpürücü aktivite: Alkolik ekstraktlarda yüksek düzeyde tespit edilmiştir (Wang et al., 1998). FRAP

aktivitesi (Ferric reducing ability): Yaprak fenolik fraksiyonlarında güçlü indirgeme etkinliği gösterilmiştir (Hussain et al., 2010). ORAC analizi: Bazı kemotiplerde antioksidan kapasitenin linalool içeriğiyle pozitif korelasyon gösterdiği bildirilmiştir (Jayasinghe et al., 2003). Antioksidan etkinin klinik açıdan önemi; hücre membran stabilizasyonu, inflamasyonun baskılanması, DNA hasarının azaltılması ve yaşlanma karşıtı mekanizmalarla ilişkilidir. Bu nedenle fesleğen gıda koruyucusu, fonksiyonel gıda bileşeni ve farmasötik formülasyonlarda kullanılmaya uygun bir bitkidir.

4.2. Antimikrobiyal Aktivite

Fesleğen uçucu yağı yüksek antimikrobiyal etki göstermektedir ve bu faaliyet hem bakterilere hem de funguslara karşı gözlenmiştir. Gram-negative bakterilere karşı: *E. coli*, *salmonella spp.*, *pseudomonas aeruginosa* üzerinde belirgin inhibisyon (Suppakul et al., 2003). Etkinin linalool + estragole sinerjisiyle güçlendiği bildirilmiştir (Singh et al., 2005). Gram-positif bakterilere karşı: *Staphylococcus aureus*, *bacillus subtilis* üzerinde yüksek aktivite (Purkait et al., 2012). Antifungal aktivite: *Candida albicans*, *aspergillus flavus*, *a. niger* üzerine inhibisyon (Kéita et al., 2001; Zambonelli et al., 2004). Membran geçirgenliğinin artırılması, protein denatürasyonu, enzim inhibisyonu ve metabolit transport mekanizmalarında bozulma antimikrobiyal etkinin temel mekanizmalarıdır. Gıda endüstrisinde paketleme malzemelerine eklenmesi (örnek: fesleğen yağlı polipropilen) raf ömrünü uzatan doğal bir koruma yaklaşımı sunmaktadır (Suppakul et al., 2003).

4.3. Anti-inflamatuvar Aktivite

Fesleğenin anti-inflamatuvar etkisi hem uçucu yağ hem de fenolik bileşenlerle ilişkilidir. Bu etkinin NF-kB, COX ve LOX yolaklarını baskıladığı gösterilmiştir (Singh et al., 2010; Pattanayak et al., 2010). Öne çıkan sonuçlar: Linalool ve eugenol pro-inflamatuvar sitokinleri (TNF- α , IL-6) baskılar (Peano et al., 2003). COX-2 inhibisyonu ile ağrı azaltıcı etkinlik görülebilir (Singh et al., 2010). ROS/NOS düzeylerinin azalması kronik inflamasyon modellerinde etkilidir. Klinik açıdan, fesleğen ekstraktları talamik sinyalizasyonu etkileyerek ağrı algısının azalmasına katkıda bulunur; bu durum anti-nöroseptif çalışmalarla desteklenmiştir (Peano et al., 2003).

4.4. Antiviral Aktivite

Son yıllarda yapılan çalışmalar fesleğenin viral ajanlara karşı dikkate değer etkinliğini ortaya koymuştur. Ana etkiler: HSV-1 ve HSV-2 replikasyonunu engelleme (Li et al., 2012). Influenza virüsü hemaglutinasyonunun baskılanması (Chattopadhyay et al., 2013). RNA virüslerinin proteaz aktivitesinin inhibisyonu (Pandey et al., 2014). Bu etkiler çoğunlukla fenolik bileşenlerin (özellikle rosmarinik asit) antiviral etki mekanizmalarıyla ilişkilidir.

4.5. Repellent ve İnsektisit Aktivite

Fesleğen uçucu yağı önemli bir biyopestisit ve repellent kaynağıdır. Özellikle 1,8-cineole ve estragole içeriği yüksek kemotipler böceklere karşı güçlü koruma sağlar. Sivrisineklere karşı repellent: *Aedes aegypti*, *anopheles stephensi* üzerinde etkinlik (Kéita et al., 2001). Depo zararlıları: *Sitophilus oryzae*, *tribolium castaneum* üzerinde yüksek mortalite (Sahoo et al., 2017). Bu nedenle fesleğen nanokapsül ajanlar, önleyici spreyle ve doğal pestisit formülasyonlarında kullanılabilir.

4.6. Antikanser Potansiyel

Fesleğen ekstraktları hücre çoğalmasını baskılayıcı, apoptotik ve anti-genotoksik özellikler göstermektedir. Meme kanseri hücrelerinde apoptotik etki (Awad et al., 2006). Kolon kanseri hücre hatlarında proliferasyonun baskılanması (Prakash & Gupta, 2005). Linalool → MAPK yolağı üzerinden hücre döngüsü durdurma. Fenolik bileşenler, radikal temizleme ve DNA stabilizasyonu üzerinden genotoksiteyi baskılayabilir.

5. Tarımsal Üretim Teknikleri

Ocimum basilicum L. kültür bitkisi olarak yüksek üretim potansiyeline sahip olup uygun iklim ve toprak koşullarında hem açık alanda hem de kontrollü seralarda başarıyla yetiştirilebilmektedir. Tarımsal üretimde başarı; genotip seçimi, iklim-yetiştirme koşullarının optimizasyonu, besleme yönetimi, sulama stratejileri, yabancı ot ve hastalık kontrolü ile uygun hasat parametrelerinin belirlenmesine bağlıdır (Simon et al., 1999; Telci et al., 2006).

5.1. İklim ve Toprak İstekleri

Fesleğen sıcak iklim bitkisidir ve optimum büyüme 25–30°C aralığında gerçekleşir. 10°C altında büyüme durur, 5°C altında fizyolojik stres ortaya çıkar (Purseglove, 1986). Fotoperiyod açısından uzun gün koşullarını tercih eder ve gün ışığı süresi arttığında vegetatif büyüme hızlanır. Toprak gereksinimleri: İyi drene edilmiş, Hafif ve orta tekstürlü, Organik maddece zengin topraklar (Telci et al., 2006). Toprak pH aralığı 6.0–7.5 en ideal düzeydir. Aşırı tuzluluk yetiştirmeyi ve uçucu yağ sentezini olumsuz etkiler.

5.2. Tohumlama ve Fide Yetiştiriciliği

5.2.1. Tohum Çimlenmesi

Fesleğen tohumları yüksek çimlenme yüzdesine sahiptir (>%90) ve optimum çimlenme 20–25°C aralığında gerçekleşir (Sangwan et al., 2014). Tohum kabuğu suyla temas ettiğinde jelatinimsi tabaka oluşturur; bu toprak rutubeti ile çimlenme arasında kritik bir adaptasyon mekanizmasıdır.

5.2.2. Fide Üretimi

Tohumlar genellikle viyollere veya fide yetiştirme yastıklarına ekilir. Çimlenme süresi: 6–12 gün. Dikim zamanı: 2–3 gerçek yaprak dönemi. Serada üretilen fideler açık alana dikimden önce 4–6 gün alıştırma (adaptasyon) dönemine tabi tutulmalıdır.

5.3. Dikim Sıklığı ve Sıra Arası Mesafe

Fesleğende bitki sıklığı uçucu yağ bileşenlerini, toplam biyokütleyi ve bitki morfolojisini etkiler. Önerilen sıra arası–sıra üzeri mesafe: 50 × 30 cm (geniş yapraklı tipler). 40 × 30 cm (kompakt tipler) Bitki sıklığı arttıkça: Boy uzar, yan dallanma azalır, uçucu yağ yüzdesi artabilir ancak kalite değişir (Simon et al., 1999).

5.4. Sulama Yönetimi

Fesleğen suya duyarlı bir aromatik bitkidir; orta düzey su eksikliği bile uçucu yağ sentezini etkileyebilir. Optimum sulama: toprak neminin %65–75'e korunması. Damla sulama: en uygun yöntem (Koca et al., 2010). Kuraklık stresi: Monoterpen oranını azaltır, estragol ve fenilpropanoid profillerini değiştirebilir. Sulama hasat zamanının 7–10 gün öncesi azaltılır, çünkü aşırı sulama uçucu yağ oranını düşürebilir.

5.5. Gübreleme ve Besin Yönetimi

5.5.1. Azot Uygulamaları

Azot uçucu yağ sentezini ve biyokütleyi ciddi ölçüde etkiler. 80–120 kg N/ha düzeyi önerilir (Sifola & Barbieri, 2006). Fazla azot: Vejetatif büyümeyi artırır, uçucu yağ yüzdesini hafif azaltabilir, ancak linalool/estragole dengesini değiştirebilir.

5.5.2. Fosfor ve Potasyum

Fosfor uçucu yağın kalite bileşimine olumlu etki eder. Potasyum stres toleransını artırır.

5.5.3. Organik Gübreleme

Kompost ve iyi yanmış çiftlik gübresi fesleğende uçucu yağ sentezini iyileştirir.

5.6. Yabancı Ot ve Zararlı Kontrolü

Fesleğen, geniş yapraklı ve narin yapılı olduğundan özellikle ilk 30–40 günde yabancı otlarla rekabet gücü düşüktür. İlk çapa: dikimden 2 hafta sonra, İkinci çapa: dikimden 4 hafta sonra

Kimyasal ot mücadelesi yerine mekanik kontrol önerilir. Zararlılar: Yaprak bitleri (Aphididae), thrips, tetranychus (akarlar) doğal pestisit kullanımına fesleğen uçucu yağı çok uygundur (Kéita et al., 2001).

6. Hasat Teknikleri

Hasat zamanı uçucu yağ bileşimi açısından stratejik öneme sahiptir. Optimal hasat: Çiçeklenme başlangıcı (Telci et al., 2006). Kesim şekli: Bitki boyundan 15–20 cm yukarıdan, tek kesim yerine 2–3 biçme yapılabilir. Biçim sonrası: Hızlı kurutma (40–45°C), güneş altı kurutma önerilmez (oksidasyon riski)

6.1. Distilasyon (Uçucu Yağ Çıkarma)

En yaygın yöntem: Hidrodistilasyon (Clevenger), su–buhar distilasyonu optimum distilasyon süresi: 2–3 saat (Simon et al., 1999) Distilasyon parametreleri: Su oranı, parçalama derecesi, bileşen termal stabilitesi, linalool termostabil olduğundan yüksek sıcaklığa daha toleranslıdır; estragole daha hassastır.

6.2. Türkiye’de Üretim Potansiyeli

Türkiye, akdeniz iklim kuşağı nedeniyle fesleğen tarımına uygun bir ekosisteme sahiptir ve genetik çeşitlilik bakımından da üstün yetenek göstermektedir (Telci et al., 2006). GAP bölgesi dahil olmak üzere: Ege (yüksek kalite aromatik profil), Akdeniz (yüksek verim), Güneydoğu (yüksek estragole profili) Yurtiçi üretim: Gıda sektörü, baharat sektörü, kozmetik endüstrisinin ham madde ihtiyacı ihracat potansiyeli ise özellikle uçucu yağ kalitesi ve üretim optimizasyonu ile artırılabilir.

7. Endüstriyel Kullanım Alanları

Ocimum basilicum L. uçucu yağı, ekstraktları ve kurutulmuş drog materyali; gıda, kozmetik, farmasötik, biyopestisit, ambalaj materyalleri ve veteriner preparatları gibi çok yönlü endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Uçucu yağların kimyasal kompozisyonundaki yüksek değişkenlik, farklı endüstriyel uygulamalar için spesifik kemotip seçimini önemli hâle getirmiştir (Vieira & Simon, 2006; Telci et al., 2006).

7.1. Gıda Endüstrisi

Fesleğen, gıda sektöründe aroma ajanı, doğal koruyucu ve lezzet artırıcı bileşen olarak yaygın kullanım görür.

7.1.1. Aroma Maddesi

Taze ve kuru yapraklar; peynir, sos, et ürünleri, şarküteri, baklagil ürünleri ve hazır yemeklerde kullanılır. Uçucu yağ; özellikle içecek sektörü ve şekerleme ürünleri için aromalandırmada önemlidir (Simon et al., 1999).

7.1.2. Doğal Gıda Koruyucusu

Fenolik bileşenler (özellikle rosmarinik asit) ve linalool/estragole ikilisi gıdada mikrobiyal bozulmayı geciktirebilir (Suppakul et al., 2003; Dorman et al., 2003).

Örnek uygulama:

Paketlenmiş peynir ve hazır salatalarda raf ömrü uzatma (Suppakul et al., 2003).

7.1.3. Fonksiyonel Gıda Maddesi

Antioksidan etkisi nedeniyle biyofonksiyonel ürünlerde kullanımı giderek artmaktadır (Wang et al., 1998).

7.2. Kozmetik ve Parfümeri Endüstrisi

Fesleğen uçucu yağları: Parfüm, kolonya, deodorant, şampuan, sabun, el kremi ve losyon formülasyonlarında kullanılmaktadır. Özellikle linalool tipi kemotipler parfümeri endüstrisinde istenen taze-çiçeksi nota sağlar (Aprotosoie et al., 2014).

Fonksiyonlar:

Aromaterapi (gevşetici, anksiyolitik), antimikrobiyal etkinlik ile deodorant rolü, cilt temizleyici ve tonik hazırlamalarında kullanılır.

7.3. Farmasötik ve Fitoterapi Uygulamaları

Fesleğen, farmasötik ürünlerde iki başlık altında değerlendirilir:

1. Hammadde ve etkin bileşen kaynağı:

Linalool (anti-inflamatuvar, antinosiseptif), fenolik fraksiyonlar (antioksidan-antiinflamatuvar)

2. Fitoterapi ajanı:

Sindirim sistemi destekleyici, spazmolitik (Singh et al., 2010), solunum yolu rahatlatıcı (cineole etkisi), hafif sedatif/anxiolytic (Peana et al., 2003). Geleceğe yönelik farmasötik çalışmalarda nanoenkapsülasyon ve mikroenkapsülasyon sistemleriyle standardizasyon sağlanabileceği ifade edilmektedir (Valgimigli et al., 2012).

7.4. Biyopestisit ve Tarımda Doğal Koruyucu Kullanımı

Fesleğen uçucu yağının repellent ve insektisit etkisi, özellikle depolanmış ürün zararlıları ve sivrisineklere karşı değerlendirilmiştir (Kéita et al., 2001; Sahoo et al., 2017).

Öne çıkan alanlar: Depo ambalajlarında antifungal etki, sivrisineklere karşı doğal repellent spreyler, yapraklara uygulanan doğal pestisit formülasyonları. Avantajları: Sentetik pestisitlere göre toksisite düşüktür. Organik tarıma uygundur.

7.5. Antimikrobiyal Ambalajlama (Aktif Paketleme)

Fesleğen uçucu yağının paketleme materyallerine (polietilen/polipropilen) ilavesiyle aktif paketleme oluşturma son yıllarda ilgi görmektedir (Suppakul et al., 2003).

Etki mekanizması:

Uçucu yağ zamanla difüze olur, mikroorganizma gelişimini baskılar, raf ömrü uzar. Özellikle peynir, salata, et ürünleri ve unlu mamullerde uygulanabilir.

7.6. Aromaterapi ve Psikoaktif Etki Uygulamaları

Aromaterapide fesleğen: Zihinsel performans artırıcı, hafif anksiyolitik, migren rahatlatıcı olarak kullanılmaktadır (Peana et al., 2003; Aprotosoae et al., 2014). Linalool'un GABA reseptörleri üzerinde modülatör etki gösterdiği bildirilmiştir (Peana et al., 2003).

7.7. Antimikrobiyal Uygulamaları

Son yıllarda fesleğen ekstraktları palatabilite artırıcı ve doğal antimikrobiyal katkı maddesi olarak hayvan besleme sanayinde test edilmektedir (Hussain et al., 2010). Kümes hayvanlarında yem verimini artırma Antimicrobial ajan yerine doğal fitobiyotik, sindirim sistemi sağlığını destekleme bu alan, gelecekte yeni uygulamalara açıktır.

7.8. Endüstriyel Standartizasyon ve Kalite Kontrol

Uçucu yağ ürünlerinde aşağıdaki kalite parametreleri önemlidir: Kimyasal kompozisyon (GC/MS analizleri), refraktif indeks, optik rotasyon, kirlilik ve ağır metal testleri, fenol/oksijenli bileşen dengesi, depolama stabilitesi özellikle ihracat için ISO(International Organization for Standardization) ve AFNOR(Association Française de Normalisation) standartlarına uygun üretim gereklidir.

7.9. Ticari Değer ve Pazar Dinamikleri

Fesleğen uçucu yağının dünya pazarında kullanım yüzdeleri: %45: kozmetik ve parfümeri, %35: gıda aromalandırma, %12: farmasötik/fitoterapi, %8: biyopestisit/reçine/ambalaj Türkiye, özellikle yüksek kalite aromatik yağ üretimiyle bölgede rekabet avantajına sahiptir.

8. Sağlık ve Güvenlik (Toksikoloji ve GRAS Statüsü)

Ocimum basilicum L. uçucu yağları ve ekstraktları genel olarak güvenli kabul edilmekle birlikte, özellikle fenilpropanoid türevleri içeren kemotiplerde toksikolojik açıdan bazı dikkat noktaları bulunmaktadır. Güvenlik değerlendirmesinde bileşen profili, alım miktarı, alım şekli, standardizasyon ve bireysel duyarlılıklar göz önünde bulundurulmalıdır (Aprotosoae et al., 2014; WHO, 2009).

8.1. Genel Güvenlik Profili

Fesleğen ekstraktları yüzyıllardır gıda, tıbbi ve aromaterapi amaçlı kullanılmıştır. Güncel güvenlik değerlendirmeleri: Akut toksisite: Düşük (Oral LD50 yüksek düzeydedir). Dermal iritasyon: Genellikle düşük; ancak saf uçucu yağ seyreltilmelidir. Alerjik potansiyel: Kişisel duyarlılık olabilir (özellikle eugenol içeren tiplerde). Genel GRAS statüsü: ABD FDA tarafından uçucu yağ bir aromatan olarak GRAS (Generally Recognized As Safe) sınıfında değerlendirilmiştir (FDA, 2021).

8.2. Fenilpropanoid Türevlerinin Güvenlik Değerlendirmesi (Estragole, Eugenol)

Fesleğen yağında bulunan fenilpropanoid türevleri, özellikle: Estragole. Eugenol. Methyl eugenol. Toksikoloji literatüründe tartışma konusu olmuştur.

8.2.1. Estragole (Methyl chavicol)

Bazı kemotiplerde %50–90 oranında bulunabilir (Vieira & Simon, 2006). Metabolitlerinden 1'-hydroxyestragole yüksek dozlarda genotoksisite riski oluşturabilir (Smith et al., 2002). Ancak FAO/WHO JECFA raporuna göre: Normal gıda kullanımıyla alınan estragole miktarı risk oluşturmamaktadır. Toksisite sadece yüksek, farmakolojik dozlar için geçerlidir (JECFA, 2009).

Pratik not:

Gıda amaçlı kullanımda estragole tipi fesleğen güvenlidir. İlaç/terapötik formlar için doz standardizasyonu önerilir.

8.3. Eugenol ve Methyl Eugenol Güvenliği

Eugenol, antioksidan ve antimikrobiyal etkileri güçlü olan bir bileşik olup fesleğende (özellikle mor pigmentli tiplerde) yüksek bulunabilir (Dudai et al., 2003). Dermal kullanımda iritasyon riski düşüktür; ancak saf formda uygulanmamalıdır. Dış hekimliği alanında uzun süredir güvenli kullanım geçmişi vardır. Methyl eugenol için: Uzun süreli, yüksek doz hayvan uygulamalarında tümör gelişimi rapor edilmiştir. Gıda kullanım sınırları altında risk düşük düzeydedir (JECFA, 2009).

8.4. Linalool Güvenlik Profili

Linalool, fesleğende en fazla bulunan terpenoidlerden biridir. Düşük toksisite profili vardır. İnhalasyon aromaterapisinde yaygın kullanılır (Pena et al., 2003). LD50 değeri oldukça yüksektir; güvenli kabul edilir. Güncel değerlendirmelere göre: Linalool tipi fesleğen, en güvenli kemotip olarak görülmektedir.

8.5. Deri ve Mukozal Güvenlik

Aromaterapide baz yağı içinde seyreltilmiş fesleğen yağı dermal uygulamada güvenlidir; fakat: Saf uygulamada iritasyon görülebilir. %1–2'lik seyreltilme tavsiye edilir.

Hassas bireylerde: Hafif kızarıklık ve alerjik reaksiyon görülebilir. Test önerisi: *Patch test* (bileğe küçük miktar sürme).

8.6. Kanserojenite ve Genotoksisite Değerlendirmeleri

Doğal kullanım koşullarında fesleğenin genotoksik veya kanserojen etkisi olmadığı bildirilmiştir (Aprotosoie et al., 2014; JECFA, 2009). Yalnızca: methyl eugenol ve estragole çok yüksek dozlarda risk oluşturabilir. Ancak normal gıda ve aromaterapi dozlarında: Güvenli kabul edilir.

8.7. GRAS (Generally Recognized as Safe) Statüsü

ABD FDA'ya göre: *Ocimum basilicum* essential oil, *ocimum basilicum* yaprak ekstraktı GRAS listesinde yer almaktadır (FDA, 2021). Bu durum: Gıda katkı maddesi olarak, ambalaj materyallerinde, Lezzet verici bileşen olarak kullanımına izin vermektedir.

8.8. Doz Güvenliği ve Kullanım Önerileri

Optimum güvenli kullanım (erişkin birey için): Gıda aroması: Tek dozlarda <2 mg/kg vücut ağırlığı, ekstrakt formu: 200–500 mg/gün (fenolik standardizasyon için), aromaterapi inhalasyonu: 1–2 damla / seans, dermal uygulama: %1–2’lik seyreltilmiş çözeltide, hamilelerde tıbbi dozlarda kullanım önerilmez; ancak gıda amaçlı kullanım güvenlidir.

8.9. Depolama ve Stabilite Güvenliği

Uçucu yağ depolama koşulları güvenlik profili için önemlidir: Işık, oksijen ve sıcaklık uçucu bileşenleri bozabilir. Amber renkli şişelerde saklanmalıdır. 25°C altı depolama önerilir. Aksi durumda oksidasyon ürünleri irritasyon yapabilir.

9. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Ocimum basilicum L. gerek genetik çeşitliliği, morfolojik varyasyonu, uçucu yağ bileşenleri ve farmakolojik özellikleriyle, gerekse endüstriyel kullanım potansiyeliyle dünya literatüründe önemli bir aromatik tür konumundadır. Bu derleme; fesleğenin botanik özelliklerini, kimyasal bileşenlerini, tarımsal üretim tekniklerini, farmasötik etkilerini ve güvenlik değerlendirmelerini kapsamlı bir çerçevede ele almıştır.

Bitkinin kimyasal yapısındaki çeşitlilik yalnızca farklı kemotiplerin sınıflandırılmasına zemin hazırlamamakta, aynı zamanda parfümeri, gıda, ilaç ve biyopestisit endüstrileri için seçici kullanım fırsatı sunmaktadır. Linalool baskın kemotiplerin aromaterapide, estragole baskın kemotiplerin gıda ve kozmetikte, eugenol tipi kemotiplerin ise farmasötik ve antimikrobiyal formülasyonlarda öne çıkması; kimyasal çeşitliliğin endüstriyel uygulamayla birebir bağ kurduğunu göstermektedir.

Fesleğenin farmakoaktif profilinin geniş olması, özellikle antiinflamatuvar, antioksidan, antimikrobiyal, antiviral ve antioksidan etkilerinin bilimsel olarak desteklenmesi, bu türün gelecekte farmasötik araştırmalara konu olma potansiyelini güçlendirmektedir. Bu bağlamda son yıllarda nanoenkapsülasyon teknolojileri, aktif ambalajlama sistemleri ve doğal biyopestisit formülasyonları üzerine yoğunlaşan araştırmalar dikkat çekmektedir.

Tarımsal açıdan ele alındığında, fesleğen yüksek verim ve kalite sağlamak için iklim koşullarına uygun bölgeleri tercih eder; Türkiye bu açıdan avantajlı ülkeler arasındadır. Ege ve Akdeniz bölgelerinde linalool baskın, Güneydoğu Anadolu bölgesinde estragole baskın profillerin tespit edilmesi, ülkesel farklılığın kimyasal çeşitliliği desteklediğini göstermektedir. Dolayısıyla Türkiye, doğru genotip seçimi ve standardizasyon ile dünya pazarında rekabet avantajına sahiptir.

Güvenlik bakımından, fesleğenin genel kullanımında herhangi bir toksikolojik risk gözlemlenmezken; estragole ve methyl eugenol gibi fenilpropanoidlerin yüksek farmakolojik dozlara maruziyeti belirli limitlere tabi tutulmalıdır. Gıda ve aromaterapi amaçlı tüketimlerde fesleğen genel olarak GRAS statüsünde güvenli kabul edilmektedir.

9.1. Gelecek Araştırma Yönelimleri

Gelecek yıllarda *Ocimum basilicum* üzerine gerçekleştirilecek araştırmaların aşağıdaki öncelik alanlarına yönelmesi beklenmektedir:

1) Kemotip–Genotip İlişkisi

Moleküler markırlar (SSR(Simple sequence repeats/Basit dizi tekrarları), SNP(single nucleotide polymorphism RAPD/Tek nükleotit polimorfizmi)) ile kemotip eşleştirme, seleksiyon ve ıslah programlarında hızlandırıcı yaklaşım

2) Fitokimyasal Standardizasyon

GC(Gaz kromatografisi)/MS(Kütle spektrometrisi) profil standartları, farmasötik uygulamalar için QC protokolleri

3) Ontogenetik ve Diurnal Dinamikler

Kimyasal bileşimin gelişim döneminde optimizasyonu, distilasyon öncesi en uygun kesim zamanının belirlenmesi

4) İleri Farmakolojik Araştırmalar

Antikanser mekanizmalarının açıklanması, küçük molekül sinyal yolağı etkilerinin belirlenmesi

5) Nanoteknolojik Uygulamalar

Mikroencapsulation ve nanoemülsiyon sistemleri, Kontrollü salım formülasyonları

6) Endüstriyel Ürün Geliştirme

Doğal biyopestisit formülasyonları, aktif paketlenme sistemlerinde fesleğen yağının kullanımı

7) Türkiye’de Islah ve Genetik Kaynak Yönetimi

Yerel genotiplerin değerlendirilmesi, bölgesel ekotip bankalarının oluşturulması, çeşit tescili ve tohum ıslah programları

9.2. Türkiye İçin Bilimsel ve Ekonomik Öngörüler

Türkiye; Yetiştirme koşulları bakımından uygun, kemotip çeşitliliği açısından avantajlı, uçucu yağ kalitesi bakımından dünya standartlarıyla yarışabilir bir konumdadır. Eğer standardizasyon, kimyasal kalite kontrol ve tescilli çeşit geliştirme çalışmaları desteklenirse: Katma değerli uçucu yağ üretimi artacak, ihracat pazarları genişleyecek, yüksek ekonomik getirili aromatik bitki sektöründe Türkiye bölgesel lider konuma gelebilecektir.

9.3. Genel Değerlendirme

Sonuç olarak *Ocimum basilicum L.*, sadece geleneksel bir mutfak bitkisi değil; aynı zamanda çok yönlü endüstriyel değere sahip, bilimsel açıdan derin potansiyeli bulunan, geleceğin fito-endüstriyel ürünleri için temel bir tıbbi–aromatik tür olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu kitap bölümü, fesleğenin agronomik, fitokimyasal, toksikolojik ve endüstriyel yönlerini bütüncül bir çerçevede değerlendirmekte; araştırmacılar, endüstri paydaşları ve üreticiler için stratejik bir bilgi kaynağı sunmaktadır.

10. Mardin ve Çevresinde *Ocimum basilicum* Üretiminin Değerlendirilmesi, Öneriler ve Yatırım Fizibilitesi

Ocimum basilicum (fesleğen) üretimi Mardin ve çevresinde agro-ekolojik açıdan oldukça elverişli olup, bölgenin ışık yoğunluğu, minimal yağış, düşük fungal hastalık riski ve yüksek sıcaklık potansiyeli uçucu yağ sentezi açısından avantaj sağlamaktadır. Fide dikim zamanının nisan sonu–mayıs başı olarak planlanması, bitkinin ilk dönem sıcaklık stresinden korunmasına

yardımcı olur. Toprak tuzluluğu bölgeye göre değişebilse de fesleğen hafif tuzlu ortamlara uyum sağlayabilmekte, ancak organik madde takviyesi kaliteyi yükseltmektedir. Bu nedenle damla sulama ile birlikte çiftlik gübresi ve azot uygulamaları tavsiye edilir.

Bölgede yüksek ışık şiddeti linalool dominant tiplerin yağ sentezini artırdığı için, genetik materyal seçiminde yüksek linalool içeren kemotiplerin tercih edilmesi ekonomik verimlilik sağlar. Distilasyon altyapısı yörede aromatik bitki tecrübesi nedeniyle kolaylıkla kurulabilir; küçük ölçekli üreticiler için modüler 50–100 L damıtma sistemleri, kooperatif yatırımları için ise 500–1.000 L hacimler uygundur. Üretilen yağ; gıda, kozmetik, aromaterapi ve farmasötik sektörlerde kullanılabileceğinden bölgesel pazarlama avantajı oluşturur. Ayrıca kurutulmuş yaprak, gastronomik ürünler (pesto, çeşni karışımları), aromatik sirke ve distilasyon sonrası yan ürünlerin değerlendirilmesi katma değeri yükseltir.

Turizm potansiyeli yüksek olan Mardin’de “Mardin Fesleğeni Yağı” gibi yerel marka değeri oluşturulabilir. Üniversite–üretici iş birliği ile kemotip tespiti, uçucu yağ profil standardizasyonu, kalite kontrol protokolleri ve sertifikasyon sağlanabilir. Böylece ürün ulusal ve uluslararası pazarlara uygun hale gelir.

10.1. Kısa Yatırım Fizibilite Analizi

Yatırım Ölçeği: 5–20 dekar fesleğen üretim alanı küçük yatırımcı için uygundur; 50–100 dekar kooperatif modeli için idealdir. Distilasyon Ünitesi: 50–100 L başlangıç sistemi ~5.950 USD –10.700 USD maliyetli olup, yılda 3–5 kat geri dönüş sağlayabilir. Girdi Maliyeti: Üretim maliyeti (fide, sulama, gübre, hasat) düşük; distilasyon sonrası katma değer yüksektir. Verim: 1 dekar alandan 7–12 kg yağ elde edilebilir (genotip ve distilasyon verimine bağlı). Satış Değeri: Uçucu yağ litre fiyatı kaliteye göre 700 USD–2.000 USD arasında değişmektedir. Yan Ürün Değeri: Kurutulmuş yaprak, baharat ve gastronomik ürün satışları toplam kâr marjını artırır. Pazar Avantajı: “Anadolu aromatikleri” temalı pazarlama ile iç ve dış pazarda marka değer kazanır. Risk Yönetimi: Sulama altyapısı, fide kalitesi ve hasat olgunluğu kalite parametrelerinin belirleyicisidir. Sürdürülebilirlik: Düşük su tüketimi, kısa vegetasyon süresi ve yüksek katma değer nedeniyle sürdürülebilir tıbbi-aromatik tarım modeli oluşturur.

Sonuç olarak, Mardin ve çevresi *Ocimum basilicum* için yalnız agro-ekolojik açıdan değil, ekonomik açıdan da uygun bölgedir. Doğru kemotip seçimi, küçük ölçekli distilasyon ünitesi, hedefli pazarlama ve üniversite destekli kalite yönetimi ile kısa vadede gelir oluşturabilen, uzun vadede markalaşmaya uygun sürdürülebilir bir tıbbi-aromatik bitki yatırımdır.

KAYNAKLAR

- Aprotosoai, A. C., et al. (2014). Linalool in aromatherapy. *Phytochemistry Reviews*, 13, 349–368.
- Awad, A., et al. (2006). Anticancer effects of fesleğen extracts. *Phytomedicine*, 13, 200–207.
- Bown, D. (2001). *Encyclopedia of Herbs & Their Uses*. Dorling Kindersley.
- Carović-Stanko, K., et al. (2010). Genetic relationships among fesleğen taxa. *Plant Systematics and Evolution*, 285, 13–22.
- Chattopadhyay, D., et al. (2013). Antiviral activity of *Ocimum basilicum*. *Journal of Ethnopharmacology*, 146, 773–778.
- Dorman, H. J., et al. (2003). Antioxidant properties of basil. *Food Chemistry*, 44, 251–257.
- Dudai, N., et al. (2003). Anthocyanins and aroma in purple fesleğen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 4447–4451.
- FDA (2021). GRAS Notice Inventory: *Ocimum basilicum* oil. U.S. Food and Drug Administration.
- Grayer, R. J., et al. (1996). Variation in chemical composition of basil. *Biochemical Systematics and Ecology*, 24, 31–43.
- Hussain, A. I., et al. (2010). Chemical composition and antioxidant activity of fesleğen. *Food Chemistry*, 118, 680–685.
- Jayasinghe, C., et al. (2003). Antioxidant activity of fesleğen varieties. *Food Chemistry*, 83, 117–121.
- JECFA (2009). *Evaluation of Estragole*. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives.
- Kéita, S. M., et al. (2001). Insecticidal activity of fesleğen essential oil. *Journal of Stored Products Research*, 37, 339–349.
- Koca, N., et al. (2010). Environmental effects on fesleğen essential oils. *Industrial Crops and Products*, 32, 623–628.
- Labra, M., et al. (2004). Morphological and molecular analysis of fesleğen germplasm. *Plant Science*, 167, 725–731.
- Li, Y., et al. (2012). Antiviral effects of fesleğen extracts. *Phytotherapy Research*, 26, 1102–1107.
- Pandey, A. K., et al. (2014). Chemotypic variation in Indian fesleğen. *Journal of Essential Oil Research*, 26, 1–10.

- Paton, A. (1992). A synopsis of *Ocimum*. *Kew Bulletin*, 47, 403–435.
- Paton, A., et al. (1999). Taxonomic reassessment of *Ocimum* species. *Kew Bulletin*, 54, 125–128.
- Peana, A. T., et al. (2003). Anti-nociceptive and anti-inflammatory actions of linalool. *Life Sciences*, 72, 1579–1586.
- Prakash, V., & Gupta, A. (2005). Anticancer activity of fesleğen polyphenols. *Cancer Letters*, 229, 77–84.
- Pattanayak, P., et al. (2010). Anti-inflammatory properties of fesleğen. *Pharmacognosy Reviews*, 4, 95–105.
- Purseglove, J. W. (1986). *Tropical Crops*. Longman.
- Putievsky, E., et al. (1999). Morphological traits and essential oils in fesleğen cultivars. *Industrial Crops and Products*, 10, 1–9.
- Purkait, A., et al. (2012). Antimicrobial activity of *Ocimum* species. *International Journal of Microbiological Research*, 4, 212–220.
- Sahoo, D., et al. (2017). Repellent properties of fesleğen oil. *Industrial Crops and Products*, 109, 37–43.
- Sangwan, N., et al. (2014). Seed physiology and germination behavior in fesleğen. *Seed Science Research*, 24, 321–329.
- Sifola, M. I., & Barbieri, G. (2006). Nitrogen effects on fesleğen yield and essential oil. *European Journal of Agronomy*, 24, 349–356.
- Simon, J. E., et al. (1999). fesleğen production and quality. *Acta Horticulturae*, 502, 113–120.
- Singh, S., et al. (2005). Antibacterial activity of essential oils. *Journal of Ethnopharmacology*, 98, 267–272.
- Singh, M., et al. (2010). Anti-inflammatory potential of fesleğen. *Journal of Ethnopharmacology*, 127, 133–137.
- Smith, R. L., et al. (2002). Safety assessment of estragole metabolites. *Food and Chemical Toxicology*, 40, 915–920.
- Suppakul, P., et al. (2003). Antimicrobial properties of fesleğen essential oil. *Journal of Food Science*, 68, 207–213.
- Telci, I., et al. (2006). Essential oil variation in Turkish fesleğen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 653–661.
- Valgimigli, M., et al. (2012). Encapsulation of essential oils. *Journal of Controlled Release*, 165, 45–52.

- Vieira, R. F., & Simon, J. E. (2006). Chemical diversity of fesleğen. *Economic Botany*, 60, 328–333.
- Vieira, R. F., et al. (2003). Genetic diversity analysis in fesleğen. *Plant Genetic Resources*, 1, 1–7.
- Wang, F., et al. (1998). Antioxidant capacity of fesleğen. *Food Chemistry*, 61, 39–45.
- Werker, E., et al. (1993). Glandular trichomes and essential oil secretion in *Ocimum*. *Annals of Botany*, 71, 43–50.
- WHO (2009). *Food Additive Evaluations: Estragole*. World Health Organization.
- Zambonelli, A., et al. (2004). Antifungal activity of fesleğen. *Journal of Stored Products Research*, 40, 501–506.

BÖLÜM 7

STRES YÖNETİMİNDE BİTKİSEL DÜZENLEYİCİLERİN ETKİSİ

Dr. Öğretim Üyesi Alper GÜNGÖR¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17914744>

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye. alper.gungor@ahievran.edu.tr, orcid id: 0000-0002-1993-5725

1. GİRİŞ

Stres, tohumun çıkış ve çimlenmesinden bitkilerin büyüme, gelişme ve üreme aşamalarını etkileyen, sebebi ne olursa olsun ihtiyacın karşılanamadığı durumlara karşı fizyolojik ve biyokimyasal tepkilerin tamamıdır. Stres faktörleri canlılardan (biyotik) veya cansız çevre koşullarından (abiyotik) kaynaklanır. Biyotik stres faktörleri hayvanlar, böcekler, mikroorganizmalar ve patojenleri kapsar. Abiyotik stres faktörleri ise kuraklık ve tuzluluk başta olmak üzere sıcaklık değişimleri, ağır metaller, ışık ve kimyasal stresler olarak değerlendirilir. Bitkiler stresi algıladığı andan itibaren savunma sistemleri devreye girer ve fizyolojik değişimler sergilerler. Bunlar bazen kuraklığa karşı su kaybını azaltmak için stomalarını kapatma olabileceği gibi bazen tuzluğa karşı içsel basınçlarını dengelemek için osmolit düzenleyiciler sentezleyebilmektir. Stresin ne olduğuna bakılmaksızın, her faktör bitkinin fotosentez mekanizmasında tahribat oluşturur ve reaktif oksijen türlerinin (ROS) birikmesiyle oksidatif hasara yol açar. Stres faktörlerinden olumsuz etkilenen bitkiler, hasarı onarmak için antioksidan sistemlerini ile bozulmaları en aza indirmeye çalışarak stresi hafifletmek için uğraşır.

İklim değişikliği, tarımsal üretimi doğrudan etkisi altına almaktadır. Bu sebeple dünya genelinde tarımsal alanlardaki sürdürülebilirlik için hayati derecede bir tehdit oluşturmaktadır (Güngör, 2025). Sık sık yaşanan iklimsel değişkenlikler abiyotik stres faktörlerini tetikleyerek özellikle bitkisel üretimi etkisi altına almaktadır. Bu durum verim kayıplarına ve ürün üretim aşamalarındaki aksamalara yol açarak sadece gıda güvenliğinde sorunlar oluşturmakla kalmaz aynı zamanda sürdürülebilirlik için de tehdit oluşturur. Bundan dolayı varolan stresi yönetebilmek için bitkisel düzenleyici uygulamalar, bitkisel savunma sisteminin yetersiz kaldığı durumlarda stresi hafifletmedeki en başarılı yöntemdir.

2. BİTKİSEL DÜZENLEYİCİLERİN ÖNEMİ

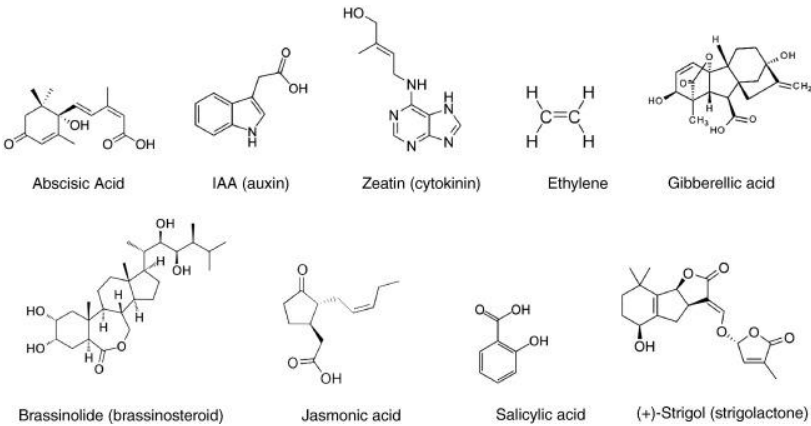
Bitkilerin kuraklık stresine verdiği yanıtlar çok aşamalı ve kompleks yapıdadır. Bunun nedeni, bitkilerin tuzluluk, donma, yüksek ve düşük sıcaklık gibi diğer abiyotik strese verdiği tepkilerin benzer sinyal iletim yolları ve mekanizmaları kullanmasından ileri gelmektedir. Bu aşamada bilinmesi gereken en önemli husus yetiştirme aşamasında, diğer bir deyişle doğada, kuraklık, sıcaklık ve tuzluluk streslerinin birbiriyle ilişkili olarak aynı anda etki

ettiği ve bu nedenle bitkilerin bu streslerle mücadele mekanizmalarının da birbirinden ayrı olamayacağıdır (Suzuki ve ark., 2014). Bu nedenle günümüzdeki son çalışmalar, küresel iklim değişikliğinin sonucu olarak yaşanan ve bitkisel üretimi doğrudan etkileyen stres ve stres mekanizmalarını anlamaya yöneliktir. Bunun için birçok araştırmacı geleneksel yöntemler olan ıslah konularına yer vermektedir. Ancak bu yöntemler hem uzun zaman almakta hem de maddi imkanları zorlamaktadır. Anlık ve daha kolay çözüm olarak bitkisel düzenleyicilerin kullanılması (Lopez and Satti 1996; Sakr ve ark., 2012) bitki metabolizmasında, dış etkenlere karşı sürekli bir güç olarak kendini göstermekte ve stres anında tolerans sağlamaktadır.

3. BİTKİSEL DÜZENLEYİCİLERİN ÖZELLİKLERİ

Bitkiler hareketsiz canlılar olduğundan olumsuz şartlara karşı savunmaları kısıtlıdır. Bundan dolayı, her türlü iç ve dış uyarılara yanıt sağlamak için büyüme ve gelişmelerini düzenlemek zorundadır. Bitki hücrelerinde bulunan fitohormonlar bu yanıtlara cevap verme ile görevlidir. Bu özelliği ile fitohormonlar bitkideki en önemli endojenlerin başında gelmektedir.

Fitohormonlar, bitki gelişimi ve büyümede temel öneme sahiptir. Bunlar arasında oksin (IAA), sitokininler (CK'ler), absisik asit (ABA), etilen (ET), gibberellinler (GA'ler), salisilik asit (SA), brassinosteroidler (BR'ler) ve jasmonatlar (JA'ler) bulunur. Strigolakton (SL) nispeten yeni fitohormonlardandır. Şekil 1, başlıca fitohormonların kimyasal yapılarını göstermektedir (Wani, ve ark., 2016).



Şekil 1. Bitkilerde stres anında görülen başlıca fitohormon sınıfları

Çeşitli sonuçlar, çevresel olarak aktive edilen ABA, ET, GA ve SL sinyalleri arasındaki etkileşimin bitki stres tepkilerini belirlemede kritik öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Wani ve ark., 2016).

Bitkiler, abiyotik stres koşulları altında hormonları [örneğin, absisik asit (ABA) veya salisilik asit (SA) veya metil jasmonat (MJ)] ve patojen saldırısı altında uyarıcıları [örneğin, flagellin 22 (flg22)] biriktirir. Hormonlar arasında ABA, çeşitli abiyotik ve biyotik stres koşullarında rol oynar ve bu nedenle temel ve çok yönlü bir bileşik olarak kabul edilir. Buna karşılık; SA, MJ ve ET, biyotik strese karşı dirence yardımcı olur. Kuraklık, tuzluluk veya soğuk stresi altında, ABA birikimi suyu korumak için stomaların kapanmasına neden olurken, yapraklarda ozmotik ayarlamayı teşvik etmek için genleri yukarı düzenler (Lim ve ark., 2015; Zhao ve ark., 2017; Niu ve ark., 2018). Bitkilerdeki artan ABA seviyeleri, böcek otçullarının yanı sıra kuraklığa ve patojenlere karşı çapraz adaptasyonu sağlar (Lee ve Luan, 2012; Nguyen ve ark., 2016; Bharath ve ark., 2021).

ABA'nın yanı sıra, bitkiler strese maruz kaldığında stomaların kapanmasını sağlayan ve bitki savunma tepkilerine yardımcı olan birkaç başka bileşik daha artar. Bu bileşikler üç kategoriye ayrılabilir: hormonlar, uyarıcılar ve metabolitler. Bu hormonlar MJ, SA, ET ve BR'leri içermektedir. Bunlar arasında en etkili olanın MJ olduğu ve pH, ROS, NO ve Ca^{2+} 'yi yükselterek stoma kapanmasını indüklediği ve böylece ABA etkisine benzer şekilde anyon kanallarının aktivasyonuna yol açtığı belirlenmiştir (Munemasa ve ark., 2007; Gonugunta ve ark., 2009; Agurla ve Raghavendra, 2016). ET'nin yanı sıra BR'lerin kapanma üzerindeki etkilerini anlamak için daha detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır (Bharath ve ark., 2021). Günümüzde yapılan çalışmalar ile henüz tam anlamıyla bitkide fizyolojik ve fizyo-morfolojik tepkiler cevap bulamamıştır. Bu tepkilerin kompleks bir yapı oluşturmasının yanında, bitki vejetasyon süreci içerisindeki büyüme ve gelişme evrelerinin değişkenliği de ortam şartları kadar etkili görülmektedir. Fotosenteze başlayan her bitki çevresel etkilere maruz kaldığı sürece kendi savunmasını artırmayı hedeflemektedir. Bunun için bitkisel mekanizma devreye girmektedir.

Salisilik asit, doğal olarak bitki bünyesinde oluşan çok önemli bir sinyal molekülü olarak çalışan, çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal işlevleri etkileyen ve hem biyotik hem de abiyotik streslere karşı tolerans üzerinde çeşitli etkileri olan bitki hormonlarından biridir (Nazar ve ark. 2011; Wani ve ark., 2017).

Genel olarak SA; tohum çimlenmesini, fide oluşumunu, hücre büyümesini, solunumu, stoma kapanmasını, abiyotik streslere verilen yanıtları, baklagillerde nodülasyonu ve meyve verimini etkilediği yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Vlot ve ark., 2009; Wani ve ark., 2017). Bunun yanı sıra geniş bir patojen spektrumuna karşı olarak direnci aktive ettiğine dair bilgilere çalışmalarda yer verilmiştir (Fu ve ark., 2012; Wani ve ark., 2017). Aynı zamanda SA, bir uyarıcı olarak örtüşen işlevlere sahip bir bitki savunma hormonu olarak kabul edilir (Ding ve Ding, 2020). SA ile indüklenen stoma kapanması, öncelikle peroksidaz aracılığıyla üretilen ROS tarafından aracılık edilmektedir (Hao ve ark., 2010; Bharath ve ark., 2021).

Bitkide stres anında biriken diğer metabolit ise prolin'dir. Büyük miktarlarda birikmelerine rağmen, uyumlu bir ozmolit olan prolin yalnızca kısmi bir kapanmaya neden olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Raghavendra ve Reddy, 1987; Bharath ve ark., 2021). Bununla birlikte, prolinin bu ek işlevlerinin moleküler mekanizmaları ve göreceli önemi hala araştırılmaktadır. Gerek stres tepkilerinin gerekse gelişim süreçlerinin prolin birikimiyle ilişkili olduğu kanıtlanmıştır. Stres koşulları altında prolinin stres toleransı sağladığına inanılırken, fizyolojik koşullar altında, özellikle üreme evresinde, gelişim süreçlerine yardımcı olur. Prolinin potansiyel reaktif oksijen türleri (ROS) temizleyicisi olarak özelliklerinin olması gibi faydalı etkilerinin çoğu tarihsel olarak bitkilerdeki birikiminin fizyokimyasal sonuçlarına atfedilmiştir (Renzetti ve ark., 2024).

Gaz halindeki önemli bir fitohormon olan etilen, bitki büyümesi ve stres tepkisinde hayati bir rol oynamaktadır. Etilen; kök büyümesi, hem yaprak hem de çiçek dökülmesi ve meyve olgunlaşması gibi bitki büyüme ve gelişiminin düzenlenmesinde yer almaktadır (Zhang ve ark., 2004). Sulu meyvelerin olgunlaşması sırasında, klorofilin parçalanması veya pigmentlerin birikmesi nedeniyle renk değişimleri ve etilen salınımı da dahil olmak üzere meyvelerde önemli değişikliklere sebep olmaktadır (Klee ve Giovannoni, 2011). Etilen, meyvenin olgunlaşmasında önemli bir rol oynayarak meyve olgunlaşmasının geçiş döneminde, etilen sentezi hızla artar ve bu da solunumu artırmaya yardımcı olur (Giovannoni ve El-Rakshy, 2004; Wang ve ark., 2025). Etilen genel olarak, bitkilerin biyotik ve abiyotik streslere verdiği tepkide de hayati bir göreve sahiptir (Morgan ve Drew, 1997). Her düzenleyici birbirini takip

eden ve bazıları eş zamanlı görülebilen bir mekanizma içerisinde yer almaktadır. Bu nedenle her birinin hücre içi rolü değişkenlik göstermektedir.

Bitki hormonu gibberellin (GA_3), hücre bölünmesi, boy, doku farklılaşması, kuru madde birikimi, net asimilasyon oranı, yaprak uzaması, çiçeklenme, fotosentez ve terleme oranı dahil olmak üzere bitki gelişiminin birden fazla aşamasında rol oynar (Fahad ve ark., 2015). Dahası, GA_3 'ün kök mimarisini iyileştirdiği ve kök biyokütlesini artırdığı, bitkinin besin ve su alım yeteneğini geliştirdiği ve stres koşulları altında büyümeyi daha da desteklediği belirtilmiştir. Ayrıca, Gibberellin, ozmolit birikimini, membran geçirgenliğini, iyon homeostazını, antioksidan sistemi ve stres azaltıcı genlerin ifadesini artırarak, mahsul bitkilerinde stres toleransı sağlayan bitki mekanizmalarına aktif olarak katkıda bulunduğu belirlenmiştir (Emamverdian ve ark., 2020; Nagar ve ark., 2021; Ullah ve ark., 2025). Bitkide hücre bölünmesinden verime kadar geniş bir etkinliği olan GA_3 hücrenin stres yönetiminde yer alan en önemli fitohormonlardandır.

Diğer bir bitki hormonları grubu olan strigolaktonlar (SL), bitkilerde oksidatif stresi etkili bir şekilde yönetmek için umut vadeden biyomoleküller olarak ortaya çıkmıştır. Strigolaktonların oksidatif stresi azaltmaya yardımcı olduğu temel yollardan biri, antioksidanların sentezini ve birikimini uyarmasıdır. Bu antioksidanlar, ROS temizleyicileri olarak hareket ederek zararlı etkilerini nötralize eder. Ek olarak, strigolaktonlar stoma kapanmasını da düzenleyerek su kaybını azaltır ve kuraklık stresi veya su eksikliği koşullarında oksidatif stresi hafifletmeye yardımcı olur (Mansoor ve ark., 2024). Strigolaktonlar, bitki oksidatif savunma mekanizmalarını güçlendirmeye dikkat çekerek, bitki gelişimi ve stres yönetiminin çeşitli yönlerine aktif olarak katılırlar. Sürgün dallanması inhibisyonunu düzenleyerek, yaprak yaşlanmasını uzatarak, kök mimarisini ince ayarlayarak ve tohum çimlenmesini uyararak etkilerini gösterirler (Ma ve ark., 2017). Bunun yanı sıra, SL'ler ile absisik asit (ABA) sinyal yolları arasında, özellikle stoma kapanması ve tuz toleransı gibi süreçlerde gözlemlenen karmaşık etkileşim, bitki oksidatif savunmasını koordine etmedeki rollerini vurgular (Hashem ve Khalil, 2023). SL'ler, bitkinin kuraklık stresine karşı direncini olumlu yönde düzenler. Ancak, farklı konsantrasyonlarda SL'lerin yapraktan uygulanmasının bitki büyümesi ve ozmoregülasyonla ilişkili metabolik yollar

üzerindeki etkisi araştırılması gereken konular arasında olduğuna değinilmiştir (Cao ve ark., 2024).

4. SONUÇ

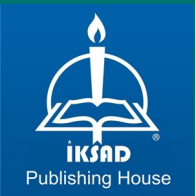
Son yıllardaki araştırmalar, stres yaşayan bitkilerin büyüme ve gelişimindeki önemini vurgulamaktadır. Bitkilerin stres faktörlerine karşı tolerans göstermesine karşı hangi mekanizmaların devreye girdiği ve nasıl tepki verdiğinin araştırılması, küresel ısınmanın sonucundaki sürdürülebilir tarım yönetimi için büyük önem taşımaktadır. Bitkiler hangi ortamda ne koşullarda yetişirse yetişsin, mutlaka vejetasyon sürecinin herhangi bir evresinde stresle karşı karşıya kalabilmektedir. Bunun için savunma sistemleri sürekli stresi algılayıp devreye girer. Toleranslı bitkiler stresle başa çıkabilirken duyarlı bitkiler çok fazla olumsuz etkilenebilmektedir. Bitki stres yanıtının ayarlanması, sinyal yolları ve uyaranlar arasında oluşan senkronize etkileşime bağlıdır ve metabolizma, çözünmüş madde, gen ekspresyonu, ve fizyolojik yanıtta değişikliklere olanak tanır. Dışarıdan uygulanan bitkisel düzenleyici uygulamalar ile özellikle strese duyarlı bitkilere dayanım sağlanmakla kalmayıp verim artışında ve depolama koşullarında bozulmaya karşı direnç artışı da kazandırılmış olur. Stres anında doğal olarak salgılanan fitohormonlar, olumsuz atmosfer koşullarında bile optimum düzeyde büyüme ve gelişmeyi tetikleyerek bitkilerin stresten kaynaklanan şartları hafifletir ve gelişimi sürdürür. Ayrıca, antioksidan savunma sistemini teşvik etmede önemli rol oynar. Antioksidanlar ise stresi azaltıcı etkileri olduğu gibi ROS miktarının artmasına da sebep olur. Bu nedenle birbirini takip eden bu süreçte hormonal ve enzimsel aktivitelerin düzeyini belirleyerek; doğru zamanda, doğru miktarda ve doğru yöntemlerle dışsal uygulamalar ile destek sağlamak stres yönetiminde en etkili sürdürülebilir çözümler arasında görülmektedir. Bu sayede bitkisel stresin yaşandığı tüm alanlarda ve stresin en çok görüldüğü özellikle kurak ve yarı kurak iklim bölgelerinde tarımsal uygulamaların ilerlemesine önemli derecede katkıda bulunabilir.

KAYNAKÇA

- Cao, L., Zhang, S., Feng, L., Qiang, B., Ma, W., Cao, S., ... & Zhang, Y. (2024). Metabolic pathways regulated by strigolactones foliar spraying enhance osmoregulation and antioxidant defense in drought-prone soybean. *BMC Plant Biology*, 24(1), 980.
- Ding, P., & Ding, Y. (2020). Stories of salicylic acid: a plant defense hormone. *Trends in plant science*, 25(6), 549-565.
- Emamverdian, A., Ding, Y., & Mokhberdoran, F. (2020). The role of salicylic acid and gibberellin signaling in plant responses to abiotic stress with an emphasis on heavy metals. *Plant signaling & behavior*, 15(7), 1777372.
- Fahad, S., Hussain, S., Bano, A., Saud, S., Hassan, S., Shan, D., ... & Huang, J. (2015). Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses: consequences for changing environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(7), 4907-4921.
- Fu ZQ, Yan S, Saleh A, Wang W, Ruble J, Oka N, Mohan R, Spoel SH, Tada Y, Zheng N, Fu XD (2012) NPR3 ve NPR4, bitkilerde bağışıklık sinyali salisilik asidinin reseptörleridir. *Nature* 486:228–232. doi: 10.1038/nature11162
- Giovannoni, J. J., & El-Rakshy, S. (2004, June). Genetic regulation of tomato fruit ripening and development and implementation of associated genomics tools. In *V International Postharvest Symposium* 682 (pp. 63-72).
- Güngör, A. (2025). The Impact of Agricultural Activities on Wetland Ecology and the Preservation of Sustainability. *Black Sea Journal of Agriculture*, 8(6), 903-908.
- Hao, F., Zhao, S., Dong, H., Zhang, H., Sun, L., & Miao, C. (2010). Nia1 and Nia2 are involved in exogenous salicylic acid-induced nitric oxide generation and stomatal closure in Arabidopsis. *Journal of Integrative Plant Biology*, 52(3), 298-307.
- Hashem, H. A., & Khalil, R. (2023). Insight into the interaction of strigolactones, abscisic acid, and reactive oxygen species signals. In *Reactive Oxygen Species: Prospects in Plant Metabolism* (pp. 179-211). Singapore: Springer Nature Singapore.

- Klee, H. J., & Giovannoni, J. J. (2011). Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. *Annual review of genetics*, 45(1), 41-59.
- Lee, S. C., & Luan, S. (2012). ABA signal transduction at the crossroad of biotic and abiotic stress responses. *Plant, cell & environment*, 35(1), 53-60.
- Lim, C. W., Baek, W., Jung, J., Kim, J. H., & Lee, S. C. (2015). Function of ABA in stomatal defense against biotic and drought stresses. *International journal of molecular sciences*, 16(7), 15251-15270.
- Lopez ML, Satti SME (1996) Kalsiyum ve potasyum, sodyum klorür stresi altında domatesin büyümesini ve verimini artırdı. *Bitki Bilimi* 114:19–27
- Ma, N., Hu, C., Wan, L., Hu, Q., Xiong, J., & Zhang, C. (2017). Strigolactones improve plant growth, photosynthesis, and alleviate oxidative stress under salinity in rapeseed (*Brassica napus* L.) by regulating gene expression. *Frontiers in plant science*, 8, 1671.
- Mansoor, S., Mir, M. A., Karunathilake, E. M. B. M., Rasool, A., Ştefănescu, D. M., Chung, Y. S., & Sun, H. J. (2024). Strigolactones as promising biomolecule for oxidative stress management: A comprehensive review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 206, 108282.
- Morgan, P. W., & Drew, M. C. (1997). Ethylene and plant responses to stress. *Physiologia Plantarum*, 100(3), 620-630.
- Nagar, S., Singh, V. P., Arora, A., Dhakar, R., Singh, N., Singh, G. P., ... & Shiv Ramakrishnan, R. (2021). Understanding the role of gibberellic acid and paclobutrazol in terminal heat stress tolerance in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 12, 692252.
- Nazar R, Iqbal N, Syeed S, Khan NA (2011) Salisilik asit, iki maş fasulyesi çeşidinde azot ve kükürt asimilasyonunu ve antioksidan metabolizmasını farklı şekilde artırarak tuz stresi altında fotosentezdeki azalmaları hafifletir. *J Plant Physiol* 168:807–815. doi: 10.1016/j.jplph.2010.11.001
- Nguyen, D., D'Agostino, N., Tytgat, T. O., Sun, P., Lortzing, T., Visser, E. J., ... & Rieu, I. (2016). Drought and flooding have distinct effects on herbivore-induced responses and resistance in *Solanum dulcamara*. *Plant, Cell & Environment*, 39(7), 1485-1499.
- Niu, M., Xie, J., Chen, C., Cao, H., Sun, J., Kong, Q., ... & Bie, Z. (2018). An early ABA-induced stomatal closure, Na⁺ sequestration in leaf vein

- and K⁺ retention in mesophyll confer salt tissue tolerance in *Cucurbita* species. *Journal of experimental botany*, 69(20), 4945-4960.
- Raghavendra, A. S., & Reddy, K. B. (1987). Action of proline on stomata differs from that of abscisic acid, G-substances, or methyl jasmonate. *Plant Physiology*, 83(4), 732-734.
- Renzetti, M., Funck, D., & Trovato, M. (2024). Proline and ROS: A unified mechanism in plant development and stress response?. *Plants*, 14(1), 2.
- Sakr, M. T., El-Sarkassy, N. M., & Fuller, M. P. (2012). Osmoregulators proline and glycine betaine counteract salinity stress in canola. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(3), 747-754.
- Ullah, A., Hazrat, A., Khan, B. A., Saqib, S., & Ullah, F. (2025). Mitigating lead stress in barley using gibberellic acid (GA3): effects on morpho-physiological and biochemical parameters. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-12.
- Vlot AC, Dempsey DA, Klessig DF (2009) Salisilik asit, hastalıklarla mücadelede çok yönlü bir hormondur. *Annu Rev Phytopathol* 47:177–206. doi: 10.1146/annurev.phyto.050908.135202
- Wang, X., Wen, H., Suprun, A., & Zhu, H. (2025). Ethylene signaling in regulating plant growth, development, and stress responses. *Plants*, 14(3), 309.
- Wani, A. B., Chadar, H., Wani, A. H., Singh, S., & Upadhyay, N. (2017). Salicylic acid to decrease plant stress. *Environmental Chemistry Letters*, 15(1), 101-123.
- Wani, S. H., Kumar, V., Shriram, V., & Sah, S. K. (2016). Phytohormones and their metabolic engineering for abiotic stress tolerance in crop plants. *Crop J*, 4(3), 162-176.
- Zhang, Z. G., Zhou, H. L., Chen, T., Gong, Y., Cao, W. H., Wang, Y. J., ... & Chen, S. Y. (2004). Evidence for serine/threonine and histidine kinase activity in the tobacco ethylene receptor protein NTHK2. *Plant physiology*, 136(2), 2971-2981.
- Zhao, Y., Gao, J., Im Kim, J., Chen, K., Bressan, R. A., & Zhu, J. K. (2017). Control of plant water use by ABA induction of senescence and dormancy: an overlooked lesson from evolution. *Plant and Cell Physiology*, 58(8), 1319-1327.



ISBN: 978-625-378-437-9