

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM VE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR III



EDİTÖRLER

Prof. Dr. Bünyamin SÖĞÜT

Prof. Dr. Tugay AYAŞAN

Prof. Dr. Hakan İNCİ

Dr.Öğr.Üyesi. Mehmet İLKAYA



İKSAD
Publishing House

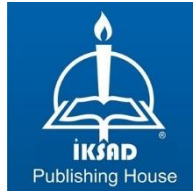
SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM VE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR III

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Bünyamin SÖĞÜT
Prof. Dr. Tugay AYAŞAN
Prof. Dr. Hakan İNCİ
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İLKAYA

YAZARLAR

Prof. Dr. Mehmet ÇİFTÇİ
Doç. Dr. Harun Kaya KESİK
Dr. Öğr. Üyesi Benian Pınar AKTEPE
Dr. Öğr. Üyesi Pırıl TEKİN
Dr. Öğr. Üyesi Münire TURHAN
Dr. Öğr. Üyesi Nurcan DEDEOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Sedat YELKOVAN
Dr. Öğr. Üyesi Selcen Süheyla ERGÜN
Dr. İbrahim ŞAHİN
Dr. Nimetullah KORKUT
Öğr. Gör. Muhammet Alperen HAMEŞ
Öğr. Gör. Nevzat ÇAĞLAYAN
Öğr. Gör. Zeynep ASUTAY
Doktora Öğrencisi Şirvan KARAKOÇ
Emre GÜLTEKİN



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: 978-625-378-468-3

Cover Design: Hakan İNCİ

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

BAL ARISI (*Apis mellifera*) KOLONİ DİNAMİKLERİ VE SOSYAL DAVRANIŞ BİYOLOJİSİ

Öğr. Gör. Nevzat ÇAĞLAYAN.....3

BÖLÜM 2

MONOKÜLTÜRÜN ARI BESLENMESİ ÜZERİNDEKİ UZUN VADELİ ETKİLERİ

Öğr. Gör. Zeynep ASUTAY.....29

BÖLÜM 3

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR ARICILIK

Dr. Öğr. Üyesi Selcen Süheyla ERGÜN.....51

BÖLÜM 4

APİAİR (KOVAN HAVASI) ANALİZİ VE TERAPÖTİK POTANSİYELİ: YÖNTEMLER, BULGULAR VE UYGULAMALAR

Dr. İbrahim ŞAHİN.....81

BÖLÜM 5

ORGANİK ARICILIKTA ARI BESLEME: STANDARTLAR, DOĞAL GİRDİLER VE KOLONİ SAĞLIĞI

Dr. Nimetullah KORKUT.....91

BÖLÜM 6

BAL ARISI KOLONİ BESLENMESİ: BİYOLOJİ, BESİN GEREKSİNİMLERİ, UYGULAMA STRATEJİLERİ VE MODERN YAKLAŞIMLAR

Dr. İbrahim ŞAHİN.....115

BÖLÜM 7

TROPILAEAPS AKARININ BİYOLOJİK ÖZELLİKLERİ, KOLONİ DÜZEYİNDE ZARARLARI, TEŞHİSİ VE MÜCADELE YÖNTEMLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Sedat YELKOVAN.....131

BÖLÜM 8

VARROA DESTRUCTOR SENTETİK AKARİSİT DİRENCİ: FENOTİPİK ve GENOTİPİK MEKANİZMALAR

Doç. Dr. Harun Kaya KESİK.....145

BÖLÜM 9

TARIMDA İLAÇ (PESTİSİT) KULLANIMINI AZALTMA: SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNTEMLER

Emre GÜLTEKİN.....197

BÖLÜM 10

ANTİMİKROBİYAL BAKIRLI BİLEŞİKLERİN TARIMDA KULLANIMI

Dr. Öğr. Üyesi Benian Pınar AKTEPE.....221

BÖLÜM 11

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMSAL TEDARİK ZİNCİRLERİNDE KARBON AYAK İZİ YÖNETİMİ: KAVRAMSAL TEMELLER, YAPISAL ANALİZ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ YAKLAŞIMLARI

Dr. Öğr. Üyesi Pırıl TEKİN

Dr. Öğr. Üyesi Nurcan DEDEOĞLU.....235

BÖLÜM 12

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMSAL TEDARİK ZİNCİRLERİNDE KARBON AYAK İZİ AZALTIMINDA OPTİMİZASYON YAKLAŞIMLARI, DİJİTAL TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALI VAKA ANALİZLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Pırıl TEKİN

Dr. Öğr. Üyesi Nurcan DEDEOĞLU.....255

CHAPTER 13

HISTORY, DEFINITION, AND PRODUCTION PURPOSES OF GENETICALLY MODIFIED ORGANISMS

PhD Student Şirvan KARAKOÇ

Lecturer Muhammet Alperen HAMEŞ

Prof. Dr. Mehmet ÇİFTÇİ.....275

CHAPTER 14

GLOBAL TRENDS IN GENETICALLY MODIFIED CROP CULTIVATION AND THE REGULATORY FRAMEWORK IN TURKIYE

PhD Student Şirvan KARAKOÇ

Lecturer Muhammet Alperen HAMEŞ

Prof. Dr. Mehmet ÇİFTÇİ.....285

BÖLÜM 15

BOMBUS TÜRLERİNİN TARIMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİKTEKİ ROLÜ VE TARIM-ÇEVRE MÜDAHALELERİ ÜZERİNDEKİ TÜR TEMELLİ TEPKİLERİ

Dr. Nimetullah KORKUT

Dr. Öğr. Üyesi Münire TURHAN.....293

ÖNSÖZ

Editörler olarak, Sürdürülebilir Tarım ve Zootekni bilimlerinin güncel araştırma alanlarını disiplinlerarası bir yaklaşımla ele alan bu eseri, hem temel kavramsal çerçeveleri hem de uygulamaya dayalı araştırma sonuçlarını içeren derleme niteliğinde kapsamlı bir başvuru kaynağı olarak hazırlamış bulunmaktayız. Kitapta; bal arısı (*Apis mellifera*) koloni dinamikleri ve sosyal davranış biyolojisinden organik arıcılıkta besleme stratejilerine, pestisit kullanımının azaltılmasına yönelik sürdürülebilir yöntemlerden tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin yönetimine kadar uzanan geniş bir yelpazede güncel konular bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmaktadır. Eserde; monokültür tarım uygulamalarının arı beslenmesi üzerindeki uzun vadeli etkileri, kovan havası (Apiair) analizinin terapötik potansiyeli, *Tropilaelaps* akarının biyolojik özellikleri, koloni düzeyinde neden olduğu zararlar ile teşhis ve mücadele yöntemleri, *Varroa destructor* bal arısı akarlarında sentetik akarisit direnci, organik üretim standartları çerçevesinde doğal besleme girdilerine yönelik yaklaşımlar, koloni beslenmesinde biyolojik gereksinimlere dayalı modern uygulama stratejileri ve tarımda antimikrobiyal bakırlı bileşiklerin kullanımına ilişkin güncel bilimsel bulgular ayrıntılı biçimde değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra kitapta, genetiği değiştirilmiş organizmaların (GDO) tarihsel gelişimi, tanımı ve üretim amaçları bilimsel bir çerçevede ele alınmakta; genetiği değiştirilmiş bitki yetiştiriciliğinde küresel eğilimler, uluslararası uygulamalar, risk değerlendirme süreçleri ve Türkiye'deki düzenleyici mevzuat sürdürülebilir tarım ve gıda güvenliği perspektifinden kapsamlı olarak tartışılmaktadır. Ayrıca sürdürülebilir tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik optimizasyon teknikleri, dijitalleşme süreçleri ve vaka analizlerine dayalı uygulamalı modeller kitabın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu yönüyle eser, yalnızca arıcılık ve hayvansal üretim odaklı güncel araştırmaları değil, aynı zamanda modern tarımın biyoteknolojik, çevresel ve yönetsel boyutlarını da bütünleşik bir çerçevede ele alarak disiplinlerarası bir referans kaynağı niteliği kazanmaktadır. On dört bölümden oluşan ve alanında uzman on sekiz akademisyen tarafından kaleme alınan bu çalışma; sürdürülebilirlik, hayvansal üretim, ekolojik denge, arıcılık bilimleri ve tarımsal çevre yönetimi alanlarında bilimsel literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda editörler olarak, kitabın araştırmacılar, lisansüstü öğrenciler, uygulayıcılar ve politika

geliştiriciler için değerli bir referans kaynağı oluşturacağına inanıyoruz. Bu eserin hazırlanmasında emeği geçen tüm yazarlarımıza ve katkı sunan paydaşlara teşekkür eder; kitabın bilim dünyasına, sektöre ve tüm ilgili paydaşlara yararlı olmasını temenni ederiz.

Saygılarımızla

Prof. Dr. Bünyamin SÖĞÜT

Prof. Dr. Tugay AYAŞAN

Prof. Dr. Hakan İNCİ

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İLKAYA

BÖLÜM 1

BAL ARISI (*Apis mellifera*) KOLONİ DİNAMİKLERİ VE SOSYAL DAVRANIŞ BİYOLOJİSİ

Öğr. Gör. Nevzat ÇAĞLAYAN^{1*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986422>

¹ Bingöl Üniversitesi Gıda, Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu,
Email: ncaglayan@bingol.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4917-6731>

1. GİRİŞ

Bal arıları (*Apis mellifera*), yüksek düzeyde örgütlenmiş sosyal davranışları, görev dağılımındaki esneklikleri ve koloni düzeyinde sergiledikleri bütünsel adaptasyon mekanizmaları ile biyolojinin en karmaşık süperorganizma modellerinden birini oluşturur. Koloni yapısı; kraliçe, binlerce işçi arı ve erkek arılardan (dron) oluşan, hiyerarşik fakat aynı zamanda dinamik bir sosyal sistemdir. Bu yapı içerisinde bireylerin davranışları yalnızca kendi fizyolojileri tarafından değil, aynı zamanda koloni içi çevresel sinyaller, feromonlar ve topluluk geri bildirimleri tarafından şekillenir (Seeley, 2019; Winston, 1991). Arı kolonilerini benzersiz kılan temel unsur, bireysel seviyede sınırlı bilişsel ve davranışsal kapasitenin, koloni seviyesinde yüksek fonksiyonel uyuma dönüşmesidir; bu durum literatürde “kolektif zekâ” (collective intelligence) olarak tanımlanmaktadır (Johnstone et al., 2002).

Koloni dinamiklerinin merkezinde öğrenilmiş ve genetik olarak programlanmış davranış kalıplarının birlikte işlediği bir görev dağılımı sistemi yer alır. İşçi arıların yaşam döngüsü boyunca “yaşa bağlı görev değişimi” (age polyethism) adı verilen süreç ile farklı işlevlere geçiş yaptığı bilinmektedir. Genç arılar kuluçkalıkta temizlik ve larva bakımıyla (nursing) ilgilenirken, yaşları ilerledikçe petek örme, nektar işleme ve son olarak tarlacılık (foraging) görevlerini üstlenirler (Robinson, 2009; Johnson, 2010). Moleküler çalışmalar, bu görev değişimlerinin yalnızca yaş ile değil, aynı zamanda sosyal çevre, koloninin ihtiyaçları ve feromon sinyalleri ile düzenlendiğini ortaya koymuştur (Whitfield et al., 2003). Özellikle kraliçe mandibular feromonu (QMP) ve larva kaynaklı feromon sinyalleri, işçi davranışlarının fizyolojik temellerini belirleyen kritik düzenleyicilerdir (Pankiw et al., 2004; Slessor et al., 2005).

Bal arılarında sosyal davranış biyolojisi, yalnızca görev dağılımı ile sınırlı olmayıp koloni içi iletişim mekanizmalarının da bütüncül olarak ele alınmasını gerektirir. Bu bağlamda, Karl von Frisch’in öncülüğünde tanımlanan “arı dansları” (waggle dance), tarlacı arıların nektar ve polen kaynaklarının yönü ve mesafesi hakkında koloniye bilgi aktarmasını sağlayan en gelişmiş hayvan iletişim sistemlerinden biridir (von Frisch, 1993; Riley et al., 2005). Dans iletişimi, çevresel geri bildirim ve koloni ihtiyaçları doğrultusunda karar verilen kolektif kaynak kullanımı stratejilerinin temel bileşenidir ve koloninin enerji verimliliğini doğrudan artırır (Seeley, 2019).

Koloni biyolojisinin bir diğer önemli bileşeni, homeostatik düzenleme kapasitesidir. Bal arıları, sıcaklığı 34–36°C aralığında tutarak larva gelişiminin optimal koşullarda sürmesini sağlar; bu amaçla işçi arılar kanat çırparak havalandırma yapabilir, su taşıyarak buharlaşma yoluyla soğutabilir ve kış aylarında kümelenerek (clustering) ısı üretebilirler (Jones, 2006; Stabentheiner et al., 2010). Bu davranışlar bireysel düzeyde basit olsa da koloni genelinde karmaşık ve koordineli bir termoregülasyon sistemine dönüşür. Çevresel stres faktörleri—pestisitler, iklim değişikliği, besin yetersizliği—koloni homeostazını bozarak davranışsal ve fizyolojik adaptasyon mekanizmalarının sınırlarını zorlayabilir (Goulson et al., 2015; Klein et al., 2007).

Bal arısı kolonilerinin sosyal yapısı, evrimsel açıdan incelendiğinde eşeyli çoğalma, akrabalık seçilimi (kin selection) ve eusosyalite kavramlarıyla yakından ilişkilidir. Hamilton’un akrabalık seçilimi teorisine göre, işçi arıların üreme yeteneğinden büyük ölçüde feragat ederek koloniye hizmet etmeleri, genetik kazanç bakımından avantaj yaratmaktadır; çünkü haplodiploid genetik sistem işçi arılar arasında yüksek akrabalık oranı oluşturur (Hamilton, 1964; Ratnieks & Reeve, 1992). Bu evrimsel çerçeve, kolonilerin neden bir süperorganizma gibi hareket ettiğini anlamada temel teorik altyapıyı sunar(Seeley, 2019; Vercelli et al., 2021).

Bal arısı kolonilerinin sosyal organizasyonu, yalnızca bireyler arasındaki doğrudan davranışsal etkileşimlerle değil, aynı zamanda karmaşık geri bildirim döngüleri, çevresel bilgi akışı ve kimyasal iletişimin bir arada işlemesiyle şekillenir. Koloninin iç işleyişi, tıpkı bir memeli organizmasında olduğu gibi homeostatik mekanizmalarla düzenlenir; bu nedenle *Apis mellifera* kolonileri “süperorganizma” kavramının en iyi modellerinden biri olarak kabul edilir (Hölldobler & Wilson, 2009). Süperorganizma yaklaşımı, işçi arıların bireysel davranışlarının koloni düzeyinde fonksiyonel bir bütünlük oluşturduğu ve doğal seçilimin büyük ölçüde koloni seviyesinde işlediğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, koloniye oluşturan işçi arılar fizyolojik açıdan steril olsalar da davranışsal adaptasyonları ve genetik akrabalık düzeyleri nedeniyle evrimsel çıkarları kraliçe ve koloninin toplam verimliliği ile uyumludur (Ratnieks & Reeve, 1992; Tarpay et al., 2013).

Koloni içi sosyal davranışların düzenlenmesinde feromonlar merkezi bir role sahiptir. Kraliçe mandibular feromonu (QMP), kolonide üreme baskılanmasını, işçi davranış düzenlemesini ve koloni bütünlüğünü sağlayan en

güçlü biyokimyasal sinyallerden biridir (Slessor et al., 2005). QMP'nin yokluğunda işçilerde yumurtalık aktivasyonu artmakta, koloni içi sosyal düzen bozulmakta ve davranış repertuarında önemli değişiklikler ortaya çıkmaktadır (Hoover et al., 2003). Benzer şekilde, larvalardan salınan brood pheromone, işçi arıların hemşirelik davranışlarını, görev değişimini ve tarlacı davranışının başlamasını etkileyen önemli bir düzenleyicidir (Pankiw et al., 2004). Bu kimyasal sinyaller, bireyler arasında doğrudan komutlar vermekten ziyade koloninin ihtiyaçlarına yönelik topluluk seviyesinde bir düzenleyici ağ oluşturur.

Bal arılarında kolektif karar verme süreçleri de koloni dinamiklerinin temelini oluşturur. Yeni bir yuva yeri seçimi, koloninin yaşamını sürdürülebilmesi açısından kritik bir karardır ve bu süreçte işçi arılar, keşifçi (scout) davranışlarıyla potansiyel yuva alanlarını değerlendirir. Bu keşifçiler dans dili aracılığıyla bilgilerini koloniye aktarır ve destek alan alternatif seçenekler zamanla bir rekabet halinde değerlendirilir (Seeley, 2019). Koloni nihai kararı verirken bireylerin bilgileri, tercihleri ve dans yoğunlukları bir araya gelerek çoğulcul bir seçim mekanizması oluşturur. Bu tür karar verme süreçleri, robotik sürü algoritmalarından yapay zekâ modellerine kadar birçok modern mühendislik uygulamasına ilham olmuştur (Passino et al., 2008).

Bal arılarının ekolojik başarılarının temelinde davranışsal plastikite yer alır. İşçi arıların görevleri arasında hızlı geçiş yapabilmeleri, çevresel baskılara karşı etkin bir adaptasyon sağlar. Örneğin koloni ani bir tarlacı kaybı yaşadığında, hemşire arılar hızla davranışsal geçiş yaparak tarlacı pozisyonuna geçebilir; bu adaptasyon davranışsal gen ekspresyon profillerindeki hızlı değişimlerle desteklenir (Whitfield et al., 2003). Bu durum, koloninin çevresel streslere karşı “esneklik” kapasitesini belirleyen kritik bir özelliktir (Wild et al., 2023). Bununla birlikte modern stres faktörleri—özellikle neonikotinoid pestisitler, *Nosema* spp. enfeksiyonları, *Varroa destructor* parazit baskısı ve iklim değişikliğine bağlı çiçek fenolojisi kaymaları—koloni davranış dinamiklerini derinden etkileyerek işçi arıların görev dağılımı, öğrenme kapasitesi ve yön bulma yeteneklerinde ciddi bozulmalara yol açabilmektedir (Henry et al., 2012; McMahon et al., 2016).

Koloni davranışlarının evrimsel ve ekolojik temeli incelendiğinde, bal arılarının enerji kullanımında sergiledikleri yüksek verimlilik de dikkat çekicidir. Tarmacı arılar yalnızca yüksek getirili kaynaklara yönelmekle kalmaz,

aynı zamanda kaynakların mevsimsel ve günlük değişkenliklerini de dikkate alarak dinamik bir topluluk optimizasyonu gerçekleştirir (Dyer, 2002). Arıların görsel spektrumu, UV ışığını algılama yetenekleri ve polarize ışıkla yön bulma kapasiteleri, tarlacılık davranışının başarısını artıran kritik adaptasyonlardır (Michener, 2007; Srinivasan, 2011). Bu özellikler, koloninin uzun vadeli enerji bütçesini optimize ederek sürdürülebilir popülasyon büyümesine katkı sağlar.

Bal arılarındaki sosyal organizasyon, yalnızca davranışsal değil, aynı zamanda immünolojik düzeyde kolektif savunma ile de karakterizedir. Koloni bağışıklığı (social immunity) kavramı, bireysel arıların enfeksiyonlarla karşılaştığında hem kendilerini hem de koloniyi korumaya yönelik kolektif davranışlar geliştirdiğini ifade eder. Örneğin hastalık belirtileri gösteren larvaların uzaklaştırılması (hijyen davranışı), propolis ile kovan içi dezenfeksiyon ve trofallaksis sırasında antimikrobiyal bileşiklerin paylaşılması koloninin patojen baskısına karşı dayanıklılığını artırır (Evans & Spivak, 2010; Simone-Finstrom et al., 2017). Bu davranışlar, koloninin bir “süperorganizma bağışıklık sistemi” geliştirdiğini göstermektedir.

Genel olarak, bal arılarında koloni dinamikleri ve sosyal davranış biyolojisi; genetik, fizyolojik, çevresel ve sosyal faktörlerin iç içe geçtiği çok katmanlı bir organizasyon modelini temsil etmektedir. Arı kolonilerinin bu karmaşık yapısını anlamak, yalnızca temel bilim açısından değil, modern arıcılık uygulamaları, hastalık yönetimi, seleksiyon programları ve ekosistem sürdürülebilirliği açısından da stratejik bir önem taşımaktadır (Goulson et al., 2015; Popovska et al., 2021).

Bal arısı kolonilerinde sosyal davranışların sürekliliği, bireyler arası iletişim ağlarının zaman içinde kendini düzenleyebilmesiyle mümkündür. Bu iletişim ağları yalnızca feromon sinyallerine değil, aynı zamanda dokunsal, akustik ve çevresel geri bildirimlere dayanır. Özellikle işçi arıların titreşim sinyalleri yoluyla koloni içi aktiviteleri koordine ettiği, kovan içerisindeki yoğunluk değişimleri ve titreşim iletimleri sayesinde işçi arıların görev değişimlerine ve aktivite seviyelerine ince ayar çektiği gösterilmiştir (Nieh, 1998; Kirchner et al., 2022). Bu akustik ve titreşim temelli iletişim mekanizmaları, koloni içinde anlık iş gücü ayarlamaları yapılmasını sağlayan önemli bir davranışsal modülatör olarak işlev görür.

Koloni içi iş yükü düzenlemesi, sosyal böceklerde evrimsel başarının anahtarı olarak kabul edilen esnek iş bölümü sistemiyle doğrudan ilişkilidir. Bal

arıları, değişen çevresel koşullara ve koloninin ihtiyaçlarına göre işgücü dağılımını yeniden şekillendirebilecek derecede yüksek davranışsal esneklik gösterir. Yeterli sayıda hemşire arı bulunmadığında genç arıların tarlacılığa geçişi geciktirdiği veya yaşlı işçilerin larva bakımına geri dönebildiği bilinmektedir; bu esneklik koloninin dayanıklılığını artırmaktadır (Robinson, 2009; Johnson, 2010). Bu davranışsal geçişler, nöroendokrin mekanizmalar tarafından düzenlenmekte olup juvenil hormon, vitellogenin düzeyleri ve nöropeptid ifadeleri işçi arıların görev profillerini şekillendirmektedir (Amdam & Omholt, 2003; Elekonich & Roberts, 2005).

Koloni organizasyonunun önemli bir parçası da enerji optimizasyonuna dayalı kaynak kullanım stratejileridir. Tarlacı arıların yön bulma yetenekleri, güneş pusulası, polarize ışık algısı, manyetik alan hissi ve çevresel işaretlerin entegrasyonuna dayanır; bu sistem, arıların karmaşık üç boyutlu çevrede yüksek doğrulukla navigasyon yapabilmesini sağlar (Srinivasan, 2011; Dyer & Gould, 1983). Tarlacı arıların dans iletişimi ile koloniye aktardığı bilgiler, bireysel keşif davranışlarıyla birleşerek optimum çiçek kaynaklarının değerlendirilmesine katkı sağlar ve böylece koloninin enerji bütçesi dengelenir. Bu mekanizma, koloni düzeyinde bir karar verme sisteminin yalnızca kimyasal sinyallerle değil, aynı zamanda bilişsel süreçlerin kolektif entegrasyonu ile yürütüldüğünü göstermektedir (Seeley, 2019; Grüter & Farina, 2009).

Koloni sürdürülebilirliğini etkileyen bir diğer önemli unsur, çevresel stres faktörlerinin sosyal davranışlar üzerindeki baskılarıdır. Modern arıcılıkta en çok tartışılan stres etkenlerinden biri olan pestisit maruziyetinin, bal arılarında öğrenme kapasitesini, koku belleğini ve yön bulma yeteneğini bozduğu; ayrıca sosyal etkileşim sıklığını ve görev dağılımını olumsuz etkilediği çok sayıda çalışmada bildirilmiştir (Henry et al., 2012; Tsvetkov et al., 2017). Varroa destructor enfestasyonu da koloninin davranışsal bütünlüğünü ciddi şekilde bozar; akarın hem doğrudan hem de virüs vektörlüğü yoluyla işçi arıların fizyolojisini değiştirmesi, tarlacı davranışlarında anormalliklere, erken yaşta tarlacılığa geçişe ve koloni çöküşüne yol açabilmektedir (Nazzi & Le Conte, 2016; Ramsey et al., 2019). Bu tür stres faktörleri koloni içi görev dağılımını, sosyal bağışıklığı ve koloni homeostazını hedef aldığı için Apis mellifera sosyal organizmasının kırılgan noktalarını ortaya koymaktadır.

Davranışsal açıdan bakıldığında, bal arısı kolonilerinin en dikkat çekici özelliklerinden biri de kendi kendini organize eden yapıya sahip olmalarıdır. Koloni içinde merkezi bir kontrol sistemi bulunmadığından, düzen bireylerin yerel etkileşimlerinin zaman içinde oluşturduğu karmaşık ağlar aracılığıyla ortaya çıkar. Bu nedenle koloni davranışları, kaos teorisi, karmaşıklık bilimi ve topluluk optimizasyon modelleri açısından ideal bir çalışma materyalidir (Camazine et al., 2020). Bu kendiliğinden düzenlenen sistemde küçük ölçekli bireysel davranış değişiklikleri koloni düzeyinde büyük sonuçlara yol açabilir; örneğin tarlacı geri dönüş oranlarındaki küçük değişimler bile nektar giriş hızını, larva besleme kapasitesini ve kraliçe yumurtlama hızını etkileyebilir (Seeley, 2019). Bu tür geri bildirim döngüleri, koloninin biyolojik bir "denge arayışı" içinde sürekli olarak kendini yenilediğini göstermektedir.

Bal arılarının sosyal yapılara sahip olmasının evrimsel temelleri, akrabalık seçilimi ve haplodiploidi genetik sistemi çerçevesinde açıklanmaktadır. İşçi arıların kendi genlerinin daha yüksek oranda kraliçe aracılığıyla sonraki nesillere aktarılması, işçi özgeciliğinin evrimsel avantajını desteklemektedir (Hamilton, 1964). Bununla birlikte modern çalışmalar, bal arılarında sosyal davranışların yalnızca genetik akrabalıkla değil, aynı zamanda epigenetik düzenlemeler ve çevresel sinyallerle de şekillendiğini ortaya koymaktadır. İşçi ve kraliçe gelişimi arasındaki farkın büyük ölçüde beslenme rejimi ve epigenetik modifikasyonlara dayanması bu duruma en iyi örneklerden biridir (Kamakura, 2011; Li-Byarlay et al., 2020).

Bal arıları, sosyal davranışları yalnızca koloni içi organizasyonla sınırlı olmayan, ekosistemin daha geniş bir parçası olan biyolojik aktörlerdir. Polen ve nektar taşıyıcısı olarak ekosistem hizmetleri açısından kritik bir rol oynamalarının yanında, çevresel geri bildirim sistemlerinin bir parçası olarak bitki-polinatör etkileşimlerinin sürdürülebilirliğini sağlarlar (Klein et al., 2007). Bu nedenle koloni dinamiklerinin bozulması yalnızca arıcılar açısından değil, biyoçeşitlilik ve tarımsal üretim açısından da küresel ölçekte ciddi sonuçlar doğurabilmektedir.

Bal arısı kolonilerinin yüksek düzeyde örgütlenmiş sosyal yapısı, yalnızca iç dinamiklerin bir ürünü olmayıp aynı zamanda çevreyle kurulan çift yönlü geri bildirim mekanizmalarıyla sürekli biçimde yeniden şekillenmektedir (Seeley, 2019; Winston, 1991). Koloni, çevredeki floral kaynakların bolluğu, iklim koşulları, patojen baskısı ve predatör tehditleri gibi değişkenlere göre

işgücü dağılımını ve davranışsal stratejilerini dinamik olarak ayarlayabilen benzersiz bir adaptif sistemdir (Klein et al., 2007; Vercelli et al., 2021). Tarlacı arıların topladıkları nektar ve polen miktarı, koloninin protein ve karbonhidrat gereksinimleri hakkında anlık bilgi sağlar ve bu bilgi hemşire arıların larva besleme hızını, kraliçenin yumurtlama ritmini ve petek inşa faaliyetlerini doğrudan etkiler (Johnson, 2010). Böylece koloni, içsel fizyolojik süreçlerle dışsal ekolojik sinyaller arasında sürekli bir uyum arayışı içinde işleyen bütüncül bir homeostatik yapı sergiler (Jones, 2006; Stabentheiner et al., 2010).

Koloni içinde görev değişimlerinin rastlantısal olmadığı, aksine karmaşık bir sosyal geri bildirim ağı tarafından düzenlendiği gösterilmiştir (Robinson, 2009; Pankiw et al., 2004). Hemşire arıların salgıladığı besin maddelerinin kimyasal bileşimi, larvaların gelişim hızını ve yönünü belirlerken, larvaların feromon profili de hemşire arıların davranışını biçimlendirir (Slessor et al., 2005). Böylece larva-işçi etkileşimleri çift taraflı bir kontrol mekanizması oluşturur (Pankiw et al., 2004). Aynı şekilde, tarlacı arıların kovana taşıdığı nektarın nem oranı ve şeker konsantrasyonu, nektar işleme görevindeki arıların çalışma temposunu etkiler ve petek gözlerinde bal olgunlaştırma faaliyetleri buna göre hızlanır veya yavaşlar (Dyer, 2002). Bu karşılıklı düzenlemeler, koloninin bir organizma gibi davranmasını sağlayan çok katmanlı bir bütünleşme düzeyi yaratır (Hölldobler & Wilson, 2009).

Bal arıları sosyal davranışlarında bireysel ve topluluk düzeyinde öğrenme kapasitesine sahip olup deneyim yoluyla davranışlarını optimize edebilirler (Menzel, 2012; Srinivasan, 2011). Tarlacı arıların çiçek türlerinin renklerini, kokularını ve morfolojik yapısını öğrenerek sonraki uçuşlarda daha verimli kaynakları seçmesi, koloni genelinde enerji tasarrufu sağlar (Dyer & Gould, 1983). Dahası, bireysel öğrenme süreçleri dans iletişimi yoluyla koloniye aktarıldığında bu bilgi paylaşımı kolektif bir bilişsel kapasiteye dönüşür (Grüter & Farina, 2009). Bu durum, bal arısı kolonilerinin yalnızca fizyolojik olarak değil, bilgi işleme süreçleri açısından da bir süperorganizma niteliği taşıdığını göstermektedir (Camazine et al., 2020).

Koloni içi karmaşık davranışsal yapıların korunabilmesi, bireylerin fizyolojik dayanıklılıkları kadar sosyal bağışıklık mekanizmalarının etkinliğine de bağlıdır. İşçi arıların propolis biriktirme davranışı, kovan içi mikroorganizma yükünü azaltarak patojenlerin yayılım hızını sınırlar (Simone-Finstrom et al., 2017). Hijyen davranışına sahip kolonilerde işçiler bozulmuş

veya enfekte larvaları hızla uzaklaştırarak patojen baskısını önemli ölçüde azaltır (Evans & Spivak, 2010). Bu sosyal bağışıklık davranışları bireysel bir arının yaşam süresini uzatmaktan öte, koloninin bütünsel sağlığını koruyan temel evrimsel stratejiler olarak işlev görür (Nazzi & Le Conte, 2016). Sosyal bağışıklığın bozulması, özellikle *Varroa destructor* ve virüs etkileşimlerinde görüldüğü gibi, koloni çöküşüne kadar giden zincirleme etkilere yol açabilir (Ramsey et al., 2019).

Modern çevresel baskıların artmasıyla birlikte bal arısı kolonilerinin sosyal organizasyonunda meydana gelen değişikliklerin ekolojik sonuçları daha görünür hale gelmiştir. Pestisit maruziyeti işçi arıların yön bulma yeteneğini bozduğunda koloninin tarlacı kaybı artmakta, bu durum hem kaynak girişini azaltmakta hem de genç işçilerin erken tarlacılığa geçmesine neden olarak koloninin yaş yapısını bozmaktadır (Henry et al., 2012; Tsvetkov et al., 2017). Erken tarlacı olan arıların yaşam süresi kısaltıldığından koloni giderek zayıflamakta ve sosyal davranış ağı kırılgan hale gelmektedir (Klein et al., 2007; McMahon et al., 2018). Böylece dışsal bir stres faktörü, davranışsal zincirleme etkiler yoluyla koloninin temel organizasyonel yapısını hedef almış olur. Koloni düzeyindeki bu kırılganlık, sosyal organizmanın çevresel streslere karşı ne kadar hassas olduğunu ve sürdürülebilir arıcılık uygulamalarının önemini bir kez daha vurgular (Goulson et al., 2015).

Bal arısı kolonilerinde sosyal davranış dinamiklerini sürdüren temel mekanizmalardan biri de koloni içinde oluşan mikrobiyal topluluk yapısıdır. İşçi arıların bağırsak mikrobiyotası, besin sindirimi, bağışıklık yanıtı ve hatta davranışsal fenotiplerin şekillenmesinde kritik rol oynamaktadır (Engel & Moran, 2013). Mikrobiyota bileşimi, polen çeşitliliği, çevresel pestisit kalıntıları ve kolonideki sosyal temas yoğunluğu gibi faktörlerden güçlü biçimde etkilenir. Arıların trofalloksis yoluyla birbirlerine gıda aktarırken aynı zamanda simbiyotik bakterileri de paylaşımları, koloninin mikrobiyal yapısının bütüncül bir “konak–koloni birliği” oluşturmalarını sağlar (Powell et al., 2014). Bu durum sosyal bağışıklığın mikrobiyal bir katmanla desteklendiğini ve koloninin sağlığının yalnızca bireysel fizyolojiyle değil, topluluk temelli mikrobiyal etkileşimlerle de şekillendiğini göstermektedir.

Koloninin karar alma süreçlerinde, bireysel arıların çevresel uyarıcılara verdiği davranışsal yanıtlar ile grubun ortak çıkarına uygun düşen kolektif tepki arasında ince bir denge bulunur. Bu denge, çoğu zaman rekabet eden bilgi

kaynaklarının koloni içinde nasıl yayıldığına ve hangi bilginin baskın hale geldiğine bağlıdır. Örneğin nektar kaynakları arasında seçim yapılırken tarlacı arıların dans şiddeti yalnızca kaynağın kalitesi ile değil, rekabet eden tarlacıların danslarının göreceli yoğunluklarıyla da şekillenir; böylece koloni kararları merkezi bir kontrol olmaksızın “oy çokluğu” benzeri bir mekanizma ile belirlenir (Seeley, 2019; Passino et al., 2008). Bu süreç, biyolojik karar sistemlerinin matematiksel optimizasyon süreçleriyle paralellik gösterdiğini ortaya koymakta ve bal arılarını biyomimetik algoritmalar için ideal bir model haline getirmektedir.

Sosyal organizasyonun sürdürülebilmesi açısından koloninin popülasyon yapısı da kritik öneme sahiptir. İşçi arı yaş dağılımı optimumdan sapmaya başladığında koloninin işlevsel kapasitesi hızla düşer. Genç işçilerin hemşirelik davranışlarını, yaşlı işçilerin ise tarlacılık görevlerini üstlenmesi koloninin temel işlevsel yapısını oluşturur. Pestisitler, Varroa destructor enfestasyonu ve viral hastalıklar genç işçilerin gelişimini bozduğunda koloninin iç işgücü dengesi kaybolur ve “prematüre foraging” olarak adlandırılan erken tarlacılığa geçiş davranışı ortaya çıkar (Perry et al., 2015). Bu erken dönüşüm, arıların fiziksel yeterliliği tam gelişmeden tarlacı olmalarına yol açtığı için yaşam sürelerini kısaltır, tarlacı kayıplarını artırır ve sonuçta koloni çöküş riskini yükseltir (Nazzi & Le Conte, 2016; Ramsey et al., 2019). Bu etkileşimsel kırılma, sosyal böcek kolonilerinin ekolojik stresler altında neden hızlı şekilde çözülebileceğini açıklayan temel mekanizmalardan biridir.

Bal arılarının sosyal davranış sistemlerinin bir diğer önemli yönü, çevresel değişimlere karşı esnek ve hızlı uyum sağlayabilme kapasitesidir. Koloni içi sıcaklık ve nem değişimleri karşısında işçi arılar tarafından uygulanan davranışsal termoregülasyon stratejileri, koloninin hayatta kalması açısından hayati önem taşır (Stabentheiner et al., 2010). Kuluçkalık bölgesinin sıcaklığının 34–36°C aralığında korunması, larva gelişimi ve kraliçe yumurtlama hızı için optimum koşulları sağlar. Sıcaklık sapmaları durumunda işçi arılar titreşim kas aktivasyonunu artırarak ısı üretir veya koloniyi serinletmek için su taşıyarak buharlaşmalı soğutma mekanizmasını devreye sokar (Jones, 2006). Bu davranışların koordinasyonu, koloninin bireysel arıların çok üzerinde bir organizasyonel zekâyâ sahip olduğunu göstermektedir.

Tüm bu sosyal, fizyolojik ve ekolojik süreçler birlikte değerlendirildiğinde bal arısı kolonilerinin sosyal evrim açısından benzersiz bir

model sunduğu görülmektedir. Haplodiploidi genetik sistemi, akrabalık seçilimi, kraliçe-işçi işlevsel ayrımı ve epigenetik düzenleme mekanizmaları, koloninin uzun vadeli uyum başarısında birlikte rol oynar (Hamilton, 1964; Kamakura, 2011; Li-Byarlay et al., 2020). Bal arılarının kraliçe ve işçi gelişimi arasındaki dramatik farkların besin temelli epigenetik modifikasyonlarla belirlenmesi, sosyal kast sistemlerinin biyolojik temellerine dair en güçlü kanıtlardan biridir. Bu epigenetik esneklik koloninin çevresel baskılar karşısında adaptasyon kapasitesini artırmakta ve koloniyi ekolojik dinamiklere duyarlı hale getirmektedir.

Koloni düzeyinde ortaya çıkan bu bütünleşik davranış sistemi, yalnızca arı biyolojisini anlamamız açısından değil, aynı zamanda doğal ekosistemlerin sürdürülebilirliğini değerlendirme açısından da kritik bir pasaj sunmaktadır. Arıların tozlaşma faaliyetleri dünya bitkisel üretiminin ve ekosistem fonksiyonlarının temel taşlarından biridir (Klein et al., 2007). Dolayısıyla bal arısı kolonilerinin sosyal yapısında meydana gelecek herhangi bir bozulma yalnızca arıcılık ekonomisini değil, aynı zamanda küresel gıda güvenliğini ve biyolojik çeşitliliği de doğrudan tehdit etmektedir (Goulson et al., 2015). Bu nedenle bal arısı kolonilerinin sosyal davranış biyolojisinin anlaşılması, modern ekoloji, tarım bilimi ve çevre politikaları için stratejik bir önem taşımaktadır.

Bal arısı kolonilerindeki sosyal davranışların derinliğini anlamak için, bireylerin görev değişimlerini düzenleyen nörofizyolojik süreçlerin de göz önünde bulundurulması gerekir. İşçi arıların beyinde yer alan nöropeptid sinyalleme ağları, özellikle aminergik nörotransmitterler olan dopamin, serotonin ve oktopamin yolları, davranış geçişlerinin temel düzenleyicileri arasında yer almaktadır (Robinson, 2009). Oktopamin düzeylerinin artması tarlacı davranışını teşvik ederken, vitellogenin düzeyleri ve juvenil hormon arasındaki ters yönlü ilişki hemşirelik davranışına bağlı fizyolojik profili belirler (Amdam & Omholt, 2003). Bu karşıt düzenleyici ağ, işçi arıların sosyal rolleri arasında dinamik bir denge kurulmasını sağlar. Dolayısıyla davranışsal polietismin yalnızca yaş temelli değil, aynı zamanda moleküler ve nöroendokrin girdilerle şekillenen bütünleşik bir süreç olduğu anlaşılmaktadır.

Arıların çevresel bilgiyi işleme ve karar verme kapasitesi, grup zekâsının nasıl ortaya çıktığına dair önemli ipuçları sunar. Tarmacı arıların uçuş sırasında topladıkları çevresel veriler —rüzgâr yönü, güneş konumu, flora çeşitliliği,

predatör baskısı— bireysel hafızada depolanmakta ve kovan dönüşünde dans iletişimi sırasında koloniye aktarılmaktadır (Menzel, 2012; Riley et al., 2005). Bu veri paylaşımı, koloni düzeyinde adeta merkezi olmayan bir bilgi işlem ağı oluşturur. Her bir tarlacının katkısı küçük görünse de, çok sayıda bireyin sinyal entegrasyonu sonucunda koloni, yüzlerce olası kaynak arasında optimum seçimi yapabilmektedir. Bu süreçte zayıf sinyallerin zamanla elenmesi, güçlü sinyallerin pekiştirilmesi ve kollektif eylemin adım adım oluşması, bal arılarının bilişsel ekolojisini diğer sosyal böceklerden ayıran temel özelliklerden biridir (Seeley, 2019).

Koloninin uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından genetik çeşitlilik önemli bir unsur olarak karşımıza çıkar. Bir kolonideki genetik çeşitlilik, işçi arı davranışlarının çeşitliliğini artırdığı gibi koloni dayanıklılığını da yükseltmektedir. Çoklu erkekle çiftleşme (polyandry) sonucu oluşan patriline çeşitliliği, işçi arılar arasında farklı görev yatkınlıklarının ortaya çıkmasını sağlamakta ve bunun sonucunda koloni içi iş bölümü daha verimli hale gelmektedir (Tarpy et al., 2013). Ayrıca genetik çeşitlilik, patojenlere karşı toleransı artırarak koloni bağışıklığını güçlendirmekte ve çevresel değişikliklere adaptasyon kapasitesini genişletmektedir (Seeley, 2019). Bu nedenle bal arılarında koloninin üreme stratejileri, sosyal davranış sisteminin evrimsel temelleriyle doğrudan bağlantılıdır.

Bal arısı kolonilerinin sosyal yapısını etkileyen kritik faktörlerden biri de enerji bütçesinin yönetilmesidir. Koloni içinde her davranışın bir enerji maliyeti vardır ve bu maliyetler koloni düzeyinde optimize edilmek zorundadır. Kuluçka bakımının yüksek enerji gereksinimi, genç işçilerin metabolik profilleriyle uyumludur; buna karşın tarlacılık davranışının enerji maliyeti daha yüksektir ve yaşlı işçilerin oksidatif stres toleransı bu görevi daha verimli şekilde üstlenmelerine imkân tanır (Higes et al., 2008). Koloni, bu metabolik farklılıkları kullanarak hem davranışsal hem de fizyolojik verimliliği artırır. Bu verimlilik, koloni büyüklüğünün yıl içindeki dalgalanmalarına rağmen sürdürülmesi gereken karmaşık bir adaptasyon sürecidir.

Sosyal davranış sisteminin sürdürülebilirliği aynı zamanda çevresel toksinlere ve patojen baskısına karşı verilen yanıtların etkinliğiyle ilişkilidir. Özellikle neonikotinoid pestisitlerin sinaptik asetilkolin reseptörlerine bağlanarak nörolojik bozukluklar oluşturduğu ve yön bulma hatalarını artırdığı, bunun da koloninin kaynak akışında ciddi kesintilere yol açtığı bilinmektedir

(Henry et al., 2012; Tsvetkov et al., 2017). Benzer şekilde, *Nosema ceranae* enfeksiyonlarının enerji metabolizmasını bozarak tarlacı arıların dayanıklılığını düşürdüğü ve sosyal davranışların bütünsel koordinasyonunu zayıflatığı gösterilmiştir (Higes et al., 2008). Bu tür streslerin kolonide tetiklediği zincirleme etkiler, davranışsal rollerin çökmesine, yaş yapısının bozulmasına ve sonuç olarak koloni kayıplarına yol açabilmektedir.

1. Feromon Biyolojisi

Bal arısı kolonilerinde sosyal organizasyonun en temel düzenleyicisi feromonlardır ve bu kimyasal sinyal sistemleri koloninin işleyişinin neredeyse her aşamasını kontrol eder. Feromonlar, koloni üyeleri arasında hem kısa mesafeli hem de uzun mesafeli bilgi aktarımını sağlayan, davranış ve fizyoloji üzerinde güçlü etkiler yaratan moleküllerdir (Slessor et al., 2005). Kraliçe mandibular feromonu (QMP), koloninin sosyal yapısını sürdüren en kritik kimyasal sinyallerden biridir. QMP'nin işçilerde üreme baskılaması, işçi davranışının düzenlenmesi, koloni bütünlüğünün korunması ve erkek arıların kraliçeye yönlendirilmesi gibi çok yönlü etkileri vardır (Hoover et al., 2003). Özellikle 9-ODA ve 9-HDA bileşenleri, işçi arıların yumurtalık gelişimini baskılayarak kolonideki üreme işbölümünün evrimsel temellerini oluşturur (Winston, 1991).

Larvalar tarafından salgılanan brood pheromone ise işçi arıların görev dağılımını (age polyethism), hemşirelik davranışını ve tarlacılık başlangıcını etkileyen hayati bir düzenleyicidir (Pankiw et al., 2004). Bu feromon, hemşire arı popülasyonunun koloninin larva bakım ihtiyaçlarına göre dinamik olarak ayarlanmasını sağlar. Aynı zamanda tarlacıların nektar toplama motivasyonunu değiştiren primer faktörlerden biridir.

Alarm feromonu (izoamil asetat) savunma davranışlarını düzenler ve saldırganlık yanıtını koordine eder. Bir işçi arı iğnesini bıraktığında, izoamil asetat yayılır ve koloni savunma birimlerini aynı hedefe yönlendirir (Boch et al., 1962). Nasonov feromonu ise kovan girişinde işçiler tarafından salınır ve yönlendirme işareti görevi görür; bu feromon sürünün toparlanması, yeni yuvanın bulunması ve koloni bütünlüğünün korunması için gereklidir (Free, 1987).

Feromon sistemlerinin en dikkat çekici yönü, bireysel davranışları düzenlemekten daha öte, koloni düzeyinde koordineli ve bütünsel davranışlar

oluşturmaya katkı sağlamasıdır. Bu nedenle feromon biyolojisi, bal arısı kolonilerinde karar verme, görev dağılımı, bağışıklık ve termoregülasyon gibi diğer sosyal süreçlerin temel bileşeni olarak işlev görür (Seeley, 2019).

2. Kolektif Karar Verme

Bal arısı kolonileri, biyolojide “kolektif zekâ” olarak bilinen olgunun en iyi modellerinden birini oluşturur. Koloni, merkezi bir liderden yoksundur; buna rağmen karmaşık kararları hızlı, doğru ve optimize bir şekilde verebilir (Johnstone et al., 2002). En iyi bilinen örneklerinden biri, yeni yuva yeri seçimidir. Koloni bölündüğünde scout adı verilen keşifçi arılar potansiyel yuva alanlarını değerlendirir ve dans iletişimi yoluyla koloninin diğer üyelerine bu bilgiyi iletir (Seeley, 2019).

Bu süreçte, kaliteli yuva yerleri daha güçlü ve daha hızlı danslarla temsil edilir; düşük kaliteli alanlar ise davranışsal rekabet yoluyla elenir. Bu bireysel sinyallerin entegrasyonu, çok sayıda arının katıldığı bir “oylama süreci”ne dönüşür. Yeterli sayıda destek toplayan yer, koloni tarafından seçilir. Bu, biyolojik sistemlerde en bilinen demokratik seçim mekanizmalarından biridir (Seeley, 2019).

Nektar kaynağı seçimi de benzer şekilde gerçekleşir. Tarlacı arılar kaynakların şeker derişimi, mesafesi ve tehlike düzeyi hakkında bilgi getirir. Dans şiddeti ve sıklığı kaynak kalitesiyle doğru orantılıdır (Riley et al., 2005). Zayıf kaynaklar zamanla dans rekabetinde kaybolur; güçlü kaynaklar baskın hâle gelir.

Bu süreç, koloni düzeyinde ortaya çıkan optimize davranışın kaynağıdır. İlginç şekilde, bal arıları bireysel olarak sınırlı bilişsel kapasiteye sahip olsalar da topluluk halinde son derece sofistike kararlar verebilir. Doğada bu mekanizma, koloninin hayatta kalmasını artıran en kritik adaptasyonlardan biri olarak kabul edilir (Passino et al., 2008).

3. Age Polyethism ve Fizyolojik Temeller

Bal arısı işçilerinde görev dağılımı, yaşa bağlı olarak değişen “age polyethism” mekanizmasına dayanır. Genç işçiler hemşirelik davranışını üstlenirken, orta yaşlılar petek örme ve kovan içi bakım görevlerini yürütür, yaşlı işçiler ise tarlacılık görevine geçer (Robinson, 2009).

Bu davranış döngüsünün yalnızca yaşla değil, aynı zamanda hormon profilleri, nöropeptidler, gen ekspresyonu ve enerji metabolizması ile düzenlendiği gösterilmiştir. Juvenil hormon (JH), işçilerin tarlacılığa dönüşümünde kritik rol oynar. Hemşire arılarda JH düzeyi düşüktür; tarlacı olmadan önce hızla yükselir (Elekonich & Roberts, 2005). Bunun tam zıddı olarak vitellogenin proteini hemşirelik davranışını destekler, oksidatif stres toleransını artırır ve işçilerin metabolik profillerini belirler (Amdam & Omholt, 2003).

Gen ekspresyon çalışmaları, hemşire arıların beyinlerinde sosyal bakım davranışını destekleyen genlerin; tarlacıların beyinde ise hafıza, yön bulma ve uçuş metabolizmasıyla ilişkili genlerin aktif olduğunu göstermiştir (Whitfield et al., 2003). Bu durum görev değişiminin moleküler temelini açıklar.

Age polyethism dinamik bir süreçtir; koloni stres altında olduğunda görev değişimleri hızlanabilir veya geri dönebilir. Örneğin tarlacı kaybı arttığında genç arılar normalden hızla tarlacı olur; fakat bu “erken tarlacılık” koloninin çöküş riskini artırır (Perry et al., 2015).

4. Koloni Bağışıklığı (Social Immunity)

Koloninin bağışıklığı yalnızca bireysel arıların fizyolojik savunma mekanizmalarına değil, aynı zamanda **toplumsal bağışıklık** denen kolektif savunma stratejilerine dayanır. Bal arıları patojen baskısına karşı sosyal düzeyde koordineli davranışlar geliştirmiştir (Evans & Spivak, 2010).

Bunların en önemlileri:

- **Hijyen davranışı:** İşçiler enfekte veya ölü larvaları petekten hızla uzaklaştırır. Bu davranış Amerikan Yavru Çürüklüğü ve Nosema gibi hastalıkların yayılmasını büyük ölçüde sınırlar (Perry et al., 2015).

- **Propolis bariyeri:** Arılar kovan içini propolisle kaplayarak bakteriyel yükü azaltır ve kolonide daha steril bir mikro ortam oluşturur (Simone-Finstrom et al., 2017).

- **Sosyal duyarlılık (social fever):** Varroa ve Nosema gibi patojenlere karşı koloninin ısı artırdığı, bu termal yanıtın patojen çoğalmasını baskıladığı gösterilmiştir (Starks et al., 2000).

- **Mikrobiyota paylaşımı:** Arılar trofallaksis sırasında simbiyotik mikroorganizmaları paylaşır. Bu mikroorganizmalar hastalıklara karşı koloniyi koruyan bir biyolojik kalkan işlevi görür (Engel & Moran, 2013).

Bu sosyal bağışıklık mekanizmaları koloniyi bir süperorganizma olarak işlevsel kılar ve modern arı sağlığı çalışmalarının temel araştırma alanlarından biridir(Evans & Spivak, 2010).

5. Termoregülasyon ve Homeostaz

Bal arısı kolonileri olağanüstü bir termoregülasyon kapasitesine sahiptir ve kuluçka sıcaklığının 34–36°C aralığında korunması hayati önem taşır (Stabentheiner et al., 2010). Koloni, sıcaklık düzenlemesini bireysel arıların koordineli davranışlarıyla sağlar:

- **Isı üretimi:** Arılar torasik kaslarını titreştirerek ısı üretir (Heinrich, 1973).
- **Soğutma:** Arılar kanat çırparak hava akımı oluşturur ve su buharlaştırarak kovani serinletir.
- **Kümeleşme (clustering):** Soğuk havalarda işçiler ısıyı korumak için sıkı bir küme oluşturur.

Termoregülasyon yalnızca fiziksel bir süreç değildir; koloni içi davranış modelleri, işçi yoğunluğu, kuluçka konumu ve çevresel faktörlerle sinerjik biçimde çalışır (Jones, 2006).

Bu homeostatik kontrol koloninin hayatta kalması için mutlak gereklidir. Sıcaklık bozulduğunda larvaların gelişim anormallikleri, kraliçe yumurtlama düzensizlikleri ve koloni güç kaybı görülür (Tautz et al., 2003).

6. Çevresel Stres Faktörlerinin Koloni Davranışına Etkisi

Modern arıcılığın en büyük tehditleri pestisitler, patojenler, iklim değişikliği ve habitat kaybıdır. Özellikle neonikotinoid pestisitlerin arıların yön bulma sistemine, öğrenme kapasitesine ve sosyal davranışlarına zarar verdiği gösterilmiştir (Henry et al., 2012).

Varroa destructor, hem mekanik hem de viral etkilerle koloniyi çökerten en yıkıcı parazittir. Varroa'nın yağ dokuyla beslenmesi işçi arıların enerji metabolizmasını bozar ve davranış koordinasyonunu zayıflatır (Ramsey et al., 2019).

Nosema ceranae enfeksiyonları işçilerin enerji dengesini alt üst eder, tarlacıların dayanıklılığını düşürür ve koloninin görev dağılımını bozar (Higes et al., 2008).

İklim değişikliği ise çiçek fenolojisini bozarak arıların foraging zamanlaması ile bitki nektar akışı arasındaki uyumu azaltır (Tautz et al., 2003).

Bu stres faktörleri tek başına zararlı olsa da en büyük tehlike sinergistik etkileridir. Pestisit + Varroa + yetersiz besin zinciri, kolonilerin çöküş sendromuna (CCD) girmesine neden olabilir (Goulson et al., 2015).

SONUÇ

Bal arısı kolonileri, sosyal organizasyonun en karmaşık ve en başarılı örneklerinden birini oluşturan, biyolojide “süperorganizma” kavramının tam anlamıyla karşılığını bulan yapı ve işleyiş özelliklerine sahiptir. Bu kolonilerde görülen davranışsal, fizyolojik ve kimyasal bütünleşme; tek tek bireylerin sınırlı kapasitesiyle açıklanamayacak derecede yüksek bir fonksiyonel uyum ve kolektif zekâ ortaya çıkarır (Hölldobler & Wilson, 2009). Feromon iletişimi, koloni içinde koordinasyonu sağlayan en güçlü düzenleyici ağlardan birini oluşturur ve işçi arıların üreme baskılanmasından savunma organizasyonuna, görev dağılımından koloni bütünlüğüne kadar geniş bir davranış yelpazesini kontrol eder (Slessor et al., 2005; Hoover et al., 2003).

Kolektif karar verme süreçleri, bireysel arıların sahip olduğu kısıtlı bilgi ve kapasiteye rağmen koloninin optimal seçimlerde bulunabilmesini mümkün kılar. Hem yuva yeri seçimi hem de nektar kaynaklarının değerlendirilmesi süreçlerinde, bireylerin dans dili ile ilettiği bilgiler kolonide demokratik ve çoğulcu bir değerlendirme sürecine dönüşür ve koloninin evrimsel açıdan en avantajlı kararı vermesi sağlanır (Johnstone et al., 2002). Bu karar verme mekanizması, sosyal böcek topluluklarının merkezi bir lider olmaksızın yüksek verimlilikle işleyebileceğine dair önemli bir evrimsel kanıt niteliğindedir.

Görev dağılımının yaşa bağlı olarak düzenlendiği age polyethism sistemi, hem nörofizyolojik hem de hormonal mekanizmaların bir arada işlediği çok katmanlı bir düzenleme sağlar. Juvenil hormon, vitellogenin düzeyleri ve aminergik sinyal yolları gibi fizyolojik faktörlerin davranış geçişlerini düzenlediği ortaya konmuştur (Amdam & Omholt, 2003; Elekonich & Roberts, 2005). Bu biyolojik düzenleme sayesinde koloni, çevresel koşullara hızla uyum sağlayan dinamik bir organizma gibi davranır. Özellikle koloni stresi altında görülen “erken tarlacılık fenomeni”, sosyal düzenin ne kadar hassas olduğunu ve davranışsal esnekliğin koloni başarısında belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir (Perry et al., 2015).

Koloni bağışıklığı ise bireysel immün yanıtın ötesine geçen, sosyal düzeyde ortaya çıkan bir savunma sistemidir. Hijyen davranışı, propolis

bariyeri, sosyal ateş tepkisi ve mikrobiyota paylaşımı gibi süreçler, patojen baskısına karşı koloni bütününde koruyucu bir kalkan oluşturur (Evans & Spivak, 2010; Simone-Finstrom et al., 2017; Engel & Moran, 2013). Bu mekanizmaların gelişimi, arı kolonilerinin çevresel patojen basıncı altında evrimsel olarak şekillendiğini ve sosyal bağışıklığın süperorganizma düzeyinde adaptif bir özellik olduğunu göstermektedir.

Termoregülasyon ise koloni sağlığının sürdürülmesinde kritik bir rol oynar. İşçi arıların kas titremesiyle ısı üretmesi, buharlaşmalı soğutma yapması veya kışın kümelenerek ısı koruması sağlaması, koloninin homeostatik kontrol kapasitesinin en belirgin göstergelerindendir (Stabentheiner et al., 2010; Jones, 2006). Kuluçka gelişimini destekleyen bu termal stabilite, koloninin büyüme hızını, işçi verimliliğini ve genel dayanıklılığını belirleyen önemli bir biyolojik önkoşuldur. Bu yönüyle termoregülasyon, sosyal davranış ile fizyolojik uyumun bütünleştiği bir alanı temsil eder.

Günümüzde arı kolonilerinin karşı karşıya olduğu çevresel stres faktörleri —pestisit maruziyeti, Varroa destructor enfestasyonu, Nosema enfeksiyonları, iklim değişikliği ve habitat kaybı— koloni davranışlarını doğrudan etkilemekte ve sosyal düzenin bozulmasına neden olmaktadır (Henry et al., 2012; Higes et al., 2008; Ramsey et al., 2019). Bu stres faktörlerinin çoğu sinerjistik şekilde etki gösterir. Örneğin neonikotinoid maruziyeti işçi arıların yön bulma yeteneğini zayıflatırken, Varroa parazitliği hem bağışıklığı baskılar hem de viral yükü artırarak mortaliteyi yükseltir. Bu çoklu stres durumu kolonilerin çökme sendromuna (CCD) girişinde temel bir belirleyicidir (Goulson et al., 2015).

Tüm bu bilimsel bulgular bir araya getirildiğinde, bal arısı kolonilerinin sosyal organizasyonu yalnızca entomolojik açıdan değil, aynı zamanda ekolojik, evrimsel ve biyoteknolojik açılardan da büyük bir öneme sahiptir. Koloni davranışlarının anlaşılması, sürdürülebilir arıcılık uygulamalarının geliştirilmesi, hastalık yönetimi stratejilerinin iyileştirilmesi ve çevresel risk değerlendirmelerinin yapılması açısından temel bir bilgi alanı sunmaktadır. Ayrıca arı kolonilerinin kolektif zekâsı, mühendislik ve yapay zekâ gibi disiplinler için ilham kaynağı olmayı sürdürmektedir (Passino et al., 2008).

Sonuç olarak, bal arısı kolonileri karmaşık bir biyolojik sistemler ağıdır; feromon iletişimi, görev dağılımı, kolektif karar verme, sosyal bağışıklık, termoregülasyon ve çevresel stres yanıtlarının entegrasyonu ile işlev yürütür.

Bu sistemlerin her biri koloninin hayatta kalmasını ve ekosistemdeki kritik tozlaşma hizmetlerini yerine getirmesini mümkün kılar. Arı kolonilerinin karşı karşıya olduğu modern tehditler göz önüne alındığında, bu sosyal organizmanın biyolojisini anlamak yalnızca bilimsel bir hedef değil, aynı zamanda gelecekteki tarımsal üretim ve ekolojik sürekliliğin güvence altına alınması için zorunlu bir gerekliliktir (Klein et al., 2007; Goulson et al., 2015).

KAYNAKLAR

- Amdam, G. V., & Omholt, S. W. (2003). The hive bee to forager transition in honeybee colonies: the double repressor hypothesis. *Journal of theoretical biology*, 223(4), 451-464.
- Boch, R., Shearer, D. A., & Stone, B. C. (1962). Identification of iso-amyl acetate as an active component in the sting pheromone of the honey bee. *Nature*, 195(4845), 1018-1020.
- Camazine, S., Deneubourg, J. L., Theraula, G., Sneyd, J., & Franks, N. R. (2020). Self-organization in biological systems.
- Dyer, F. C. (2002). The biology of the dance language. *Annual review of entomology*, 47(1), 917-949.
- Dyer, F. C., & Could, J. L. (1983). Honey bee navigation: the honey bee's ability to find its way depends on a hierarchy of sophisticated orientation mechanisms. *American Scientist*, 71(6), 587-597.
- Elekonich, M. M., & Roberts, S. P. (2005). Honey bees as a model for understanding mechanisms of life history transitions. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 141(4), 362-371.
- Engel, P., & Moran, N. A. (2013). The gut microbiota of insects—diversity in structure and function. *FEMS microbiology reviews*, 37(5), 699-735.
- Evans, J. D., & Spivak, M. (2010). Socialized medicine: individual and communal disease barriers in honey bees. *Journal of invertebrate pathology*, 103, S62-S72.
- Free, J. B. (1987). Pheromones of social bees (pp. xiii+-218).
- Frisch, K. V. (1993). The dance language and orientation of bees. Harvard University Press.
- Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., & Rotheray, E. L. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229), 1255957.
- Grüter, C., & Farina, W. M. (2009). The honeybee waggle dance: can we follow the steps?. *Trends in ecology & evolution*, 24(5), 242-247.
- Hamilton, W. D. (1964). The genetical evolution of social behaviour. II. *Journal of theoretical biology*, 7(1), 17-52.

- Heinrich, B. (1973). Mechanisms of insect thermoregulation. In *Effects of temperature on ectothermic organisms: ecological implications and mechanisms of compensation* (pp. 139-150). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Henry, M., Beguin, M., Requier, F., Rollin, O., Odoux, J. F., Aupinel, P., ... & Decourtye, A. (2012). A common pesticide decreases foraging success and survival in honey bees. *Science*, 336(6079), 348-350.
- Higes, M., Martín-Hernández, R., Botías, C., Bailón, E. G., González-Porto, A. V., Barrios, L., ... & Meana, A. (2008). How natural infection by *Nosema ceranae* causes honeybee colony collapse. *Environmental microbiology*, 10(10), 2659-2669.
- Hölldobler, B., & Wilson, E. O. (2009). *The superorganism: the beauty elegance and strangeness of insect societies*. WW Norton & Company.
- Hoover, S. E., Keeling, C. I., Winston, M. L., & Slessor, K. N. (2003). The effect of queen pheromones on worker honey bee ovary development. *Naturwissenschaften*, 90(10), 477-480.
- Johnstone, R. A., Dall, S. R. X., Franks, N. R., Pratt, S. C., Mallon, E. B., Britton, N. F., & Sumpter, D. J. (2002). Information flow, opinion polling and collective intelligence in house-hunting social insects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 357(1427), 1567-1583.
- Johnson, B. R. (2010). *Division of labor in honeybees: form, function, and proximate mechanisms*. *Behavioral ecology and sociobiology*, 64(3), 305-316.
- Jones, J. (2006). *Honey Bee Nest Thermoregulation* (Doctoral dissertation, School of Biological Sciences, Faculty of Science, University of Sydney).
- Kamakura, M. (2011). Royalactin induces queen differentiation in honeybees. *Nature*, 473(7348), 478-483.
- Kirchner, W. H., Hager, F. A., & Krausa, K. (2022). Vibrational behaviour in honeybees. In *Biotremology: Physiology, Ecology, and Evolution* (pp. 387-410). Cham: Springer International Publishing.
- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in

- changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 274(1608), 303-313.
- Li-Byarlay, H., Boncristiani, H., Howell, G., Herman, J., Clark, L., Strand, M. K., ... & Rueppell, O. (2020). Transcriptomic and epigenomic dynamics of honey bees in response to lethal viral infection. *Frontiers in genetics*, 11, 566320.
- McMahon, D. P., Natsopoulou, M. E., Doublet, V., Fürst, M., Weging, S., Brown, M. J., ... & Paxton, R. J. (2016). Elevated virulence of an emerging viral genotype as a driver of honeybee loss. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1833), 20160811.
- Menzel, R. (2012). The honeybee as a model for understanding the basis of cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(11), 758-768.
- Michener, C. D. (2007). *The Bees of the World* Johns Hopkins University Press. Baltimore, Md, USA.
- Nazzi, F., & Le Conte, Y. (2016). Ecology of *Varroa destructor*, the major ectoparasite of the western honey bee, *Apis mellifera*. *Annual review of entomology*, 61(1), 417-432.
- Nieh, J. C. (1998). The honey bee shaking signal: function and design of a modulatory communication signal. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 42(1), 23-36.
- Pankiw, T., Roman, R., Sagili, R. R., & Zhu-Salzman, K. (2004). Pheromone-modulated behavioral suites influence colony growth in the honey bee (*Apis mellifera*). *Naturwissenschaften*, 91(12), 575-578.
- Passino, K. M., Seeley, T. D., & Visscher, P. K. (2008). Swarm cognition in honey bees. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 62(3), 401-414.
- Perry, C. J., Søvik, E., Myerscough, M. R., & Barron, A. B. (2015). Rapid behavioral maturation accelerates failure of stressed honey bee colonies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(11), 3427-3432.
- Popovska Stojanov, D., Dimitrov, L., Danihlík, J., Uzunov, A., Golubovski, M., Andonov, S., & Brodschneider, R. (2021). Direct economic impact assessment of winter honeybee colony losses in three European countries. *Agriculture*, 11(5), 398.
- Powell, J. E., Martinson, V. G., Urban-Mead, K., & Moran, N. A. (2014). Routes of acquisition of the gut microbiota of the honey bee *Apis mellifera*. *Applied and environmental microbiology*, 80(23), 7378-7387.

- Ramsey, S. D., Ochoa, R., Bauchan, G., Gulbranson, C., Mowery, J. D., Cohen, A., ... & vanEngelsdorp, D. (2019). Varroa destructor feeds primarily on honey bee fat body tissue and not hemolymph. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(5), 1792-1801.
- Ratnieks, F. L., & Reeve, H. K. (1992). Conflict in single-queen hymenopteran societies: the structure of conflict and processes that reduce conflict in advanced eusocial species. *Journal of Theoretical Biology*, 158(1), 33-65.
- Riley, J. R., Greggers, U., Smith, A. D., Reynolds, D. R., & Menzel, R. (2005). The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance. *Nature*, 435(7039), 205-207.
- Robinson, G. E. (2009). Division of labor in insect societies. *Encyclopedia of insects*, 297-299.
- Seeley, T. D. (2019). *The lives of bees: the untold story of the honey bee in the wild*. Princeton University Press.
- Simone-Finstrom, M., Borba, R. S., Wilson, M., & Spivak, M. (2017). Propolis counteracts some threats to honey bee health. *Insects*, 8(2), 46.
- Slessor, K. N., Winston, M. L., & Le Conte, Y. (2005). Pheromone communication in the honeybee (*Apis mellifera* L.). *Journal of chemical ecology*, 31(11), 2731-2745.
- Srinivasan, M. V. (2011). Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically inspired robotics. *Physiological reviews*, 91(2), 413-460.
- Stabentheiner, A., Kovac, H., & Brodschneider, R. (2010). Honeybee colony thermoregulation—regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress. *PLoS one*, 5(1), e8967.
- Starks, P. T., Blackie, C. A., & Seeley, T. D. (2000). Fever in honeybee colonies. *Naturwissenschaften*, 87(5), 229-231.
- Tautz, J., Maier, S., Groh, C., Rössler, W., & Brockmann, A. (2003). Behavioral performance in adult honey bees is influenced by the temperature experienced during their pupal development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(12), 7343-7347.

- Tarpy, D. R., Vanengelsdorp, D., & Pettis, J. S. (2013). Genetic diversity affects colony survivorship in commercial honey bee colonies. *Naturwissenschaften*, 100(8), 723-728.
- Tautz, J., Maier, S., Groh, C., Rössler, W., & Brockmann, A. (2003). Behavioral performance in adult honey bees is influenced by the temperature experienced during their pupal development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(12), 7343-7347.
- Tsvetkov, N., Samson-Robert, O., Sood, K., Patel, H. S., Malena, D. A., Gajiwala, P. H., ... & Zayed, A. (2017). Chronic exposure to neonicotinoids reduces honey bee health near corn crops. *Science*, 356(6345), 1395-1397.
- Wild, B., Dormagen, D. M., Landgraf, T., Couzin, I. D., & Smith, M. L. (2023). How honeybees respond to heat stress from the individual to colony level.
- Whitfield, C. W., Cziko, A. M., & Robinson, G. E. (2003). Gene expression profiles in the brain predict behavior in individual honey bees. *Science*, 302(5643), 296-299.
- Winston, M. L. (1991). *The biology of the honey bee*. Harvard University Press.

BÖLÜM 2

MONOKÜLTÜRÜN ARI BESLENMESİ ÜZERİNDEKİ UZUN VADELİ ETKİLERİ

Öğr. Gör. Zeynep ASUTAY

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986474>

1. GİRİŞ

Tarımsal üretim sistemlerinde verimliliği artırma amacıyla uygulanan monokültür, geniş alanlarda tek bir bitki türünün yetiştirilmesine dayanan bir model olup modern tarımın en belirgin karakteristiklerinden biri hâline gelmiştir (Altieri, 1999). Bu model kısa vadede üretim miktarını artırsa da ekolojik çeşitliliği azaltması nedeniyle sürdürülebilirlik açısından önemli tartışmalar doğurmaktadır (Tilman et al., 2002). Monokültürün ekosistem bileşenleri üzerindeki en kritik yansımalarından biri, tozlayıcı böceklerin — özellikle bal arılarının (*Apis mellifera* L.)— beslenme kaynaklarının çeşit ve süreklilik bakımından kısıtlanmasıdır (Kremen, 2008).

Arıların yaşam döngüsünü sürdürebilmesi için polen ve nektar kaynaklarının yıl boyunca erişilebilir olması gerekmektedir. Polen, arıların temel protein, amino asit, vitamin ve mineral kaynağını oluştururken; nektar karbonhidrat temelli enerji gereksinimini karşılamaktadır (Brodschneider & Crailsheim, 2010). Besin çeşitliliği, larva gelişiminden bağışıklık yanıtının düzenlenmesine kadar koloninin tüm fizyolojik süreçlerinde belirleyici faktördür (Di Pasquale et al., 2013). Ancak monokültür alanlarında bitki çeşitliliğinin azalması, arıların tek tip polene bağımlı kalmasına yol açmakta; bu durum beslenme yetersizliği, fizyolojik stres ve davranışsal bozulmalarla sonuçlanabilmektedir (Alaux et al., 2010).

Son yıllarda yürütülen çalışmalar, polen çeşitliliğindeki azalmanın arı yağ dokusu (fat body) gelişimini sınırladığını, bunun ise detoksifikasyon kapasitesini ve viral enfeksiyonlara karşı direnci düşürdüğünü göstermiştir (DeGrandi-Hoffman & Chen, 2015). Beslenme yetersizliğinin *Varroa destructor* gibi parazitlerin etkisini artırdığı ve koloni çöküşünün önemli bileşenlerinden biri olduğu bildirilmektedir (Nazzi & Pennacchio, 2014). Ayrıca monokültür bölgelerinde pestisit kullanımının yoğun olması, beslenme stresinin kimyasal stresle birleşerek arı mortalitesini artıran sinerjik bir etkileşim yarattığını ortaya koymuştur (Potts et al., 2010).

Monokültürün etkileri yalnızca fizyolojik düzeyle sınırlı değildir; aynı zamanda arı-bitki etkileşim ağlarının zayıflaması, habitat parçalanması, flora süreksizliği, genetik çeşitlilik daralması ve uzun vadeli popülasyon düşüşleri gibi daha geniş ekosistem sonuçlarına sahiptir (Goulson et al., 2015). Bu nedenle arı sağlığı ile tarımsal üretim modelleri arasındaki ilişki, çevre

bilimleri, arıcılık, tarım ekonomisi ve ekoloji disiplinlerini kesiştiren önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir.

Bu bölüm, tarımsal monokültürün arı beslenmesi üzerindeki uzun vadeli etkilerini literatür temelli olarak incelemekte; konuyu ekolojik, fizyolojik, davranışsal ve genetik perspektiflerden değerlendirmekte ve sürdürülebilir uygulamalar açısından tartışmaktadır. Böylece hem arıcılık sektörüne hem de tarımsal planlama politikalarına bilimsel katkı sunmayı amaçlamaktadır. Tarımsal üretim sistemlerinde verimliliği artırma amacıyla uygulanan monokültür, geniş alanlarda tek bir bitki türünün yetiştirilmesine dayanan bir model olup modern tarımın en belirgin karakteristiklerinden biri hâline gelmiştir (Altieri, 1999). Bu model kısa vadede üretim miktarını artırsa da ekolojik çeşitliliği azaltması nedeniyle sürdürülebilirlik açısından önemli tartışmalar doğurmaktadır (Tilman et al., 2002). Monokültürün ekosistem bileşenleri üzerindeki en kritik yansımalarından biri, tozlayıcı böceklerin — özellikle bal arılarının (*Apis mellifera* L.)— beslenme kaynaklarının çeşit ve süreklilik bakımından kısıtlanmasıdır (Kremen, 2008).

2. Arı Beslenmesinin Temelleri

Arı kolonilerinin yaşam döngüsünü sürdürebilmesi, yavru yetiştirme kapasitesini koruyabilmesi ve çevresel stres faktörlerine karşı direnç gösterebilmesi büyük ölçüde yeterli ve dengeli beslenmeye bağlıdır. Bal arıları, enerji ve yapı maddesi gereksinimlerini başlıca nektar ve polenden karşılamakta olup bu iki besin kaynağının miktarı, bileşimi ve çeşitliliği koloni sağlığının temel belirleyicilerindendir (Brodschneider & Crailsheim, 2010). Beslenmenin yalnızca kısa dönemli değil, uzun vadeli koloni performansı üzerindeki etkileri de literatürde giderek daha fazla vurgulanmaktadır (DeGrandi-Hoffman & Chen, 2015).

2.1. Polen ve Besin Bileşenleri

Polen, arıların protein, temel amino asitler, lipidler, steroller, vitaminler ve mineraller açısından birincil kaynağıdır. Özellikle esansiyel amino asitlerin yeterliliği, larva gelişimi ve işçi arıların fizyolojik dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir (Herbert, 1992). Yapılan çalışmalar, farklı bitki türlerinden elde edilen polenlerin besleyici değerinin geniş varyasyon gösterdiğini ve tek tip polenle beslenmenin koloni gelişimini sınırladığını ortaya koymaktadır (Di

Pasquale et al., 2013). Ayrıca polen çeşitliliği ile bağışıklık sistemi arasında doğrudan ilişki olduğu, çeşitli polenle beslenen kolonilerde hem antimikrobiyal yanıtın hem de hemolenf protein içeriğinin daha yüksek olduğu bildirilmektedir (Alaux et al., 2010).

Polenin kalitesi yalnızca besinsel içerik bakımından değil, aynı zamanda sindirilebilirlik ile de belirlenir. Arıların sindirim enzim aktiviteleri, polen kaynaklarına göre farklılık gösterebilmekte ve düşük sindirilebilirlik besinsel eksikliklere yol açabilmektedir (Human & Nicolson, 2006). Bu durum, tek tür bitkiden toplanan polene bağımlı kalan kolonilerde gelişimsel başarının azalmasına neden olabilir.

2.2. Nektar, Karbonhidrat Metabolizması ve Enerji Dengesi

Nektar, bal arılarının başlıca karbonhidrat kaynağı olup tarlacı aktivitesi, uçuş kaslarının enerji gereksinimi ve koloninin termoregülasyonu için vazgeçilmezdir (Crailsheim, 1990). Bal üretimi, yalnızca enerji depolama stratejisi değil aynı zamanda koloni içi stabilitenin de bir göstergesidir. Nektar kıtlığı dönemlerinde arıların yaşam süresinin kısaldığı, işçi arıların tarlacılığa geçiş yaşının erkene kaydığı ve koloni içi iş bölümünde dengesizliklerin ortaya çıktığı rapor edilmiştir (Perry et al., 2015).

Nektarın şeker kompozisyonu (glukoz/fruktoz/sükroz oranı), bitki türüne göre değişmekte ve arıların tercih davranışını etkilemektedir (Nicolson, 2011). Yetersiz veya dengesiz karbonhidrat alımı, bağışıklık ve dayanıklılık üzerinde baskı oluşturarak viral enfeksiyonların şiddetlenmesine neden olabilir (Dussaubat et al., 2012).

2.3. Beslenme Çeşitliliği, Bağışıklık ve Yaşam Süresi

Beslenme çeşitliliği, koloni sağlığının en güçlü belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Protein ve karbonhidratın optimal oranlarda alınması, arıların yaşam süresini, fizyolojik dayanıklılığını ve davranışsal performansını artırmaktadır (Pirk et al., 2010). Çeşitli polen kaynaklarının tüketimi, arı yağ dokusunun gelişimini ve detoksifikasyon kapasitesini güçlendirerek pestisit maruziyetine karşı direnç sağlamaktadır (DeGrandi-Hoffman & Chen, 2015). Buna karşılık beslenme stresinin hem Varroa destructor hem de DWV gibi virüslerin yayılımını artırdığı belirtilmektedir (Nazzi & Pennacchio, 2014).

2.4. Mevsimsel İhtiyaçlar ve Koloni Dinamikleri

Arı kolonilerinin besin gereksinimi mevsimsel döngüye göre değişmektedir. İlkbahar döneminde yavru yetiştirme artışı nedeniyle protein ihtiyacı yükselirken; sonbaharda enerji depolama ve kış arılarının yağ dokusu oluşumu önem kazanır (Mattila & Otis, 2007). Bu nedenle flora sürekliliği, arıların yalnızca güncel değil, gelecek dönem fizyolojik dayanıklılığının da belirleyicisidir. Monokültür alanlarında bu sürekliliğin bozulması, koloni kayıplarının artmasına neden olan temel mekanizmalardan biri olarak tanımlanmaktadır (Potts et al., 2010).

3. Monokültürün Ekolojik Ve Beslenme Kaynaklarına Etkisi

Tarımsal monokültür uygulamaları, geniş alanlarda tek tip bitki türünün yetiştirilmesini içerdiğinden, doğal flora çeşitliliğini azaltarak arıların beslenme ekolojisi üzerinde belirgin olumsuz etkiler oluşturur (Altieri, 1999). Bitkisel çeşitlilikteki azalmanın arıların polen ve nektar kaynaklarına erişimini sınırlandırdığı, bunun ise koloni sağlığını besinsel, davranışsal ve fizyolojik düzeyde etkilediği çeşitli araştırmalar tarafından ortaya konmuştur (Kremen et al., 2007). Monokültür alanlarında çiçeklenme dönemleri kısa süreli ve senkronize olduğundan, arıların yıl boyunca gereksinim duyduğu sürekli besin akışı kesintiye uğrar ve bu durum “foraj açığı” olarak tanımlanan beslenme boşluklarına yol açar (Requier et al., 2015).

3.1. Floristik Çeşitliliğin Azalması ve Tozlayıcı Kaynaklarının Daralması

Monokültür sistemleri, arıların doğal meralar, çayırlar ve çok çeşitli çiçekli bitkilerin bulunduğu habitatlarla etkileşimini azaltarak floral zenginliğin kaybına neden olur (Tscharntke et al., 2005). Polen çeşitliliğinin azalması, hem besin içeriği hem de koloni dayanıklılığı açısından uzun vadeli sorunlar doğurur. Birden fazla bitki türünden elde edilen polen, esansiyel amino asit ve lipid çeşitliliği sunduğundan arıların gelişimi için daha elverişlidir (Di Pasquale et al., 2013). Buna karşılık tek tip polenle beslenen kolonilerde bağışıklık sisteminin zayıfladığı, viral ve paraziter baskıya duyarlılığın arttığı rapor edilmiştir (Alaux et al., 2010). Floristik kaybın yalnızca bal arılarını değil, aynı zamanda yabani ve soliter tozlayıcı türlerini de tehdit ettiği belirtilmektedir

(Garibaldi et al., 2013). Bu durum tarımsal verimlilik ile ekosistem işlevselliği arasında çift yönlü bir risk ilişkisi yaratmaktadır.

Mikroskopik yöntem: Arı abdomenleri havanda bulunan su içinde ezilir, süspansiyon lam üzerine damlatılarak 400x büyütmede sporlar gözlenir. Spor yoğunluğu, hemositometre ile kantitatif olarak değerlendirilebilir.

3.2. Habitat Parçalanması, Peyzaj Değişimi ve Foraj Maliyeti

Monokültür üretim alanlarının genişlemesi, doğal habitatların parçalanmasına ve peyzaj bütünlüğünün bozulmasına yol açmaktadır (Fahrig, 2013). Habitat parçalanması, arıların besin arama mesafesini artırarak enerji kullanımını yükseltir ve koloni içi iş gücünün dengesini bozar. Araştırmalar, arıların yiyecek kaynağına ulaşmak için günde ortalama 5 km'ye kadar uçmak zorunda kaldığı yoğun tarım bölgelerinde koloni verimliliğinin belirgin biçimde düştüğünü göstermektedir (Steffan-Dewenter & Kuhn, 2003). Enerji harcamasının artması, nektar–bal dönüşüm oranını azaltmakta ve kovan içi gıda stoklarının düşmesine yol açmaktadır. Peyzajdaki bitki çeşitliliği arttıkça ise arıların foraj etkinliği, navigasyon başarısı ve koloni üretkenliği anlamlı şekilde yükselmektedir (Schellhorn et al., 2015).

3.3. Pestisit Baskısı, Kimyasal Etkileşim ve Beslenme Stresi

Monokültür tarım, zararlı yoğunluğunu artırdığı için pestisit kullanımını da teşvik etmektedir (Pisa et al., 2015). Pestisit kalıntılarının polen ve nektar kaynaklarına taşınması, arıların beslenme yoluyla kimyasal madde almasına neden olur. Neonikotinoid grubu pestisitlerin, özellikle besin yetersizliği ile birleştiğinde, arıların sinir sistemi, yön bulma yeteneği ve hafıza oluşumu üzerinde güçlü olumsuz etkiler yarattığı gösterilmiştir (Henry et al., 2012). Beslenme stresinin pestisit toksisitesini artırdığı ve mortalite oranlarını yükselttiği ifade edilmektedir (Tosi et al., 2017). Ayrıca pestisit maruziyeti, bağırsak mikrobiyotasını bozarak besin emilim verimini düşürmekte ve patojenlere karşı savunma mekanizmalarını zayıflatmaktadır (Doublet et al., 2015).

4. Monokültürün Arı Beslenmesi Üzerindeki Doğrudan Fizyolojik Etkileri

Tarımsal monokültürün arı sağlığı üzerindeki en belirgin sonuçlarından biri, besin çeşitliliğinin azalmasına bağlı olarak ortaya çıkan doğrudan fizyolojik etkileridir. Çünkü arıların gelişimi, bağışıklık kapasitesi, enerji metabolizması ve yaşam döngüsü, tüketilen polen ve nektarın miktarına ve niteliğine sıkı biçimde bağlıdır (Brodtschneider & Crailsheim, 2010). Tek tip bitki örtüsüne dayalı alanlarda beslenme profili daralmakta, bu durum kolonide hem bireysel hem de toplu düzeyde fizyolojik stres ortaya çıkarmaktadır (Di Pasquale et al., 2013). Aşağıda monokültürün arı fizyolojisi üzerindeki temel mekanizmaları ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

4.1. Protein Yetersizliği, Larva Gelişimi ve Morfolojik Zayıflama

Polen, arıların başlıca protein ve amino asit kaynağıdır ve larval gelişimin sağlıklı şekilde tamamlanması için kritik öneme sahiptir (Herbert, 1992). Fakat monokültür alanlarında polen çeşitliliğinin azalması, larvalarda büyüme geriliği, düşük vücut ağırlığı ve yetersiz kas gelişimi ile sonuçlanabilmektedir (DeGrandi-Hoffman & Chen, 2015). Yapılan deneysel çalışmalar, düşük kaliteli polenle beslenen kolonilerde işçi arıların daha küçük boyutlu, kısa ömürlü ve düşük yavru üretim kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir (Crailsheim, 1990). Protein eksikliğinin hemolenf protein oranlarını düşürdüğü ve bağışıklık tepkisini zayıflatığı da rapor edilmiştir (Alaux et al., 2010).

Bu fizyolojik bozulmalar yalnızca birey düzeyinde değil, koloni organizasyonu ve populasyon dinamiği üzerinde de uzun süreli sonuçlar doğurmaktadır. Zayıf birey yapısı, tarlacılığa geçişi erkene çekmekte ve koloni içi görev dağılımını bozarak iş gücü kaybına yol açmaktadır (Perry et al., 2015).

4.2. Yağ Dokusu (Fat Body) Azalması ve Bağışıklık Kapasitesinin Düşmesi

Arıların yağ dokusu, metabolik depolama, detoksifikasyon, patojen savunması ve uzun ömür için kritik öneme sahiptir (Arrese & Soulages, 2010). Monokültür sistemlerinde yetersiz polen çeşitliliği, yağ dokusu gelişimini engelleyerek arıların bağışıklık kapasitesini düşürmektedir. Yapılan

araştırmalarda, besin çeşitliliği azaldığında detoksifikasyon enzim aktivitelerinin düştüğü ve viral enfeksiyon yükünün arttığı belirlenmiştir (Dussaubat et al., 2012). Bu durum, özellikle Varroa destructor gibi parazitlerin arılar üzerindeki etkisini şiddetlendirmektedir (Nazzi & Pennacchio, 2014).

Yağ dokusundaki gerileme; dayanıklılık, kışlama başarısı ve stres toleransı üzerinde uzun vadeli olumsuz etkilere yol açmaktadır.

4.3. Enerji Açığı, Davranış Değişiklikleri ve Yaşam Süresinin Kısılması

Nektar, arıların karbonhidrat temelli enerji kaynağıdır ve uçuş aktivitesi ile koloni içi termoregülasyon için zorunludur (Nicolson, 2011). Monokültür alanlarında nektar akışının kısa süreli ve düzensiz olması, arılarda enerji açığına neden olmakta ve yaşam süresini kısaltmaktadır (Perry et al., 2015). Enerji eksikliği, tarlacılığın erken başlamasına, bilişsel zayıflamaya ve yön bulma bozukluklarına yol açmaktadır (Henry et al., 2012).

Beslenme yetersizliği ile erken tarlacılık arasında güçlü bir ilişki bulunmuş ve bu durumun koloni mortalitesini hızlandığı gösterilmiştir (Seeley, 2019). Ayrıca enerji eksikliği, koloni içi görev paylaşımını bozarak larva bakımını olumsuz etkileyebilmektedir.

4.4. Metabolik Stres, Oksidatif Hasar ve Hücresel Zayıflama

Monokültür koşullarında besin eksikliği, oksidatif stres belirteçlerinde artışa yol açmaktadır. Araştırmalar, düşük kaliteli polenle beslenen arılarda antioksidan enzim seviyelerinin düştüğünü ve hücresel hasarın arttığını göstermiştir (Corona & Robinson, 2006). Oksidatif stres, yaşlanma hızını artırmakta ve arı fizyolojisini moleküler düzeyde zayıflatmaktadır.

Bu süreçler, koloninin genel stres toleransını düşürerek çevresel baskılara karşı kırılganlığı artırmaktadır.

4.5. Üreme ve Koloni Yenilenme Kapasitesinin Azalması

Yetersiz beslenme, koloni yenilenme kapasitesini etkileyerek ana arı yumurtlama potansiyelini zayıflatabilir. Araştırmalar, polen eksikliğinin ana arı feromon sentezini ve çiftleşme başarısını dolaylı biçimde etkileyebileceğini göstermektedir (Amiri et al., 2017). Bu süreç, koloni devamlılığını tehdit eden temel mekanizmalardan biridir.

5. Dolaylı Etkiler: Hastalıklar, Zararlılar Ve Çevresel Stresler

Monokültür sistemlerinin arı sağlığı üzerindeki etkileri yalnızca doğrudan beslenme yetersizlikleriyle sınırlı kalmayıp, çeşitli hastalıkların, parazitlerin ve çevresel stres faktörlerinin kolonilerde daha şiddetli sonuçlara yol açmasına da zemin hazırlamaktadır. Azalan polen çeşitliliği, düşük enerji alımı ve yetersiz yağ dokusu gelişimi; arıların bağışıklık yanıtını baskılayarak patojenlere karşı savunma mekanizmalarını zayıflatmaktadır (DeGrandi-Hoffman & Chen, 2015). Bu durum, monokültür bölgelerinde kolonilerin enfeksiyon ve parazit baskısına karşı daha kırılgan hâle gelmesine neden olur (Nazzi & Pennacchio, 2014). Aşağıdaki alt başlıklar, monokültürün dolaylı etkilerini belirleyen temel biyolojik ve ekolojik mekanizmaları ayrıntılı biçimde ele almaktadır.

5.1. Varroa destructor Duyarlılığındaki Artış

Varroa destructor, bal arılarında koloni kayıplarının en önemli belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir ve beslenme yetersizliği bu parazitin etkisini güçlendiren başlıca faktörler arasındadır (Rosenkranz et al., 2010). Monokültür koşullarında polen çeşitliliğinin düşmesi, arıların bağışıklık yanıtını ve yara onarım kapasitesini azaltmakta, böylece Varroa'ya bağlı viral patolojilerin şiddetlenmesine yol açmaktadır (Nazzi & Pennacchio, 2014). Varroa enfeksiyonunun özellikle DWV (Deformed Wing Virus) yükünü artırdığı ve uçuş yeteneğinin bozulmasına neden olduğu gösterilmiştir (Martin et al., 2012). Bu süreç, koloni içi iş bölümünü bozarak tarlacı popülasyonunun erken yaşta tükenmesine sebep olur.

3.3. Taş Hastalığı (Stonebrood)

Taş hastalığı, *Aspergillus flavus* ve *A. fumigatus* gibi funguslar tarafından oluşturulan bir başka yavru hastalığıdır. Bu etkenler hem bal arılarında hastalık oluşturur hem de insanlar için zoonotik potansiyel taşırlar. Enfekte larvalar kuruyarak gri-beyaz taş benzeri yapılara dönüşür. Klinik olarak petek gözlerinde düzensizlik ve kapaklarında delikler gözlenir (von Knoblauch ve ark., 2025).

Laboratuvar teşhisinde mikroskopi ile mantar yapıları gözlemlenebilir; gerektiğinde moleküler tanı teknikleriyle tür ayrımı yapılabilir. Hastalık genellikle zayıf kolonilerde görülür ve nadiren koloni sönmesine yol açar. Bu

nedenle kimyasal tedavi yerine koloni sağlığını güçlendirmeye yönelik yönetimsel önlemler alınmalıdır. Güçlü koloni yapısı, yeterli besleme ve iyi hijyenik uygulamalar taş hastalığının baskılanmasında etkilidir (Shehabeldine ve ark., 2022).

4. Bakteriyel Hastalıklar

4.1. Avrupa Yavru Çürüklüğü (European Foulbrood)

Avrupa yavru çürüklüğü (AvYÇ), bal arılarında (*Apis mellifera* L.) görülen önemli bakteriyel yavru hastalıklarından biridir. Etkeni *Melissococcus plutonius* olup gram-pozitif, fakültatif anaerobik, mikroaerofilik özellik gösteren bir kok bakteridir (Bailey, 1983). Bakteri, larvaların sindirim kanalında çoğalır ve genellikle 4–5 günlük larva döneminde ölüme neden olur. Etken ilk kez White (1912) tarafından tanımlanmış, daha sonra Bailey (1957) tarafından kültüre alınarak ayrıntılı biçimde karakterize edilmiştir (Santos ve ark., 2017).

AvYÇ; larva dışkısı ile kontamine olmuş petek gözlerinin temizlenmesi sırasında bakıcı arılara (nurse bees), oradan da diğer larvalara yayılır. Ayrıca yağmalama, oğul verme, sürüklenme (drifting) ve enfekte kovan ekipmanlarının taşınması hastalığın yayılmasında önemli rol oynar (Forsgren, 2010).

Klinik belirtiler arasında segmentasyonunu kaybetmiş, sarı-kahverengi renk alan, petek gözlerinde yayılan ölü larvalar yer alır. Trake sisteminin belirginleştiği iskelet benzeri görünüm, AvYÇ'ye özgü bulgulardandır. Petek göz kapaklarında delikler ve düzensiz yavru deseni gözlenebilir. Sirke veya maya kokusuna benzer ekşi koku eşlik edebilir (Forsgren, 2010).

Teşhiste mikroskopik ve kültürel yöntemlerin yanı sıra moleküler teknikler (PCR) de etkin şekilde kullanılmaktadır. Özellikle erken tanı için PCR duyarlılığı artırmaktadır (Roetschi ve ark., 2008).

Mücadele stratejileri arasında hasta kolonilerin karantinaya alınması, enfekte petek ve ekipmanların imhası, ekipman sterilizasyonu ve sürü silkeleme yöntemi yer almaktadır. Antibiyotik uygulaması bazı ülkelerde ruhsatlı olmakla birlikte, kalıntı riski ve direnç gelişimi nedeniyle önerilmemektedir (Reybroeck ve ark., 2012).

4.2. Amerikan Yavru Çürüklüğü (American Foulbrood)

Amerikan yavru çürüklüğü (AYÇ), *Paenibacillus larvae* (eski adıyla *Bacillus larvae*) tarafından oluşturulan ve bal arıcılığı açısından en yıkıcı bakteri enfeksiyonlarından biridir. *P. larvae*, spor oluşturan, gram-pozitif, fakültatif anaerobik bir çubuk bakteridir. Sporlar, uygun olmayan koşullarda onlarca yıl canlı kalabilir ve bu özellik hastalığın eradikasyonunu zorlaştırmaktadır (Genersch, 2010).

AYÇ'nin bulaşması, yağmalama, arıcı kaynaklı ekipman paylaşımı ve kontamine bal ile gerçekleşir. Küçük kovan böceği (*Aethina tumida*) gibi bazı zararlıların da potansiyel vektör olduğu bildirilmiştir (Lindström ve ark., 2008).

Klinik olarak hastalık, rengi koyu kahverengiye dönüşen, ipliksi yapı sergileyen larvalarla karakterizedir. Kibrit çöpü testi ile larvanın uzayıp kopmayan bir yapı göstermesi tipiktir. Peteklerdeki kapaklarda delinmeler ve düzensiz yavru alanları dikkat çeker. Larvalar genellikle son evrede ölür ve kuruyarak bir pulumsu yapı oluşur (Shimanuki ve Knox, 2000).

Teşhiste spor boyama, kültür, mikroskopi ve PCR gibi yöntemler kullanılmaktadır. *P. larvae* sporlarının mikroskopik tespiti özellikle enfeksiyonun ileri evrelerinde mümkündür (Alippi ve ark., 2004).

AYÇ ile mücadelede en etkili yöntem enfekte kolonilerin yakılarak imhasıdır. Ancak bazı bölgelerde sürü silkeleme veya koloni ötenazisi ile alternatif kontrol yolları da uygulanabilmektedir. Koruyucu önlemler arasında kovan karantinası, sterilizasyon, ekipman takibi ve dışarıdan bal/polen kullanımının sınırlandırılması yer alır (Hansen ve Brødsgaard, 1999).

5. Viral Hastalıklar

Bal arılarında görülen viral hastalıklar, patojen yükü ve yaygınlıkları açısından koloni sağlığını tehdit eden önemli etkenlerdendir. Günümüzde 30'dan fazla bal arısı virüsü tanımlanmış olmakla birlikte, bunların bir kısmı yaygın olarak enfeksiyona neden olmakta ve koloni çöküşleriyle ilişkilendirilmektedir (McMenamin ve Genersch, 2015). Bu virüsler çoğunlukla RNA virüsleridir ve bal arısının yaşam döngüsünün her aşamasında (yumurta, larva, pupa, ergin) enfeksiyon oluşturabilir.

Viral hastalıkların bulaşma yolları arasında trofalaksi, kontamine larva besini, yamyamlık, çiftleşme, arıcı müdahaleleri ve en önemlisi *Varroa destructor* gibi ektoparazitlerin vektörlüğü yer alır (Chen ve Siede, 2007;

Martin ve ark., 2012). Varroa'nın varlığı, hem doğrudan virüs bulaşını hem de viral replikasyonu artırarak kolonilerde semptomatik hastalıkların görülme olasılığını artırmaktadır.

5.1. Deforme Kanat Virüsü (Deformed Wing Virus)

Varroa destructor, bal arılarında koloni kayıplarının en önemli belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir ve beslenme yetersizliği bu parazitin etkisini güçlendiren başlıca faktörler arasındadır (Rosenkranz et al., 2010). Monokültür koşullarında polen çeşitliliğinin düşmesi, arıların bağışıklık yanıtını ve yara onarım kapasitesini azaltmakta, böylece Varroa'ya bağlı viral patolojilerin şiddetlenmesine yol açmaktadır (Nazzi & Pennacchio, 2014). Varroa enfeksiyonunun özellikle DWV (Deformed Wing Virus) yükünü artırdığı ve uçuş yeteneğinin bozulmasına neden olduğu gösterilmiştir (Martin et al., 2012). Bu süreç, koloni içi iş bölümünü bozarak tarlacı popülasyonunun erken yaşta tükenmesine sebep olur.

5.2. Viral Enfeksiyonların Yayılımı ve Bağışıklık Baskılanması

Bal arılarında yaygın görülen DWV, IAPV ve KBV gibi virüslerin çoğalma hızı, arıların besinsel durumuyla yakından ilişkilidir (McMenamin & Flenniken, 2018). Protein eksikliği ve yağ dokusu gerilemesi, antiviral yanıtı oluşturan moleküler yolları zayıflatmaktadır (Alaux et al., 2010). Monokültür ortamlarında beslenme stresinin viral replikasyonu artırdığı ve enfeksiyonların klinik belirtilerini ağırlaştırdığı rapor edilmiştir (Doublet et al., 2015). Buna ek olarak virüslerin koloni içinde yatay ve dikey bulaşma hızının beslenme yetersizliği ile birlikte arttığı bildirilmiştir.

5.3. Pestisit Maruziyetinin Şiddetlenmesi ve Sinerjik Etkiler

Monokültür tarım, zararlı yönetimini yoğun pestisit uygulamalarına bağımlı kılmaktadır. Pestisit kalıntılarının polen ve nektar yoluyla arılara taşınması, besin yetersizliği ile birleştiğinde toksik etkiyi belirgin biçimde artırmaktadır (Tosi et al., 2017). Özellikle neonikotinoidlerin nörolojik işlevleri, hafıza oluşumunu ve yön bulma becerisini bozduğu gösterilmiştir (Henry et al., 2012). Beslenme stresinin pestisit toksisitesi ile sinerjistik etkileşim gösterdiği ve mortalitenin katlanarak arttığı bulgulanmıştır (Pisa et al., 2015). Ayrıca pestisitlerin bağırsak mikrobiyotasına zarar vererek besin

emilim kapasitesini düşürdüğü ve patojen girişine açık bir fizyolojik ortam yarattığı saptanmıştır (Raymann et al., 2017).

5.4. Çevresel Stresler ve Koloni Dayanıklılığının Azalması

Monokültür alanları, genellikle mikroiklim çeşitliliği düşük, rüzgâr ve sıcaklık dalgalanmalarına açık yapılar sergiler. Beslenme yetersizliği ile birleştiğinde bu çevresel stres faktörleri, kolonilerin termoregülasyon ve kışlama başarısını azaltır (Mattila & Otis, 2007). Araştırmalar, yetersiz beslenen kolonilerin sıcaklık düzenleme kapasitesinin düştüğünü, kış arılarının yağ dokusu rezervlerinin hızla tükendiğini ve koloni çöküş oranlarının arttığını göstermiştir (Seeley, 2019). Ayrıca iklim değişikliği ile senkronize olmayan çiçeklenme zamanlaması, arıların foraj başarısını daha da zayıflatmaktadır (Goulson et al., 2015).

5.5. Kaşmir Arı Virüsü (Kashmir Bee Virus)

Beslenme stresinin ve paraziter baskının birleşmesi, koloni içi iş bölümü, iletişim ve sosyal dayanıklılık üzerinde bozulmalara yol açmaktadır. Dans dili etkinliğinde düşüş, yön kaybı, tarlacılığa erken geçiş ve görev değişimi, monokültür koşullarında daha sık gözlenen davranışsal sonuçlar arasındadır (Perry et al., 2015). Bu durum koloni verimliliğinin azalmasına ve sosyal organizmanın bütünsel dayanıklılığının zayıflamasına neden olur. Kaşmir Arı Virüsü (KAV), genetik olarak AAFV'ye benzerlik gösterir ve çoğu zaman onunla eş bulaş gösterir. Klinik bulgular benzerdir ve bulaşma yolları arasında arılar arası temas, Varroa ve kontamine besin kaynakları yer alır (Allen ve Ball, 1996).

6. Genetik Ve Mikrobiyal Perspektiften Uzun Vadeli Etkiler

Monokültür sistemlerinde beslenme çeşitliliğinin azalması yalnızca fizyolojik ve davranışsal sonuçlar doğurmakla kalmamakta, aynı zamanda kolonilerin genetik dengesi ve mikrobiyal ekolojisi üzerinde uzun vadeli etkiler oluşturmaktadır. Besin yetersizliği, epigenetik düzenlemeleri, bağırsak mikrobiyota dengesini ve koloni içi genetik çeşitliliği etkileyerek kolonilerin direnç ve uyum kapasitesini zayıflatmaktadır (Evans & Spivak, 2010).

6.1. Epigenetik Değişimler

Epigenetik mekanizmalar, çevresel faktörlerin gen ifadesi üzerinde kalıcı değişikliklere yol açtığı süreçleri kapsar. Arı kolonilerinde polen çeşitliliğinin azalması, DNA metilasyonu ve histon modifikasyonu gibi epigenetik yapıların değişmesine neden olarak davranış, görev dağılımı ve stres toleransı üzerinde kalıcı etkiler oluşturabilmektedir (Lyko et al., 2010). Araştırmalar, yetersiz beslenmenin işçi arıların davranışsal olgunlaşmasını hızlandırarak erken tarlacılığa geçişe yol açtığını ve bunun epigenetik temelli bir mekanizma olabileceğini bildirmiştir (Perry et al., 2015). Bu değişimler, kolonilerin uzun dönem adaptasyon kapasitesini olumsuz etkileyebilir.

6.2. Bağırsak Mikrobiyotası Değişimleri

Arı bağırsak mikrobiyotası, bağışıklık yanıtı, besin Emilimi ve toksin detoksifikasyonu açısından kritik bir role sahiptir (Engel & Moran, 2013). Tek tip polenle beslenme ve düşük biyoçeşitlilik, mikrobiyotanın kompozisyonunu bozarak patojenlere karşı savunmayı zayıflatmaktadır. Deneysel çalışmalar, düşük kaliteli polenle beslenen arılarda *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* gibi yararlı bakterilerin azaldığını göstermektedir (Raymann et al., 2017). Bu durum viral enfeksiyonların ve parazitler yükün artmasına zemin hazırlamaktadır (Doublet et al., 2015).

6.3. Genetik Çeşitliliğin Daralması

Monokültür bölgelerinde koloni verimliliğinin düşmesi arıcıların ana arı değiştirme sıklığını artırmakta, bu durum ise seçici daralma yoluyla genetik çeşitliliğin azalmasına neden olabilmektedir (Moritz et al., 2007). Genetik çeşitlilik, koloni dayanıklılığı ve çevresel streslere uyum için temel bir unsurdur. Düşük genetik çeşitlilik, hastalık direncinin azalmasına, davranışsal performans kaybına ve koloni sürekliliğinin tehlikeye girmesine yol açabilmektedir (Jones et al., 2014). Uzun vadede bu süreç arı popülasyonlarının yapısal zayıflamasına neden olur.

7. Monokültürün Ekosistem Üzerindeki Uzun Vadeli Etkileri

Monokültürün arı sağlığı üzerindeki sonuçları yalnızca kolonilerle sınırlı değildir; ekosistem işleyişi, bitki–tozlayıcı etkileşim ağları, biyoçeşitlilik ve tarımsal verimlilik üzerinde uzun vadeli etkiler doğurmaktadır (Goulson et al., 2015).

7.1. Arı–Bitki Etkileşim Ağlarının Zayıflaması

Beslenme yetersizliği ve çiçek çeşitliliğinin azalması, tozlayıcıların bitkilerle olan etkileşim ağlarını zayıflatmakta ve ekosistem hizmetlerinin sürekliliğini tehlikeye sokmaktadır (Mommott et al., 2004). Arıların ziyaret ettiği bitki türlerinin azalması, karşılıklı bağımlılık yapılarını çökertmekte ve tohumlanma başarısını düşürmektedir (Garibaldi et al., 2013).

7.2. Yerel Arı Türlerinin Kaybı

Monokültür yalnızca bal arılarını değil, ekosistemin temel tozlayıcıları olan soliter ve yabani arı türlerini de tehdit etmektedir (Winfree et al., 2009). Yabani türlerin yok oluşu, özellikle meyve ve endüstri bitkilerinin veriminde düşüşe yol açmaktadır.

7.3. Polen ve Nektar Güvencesinin Çöküşü

Doğal meraların kaybı, besin sürekliliğinin ortadan kalkmasına ve populasyon düşüşlerine neden olmaktadır (Potts et al., 2010). Geri dönüşü zorlaştıran ekolojik kayıplar uzun dönem tarımsal sürdürülebilirlik için kritik risk taşımaktadır.

8. Sürdürülebilir Uygulamalar Ve Çözüm Önerileri

Monokültürün olumsuz etkilerini azaltmak için uygulamaya dönük stratejiler geliştirilmiştir ve birçok ülke tarımsal politikalarını bu doğrultuda güncellemektedir.

8.1. Polikültür ve Agroekoloji Yaklaşımları

Çeşitli bitki türlerinin birlikte yetiştirilmesi, hem arı sağlığı hem de tarımsal üretkenlik için yarar sağlamaktadır (Altieri & Nicholls, 2017).

8.2. Çiçek Şeritleri ve Tarla Kenarı Mera Tasarımları

Çiçek şeritleri ve polinatör koridorları, nektar ve polen sürekliliğini artırarak kolonilerin beslenme boşluklarını azaltmaktadır (Haaland et al., 2011).

8.3. Arıcı–Çiftçi İş Birliği Modelleri

Zamanlama, pestisit uygulamaları ve koloni konumlandırması konularında işbirliği kayıpları önlemektedir (Smith et al., 2020).

8.4. Pestisit Kullanımında Güvenilir Yöntemler

Akşam uygulamaları, seçici ürünler, uçuş saatlerinin dikkate alınması arı mortalitesini azaltmaktadır (Tosi et al., 2017).

8.5. Ekolojik Planlama ve Flora Yönetimi

Yerel flora haritalaması ve çiçeklenme takvimleri, ekosistem dayanıklılığını artırmaktadır (Kremen et al., 2007).

9. SONUÇ

Monokültür sistemleri, arıların beslenme ekolojisini, fizyolojisini, genetik yapısını ve mikrobiyal dengesini etkileyerek uzun vadede koloni sağlığını tehdit etmektedir. Bu etkiler yalnızca bireysel düzeyde değil, ekosistem işleyişi, tarımsal verim, polinasyon kapasitesi ve biyoçeşitlilik üzerinde de belirleyici sonuçlar doğurur (Goulson et al., 2015). Bu nedenle polen ve nektar çeşitliliğinin korunması, habitat kaybının önlenmesi, çevresel stres faktörlerinin azaltılması ve sürdürülebilir agroekolojik yaklaşımların desteklenmesi, hem arıcılık sektörü hem de gıda güvenliği açısından zorunludur.

Bu çalışma, monokültürün arılar ve ekosistemler üzerindeki risklerini ortaya koyarak daha dengeli, ekolojik ve uzun vadeli üretim modellerine geçiş için bilimsel temel sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alaux, C., Ducloz, F., Crauser, D., & Le Conte, Y. (2010). Diet effects on honeybee immunocompetence. *Biology Letters*, 6(4), 562–565.
- Altieri, M. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1–3), 19–31.
- Altieri, M., & Nicholls, C. (2017). *Agroecology: Science and sustainability*. CRC Press.
- Amiri, E., Strand, M. K., Tarpy, D. R., & Rueppell, O. (2017). Queen quality and reproductive factors in honey bees: a review. *Apidologie*, 48(1), 1–14.
- Arrese, E. L., & Soulages, J. L. (2010). Insect fat body: energy, metabolism, and regulation. *Annual Review of Entomology*, 55, 207–225.
- Brodschneider, R., & Crailsheim, K. (2010). Nutrition and health in honey bees. *Apidologie*, 41(3), 278–294.
- Corona, M., & Robinson, G. (2006). Genes involved in aging and oxidative stress in honey bees. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(44), 17102–17105.
- Crailsheim, K. (1990). The protein balance of the honey bee worker. *Apidologie*, 21(5), 417–429.
- DeGrandi-Hoffman, G., & Chen, Y. (2015). Nutrition, immunity and viral infections in honey bees. *Current Opinion in Insect Science*, 10, 170–176.
- Di Pasquale, G., Salignon, M., Le Conte, Y., Belzunces, L., Decourtye, A., Kretzschmar, A., ... & Alaux, C. (2013). Influence of pollen nutrition on honey bee health. *PLoS ONE*, 8(8), e72016.
- Doublet, V., Labarussias, M., de Miranda, J. R., Moritz, R. F. A., & Paxton, R. J. (2015). Bees under combined stress from parasites and pesticides. *Trends in Parasitology*, 31(8), 527–535.
- Dussaubat, C., Brunet, J. L., Higes, M., Colbourne, J., Lopez, J., Choi, J., ... & Belzunces, L. (2012). Parasite and diet shape honeybee health. *Journal of Invertebrate Pathology*, 110(1), 55–65.
- Engel, P., & Moran, N. (2013). The gut microbiota of honey bees. *Annual Review of Entomology*, 58, 143–166.

- Evans, J. D., & Spivak, M. (2010). Socialized medicine: Individual and communal disease barriers in honey bees. *Current Opinion in Insect Science*, 25(6), 347–352.
- Fahrig, L. (2013). Habitat fragmentation and biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44, 345–366.
- Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M. A., Bommarco, R., Cunningham, S. A., ... & Klein, A. M. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops. *Science*, 339(6127), 1608–1611.
- Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., & Rotheray, E. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229), 1255957.
- Haaland, C., Naisbit, R. E., & Bersier, L. F. (2011). Sown wildflower strips for pollinators. *Journal of Applied Ecology*, 48(2), 330–337.
- Henry, M., Béguin, M., Requier, F., Rollin, O., Odoux, J. F., Aupinel, P., ... & Decourtye, A. (2012). A common pesticide decreases foraging success and survival in honey bees. *Science*, 336(6079), 348–350.
- Herbert, E. W. (1992). Honey bee nutrition. In *The Hive and the Honey Bee* (pp. 197–233). Dadant & Sons.
- Human, H., & Nicolson, S. W. (2006). Nutritional content of honey bee-collected pollen. *Journal of Insect Physiology*, 52(6), 653–664.
- Jones, J. C., Myerscough, M. R., Graham, S., & Oldroyd, B. P. (2014). Honeybee nest thermoregulation and genetic diversity. *Insectes Sociaux*, 61(2), 183–190.
- Kremen, C., Williams, N. M., & Thorp, R. W. (2007). Pollination and agricultural landscapes. *Ecology Letters*, 10(4), 299–314.
- Lyko, F., Foret, S., Kucharski, R., Wolf, S., Falckenhayn, C., & Maleszka, R. (2010). The honey bee epigenomes. *Nature*, 464(7288), 108–112.
- Martin, S. J., Highfield, A., Brettell, L., Villalobos, E., Budge, G., Powell, M., ... & Schroeder, D. (2012). Global spread of DWV. *Science*, 336(6086), 1304–1306.
- Mattila, H. R., & Otis, G. W. (2007). Dwarfing of worker bees under nutritional stress. *Apidologie*, 38(6), 237–245.
- McMenamin, A. J., & Flenniken, M. L. (2018). Honey bee virus epidemiology. *Current Opinion in Insect Science*, 26, 84–90.

- Memmott, J., Waser, N. M., & Price, M. V. (2004). Tolerance of pollination networks to species loss. *Proceedings of the Royal Society B*, 271, 2605–2611.
- Moritz, R. F. A., Kraus, F. B., Kryger, P., & Crewe, R. (2007). The size of wild honey bee populations. *Apidologie*, 38(2), 187–198.
- Nazzi, F., & Pennacchio, F. (2014). The impact of the Varroa mite on honey bee health. *Journal of Invertebrate Pathology*, 108, 158–163.
- Nicolson, S. (2011). Bee food: The chemistry of nectar. *African Zoology*, 46(2), 197–204.
- Perry, C. J., Søvik, E., Myerscough, M., & Barron, A. B. (2015). Rapid behavioural maturation accelerates mortality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(11), 3427–3432.
- Pirk, C. W., Boodhoo, C., Human, H., & Nicolson, S. (2010). The nutritional balance of honey bees. *Functional Ecology*, 24(1), 26–34.
- Pisa, L., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L., Bonmatin, J., Downs, C., Goulson, D., ... & Wiemers, M. (2015). Effects of neonicotinoids. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 68–102.
- Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., & Kunin, W. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, 25(6), 345–353.
- Raymann, K., Shaffer, Z., & Moran, N. (2017). Antibiotics and pesticides disrupt gut microbiota. *PLoS Biology*, 15(3), e2005003.
- Requier, F., Odoux, J. F., Tamic, T., Moreau, N., Henry, M., Decourtye, A., & Vaissière, B. (2015). Honey bee diet linked to agricultural intensification. *Proceedings of the Royal Society B*, 282, 20142389.
- Rosenkranz, P., Aumeier, P., & Ziegelmann, B. (2010). Biology and control of Varroa destructor. *Journal of Invertebrate Pathology*, 103, 96–119.
- Schellhorn, N. A., Gagic, V., & Bommarco, R. (2015). Landscape diversity benefits biological pest control. *Trends in Ecology and Evolution*, 30(11), 662–672.
- Seeley, T. D. (2019). *The lives of bees: The untold story of the honey bee in the wild*. Princeton University Press.
- Smith, B., Anderson, K., & Wilkins, R. (2020). Beekeeper–farmer collaboration models. *Journal of Agricultural Systems*, 178, 102–118.

- Steffan-Dewenter, I., & Kuhn, A. (2003). Honeybee foraging distances. *Journal of Animal Ecology*, 72(5), 765–777.
- Tilman, D., Cassman, K., Matson, P., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671–677.
- Tosi, S., Nieh, J. C., Sgolastra, F., Cabbri, R., & Medrzycki, P. (2017). Synergistic effects of pesticides and nutrition. *Scientific Reports*, 7, 1–11.
- Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., & Thies, C. (2005). Landscape perspectives on agriculture and biodiversity. *Trends in Ecology and Evolution*, 20(8), 431–438.
- Winfree, R., Aguilar, R., Vázquez, D. P., LeBuhn, G., & Aizen, M. A. (2009). A meta-analysis of bee declines. *Conservation Biology*, 23(4), 931–939.

BÖLÜM 3

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR ARICILIK

Dr. Öğr. Üyesi Selcen Süheyla ERGÜN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986505>

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Şuhut Meslek Yüksekokulu, Laborant ve Veteriner Sağlık Bölümü, Afyonkarahisar, ORCID ID: 0000 0002 3731 1879, e-mail: sergun@aku.edu.tr

GİRİŞ

“Sürdürülebilir” terimi, özünde “zaman içinde devam ettirilebilen” anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, sürdürülemez bir toplum uzun süre varlığını sürdüremez ve zamanla işlevini yitirir. Günümüzde “sürdürülebilir” kelimesi, genellikle çevre dostu uygulamaları tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Heinberg ve Lerch, 2010).

Sürdürülebilirlik kavramı, 1987’de Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Dünya Komisyonu’nun Brundtland Raporu ile küresel ölçekte yaygınlık kazanmıştır. Raporda sürdürülebilir kalkınma, “...mevcut neslin ihtiyaçlarını, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerini tehlikeye atmadan karşılamak” olarak tanımlanmıştır (WCED, 1987). Bu tanım etkili olmuş ve hâlâ geniş ölçüde kullanılmaktadır; ancak tükenebilir kaynakların kullanımına ve nüfus artışına ilişkin sınırlamaları nedeniyle eleştirilmiştir (Bartlett, 2012).

Sürdürülebilirlik, mevcut ihtiyaçları karşılayarak gelecekteki refahı koruma pratiğidir. Bu, ekolojik dayanıklılık, ekonomik refah, sosyal eşitlik ve kültürel yaratıcılığın bir arada sağlanması ile mümkün olur. Ekolojik dayanıklılık, doğal kaynakların korunmasını; ekonomik refah, fırsatlar yaratmayı ve eşitsizlikleri önlemeyi; sosyal eşitlik, bireylere yaşamlarını yönlendirme imkânı sağlamayı; kültürel yaratıcılık ise yeniliği teşvik etmeyi ifade eder. Gerçek sürdürülebilirlik, sadece doğayı korumakla kalmayıp ekonomik fırsatlar yaratmayı ve eşitlikçi ilişkiler geliştirmeyi de kapsar (Thiele, 2024).

Sürdürülebilirlik, ekonomi, çevre ve sosyal yapı üçgeninin merkezinde yer almakta ve hükümetlerden uluslararası örgütlere, akademisyenlerden çevre örgütlerine kadar geniş bir yelpazede tartışılmaktadır (Yeni, 2014). Bu nedenle farklı disiplinler, sürdürülebilirlik kavramına çok boyutlu yaklaşımlar ve farklı tanımlar geliştirmiştir.

Bu bağlamda Üçlü Sorumluluk Yaklaşımı (Triple Bottom Line – TBL), sürdürülebilir kalkınmayı üç temel boyut üzerinden ele alan bir kavramsal çerçevedir: ekonomik, çevresel ve sosyal. Genellikle 3P olarak adlandırılan bu yaklaşım — Planet (Gezegen), People (İnsanlar) ve Profit (Kâr) — sürdürülebilirlik sorunlarına bütüncül bir bakış açısıyla yaklaşmayı ve bu üç unsur arasında entegratif bir denge kurmayı amaçlamaktadır (González Pacheco ve Barragán Ocaña 2023).

Ekonomik boyut, para akışları, piyasa dinamikleri ve üretim-tüketim ilişkileriyle ilgilidir. Bu kapsamda gelir, gider, vergiler, sübvansiyonlar, istihdam yaratma, dışsallıklar (olumlu ve olumsuz), yenilik süreçleri ve ticari faaliyetler gibi unsurlar değerlendirilir.

Çevresel boyut, doğal kaynakların sürdürülebilir ve rasyonel kullanımı, biyolojik çeşitliliğin korunması, yenilenebilir enerji kaynaklarının teşviki, çevresel risklerin azaltılması ve ekosistemlere özen gösterilmesini kapsar.

Sosyal boyut ise eğitim, toplumsal dayanışma, güvenlik, sağlık, refah, eşitlik, yaşam kalitesi, kültür, değerler ve kişisel gelişim gibi insani unsurlarla ilişkilidir. Bu yönüyle TBL, sadece ekonomik kazancı değil, çevresel sürdürülebilirliği ve toplumsal refahı da dikkate alan bütüncül bir sürdürülebilirlik anlayışını temsil etmektedir (Holmes, Hughes, Mair ve Carlsen, 2015)

1. ARICILIĞIN TARIM VE EKOSİSTEMLER İÇİN ÖNEMİ

Bal arısı kolonileri binlerce yıldır bal üretimi amacıyla insan tarafından yönetilmekte olup, arıcılık geçmişi çok eski çağlara dayanan bir tarımsal faaliyettir. Bununla birlikte, arıcılık özellikle son birkaç on yılda önemli bir dönüşüm geçirerek profesyonel bir uğraş ve ekonomik sektör hâline gelmiştir (Daberkow, Korb, ve Hoff, 2009). Günümüzde arıcılık yalnızca bal üretimiyle sınırlı olmayan, çok boyutlu bir üretim sistemini temsil etmektedir. Bal arısı kolonileri, balın yanı sıra arı sütü, propolis, polen, balmumu, ana arı ve oğul gibi katma değeri yüksek arı ürünlerinin üretimini sağlamakta; aynı zamanda tozlaşma hizmeti aracılığıyla ekosistemlerin ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır. Küresel ölçekte gıda ürünlerinin yaklaşık üçte biri doğrudan ya da dolaylı olarak bal arılarının gerçekleştirdiği tozlaşmaya bağımlıdır (Klein ve diğerleri, 2007).

Böcekler, özellikle de arılar, ekosistemlerin işleyişinde temel bir rol oynayarak besin döngüsünün sürdürülmesi, organik maddelerin ayrıştırılması ve tozlaşmanın gerçekleştirilmesi gibi hayati hizmetler sunarlar. Tozlaşma, biyolojik çeşitliliğin korunması ve gıda güvenliğinin sağlanması açısından kritik bir ekolojik süreç olup, dünya genelindeki tarımsal ürünlerin büyük bir kısmı hayvansal tozlayıcılara bağlıdır. Bal arıları (*Apis mellifera*), küresel ölçekte baskın tozlayıcı tür olarak öne çıkarken; yaban arıları ve diğer böcek

türleri de ekosistem işlevlerinin devamında önemli katkılar sunmaktadır. Ancak modern arıcılık, parazitler, hastalıklar, pestisitler ve iklim değişikliği gibi ciddi tehditlerle karşı karşıyadır. Bu durum yalnızca bal üretimini değil, aynı zamanda arıların sağladığı tozlaşma hizmetlerini de tehlikeye atmaktadır. Dolayısıyla, bal arıları ve yabancı tozlayıcıların korunması, sürdürülebilir tarım, biyolojik çeşitliliğin devamı ve ekosistem dayanıklılığı için stratejik bir zorunluluktur. Arıcılığın sürdürülebilirliği, ekolojik ve ekonomik boyutlarıyla bütüncül bir yönetim anlayışını gerektirir ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kilit bir rol oynar (Thakur, 2012).

Apis cinsi, Hymenoptera takımına bağlı Apidae familyasında yer alan, iğneye sahip sosyal böceklerden oluşur ve bu cinse ait 11 bilinen tür bulunmaktadır. Bu türler arasında, hem biyolojik özellikleri hem de insanlık açısından ekonomik önemleri bakımından öne çıkan birkaç tür dikkat çeker. Apis mellifera ve Apis cerana, tropikal bölgelerin dışında da yaşayabilen türler olup, yaklaşık 2 milyon yıl önce Pliyosen döneminin sonunda birbirlerinden ayrılmışlardır. Dolayısıyla, gelişmiş oyukta yuva yapan bu türlerin varlığı, yalnızca tropik bölgelerde yaşayan açık yuva yapan türlerin varlığına kıyasla evrimsel olarak daha yenidir. İnsanlık açısından en önemli tür A. mellifera'dır. Bu tür, yüksek bal verimi ve uyum kabiliyeti sayesinde arıcılık faaliyetlerinde en yaygın kullanılan türdür ve neredeyse tüm dünyaya yayılmıştır. (Moritz, Härtel ve Neumann., 2005)

Arıcılık, herhangi bir türden sosyal arı kolonilerinin kurulması, bakımı ve yönetimini kapsayan bir faaliyettir. Günümüzde dünya genelinde yapılan arıcılığın büyük çoğunluğu, Apis mellifera (Avrupa bal arısı) türü ile yürütülmektedir. Arıcılığın temel amacı bal üretimi olsa da, bunun dışında farklı uzmanlık alanlarına dayanan arıcılık türleri de bulunmaktadır. Bunlar arasında, diğer arıların kullanımı için ana arı veya paket arı üretimi ile ticari tozlaşma hizmeti sunmak yer almaktadır. Özellikle yoğun tarımsal üretimin yapıldığı ve yerel tozlayıcı popülasyonlarının azaldığı bölgelerde, arı kolonilerinin tozlaşma amacıyla kullanımı büyük önem taşımaktadır. Her arıcılık faaliyetinde olduğu gibi, bu farklı uygulama türlerinde de kolonilerin verimli ve sağlıklı şekilde yönetilmesi, arıların arıcının hedeflerini karşılayabilmesi açısından temel bir gerekliliktir (Crane, 2009).

Arıcılığın, bal üretimi ve özellikle arıların tozlayıcı olarak rolü bağlamında, tarımsal ve doğal ekosistemler içindeki işlevi analiz edildiğinde;

Lepidoptera, Coleoptera, Diptera ve Hymenoptera takımlarına ait tozlayıcı böcekler, Liliaceae, Cruciferae, Rosaceae, Leguminosae, Compositae gibi birçok bitki ailesine ait bitkilerde polen taşımını gerçekleştirir. Özellikle, Leguminosae familyasının yayılması, hem yabani Apoidea hem de Apis mellifera L. tarafından desteklenir ve bu durum, bu bitkiler ile azot bağlayıcı bakteriler arasında bir simbiyoz yaratır; bunun sonucunda ise toprak verimliliği artar (Longo, 1994).

A. mellifera, bal üretimi, yabani bitki popülasyonlarının devamlılığının sağlanması ve insan bağımlı tarımsal üretimin desteklenmesi yoluyla insan refahında önemli bir rol oynamaktadır (Requier, 2019).

Arıcılık, tarımsal faaliyetlerle birlikte yürütüldüğünde önemli bir gelir kaynağı potansiyeline sahiptir. Tozlayıcılar, bitkilerin verimliliğini artırmak ve ekosistem hizmetlerinin sürekliliğini sağlamak açısından hayati bir rol oynarlar. Bal arıları; meyveler, sebzeler, yağlı tohumlar, baklagiller ve lif bitkileri gibi birçok tarımsal ürünün temel tozlayıcılarıdır. Bu nedenle, tarımsal üretimin artırılması ve yeterli tozlaşmanın sağlanabilmesi için arıcılık sektörünün desteklenmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle çiçekli bitkilerin ve tarım ürünlerinin üremesinde arılar vazgeçilmez bir rol üstlenir. Hem yabani hem de yönetilen bal arısı popülasyonları, tozlaşma yoluyla tarımsal verimliliği artırmakta, gıda güvenliğini güçlendirmekte ve ekosistemlerin sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır (Köseoğlu, Tunca, Yücel, Balkanska ve Yıldırım, 2021; Abrol, 2023).

Arılar ve çevre arasındaki simbiyotik ilişki, arıcılığın sürdürülebilir bir uygulama olarak sahip olduğu potansiyeli açıkça ortaya koymaktadır. Doğal ekosistemlerin önemli bir bileşeni olan arılar, tozlayıcı rolleri sayesinde ekosistem sağlığı ve biyolojik çeşitliliğin korunmasında merkezi bir konuma sahiptir. Tozlaşma hizmetleri, yalnızca doğal bitki topluluklarının devamlılığını değil, aynı zamanda küresel tarım ekonomilerinin omurgasını oluşturan birçok ürünün üretimini de mümkün kılar. Bu yönüyle arıcılık, hem ekolojik hem de ekonomik sistemlerin karşılıklı bağımlılığını temsil eden stratejik bir faaliyettir (Prodanović ve diğerleri, 2024).

Biyçeşitlilik, herhangi bir ekosistemin (tarım arazisi, orman, göl vb.) üretkenliğini, dayanıklılığını ve sürdürülebilirliğini güçlendiren temel bir unsurdur. Biyçeşitliliğin kaybı; gıda ve enerji güvensizliğine yol açar, doğal afetlere (sel, tropikal fırtınalar vb.) karşı kırılganlığı artırır ve hem yaşam

kalitesi hem de insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratır. Bu bağlamda, yabancı ve evcil arılar biyoçeşitliliğin korunmasında, bozulmuş habitatların iyileştirilmesi ve ekosistemlerin restorasyonunda kilit rol oynar. Arıların biyogöstergeler olarak çevresel değişimleri yansıtmaya kapasitesi, onların ekosistem sağlığının izlenmesinde ve sürdürülebilirliğin değerlendirilmesinde önemli bir araç olmasını sağlar. Bu yenilikçi bakış açısı, arı ürünlerinin biyoçeşitlilik, sürdürülebilirlik ve insan sağlığı ile olan çok yönlü ilişkisine dair güncel bir çerçeve sunar (Durazzo ve diğerleri, 2021).

2. SÜRDÜRÜLEBİLİR ARICILIK

Arıcılık, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle doğrudan bağlantılı çok yönlü bir üretim alanıdır. Arı kolonilerinin sağladığı ürünler; bal, propolis, arı sütü, polen, balmumu ve ana arı üretimi gibi önemli ekonomik değer taşımakta ve kırsal bölgelerde gelir kaynaklarını çeşitlendirerek tek bir ürüne bağımlılığı azaltmaktadır. Bu çeşitlilik, kırsal hanelerin ekonomik şoklara ve piyasa dalgalanmalarına karşı dayanıklılığını artırırken, aynı zamanda yerel ekonomilerin sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Agera, 2011).

Sürdürülebilir arıcılık, yalnızca üretim faaliyetlerinin devamlılığına değil, aynı zamanda çevresel koruma, sosyal katılım ve ekonomik refahın dengelenmesine dayanmaktadır. Bu bağlamda arıcılık, doğal kaynakların korunması ile toplum refahının artırılması arasında bir köprü görevi görür. Arıların ekosistem hizmetleri, özellikle tozlaşma yoluyla biyolojik çeşitliliğin sürdürülmesine katkı sağlarken; arıcılık faaliyeti, kırsal nüfusun istihdamına, toplumsal dayanışmanın güçlenmesine ve yerel bilgi birikiminin korunmasına olanak tanır (Vinci, Rapa ve Roscioli, 2018).

Sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda arıcılık, arı yetiştirme faaliyetlerini, mevcut tüketim ihtiyaçlarını karşılayan türev ürünlerin üretimini ve doğal kaynakların gelecekteki kullanımı için korunmasını kapsayan bütüncül bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Ancak, arıcılıkta sürdürülebilirliğin uygulamaya geçirilmesi, değerlendirilmesi ve ölçülmesine yönelik referans çerçevelerin geliştirilmesi konusunda hâlen daha fazla araştırma ve uygulamalı çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Purvis ve Robinson, 2019).

Son yıllarda sürdürülebilirliğin önemi, tarımsal çeşitlilik, verimlilik ve insan refahına yönelik ilgiyi artırmıştır. Özellikle geçimini agro-pastoral

faaliyetlerle sürdüren ve arıcılıkla uğraşan kır kesimleri, bu sürecin merkezinde yer almaktadır. Ancak, küresel sürdürülebilirlik hedefleri ile arıcılık arasındaki ilişkilerin tam olarak anlaşılabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. “Çevre korumalı ekolojik arıcılık” yaklaşımı, gıda güvenliğini desteklerken çevreyi korumayı ve arıcılık sektörünün gelişimini teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Tozlaşma, hem çevresel hem ekonomik hem de toplumsal açıdan temel bir ekosistem hizmetidir ve yalnızca sürdürülebilir biçimde yönetilen arıcılık faaliyetleriyle etkin bir şekilde sağlanabilir. Arılar, biyolojik çeşitliliğin korunması, bitki türlerinin devamlılığı, orman sağlığı, tarımsal verimlilik ve iklim değişikliğine uyum açısından kritik bir role sahiptir. Tarım sistemlerinde çeşitliliğin artırılması ve kimyasal girdilere bağımlılığın azaltılması, tozlaşma verimliliğini yükselterek hem ekosistem hem de insan sağlığı için daha kaliteli ve sürdürülebilir bir gıda üretimine katkı sağlar (Jebarathnam, 2024).

Bal arıları, temel gıda ürünlerinin tozlaşmasında kritik rol oynayarak ekolojik dengeyi destekler ve önemli sosyo-ekonomik faydalar sağlar. Arıcılık, hem gıda güvenliğini artıran hem de besin değeri yüksek ürünler sunan sürdürülebilir bir faaliyettir. Ticari arıcılık, ekosistem teorileri, sosyal ekoloji ve sürdürülebilirlik yaklaşımlarıyla entegre edilerek, arıcılığın kırsal kalkınma ve geçim kaynakları üzerindeki etkisini güçlendirir. Arı dostu tarım uygulamaları ve habitat koruma çalışmaları, biyolojik çeşitliliği artırırken ekosistemlerin dayanıklılığını destekler. Yönetilen kovanlar, tozlaşmayı ve mahsul verimini artırarak kırsal topluluklarda gıda güvenliğini iyileştirir. Ayrıca arıcılık, doğal kaynakların korunmasını ve çevreye duyarlı arazi yönetimini teşvik ederek yoğun tarımın olumsuz etkilerini azaltır. Genel olarak arıcılık, tarım, çevre ve insan refahı açısından sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir bileşenidir (Devkota, Dhakal ve Thapa, 2016).

Arıcılık, sürdürülebilir arazi yönetimini destekleyerek doğal kaynakların korunması ve ekosistem sağlığının güçlendirilmesine katkı sağlar. Arıcılar, biyolojik çeşitliliği artırmak ve kimyasal girdilere olan bağımlılığı azaltmak amacıyla agro-ekolojik ve organik uygulamalara yönelir (Hill ve diğerleri, 2019; Pocol ve diğerleri, 2021). Organik arıcılık yöntemleri, toprak verimliliğini, su kalitesini ve ekosistem bütünlüğünü korumada önemli bir rol oynar. Ayrıca, arıcılığın agroforestry, organik ve rejeneratif tarım gibi sürdürülebilir uygulamalarla entegrasyonu, arılara beslenme ve yuvalanma

alanları kazandırırken toprak sağlığını, su ve karbon tutulumunu artırır. Bu bütüncül yaklaşım, kırsal topluluklar için gelir istikrarı, iklim dayanıklılığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından çok yönlü faydalar sunar (Iwasaki ve Hogendoorn, 2021).

Arıcılığın kırsal kalkınma planlarına entegre edilmesi; ekonomik çeşitlilik, yoksulluğun azaltılması, çevresel sürdürülebilirlik ve sosyal güçlenme açısından önemli fırsatlar sunar (Karagözoğlu ve Kıran, 2022). Arıcılık, çiftçilere bal, balmumu, arı sütü ve diğer arı ürünleri aracılığıyla ek gelir sağlayarak tek bir ürüne bağımlılığı azaltır ve hane halklarının ekonomik dayanıklılığını artırır. Özellikle geçim kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, arıcılık yıl boyu sürdürülebilir bir gelir kaynağı oluşturur. Ayrıca, bal üretimi ve işlenmesi, kovan yapımı, paketleme ve pazarlama gibi faaliyetlerle yerel ekonomileri canlandırarak kırsal istihdamı destekler (Kamala ve Devanand, 2021).

Arıcılık, sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamalarını destekleyerek biyolojik çeşitliliğin korunmasına, tozlaşma hizmetlerinin güçlendirilmesine ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına önemli katkılar sunmaktadır. Arılar, ekosistemlerin işleyişi ve tarımsal üretimin devamlılığı açısından kilit bir rol oynamakta; hem yönetilen bal arısı kolonileri hem de yabani arı popülasyonları aracılığıyla bitkisel üretimi artırmakta ve gıda güvenliğini desteklemektedir (Anderson, Khanna, Scott ve Patel, 2021). Bununla birlikte, arıcılık faaliyetleri toprak sağlığının korunması, su kaynaklarının etkin kullanımı ve karbon depolama gibi agroekolojik uygulamalarla iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır (Tiwari, Tiwari, Singh ve Singh, 2013).

Toplumsal açıdan değerlendirildiğinde, arıcılık bilgi paylaşımını, kapasite gelişimini ve topluluk temelli katılımı teşvik eden bir faaliyettir. Arıcıların kooperatifler, birlikler veya dayanışma ağları altında örgütlenmesi, sosyal uyumun güçlenmesine, ortak karar alma süreçlerinin desteklenmesine ve ekonomik dayanışmanın artmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, arıcılık kadınlar, gençler ve yerli topluluklar gibi gruplara ekonomik katılım, beceri geliştirme ve liderlik fırsatları sunarak sosyal güçlenmeyi teşvik etmektedir (Gring-Pemble ve Perilla, 2021).

Ekonomik açıdan arıcılık, gelir artışı, istihdam yaratma ve kırsal ekonomilerin çeşitlendirilmesi bakımından stratejik öneme sahip bir kalkınma

alanıdır. Ancak, bu potansiyelin tam anlamıyla değerlendirilebilmesi için teknik destek, eğitim, altyapı yatırımları, pazar erişimi ile zararlı ve hastalık yönetimi gibi alanlarda bütüncül ve koordineli politikaların uygulanması gerekmektedir. Etkin destek mekanizmalarının hayata geçirilmesi durumunda arıcılık sektörü, kırsal bölgelerde ekonomik dayanıklılığı güçlendiren, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve yoksulluğun azaltılmasına katkı sağlayan güçlü bir kalkınma aracı işlevi görebilmektedir (Rudolph, 2010).

Son yıllarda artan nüfusa paralel olarak, iklim değişikliği, yaşam alanlarının tahrip olması, biyolojik çeşitliliğin azalması, çevre kirliliği, kentleşme, toplumsal hastalıklar, pestisit kalıntıları, yüksek koloni kayıp oranları, bilinçsizce kimyasal ilaç ve antibiyotik kullanımı, tek ürün merkezli üretimin yapılması gibi toplumsal, ekonomik ve çevreyle ilgili sorunlar, arıcılık faaliyetlerinde sürdürülebilir arıcılık uygulamalarının gerçekleştirilmesini bir zorunluluk olarak ortaya çıkarmıştır. Arıcılığın sürdürülebilirliği, arı popülasyonlarının korunması, doğal kaynakların dengeli kullanımı ve ekosistem bütünlüğünün gözetilmesi ile mümkündür. Bu nedenle, sürdürülebilir arıcılık uygulamaları, hem arıların hem de çevrenin karşılıklı faydasını temel alan bütüncül bir yaklaşım çerçevesinde ele alınmalıdır (Şengül, 2020; Armstrong ve diğerleri, 2021).

3. ARI SAĞLIĞI VE HASTALIK YÖNETİMİ

Doğal çevrelerde meydana gelen değişimler, canlıların bulundukları ekosistemlerde varlıklarını sürdürebilmeleri için yüksek düzeyde uyum kapasitesine sahip olmalarını zorunlu kılmaktadır. Bal arıları üzerine yapılan çok sayıda bilimsel araştırma, bu türün güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koyarak, arıların dayanıklılığını ve hayatta kalma yeteneğini artırmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamıştır. Bu stratejiler arasında, beslenme ve mikrobiyota yönetimi, parazit kontrolü ve pestisitlerin zararlı etkilerinin azaltılması gibi yöntemler öne çıkmaktadır. İklim değişikliği, bitkisel biyoçeşitliliğin azalması, insan kaynaklı çevresel baskılar, yeni patojen ve yırtıcıların ortaya çıkışı ile toksin yükü, arı kolonilerinin ve yabani arı popülasyonlarının azalmasında temel etkenler olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, arıların değişen çevresel koşullara karşı direncini artırmaya yönelik yaklaşımlar büyük önem taşımaktadır (Dequenne, Philippart de Foy ve Cani , 2022).

Bal arısı (*Apis mellifera*) kolonileri, günümüzde parazitler, patojenler, pestisitler ve çevresel stres faktörlerinin ortak etkisiyle ciddi kayıplar yaşamakta; bu durum uzun vadede koloni çöküşlerine yol açabilmektedir. Deneysel çalışmalar, bu stres etmenlerinin hem bireysel düzeyde hem de koloni bütünlüğü üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bireysel kayıplara rağmen koloniler her zaman çöküşe uğramamakta, belirli koşullar altında dengeyi koruma veya yeniden sağlama kapasitesi gösterebilmektedir. Bu durum, “sosyal dayanıklılık (social resilience)” kavramı ile açıklanmakta olup, bir koloninin dış stres faktörlerine rağmen içsel düzenini ve işlevsel bütünlüğünü sürdürebilme yeteneğini ifade eder. Ancak, stresin şiddeti belirli bir eşiği aştığında bu mekanizmalar bozulmakta, dayanıklılık zayıflamakta ve sonuçta koloni çöküşü gerçekleşebilmektedir. Bal arılarında sosyal dayanıklılığın anlaşılabilmesi için, kolonilerin stres sonrası toparlanma süreçlerinin ve homeostatik mekanizmalarının ayrıntılı biçimde incelenmesi gerekmektedir. Bu mekanizmaların tanımlanması, koloni sağlığının korunması, koloni kayıplarının azaltılması ve sürdürülebilir arıcılık uygulamalarının geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Ulgezen, van Dooremalen ve van Langevelde, 2021).

Bal arıları (*Apis mellifera*), yaşam döngülerinin farklı evrelerinde çok sayıda hastalık ve parazite karşı duyarlılık göstermektedir. Özellikle Varroa destructor akarı, günümüzde Avrupa bal arıları için en ciddi tehditlerden biri olarak kabul edilmektedir. Larva ve pupa dönemlerinde görülen Amerikan yavru çürüklüğü (AFB) ve Avrupa yavru çürüklüğü (EFB) hastalıkları, koloni sağlığını olumsuz yönde etkileyen önemli bakteriyel enfeksiyonlardır. Bunun yanı sıra, Nosema spp. tarafından oluşturulan nosematoz, bal arılarında sindirim sistemini hedef alan ve genellikle zayıflamaya yol açan tek hücreli bir mikroorganizma hastalığıdır. Kolonilerde ayrıca deforme kanat virüsü (DWV) ve kronik arı felci virüsü (CBPV) gibi viral patojenlerin latent (uyku halinde) formları sıklıkla tespit edilmektedir. Bal arısı kolonileri yalnızca hastalıklarla değil, aynı zamanda ekolojik olarak arılardan yararlanan diğer organizmalarla da etkileşim hâlinindedir. Bal mumu güveleri ve polen akarları gibi türler, kovan ürünleriyle beslenerek kolonilere dolaylı zarar verebilir. Bu nedenle, arı sağlığının korunması, patojenlerin, parazitlerin ve simbiyotik

organizmaların etkileşimlerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesini gerektirir (Samanci, Muluk, Samanci ve Cingi, 2024).

Bal arısı kolonilerinin sağlığı ve sürdürülebilirliği, büyük ölçüde arıcıların uyguladığı yönetim stratejilerine bağlıdır. Arıcılıkta kullanılan yöntemler; kimyasal müdahale düzeyi, kovan yönetimi sıklığı ve kolonilere sağlanan ek besin desteği bakımından farklılık göstermektedir. Bu uygulamalardaki değişkenlik, kolonilerin dayanıklılığı, verimliliği ve hastalıklara karşı direncini doğrudan etkilemektedir (Underwood, Traver ve López-Urbe, 2019).

Çevresel faktörler, arıların sağlık durumunu, davranışlarını ve üretkenlik düzeylerini belirleyen temel unsurlardandır. Bu nedenle, arıcılıkta kovanların konumlandırılması büyük bir önem taşır. Uygun kovan yerleşimi, arıların besin kaynaklarına erişimini kolaylaştırırken, koloni sağlığını ve bal verimini de artırır. Çevresel kirlilik, arılar ve kovan ürünleri açısından ciddi bir tehdit unsuru olup, bu durum kovanların uygun şekilde konumlandırılmasının önemini ortaya koymaktadır. Arıcılar, arıların çevresel izleme amacıyla kullanılmadığı durumlarda, en uygun çevresel koşullara sahip alanları tercih etmelidir. Etkili bir kovan-çevre yönetimi, çoğu zaman diğer paydaşlarla bütüncül bir peyzaj yönetimi çerçevesinde iş birliği gerektirir. Dış çevresel faktörler, kovanların performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir ve bu etki, kovanla olan mesafe azaldıkça artış gösterir. Arıların uçuş yarıçapı genellikle üç kilometre ile sınırlıdır; bu durum, bazı doğal kaynaklara erişimlerini kısıtlayabilir. Ayrıca, yerel mikroiklim koşulları, arazinin eğimi, bitki örtüsü yapısı ve yön gibi faktörler, kovanların verimliliği ve hayatta kalma oranları üzerinde önemli rol oynar. Bu bölgesel unsurlar, özellikle aşırı sıcaklık gibi olumsuz çevresel etkilerin azaltılmasına da katkı sağlayabilir (Awasthi, 2022).

Bal arısı kolonilerinin sağlığı, yaşam süresi ve gelişimi, kovanda bulunan besinlerin hem miktarına hem de kalitesine doğrudan bağlıdır. Arılar; karbonhidratlar, proteinler, lipitler ve mikro besinleri içeren nektar ve polen kaynaklarına ihtiyaç duyarlar. Bu besin bileşenleri, arıların yaşamlarını sürdürebilmeleri, üreme faaliyetlerini gerçekleştirebilmeleri ve çevresel stres koşullarına karşı dayanıklılık kazanabilmeleri açısından temel öneme sahiptir. Genel olarak, bal arıları enerji ihtiyaçlarını nektardan sağlarken, büyüme ve

gelişme için gerekli olan protein gereksinimlerini polenden karşılarlar (Topal ve diğerleri, 2022).

Pestisitler (insektisitler, akarisitler, fungusitler, herbisitler) ve antibiyotikleri kapsayan geniş bir kimyasal grubun arılar üzerinde yaygın ve çoğunlukla zararlı etkiler oluşturduğu bilinmektedir. Bu maddeler, akut zehirlenmelere, kronik hastalıklara ve nihayetinde koloni kayıplarına yol açabilmektedir. Pestisit kullanımında genel bir azalma eğilimi gözlenmekle birlikte, arı ölümlerinin devam etmesi, daha yüksek toksisiteye sahip yeni pestisit türlerinin kullanımına bağlanmaktadır. Pestisitler yalnızca arı sağlığını tehdit etmekle kalmamakta; aynı zamanda böcek popülasyonlarının azalmasına neden olarak ekosistem dengesini bozmakta ve dolaylı yoldan insan sağlığını da tehlikeye atmaktadır (Awasthi, 2022).

Yerel bitki çeşitliliği, arıların yaşamlarını sürdürebilmeleri için gerekli besin kaynaklarına düzenli erişim sağlamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Sezon boyunca çeşitli ve yüksek kaliteli nektar ile polen kaynaklarının bolluğu, kovanların hayatta kalması ve üreme başarısı için temel bir gerekliliktir. Arıların, özellikle yüksek besin talebinin bulunduğu dönemlerde geç çiçeklenen bitkilere de erişim sağlayabilmeleri önemlidir. Bu durum, vahşi ve yarı doğal habitatlarda biyolojik çeşitliliğin korunmasına katkıda bulunmakta ve tarımsal alanlarda arıların beslenmesini destekleyecek şekilde doğal alanlarla bütünleşik ekim uygulamalarının teşvik edilmesini gerektirmektedir (Awasthi, 2022).

4. SÜRDÜRÜLEBİLİR KOVAN YÖNETİMİ VE ARI BESLENMESİ

Kovanı oluşturan petekler, arıların salgıladığı balmumundan inşa edilen altıgen hücrelerden meydana gelen iki katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu hücrelerde, bitkilerden toplanan nektar ve polen kaynaklarından üretilen bal ile polen ekmeği (arı ekmeği olarak da adlandırılır) gibi besinler depolanır. Çiçek nektarından arılar tarafından üretilen bal, modern öncesi dönemlerde insanlar için ulaşılabilir tek doğal ve kolay şeker kaynağıydı. Bu nedenle insanlar, tarih boyunca bal arılarını evcilleştirme ve onlardan sistematik şekilde faydalanma yoluna gitmiştir.

Arıcılık, bal arısı kolonilerinin korunması, yönetilmesi ve üretim faaliyetlerinin sürdürülmesiyle ilgilenen bir uygulama alanıdır. Bal arıları

yalnızca bal üretimiyle değil, aynı zamanda birçok kültür bitkisinin tozlaşmasını sağlayarak tarımsal verimliliğe ve ekosistem dengesine katkıda bulunmaları bakımından da büyük öneme sahiptir. Apis cinsine ait bazı bal arısı türleri, yavrularını yetiştirmek amacıyla “kovan” olarak adlandırılan kapalı yapılarda yaşamaktadır. “Kovan” terimi genel olarak bir arı kolonisinin yuvasını ifade etse de, bilimsel literatürde “yuva” kavramı daha özel bir anlam taşımakta ve koloninin açık alanlarda, doğal boşluklarda veya insan yapımı barınaklarda oluşturduğu yaşam alanını tanımlamaktadır. Buna karşılık, arı kolonilerinin barınması amacıyla özel olarak inşa edilen insan yapımı yapılar “kovan” olarak adlandırılır (Samanci ve diğerleri, 2024).

Dünyanın çeşitli bölgelerinde arıcılık ve kovan tasarımlarının tarihsel gelişimi, arıcılık uygulamalarının kültürel çeşitliliğini ve evrimini yansıtmaktadır. Avrupa, Afrika, Latin Amerika, Orta Doğu, Okyanusya ve Asya’da farklı dönemlerde geliştirilen kovan tipleri, hem yerel kaynaklara hem de iklim koşullarına uyum sağlamıştır. Avrupa’da kovan yapıları zamanla tasarım, malzeme ve kullanım açısından değişim göstermiştir. Büyük ağaç gövdelerinin teminindeki zorluklar, çamur veya gübre ile kaplanmış sepet kovanların yaygınlaşmasına yol açmıştır. Yatay kovanlardan evrilen dikey ahşap kovanlar, pratiklik açısından tercih edilirken; endüstriyel üretim kolaylığı nedeniyle hareketli çerçeveli kovanlar, Avrupa genelinde geleneksel modellerin yerini büyük ölçüde almıştır. Afrika’da ise arıcılığın kökleri çok eskiye dayanır. Kıtada birçok topluluk, balı önce doğadan toplayarak, daha sonra kendi geliştirdikleri yerel kovan modelleriyle üretmeye başlamıştır. Günümüzde Afrika’dan ihraç edilen balın büyük kısmı hâlâ geleneksel kovanlardan elde edilmektedir. Bu kovanların boyutları ve biçimleri, bölgesel malzeme çeşitliliğine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Günümüzde arıcılıkta kullanılan başlıca modern kovan türleri arasında hareketli çerçeveli, üst çubuklu, dikey modüler ve yatay kovanlar bulunmaktadır. Bu sistemler, koloni yönetimi ve bal üretiminde esneklik sağlayarak farklı iklim koşullarına ve arıcılık uygulamalarına uyum göstermektedir (Singh, 2022).

Yeterli ve dengeli beslenme, sağlıklı bal arısı kolonilerinin gelişimi ve sürdürülebilirliği için temel bir gerekliliktir. Bu kapsamda; bal arısı işçilerinin beslenme gereksinimleri karbonhidrat ve protein takviyeleriyle koloni düzeyinde beslenme, ergin arı beslenmesi ve larva beslenmesi olarak üç

düzeyde incelenmektedir. Larvalar, özellikle protein açısından yüksek gereksinime sahiptir ve koloni içerisindeki yavru üretimi bu besin maddesinin yeterliliğine doğrudan bağlıdır. Protein eksikliği durumunda, koloni mevcut kaynaklarını korumak amacıyla yetiştirilen larva sayısını azaltabilir. Larva döneminde yaşanan besin yetersizliği, gelişmekte olan işçi arıların fizyolojik kalitesini düşürmekte ve zayıf bireylerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, larva açlığı, tek başına veya diğer çevresel stres faktörleriyle birlikte değerlendirildiğinde, koloninin genel dayanıklılığını ve üretkenliğini önemli ölçüde azaltan bir unsur olarak kabul edilmektedir (Brodtschneider ve Crailsheim, 2010).

Bal arısı işçileri, yaşlanma süreciyle birlikte beslenme alışkanlıklarında belirgin bir değişim gösterir; genç işçiler yüksek oranda temel amino asit içeren protein ağırlıklı diyetlerle beslenirken, yaşlı işçiler giderek daha fazla karbonhidrat temelli bir diyetle yönelirler. Bal arısı beslenmesi, büyük ölçüde çevresel koşullara ve özellikle peyzajdaki bitki örtüsünün çeşitliliğine bağlıdır. Arılar, hem mekânsal hem de zamânsal olarak değişkenlik gösteren çiçek kaynaklarıyla karşı karşıyadır. Bu kaynakların miktarı ve kalitesi yıl boyunca farklılık gösterdiğinden, bal arıları bulundukları bölgeye göre polen çeşitliliği, miktarı ve besin değeri açısından önemli kısıtlamalarla karşılaşabilirler (Tsuruda, Chakrabarti ve Sagili, 2021).

Bal arısı kolonilerinin kış mevsimini başarıyla geçirebilmeleri için yapay şekerli yemlerle desteklenmeleri gerekmektedir. Bu amaçla farklı türde besin maddeleri kullanılmakta olup, geleneksel olarak şeker pancarından veya kamıştan elde edilen sakkaroz (sofra şekeri), etkili bir besleme kaynağı olarak tercih edilmektedir. Günümüzde ise nişasta veya sakkarozdan türetilen basit şekerleri içeren invert şuruplar (ters çevrilmiş şeker şurupları), daha yüksek maliyetlerine rağmen önerilmektedir. İnvert şuruplar, arıların sakkarozu parçalamak için ilave enzim üretme gereksinimini ortadan kaldırdığı varsayımına dayanarak, kolonilerin kış öncesi beslenme durumunu iyileştirme potansiyeline sahip bir yem türü olarak değerlendirilmektedir (Přidal, Musila ve Svoboda, 2023).

5. BAL VE DİĞER KOVAN ÜRÜNLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİMİ

Arılar, bitkilerden topladıkları nektar, polen, reçine ve salgıları kendi enzim ve bez salgılarıyla dönüştürerek çeşitli ürünler üretirler. Bal, nektarın arılar tarafından işlenip petek gözlerinde olgunlaştırılmasıyla elde edilir. Polen, arıların çiçeklerden topladığı taneciklerin arka bacaklarında taşınarak kovana getirilmesiyle birikir ve arı ekmeğine (beebread) dönüştürülür. Propolis, bitkisel reçinelerin arı salgılarıyla karışımından oluşur ve kovan içi sterilizasyon için kullanılır. Balmumu, genç arıların salgıladığı doğal bir yapı malzemesidir ve petek üretiminde kullanılır. Arı sütü ve kraliçe sütü, larva beslenmesi için özel bezlerden salgılanır. Arı zehri (apitoksin), savunma amaçlı üretilen biyoaktif bir maddedir. Bu süreçlerin her biri, arıların ekosistemle kurduğu karşılıklı ilişki sayesinde gerçekleşir. Arılar hem ürün üretir hem de bitkilerin tozlaşmasını sağlayarak biyolojik çeşitliliği destekler.

Bal, gelişmekte olan ülkelerde en tanınan arı ürünüdür. Pazar güveni açısından ürünlerin katkısız, doğal ve hijyenik koşullarda üretilmiş olması gerekmektedir. Özellikle petekli bal, tüketici açısından doğallık ve saflığın en güçlü göstergesidir. Yüksek kaliteli bal üretimi, yalnızca ürünün kimyasal ve duyuşal özelliklerinin korunmasını değil, aynı zamanda tüketici güveninin ve pazar sürekliliğinin sağlanmasını da mümkün kılar. Dolayısıyla, kalite güvencesi sağlanmış bal ürünleri, etkin pazarlama kanallarının oluşturulması ve sürdürülebilir şekilde işletilmesi açısından vazgeçilmez bir öneme sahiptir. Balın kalitesini belirleyen temel unsurlar; saflık (yabancı madde bulunmaması), nem oranı (%18'in altında olması) ve doğal kristalleşme sürecidir. Kristalleşmiş bal bozulmuş değildir; bu doğal bir süreçtir. Ancak yüksek sıcaklıkta ısıtma, balın kimyasal yapısını ve aromasını bozabilir. Sürdürülebilir üretimde, soğuk zincir ve düşük ısı işlem prensipleri benimsenmelidir. Ayrıca bal, higroskopik yapısı nedeniyle hava geçirilmeyen kaplarda saklanmalıdır.

Propolis, kovanın steril tutulmasında kullanılır ve tıbbi değeri yüksek bir üründür. Ekstraksiyon (özütleme) yöntemleriyle saflaştırılır. Polen ve arı ekmeği, özel polen tuzaklarıyla toplanır; protein, vitamin ve mineral açısından zengindir. Balmumu, kozmetik ve farmasötik üretimde doğal bir hammadde olarak değerlendirilir. Arı sütü, yüksek besin içeriği nedeniyle hem sağlık hem de güzellik ürünlerinde kullanılır. Arı zehri, tıbbi ve estetik alanlarda (örneğin

artrit veya cilt tedavilerinde) araştırılmaktadır. Bu ürünlerin her biri, doğru toplama, işleme ve depolama yöntemleri uygulanmadığında değer kaybına uğrayabilir. Dolayısıyla, sürdürülebilir üretim için standartlaştırılmış kalite kontrol sistemleri gereklidir.

Bal ve diğer arı ürünleri, yalnızca ekonomik bir değer değil, aynı zamanda ekolojik sürdürülebilirliğin bir göstergesidir. Arıların ürettiği her bir madde, doğa döngüsünün ayrılmaz bir parçasıdır. Sürdürülebilir üretim, çevre dostu uygulamalarla birlikte arıların yaşam alanlarının korunmasını, bilinçli üretim tekniklerinin yaygınlaştırılmasını ve yüksek kalite güvencesinin sağlanmasını gerektirir. Bu anlayışla yürütülen arıcılık, hem doğanın devamlılığı hem de insanlığın sağlıklı geleceği için vazgeçilmezdir (Gupta, Reybroeck, De Waele ve Bouters, 2014).

6. SÜRDÜRÜLEBİLİR ARICILIĞIN KIRSAL KALKINMAYA KATKISI

Kırsal kalkınma, insanların mevcut doğal kaynakları sürdürülebilir biçimde kullanarak yaşam standartlarını iyileştirmelerini hedefleyen bir yaklaşımdır. Bu anlayış, çevreye zarar vermeden, bireylerin yeteneklerine ve yerel koşullara uygun istihdam olanakları sunarak ekonomik ve sosyal güçlenmeyi destekler.

Arıcılık ve bal avcılığı, insanlık tarihinin en eski üretim faaliyetleri arasında yer alır ve uzun süredir kalkınma süreçleriyle ilişkilendirilmiştir. “Bal avcılığı” yani vahşi arı kolonilerinden bal toplama geleneği, tarih öncesi dönemlerden itibaren uygulanmaktadır. Bu geleneğe dair kanıtlar, Hindistan’daki M.Ö. 11.000 yılına tarihlenen mağara resimlerinde ve Antik Mısır’daki duvar çizimlerinde görülmektedir.

Zamanla yerleşik tarımın gelişmesiyle birlikte, arıların kontrollü şekilde kovanlarda beslenmesi fikri doğmuş ve arıcılık bir üretim faaliyeti haline gelmiştir. Ancak bu gelişme, bal avcılığını ortadan kaldırmamış; iki uygulama, birçok bölgede birbirini tamamlayan faaliyetler olarak sürmüştür. Günümüzde bile, özellikle Güney Asya ve Afrika gibi bölgelerde vahşi bal toplama yaygın bir geçim kaynağıdır. Örneğin Hindistan’da her yıl yaklaşık 22.000 ton vahşi bal toplanmakta olup, bu miktar modern arıcılık sektöründe üretilen balın yaklaşık iki katına eşittir (Wakhle ve Pal, 2000).

Arıcılık, yalnızca çevresel açıdan değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal yönden de sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlar. Kırsal ekonomilerde gelir çeşitliliğini artırarak tek ürüne bağımlılığı azaltır ve toplulukların ekonomik dalgalanmalara karşı direncini güçlendirir. Arıcılık ekonomik refah, sosyal kapsayıcılık ve çevresel sürdürülebilirlik arasında köprü kuran çok yönlü bir faaliyettir. Arıların biyolojik çeşitlilik ve toplumsal kalkınma arasındaki etkileşimden doğan potansiyeli, kırsal bölgelerin ekonomik ve ekolojik dönüşümünde önemli bir araçtır. Bununla birlikte, arıcılığın tam potansiyeline ulaşabilmesi için sektörel zorlukların giderilmesi, ortak politikaların geliştirilmesi ve bütüncül yaklaşımların benimsenmesi gerekmektedir. Bu sayede, arıcılığın dönüştürücü gücüyle dayanıklı ve sürdürülebilir kırsal topluluklar inşa edilebilir (Prodanović ve diğerleri, 2024).

7. ÇEVRESEL YÖNETİM VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ARAÇLARI

Çevre kirliliği, arılar ve kovan ürünlerinin kalitesi için ciddi bir tehdit oluşturur. Bu nedenle kovanların dikkatli şekilde yerleştirilmesi, arıcılığın başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Arıcılar, arılarını çevresel izleme amacıyla kullanmadıkları durumlarda, en uygun doğal koşullara sahip alanları tercih etmelidir. Arıların uçuş mesafesi genellikle 3 kilometreyle sınırlıdır, bu da kovan çevresindeki doğal faktörlerin (mikroklim, bitki örtüsü, eğim, yön vb.) koloni sağlığı üzerinde doğrudan etkili olmasına yol açar. Uygun çevresel koşullar, sıcaklık dalgalanmalarının etkilerini azaltarak kolonilerin hayatta kalmasını destekler.

Pestisitler ve diğer kimyasallar (akarisit, fungusit, herbisit, antibiyotik vb.), arılar üzerinde akut zehirlenme, hastalık ve toplu ölümler gibi ciddi sonuçlara neden olabilir. Kimyasal kullanımındaki azalmaya rağmen, daha güçlü pestisitlerin kullanımı arı kayıplarını sürdürmektedir. Bu maddeler yalnızca arı sağlığını değil, ekosistem dengesini ve insan sağlığını da olumsuz etkiler (Minja ve Nkumilwa, 2016; Ismail, 2016).

Ayrıca, yerel bitki çeşitliliği arıların sürekli besin bulabilmesi açısından yaşamsal öneme sahiptir. Yıl boyunca farklı dönemlerde çiçeklenen bitkilerin bulunması, kovanların üretkenliği ve sürekliliği için gereklidir. Tarım alanlarının doğal habitatlarla iç içe planlanması, hem biyolojik çeşitliliği korur hem de arıların beslenme sürekliliğini sağlar. Sonuç olarak, çevre dostu kovan

yerleşimi, kimyasal kullanımının azaltılması ve bitki çeşitliliğinin korunması, sürdürülebilir arıcılığın temelini oluşturur. (Awasthi, 2022)

Habitat kaybı, küresel biyolojik çeşitlilikteki azalmanın en önemli nedenlerinden biridir ve bu durum, yerli arı türleri başta olmak üzere pek çok canlı grubunu olumsuz etkilemektedir. Doğal yaşam alanlarının yok olması, arıların beslenme, üreme ve yuvalama imkânlarını kısıtlayarak kolonilerin zayıflamasına ve tür çeşitliliğinin azalmasına yol açmaktadır. Bu kayıpları azaltmanın en etkili yollarından biri, habitat restorasyonu çalışmalarına yönelmektir. Restorasyon, bozulan veya zarar görmüş alanların yeniden doğaya kazandırılması ve bu süreçte biyolojik çeşitliliğin artırılması anlamına gelir. Arıların desteklenmesi için yapılacak bu çalışmalar, sadece çevresel iyileşme sağlamakla kalmaz; aynı zamanda ekosistem hizmetlerinin (özellikle tozlaşmanın) sürekliliğini de güvence altına alır. (Payne, Mazer ve Seltmann, 2024).

Arıcılık sektörü, son yıllarda hem iklim değişiklikleri hem de arı yaşamına aykırı uygulamalar nedeniyle ciddi koloni kayıpları yaşamaktadır. Çevresel koşullardaki olumsuzluklar, üretimi doğrudan etkileyerek sektörde ekonomik zorluklara yol açmaktadır. Kırsal kalkınmada önemli bir model olarak görülen arıcılık, artan sorunlarla birlikte sürdürülebilirliğini tehdit altında bulmaktadır. Özellikle arı hastalıkları ve zararlılarıyla yapılan mücadelelerin yetersiz kalması, yeni hastalıkların ortaya çıkmasıyla birlikte arı sağlığını ciddi biçimde etkilemektedir. Yanlış ilaçlama uygulamaları, hem arılarda hem de parazit ve patojenlerde direnç gelişimine neden olurken, kimyasalların hatalı kullanımı arı ürünlerinde kalıntı riskini artırmaktadır. Bunun yanında, iklimdeki ani değişimler arıların floral kaynaklardan yeterince yararlanmasını engellemekte ve yetersiz beslenme sonucu kolonilerin zayıflamasına yol açmaktadır. Üreticilerin koloni yönetimi sırasında yaptıkları hatalar da bu durumu daha da kötüleştirmektedir. Tüm bu etkenler, arıcılıkta sağlıklı kolonilerin korunması ve sürdürülebilirliğin sağlanmasının ne kadar önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır (Kösoğlu ve diğerleri, 2021).

8. ARICI EĞİTİMİ

Küreselleşme süreciyle birlikte arıcılar, arı kovanlarını dengede tutma, verimliliği artırma, koloni performansını geliştirme ve rekabet gücünü koruma

konularında pek çok zorlukla karşılaşmaktadır. Arıcılık işletmelerinin büyük bir kısmı küçük ölçekli olup, kırsal nüfusun ekonomik ve sosyal kalkınmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Bu nedenle, arıcılara uygun eğitim olanaklarının sunulması büyük bir gerekliliktir. Eğitim, arıcıların sektördeki değişen koşullara uyum sağlamasına, üretim süreçlerini geliştirmesine ve sürdürülebilir bir şekilde faaliyet göstermesine yardımcı olur. Özellikle yaşam boyu öğrenme ve mesleki eğitim programlarına yapılan yatırımlar, bir arıcılık işletmesinin başarıyla büyümesi ile başarısız kalması arasındaki farkı belirleyebilecek kadar kritik bir rol oynar. Eğitim, üretim kalitesini artırarak hem bireysel hem de toplumsal düzeyde sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlar ve arıcılığın küresel ölçekte rekabetçi bir sektör haline gelmesine destek olur (Huang, Ma, Song, Rong ve Li, 2021; Gryshchuk, Weber, Loo ve Wermter, 2022).

Eğitim teknolojilerinin arıcılık eğitimine entegrasyonu, özellikle kırsal bölgelerde eğitim erişimini artırmak ve öğrenme verimliliğini geliştirmek açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ancak bu tür programların başarılı olabilmesi için, sınırlı eğitim altyapısı, pedagojik desteği yetersiz eğitmenler ve zayıf sınıf yönetimi gibi mevcut zorlukların dikkate alınarak tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca, arıcılık eğitiminde resmî (kurumsal, örgün eğitim) ve gayriresmî (usta-çırak ilişkisi, topluluk temelli öğrenme) öğrenme biçimlerinin bir arada yürütülmesi, sektörde yenilikçiliği, araştırma kapasitesini ve sürdürülebilir gelişmeyi teşvik etmektedir. Bunun yanında, aile içi bilgi aktarımı ve çevresel farkındalığın güçlendirilmesi sürdürülebilir arıcılığın temel dayanakları arasında yer almaktadır (Guiné ve diğerleri, 2023).

9. TÜRKİYE ARICILIK SEKTÖRÜNDE YASAL DÜZENLEMELER VE GELİŞİM POTANSİYELİ

Türkiye, dünya arıcılık sektöründe büyük bir üretim potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Koloni varlığı açısından dünya üçüncüsü olmasına rağmen, bal ihracatında yirmi birinci sırada bulunması, mevcut üretim gücünün ekonomik kazanca tam olarak yansıtılmadığını göstermektedir. Her ne kadar Türkiye, iç pazarda bal üretimi bakımından kendi ihtiyaçlarını karşılayabilecek düzeyde olsa da, uluslararası pazarda rekabet gücü sınırlıdır. Bunun temel nedenlerinden biri, yürürlükteki yasal ve

kurumsal düzenlemelerin sektörün dinamiklerine ve güncel ihtiyaçlarına yeterince cevap verememesidir. Mevzuatın, üretim verimliliğini artıracak ve sürdürülebilir kalkınmayı destekleyecek biçimde yeniden yapılandırılması gerekmektedir.

Arıcılık sektörünün sürdürülebilir biçimde büyüebilmesi için, tüm arı ürünlerini kapsayan, güncel, şeffaf ve uygulanabilir bir yasal çerçevenin oluşturulması kaçınılmazdır. Böyle bir düzenleme, yalnızca üretim kalitesi ve verimliliğini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda Türk arı ürünlerinin marka değerini güçlendirerek uluslararası pazarda rekabet gücünü de önemli ölçüde yükseltecektir. Sonuç olarak, güçlü bir yasal altyapı ve etkin denetim mekanizmasıyla desteklenen arıcılık sektörü, Türkiye'nin hem kırsal kalkınmasında hem de küresel gıda ekonomisinde stratejik bir konum elde etmesini sağlayacaktır (Doğan ve Özkök, 2019).

Arıcılık, hem Avrupa Birliği'nde hem de Türkiye'de kırsal bölgelerde birçok üreticinin temel geçim kaynağı olup, mikro düzeyde kırsal kalkınmaya, makro düzeyde ise ülke ekonomisine önemli katkı sağlamaktadır. Bu faaliyetin sürdürülebilir biçimde devam edebilmesi için gıda güvenliği ilkelerine uygun üretim ve ticaret büyük önem taşır. Arı ürünlerinin doğal ve sağlıklı yapısının korunması, kovandan tüketiciye kadar tüm süreçte güvenli ve kaliteli üretim uygulamalarının benimsenmesiyle mümkündür. Bu kapsamda, iyi üretim uygulamaları (GMP) gibi sistemler, arı ürünlerinde iç ve dış kirlenme risklerini önlemede kritik rol oynamaktadır.

Türkiye, özellikle çam balı üretiminde dünya lideridir. Ancak bu konumun korunabilmesi, güvenli ve kaliteli üretim standartlarının sürdürülmesine bağlıdır. Türkiye'de arıcılık sektörüne yönelik gıda güvenliği mevzuatı ve uygulamalar, AB'ye uyum süreciyle birlikte önemli ilerleme kaydetmiştir. Sonuç olarak, Türkiye arıcılık sektöründe gıda güvenliğinin sağlanması için denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi ve uygulamaların etkinleştirilmesi gerekmektedir. Bu sayede hem tüketici güveni artacak hem de sektörün uluslararası rekabet gücü korunacaktır (Çukur, Yücel ve Demirbaş, 2016).

10. DÜNYA VE TÜRKİYE ARICILIĞININ GÜNCEL DURUMU

Arıcılık, bir yandan insan beslenmesinde önemli bir yer tutan bal ve diğer arı ürünlerinin üretimini sağlarken, diğer yandan tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından polinasyon yoluyla biyoçeşitliliğe ve verimliliğe büyük katkı sunmaktadır. Bu yönüyle arıcılık, hem ekonomik hem de ekolojik değeri yüksek bir faaliyettir (Bertoni, Pardo ve Paracchini, 2025).

2008–2022 yıllarını kapsayan veriler, dünya arıcılık sektörünün küresel üretim değerinin 9,2 milyar doları aştığını göstermektedir. 2020–2022 döneminde Çin, 1.800.089 tonluk üretimiyle dünya bal üretiminin %25,79’unu karşılayarak ilk sırada yer almıştır. Türkiye ise 106.239 tonluk üretimiyle ikinci sıradadır. Türkiye’yi İran, Hindistan, Arjantin ve Rusya Federasyonu takip etmektedir. Koloni sayısı bakımından ise Hindistan, Çin ve Türkiye ilk üç sırayı paylaşmaktadır ((Bayav ve Karlı, 2024).

2023 yılı dünya bal üretiminde %25,5’lik paya sahip olan Çin 464 bin ton üretimi ile açık ara en büyük üretici konumundayken, %6,1’lik paya sahip Türkiye 115 bin ton ile ikinci, %4,5’lik pay ile Etiyopya ise 85 bin ton üretimi ile üçüncü sırada yer almaktadır (TRGM/TEPGE, 2025).

Türkiye, sahip olduğu koloni varlığına rağmen 12,31 kg olan ortalama kovan başı bal verimiyle dünya ortalaması olan 18,02 kg’ın altında kalmaktadır. Bu durum, üretim kapasitesi yüksek olmasına karşın verimlilik açısından iyileştirilmesi gereken alanlar bulunduğunu göstermektedir.

İhracat açısından da benzer bir tablo görülmektedir. Üretimde ikinci sırada yer alan Türkiye, 11.051 tonluk ihracatıyla dünya sıralamasında 11. sırada bulunmaktadır. Türkiye ihracatının %43,55’i ABD’ye yapılmakta olup başlıca ihracat pazarları arasında ABD, İspanya, Almanya ve Suudi Arabistan yer almaktadır. Dünya genelinde ise ABD, en fazla bal ithalatı yapan ülke konumundadır; onu Almanya, İngiltere, Japonya, Polonya ve Belçika izlemektedir.

Türkiye’de 81 ilde bal üretimi yapılmakta, özellikle Ordu, Adana, Muğla, Sivas ve Kocaeli illeri öne çıkmaktadır. Ülkenin sahip olduğu farklı iklim ve coğrafi koşullar, arıcılık açısından büyük bir potansiyel oluşturmaktadır. Ancak düşük verimlilik, sektörün en önemli yapısal sorunu olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, arıcılıkta verimliliği artırmaya yönelik Ar-Ge çalışmalarına öncelik verilmesi ve sektöre yönelik teknik,

ekonomik ve bilimsel desteklerin güçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır (Bayav ve Karlı, 2024).

11. ARICILIK FAALİYETLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ

Yapılan araştırmalar, arıcılık faaliyetlerinin sürdürülebilirliğinin doğrudan işletme büyüklüğü ve arıcının deneyim düzeyi ile ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Büyük ölçekli ve deneyimli işletmelerin hem ekonomik açıdan daha istikrarlı bir yapıya sahip oldukları hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından daha yüksek düzeyde tozlaşma hizmeti sundukları belirlenmiştir. Bu durum, bilgi birikimi ve işletme kapasitesinin, arıcılık sektöründe uzun vadeli başarı ve çevresel katkı açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir (Kence, 2006).

Ayrıca göçer arıcılık uygulamalarının, sürdürülebilirlik üzerinde önemli bir olumlu etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Tamamen ya da kısmen göçer arıcılık yapan işletmelerin, sabit arıcılıkla uğraşanlara kıyasla daha yüksek ekonomik performans gösterdikleri saptanmıştır. Bu bulgu, arı kolonilerinin farklı flora koşullarından yararlanmasının hem bal verimini hem de ekosistem hizmetlerini desteklediğini göstermektedir (Kekeçoğlu, 2021).

Coğrafi faktörler açısından bakıldığında, düzlük alanlarda konumlanan kovanlıkların sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik bakımından daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, ulaşım kolaylığı, bakım koşullarının uygunluğu ve çevresel stres faktörlerinin görece düşük olmasıyla açıklanabilmektedir.

Arıcılık faaliyetlerinin çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğini artırmak için bütüncül bir yaklaşım benimsenmesi gerekmektedir. Deneyim, uygun ölçek, coğrafi koşullar ve doğru yönetim stratejilerinin bir arada planlanması, arıcılığın hem ekonomik verimliliğini hem de ekosistem üzerindeki olumlu etkilerini güçlendirecektir (Şahinler, Toy ve Alapala Demirhan, 2022).

12. SONUÇ

Arıcılık, sosyal arı türlerinin yönetimine dayalı olarak gıda ve beslenme güvenliğine, yoksulluğun azaltılmasına ve ekonomik kalkınmaya önemli

katkıları sunan bir tarımsal faaliyettir. Sürdürülebilir arıcılık işletmelerinin gelişimi, çiçek kaynağı temininden kovan ürünlerinin toplanmasına kadar uzanan değer zincirinin tüm aşamalarında yenilikçi, sürdürülebilir ve bütüncül bir yaklaşım gerektirir. Bu süreçte çevre, genetik yapı, uygulamalar, eğitim ve yayım hizmetleri temel belirleyiciler arasında yer alır. Çevresel koşullar ve biyoçeşitlilik, arıların beslenme davranışlarını, ürün kalitesini ve üretim verimliliğini doğrudan etkilerken; insan faaliyetleri de nektar ve polen kaynaklarının mevcudiyetini şekillendirebilir. Arıcılığın başarısı büyük ölçüde arı genetiğine bağlı olup, yerli arı türlerinin korunması ve genetik çeşitliliğin sürdürülmesi uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Yerel koşullara uyum sağlamış arı popülasyonları, çevresel değişkenliklere karşı daha dayanıklı ve üretken olduklarından, dışarıdan getirilen türlere kıyasla daha sürdürülebilir bir arıcılık modeli sunarlar (Singh, 2022).

KAYNAKÇA

- Abrol, D. P. (2023). Beekeeping for sustainable economic development of India: challenges and opportunities. *Journal of the Indian Institute of Science*, 103(4), 997-1017.
- Agera, S. I. N. (2011). Role of beekeeping in the conservation of forests. *Global Journal of Agricultural Sciences*, 10(1), 27-32.
- Anderson, S., Khanna, R., Scott, B. ve Patel, A. (2021). AI and IoT for Smart Beekeeping and Pollination Management.
- Armstrong, A., Brown, L., Davies, G., Whyatt, J. D. ve Potts, S. G. (2021). Honeybee pollination benefits could inform solar park business cases, planning decisions and environmental sustainability targets. *Biological Conservation*, 263, 109332.
- Awasthi, A. (2022). Role of Environmental Management in Beekeeping and Bee Welfare. *Beekeeping Industry in Rural Industrialization*, 42.
- Bartlett, A. A. (2012). The meaning of sustainability. *Teachers Clearinghouse for Science and Society Education Newsletter*, 31(1), 1-17.
- Bayav, A. ve Karlı, B. (2024). Arıcılığa Türkiye’den Küresel Bir Bakış.
- Bertoni, D., Pardo, A. ve Paracchini, M. L. (2025). Assessing the environmental, social and economic sustainability of beekeeping activities. *Journal of Apicultural Research*, 64(5), 1275-1293.
- Brodschneider, R. ve Crailsheim, K. (2010). Nutrition and health in honey bees. *Apidologie*, 41(3), 278-294.
- Crane, E. (2009). Beekeeping. In *Encyclopedia of insects* (pp. 66-71). Academic Press.
- Çukur, F., Yücel, B. ve Demirbaş, N. (2016). AB ve Türkiye’de arıcılık faaliyetine yönelik gıda güvenliği uygulamaları: sorunlar ve öneriler. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 22(2), 87-95.)
- Daberkow, S., Korb, P. ve Hoff, F. (2009). Structure of the US beekeeping industry: 1982–2002. *Journal of Economic Entomology*, 102(3), 868-886.
- Dequenue, I., Philippart de Foy, J. M. ve Cani, P. D. (2022). Developing strategies to help bee colony resilience in changing environments. *Animals*, 12(23), 3396.

- Devkota, K., Dhakal, S. C., Thapa, R.P., (2016).10. Economics of Beekeeping as Pollination Management Practices Adopted by Farmers in Chitwan District Of Nepal. *Agriculture & Food Security*, 5(6).
- Doğan, İ. ve Özkök, A. (2019). Türkiye’deki Arıcılık Faaliyetine Hukuki Perspektiften Bakış. *Uludag Bee Journal*, 19(2), 177-187.)
- Durazzo, A., Lucarini, M., Plutino, M., Lucini, L., Aromolo, R., Martinelli, E. ve Pignatti, G. (2021). Bee products: A representation of biodiversity, sustainability, and health. *Life*, 11(9), 970.
- González Pacheco, M. A. ve Barragán Ocaña, A. (2023). Sustainability and innovation in the beekeeping sector: a first approach. In *Digital and sustainable transformations in a post-COVID world: economic, social, and environmental challenges* (pp. 161-189). Cham: Springer International Publishing.
- Gring-Pemble, L. ve Perilla, G. (2021). Sustainable beekeeping, community driven-development, and tri-sector solutions with impact. *Corporate Governance: The International Journal of Business in Society*, 21(2), 359-372.
- Gryshchuk, V., Weber, C., Loo, C. K. ve Wermter, S. (2022). Go ahead and do not forget: Modular lifelong learning from event-based data. *Neurocomputing*, 500, 1063-1074.
- Guiné, R. P., Oliveira, J., Coelho, C., Costa, D. T., Correia, P., Correia, H. E. ve Costa, C. A. (2023). Professional training in beekeeping: A cross-country survey to identify learning opportunities. *Sustainability*, 15(11), 8953.
- Gupta, R. K., Reybroeck, W., De Waele, M. ve Bouters, A. (2014). Bee products: production and processing. In *Beekeeping for poverty alleviation and livelihood security* (pp. 599-636). Springer, Dordrecht
- Heinberg, R. ve Lerch, D. (2010). What is sustainability. *The Post Carbon Reader*, 11, 19.
- Hill, R., Nates-Parra, G., Quezada-Euán, J. J. G., Buchori, D., LeBuhn, G., Maués, M. M., ... & Roué, M. (2019). Biocultural approaches to pollinator conservation. *Nature Sustainability*, 2(3), 214-222.
- Holmes, K., Hughes, M., Mair, J. ve Carlsen, J. (2015). *Events and sustainability* (pp. 1-206). Abingdon: Routledge.

- Huang, K., Ma, X., Song, R., Rong, X. ve Li, Y. (2021). Autonomous cognition development with lifelong learning: A self-organizing and reflecting cognitive network. *Neurocomputing*, 421, 66-83.
- Ismail, W. I. W. (2016). A review on beekeeping in Malaysia.
- Iwasaki, J. M. ve Hogendoorn, K. (2021). How protection of honey bees can help and hinder bee conservation. *Current Opinion in Insect Science*, 46, 112-118.
- Jebarathnam, T. G. (2024). Apiary and agriculture systems for environmental and ecological security. *Trends in Agriculture Science*, Vol. 3 Special Issue 03.
- Kamala, I. M. ve Devanand, I. I. (2021). Honey bee farming for sustainable rural livelihood. In *Advances in sustainable development and management of environmental and natural resources* (pp. Vol1-331). Apple Academic Press.
- Karagözoğlu, Y. ve Kıran, T. R. (2022). Bingöl ili ve yöresine ait arı ürünlerinin biyolojik aktiviteleri. *Journal of Medical Topics and Updates*, 1(3), 170-180.
- Kekeçoğlu, M. (2021). Arıcılık ve Girişimcilik Bilimin Sosyal Sorumluluk Boyutuyla İlgili Örnek Bir Çalışma. *Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi*, 1(2), 93-108.
- Kence, A. (2006). Türkiye balarılarında genetik çeşitlilik ve korunmasının önemi. *Uludağ arıcılık dergisi*, 6(1), 25-32.
- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C. ve Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 274(1608), 303-313.
- Kösoğlu, M., Tunca, R. İ., Yücel, B., Balkanska, R. ve Yıldırım, Z. T. (2021). Arıcılıkta Sürdürülebilirlik Mümkün Mü?. *MAS Journal of Applied Sciences*, 6(3), 610-623.
- Longo, S. (1994). The role of beekeeping within agrarian and natural ecosystems. *Ethology Ecology & Evolution*, 6(sup1), 5-9.
- Minja, G. S. ve Nkumilwa, T. J. (2016). The role of beekeeping on forest conservation and poverty alleviation in Moshi Rural District, Tanzania. *European Scientific Journal*, 12(23).

- Moritz, R. F., Härtel, S. ve Neumann, P. (2005). Global invasions of the western honeybee (*Apis mellifera*) and the consequences for biodiversity. *Ecoscience*, 12(3), 289-301.
- Payne, H. E., Mazer, S. J. ve Seltsmann, K. C. (2024). Native bee habitat restoration: key ecological considerations from recent North American literature. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 12, 1358621.
- Pocol, C. B., Šedík, P., Brumă, I. S., Amuza, A., & Chirsanova, A. (2021). Organic beekeeping practices in Romania: Status and perspectives towards a sustainable development. *Agriculture*, 11(4), 281.
- Přidal, A., Musila, J. ve Svoboda, J. (2023). Condition and honey productivity of honeybee colonies depending on type of supplemental feed for overwintering. *Animals*, 13(3), 323.
- Prodanović, R., Brkić, I., Soleša, K., Ljubojević Pelić, D., Pelić, M., Bursić, V. ve Vapa Tankosić, J. (2024). Beekeeping as a tool for sustainable rural development.
- Purvis, B., Mao, Y. ve Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability science*, 14(3), 681-695.
- Requier, F. (2019). Bee colony health indicators: synthesis and future directions. *CABI Reviews*, (2019), 1-12.
- Rudolph, W. (2010). *Honeybees are Protectors of Humanity and Guardians of the Planet*.
- Samanci, A. E. T., Muluk, N. B., Samanci, T. ve Cingi, C. (2024). *Propolis: Prevention and Healing Effects in Otorhinolaryngology*. Springer Nature.
- Singh, D. P. (2022). Evolution of beehives: from local-style varieties to modern movable-frame hives. *Beekeeping industry in rural industrialization*, 26.
- Şahinler N., Toy N.Ö., Alapala Demirhan S., (2022). Arı Ürünlerinden Olan Bal, Bal Mumu, Polenin Kullanım Alanları. Erdoğan, Y., Yılmaz, Y.Y.(Ed.). *Arı Ve Arıcılık*, 64-86.
- Şengül, Z. (2020). Ege bölgesinde arıcılık yapan işletmelerin sürdürülebilirlik yönünden değerlendirilmesi. TC Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Ekonomisi Anabilim Dalı,(Basılmamış) Doktora Tezi, İzmir.

- TRGM/TEPGE (2025). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tarım Reformu Genel Müdürlüğü Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü, *Arıcılık Ürün Raporu*. Araştırma Yayınları, Yayın No: 409. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge>
- Thakur, M. (2012). Bees as pollinators–Biodiversity and Conservation. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 2(1), 1-7.
- Thiele, L. P. (2024). *Sustainability*. John Wiley & Sons.
- Tiwari, P., Tiwari, J. K., Singh, D. ve Singh, D. (2013). Traditional beekeeping with the Indian honey bee (*Apis cerana* F.) in District Chamoli, Uttarakhand, India. *International Journal of Rural Studies (IJRS)*, 20(2), 1-6.
- Topal, E., Mărgăoan, R., Bay, V., Takma, Ç., Yücel, B., Oskay, D. ve Kösoğlu, M. (2022). The effect of supplementary feeding with different pollens in autumn on colony development under natural environment and in vitro lifespan of honey bees. *Insects*, 13(7), 588.
- Tsuruda, J. M., Chakrabarti, P. ve Sagili, R. R. (2021). Honey bee nutrition. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 37(3), 505-519.
- Ulgezen, Z. N., van Dooremalen, C. ve van Langevelde, F. (2021). Understanding social resilience in honeybee colonies. *Current Research in Insect Science*, 1, 100021.
- Underwood, R. M., Traver, B. E. ve López-Urbe, M. M. (2019). Beekeeping management practices are associated with operation size and beekeepers' philosophy towards in-hive chemicals. *Insects*, 10(1), 10.)
- Vinci, G., Rapa, M. ve Roscioli, F. (2018). Sustainable development in rural areas of Mexico through beekeeping. *International Journal of Science and Engineering Invention*, (August 2018), 1-7.
- Wakhle, D. M. ve Pal, N. (2000). Honey and hive products in India-Present status'. In *Proceedings of the 7th International Conference on Tropical Bees: Management and Diversity and 5th AAA Conference*.
- WCED, Our Common Future, Oxford University Press, Oxford, U.K. (1987).

Yeni, O. (2014). Sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma: bir yazın taraması. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16(3), 181-208.

BÖLÜM 4

APIAİR (KOVAN HAVASI) ANALİZİ VE TERAPÖTİK POTANSİYELİ: YÖNTEMLER, BULGULAR VE UYGULAMALAR

Dr. İbrahim ŞAHİN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986532>

¹ Bingöl Üniversitesi, Arıcılık Araştırma Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bingöl, Türkiye, isahin@bingol.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6803-0121

1. GİRİŞ

Apiterapi, arı ürünlerinin geleneksel ve tamamlayıcı tıp bağlamında sağlık amaçlı kullanımını kapsayan bir disiplin olarak bilinmektedir. Bu alanda, son yıllarda dikkat çeken bir yenilikçi yaklaşım ise “kovan havası inhalasyonu” ya da “Apiair / Hive-Air Therapy”dir. Bu yaklaşım, arı ürünlerinin uçucu bileşenlerini içeren kovan atmosferinin kontrollü biçimde inhalasyonunu esas alır; böylece yalnızca bal ya da propolis değil, kovanın doğal atmosferine özgü karmaşık kimyasal profil de bir terapi aracı haline gelebilir.

Kovan atmosferi, arı fizyolojisi, petek-kovan materyalleri ve koloninin mikrokliması ile etkileşim hâlinindedir; bu durum hem arı koloni sağlığı hem de potansiyel insan kullanımı açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Güncel araştırmalar, kovan havasında geniş bir uçucu bileşik yelpazesi uçucu organik bileşikler (VOC), potansiyel kirleticiler, aromatik bileşikler, gazlar bulunduğunu ve bu bileşenlerin hem arı hem de çevre sağlığı ile ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Bununla beraber, bu alandaki bilimsel veri hâlâ sınırlı olmakla birlikte, teknolojik yenilikler (örneğin portatif ölçüm cihazları) bu profilin daha derinlemesine incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Bu derleme, kovan havasının kimyasal ve biyolojik yapısını, mevcut analiz yöntemlerini ve bu bilgilerin hem arı kolonisinin izlenmesi hem de potansiyel terapötik uygulamalar açısından ne anlama geldiğini araştırmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda, alandaki kritik araştırma boşluklarını ve geleceğe yönelik önerileri de sunmaktadır.

2. Kovan Havasının Kimyasal ve Biyolojik Yapısı

2.1. Uçucu Organik Bileşikler (VOC) ve Diğer Bileşenler

Güncel çalışmalar, kovan havasının son derece zengin ve karmaşık bir kimyasal bileşim taşıdığını doğrulamaktadır. Özellikle bir araştırmada, katı-faz mikroekstraksiyonu (SPME) ve gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS) kullanılarak 56 farklı uçucu bileşik (yağ asitleri, alkol, aldehit, ester, keton, alkane/hidrokarbon, terpen, fenol vb.) tespit edilmiştir (Abd El-Wahed ve ark., 2001). Bu bileşikler arasında kısa zincirli yağ asitleri en baskın grup (örneğin n-kaprilik asit), ayrıca terpenoidler (örneğin β -linalool), aldehitler ve aromatik bileşikler yer almıştır (Abd El-Wahed ve ark., 2001).

Bu profil, yalnızca propolis, balmumu ya da bal gibi arı ürünlerine değil; aynı zamanda canlı arılar, petek, koloninin mikrobiyal topluluğu ve kovan materyali gibi çok sayıda kaynağın katkısı sonucudur. Araştırmacılar, kovan havasının “kovan + arı + ortamın kombine aroma/kimyasal imzası” olduğunu vurgularlar (örneğin yağ asitleri, terpenoidler, ketonlar, hidrokarbonlar) (Abd El-Wahed ve ark., 2001).

Bu bulgular önemlidir. Çünkü kovan havası; doğal aromatik bileşikler yanında; polen, propolis, balmumu, arı feromonları gibi biyolojik olarak aktif molekülleri ve muhtemel çevresel kirleticileri bir matriks içinde barındırmaktadır. Bu nedenle, kovan havası hem biyokimyasal potansiyel hem de ekotoksikolojik risk değerlendirmesi için hedef alınmalıdır.

2.2. Kovan Havası ve Çevresel Kirleticiler, Hava Kalitesi & Biyogösterge Potansiyeli

Son dönemde yayımlanan bir çalışma, portatif “membrane inlet mass spectrometry (MIMS)” cihazı kullanarak kovan havasından VOC, PAH (poliaromatik hidrokarbon), BTEX (benzen, tolüen, ksilen vb.) ve pestisit gibi kirleticilerin tespit edilebileceğini göstermiştir (İliç ve ark., 20024). Bu çalışma, kovan havasını yalnızca arı ürünü kökenli bileşenleri değil, çevresel kirlilik kaynaklı uçucu kimyasalları da yansıtan bir “biyomonitoring matriksi” olarak önermektedir (İliç ve ark., 20024).

Bu yaklaşımın önemi iki yönlüdür: bir yandan arı kolonilerinin sağlığı ve kovan içi çevresel koşullar hakkında veri sağlar; diğer yandan çevre atmosferinde var olan VOC, pestisit, PAH vb. kirleticilerin özellikle polen/nektar toplama ve uçuş yapan arılar aracılığıyla yayılımı ve insan-çevre sağlığı üzerindeki etkileri hakkında dolaylı izleme sunmaktadır. Gerçekten de, yakın tarihli bir çalışma, arıların polen ve kendilerinin analiz edilmesiyle per ve polifloroalkil maddeler (PFAS) gibi kalıcı çevresel kirleticileri tespit etmiş; bu da arılar ve kovan havasının çevresel sağlık açısından nasıl kullanılabileceğini göstermiştir (Müller ve ark., 2025).

Bu literatür, kovan havasının salt “doğal arı ürünü atmosfere” değil, aynı zamanda “çevresel hava kalitesi + kovan + arı” üçgeninde sensör/analiz matriksi olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle çevresel kirlilik, pestisit kullanımı, endüstriyel yayılım gibi konularda

arı kolonilerinin ve kovan havasının izleme ve erken uyarı sistemi olarak kullanılma potansiyelini gündeme getirmektedir.

2.3. Mikroklima, CO₂, Sıcaklık ve Koloni Meteorolojisi

Kovan havasının bileşenleri sadece kimyasal VOC'lerle sınırlı değildir; gaz bileşenleri, özellikle CO₂, ve mikroklima parametreleri (sıcaklık, nem, havalandırma) de kovan içi atmosferin önemli parçalarıdır. Son yapılan çalışmalar, kovan içi CO₂ ve sıcaklık düzeylerinin koloni durumu, havalandırma, sezon ve gün-içi ritimlere göre değiştiğini göstermektedir. Örneğin, bir çalışmada CO₂ konsantrasyonu saniyelik aralıklarla izlenmiş, kovan ventilasyon değişimlerine rağmen koloninin CO₂ ve sıcaklık dengesini koruduğunu rapor edilmiştir (Meikle ve ark., 2022).

Diğer yandan, farklı bir araştırma kovan içi sıcaklık ve CO₂ konsantrasyonunun 24 saatlik ritimler gösterdiği, bu ritimlerin koloni büyüklüğü, çevresel koşullar ve kovan yönetimi ile ilişkili olduğu bildirmiştir (Meikle ve ark., 2025). Bu bulgular, kovan havasının statik değil, dinamik bir atmosfer olduğunu; dolayısıyla hem arı sağlığı hem de inhalasyon terapisi düşünüldüğünde bu mikroklima değişkenlerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

3. Kovan Havası Analiz Yöntemleri ve Teknik Değerlendirme

3.1. Gaz Sensörleri ile Kovan Havası Ölçümü

Bir kovanın iç havasının kimyasal ve fiziksel durumu hakkında veri edinmek için, sabit ya da portatif gaz sensörleri kullanılabilir. Örneğin yapılan bir çalışma da, kovan havasının gaz sensörleriyle izlenmesi üzerine metodolojik ve teknik kritik noktaları tartışılmıştır. Bu çalışmada, sensör cihazlarının çalışma modu, örnekleme yöntemi (diffüz ya da dinamik), örnekleme noktası seçimi, örnek hazırlama ve gaz iletim sistemleri gibi konular ele alınmıştır (Szcurek, ve Maciejewska, 2022).

Çalışma, sensörler aracılığıyla kovan içi hava bileşenlerinin izlenmesinin koloni durumu, sağlık, hava bileşimi gibi göstergeler açısından pratik ve yenilikçi bir yöntem olduğunu vurgulamaktadır (Szcurek, ve Maciejewska, 2022).

Bununla birlikte çalışmada, sensör temelli ölçümlerde karşılaşılan yaygın sorunlar: sensör seçimi ve kalibrasyonu, gaz numunesinin temsili olması, su buharı / nem / toz gibi interferansların etkisi, ölçüm cihazlarının

enerji tüketimi ve saha koşullarına uyum gibi teknik zorluklar olarak bildirilmiştir (Szcurek, ve Maciejewska, 2022).

Dolayısıyla, sensörlerle kovan havası izleme laboratuvar dışı, saha tipi uygulamalar için cazip olsa da sonuçların güvenilirliği için dikkatli protokoller, kalite kontrol ve düzenli bakım gerektirmektedir.

3.2. Katı-Faz Mikroekstraksiyonu (SPME) + GC–MS ile VOC Profil Analizi

Kimyasal bileşenlerin tanımlanması ve kantitatif analiz için hâlâ en güvenilir yöntemlerden biri, uçucu ve yarı uçucu bileşikler toplamak ve analiz etmek için katı-faz mikroekstraksiyonu (SPME) ile gaz kromatografisi–kütle spektrometrisi (GC–MS) kombinasyonudur. Bu yaklaşımla, farklı kovan bileşenlerinden (arı, balmumu, bal, propolis vs.) ve kovan havasından uçucu bileşikler izole edilip analiz edilebilmektedir. Yapılan bir çalışmada, kovan havası VOC profilini bu yöntemle belirlemiş ve moleküler bileşen dağılımını rapor edilmiştir (Abd El-Wahed ve ark., 2001).

Bu çalışmada, kovan havasının yalnızca arı ürünlerinden değil, kovanın komple biyokimyasal ve fiziksel ekolojisinden kaynaklanan çok sayıda bileşeni içerdiğini göstermektedir; örneğin yağ asitleri, alkol, aldehit, ester, keton, hidrokarbon ve terpenoidler gibi geniş bir bileşik yelpazesi tespit edilmiştir (Abd El-Wahed ve ark., 2001).

SPME-GC–MS, kimyasal analizin altın standardı olarak kabul edilebilir; ancak bu yöntem genellikle laboratuvar ortamında uygulamıştır ve saha çalışmaları için pratik olmayabilir. Örnek toplama, gazın kovan içinden çekilmesi, numunenin korunması, numune taşınması gibi işlemler, pratik sınırlılıklar doğurabilmektedir.

3.3. Mevcut Literatürün Sınırlılığı ve Teknik Zorluklar

- Sensör temelli yöntemler hâlâ deneysel düzeydedir; sensörlerin seçimi, kalibrasyonu, drift (zamanla duyarlılık kaybı), interferans (nem, toz, su buharı vs.) gibi kriterler, sonuçların güvenilirliğini etkileyebilmektedir.
- SPME-GC–MS gibi laboratuvar analizleri, kimyasal profil sunmak için iyi olsa da saha ölçeğinde, gerçek zamanlı ve yaygın uygulama için pratik değildir.

- Güncel literatürde, kovan havası örnekleme ve analizi üzerine yapılmış çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle “kovan havası inhalasyonu (Apiair)” gibi terapötik uygulamaların biyokimyasal alt yapısı ve güvenilirliği bilimsel olarak henüz yeterince sağlam değildir.
- Farklı kovan tipleri, coğrafi koşullar, mevsim, koloni durumu gibi değişkenler, kovan havasının bileşimini önemli ölçüde etkileyebilir; bu da genellenebilirlik ve standardizasyon açısından büyük bir sorun oluşturmaktadır.

4. SONUÇ

Yukarıdaki bulgular, kovan havasının yalnızca arı ürünlerine özgü uçucu bileşikleri değil; mikroklima, koloni fizyolojisi ve çevresel kirleticileri içeren karmaşık bir atmosfer olduğunu net şekilde ortaya koymaktadır. Bu da “kovan havası inhalasyonu (Apiair)” fikrini hem ilginç hem de karmaşık kılmaktadır.

- Bu profil, doğal arı ürünlerinin ötesine geçerek “kovan + arı + çevre” üçgenini bir bütün olarak temsil etmektedir. Bu nedenle, eğer Apiair terapisi düşünülüyorsa sadece propolis / bal aromasından ziyade bu bütünsel bileşen yapısının dikkate alınması gereklidir.
- Aynı zamanda, kovan havasının uçucu bileşenler ve çevresel kirleticiler (PAH, pestisit, BTEX vb.) içerebilme potansiyeli, inhalasyon terapilerinde güvenlik açısından ciddi değerlendirme gerektirmektedir. Bu bağlamda, “temiz” kovan havası elde etmek ya da en azından kirleticilerden arındırmak önemli bir ön koşuldur.
- Mikroklima (CO₂, sıcaklık, nem, havalandırma) parametrelerinin koloni sağlığı ve kimyasal profil üzerinde önemli etkisi olduğunu gösteren veriler, inhalasyon seanslarında bu ortamların standardize edilmesini zorunlu kılmaktadır.
- Sensör-temelli izleme (gaz sensörleri, “elektronik koku-burun / e-nose” benzeri cihazlar) ve laboratuvar analizi (SPME-GC-MS) her ikisi de kovan havası araştırmaları için önemli araçlardır.
- Ancak henüz bu yöntemler geniş çaplı uygulama, terapötik inhalasyon ya da rutin koloni izleme protokolleri için standartlaşmamıştır.

- Eğer “kovan havası terapisi / Apiair” gibi yaklaşımlar düşünülüyorsa kimyasal profil, güvenlik, dozaj, inhalasyon şartları gibi çok sayıda değişkenin dikkatli biçimde ele alınması gerekmektedir.
- Araştırmacılar sensör cihazı üreticileri, arıcılık bilim insanları, toksikologlar ve klinik araştırmacılar birlikte çalışmalı; kovan havası analizi, güvenlik değerlendirmesi ve potansiyel terapötik uygulamalar için çok disiplinli bir yol haritası oluşturulmalıdır.

Bu nedenlerle kovan havasının terapötik potansiyeli olsa da mevcut bilimsel veri hâlâ başlangıç aşamasındadır. Kovan havasının kimyasal profili ve güvenlik analizi yapılmış olsa da, insan klinik uygulamaları için yeterli veri bulunmamaktadır. Dolayısıyla Apiair’in bir terapötik yöntem olarak önerilmesi hâlâ öncül/deneysel düzeydedir.

KAYNAKLAR

- Abd El-Wahed, A. A., Farag, M. A., Eraqi, W. A., Mersal, G. A., Zhao, C., Khalifa, S. A., & El-Seedi, H. R. (2021). Unravelling the beehive air volatiles profile as analysed via solid-phase microextraction (SPME) and chemometrics. *Journal of King Saud University-Science*, 33(5), 101449.
- Ilić, D., Brkić, B., & Sekulić, M. T. (2024). Biomonitoring: Developing a beehive air volatiles profile as an indicator of environmental contamination using a sustainable in-field technique. *Sustainability*, 16(5), 1713.
- Müller, V., Feldmann, J., Prieler, E., & Brodschneider, R. (2025). PFAS in the Buzz: Seasonal Biomonitoring with Honey bees (*Apis mellifera*) and Bee-collected Pollen. *Environmental Pollution*, 126750.
- Meikle, W. G., Barg, A., & Weiss, M. (2022). Honey bee colonies maintain CO₂ and temperature regimes in spite of change in hive ventilation characteristics. *Apidologie*, 53(5), 51.
- Meikle, W. G., & Weiss, M. (2025). Temperature and CO₂ concentration in honey bee hives exhibit circadian rhythms. *Scientific Reports*, 15(1), 22042.
- Szczurek, A., & Maciejewska, M. (2021). Beehive air sampling and sensing device operation in apicultural applications—methodological and technical aspects. *Sensors*, 21(12), 4019.

BÖLÜM 5

ORGANİK ARICILIKTA ARI BESLEME: STANDARTLAR, DOĞAL GİRDİLER VE KOLONİ SAĞLIĞI

Dr. Nimetullah KORKUT¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986577>

¹ Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Arı ve Arı Ürünleri Bölümü, 12000, Bingöl, Türkiye. Orcid ID: 0000-0002-6016-0028
Sorumlu yazar: nkorkut@bingol.edu.tr

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir tarım, ekolojik döngülerle uyumlu üretimi esas alarak çevresel etkilerin azaltılmasını ve biyolojik çeşitliliğin korunmasını hedefleyen bütüncül bir yaklaşımdır. Bu çerçevede arıcılık, hem sunduğu ekosistem hizmetleri hem de sahip olduğu ekonomik değer nedeniyle stratejik bir konuma sahiptir. Tarımsal tozlaşmanın başlıca aktörleri olan bal arıları (*Apis mellifera*), küresel gıda üretiminin sürekliliği açısından kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla koloni sağlığında meydana gelen bozulmalar yalnızca arıcılık sektörünü değil, aynı zamanda bitkisel üretim sistemlerini ve ekosistem dengesini de zincirleme biçimde etkilemektedir (Underwood et al., 2023).

Günümüzde pestisit kullanımı, monofloral üretim sistemleri ve iklim değişikliğine bağlı flora kayıpları; koloni düzeyinde besin yetersizliği, bağışıklık zayıflaması ve patojen duyarlılığının artması gibi sorunları derinleştirmektedir (Branchiccela et al., 2019; Castelli et al., 2020). Bu nedenle arı besleme stratejileri sürdürülebilir arıcılığın temel bileşenlerinden biri hâline gelirken, özellikle organik arıcılık sistemlerinde daha da kritik bir rol kazanmıştır.

Organik üretim standartları (EU Organic, USDA NOP, IFOAM) sentetik girdilerin kullanımını sınırlandırmakta; koloni beslemesinde yalnızca organik sertifikalı ya da doğal kaynaklı girdilerin—bal, polen, organik sakaroz, invert şuruplar, bitkisel özler ve probiyotikler—kullanılmasına izin vermektedir (Underwood et al., 2023). Bu yaklaşım, arı sağlığını yalnızca koloni ölçeğinde değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve gıda güvenliği bağlamında ele alan daha geniş bir perspektife işaret eder.

Son yirmi yılda yürütülen araştırmalar, doğal ve organik girdilerin koloni performansı üzerindeki olumlu etkilerini açık biçimde ortaya koymuştur. Doğal polenle beslenen kolonilerde bağışıklık tepkisinin güçlendiği, yavru gelişiminin desteklendiği ve Nosema yükünün belirgin şekilde azaldığı bildirilmiştir (Annoscia et al., 2017; DeGrandi-Hoffman et al., 2015; Watkins de Jong et al., 2019). Benzer şekilde bal ile beslenen kolonilerde Nosema prevalansının düşmesi, detoksifikasyon ve bağışıklıkla ilişkili genlerin ifade düzeylerinin artması, balın biyolojik açıdan işlevsel bir besin kaynağı olduğunu göstermektedir (Papežíková et al., 2019; Mao et al., 2013).

Ayrıca probiyotikler ve bitkisel fenolik bileşikler gibi yenilikçi doğal katkıların da koloni sağlığı üzerinde umut verici etkiler sağladığı bilinmektedir.

Örneğin *Lactobacillus johnsonii* tarafından üretilen metabolitlerin *Nosema* spor yükünü yarıya indirdiği ve koloni popülasyonunu artırdığı; Protexin® ile naringenin kombinasyonunun ise *Nosema* sporlarında %89 oranında azalma sağladığı rapor edilmiştir (Maggi et al., 2013; Klassen et al., 2021).

Bununla birlikte mevcut literatürün önemli bir bölümü, “organik uyumlu” koşullarda yürütülmüş olsa da tam sertifikalı organik üretim ortamlarını tam olarak yansıtmamaktadır. Örneğin Underwood ve arkadaşlarının (2023) uzun süreli deneyleri, organik yönetim altında bulunan kolonilerin sağlık ve üretkenlik düzeylerinin konvansiyonel sistemlerle büyük ölçüde benzer olduğunu göstermektedir; ancak sahada sertifikalı organik koşullarda yürütülen besleme çalışmalarının sayısı hâlâ sınırlıdır.

Bu sınırlılık, organik arıcılıkta besleme uygulamalarının sürdürülebilir tarım politikalarına entegrasyonunda önemli bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir. Bu bölümde, 2000 sonrası literatür doğrultusunda organik arıcılıkta izin verilen doğal girdilerin koloni sağlığı üzerindeki etkileri, sürdürülebilir tarım ilkeleri ve yenilikçi biyoteknolojik yaklaşımlar çerçevesinde ele alınacaktır.

2. ORGANİK ARICILIKTA BESLEME STANDARTLARI VE İLKELERİ

Organik arıcılıkta besleme uygulamaları, yalnızca koloni sağlığını desteklemeye yönelik teknik bir müdahale olarak değil, aynı zamanda ekosistem bütünlüğünü koruyan sürdürülebilir bir yönetim aracı olarak ele alınır. Bu nedenle besleme stratejileri, organik üretimin temel ilkeleri arasında yer alan “doğallık, kapalı döngü” ve “minimum dış girdi kullanımı” prensipleriyle doğrudan ilişkilidir (Migliorini & Wezel, 2017) (bkz. Şekil 1).



Şekil 1. Organik üretim standartlarının temel ilkeleri: doğallık, ekolojik kapalı döngü ve minimum dış girdi kullanımı.

2.1. Mevzuat Çerçevesi: AB, ABD ve IFOAM Sistemleri

Organik arıcılığa ilişkin uluslararası standartlar, temelde üç ana düzenleyici çerçevede şekillenmektedir:

- Avrupa Birliği'nin 2018/848 sayılı Yönetmeliği,
- ABD Tarım Bakanlığı'nın (USDA) National Organic Program (NOP) kapsamında yer alan düzenlemeler,
- Uluslararası Organik Tarım Hareketleri Federasyonu'nun (IFOAM) yayınladığı normlar.

Bu üç sistem, ekolojik sürdürülebilirliği destekleme açısından ortak amaçlar taşısa da, özellikle besleme uygulamalarına ilişkin hükümler bakımından belirgin farklılıklar içermektedir (Migliorini & Wezel, 2017).

2.2. Avrupa Birliği: Yönetmelik (EU) 2018/848

Avrupa Birliği'nin organik üretime ilişkin temel mevzuatını oluşturan Yönetmelik (Regulation) 2018/848 ve onu tamamlayan Uygulama Yönetmeliği (Implementing Regulation) 2020/464, arı beslemesini yalnızca “doğal kaynakların geçici yetersizliği durumunda” istisnai olarak izin verilen bir uygulama şeklinde tanımlamaktadır (European Commission, 2018).

Bu düzenlemelere göre:

- İzin verilen yemler, yalnızca organik bal, organik şeker veya organik şeker şurubu ile sınırlıdır.
- Ek besleme, yalnızca koloni yaşamı tehdit altında olduğunda—örneğin olumsuz iklim koşulları veya doğal nektar-polen azlığı gibi durumlarda—uygulanabilir.

- Kış öncesinde, kovanlarda yeterli düzeyde bal ve polen stoğunun bırakılması zorunludur.
- Kovan materyalleri, balmumu ve çevresel konumlandırma dahil tüm üretim bileşenlerinin organik veya doğal kaynaklı olması gerekmektedir.

Buna ek olarak, kovanların çevresindeki yaklaşık 3 km’lik yayılım alanında (foraging radius) arıların ağırlıklı olarak organik veya çevresel etkisi düşük bitki örtüsüne erişmesi beklenir. Bu koşul, organik beslenmenin yalnızca kovan içi girdilere değil, aynı zamanda arının doğal beslenme ortamına da uyumlu olmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla AB düzenlemesi, hem besleme materyalinin organik kökenini hem de çevresel bütünlüğü birlikte gözetken en katı yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Migliorini & Wezel, 2017).

2.3. ABD: Ulusal Organik Programı (USDA National Organic Program-NOP)

ABD’de organik arıcılığa ilişkin federal düzeyde ayrıntılı bir nihai düzenleme bulunmamakla birlikte, uygulama USDA National Organic Program (NOP) kapsamında yürütülmektedir. USDA Ulusal Organik Programı’nın (NOP) 7 CFR 205.105 ve 205.239. maddeleri, organik üretimde izinli ve yasaklı girdileri genel olarak belirlerken, arıcılığa özel ilkeler Ulusal Organik Standartlar Kurulu’nun (National Organic Standards Board, NOSB) 2010 tarihli önerisinde (Recommendation on Apiculture) tanımlanmıştır (USDA, 2025).

Bu çerçevede:

- İzin verilen yemler arasında organik bal, organik şeker şurubu ve belirli polen ikamesi/takviyesi türleri yer alır (Federal Yönetmelikler Kodu’nun 7. Başlık, 205.603. maddesinde tanımlanmıştır).
- Ek besleme, yalnızca yetersiz mera koşulları, kışlama veya acil durumlarda mümkündür.
- Hasattan önceki 15 gün içinde koloniye şeker şurubu verilmesi yasaktır.
- Kovanlar yeterli doğal bal ve polen stokuyla kışa girmelidir.
- Ekolojik sürdürülebilirlik açısından, arıların uçuş yarıçapında (yaklaşık 3 km forage zone ve 3,4 km surveillance zone) pestisit veya GDO riski düşük alanlar tercih edilmelidir.

USDA sisteminin güçlü yönü, pratik esnekliğidir; ancak organik beslemede “holistik sürdürülebilirlik vizyonu” yerine “uyum ve yasaklar listesi” esasına dayalı daha teknik bir yaklaşım benimsenmiştir (Migliorini & Wezel, 2017).

2.4. IFOAM Organik Tarım Hareketleri Uluslararası Standartları

IFOAM Normları (Version 2014, ed. 2019), organik arıcılığı bir “yaşayan ekosistem yönetimi” olarak ele alır (IFOAM, 2019). Bu standartlar, AB ve ABD sistemlerine kıyasla en geniş ekolojik kapsam ve en yüksek etik/sosyal sürdürülebilirlik vurgusuna sahiptir.

Başlıca ilkeler:

- Arılar çeşitli doğal flora üzerinden beslenmeli; ek besleme yalnızca geçici kıtlık veya koloni yaşamını koruma durumlarında yapılmalıdır.
- Kullanılan tüm yemler organik kaynaklı olmalı ve sınırlı süreyle verilmelidir.
- Kovanların yerleştirileceği alanlar, organik yönetilen veya doğal alanlar olmalı; çevrede kirlilik veya konvansiyonel tarım riski minimum düzeyde tutulmalıdır.
- Yönetim, biyoçeşitlilik, yerel ekosistem sağlığı ve hayvan refahı ilkeleriyle uyumlu olmalıdır.

IFOAM, AB ve USDA sistemlerinden farklı olarak “ilke temelli” bir yaklaşıma sahiptir; yani ülkeler veya sertifikasyon kurumları, bu normları kendi yerel koşullarına uyarlayabilir. Böylece, arıcılıkta bölgesel sürdürülebilirlik modellerine olanak tanır (Migliorini & Wezel, 2017).

2.5. Karşılaştırmalı Değerlendirme

Genel olarak, AB ve IFOAM sistemleri, ek besleme konusunda katı ve çevresel bütünlük odaklı, USDA sistemi ise uyum ve denetim kolaylığı üzerine kuruludur. IFOAM’ın yaklaşımı, sürdürülebilir arıcılığı yalnızca çevresel değil, etik ve sosyo-ekonomik bir boyutla tanımlar (Migliorini & Wezel, 2017).

Underwood ve arkadaşlarının (2023) uzun dönemli alan deneyi de bu farklılıkları dolaylı biçimde destekler: organik yönetim altında beslenen koloniler, konvansiyonel sistemlerle eşdeğer bal verimi ve sağkalım oranlarına ulaşmıştır. Bu durum, katı organik standartların koloni sağlığına olumsuz bir

etkisi olmadığını, aksine sürdürülebilir üretimle uyumlu olduğunu göstermektedir (Bkz. Tablo 1).

Tablo 1. EU, USDA ve IFOAM organik arıcılık standartlarının karşılaştırılması

Özellik	EU Regulation 2018/848	USDA NOP (7 CFR 205. Bölüm)	IFOAM Standards
İzinli Yem Türleri	Organik bal, organik şeker, organik şurup	Organik bal, şeker şurubu, onaylı protein/polen ikameleri	Organik kaynaklı tüm doğal yemler
Ek Besleme Koşulları	Yalnızca doğal kaynakların yetersizliği durumunda	Kıtlık, kışlama, acil durum; 15 gün hasat öncesi yasağı	Sadece geçici kıtlıkta; sınırlı süre
Ekolojik İlkeler	Ekolojik süreçlerin korunması, 3 km çevre sınırı	Doğal kaynak yönetimi, pestisit risk yönetimi	Holistik, etik ve ekosistem temelli yaklaşım
Esneklik Düzeyi	Katı, detaylı düzenlenmiş	Orta – teknik uyum odaklı	Yüksek – yerel uyarlama temelli
Sürdürülebilirlik Vurgusu	Ekolojik bütünlük	Teknik uygunluk	Sistemik sürdürülebilirlik ve etik boyut

2.6. Sürdürülebilir Arıcılık Açısından Değerlendirme

Üç sistemin ortak paydası, dış girdilerin azaltılması ve doğal kaynakların önceliklendirilmesidir. Bununla birlikte, sürdürülebilir arıcılık açısından en güçlü entegrasyon, IFOAM'ın sistemik sürdürülebilirlik vizyonu ile AB'nin detaylı çevre koruma ilkelerinin birleşiminde görülmektedir. ABD sistemi, uygulama kolaylığı ve piyasa erişimi açısından avantajlı olsa da sürdürülebilirlik boyutunda daha teknik ve dar bir çerçeveye sunar.

Bu farklar, yalnızca düzenleyici çeşitlilik değil; aynı zamanda sürdürülebilir tarım politikalarının değer önceliklerini de yansıtır:

- AB ve IFOAM ekosistem temelli yönetimi,
- ABD ise sertifikasyon odaklı uyumu önceliklendirir.

3. DOĞAL VE YAPAY DİYETLERİN KARŞILAŞTIRMALI ETKİLERİ

Organik arıcılığın temel prensiplerinden biri, kolonilerin doğal ekosistem koşullarına uygun biçimde beslenmesini sağlamaktır. Bu nedenle doğal kaynaklı diyetler (bal, polen, bitkisel özler) ile yapay ya da ikame diyetlerin (şeker şurupları, protein takviyeleri) koloni sağlığı üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması hem bilimsel hem de sürdürülebilirlik açısından kritik bir araştırma alanı haline gelmiştir (Underwood et al., 2023).

3.1. Polen ve Protein İkameleri

Bal arılarında polen, temel protein ve lipit kaynağı olarak larva gelişimi, bağışıklık sistemi ve mikrobiyota dengesinin korunmasında merkezi bir role sahiptir (Ricigliano et al., 2018; Castelli et al., 2020). Doğal polen ile beslenen kolonilerde hem bağışıklık genlerinin aktivitesi hem de koloninin genel dayanıklılığı anlamlı ölçüde artarken, yapay protein ikameleri çoğunlukla bu biyolojik bütünlüğü tam olarak sağlayamamaktadır (DeGrandi-Hoffman et al., 2015; Ricigliano et al., 2022; Watkins de Jong et al., 2019).

Örneğin Annoscia ve arkadaşları (2017), Varroa enfestasyonu altındaki arılarda doğal polenle beslemenin viral yükü %50'den fazla azalttığını, yapay şeker diyetiyle beslenen kolonilerde ise viral titrenin iki katına çıktığını raporlamıştır. Benzer şekilde, Watkins de Jong ve arkadaşları (2019), pollen–protein substitute karşılaştırmasında *Nosema ceranae* spor yüklerinin doğal polen grubunda 110.000/arı, ticari protein ikamelerinde ise 960.000/arı düzeyine ulaştığını bildirmiştir. Bu fark, polen ikamelerinin besin içeriği ve sindirilebilirliğinin arı fizyolojisiyle tam uyumlu olmadığını göstermektedir (Bkz. Şekil 2).



Şekil 2. Doğal polen ve yapay ikame besinlerin nosema spor yüküne etkisi

Bununla birlikte, ikame yemlerin tamamen olumsuz olduğu söylenemez. Ricigliano ve arkadaşları (2022) ile Kim ve arkadaşları (2024), aminoasit oranları dengelenmiş (özellikle lüsin oranı optimize edilmiş) diyetlerin koloni büyüklüğü ve verimlilik üzerinde olumlu etkiler gösterebileceğini vurgulamıştır. Bu sonuçlar, organik koşullarda geliştirilmiş, iyi formüle edilmiş polen ikamelerinin, kıtlık dönemlerinde yararlı olabileceğini göstermektedir (Noordyke & Ellis, 2021; Ansaloni et al., 2025).

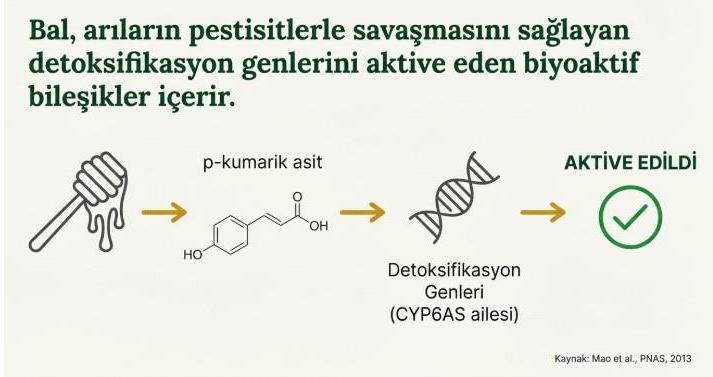
Dolayısıyla, sürdürülebilir besleme stratejileri açısından en etkili yaklaşım, doğal polen temelli ancak formülasyon açısından optimize edilmiş karışımların (örneğin %10 polen + %90 protein ikamesi) kullanılmasıdır. Watkins de Jong ve arkadaşlarının (2019) bulguları, bu tür “karma diyetlerin” patojen yükünü düşürmede ara etki yarattığını göstermektedir.

3.2. Bal, Şeker ve İnvert Şuruplar

Karbonhidrat beslemesinde de benzer bir ayrım gözlemlenir. Bal, yalnızca enerji kaynağı olarak değil, aynı zamanda fenolik bileşikler ve antioksidanlar içeren biyolojik bir kompleks olarak bağışıklık ve detoksifikasyon süreçlerini destekler (Mao et al., 2013). Buna karşın, yapay şeker şurupları (sakaroz, invert veya buğday nişastası bazlı) bu biyoaktif bileşenlerden yoksundur.

Papežíková ve arkadaşları (2019), *Nosema ceranae* prevalansının bal ile beslenen kolonilerde en düşük, buğday nişastası şurubu ile beslenenlerde ise en yüksek düzeyde olduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada bal ile beslenen kolonilerde arıların “fitness” göstergeleri (aktivite, ömür, bağışıklık yanıtı) belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur. Mao ve arkadaşları (2013) ise balda

doğal olarak bulunan p-kumarik asit bileşiğinin, arılarda detoksifikasyon genlerinin (ör. *CYP6AS* ailesi) ifadesini anlamlı şekilde artırdığını ve pestisit metabolizmasını hızlandırdığını bildirmiştir.



Şekil 3. Baldaki doğal fenolik bileşiklerden biri olan p-kumarik asidin, arılarda pestisit metabolizmasında rol alan detoksifikasyon genlerini (ör. *CYP6AS* ailesi) aktive ederek bağışıklık ve dayanıklılık kapasitesini artırdığı mekanizma şematik olarak gösterilmektedir (Mao et al., 2013).

Přidal ve arkadaşlarının (2023) uzun dönemli saha deneyinde, organik sakaroz ve invert şurup kullanımında kışlatma başarısı ve verim açısından anlamlı fark görülmemiştir. Ancak invert şurupların maliyetinin yüksek olması, organik üretim sistemlerinde bal veya basit sakaroz kullanımını daha sürdürülebilir hale getirmektedir.

Sürdürülebilirlik Perspektifinden Yorum

Doğal diyetlerin üstünlüğü yalnızca koloni ölçeğinde değil, tarımsal ekosistem ölçeğinde de sürdürülebilirlik açısından belirleyicidir.

- Doğal polen çeşitliliği, floristik zenginliği korur ve arı-bitki karşılıklı bağımlılığını güçlendirir.
- Balın yeniden kullanımı ve yerel kaynaklı besleme, karbon ayak izini düşürür.
- Fitobiyotik ve probiyotik takviyeler, kimyasal ilaç bağımlılığını azaltır ve ekosistem temelli hastalık yönetimi sağlar.

Dolayısıyla organik arıcılıkta önerilen yaklaşım, yalnızca “doğal besin kullanımı” değil, aynı zamanda besleme uygulamasının ekolojik işlevselliğe katkı sağlamasıdır.

4. ORGANİK ARICILIKTA YENİ BİYOTEKNOLOJİK YAKLAŞIMLAR

Organik arıcılık sistemlerinde, kimyasal tedavilerin kısıtlanması ve sentetik girdilerin yasaklanması, koloni sağlığını koruyacak biyolojik temelli yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Son on yılda yapılan araştırmalar, bitkisel ekstreler, doğal fitokimyasallar ve probiyotik mikroorganizmaların, bağışıklık modülasyonu, patojen baskılanması ve bağırsak mikrobiyota dengesinin güçlendirilmesi açısından umut verici sonuçlar verdiğini göstermektedir (Klassen et al., 2021; Maggi et al., 2013; Hsu et al., 2021; Mao et al., 2013; Gawali & Waykar, 2025).

4.1. Fitokimyasalların Bağışıklık ve Detoksifikasyon Üzerindeki Rolü

Bal ve polen gibi doğal arı besinlerinde, arı sağlığına doğrudan etki eden çok sayıda biyoaktif fenolik bileşik bulunur. Bu bileşikler arasında özellikle p-kumarik asit, naringenin, quercetin ve moringin öne çıkmaktadır (Mao et al., 2013; Gawali & Waykar, 2025).

Mao ve arkadaşlarının (2013) çalışması, p-kumarik asidin arıların detoksifikasyon ve bağışıklık genlerini (örneğin *CYP6AS* ailesi, *HSP70*, *immune effector* genleri) belirgin biçimde aktive ettiğini ortaya koymuştur. Bu molekül, pestisit metabolizmasında görev alan sitokrom P450 enzimlerinin sentezini artırarak arıların pestisit duyarlılığını düşürür. Bu bulgular, doğal bitki fenollerinin “besin takviyesi” olmanın ötesinde, biyolojik savunma düzenleyicileri olarak işlev gördüğünü göstermektedir.

Benzer şekilde, Gawali ve Waykar (2025) tarafından yapılan bir saha çalışmasında, koriander, moringa, tulsi ve amla gibi bitkisel bileşenlerle zenginleştirilmiş polen ikameleri, *Nosema* spor yükünü önemli ölçüde azaltmıştır. Bu sonuç, organik besleme stratejilerinde fitobiyotik bileşiklerin entegre edilmesinin patojen baskısı açısından etkili bir yöntem olabileceğini desteklemektedir.

Naringenin, özellikle antioksidan ve antiviral etkisi nedeniyle öne çıkmaktadır. Klassen ve arkadaşları (2021), naringenin ile kombine edilmiş Protexin® probiyotik karışımının, *Nosema* spor yükünü %89 oranında azalttığını ve koloni popülasyonunu önemli ölçüde artırdığını bildirmiştir. Bu

etki, flavonoidlerin hem doğrudan parazitik gelişmeyi baskılaması hem de konak bağışıklığını aktive etmesiyle ilişkilendirilmiştir.

4.2. Probiyotik ve Fermente Yem Uygulamaları

Organik arıcılıkta probiyotikler, özellikle laktik asit bakterileri (LAB) ve maya kökenli simbiyontlar, koloninin bağırsak ekolojisini destekleyen doğal ajanlar olarak değerlendirilmektedir. Maggi ve arkadaşları (2013), *Lactobacillus johnsonii* CRL1647 suşunun ürettiği organik asit metabolitlerinin, *Nosema* enfeksiyonunu 5.52×10^6 spordan 2.61×10^6 spora düşürdüğünü ve erişkin arıların yağ cismi (fat body) kütlesini %132 artırdığını göstermiştir. Bu etki, metabolik rezervlerin güçlenmesi ve bağışıklık kapasitesinin artması ile ilişkilendirilmiştir.

Hsu, Wang ve Wu (2021), *Aureobasidium melanogenum* CK-CsC adlı potansiyel bir mantar probiyotiğin, arı bağırsağında mikrobiyota kompozisyonunu düzenlediğini ve bağışıklık genlerinin ifadesini artırdığını rapor etmiştir. Bu bulgu, probiyotik mantarların da organik arıcılıkta kullanılabilecek yeni bir besleme kategorisi oluşturabileceğini göstermektedir.

Klassen ve arkadaşlarının (2021) çalışması, prebiyotik (chitosan, eugenol) ve probiyotik (*Enterococcus faecium*) kombinasyonlarının *Nosema* kontrolünde farklı etkinlik düzeylerine sahip olduğunu göstermiştir. Bu araştırma, yalnızca belirli kombinasyonların etkili olduğunu, örneğin chitosan'ın etkisiz kaldığını ortaya koyarak, organik sistemlerde kullanılacak biyoteknolojik katkıların spesifik formülasyonlara dayanması gerektiğini vurgulamıştır.

4.3. Fitobiyotik–Probiyotik Etkileşimleri ve Koloni Performansı

Fitokimyasallar ile probiyotiklerin sinerjik etkileri, arı kolonilerinde hem patojen yükünü azaltma hem de besin dönüşüm verimliliğini artırma potansiyeli taşımaktadır. Klassen et al. (2021) çalışmasında, Protexin® + naringenin kombinasyonu *Nosema* sporlarını azaltırken, koloni popülasyonunu da artırmıştır. Maggi et al. (2013) çalışmasında, laktik asit bakterisi metabolitleri ile beslenen kolonilerde yalnızca *Nosema* azalmamış, aynı zamanda erişkin arı popülasyonu %39,5 oranında artmıştır.



Şekil 4. *Lactobacillus* ve Naringenin’in koloni sağlığı üzerindeki etkileri

Bu sonuçlar, doğal biyoaktiflerin bağışıklığı güçlendirmekle kalmayıp, koloni düzeyinde verim ve kışlama başarısını da desteklediğini göstermektedir. Ayrıca Mao et al. (2013) tarafından gösterilen gen düzeyindeki aktivasyonlar, bu etkileşimin moleküler temellerine ışık tutmaktadır.

4.4. Organik Sistemlerde Uygulama Potansiyeli ve Kısıtlar

Bu biyolojik katkıların organik sistemlere entegrasyonu, iki temel kısıta tabidir:

1. Organik sertifikasyon koşulları – Kullanılacak bitkisel ve mikrobiyal materyallerin tamamının organik üretimden veya doğal kaynaktan gelmesi gerekir (EU Regulation 2018/848; IFOAM, 2019).

2. Alan doğrulaması ve toksisite testleri – Her yeni bileşiğin çevresel güvenliği, arı davranışı ve bal kalitesi üzerindeki etkileri titizlikle test edilmelidir.

Bu nedenle, probiyotik ve fitobiyotik bazlı yem katkıları, organik sistemlerde ancak belgelendirilmiş kaynaklardan sağlandığında kullanılabilir. Mevcut araştırmalar, bu katkıların biyogüvenlik riski taşımadığını, ancak formülasyon ve dozaj optimizasyonu gerektirdiğini göstermektedir (Hsu et al., 2021; Klassen et al., 2021).

Sürdürülebilir Tarım Bağlamında Değerlendirme

Bitkisel ve mikrobiyal katkıların organik arıcılığa entegrasyonu, sürdürülebilir tarımın üç temel boyutuna katkı sağlar:

- **Ekolojik:** Pestisit kullanımını azaltır, hastalık yönetimini biyolojik yolla sağlar.
- **Ekonomik:** Koloni kayıplarını azaltarak uzun vadeli üretim istikrarı sağlar.
- **Sosyal:** Kimyasal kalıntısız, etik üretim modelleriyle tüketici güvenliğini artırır.

Bu yönüyle fitobiyotik ve probiyotik yaklaşımlar, organik arıcılığın yalnızca koruyucu değil, aynı zamanda yenilikçi ve direnç kazandırıcı bir sürdürülebilirlik modeline dönüşmesine olanak tanımaktadır.

5. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ARAŞTIRMA ÖNCELİKLERİ

5.1. Organik Arıcılığın Sürdürülebilir Tarımdaki Rolü

Organik arıcılık, yalnızca alternatif bir üretim modeli değil, aynı zamanda ekosistem temelli sürdürülebilir tarımın tamamlayıcı bir bileşenidir. Kolonilerin çevreyle olan simbiyotik ilişkisi, polinasyon yoluyla tarımsal üretkenliği desteklerken, kimyasal kullanımının azaltılmasıyla ekosistem hizmetlerinin sürekliliğini sağlar (Underwood et al., 2023).

Avrupa Birliği (EU Regulation 2018/848), USDA NOP ve IFOAM çerçeveleri arasındaki farklılıklar, sürdürülebilirlik vizyonlarının çeşitliliğini yansıtır. AB ve IFOAM sistemleri, ekolojik bütünlük ve doğal döngülerin korunmasına, USDA ise uyum ve yönetim kolaylığına öncelik vermektedir (Migliorini & Wezel, 2017). Ancak her üç sistemde de ortak hedef, dış girdilerin azaltılması ve doğal kaynakların etkin yönetimi yoluyla koloni sağlığının sürdürülmesidir.

Underwood ve arkadaşlarının (2023) çalışması, organik yönetimle sürdürülen kolonilerin konvansiyonel yönetimle eşdeğer üretkenlik sergilediğini, ancak pestisit ve kimyasal streslerin azalması sayesinde daha uzun ömürlü ve dirençli koloniler oluşturduğunu göstermiştir. Bu bulgu, organik arıcılığın sadece “etik” bir tercih değil, aynı zamanda uzun vadeli sürdürülebilir verimlilik stratejisi olduğunu ortaya koymaktadır. Organik besleme, koloni sağlığını desteklemenin ötesinde, tarımsal ekosistemin

bütünsel direncine katkı sağlar. Bu döngüde sağlıklı arılar, etkin tozlaşma, artan biyolojik çeşitlilik ve dirençli ekosistemler ile kaliteli doğal besin döngüsünü güçlendirir (Bkz. Şekil 6).



Şekil 5. Organik beslemenin ekosistem direncine katkısı

5.2. Doğal Besleme ve Ekosistem Hizmetlerinin Entegrasyonu

Doğal polen ve bal temelli beslenme, sadece arı fizyolojisini değil, aynı zamanda tarımsal ekosistemlerin biyolojik döngülerini destekler.

- **Polen çeşitliliği**, bitki–arı etkileşimini güçlendirir ve flora sürekliliğini sağlar (DeGrandi-Hoffman et al., 2015; Ricigliano et al., 2018).
- **Bal kaynaklı fitokimyasallar**, arılarda pestisit toleransını artırarak ekolojik streslere karşı adaptasyon kapasitesini güçlendirir (Mao et al., 2013).
- **Bitkisel ekstrakt ve probiyotik katkılar**, sentetik ilaçların yerini alarak ekosistem temelli sağlık yönetimi sağlar (Maggi et al., 2013; Klassen et al., 2021; Gawali & Waykar, 2025).

Bu bulgular, organik arıcılığın sadece “girdi kısıtlaması” değil, aynı zamanda doğal süreçlerin yeniden entegrasyonu üzerine kurulu bir sürdürülebilirlik modeli olduğunu göstermektedir.

5.3. Yenilikçi Uygulama Alanları ve Biyoteknolojik Gelişmeler

Son yıllarda organik arıcılıkta öne çıkan yenilikçi yaklaşımlar, biyoteknoloji ve dijital izleme teknolojilerinin entegrasyonu etrafında şekillenmektedir.

- 1. Fitobiyotik–Probiyotik Formülasyonlar:** Organik onaylı mikroorganizma ve bitkisel bileşik kombinasyonları, *Nosema* ve diğer mikrobiyal hastalıklarla mücadelede sentetik ilaçlara alternatif oluşturmaktadır (Hsu et al., 2021; Klassen et al., 2021). Bu formülasyonlar, özellikle iklim stresine duyarlı kolonilerde bağışıklık ve mikrobiyota dayanıklılığını artırmaktadır.
- 2. Biyosensör ve Dijital Kovan İzleme Sistemleri:** Hassas tarım teknolojilerinin arıcılığa uyarlanması, kolonilerin beslenme davranışlarının gerçek zamanlı takibini mümkün kılmaktadır. Bu sistemler, enerji kullanımı ve yem tüketimini optimize ederek karbon ayak izini düşürmekte, aynı zamanda organik sertifikasyon süreçlerinde izlenebilirlik sağlamaktadır.
- 3. Yerel Biyoçeşitlilik Temelli Yem Kaynakları:** Bölgesel flora analizleriyle geliştirilen “yerli polen karışımları” ve bölgesel yem bitkisi planlamaları, organik sistemlerin yerel ekolojik döngülerle uyumlu hale gelmesini desteklemektedir (Ricigliano et al., 2022; Ansaloni et al., 2025).

Bu yenilikçi yaklaşımlar, organik arıcılığın yalnızca geçmişe dönük bir “doğala dönüş” değil, aynı zamanda ileri teknolojiyle güçlendirilmiş bir agroekolojik model olduğunu ortaya koymaktadır.

5.4. Araştırma Öncelikleri

Organik arıcılık, sürdürülebilir tarım politikalarının hem çevresel hem de sosyo-ekonomik hedeflerine hizmet eder. Ancak mevcut literatür, bu alanın hâlen birkaç temel sınırlılıkla karşı karşıya olduğunu göstermektedir:

- 1. Organik Standartların Uyumlaştırılması:** EU, USDA ve IFOAM arasında besleme ve sertifikasyon koşullarındaki farklılıklar, uluslararası organik bal ticaretinde belirsizlikler yaratmaktadır (Migliorini & Wezel, 2017). Gelecekte bu standartların biyolojik temelli ortak göstergelere dayandırılması önerilmektedir.

2. **Uzun Dönemli Saha Çalışmaları:** Çoğu mevcut araştırma kısa dönemli deneysel düzeydedir. Koloni yaşam döngüsünü kapsayan uzun dönemli çalışmalar, organik besleme stratejilerinin kalıcı sağlık ve verim etkilerini netleştirecektir (Underwood et al., 2023).
3. **Yerli Ekosistemlere Uyum:** Organik besleme protokolleri genellikle Avrupa veya Kuzey Amerika koşullarına göre tasarlanmıştır. Farklı iklim ve flora bölgelerinde yerel tür ve kaynaklara dayalı biyobölgesel besleme modelleri geliştirilmelidir.
4. **Arı Sağlığı–Ekosistem Sağlığı Etkileşimi:** Gelecekteki çalışmaların yalnızca koloni düzeyinde değil, aynı zamanda peyzaj ölçeğinde ekolojik geri besleme mekanizmalarını incelemesi gerekmektedir (Castelli et al., 2020).

6. GENEL SONUÇ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Organik arıcılıkta besleme uygulamaları, sürdürülebilir tarımın temel ilkeleriyle uyumlu biçimde; doğal kaynak kullanımı, biyolojik çeşitliliğin korunması ve kimyasal bağımlılığın azaltılması hedeflerini bütünleştiren bir üretim modeline dönüşmektedir. Bu sistem, yalnızca koloni sağlığına değil, aynı zamanda ekosistem işlevlerine, gıda güvenliğine ve kırsal kalkınmaya da doğrudan katkı sağlamaktadır (Underwood et al., 2023; Migliorini & Wezel, 2017).

1. Bilimsel Bulguların Genel Değerlendirmesi

Bu çalışma göstermektedir ki:

- **Doğal besin kaynakları** (bal, polen, propolis) arı fizyolojisini en üst düzeyde desteklemekte, bağışıklık yanıtını güçlendirmekte ve pestisit stresine karşı dayanıklılığı artırmaktadır (Mao et al., 2013; DeGrandi-Hoffman et al., 2015).
- **Yapay veya düşük kaliteli ikameler** (örneğin yüksek fruktozlu şuruplar, protein katkıları) koloninin mikrobiyal dengesini bozmakta ve *Nosema* gibi parazitik enfeksiyonların artışına neden olmaktadır (Watkins de Jong et al., 2019; Castelli et al., 2020).
- **Fitobiyotik ve probiyotik katkılar**, organik sistemlerde kimyasal tedavilerin yerini alabilecek doğal alternatifler sunmakta; *Nosema* ve diğer patojenlere karşı güçlü biyolojik savunma mekanizmaları

oluşturabilmektedir (Maggi et al., 2013; Klassen et al., 2021; Gawali & Waykar, 2025).

- **Organik yönetim sistemleri**, konvansiyonel yönetimle eşdeğer ya da daha yüksek koloni sağkalımı ve üretkenlik sağlamaktadır (Underwood et al., 2023).

Bu sonuçlar, organik arıcılığın yalnızca çevresel açıdan değil, aynı zamanda ekonomik ve üretimsel olarak da sürdürülebilir bir model olduğunu ortaya koymaktadır.

2. Politika Düzeyinde Öneriler

2.1. Standartların Uyumlaştırılması

Avrupa Birliği (EU Regulation 2018/848), USDA NOP ve IFOAM standartları arasındaki farklılıklar, küresel organik bal ticareti ve sertifikasyon süreçlerinde zorluklar yaratmaktadır.

Bu nedenle, uluslararası düzeyde organik arıcılık için bir “ortak çekirdek standart seti” geliştirilmelidir. Bu çekirdek, aşağıdaki unsurları içermelidir:

- Organik kökenli yem zorunluluğu,
- Acil besleme koşullarının biyolojik olarak tanımlanması,
- Forage zonlarının çevresel kalite göstergeleriyle (ör. pestisit kalıntısı, flora çeşitliliği) ilişkilendirilmesi,
- Ekolojik göstergelere dayalı izleme protokolleri.

Bu harmonizasyon, hem üreticiler için adil ticaret ortamı yaratacak hem de tüketici güvenini artıracaktır.

2.2. Bilim-Politika Arayüzünün Güçlendirilmesi

Arı beslenmesi, iklim değişikliği, pestisit kullanımı ve gıda güvenliği arasındaki etkileşimleri kapsayan bir “bilim-politika arayüzü” geliştirilmelidir.

- Üniversiteler ve araştırma merkezleri, yerel ekosistemlere uygun biyobölgesel besleme protokolleri geliştirmelidir.
- Tarım bakanlıkları ve organik sertifikasyon kurumları, bu verileri politika rehberlerine entegre etmelidir.
- Uluslararası kuruluşlar (FAO, IFOAM, EFSA), arı sağlığını sürdürülebilir tarım göstergeleri arasına dâhil etmelidir.

Bu yaklaşım, arıcılığı yalnızca bir üretim faaliyeti değil, ekosistem sağlığının izlenebilir bir göstergesi haline getirecektir.

2.3. Ar-Ge ve Yenilik Yatırımlarının Önceliklendirilmesi

Gelecekteki araştırma politikaları, aşağıdaki üç eksen üzerinde yoğunlaşmalıdır:

1. **Mikrobiyota temelli besleme:** Probiyotik ve fermente yemlerin koloni sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkilerinin izlenmesi,
2. **Dijital arıcılık teknolojileri:** Kovan içi sensörler, yapay zekâ destekli yem optimizasyonu ve çevresel izleme sistemleri,
3. **İklim dayanıklılığı odaklı besleme:** Kuraklık, flora kaybı ve sıcaklık dalgalanmalarına dayanıklı besleme modellerinin geliştirilmesi.

Bu inovasyon alanları, organik arıcılığın yalnızca çevresel değil, aynı zamanda teknolojik sürdürülebilirlik perspektifinden de güçlenmesini sağlayacaktır.

3. Sürdürülebilirlik Perspektifinde Sonuç

Organik arıcılıkta besleme uygulamaları, arı sağlığı, biyolojik çeşitlilik ve tarımsal sürdürülebilirlik arasındaki karmaşık ilişkiyi bütüncül biçimde ele almaktadır. Doğal ve biyoteknolojik girdilerin entegrasyonu hem ekolojik dayanıklılığı artırmakta hem de üretim sistemlerini çevresel değişimlere karşı dirençli hale getirmektedir.

Bu bağlamda:

- Arı besleme artık yalnızca bir yönetim aracı değil, ekosistem restorasyonu ve sürdürülebilir gıda üretiminin stratejik bileşenidir.
- Organik sistemlerde uygulanacak her besleme modeli, yalnızca koloni verimini değil, aynı zamanda tarımsal peyzajın ekolojik dengesini de gözetmelidir.
- Geleceğin organik arıcılığı, bilimsel yenilikle ekolojik etiği birleştiren, “yaşayan sistem” merkezli bir yaklaşım olmalıdır.

Bu bütüncül perspektif, organik arıcılığı sürdürülebilir tarımın sınır ötesi bir uygulama alanı haline getirecek hem arılar hem de insanlar için daha sağlıklı bir agroekolojik gelecek inşa edecektir.

KAYNAKLAR

- Annoscia, D., Zanni, V., Galbraith, D., Quirici, A., & Grozinger, C. (2017). Elucidating the mechanisms underlying the beneficial health effects of dietary pollen on honey bees (*Apis mellifera*) infested by Varroa mite ectoparasites. *Scientific Reports*, 7, 16534. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06488-2>
- Ansaloni, L., Kristl, J., Domingues, C., & Gregorc, A. (2025). An overview of the nutritional requirements of honey bees (*Apis mellifera* Linnaeus, 1758). *Insects*, 16(1), 97. <https://doi.org/10.3390/insects16010097>
- Branchiccela, B., Castelli, L., Corona, M., Díaz-Cetti, S., Invernizzi, C., Escalera, G., Mendoza, Y., Santos, E., Silva, C., Zunino, P., & Antúnez, K. (2019). Impact of nutritional stress on the honeybee colony health. *Scientific Reports*, 9, 10156. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46453-9>
- Castelli, L., Branchiccela, B., Garrido, M., Invernizzi, C., Porrini, M., Romero, H., Santos, E., Zunino, P., & Antúnez, K. (2020). Impact of nutritional stress on honeybee gut microbiota, immunity, and *Nosema ceranae* infection. *Microbial Ecology*, 80, 908–919. <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01538-1>
- DeGrandi-Hoffman, G., Chen, Y., Rivera, R., Carroll, M., Chambers, M., Hidalgo, G., & de Jong, E. W. (2016). Honey bee colonies provided with natural forage have lower pathogen loads and higher overwinter survival than those fed protein supplements. *Apidologie*, 47(2), 186-196. <http://dx.doi.org/10.1007/s13592-015-0386-6>
- European Commission. (2018). Regulation (EU) 2018/848 of the European Parliament and of the Council on organic production and labelling of organic products. *Official Journal of the European Union*, L 150, 1–92.
- Gawali, A., & Waykar, B. (2025). Protective role of plant-based pollen substitute diets against *Nosema* spores in *Apis mellifera* colonies. *Journal of Applied and Natural Science*. <https://doi.org/10.31018/jans.v17i1.6188>
- Hsu, C., Wang, D., & Wu, M. (2021). A Potential Fungal Probiotic *Aureobasidium melanogenum* CK-CsC for the Western Honey Bee, *Apis*

- mellifera*. *Journal of Fungi*, 7(7), 508. <https://doi.org/10.3390/jof7070508>
- IFOAM – Organics International. (2019). The IFOAM Norms for Organic Production and Processing (Version 2014, edited 2019). *IFOAM*.
- Kim, H., Frunze, O., Lee, J., & Kwon, H. (2024). Enhancing honey bee health: Evaluating pollen substitute diets in field and cage experiments. *Insects*, 15(5), 361. <https://doi.org/10.3390/insects15050361>
- Klassen, S., VanBlyderveen, W., Eccles, L., Kelly, P., & Borges, D. (2021). *Nosema ceranae* infections in honey bees (*Apis mellifera*) treated with pre/probiotics and impacts on colonies in the field. *Veterinary Sciences*, 8(6), 107. <https://doi.org/10.3390/vetsci8060107>
- Maggi, M., Negri, P., Plischuk, S., Szawarski, N., De Piano, F., De Feudis, L., Eguaras, M., & Audisio, M. (2013). Effects of the organic acids produced by a lactic acid bacterium in *Apis mellifera* colony development, *Nosema ceranae* control and fumagillin efficiency. *Veterinary Microbiology*, 167(3–4), 474–483. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2013.07.030>
- Mao, W., Schuler, M., & Berenbaum, M. (2013). Honey constituents up-regulate detoxification and immunity genes in the western honey bee *Apis mellifera*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(22), 8842–8846. <https://doi.org/10.1073/pnas.1303884110>
- Migliorini, P., & Wezel, A. (2017). Converging and diverging principles and practices of organic agriculture regulations and agroecology: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(63), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0472-4>
- Noordyke, E., & Ellis, J. (2021). Reviewing the efficacy of pollen substitutes as a management tool for improving the health and productivity of Western honey bee (*Apis mellifera*) colonies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 772897. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.772897>
- Papežíková, I., Palíková, E., Syrová, M., Záchová, A., & Somerlíková, K. (2019). Effect of feeding honey bee colonies with honey, sugar solution, inverted sugar, and wheat starch syrup on Nosematosis prevalence and intensity. *Journal of Economic Entomology*, 113(1), 26–33. <https://doi.org/10.1093/jee/toz251>

- Přidal, A., Musila, J., & Svoboda, J. (2023). Condition and honey productivity of honeybee colonies depending on type of supplemental feed for overwintering. *Animals*, 13(3), 323. <https://doi.org/10.3390/ani13030323>
- Ricigliano, V., Mott, B., Floyd, A., Copeland, D., Carroll, M., & Anderson, K. (2018). Honey bees overwintering in a southern climate: Longitudinal effects of nutrition and queen age on colony-level molecular physiology and performance. *Scientific Reports*, 8, 10475. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28732-z>
- Ricigliano, V., Williams, S., & Oliver, R. (2022). Effects of different artificial diets on commercial honey bee colony performance, health biomarkers, and gut microbiota. *BMC Veterinary Research*, 18, 52. <https://doi.org/10.1186/s12917-022-03151-5>
- Underwood, R., Lawrence, B., Turley, N., Cambron-Kopco, L., Kietzman, P., Traver, B., & López-Urbe, M. (2023). A longitudinal experiment demonstrates that honey bee colonies managed organically are as healthy and productive as those managed conventionally. *Scientific Reports*, 13, 6072. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32824-w>
- USDA Agricultural Marketing Service. (2025). *National Organic Program: 7 CFR Part 205. Code of Federal Regulations*. <https://www.ecfr.gov/current/title-7/subtitle-B/chapter-I/subchapter-M/part-205>
- Watkins de Jong, E., DeGrandi-Hoffman, G., Chen, Y., Graham, H., & Ziolkowski, N. (2019). Effects of diets containing different concentrations of pollen and pollen substitutes on physiology, *Nosema* burden, and virus titers in the honey bee (*Apis mellifera* L.). *Apidologie*, 50, 845-858. <https://doi.org/10.1007/s13592-019-00695-8>

BÖLÜM 6

BAL ARISI KOLONİ BESLENMESİ: BİYOLOJİ, BESİN GEREKSİNİMLERİ, UYGULAMA STRATEJİLERİ VE MODERN YAKLAŞIMLAR

Dr. İbrahim ŞAHİN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986593>

¹ Bingöl Üniversitesi, Arıcılık Araştırma Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bingöl, Türkiye, isahin@bingol.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6803-0121

1.GİRİŞ

Bal arısı kolonileri, karmaşık sosyal organizasyonları ve ileri düzey görev paylaşımıyla öne çıkan son derece dinamik biyolojik sistemlerdir. Tipik bir koloni; üremenin merkezinde yer alan ana arı, kovan içi ve dışı görevleri yerine getiren işçi arılar, erkek arılar ile larva ve pupa evrelerindeki yavruardan oluşan çok bileşenli bir yapıya sahiptir. Fizyolojik ve morfolojik özellikleri bakımından belirgin biçimde farklılık gösteren bu bireylerin, yaşam evreleri ve görevleri doğrultusunda değişen niteliksel ve niceliksel beslenme gereksinimleri bulunmaktadır (Özbakır ve Alişiroğlu, 2019).

Bal arılarının, diğer tüm organizmalarda olduğu gibi, yaşamlarını sürdürebilmeleri, büyüme ve gelişme süreçlerini tamamlayabilmeleri ve üreme başarılarını koruyabilmeleri için karbonhidratlar, proteinler, lipitler, vitaminler, mineraller, fitosteroller ve su gibi temel besin öğelerine ihtiyaçları vardır. Bu bağlamda, çiçek nektarı ve bazı hemipter böceklerinin salgıları, koloninin temel karbonhidrat kaynağını oluşturarak uçuş aktivitesi, termoregülasyon ve balmumu üretimi gibi yüksek enerji gerektiren fizyolojik süreçlerin karşılanmasında kritik bir rol oynar. Bunun yanında polen, arılar için başlıca protein, lipit, sterol ve mikro besin elementi kaynağı olup özellikle yavru gelişimi, dokusal yenilenme ve işçi arı fizyolojisi açısından vazgeçilmez bir besin bileşenidir (Özbakır ve Alişiroğlu, 2019).

Koloni içerisinde genellikle büyük miktarda bal depolanmasına karşın, polen rezervleri daha sınırlıdır. Ancak polen, koloninin temel protein kaynağı olması ve kitlesel yavru üretiminin büyük ölçüde bu proteine bağlı bulunması nedeniyle koloni organizasyonu açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu nedenle koloninin polen depolarını düzenleme ve sürekliliğini sağlama gereksinimi oldukça belirgindir (Schmickl ve Crailsheim, 2004).

Sonuç olarak, bal arısı kolonilerinin sağlıklı gelişimi, yüksek verimliliği ve çevresel stres unsurlarına karşı direnç kazanabilmesi için dengeli ve yeterli beslenme vazgeçilmezdir. Koloni beslenmesi; arı biyolojisi, enerji gereksinimleri, çevresel kaynakların niteliği, koloninin yıllık yaşam döngüsü ve arıcılık uygulamaları ile doğrudan ilişkili çok boyutlu bir süreçtir. Bu bölümde bal arılarının doğal beslenme davranışları, makro ve mikro besin gereksinimleri, mevsimsel farklılıklar, koloni besleme teknikleri ve güncel araştırma bulgularına dayalı modern beslenme stratejileri kapsamlı biçimde ele alınacaktır.

2. Bal Arılarının Doğal Besin Kaynakları

Bal arılarının yaşam döngüsünü sürdürebilmesi, koloni organizasyonunu koruyabilmesi ve yüksek biyolojik performans gösterebilmesi büyük ölçüde doğal besin kaynaklarının yeterliliğine bağlıdır. Koloni düzeyinde beslenme, karbonhidrat, protein, lipid, vitamin, mineral ve su gereksinimlerinin karşılanmasıyla sağlanır ve bu gereksinimlerin temelini nektar, polen ve bunlardan üretilen arı ürünleri oluşturur. Arıların başlıca karbonhidrat kaynağı çiçek nektarı ve tatlı salgılar olup, bu kaynaklardan işlenerek elde edilen bal; protein kaynağı ise polen ve bu polenin laktik fermentasyonla zenginleştirilmiş formu olan arı ekmeğidir. Bal, arı ekmeği ve arı sütü gibi ürünler yalnızca karbonhidrat ve protein sağlamamakta, aynı zamanda arı fizyolojisi için elzem olan vitaminler, mineraller, amino asitler ve yağları da içermektedir. Koloninin su ihtiyacı büyük ölçüde nektar yoluyla karşılanmakla birlikte, gerek duyulduğunda tarlacı arılar tarafından su kaynaklarından kovana aktif olarak taşınır; su, hem ergin arılarda ozmotik dengenin korunması hem yavru besini hazırlanması hem de sıcak dönemlerde kovanın evaporatif soğutulması için vazgeçilmezdir. Nitekim tarlacı arıların su toplama aktivitesinin çevresel sıcaklıkla arttığı ve aşırı ısınma baskısı azaldığında düştüğü bildirilmiştir (Winston, 1991; Kuhnholz ve Seeley, 1997). Ayrıca bal arılarının özellikle sodyum içeriği yüksek su kaynaklarına yönelim gösterdiği belirlenmiştir (Lau ve Nieh, 2016). Arı beslenmesinin temelini oluşturan nektar ve polen yalnızca enerji ve protein girdileri sağlamakla sınırlı olmayıp, bağışıklık sistemi fonksiyonlarının desteklenmesi, fizyolojik süreçlerin düzenlenmesi ve yavru gelişiminin sürdürebilmesi açısından kritik bileşenler sunar. Bitkisel kökenli bu besinlerin kimyasal kompozisyonu; bitki türü, fenolojik dönem, yetiştirme koşulları ve çevresel stres faktörlerine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Nektar esas olarak monosakkarit ve disakkaritlerden oluşan bir karbonhidrat çözeltisi niteliğinde iken, polen yüksek biyoyararlanımlı proteinlerin yanı sıra lipitler, vitaminler, mineraller ve steroller gibi temel mikro besin bileşenlerini içermektedir. Dolayısıyla koloni sağlığı, üretkenliği ve stres faktörlerine dayanıklılığı, doğal besin kaynaklarının miktarı ve bileşimsel niteliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, bal arılarının doğal besin kaynaklarının biyokimyasal özelliklerinin ve ekolojik belirleyicilerinin anlaşılması, koloni fizyolojisinin ve sürdürebilir arıcılık uygulamalarının bilimsel temellerini oluşturmaktadır.

2.1. Karbonhidrat Bileşimi ve Koloni İçin Rolü

Nektar; içerdiği şekerler ile birlikte su ve bala özgü aromatik karakteri oluşturan çeşitli organik bileşiklerden meydana gelmekte olup, su oranı bitki türü ve çevresel koşullara göre değişiklik göstermektedir. Amino asitler, özellikle böceklerle tozlanan bitki türlerinde düşük derişimlerde bulunmalarına rağmen, şekerlerden sonra nektarın en yaygın bileşenleri arasında yer almakta; prolinin bal arıları için cezbedici bir özellik gösterdiği ve balda kalite kriteri olarak değerlendirildiği, glisinin ise arıların öğrenme performansını artırdığı bildirilmektedir. Ayrıca nektarda organik asitler, terpenler, alkaloidler, flavonoidler, glikositler, vitaminler, fenolik bileşikler ve yağlar gibi çok çeşitli ikincil metabolitlerin bulunduğu farklı araştırmalarca ortaya konmuştur (Roubik ve Buchmann, 1984; Gardener ve Gillman, 2002; Carter ve Shafir, 2006; Nicolson, 2011). Bal arılarının balmumu salgılama ve petek örme, kovan içi temizlik, yavru ve ergin bireylerin beslenmesi, kovan içi sıcaklık düzenlemesi, tarlacı arıların uçuşu ve diğer tüm koloni faaliyetleri için gerekli enerji temel olarak karbonhidratlardan sağlanmaktadır. Arılar için karbonhidrat kaynağı büyük ölçüde çiçek nektarı, böcek salgıları ve bu kaynakların işlenmesiyle üretilen bal olup, nektarda bulunan başlıca şekerler olan glukoz, fruktoz ve sakkaroz yüksek metabolik hız gerektiren uçuş aktivitesi, termoregülasyon ve tüm görevsel işlevlerin yerine getirilmesinde zorunlu enerji girdisini oluşturmaktadır (Hrassnigg ve Crailsheim, 2005). Koloni içerisinde uzun dönemli enerji deposu niteliğindeki bal, arıların invertaz enzimiyle nektarı glukoz ve fruktoza parçalayarak su oranını azaltması sonucu elde edilmekte ve yalnızca enerji kaynağı değil, aynı zamanda antioksidan ve biyoaktif bileşenler sağlayarak fizyolojik dayanıklılığı artıran bir besin matriksi sunmaktadır (Wright ve Nicolson, 2018). Yavru gelişiminin doğrudan polene bağlı olmasına karşın, yavru besleme bezlerinin etkin çalışabilmesi için işçi arıların yeterli karbonhidrat tüketmesi gerekmekte; karbonhidrat yetersizliği arı sütü üretimini ve dolayısıyla yavru gelişimini olumsuz etkilemektedir (Crailsheim, 1992). Mevsimsel döngü açısından bakıldığında, kışlama döneminde koloni tüm enerji gereksinimini bal depolarından karşıladığından, yeterli karbonhidrat rezervleri kış arılarının uzun ömürlülüğü ve koloninin bahara güçlü çıkması için kritik öneme sahiptir (Mattila ve Otis, 2006). Ayrıca karbonhidratça zengin kolonilerin hastalık, pestisit maruziyeti, sıcaklık stresi veya nakliye gibi stres faktörlerine karşı daha dayanıklı olduğu, enerji eksikliğinin ise bağışıklık

yanıtını zayıflattığı; karbonhidrat temininin bağışıklık fonksiyonlarını düzenlediği güncel çalışmalarca ortaya konmuştur (Tosi ve Nieh, 2017). Bu bağlamda karbonhidratlar, arı kolonilerinde enerji metabolizmasının temelini oluşturmakta; uçuş, termoregülasyon, koloni içi iş bölümü, bal üretimi, kışlama başarısı ve yavru gelişimi gibi kritik süreçlerde vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir.

2.2. Polen Bileşimi ve Koloni İçin Rolü

Polen, çiçekli bitkilerin erkek gametofiti olmasının yanı sıra bal arılarının temel protein ve mikro besin kaynağını oluşturmaktadır. Kimyasal bileşimi bakımından oldukça zengin olan polen; proteinler, lipitler, karbonhidratlar, lifler, mineral tuzlar, amino asitler, fenolik bileşikler ve vitaminlerden meydana gelir. Yüksek miktarda indirgenmiş şekerler, esansiyel amino asitler, doymuş ve doymamış yağ asitleri ile Zn, Cu, Fe gibi iz elementlerin ve yüksek K/Na oranının bulunması, poleni yalnızca arılar için değil, insanlar için de besinsel açıdan değerli kılmaktadır. Polen bileşiminin büyük kısmını %13–55 oranında karbonhidratlar (fruktoz, glukoz, sakkaroz), %10–40 oranında proteinler (amino asitler ve enzimler), %0.3–20 oranında ham lifler ve %1–10 oranında lipitler (yağ asitleri, steroller, hidrokarbonlar) oluşturmaktadır (Bogdanov, 2012; Campos ve Bogdanov, 2008). Bal arısı kolonileri için polen, fizyolojik süreklilik, üreme başarısı ve bağışıklık fonksiyonlarının sürdürülebilmesi açısından vazgeçilmez bir girdidir. Protein, lipit, vitamin, mineral ve steroller bakımından koloninin tek doğal kaynağı olduğundan, özellikle yavru gelişimi ve işçi arı fizyolojisinin düzenlenmesinde kritik rol oynamaktadır (Brodschneider ve Crailsheim, 2010; Herbert, 1992). İşçi arıların hipofaringeal bez gelişimi ve bu bezlerden salgılanan arı sütü üretimi doğrudan kaliteli polen tüketimine bağlı olup, larvaların ve ana arının beslenmesi bu süreçle şekillenmektedir (Crailsheim, 1990; Human ve Nicolson, 2007). Yetersiz ya da düşük kaliteli polen alımı, yavru üretiminde azalma, işçi arıların ömründe kısalma, bağışıklık kapasitesinde düşüş ve koloni performansında belirgin zayıflama yaratmaktadır (Di Pasquale ve Alaux, 2016). Polen lipit fraksiyonunda bulunan ve bal arıları tarafından sentezlenemeyen 24-methylenecholesterol gibi steroller ise hücresel membran bütünlüğü ve hormon sentezi için zorunlu bileşenlerdir (Furse ve Koch, 2023). Bunun yanında polen, koloni içi davranışsal ve ekolojik dinamikleri de

etkileyerek tarlacı arıların toplama davranışını yönlendirmekte; polen kıtlığı durumunda kolonide acil durum tepkileri ortaya çıkmaktadır (Pernal ve Currie, 2001). Pestisitler, kuraklık ve monokültür tarımı gibi çevresel stres faktörlerine bağlı olarak polen çeşitliliğinin azalması, arıların patojenlere duyarlılığını artırmakta ve koloni çöküşü riskini yükseltmektedir (Alaux ve Ducloz 2010; Di Pasquale ve Alaux 2016). Tüm bu bulgular, polenin koloni biyolojisinin her aşamasında merkezi bir rol üstlendiğini ve koloni sağlığının sürdürülebilmesi için yalnızca polen miktarının değil, aynı zamanda polen çeşitliliğinin de kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

3. Mevsimsel Koloni Beslemesi ve Önemi

3.1 İlkbahar Dönemi Besleme

İlkbahar, koloni büyümesinin ve yavru yetiştiriciliğinin hızlandığı kritik bir dönemdir. Kıştan zayıf çıkan kolonilerde karbonhidrat ve protein eksikliği, erken dönem yavru üretimini sınırlayabilmektedir. Bu dönemde şurup beslemesi (1:1 şeker şurubu), koloniye enerji sağlayarak nektar akımını simüle eder ve ana arının yumurtlama hızını artırır (Mattila ve Otis, 2006). Erken ilkbaharda floral kaynakların yetersiz olduğu bölgelerde polen ikameleri veya protein takviyesi yapılması, hem hipofaringeal bez gelişimini destekler hem de genç işçi arıların fizyolojik kapasitesini artırır (DeGrandi-Hoffman ve Wardell, 2008). Ayrıca, polen çeşitliliği erken dönem bağışıklık fonksiyonlarının etkin şekilde çalışması için önem taşır; monofloral beslenme, koloniyi patojenlere karşı daha duyarlı hâle getirebilmektedir (Di Pasquale ve Salignon, 2013).

3.2. Yaz Dönemi Besleme

Yaz dönemi genellikle bol nektar akımıyla ilişkilendirilse de sıcaklık artışı, kuraklık ve bitkisel üretimdeki değişkenlik nedeniyle bazı bölgelerde yaz ortası açlığı ortaya çıkabilmektedir. Aşırı sıcaklarda su gereksinimi artmakta ve tarlacı arılar tarafından taşınan su miktarı koloninin termoregülasyon kapasitesini belirlemektedir (Kuhnholz ve Seeley, 1997). Bu nedenle, sıcak aylarda su kaynağı sağlanması zorunludur. Yaz aylarında protein takviyesi sınırlı ölçüde uygulanır; çünkü yüksek sıcaklıkta proteinli yemlerin bozulma riski artar. Ancak, koloni zayıf ise sınırlı polen ikamesi uygulanabilir. Ayrıca bu dönemde kovan yönetimi, beslenmeden bağımsız olarak koloni verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynar. Özellikle uzun süren nektarsız dönemlerde

kek formunda karbonhidrat desteği, koloni stresini azaltarak yavru alanının daralmasını önler (Pernal ve Currie, 2001).

3.3. Sonbahar Dönemi Besleme

Sonbahar beslemesi, koloninin kışa güçlü ve sağlıklı bir popülasyonla girebilmesi için en kritik besleme dönemlerinden biridir. Bu dönemde amaç, kış arılarının oluşumunu desteklemek ve koloniye yeterli karbonhidrat stoğu sağlamaktır. Sonbahar beslemesinde genellikle 2:1 koyu şurup kullanılır; bu formülasyon balın doğal kıvamına yakın olduğundan arılar tarafından depolanması daha kolaydır (Herbert, 1992). Protein gereksinimi ise polen kaynaklarının azalmasıyla belirginleşmektedir. Bu nedenle sonbaharda polen ikamelerinin kullanılması, kış arılarının yağ dokusunun (fat body) gelişimini destekleyerek uzun ömürlülük ve bağışıklık kapasitesini artıracaktır (Alaux ve Ducloz 2010). Ayrıca besin eksikliği ile streslenen kolonilerde Nosema spp. başta olmak üzere çeşitli patojenlere duyarlılık artmaktadır.

4. Bal Arılarında Beslemenin Koloni Sağlığı Üzerine Etkisi

Mevsimsel besleme uygulamalarının koloni sağlığı üzerindeki etkileri yalnızca besin miktarına değil, besin çeşitliliğine, kalitesine ve ekolojik faktörlere de bağlıdır. Monokültür tarım sistemleri, polen çeşitliliğini azaltarak arıların bağışıklık ve detoksifikasyon mekanizmalarını zayıflatmakta, pestisitlere duyarlılığını artırmaktadır (Alaux ve Ducloz 2010). Bu bağlamda, mevsimsel besleme yalnızca arıcılık yönetimi için değil, aynı zamanda çevresel streslerin olumsuz etkilerini azaltmak adına tamamlayıcı bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Doğru planlanmış besleme protokolleri, koloni çöküş bozukluğu (CCD) gibi fenomenlerin etkisini azaltabilmektedir. Beslenme yetersizliği ile patojen yükünün birlikte ele alındığı çalışmalarda, dengeli ve yüksek kaliteli besin kaynaklarının kolonilerin hayatta kalma oranlarını anlamlı derecede artırdığı gösterilmiştir (Di Pasquale ve Alaux, 2016). Bal arılarında beslenme, koloni sağlığının sürdürülebilirliği, fizyolojik fonksiyonların düzenlenmesi, üreme başarısı ve bağışıklık yanıtlarının etkinliği açısından temel bir belirleyicidir. Koloni düzeyindeki tüm biyolojik süreçler yavru yetiştirme, işçi arı fizyolojisi, bal üretimi, davranışsal organizasyon ve kışlama başarısı doğrudan besin kalitesi ve miktarına bağlı olarak şekillenmektedir (Brodschneider ve Crailsheim, 2010). Bu nedenle, koloni beslenmesinde hem

karbonhidrat hem protein kaynaklarının sürekliliği, çeşitliliği ve biyoyararlanım potansiyeli koloni sağlığı açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Bal arılarının enerji gereksinimi büyük ölçüde nektar veya balla karşılanırken, koloni metabolizmasının, yavru gelişiminin ve bağışıklık sisteminin temel yapı taşları polen tarafından sağlanmaktadır. Polen, arılar için tek doğal protein kaynağıdır ve içerdiği amino asitler, yağ asitleri, vitaminler ve mineraller, hem genç işçi arıların hipofaringeal bezlerinin gelişimi hem de yavru besleme kapasitesi açısından zorunludur (Herbert, 1992; Human ve Nicolson 2007). Yetersiz protein alımı, hemolenf protein düzeylerinde azalmaya, yavru yetiştirme oranının düşmesine ve işçi arı ömrünün kısalmasına neden olmaktadır (DeGrandi-Hoffman ve Wardell 2008). Bunun sonucunda koloni içi işbölümü, davranışsal organizasyon ve işçi arıların görev ömürleri olumsuz etkilenir.

Besin yetersizliğinin kolonilerde bağışıklık fonksiyonları üzerindeki etkileri özellikle son yıllarda yapılan araştırmalarla daha net ortaya konmuştur. Çeşitli çalışmalar, düşük kaliteli veya monofloral polenle beslenen arıların bağışıklık yanıtlarının zayıfladığını, özellikle *Nosema* spp. ve viral patojenlere karşı daha duyarlı hâle geldiğini göstermektedir (Alaux Ducloz, 2010; Di Pasquale Alaux, 2016). Bu durum, beslenmenin yalnızca fizyolojik süreçleri değil aynı zamanda koloninin hastalık direncini de belirlediğini göstermektedir. Patojen yükünün arttığı durumlarda, iyi bir beslenme rejimi koloninin iyileşme kapasitesini ve hayatta kalma oranlarını anlamlı düzeyde artırabilmektedir (Di Pasquale ve Salignon, 2013).

Karbonhidrat eksikliği ise koloni davranışlarını değiştirmekte ve stres seviyesini artırmaktadır. Enerji yetersizliği durumunda tarlacı arıların toplama davranışları düzensizleşmekte, yavru üretimi daralmakta ve koloni içi termoregülasyon bozulmaktadır (Mattila ve Otis, 2006). Özellikle kış döneminde yetersiz enerji kaynağı, koloni kayıplarının ana nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Bogdanov, 2012). Enerji rezervlerinin azalması, kovan içi sıcaklık kontrolünün bozulmasına, yavru üretiminin kesintiye uğramasına ve yaşlı işçilerin erken ölmesine yol açarak koloni çöküş riskini artırır.

Beslenmenin koloni sağlığı üzerindeki etkileri yalnızca miktar ve kaliteyle sınırlı olmayıp, besin kaynaklarının çeşitliliği de kritik öneme sahiptir. Bitki çeşitliliğinin düşük olduğu monokültür alanlarında, arılar besin açısından

denge-siz polen ve nektara maruz kalmakta ve bu durum bağışıklık sistemi üzerinde baskıya neden olmaktadır (Pernal ve Currie, 2001). Ayrıca düşük besin çeşitliliği, pestisit maruziyetinin toksik etkilerini artırmakta; detoksifikasyon mekanizmalarının zayıflaması sonucunda koloni mortalitesi yükselmektedir (Alaux ve Ducloz 2010). Bu bağlamda beslenme, çevresel stres faktörleri ile etkileşim hâlinde koloni dayanıklılığını belirleyen çok boyutlu bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, koloni beslenmesi bal arılarının biyolojik performansının hemen her yönünü etkileyen temel bir ekolojik ve fizyolojik faktördür. Yeterli karbonhidrat ve protein kaynağına erişim, besin çeşitliliği, polenin biyokimyasal kalitesi ve çevresel stres faktörlerinin yönetimi, koloni sağlığının korunmasında bir bütün olarak ele alınmalıdır. Bilimsel kanıtlar, iyi planlanmış bir beslenme stratejisinin koloni ömrünü uzattığını, bağışıklık sistemini güçlendirdiğini ve koloni verimliliğini artırdığını açıkça göstermektedir.

5. Modern Arı Beslenme Yaklaşımları: Polen Alternatifleri, Yapay Diyetler Ve Fonksiyonel Takviyeler

Bal arısı kolonilerinin sürdürülebilirliği, yalnızca doğal kaynakların erişilebilirliğine değil, aynı zamanda arıcılık uygulamalarında kullanılan modern beslenme stratejilerine de bağlıdır. İklim değişikliği, pestisit kullanımı, habitat kaybı ve monokültürel tarım gibi faktörler, polen ve nektar kaynaklarının mevsimsel ve bölgesel düzeyde azalmasına yol açarak koloni besin dengesini bozmakta ve arı sağlığını olumsuz etkilemektedir (Goulson ve Nicholls, 2015). Bu nedenle, modern arıcılıkta doğal polen kaynaklarını destekleyen veya kısmen ikame eden yapay besleme uygulamaları giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Yapay diyetler ve polen alternatifleri, özellikle erken ilkbahar, geç sonbahar ve çevresel stres dönemlerinde kolonilerin protein, karbonhidrat ve mikro besin gereksinimlerini karşılamaya yönelik stratejiler olarak değerlendirilmektedir.

Polen alternatifi olarak geliştirilen ticari veya laboratuvar bazlı protein kaynakları; soya unu, bira mayası, maya ekstraktı, spirulina, yumurta tozu ve bezelye proteini gibi yüksek biyoyararlanımlı bileşenler içermektedir (Standifer ,1978; DeGrandi-Hoffman ve Chen, 2016). Bu materyallerin, polen kalitesi düşük olduğunda veya polen kıtlığı ortaya çıktığında, işçi arıların hipofaringeal bez gelişimini desteklediği ve yavru üretimini artırdığı

bilinmektedir. Bununla birlikte, doğal polenin biyokimyasal çeşitliliği ve sterol profili tam olarak taklit edilemediğinden, yapay diyetlerin etkinliği polenle karşılaştırıldığında sınırlı kalabilmektedir. Örneğin, 24-methylencholesterol gibi temel sterollerin eksikliği, yapay diyetlerin fizyolojik etkinliğini azaltan önemli faktörlerden biridir (Herbert ve Shimanuki, 1980).

Modern beslenme uygulamalarının önemli bir bileşeni de koloniye sağlanan karbonhidrat takviyeleridir. Özellikle nektar akımının zayıf olduğu dönemlerde verilen şeker şurupları (sakkaroz şurubu, invert şurup, glukoz-fruktoz şurubu), koloni enerji metabolizmasını desteklemekte ve koloni gücünün korunmasına katkı sağlamaktadır (Crailsheim, 1990). Ancak karbonhidrat takviyelerinin uzun süreli ve yüksek miktarda uygulanması, besin çeşitliliğini azaltarak bağırsak mikrobiyotasının kompozisyonunu olumsuz etkileyebilir ve bağışıklık kapasitesini zayıflatır (Raymann ve Moran, 2018). Bu nedenle karbonhidrat takviyeleri, yalnızca çevresel gereklilik olduğunda ve kontrollü miktarlarda kullanılmalıdır.

Son yıllarda geliştirilen fonksiyonel yapay diyetler, yalnızca protein ve karbonhidrat sağlamanın ötesine geçerek probiyotik, prebiyotik ve fitokimyasal destekler içermektedir. Propolis ekstraktları, flavonoidler, organik asitler ve antioksidan bileşiklerle zenginleştirilmiş besin formülasyonlarının, arı bağışıklığını güçlendirdiği, *Nosema* spp. enfeksiyonlarını azalttığı ve oksidatif stresi hafiflettiği bildirilmektedir (Gherman ve Denner, 2014). Ayrıca *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* türleri ile desteklenen probiyotik takviyeler, arı bağırsak sağlığını iyileştirerek patojenlere karşı direnç geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Raymann ve Moran, 2018).

Polen ikamelerinin ve yapay diyetlerin başarısı, yalnızca içerik kalitesine değil, aynı zamanda koloninin fizyolojik durumu, mevsimsel ihtiyaçlar ve çevresel koşullar gibi çok boyutlu faktörlere bağlıdır. Güncel araştırmalar, karma diyet stratejilerinin yani doğal polen ile yapay protein kaynaklarının birlikte kullanımının besin çeşitliliği sağlayarak koloni performansını tek tip bir diyetle göre daha etkili biçimde artırdığını göstermektedir (DeGrandi-Hoffman ve Chen 2016). Buna karşın, yüksek kaliteli doğal polenin yerini herhangi bir yapay diyetin tam olarak dolduramayacağı, bu nedenle modern beslenme yaklaşımının temel amacının “ikame” değil “destekleme” olması gerektiği vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, modern beslenme stratejileri; koloni sağlığının korunması, yavru gelişiminin desteklenmesi, çevresel stresin

azaltılması ve bal arılarının sürdürülebilir bir üretim sistemi içinde varlığını devam ettirebilmesi açısından kritik bir araç olarak değerlendirilmektedir.

6. SONUÇ

Bal arılarının beslenmesi, koloni sağlığını, verimliliğini, bağışıklık fonksiyonlarını ve genel ekolojik dayanıklılığını doğrudan etkileyen temel bir bileşendir. Doğal polen ve nektar kaynaklarının miktarı ve çeşitliliği, hem yavru gelişimini hem de işçi arı fizyolojisini belirleyen kritik mikrobelerin koloniye aktarılmasını sağlar. Özellikle polen kalitesi ve besin çeşitliliği, koloninin bağışıklık yanıtı, stres faktörlerine toleransı ve üretim kapasitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bununla birlikte tarımsal monokültür, pestisit kullanımı ve habitat kayıpları gibi çevresel baskılar, doğal yem kaynaklarını azaltarak kolonilerin besinsel stres yaşamasına ve fizyolojik zayıflıkların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle modern arıcılık uygulamalarında doğal besin kaynaklarını destekleyici besleme stratejileri, koloni sağlığının sürdürülebilirliği açısından zorunlu hâle gelmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, koloni sağlığını ve verimliliğini artırmaya yönelik uygulanabilir öneriler aşağıda sunulmuştur.

- 1. Doğal Bitki Çeşitliliğinin Artırılması:** Koloni besin profilinin zenginleşmesi için arı merası oluşturma projeleri teşvik edilmeli; tarım alanlarında polen ve nektar açısından zengin, çok yıllık bitkilerin ekimi artırılmalıdır.
- 2. Mevsimsel Takviyeli Besleme Programları:** Nektar ve polen kıtlığı dönemlerinde koloni gelişiminin aksamasını önlemek amacıyla, bilimsel verilere dayalı mevsimsel besleme planları uygulanmalıdır.
- 3. Yüksek Kaliteli Polen Alternatiflerinin Kullanımı:** Doğal polenin bulunmadığı dönemlerde, besinsel açıdan dengeli yapay diyetler ve yüksek kaliteli protein kaynakları tercih edilmeli; ticari ürünlerin içerikleri mutlaka analiz edilmelidir.
- 4. Pestisit Maruziyetinin Azaltılması:** Beslenme stresinin pestisit etkileriyle birleşerek koloni kayıplarını artırdığı göz önünde bulundurularak, zirai ilaç kullanımının arı dostu uygulamalarla sınırlandırılması gerekmektedir.
- 5. Koloni Besin Stoklarının Düzenli İzlenmesi:** Arı sütü üretimi, yavru miktarı ve işçi arı fizyolojik durumunu etkileyen besin stokları

belirli aralıklarla kontrol edilmeli ve eksiklikler erkenden giderilmelidir.

6. **İklim Değişikliğine Uyumlu Arıcılık Yönetimi:** Değişen flora döngüleri dikkate alınarak besleme zamanlamaları yeniden düzenlenmeli, aşırı sıcaklık ve kuraklık dönemlerinde beslenme takviyesi artırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Alaux, C., Ducloz, F., Crauser, D., & Le Conte, Y. (2010). Diet effects on honeybee immunocompetence. *Biology letters*, 6(4), 562-565.
- Bogdanov, S. (2012). Pollen: Nutrition, functional properties, health. *Magnesium*, 20, 350.
- Brodschneider, R., & Crailsheim, K. (2010). Nutrition and health in honey bees. *Apidologie*, 41(3), 278-294.
- Campos, M. G., Bogdanov, S., de Almeida-Muradian, L. B., Szczesna, T., Mancebo, Y., Frigerio, C., & Ferreira, F. (2008). Pollen composition and standardisation of analytical methods. *Journal of Apicultural Research*, 47(2), 154-161.
- Carter, C., Shafir, S., Yehonatan, L., Palmer, R. G., & Thornburg, R. (2006). A novel role for proline in plant floral nectars. *Naturwissenschaften*, 93(2), 72-79.
- Crailsheim, K. (1990). The protein balance of the honey bee worker. *Apidologie*, 21(5), 417-429.
- Crailsheim, K. (1992). The flow of jelly within a honeybee colony. *Journal of comparative physiology B*, 162(8), 681-689.
- DeGrandi-Hoffman, G., Wardell, G., Ahumada-Segura, F., Rinderer, T., Danka, R., & Pettis, J. (2008). Comparisons of pollen substitute diets for honey bees: consumption rates by colonies and effects on brood and adult populations. *Journal of apicultural research*, 47(4), 265-270.
- DeGrandi-Hoffman, G., Chen, Y., Rivera, R., Carroll, M., Chambers, M., Hidalgo, G., & de Jong, E. W. (2016). Honey bee colonies provided with natural forage have lower pathogen loads and higher overwinter survival than those fed protein supplements. *Apidologie*, 47(2), 186-196.
- Di Pasquale, G., Salignon, M., Le Conte, Y., Belzunces, L. P., Decourtye, A., Kretzschmar, A., ... & Alaux, C. (2013). Influence of pollen nutrition on honey bee health: do pollen quality and diversity matter?. *PloS one*, 8(8), e72016.
- Di Pasquale, G., Alaux, C., Le Conte, Y., Odoux, J. F., Pioz, M., Vaissière, B. E., ... & Decourtye, A. (2016). Variations in the availability of pollen resources affect honey bee health. *PloS one*, 11(9), e0162818.

- Furse, S., Koch, H., Wright, G. A., & Stevenson, P. C. (2023). Sterol and lipid metabolism in bees. *Metabolomics*, 19(9), 78.
- Gherman, B. I., Denner, A., Bobiş, O., Dezmirean, D. S., Mărghitaş, L. A., Schlüns, H., ... & Erler, S. (2014). Pathogen-associated self-medication behavior in the honeybee *Apis mellifera*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 68(11), 1777-1784.
- Gardener, M. C., & Gillman, M. P. (2002). The taste of nectar—a neglected area of pollination ecology. *Oikos*, 98(3), 552-557. Gherman, B. I., et al. (2014).
- Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., & Rotheray, E. L. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229), 1255957.
- Herbert, E. W., & Hill, D. A. (1992). Honey bee nutrition. The hive and the honey bee, 3, 197-233.
- Herbert Jr, E. W., Shimanuki, H., & Shasha, B. S. (1980). Brood rearing and food consumption by honeybee colonies fed pollen substitutes supplemented with starch-encapsulated pollen extracts. *Journal of Apicultural Research*, 19(2), 115-118.
- Grassnigg, N., & Crailsheim, K. (2005). Differences in drone and worker physiology in honeybees (*Apis mellifera*). *Apidologie*, 36(2), 255-277.
- Human, H., Nicolson, S. W., Strauss, K., Pirk, C. W. W., & Dietemann, V. (2007). Influence of pollen quality on ovarian development in honeybee workers (*Apis mellifera scutellata*). *Journal of Insect Physiology*, 53(7), 649-655.
- Kühnholz, S., & Seeley, T. D. (1997). The control of water collection in honey bee colonies. *Behavioral ecology and sociobiology*, 41(6), 407-422.
- Lau PW, Nieh JC. Salt preferences of honey bee water foragers. *J Exp Biol*. 2016 Mar;219(Pt 6):790-6. doi: 10.1242/jeb.132019. Epub 2016 Jan 28. PMID: 26823100.
- Mattila, H. R., & Otis, G. W. (2006). Influence of pollen diet in spring on development of honey bee (Hymenoptera: Apidae) colonies. *Journal of economic entomology*, 99(3), 604-613.
- Nicolson, S. W. (2011). Bee food: the chemistry and nutritional value of nectar, pollen and mixtures of the two. *African Zoology*, 46(2), 197-204.

- Özbakır, G. Ö., & Alişiroğlu, D. G. (2019). Bal arılarında beslenme fizyolojisi ve metabolizması. *Journal of Animal Production*, 60(1), 67–74.
- Pernal, S.F., Currie, R.W. (2001). The influence of pollen quality on foraging behavior in honeybees (*Apis mellifera* L.). *Behav Ecol Sociobiol* 51, 53–68
- Raymann, K., & Moran, N. A. (2018). The role of the gut microbiome in health and disease of adult honey bee workers. *Current opinion in insect science*, 26, 97-104.
- Roubik, D. W., & Buchmann, S. L. (1984). Nectar selection by *Melipona* and *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) and the ecology of nectar intake by bee colonies in a tropical forest. *Oecologia*, 61(1), 1-10.
- Schmickl, T., & Crailsheim, K. (2004). Inner nest homeostasis. *Apidologie*, 35, 249–263.
- Standifer, L. N. (1978). Supplemental feeding of honey bee colonies (No. 413). US Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Furse, S., Koch, H., Wright, G. A., & Stevenson, P. C. (2023). Sterol and lipid metabolism in bees. *Metabolomics*, 19(9), 78.
- Tosi, S., Nieh, J. C., Sgolastra, F., Cabbri, R., & Medrzycki, P. (2017). Neonicotinoid pesticides and nutritional stress synergistically reduce survival in honey bees. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1869), 20171711.
- Winston, M. L. (1991). The biology of the honey bee. harvard university press.
- Wright, G. A., Nicolson, S. W., & Shafir, S. (2018). Nutritional physiology and ecology of honey bees. *Annual review of entomology*, 63, 327-344.

BÖLÜM 7

TROPILAEAPS AKARININ BİYOLOJİK ÖZELLİKLERİ, KOLONİ DÜZEYİNDE ZARARLARI, TEŞHİSİ VE MÜCADELE YÖNTEMLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Sedat YELKOVAN^{1,2,3*}

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986620>

¹Bingöl Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Zootečni ve Hayvan Besleme Bölümü, Zootečni ABD, Bingöl, Türkiye

²Bingöl Üniversitesi, Arı ve Doğal Ürünler Ar-Ge ve Ür-Ge Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bingöl, Türkiye,

³Bingöl Üniversitesi, Arıcılık Araştırma Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bingöl, Türkiye,

syelkovan@bingol.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7209-6350

1. Giriş

Tropilaelaps akarları, Asya kökenli bal arısı türlerinin yavru döneminde gelişen ektoparazitik akarlar olup, son yıllarda batı bal arısı (*Apis mellifera* L.) üzerinde de hızla yayılmaya başlamıştır. Tropilaelaps'ın arı sağlığı açısından önemini artıran temel özellikleri yüksek üreme hızları, kısa yaşam döngüleri ve gelişmekte olan yavrulara verdikleri ciddi fizyolojik zararlarla ilişkilidir (de Guzman ve ark., 2017). Tropilaelaps spp., uzun süre Güney ve Güneydoğu Asya'ya özgü bir parazit olarak değerlendirilmiştir. Ancak küresel arıcılığın artan ticari trafiği, kovan ve ana arı hareketliliği, petek ve ekipman transferleri bu parazitin yeni bölgelere taşınmasını kolaylaştırmıştır. Bu gelişmeler doğrultusunda Avrupa'da *Tropilaelaps mercedesae*'nin yerleşik popülasyonlarının tespit edilmiş olması, bu akarın potansiyel küresel etkisini açıkça ortaya koymuştur (de Guzman ve ark., 2017; Chantawannakul ve ark., 2018; Brandorf ve ark., 2025). (Şekil 1).



Native giant honey bees

Tropilaelaps clareae
Tropilaelaps mercedesae



European honey bee (*Apis mellifera*)

Şekil 1: Tropilaelaps akarlarının doğal konaklarından Avrupa bal arısına (*Apis mellifera* L.) geçişini gösteren temsili şematik görünüm (Chantawannakul ve ark., 2018).

EFSA (European Food Safety Authority)'nın 2013 yılında yayımladığı kapsamlı risk değerlendirmesi Tropilaelaps'ın Avrupa'ya giriş potansiyelinin sanıldığından çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Raporda hem kovan

hareketliliğinin hem de yetiştiricilik uygulamalarının bu riskle yakından ilişkili olduğu vurgulanmıştır (EFSA, 2013). Türkiye açısından risk özellikle sınır komşuları olan İran ve Kafkasya bölgesinde *Tropilaelaps*'ın tespit edilmiş olmasıyla daha belirgin hâle gelmiştir (Janaishia ve ark., 2024; Aydın, 2024). *Tropilaelaps*'ın önemini artıran bir diğer nokta ise *Varroa destructor* ile benzer ekolojik nişleri paylaşmasıdır. Ancak *Varroa*'nın aksine *Tropilaelaps*'ın kuluçka bağımlılığının daha yüksek olması, kısa foretik evreleri ve daha hızlı üreme stratejileri koloni çöküşünün çok daha kısa sürede gerçekleşmesine yol açabilmektedir.

2. *Tropilaelaps* Türlerinin Sınıflandırılması

Tropilaelaps cinsi Mesostigmata takımına ve Laelapidae familyasına aittir. *Tropilaelaps* türlerinin taksonomisi uzun yıllar boyunca tartışmalı olmuş, tür sınırlarının netleşmemesi araştırmalar arasında karşılaştırma yapmayı zorlaştırmıştır. Anderson ve Morgan'ın (2007) revizyon çalışmasıyla birlikte *Tropilaelaps* cinsi altında dört türün varlığı resmi olarak kabul edilmiştir. Bunlar *Tropilaelaps clareae*, *Tropilaelaps mercedesae*, *Tropilaelaps thaii* ve *Tropilaelaps koenigerum*'dur.

Bu türler arasında *Apis mellifera* üzerinde üreme başarısı en yüksek olan tür *Tropilaelaps mercedesae*'dir ve ekonomik olarak en büyük tehdit de bu türden kaynaklanmaktadır (de Guzman ve ark., 2017). Morfolojik olarak türlerin birbirine çok benzemesi teşhis sürecini güçleştirdiğinden moleküler yöntemlerin kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Anderson ve Morgan (2007) çalışmasında (Şekil 2) *Tropilaelaps* türlerinin ayırımında COI mitokondriyal gen bölgesinin ve ITS1–5.8S–ITS2 bölgesinin güvenilir markerlar olduğu belirtilmektedir. Bu gen bölgelerinde türler arasında belirgin dizilim farkları bulunmakta, bu da PCR tabanlı tanıyı yüksek doğruluk oranıyla mümkün kılmaktadır.

Mnemonic name	9ACAR	Lineage	cellular organisms > Eukaryota (eucaryotes) > Opisthokonta > Metazoa (metazoans) > Eumetazoa > Bilateria > Protostomia > Ecdysozoa > Panarthropoda > Arthropoda (arthropods) > Chelicerata > Arachnida (arachnids) > Acari (mites and ticks) > Parasitiformes > Mesostigmata > Monogynaspida > Gamasina > Dermanyssolidea > Laelapidae > Tropilaelaps
Taxon ID	418985	Links	www.ncbi.nlm.nih.gov
Scientific name	Tropilaelaps mercedesae		
Parent	Tropilaelaps		
Other names	Tropilaelaps mercedesae Anderson & Morgan, 2007		
Rank	species		

Sekil 2: *Tropilaelaps mercedesae* türünün taksonomisi
(<https://www.uniprot.org/taxonomy/418985>)

Morfolojik değerlendirmelerde *T. mercedesae*'nin diğer türlere göre daha geniş bir vücut yapısına sahip olduğu ve dorsal kalkanının daha belirgin olduğu bildirilmiştir (de Guzman ve ark., 2017). *Tropilaelaps* türlerinin hepsinin uzun-ince bir morfolojiye sahip olması ve çok hızlı hareket edebilmeleri sayesinde özellikle larva gözlerinde büyük bir hızla yayılmasına neden olmaktadır.

Taksonominin netleşmesi, tür dağılımlarının doğru şekilde belirlenebilmesi ve risk analizlerinin daha sağlıklı yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Güncel veriler *Tropilaelaps* türleri arasındaki genetik çeşitliliğin sanıldığından daha yüksek olabileceğini ve ileride yeni türlerin tanımlanmasının olası olduğunu göstermektedir.

3. Coğrafi Yayılım ve Yayılma Dinamikleri

Tropilaelaps akarlarının coğrafi yayılımı uzun yıllar Güney ve Güneydoğu Asya bölgesiyle sınırlı kalmış olsa da günümüzde bu sınırların hızla genişlediği görülmektedir. *Tropilaelaps*'ın doğal konakları *Apis dorsata*, *Apis breviligula* ve *Apis laboriosa* gibi Asya'ya özgü dev bal arılarıdır (Anderson ve Roberts, 2013). Bu doğal konaklarda binlerce yıllık evrimsel süreç içinde nispeten dengeli bir parazit-konak ilişkisi gelişmiştir. Ancak *Apis mellifera*'nın bölgeye getirilmesiyle birlikte *Tropilaelaps* türleri yeni bir konağa geçiş yapmış ve bu yeni ilişkide denge tamamen bozulmuştur.

Güncel çalışmalar *Tropilaelaps* akarının artık yalnızca Asya'da sınırlı olmadığını açık biçimde göstermektedir. Özellikle Rusya'nın Krasnodar bölgesinde *Tropilaelaps mercedesae*'nin yerleşik popülasyonlarının bulunduğu dair raporlar, Avrupa kıtası için çok önemli bir erken uyarı niteliğindedir (Brandorf ve ark., 2025) (Şekil 3). Aynı şekilde İran'da tespit edilen *Tropilaelaps* varlığı Türkiye açısından stratejik bir risk oluşturmakta ve

arı kolonilerinin korunması için acil önlem alınması gerekliliğini gündeme getirmektedir (Aydın, 2024).



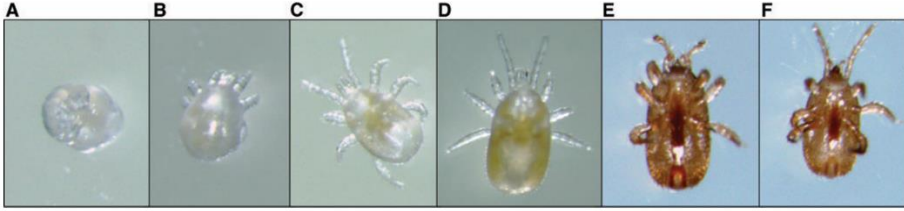
Şekil 3: *Tropilaelaps mercedesae*'nin Rusya'daki yayılışını gösteren şematik harita (Brandorf ve ark., 2025).

EFSA (2013) raporunda *Tropilaelaps* spp.'nin Avrupa'ya giriş riskinin orta-yüksek düzeyde olduğu bildirilmiştir. Risk değerlendirmesinde arı kolonilerinin ve ana arıların uluslararası taşınması birincil giriş yolu olarak görülmektedir. Ayrıca petek, balmumu, arı ürünleri ve arıcılık ekipmanlarının sınır kontrollerinin zayıf olduğu bölgelerde akarın fark edilmeden taşınma olasılığı oldukça yüksektir. Buna ek olarak sürü davranışı gösteren kolonilerde arıların doğal hareketleri de bölgesel yayılımımda rol oynayabilmektedir.

Foretik dönemin kısa oluşu *Tropilaelaps* akarının yetişkin arılar üzerinde uzun süre hayatta kalmasını zorlaştırmaktadır; ancak kapalı yavru gözlerinde üreme hızı son derece yüksektir (EFSA, 2013). Bu nedenle koloniler arasında bulaşma çoğunlukla geniş çaplı arı hareketliliği ile gerçekleşmektedir (Gill ve ark., 2024). İklim değişikliği nedeniyle sıcak dönemlerin uzaması ve kuluçka üretiminin yılın daha uzun kısmına yayılması ise *Tropilaelaps*'ın yeni coğrafyalara uyum sağlama potansiyelini artırmaktadır (Santrač ve ark., 2025).

4. Tropilaelaps Akarının Biyolojisi ve Yaşam Döngüsü

Tropilaelaps akarlarının biyolojisi ve yaşam döngüsü arı kolonileri üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında temel rol oynamaktadır. Tropilaelaps cinsine ait akar türlerinin tüm yaşam döngüsü kapalı yavru gözlerinde gerçekleşir. Dişi akarlar, yumurtalarını kapanmak üzere olan işçi arı gözlerine bırakır. Gelişim süreci *Varroa destructor*'a göre belirgin biçimde daha hızlıdır. Yumurtadan çıkan akar larvası, protonimf ve deutonimf evrelerini hızla tamamlayarak ergin formuna ulaşır (de Guzman ve ark., 2017) (Şekil 4). Gelişim sürecinin bu kadar kısa olması Tropilaelaps popülasyonlarının koloni içinde hızla artışına neden olabilir.



Şekil 4: *T. mercedesae*'nin gelişim evreleri: (A) Yumurta, (B) Altı bacaklı larva, (C) Protonimf, (D) Deutonimf, (E) Ergin dişi ve (F) Ergin erkek (de Guzman ve ark., 2017).

Tropilaelaps'ın beslenme davranışı larva üzerinde çok sayıda küçük yara açmasıyla karakterizedir. Bu durum Varroa'nın aksine daha geniş doku hasarına yol açmaktadır (de Guzman ve ark., 2017) (Şekil 5). Akarlar pupanın hemolenfini tüketerek gelişmekte olan arı yavrusunun zayıflamasına ve gelişim süreçlerinin aksamasına neden olur.



Şekil 5: Bal arısı larvası üzerinde beslenen dişi *Tropilaelaps mercedesae*'lere ait çok sayıdaki beslenme lekeleri (de Guzman ve ark., 2017).

Foretik dönem *Tropilaelaps* biyolojisinin kritik noktalarından biridir. *Tropilaelaps* erginleri yetişkin arı üzerinde yalnızca kısa süreli olarak taşınabilir (Woyke, 1984; Koeniger ve Muzaffar, 1988). Bu kısa foretik dönem *Tropilaelaps* akarının kuluçka yokluğuna toleransının düşük olduğunu göstermektedir. EFSA (2013) bazı laboratuvar çalışmalarında bu sürenin sekiz güne kadar uzadığını bildirmiş olsa da, bu süre doğal koloni koşullarını temsil etmemektedir. Bu nedenle arı kolonilerinde kuluçka üretiminin kesintiye uğradığı dönemlerde *Tropilaelaps* popülasyonlarının hızla çoktüğü bilinmektedir.

5. *Tropilaelaps* Akarının Arı Kolonileri Üzerindeki Etkileri

Tropilaelaps akarlarının arı kolonileri üzerindeki etkileri çok yönlü ve oldukça yıkıcıdır. Gelişmekte olan yavrular üzerinde beslenen bu akarlar pupanın hemolenfini tüketerek ciddi fizyolojik bozulmalara yol açarlar.

Tropilaelaps'ın açtığı beslenme yaraları Varroa'nın açtığı yaralara kıyasla daha fazla sayıdadır ve pupanın dokularını geniş bir alanda zayıflatır. Bu durum yavrunun büyüme sürecini olumsuz etkiler, metabolik süreçleri bozar ve ölüm oranlarını artırır (de Guzman ve ark., 2017). Kuluçka gözlerinde düzensiz bir görünüm, ölü veya parçalanmış pupalar, açılmış kapaklar ve ergin arılarda gözlenen kanat deformasyonu Tropilaelaps enfestasyonunun tipik bulgularıdır (Şekil 6).



Şekil 6: *Tropilaelaps mercedesae*'nin bal arısında neden olduğu kanat deformasyonu (Chantawannakul ve ark., 2018).

Bazı saha raporlarında Tropilaelaps'ın bulunduğu bölgelerde koloni kayıplarının %50'nin üzerine çıktığı belirtilmiştir (Brandorf ve ark., 2025; Gill ve ark., 2024). Bu sonuçlar Tropilaelaps'ın kısa sürede yüksek popülasyonlara ulaşabilen bir parazit olmasıyla ilişkilidir. Tropilaelaps'ın ayrıca arı virüslerinin taşınmasında rol oynayabileceği bildirilmiştir. Dainat ve ark. (2008) *Tropilaelaps mercedesae*'nin virüs taşıyabildiğini göstermiştir. Forsgren ve ark. (2008) özellikle Deforme Kanat Virüsü'nün (DWV) Tropilaelaps ile ilişkisini

deneysel olarak doğrulamıştır. Bu bulgular *Tropilaelaps* enfestasyonlarının yalnızca fiziksel hasarla sınırlı olmadığını, kolonide viral yükü artırarak ikincil enfeksiyonların meydana geldiğini göstermektedir.

6. *Tropilaelaps* Akarının Teşhisi

Tropilaelaps enfestasyonunun erken teşhisi koloni sağlığının korunması açısından büyük önem taşır. Sahada yapılan gözlemler çoğunlukla kapalı kuluçka gözlerinde düzensizliklerin fark edilmesiyle başlar (Chantawannakul ve ark., 2018). (Şekil 7). *Tropilaelaps* spp. erginlerinin petek üzerinde çok hızlı hareket ediyor olması teşhis sırasında dikkat çekici bir işarettir (EFSA, 2013). *Tropilaelaps* tespitinde en güvenilir saha yöntemi kapalı kuluçka gözlerinin açılmasıdır. Gill ve ark. (2024), 100 kapalı gözün açılmasının enfestasyonu yüksek doğrulukla ortaya çıkardığını belirtmiştir. Ayrıca *Tropilaelaps* spp. teşhisinde bal arısı erginleri (200 adet) toplanıp bir kavanoza eklendikten sonra deterjanlı su, alkol (%70) ve pudra şekeri ile çalkalama yöntemleri de uygulanabilmektedir (Anderson ve Roberts, 2013; EFSA, 2013; Gill ve ark., 2024).



Şekil 7: *Tropilaelaps* ile enfeste olmuş kolonide görülen düzensiz yavru görünümü (Chantawannakul ve ark., 2018).

Laboratuvar düzeyinde teşhis daha spesifik olup morfolojik ve moleküler analizleri içermektedir. Morfolojik teşhiste vücut şekli, renk, ağız yapısı ve

bacak segmentleri gibi kriterler kullanılır. Ancak türler arasındaki morfolojik benzerlikler nedeniyle moleküler tanı çoğu zaman zorunludur. Anderson ve Roberts (2013) protokolünde COI ve ITS bölgelerinin PCR amplifikasyonu *Tropilaelaps* türlerinin ayırt edilmesinde en güvenilir yöntem olarak belirtilmiştir.

7. *Tropilaelaps* Akarı İle Mücadele

Tropilaelaps spp. ile mücadele yaklaşımı bu akarların biyolojik özellikleri nedeniyle *Varroa destructor*'dan bazı farklılıklar göstermektedir. *Tropilaelaps*'ın gelişim süreci kuluçka gözleri ile sınırlı olduğundan kuluçka kesintisi en etkili biyolojik mücadele yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Ana arının kafese alınarak yumurta atımının geçici olarak durdurulması *Tropilaelaps* popülasyonunda belirgin bir düşüş sağlar, çünkü akarların yetişkin arılar üzerinde uzun süre hayatta kalma kapasitesi yoktur (Woyke, 1984; Koeniger ve Muzaffar, 1988).

Kimyasal mücadele yöntemlerinin etkinliği sınırlıdır. Formik asit ve timol gibi bazı organik asitlerin belirli koşullar altında etkili olabileceği bildirilmiştir; ancak bu etkinlik genellikle *Varroa*'ya kıyasla daha düşüktür (Raffique ve ark., 2012, Anderson ve Roberts, 2013). *Tropilaelaps*'ın kapalı gözlerde bulunması kimyasal maddelerin onlara ulaşmasını engellediğinden, kimyasal mücadele tek başına yeterli değildir.

Hijyenik davranışı yüksek kolonilerin *Tropilaelaps* enfestasyonuna karşı daha dirençli olduğu bildirilmiştir (Boecking ve Spivak., 1999; de Guzman ve ark., 2017). Bu nedenle hijyenik davranışın ıslah programlarına dahil edilmesi *Tropilaelaps* kontrolünde uzun vadeli bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Kolonilerin yer değiştirmesi, ekipman transferi ve kraliçe arı ticareti *Tropilaelaps* akarının yayılımında kritik rol oynadığından karantina uygulamaları ve uluslararası standartların sıkı uygulanması gerekmektedir.

8. Risk Değerlendirmesi ve Avrupa'da Yayılışı İçin Olası Senaryolar

Avrupa'daki güncel parazit baskısı içinde *Tropilaelaps* akarı, gelecekte önemli bir tehdit olarak değerlendirilmektedir (Vasić ve ark., 2025). EFSA (2013), *Tropilaelaps* spp. için Avrupa'ya giriş riskini orta-yüksek düzeyde değerlendirmiştir. Bu değerlendirmede uluslararası ticaret, arı kolonilerinin

taşınması, iklimin uygunluğu ve belirli bölgelerin doğal yayılım hatlarına yakınlığı etkili olmuştur.

Tropilaelaps akarının halihazırda Avrupa'nın doğu sınırında, Rusya'nın Krasnodar bölgesinde yerleşik hâle gelmiş olması Avrupa'nın geri kalanı için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Brandorf ve ark., 2025). Bu popülasyonların varlığı Tropilaelaps'ın Avrupa iklim koşullarında hayatta kalabileceğini fikrini vermektedir.

Türkiye açısından risk özellikle İran ve Gürcistan sınırında rapor edilen Tropilaelaps varlığı nedeniyle artmaktadır (Aydın, 2024; Janashia ve ark., 2024). Türkiye'de gezginci arıcılık uygulamalarının yaygın olması, kolonilerin yıl içinde uzun mesafelere taşınmasına neden olmakta ve Tropilaelaps gibi dış kaynaklı parazitlerin tespit edilmeden ülkeye giriş ihtimalini artırmaktadır.

9. Sonuç

Tropilaelaps akarları, küresel arıcılık açısından giderek artan bir tehdit oluşturmaktadır. Yüksek üreme hızları, kuluçka bağımlılıkları, kısa yaşam döngüleri ve arı yavrularında oluşturdukları ciddi patolojik etkiler Tropilaelaps'ın *Varroa destructor* kadar, hatta belirli koşullarda daha yıkıcı bir parazit olabileceğini göstermektedir. Tropilaelaps akarının son yıllarda Asya dışındaki bölgelerde de tespit edilmesi ve özellikle Rusya'da yerleşik popülasyonların bulunması bu tehdidin artık bölgesel olmaktan çıktığını göstermektedir.

Arıcılıkta uluslararası ticaretin artması Tropilaelaps'ın Avrupa ve Orta Doğu'ya giriş riskini daha da artırmaktadır. Türkiye gibi arıcılık hareketliliği yüksek olan ülkelerde Tropilaelaps'ın girişini önlemek için etkin izleme programlarının uygulanması zorunludur. Tropilaelaps kontrolünde kuluçka kesintisi gibi biyoteknik yöntemlerin geliştirilmesi, teşhis protokollerinin yaygınlaştırılması ve hijyen davranışı üzerinden ıslah çalışmalarının artırılması kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak Tropilaelaps spp., yakın gelecekte arı sağlığı yönetiminde merkezi bir konuma sahip olabilir ve arıcılık faaliyetlerinin sürdürülebilirliği açısından varlığı stratejik bir tehdit olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Anderson, D. L., & Roberts, J. M. (2013). Standard methods for *Tropilaelaps* mites research. *Journal of Apicultural Research*, 52(4), 1-16.
- Anderson, D. L., & Morgan, M. J. (2007). Genetic and morphological variation of bee-parasitic *Tropilaelaps* mites (Acari: Laelapidae): new and re-defined species. *Experimental and Applied Acarology*, 43(1), 1-24.
- Aydin, L. (2022). *Aethina tumida* (Small Hive Beetle; SHB) and *Tropilaelaps* spp. Mite; an emerging threat to Turkey Honey Bees. *Veterinary Journal of Ankara University/Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 69(3).
- Boecking, O., & Spivak, M. (1999). Behavioral defenses of honey bees against *Varroa jacobsoni* Oud. *Apidologie*, 30(2-3), 141-158.
- Brandorf, A., Ivoilova, M. M., Yañez, O., Neumann, P., & Soroker, V. (2025). First report of established mite populations, *Tropilaelaps mercedesae*, in Europe. *Journal of Apicultural research*, 64(3), 842-844.
- Dainat, B., Ken, T., Berthoud, H., & Neumann, P. (2009). The ectoparasitic mite *Tropilaelaps mercedesae* (Acari, Laelapidae) as a vector of honeybee viruses. *Insectes sociaux*, 56(1), 40-43.
- Chantawannakul, P., Ramsey, S., Khongphinitbunjong, K., & Phokasem, P. (2018). *Tropilaelaps* mite: an emerging threat to European honey bee. *Current opinion in insect science*, 26, 69-75.
- de Guzman, L. I., Williams, G. R., Khongphinitbunjong, K., & Chantawannakul, P. (2017). Ecology, life history, and management of *Tropilaelaps* mites. *Journal of economic entomology*, 110(2), 319-332.
- EFSA Panel on Animal Health and Welfare (AHAW). (2013). Scientific Opinion on the risk of entry of *Aethina tumida* and *Tropilaelaps* spp. in the EU. *EFSA Journal*, 11(3), 3128.
- Forsgren, E., De Miranda, J. R., Isaksson, M., Wei, S., & Fries, I. (2009). Deformed wing virus associated with *Tropilaelaps mercedesae* infesting European honey bees (*Apis mellifera*). *Experimental and Applied Acarology*, 47(2), 87-97.
- Gill, M. C., Chuttong, B., Davies, P., Etheridge, D., Panyaraksa, L., Tomkies, V., ... & Budge, G. E. (2024). Assessment of the efficacy of field and

- laboratory methods for the detection of *Tropilaelaps* spp. PloS one, 19(9), e0301880.
- Janashia, I., Uzunov, A., Chen, C., Costa, C., & Cilia, G. (2024). First report on *Tropilaelaps mercedesae* presence in Georgia: The mite is heading westward!. Journal of Apicultural Science, 68(2), 183-188.
- Koeniger, N., & Muzaffar, N. J. J. O. A. R. (1988). Lifespan of the parasitic honeybee mite, *Tropilaelaps clareae*, on *Apis cerana*, *dorsata* and *mellifera*. Journal of Apicultural Research, 27(4), 207-212.
- Raffique, M. K., Mahmood, R., Aslam, M., ve Sarwar, G. (2012). Control of *Tropilaelaps clareae* mite by using formic acid and thymol in honey bee *Apis mellifera* L. colonies. Pakistan J. Zool, 44(4), 1129-1135.
- Santrač, V., Tlak Gajger, I., Pislak Ocepek, M., Smodiš Škerl, M. I., Glavinić, U., Kovačić, M., ve Uzunov, A. (2025). *Tropilaelaps* mite outbreaks: A framework for risk communication and systemic preparedness. In 30th Annual Counselling of Doctors of Veterinary Medicine of the Republic of Srpska (Bosnia and Herzegovina)-International Scientific Meeting- Proceedings (pp. 111-112). Veterinary Chamber of the Republic of Srpska.
- Vasić, A., Rokvić, N., Radanović, O., Kureljusić, B., & Kureljusić, J. (2025). Parasites of honey bees and brood that can threaten bee health and the production of honey and bee products in Europe. 36. savetovanje veterinara Srbije, (Tematsko zasedanje VII Slobodne teme), 243-246.
- Woyke, J. (1984). Survival and prophylactic control of *Tropilaelaps clareae* infesting *Apis mellifera* colonies in Afghanistan. Apidologie, 15(4), 421-434.
- <https://www.uniprot.org/taxonomy/418985>

BÖLÜM 8

***Varroa destructor*'da SENTETİK AKARİSİT DİRENCİ: FENOTİPİK ve GENOTİPİK MEKANİZMALAR**

Doç. Dr. Harun Kaya KESİK¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986664>

¹ Bingöl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Parazitoloji Anabilim Dalı
Bingöl, Türkiye, 12000, Orcid No: 0000-0002-8480-8597
E-mail: hkesik@bingol.edu.tr

1. Arıcılığın Önemi ve *Varroa destructor*'un Etkisi

Arıcılık, bal, balmumu, polen, propolis, arı sütü ve arı zehiri gibi yüksek katma değerli ürünlerin üretiminin yanı sıra, bitkilerin döllenmesine katkı sağlayarak hem hayvansal hem de bitkisel üretimi destekleyen stratejik bir tarımsal faaliyetidir. Toprağa olan bağımlılığının az olması ve diğer tarımsal faaliyetlerle entegre yürütülebilmesi nedeniyle, tarih boyunca hem Türkiye'de hem de dünyada yaygın şekilde uygulanmaktadır. Türkiye; coğrafi konumu, iklim çeşitliliği ve zengin bitki örtüsü sayesinde arıcılık açısından oldukça elverişli bir ülkedir (Sarıözkan vd. 2009). Günümüzde arıcılık küresel ölçekte hızla gelişen ve ekonomik değeri artan bir sektör haline gelmiştir (Sancak vd. 2013). Türkiye, 8 milyondan fazla kovana sahip olmasına rağmen, kovan başına düşen bal verimi dünya ortalamasının altındadır. Bu verim düşüklüğünün nedenlerinden biri de arıcılığı tehdit eden hastalık ve parazitlerdir. Bal arıları (*Apis mellifera*), omurgasızlar aleminin böcekler sınıfına ait olup, en yaygın yetiştirilen arı türüdür. Bu türü tehdit eden en önemli dış parazitlerden biri, zorunlu ektoparazit olan *Varroa destructor*'dur. Arıların larva, pupa ve ergin dönemlerinde hemolenf emerek beslenen bu akar, doğrudan konak zararının yanı sıra çeşitli viral patojenlerin vektörlüğünü de yaparak dolaylı yolla koloni çöküşüne yol açmaktadır (Çakmak vd. 2003). Bu yönüyle dünya genelinde arıcılığa en büyük zararı veren artropod türü olarak kabul edilmektedir (Gajic vd. 2013; Koç vd. 2021).

2. *Varroa destructor*'un Biyolojisi ve Genetik Yapısı

Varroa türleri morfolojik ve genetik olarak birbirinden ayrılabilen farklı türleri içermektedir. Bu türler; *V. underwoodi*, *V. rindereri*, *V. jacobsoni* ve *V. destructor*'dur. Bunlar arasında en yaygın ve zararlı olan tür *V. destructor* olup, günümüzde hem Asya bal arısı (*Apis cerana*) hem de *A. mellifera*'da yayılım göstermektedir (Anderson ve Trueman, 2000). Bu tür, özellikle Kore haplotipi ile dünya çapında büyük kayıplara neden olmaktadır (Maggi vd. 2010; Rosenkranz vd. 2010). Parazit, ilkbaharda arı larvalarının gelişmesiyle birlikte çoğalmakta, erkek arı yavrularını tercih ederek üremesini sürdürmektedir. Kapalı yavru gözlerinde yumurtlayarak döngüsünü tamamlayan akarlar, petek gözlerinden çıkan arılarla birlikte kolonide yayılmaktadır (Colin vd. 1999). Yaşam döngüsünün bu özelliği hem mücadele hem de direnç gelişimi açısından önem arz etmektedir.

3. Etkileri ve Yayılımı

V. destructor, yalnızca fiziksel hasar vermekle kalmaz; aynı zamanda Deforme Kanat Virüsü (DWV), Kronik Arı Felci Virüsü (CBPV) gibi birçok virüsün de taşıyıcısıdır (Evans ve Cook, 2018). Akar yoğunluğu arttıkça, arıların gelişiminde bozulmalar, davranışsal anomaliler ve koloni kayıpları gözlenmektedir. Parazitin ülkemize 1976'da Bulgaristan'dan Trakya yoluyla giriş yaptığı ve kısa sürede tüm yurda yayıldığı bildirilmektedir (Akyol ve Korkmaz, 2005).

4. Mücadele Yöntemleri

Varroa ile mücadelede kimyasal, biyoteknik, organik ve biyolojik yöntemler kullanılmaktadır. Kimyasal mücadelede en yaygın kullanılan bileşikler arasında amitraz, flumethrin, fluvalinate, cymiazole ve coumaphos yer almaktadır (Rosenkranz vd. 2010). Ancak bu bileşiklerin uzun süreli ve yoğun kullanımı, kalıntı riskleriyle birlikte direnç gelişimini de beraberinde getirmiştir (Pettis, 2004). Türkiye'de yapılan çalışmalarda da flumethrin ve amitraza karşı direnç geliştiği rapor edilmiştir (İnak vd. 2024; Koç vd. 2021; Erdem vd. 2024). Organik asitler (formik asit, oksalik asit, laktik asit) ve uçucu yağlar (timol, nane, kekik gibi) ile yapılan alternatif mücadele yöntemleri, kimyasal kalıntı bırakmaması ve direnç geliştirme riskinin düşük olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır (Millán-Leiva, 2022). Ancak bu yöntemlerin etkinliği çevresel koşullara bağlı olup, genellikle kimyasallarla kombine kullanılması önerilmektedir.

5. *Varroa destructor*'a karşı pestisit tedavileri

Organik tedavi protokolleri, formik, oksalik ve laktik asitler gibi organik asitler veya esansiyel bitki yağları (örn. thymol) içermektedir (Calderone ve Spivak, 1995; Imdorf vd. 1999; Umpiérrez vd. 2011). Doğal bileşenlerin genel avantajları, arı ürünlerinde kalıntı birikim riskinin düşük olması ve direncin ortaya çıkma olasılığının daha düşük olmasıdır (Rosenkranz vd. 2010). Ancak, arıcılar bu ürünlerden bazılarıyla koloni düzeyinde akar seviyelerini yeterince kontrol edemediklerini bildirmişlerdir (Millán-Leiva, 2022). Organik akarisitlerin ana dezavantajı, etkinliklerinin değişken olmasıdır; çünkü sonuçlar iklim ve kovandaki koşullar (çevresel sıcaklık ve nem, kovan büyüklüğü, yavru varlığı, akar popülasyon büyüklüğü vb.) gibi dış faktörlere ve uygulama yöntemine (seçilen evaporatör/buharlaştırıcı tipi ve onun kapsadığı alan)

bağlıdır (Calderone, 1999; Calderone, 2010; Calis vd. 1998; Eguaras vd. 2003; Eischen, 1998; Rosenkranz vd. 2010; Underwood ve Currie, 2003). Bu durum, onları sentetik akarisitler kadar güvenilir kılmamakla birlikte diğer pestisitlere alternatif olarak kullanımları tavsiye edilmektedir (Calderone, 1999; Rosenkranz vd. 2010; Stanimirović vd. 2019; Umpiérrez vd. 2011; Underwood ve Currie, 2003). Diğer bazı maddeler (örneğin, mineral/bitkisel yağ, neem yağı, wintergreen yağı, pudra şekeri) *Varroa* kontrol tedavileri olarak bir miktar umut vaat etmektedir (Aliano ve Ellis, 2005; Fakhimzadeh vd. 2011). Ancak, bu maddelerin uygun kontrol tedavileri olarak değerlendirilebilmesi için şu ana kadar halen yeterli araştırma verisi mevcut değildir (Millán-Leiva, 2022).

Sentetik akarisitler, *Varroa* kontrolü için en etkili ve en yaygın kullanılan yöntemdir (Haber vd. 2019). Çünkü bu kimyasalların kullanımının daha kolay olmasının yanı sıra koloni kayıplarını azaltmada da en etkili ve tutarlı olduğu bildirilmektedir (Rosenkranz vd. 2010; Haber vd. 2019). *V. destructor*'a karşı kullanım için yetkilendirilmiş sentetik akarisitler, temel etki alanı sinir sistemi olan üç aktif grupta incelenmektedir. Bu etken madde grupları; Asetilkolinesteraz (AChE) inhibitörleri olarak bilinen organofosfatlar (Coumaphos), Sodyum kanal modülatörleri olan sentetik piretroitler (Tau-fluvalinate ve Flumethrin) ve Oktopamin reseptör agonistleri olan formamidinler (Amitraz) olarak bilinmektedir (Rosenkranz vd. 2010). Tarihsel olarak, sentetik akarisitler yüksek oranda etkinlikleri, duyarlı akarların ortalama %95-99'unu öldürebilme yetenekleri, bal arılarına karşı düşük toksisite göstermeleri ve kullanım sırasında uygulama kolaylığından dolayı arıcılar için tercih edilen bir seçim olmuştur. Bu bileşiklerin lipofilik doğası, balda kalıntıları sınırlamaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda artan sayıdaki çalışma ile bu kimyasalların balmumu ve arı ekmeğinde birikimini bildirmiştir (Bonzini vd. 2011; Calatayud-Vernich vd. 2018; Orantes-Bermejo vd. 2010). Sentetik akarisitlerin en büyük dezavantajı, akar popülasyonlarında direnç gelişiminin gözlemlenmesidir. Yapılan çalışmalar neticesinde şu ana kadar, üç farklı aktif etkin madde ailesinin (piretroitler, organofosfatlar ve formamidinler) tamamına karşı direnç geliştiği bildirilmektedir (Bak vd. 2012; Elzen vd. 1999a; Elzen vd. 1998; González-Cabrera vd. 2018; Gracia-Salinas vd. 2006; Lodesani vd. 1995; Maggi vd. 2009; Maggi vd. 2010; Martin, 2004; Milani, 1995, 1999; Miozes-Koch vd. 2000; Pettis, 2004; Rinkevich, 2020; Rodríguez-Dehaibes vd. 2005).

6. *Varroa* akarlarında sentetik akarisit direnci ve etki mekanizmaları

Birçok durumda, direnç gelişimi tarımsal formülasyonların kullanımı veya varroasit şeritlerinin yanlış kullanımı ile ilişkilendirilmiştir (Milani, 1999; Thompson vd. 2002). Bu kimyasallar arasında, tau-fluvalinat ve flumethrin gibi sentetik piretroitler, kovan içi seçicilikleri sayesinde arılkalarda sık bir şekilde tercih edilmektedir (Johnson vd. 2010; Blacqui re vd. 2017). Ancak, bu piretroitlerin uzun süreli ve tekrarlayan kullanımı sonucunda, arıcılık sektörü hem direnç gelişimi hem de balmumu ve bal gibi arı ürünlerinde kimyasal kalıntıların varlığı sorunlarıyla karşı karşıya kalmaktadır (Bogdanov 2006; Rosenkranz vd. 2010; Smodi  Škerl vd. 2011). Piretroitler, piretrinler ile aynı etki mekanizmasına sahip olup Voltaj kapılı sodyum kanalını (VGSC) modüle etmektedirler (Sparks ve Nauen, 2015). VGSC, nöronların ve diğer uyarılabilir hücrelerin zarında bulunan büyük bir transmembran proteini olup, sinir impulsundaki aksiyon potansiyelinin başlatılması ve iletiminde önemli bir rol oynar. Bu şekilde, eklembacaklıların hem periferik hem de merkezi sinir sistemlerini etkilerler (Dong vd. 2014; Field vd. 2017; O'Reilly vd. 2006). Bu protein, yalnızca sodyum iyonlarının geçişine izin veren yüksek iyon se icili ine sahip bir transmembran delik oluşturarak, hızlı aktivasyon (açılma) ve inaktivasyon (kapama) kinetiği ile karakterizedir (Catterall, 2000). Piretroitlerin voltaj kapılı sodyum kanalları (VGSC)  zerindeki etkisi, bu kanalların hızlı inaktivasyonunu engelleyerek açık (aktive) kalma sürelerini uzatır. Bu durum, sodyum iyonlarının hücre içine uzun süreli girişiyle sonuçlanır ve sürekli bir depolarizasyona neden olur. Sodyum akımının genliği sürekli olarak yüksek kaldığında, hücrenin sodyum-potasyum pompasının işlevini sürdürebilme kapasitesi açılır; bu da aşırı uyarılabilirli e (hipereksitabilite) ve bazı durumlarda sinir iletiminde blokaja yol açar. Zamanla hücreler bu durumdan ötürü tükenir ve organizmada "knockdown" olarak adlandırılan fel  benzeri bir fenotip ile kendini karakterize eder. Bununla birlikte, etkileşim sona erdiğinde membran potansiyelinde bir kayma meydana gelebilir ve sinir hücreleri anormal ancak görece stabil bir hipereksitabilite durumunda işlev göstermeye devam edebilir (Mill n-Leiva, 2022).

Sentetik piretroitler, voltaj kapılı sodyum kanallarına ba lanabilme yeteneğine sahip olup, uzun süreli bu kanalların açık kalmasına neden olmaktadır (Soderlund 2012; Rinkevich vd. 2013). Toplam pazar payının

%15'ine tekabül eden ikinci en yaygın kullanılan insektisit/akarisit grubu olarak tanımlanmaktadır (Sparks vd. 2020). Memeliler üzerindeki düşük toksisitesi, nispeten hızlı parçalanmaları (Tang vd. 2018) ve piretroitlerin arthropodlara özgü seçiciliği ve etki göstermeleri (Khambay ve Jewess 2005) nedeniyle, bu pestisit grubu farklı coğrafi bölgelerdeki arılkılarda *Varroa* akarlarını kontrol etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, aktif etkin madde sayısının sınırlı olması, farklı arılkılarda sürekli bir seçim baskısına yol açmış ve direnç gelişimini beraberinde getirmiştir (Van Leeuwen ve Dermauw 2016). Piretroitler söz konusu olduğunda, voltaj kapılı sodyum kanalındaki (VGSC) amino asit varyasyonlarının, akarisit bağlanmasındaki farklılıklara yol açarak, *Varroa* ile *Apis mellifera* arasındaki seçiciliğin altında yatan temel etken olduğu öne sürülmektedir (O'Reilly vd. 2014; Wu vd. 2017). Sınırlı sayıda mevcut akarisitlerin bulunduğu portföyden kaynaklanan tekrarlayan seçim, kaçınılmaz olarak *Varroa* popülasyonlarında direnç gelişimiyle sonuçlanmıştır (Elzen vd. 1999; Spreafico vd. 2001; Martin, 2004; Pettis 2004; Mitton vd. 2022). Bal arılarının ticareti, göçebe arıcılık ve *Varroa* akarlarının (Sammataro vd. 2000; Rosenkranz vd. 2010; Jack ve Ellis 2021) çeşitli yayılma stratejileri nedeniyle, direnç ortaya çıkmakta ve kısa bir süre içerisinde hızlı bir şekilde geniş alanlara yayılabilmektedir. Bu durumda meseleyi ele almayı daha da zorlaştırmaktadır. (Erdem vd. 2024). *Varroa* akarlarında pestisitlere karşı farmakokinetik ve farmakodinamik mekanizmalar aracılığıyla direnç geliştirebilmektedir (Feyereisen vd. 2015; Van Leeuwen ve Dermauw 2016). Farmakokinetik direnç genellikle sitokrom P450 mono-oksijenazlar, glutatyon S-transferazlar ve karboksil/kolinesterazlar gibi başlıca detoksifikasyon enzimlerinin artan aktivitesiyle ortaya çıkarken (Surlis vd. 2016; Panini vd. 2019), farmakodinamik direnç çoğunlukla hedef bölge yapısının ya da ifadesinin değişmesiyle meydana gelir (Feyereisen vd. 2015). Esas olarak artan detoksifikasyon enzim aktivitesi ve piretroitlerin hedef bölgesindeki bir dizi nokta mutasyonu ile ilişkilendirilmiştir (Van Leeuwen ve Dermauw 2016; Mitton vd. 2022; De Rouck vd. 2023).

Piretroitler, eklembacaklıların voltaj kapılı sodyum kanallarında (VGSC) etki ederek sinir sistemi faaliyetini bozmakta ve etkilenen eklembacaklılarda felce neden olmaktadır (Field vd. 2017). Piretroit direnci, knockdown resistance (kdr) olarak bilinen, VGSC'lerde mutasyonların meydana gelmesine yol açar (Dong vd. 2014). 1990'ların başında, piretroit

direncinin genetik olarak VGSC ile bağlantılı olduğu, özellikle de gen üzerindeki nokta mutasyonları ile ilişkili olduğu bulunmuştur (Williamson vd. 1993; Williamson vd. 1996). Piretroit direncinden sorumlu olarak tanımlanan ilk mutasyonlar, ev sineğinde L1014F ve/veya M918T değişimleri olup, bu iki mutasyonu taşıyan sineklerde kaydedilen üstün direnç seviyesinden dolayı knockdown resistance (kdr) (L1014F) veya super-kdr (M918T) olarak adlandırılmıştır (Williamson vd. 1996). İlerleyen çalışmalar sonucunda, diğer türlerde dirence bağlı olarak sodyum kanalındaki farklı nokta mutasyonları da tespit edilmiştir (Millán-Leiva, 2022). Artropodlarda VGSC'deki bu mutasyonlar, lösin 925'in (L925M/I/V), metionin 918'in (M918T/L/V/I), lösin 932'nin (L932F), treonin 929'un (T929I/C/V/N), fenilalanin 1534'ün (F1534C), lösin 1014'ün (L1014F/ H/S/W) ve fenilalanin 1538'in (F1538I) yer değiştirmesini içerir (Dong vd. 2014; Rinkevich vd. 2013). Bu nokta mutasyonları genellikle alan (domain) II ve III'ün transmembran helikslerinin (IIS5, IIS6 ve IIS6) bazı bölgelerinde ve alan (domain) II'nin 4 ve 5 heliksleri arasındaki bağlantıda (IIS4-S5) bulunmaktadır (Dong vd. 2014). Son zamanlarda dünya genelinde piretroit insektisitlere karşı hızlı bir şekilde artan kdr, bu özelliğin resesif bir özellik olarak kalıtılması nedeniyle *Varroa* akarlarının pestisitler kullanılarak kontrol edilmesini zorlaştırmıştır. Gerilimle duyarlı sodyum kanallarının kapı kinetiğini değiştiren piretroitlerin yoğun ve yaygın kullanımı, popülasyonlar üzerinde güçlü bir seçim baskısı oluşturur. İnsektisitlerle sodyum kanalındaki bağlanma yeri arasındaki afinitede değişikliğe yol açan knockdown direnç (kdr), kanal genindeki tek veya çoklu nokta mutasyonlarından kaynaklanmaktadır (Hemingway vd. 2004). Diğer eklembacaklılarda olduğu gibi, *V. destructor* akarlarında da piretroitlere karşı direnç mekanizması, VGSC'deki farklı nokta mutasyonları ile ilişkilendirilmiştir. Bu nokta mutasyonlarının çoğu, IIS4-S5 bağlantısında ve alan (domain) II ve III transmembran helikslerinin (IIS5-IIS6 ve IIS6) bazı bölgelerinde bulunur. Modelleme çalışmalarına göre piretroitler hidrofobik cep yapısına sahip bu bölgelere bağlanmaktadır (Millán-Leiva vd. 2022). VGSC proteinindeki amino asit değişiklikleri veya mutasyonları *Varroa* popülasyonlarında piretroitlere karşı duyarlılığın azalmasıyla ilişkili olduğu saptanmıştır. *Varroa* akarlarında görülen kdr türü dirençte, L925V, L925I, L925M (Gonzalez-Cabrera vd. 2013; 2016; 2018) ve M918L (Millan-Leiva vd. 2021) aminoasit değişiklikleri tespit edilmiş ve bu dirençli aleller piretroit

duyarsızlığı ile ilişkilendirilmiştir. Bu mutasyonların görülme sıklığının zamanla arttığı ve bunun büyük olasılıkla piretroit kullanımından kaynaklanan seçim baskısına bağlı olduğu düşünülmektedir (Çelikkol ve Doğaç 2025).

Varroa destructor'un tau-fluvalinate dirençli VGSC genindeki nokta mutasyonları ilk olarak ABD'de keşfedilmiştir (Wang vd. 2002). Özellikle *V. destructor*'da VGSC geni III. ve IV. alanlarının bağlantı yerindeki L1596P (Musca domestica numaralandırması) mutasyonu daha fazla incelenmiştir. Çünkü prolin (P) böceklerde korunmuş bir amino asit olması ve florvalinatın arılara düşük toksisitesinin sebeplerinden biri olma potansiyeline sahip olmasından dolayı bu mutasyonun üzerinde durulmuştur (Liu vd. 2006). Ancak, bu mutasyon daha sonraki çalışmalarda artık tespit edilmemiştir. Yıllar sonra, İngiltere ve Çek Cumhuriyeti'nden elde edilen *V. destructor* popülasyonlarında, VGSC genindeki domain II'nin transmembran segment 5'inde yer alan 925. pozisyonda wild-type lösin yerine valin yer değiştirmesi sonucu oluşan L925V mutasyonu ilk kez ortaya çıkmıştır (González-Cabrera vd. 2013; Hubert vd. 2014). Daha sonra, farklı Avrupa ülkelerindeki *Varroa* popülasyonlarının taramaları ile, L925V mutasyonunun kıta boyunca dağıldığı ve ayrıca piretroitlere karşı dirençle ilişkili olduğu doğrulanmıştır (Alissandrakis vd. 2017; González-Cabrera vd. 2018; Panini vd. 2019; Stara vd. 2019; Koç vd. 2021; Vlogiannitis vd. 2021b; Mitton vd. 2021; Ogihara vd. 2021; Hernández-Rodríguez vd. 2021; Millán-Leiva vd. 2021a). Bu nedenle, diğer eklem bacaklılarda olduğu gibi, Avrupa popülasyonlarındaki *V. destructor*'un piretroitlere karşı direncinin öncelikle hedef alan mutasyonu L925V tarafından yönlendirildiği düşünülmektedir (González-Cabrera vd. 2018). Aynı pozisyondaki diğer mutasyonlar L925I ve L925M özellikle ABD'deki *Varroa* popülasyonlarında saptanmıştır (González-Cabrera vd. 2016). Bu üç farklı dirençli alel, dünya genelindeki farklı *Varroa* akar popülasyonlarında bulunmakta olup, belirgin bir coğrafi ayrım göstermektedir. L925V mutasyonu yalnızca Avrupa akarı popülasyonlarında bulunurken, L925I ve L925M önceki zamanlarda ABD'de tespit edilmiştir (González-Cabrera vd. 2018; González-Cabrera vd. 2016; Panini vd. 2019; Stara vd. 2019), ancak L925I yakın zamanda Yunanistan'da toplanan bazı dirençli akarlar içinde rapor edilmiştir (Alissandrakis vd. 2017). Son zamanlarda, iyi tanımlanmış süper-kdr mutasyonu (M918T) varyantı olan IIS4-S5 kanal bağlantı bölgesindeki kdr benzeri M918L mutasyonu, ilk kez L925V mutasyonu ile birlikte Doğu

İspanya'daki *V. destructor* popülasyonlarında tespit edilmiştir (Millán-Leiva vd. 2021b). M918L, diğer mutasyonlarla birlikte, böcekler ve diğer akar türlerinde de bulunmuştur (Carletto vd. 2010; Karatolos vd. 2012; Katsavou vd. 2020). L925I ve M918T (süper-kdr) mutasyonlarının piretroit direncindeki rolü, elektrofizyoloji ve moleküler docking analizleri ile işlevsel olarak doğrulanmıştır (Vais vd. 2003; Usherwood vd. 2007). Sonuçta, VGSC geninin 925. pozisyonundaki nokta modifikasyonu, şu anda dünya genelindeki aralıklardan elde edilen *V. destructor* popülasyonlarında piretroit tedavisine karşı dirençle ilişkili tek mekanizmadır. Ancak, bu mutasyonların evrimi, aralıklardaki yaygınlıkları veya hatta piretroitlere karşı kanal hassasiyeti üzerindeki gerçek etkileri hakkında çok az bilgi bulunmaktadır (Millán-Leiva, 2022).

AChE, sinir hücreleri arasındaki sinaptik iletimi sonlandırarak, nörotransmitter asetilkolinin parçalanmasını katalizleyen hayati bir enzimdir. Çoğu böceğin (yüksek Diptera hariç) ve kenelerin genomları, AChE1 ve AChE2'yi kodlayan *Anopheles gambiae* paralogous ve orthologous ace-1 ve ace-2 genlerine karşılık gelen en az iki gene sahiptir. Ancak, AChE1 sinaptik iletimde yer alan ana enzim olarak kabul edilir (Weill vd. 2002). Her ne kadar coumaphos, *V. destructor* mücadelesinde yaygın olarak kullanılmış olsa da hedef bölgesi olan asetilkolinesteraz (AChE) enziminin fonksiyonel karakterizasyonu yakın bir zamanda bildirilmiştir (Kim vd. 2022). Kim vd. (2022), üç işlevsel AChE tanımlamış ve AChE1'in sinaptik iletimde görev alan başlıca AChE enzimi olduğunu belirlemişlerdir. 2016 yılında, coumaphos'a dirençli akarların AChE'sinin, aktif coumaphos metaboliti olan coroxon'a duyarlılığının, hassas popülasyonlara kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, AChE duyarsızlığının bir akarisit direnç mekanizması olabileceğini düşündürmekle birlikte, bu çalışmada AChE mutasyonlarının varlığı araştırılmamıştır (Vu, 2016). Öte yandan, Vlogiannitis vd. (2021), coumaphos'a dirençli ve hassas *V. destructor* popülasyonları arasında coroxon ile AChE inhibisyonu açısından anlamlı bir fark gözlemlememişlerdir. Ayrıca, dirençli *V. destructor* popülasyonunda AChE1 ve AChE3'te dirençle ilişkili herhangi bir mutasyona rastlanmamıştır (Vlogiannitis vd. 2021). Piretroit direnç mekanizmalarının metabolik yönleri konusundaki bilgi, esas olarak biyokimyasal ve sinerjizm testlerine dayanmakta (Hillesheim vd. 1996; Mozes-Koch vd. 2000) ve spesifik mekanizmalar hakkında nispeten sınırlı bilgi

bulunmaktadır. *Varroa*'da metabolik direnç gelişimi karmaşık olabilmektedir. Nitekim yakın zamanda yapılan bir araştırmada gösterildiği üzere, coumaphos direnci, bir P450 enziminin aşağı regülasyonu sonucunda bu bileşiğin daha az etkin hâle gelmesiyle ortaya çıkmaktadır (Vlogiannitis vd. 2021a). Öte yandan, şu ana kadar *Varroa* akarlarında coumaphos direnci sağlayan herhangi bir mutasyon bildirilmemiştir. Ancak hedef nokta mutasyonları diğer asetilkolinesteraz inhibitörleri için bilinen yaygın bir direnç mekanizmasıdır (Feyereisen vd. 2015).

Organofosfatlar (OP'ler) ve karbamatlar gibi asetilkolinesteraz (AChE) inhibitörleri, zararlı veya vektör türlerini kontrol etmek için uzun süredir kullanılsa da günümüzde bu bileşiklerin birçoğu yasaklanmıştır (Sparks ve Nauen 2015). Coumaphos direncinin ilk vakası, 20 yıl önce İtalyan *Varroa* popülasyonlarında rapor edilmiştir (Spreafico vd. 2001) ve o zamandan beri farklı kıtalarda tespit edilmiştir (Pettis 2004; Sammataro vd. 2005; Maggi vd. 2009, 2011; Hernández-Rodríguez vd. 2021). Ancak, direnç gelişiminin arkasındaki moleküler mekanizmalar henüz bilinmemektedir. Omurgasızlarda AChE inhibitörlerine karşı direnç kazandırdığı bildirilen bir dizi hedef bölge mutasyonu bulunmaktadır (Lee vd. 2015). Yine de şu anda *Varroa* içinde böyle bir mutasyonun rapor edilmediği bildirilmektedir. Erdem vd. (2024) tarafından, ülke genelinde 66 popülasyonu kapsayan kapsamlı bir moleküler tarama gerçekleştirilmiştir. Önceki raporlarla uyumlu olarak, AChE'nin ana kalıntılarında mutasyon tespit edilmemiştir. Coumaphos'a karşı fenotipik duyarlılık seviyelerine dair bilgi eksikliği nedeniyle, Türk *Varroa* popülasyonlarında hedef bölge mutasyonlarını bir direnç mekanizması olarak dışlamak üzere kesin bir ifade yapmanın zor olduğu bildirilmiştir. Son bir çalışma, Coumaphos'a karşı direncin gerçekten de hedef bölge mutasyonu dışındaki mekanizmalar yoluyla ortaya çıkabileceğini göstermiştir. Vlogiannitis vd. (2021a,b), Coumaphos'un aktivasyonunu azaltan CYP4EP4 adlı bir P450 geninin aşağı yönde regülasyonu sonucunda Coumaphos'un aktivasyonunu azalttığını bildirmektedir. Bu mekanizmanın coğrafi kökenlerden gelen *Varroa* popülasyonları arasında paylaşıp paylaşılmadığını göstermek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu bildirilmektedir (Erdem vd. 2024). Coumaphos'a direnç ile ilgili olarak, diğer türlerle yapılan çalışmalar, hedef bölgesindeki mutasyonlar, asetilkolinesteraz enzimi, asetilkolinesteraz geninin kopyalanması veya detoksifikasyon enzimlerinin ekspresyonundaki

değişikliklerle ilişkili olabileceğini bildirmiştir (Feyereisen vd. 2015). Bununla birlikte, *V. destructor* akarlarında coumaphos'a karşı dirençte yer alan mekanizma(lar) belirsizliğini korumaktadır. Coumaphos'un aktivasyonunda rol oynayan bir sitokrom P450'nin aşağı regülasyonu, Yunanistan'ın Andros adasından toplanan akarlarda bildirilen dirençle ilişkili olarak tanımlanmıştır (Vlogiannitis vd. 2021).

7. Sentetik Akarisitlere Karşı Direncin Küresel Dağılımı

Avrupa'da, *Varroa*'ya karşı en yüksek etkinliği gösteren pestisit grubu sentetik piretroitlerdir. İtalya'da, akar direncinin neden olduğu kayıpların %70'ten fazla olduğu bildirilmiştir (Bak vd. 2012). Avrupa'daki *V. destructor* popülasyonlarında piretroit direncinin ilk olarak 1990'ların başında İtalya'da bildirilmiştir (Lodesani vd. 1995). İlk ortaya çıkışından sonra, dirençli bireyler hızla komşu ülkeler olan Fransa, İsviçre ve Slovenya'ya ve sonrasında kıtanın daha geniş çapta bölgelerine yayılmıştır (Martin 2004). *V. destructor* popülasyonlarında voltaj kapılı sodyum kanal geninin 5. transmembran bölgesinde yer alan L925V/I/M ve M918L mutasyonları majör direnç mekanizmaları olarak rapor edilmiştir (González-Cabrera vd. 2013, 2016, 2018; Millán-Leiva vd. 2021a,b). Lösün yerine valin (L925V) değişimi Orta ve Güney İngiltere'de (González-Cabrera vd. 2013), İtalya'da (Panini vd. 2019), Yunanistan'da (Alissandrakis vd. 2017), Çek Cumhuriyeti'nde (Stara vd. 2019; Hubert vd. 2014), Türkiye'de (Erdem vd. 2024; Koç vd. 2021) rapor edilmiştir. L925M ve L925I mutasyonları ise Güneydoğu ABD, Japonya, Yunanistan ve Türkiye akar popülasyonlarında bildirilmiştir (Alissandrakis vd. 2017; Erdem vd. 2024; Gonzalez-Cabrera vd. 2016; Millan-Leiva vd. 2021a; Ogihara vd. 2021). Akdeniz ülkelerindeki (Türkiye, İspanya ve Yunanistan) *V. destructor* popülasyonları, L925V/M/I mutasyonlarının en yüksek sıklığına sahip olduğu ülkeler olarak tespit edilmiştir (Erdem vd. 2024). Pyrethroit kullanımının Avrupa genelinde yaygın olmamasına rağmen, İspanya ve Yunanistan'daki arıcıların tau-fluvalinate ve flumethrin kullanma oranı çoğu Avrupa ülkesinden daha yüksektir (Brodtschneider vd. 2023). Benzer şekilde, flumethrin Türk arıcılığında da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Koç vd. 2021; Erdem vd. 2024). Bu ülkelerde piretroitlerin daha sık kullanımı, piretroit mutasyonlarının yaygın varlığına muhtemelen katkıda bulunmuştur. Ayrıca, Akdeniz ikliminde *Varroa* akarlarının nüfus artış hızının ılıman bölgelerle kıyaslandığında önemli

ölçüde daha hızlı olması, muhtemelen sürekli olarak var olan yavru varlığına bağlıdır ve bu da direnç gelişimine katkıda bulunabilir (Kraus ve Page Jr 1995). Öte yandan, Avrupa'nın diğer ülkelerindeki *Varroa* popülasyonlarının direnç durumlarına bakıldığında Erdem vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada Macaristan, Avusturya ve İran'dan gelen *Varroa* örneklerinin hiçbirinde L925V/I/M mutasyonları tespit edilmemiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde en çok gözlemlenen mutasyonlar L925M ve L925I'dir (González-Cabrera vd. 2016). Avrupa'da en yaygın mutasyon L925V olmasına rağmen, son raporlar Yunanistan, Türkiye ve Belçika'da L925I değişiminin varlığını göstermiştir (Alissandrakis vd. 2017; Koç vd. 2021; Erdem vd. 2024). Güney Amerika'da, L925V mutasyonunun flumetrim direnci ile ilişkili olduğu bulunmuştur (Vlogiannitis vd. 2021a,b). Stara vd. (2019), *Varroa* akarlarında tau-fluvalinate'a karşı fenotipik direnç tespitinde tau-fluvalinate maddesini kullanmışlardır. Dirençli alelin yoğunluğuna karşılık gelen direnç değerlerinin, akarların hayatta kalması ile ilişkilendirildiğini bildirmişlerdir. Fenotipik testler neticesinde, kontrol grubunun (%70,4) hayatta kalma oranı, tau-fluvalinate ile tedavi edilen grubun (%34,3) hayatta kalma oranından önemli ölçüde yüksek olduğunu saptamışlardır. *Varroa* akarlarının hayatta kalma oranı ile ortalama direnç oranı arasında anlamlı bir korelasyon tespit edilmiştir. Tau-fluvalinat uygulamasından sonra ölen bireylerin ortalama direnç değeri 0.0783 iken, hayatta kalanların ortalama direnç değeri 0.400 olarak ölçülmüştür. Koç vd. (2021), Muğla, Ordu, Eskişehir, Zonguldak ve Ankara'dan toplanan 22 *V. destructor* popülasyonunun direnç durumunu incelemiştir. Çalışma, Polatlı popülasyonu hariç, diğer tüm popülasyonların L925V ve L925I mutasyonlarından birini veya bir kombinasyonunu taşıdığını ortaya koyarken, L925M mutasyonuna ise rastlanmamıştır. Dirençle ilişkili L925V ve L925I mutasyonlarının farklı seviyeleri, araştırılan *Varroa* örneklerinin %75'inden fazlasında bulunduğu bildirilmiştir. Benito-Murcia vd. (2021), tau-fluvalinate ile dört yıl boyunca tedavi edilmeyen kolonilerden elde edilen arı balmumu ve arı ekmeğinde kronik tau-fluvalinate kalıntılarının varlığını keşfettiler. *Varroa* akarlarında sentetik piretroitlere karşı birçok direnç vakası rapor edilmesine rağmen, bu ektoparazit ile mücadelede bu kimyasalların yoğun kullanımı devam etmektedir. Bulgularımızı destekleyen önceki çalışmalar, *V. destructor*'un voltaj kapılı sodyum kanalındaki 925. amino asit pozisyonunda dirençle ilişkili üç farklı mutasyonun (L925V, I, M) bulunduğunu göstermiştir.

Sentetik piretroitlere karşı *Varroa* ektoparazitlerinde direncin gelişmesine katkıda bulunan bir diğer faktör, bu kimyasalların bal mumunda bulunan kalıntılarıdır.

Piretiroitlere karşı akar direncini izlemek için farklı yöntemler kullanılabilir. Fenotipik testler, akarisit konsantrasyonuna bağlı olarak ölü/hayatta kalan akarların büyük bir kısmının saptanmasına izin vermektedir (Milani, 1995; Trouiller, 1998; Elzen vd., 1999). Fenotipik bir testten kurtulan bir numune, maruziyeti azaltmak için metabolik direnç, hedef mutasyon veya fizyolojik fenomen (penetrasyon, dağılım, atılım) nedeniyle dirençli olarak kabul edilmektedir (Dang vd., 2017). Fenotipik testlerle gözlenen direnci açıklamak için, çeşitli popülasyonlardan alınan örnekler üzerinde moleküler testler kullanılarak farklı çalışmalar yapılmıştır (Millán-Leiva vd., 2021; Alissandrakis vd., 2017; Benito-Murcia vd. 2021). González-Cabrera vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma kapsamında, sahada tau-fluvalinat tedavisinden sonra toplanan akarların L925V mutasyonunun varlığını arttırdığını göstermiştir. Moleküler testlerden direnç frekansını tanımlamak için yapılan çalışmalar genellikle havuzlanmış akarlar üzerinde gerçekleştirilir ve bu nedenle ilgili bir korelasyon kurmak daha zor görünmektedir (Almecija vd. 2022). Bu nedenle, moleküler tarama fenotipik direnç seviyelerini ortaya çıkarmak için fenotipik testlerle birleştirilmelidir (Erdem vd. 2024)

Akarların piretiroitlere (tau-fluvalinat ve flumethrin) duyarlılığı, birden fazla faktöre bağlı olarak bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir (Elzen vd. 1998; Cheng vd. 2019). Piretiroit direnci, genotipik testler sonucunda farklı direnç gen mutasyonları (L925V/IM) belirlenerek ortaya koyulabileceği gibi (González-Cabrera vd. 2018), biyoanalizler neticesinde de fenotipik direnç tespit edilebilmektedir (Milani, 1995; Trouiller 1998). Fenotipik testler, direnç mekanizmasının kaynağını değerlendirmemize olanak tanımasa da tüm direnç türlerini göz önünde bulundurmamıza imkân sağlamaktadır (Almecija vd. 2020). Saha denemeleri kapsamlıdır ve yalnızca *Varroa* akarlarının farklı akarisitlere karşı direncine değil, başlangıçtaki enfestasyon düzeyine, yavru miktarına ve yeniden enfestasyon süreci gibi birçok parametreye bağlıdır. Buna karşılık, direnç biyoanalizleri ise kısa sürelidir ve tedavi etkinliğini önceden belirlemeye yardımcı olabilir (Gregorc vd. 2018). Piretiroit direncin küresel dağılımı ile ilgili yapılan fenotipik direnç çalışmalarına bakıldığında; 1995

yılında gerçekleştirilen biyoanaliz test denemeleri tau-fluvalinate'a karşı ilk kez fenotipik akar direncini ortaya koymuştur. Bazı ülkelerde amitraz yaygın olarak kullanılmış ve bu durum *V. destructor*'un amitraz'a karşı direnç geliştirmesine yol açtığı ifade edilmiştir. Fransa'da, bazı saha testleri amitraz ile tedavilerde bir etkinlik kaybı olduğunu göstermiştir (Almecija vd. 2020). Fransa'da 2018 ve 2019 yıllarında Tau-fluvalinat ve Amitraz'a karşı akar duyarlılığını belirlemek amacıyla Maggi vd. (2008) tarafından geliştirilen biyoanaliz testi uygulanmıştır. Hassas akar suşlarının %90'ını öldüren öldürücü/lethal konsantrasyon LC90 değerleri sırasıyla amitraz için 0.4 µg/mL, tau-fluvalinat için ise 12 µg/mL olarak belirlenmiştir. Bu konsantrasyon değerleri, akar duyarlılığını değerlendirmek için belirleyici faktörler olarak seçilmiştir. Fransa'nın farklı arı kovanlarından toplanan bazı akar örnekleri üzerinde gerçekleştirilen fenotipik direnç testleri neticesinde, *Varroa* akarlarının %71'i amitraz'a ve %57'si ise tau-fluvalinate'a karşı direnç göstermiştir. Fransa'da sınırlı sayıda mevcut aktif madde bulunması ve akarisitlere karşı akar direncinin artma eğiliminde olması durumunda, tedavilerin etkinliği azalacak ve bu nedenle yılda daha fazla tedavi gerekli olacaktır. Bu durumu önlemek için, akar direnci yönetimini içerecek yeni bir stratejinin uygulamaya konması gerekmektedir. Bu bağlamda ilgili biyoanaliz metodunun, politika yapıcılara tavsiyelerde bulunmak için etkili bir araç olacağı sunulmuştur (Almecija vd. 2020). Fransa'da *V. destructor* popülasyonlarının tau-fluvalinat'a karşı direncinin in vitro fenotipik test ve VGSC genindeki L925V mutasyonu arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla fenotipik ve genotipik yöntemlerin karşılaştırılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Toplamda 13 farklı arılığa ait tedavi edilmiş ve edilmemiş *Varroa* popülasyonları üzerinde tau-fluvalinate ile yapılan bir in vitro fenotipik testten elde edilen sonuçlar ile TagMan genotiplendirme ayırım testi uygulanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Fenotip ile genetik profil arasındaki korelasyon oranı 0.89 olarak bulunmuştur. Dirençli fenotipik profile sahip *Varroa* akarlarının L925V mutasyonunu gösterme olasılığı %63 olarak tespit edilmiştir (direnç tespiti güvenilirliği). Buna karşılık, hassas (duyarlı) fenotipe sahip *Varroa* akarlarının %97'sinde L925V mutasyon varlığı saptanmamıştır (hassas tespit güvenilirliği). Sonuçta, L925V mutasyonu, test edilen popülasyonlarda *V. destructor*'da tau-fluvalinate karşı direncin büyük bölümünü açıklamaktadır. Bununla birlikte, fenotipik testte *Varroa* akarlarının hayatta kalmasını

açıklayabilmek için başka mutasyonlar veya farklı direnç mekanizmalarının rol oynamasının muhtemel olduğu düşünülmektedir (Almecija vd. 2022). Farklı Avrupa ülkelerinin bal arısı kolonilerinden elde edilen *Varroa* popülasyonlarında L925V mutasyonunun varlığı ile piretirotlere karşı fenotipik direnç gelişimi arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için farklı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Akarlar, sahada uygulanan piretiroid doz oranlarında yapılan biyoanaliz test ile fenotipik dirençleri test edilmiş ve akabinde *Varroa* akarlarını TaqMan allel ayırım testi kullanılarak genotiplendirilmiştir. Çalışmada, direnç mutasyonlarının Avrupa genelindeki dağılımını araştırmak amacıyla yüksek verimli genotipleme yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde, L925V mutasyonunun test edilen Avrupa ülkelerinin büyük çoğunluğunda bulunduğunu, ancak dağılımının homojen olmadığını göstermektedir. Ek olarak, bu mutasyon ile direnç arasında anlamlı bir korelasyon olduğu bildirilmiştir. Ayrıca dirençli akarların azalmış bir biyolojik uygunluğa sahip olabileceği sonucuna varılmaktadır (González-Cabrera vd. 2018). İspanya'nın farklı bölgelerinde gözlemlenen düşük akarisit tedavi başarısı vakalarının, en sık kullanılan akarisitlere karşı *Varroa* akar duyarlılığındaki azalma ile ilişkili olup olmadığını değerlendirmek amacıyla basit bir biyoanaliz yöntemi kullanılmıştır. Uygulanan bu biyoanaliz metodu ile, farklı akarisit etken madde şeritlerine maruz kaldıktan sonra hayatta kalan akarların varlığını değerlendirmede oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır. Test edilen örneklerde, coumaphos'un neden olduğu ölüm oranı %2 ile %89 arasında iken; tau-fluvalinat için ise bu oran %5 ile %96 arasında değişmektedir. Diğer taraftan, amitraz uygulamalarında ise tüm vakalarda %100 ölüm (mortalite) oranı sağlamıştır. Bu sonuçlar, son yıllarda örneklerin toplandığı arılıklarda bu aktif bileşenlerin kullanılmadığı göz önünde bulundurulduğunda, örneklenen çoğu arılıkta coumaphos ve fluvalinat'a karşı dirençli *Varroa* akarlarının varlığını sergilemektedir. Bu çalışmada sunulan biyoanaliz tekniği, tek başına ya da diğer moleküler belirteçler ile birleştirildiğinde, akarisitlere karşı farklı duyarlılıklara sahip akar popülasyonlarını tespit etmekte faydalı olabilir. Bu durum, arıcılarda parazit kontrolü için en iyi yönetim ve/veya akarisit stratejisinin seçilmesinde kritik öneme sahip olabileceği bildirilmektedir (Higes vd. 2020). Kore'de farklı arılıklardaki *Varroa* akar popülasyonlarında fluvalinat direncini hem biyoanaliz tabanlı hem de moleküler belirteç tabanlı yöntemlerle izlemeyi amaçlayan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda sahada

fenotipik direnci izlemek amacıyla artık temas şişesi (Residual Contact Vial) biyotesti geliştirilmiştir. Varsayılan duyarlı bir popülasyon kullanılarak biyoanalizlere dayalı olarak 200 ppm'lik bir tanı dozu belirlenmiştir. RCV biyotestinde, erken mortalite değerlendirmesi, akarları kdr genotipine sahip akarları doğru bir şekilde ayırt etmek için etkiliyken, geç değerlendirme ise, ek direnç faktörlerine sahip olan akarları ayırt etmek için yararlı olmuştur. Çalışma kapsamında 2021'de toplanan 14 farklı arılığa ait *Varroa* akar popülasyonunun RCV biyotesti sonucunda, dört popülasyonda potansiyel direnç gelişimi tespit edilmiştir. Alternatif bir yaklaşım olarak, fluvalinat kdr özelliği ile ilişkilendirilen voltaj kapılı sodyum kanalındaki (VGSC) L925I/M mutasyonunun sıklığını değerlendirmek için kantitatif dizileme yöntemi (QS) kullanılmıştır. 2020'de *Varroa* akar popülasyonlarında bu mutasyon yokken, 2021'de ortaya çıkmış, 2022'de sıklığı artmış ve 2023'te hemen hemen ülke genelinde yaygın hale geldiği bildirilmiştir. Kore'de fluvalinat direncinin üç yıl içerisinde hızla ortaya çıkışı ve yayılması, *Varroa* akarının direnç geliştirme konusunda önemli potansiyelini açıkça göstermektedir. Bu durum, fluvalinatın alternatif akarisitlerle değiştirilmesine yönelik acil ihtiyacın altını çizmektedir. Ayrıca direnç ile ilişkili olabileceği düşünülen ancak daha çok çalışmaya ihtiyaç duyulan potansiyel birkaç yeni VGSC mutasyonu da tanımlanmıştır (Lee vd. 2023). Yeni Zelanda'da son yıllarda gözlemlenen bal arısı koloni kayıplarındaki artışın, *Varroa* akarlarının sebebiyet verdiği zarar ve bu popülasyonlardaki olası sentetik akarisit direnci ile ilişkili olup olmadığını incelemek üzere bilimsel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yeni Zelanda'daki bal arısı popülasyonları üzerinde *Varroa*'nın oluşturduğu tehdit araştırılmış ve arıcılar tarafından en yaygın kullanılan iki sentetik akarisit tedavisinin etkinliği test edilmiştir. Yeni Zelandalı arıcılar tarafından bildirilen koloni kayıpları, 2017'den 2021'e kadar beş yıl boyunca artış göstermiştir. Aynı dönemde *Varroa* kaynaklı kayıpların oranı da artmış ve bu parazit, 2021 yılında koloni kayıplarının başlıca nedeni olarak belirlenmiştir. Akarların, flumetrin ve amitraz gibi sentetik akarisit tedavilerine karşı direnç durumu incelenmiştir. Akarların %50'sini öldürmek için gereken flumetrin konsantrasyonu (LC₅₀), 156 µg/g olarak bulunmuş ve bu değer, 2003 yılında Yeni Zelanda'da gerçekleştirilen bir çalışmada gözlemlenen 6 µg/g'lık değerın 26 katı olarak tespit edilmiştir. Bu durum, flumetrine karşı gelişen direncin varlığına işaret etmektedir. *Varroa* genomunda, flumetrin direnciyle ilişkili olduğu bilinen

mutasyonlar için yapılan moleküler analizlerde ise, herhangi bir direnç mutasyonuna rastlanılmamıştır. Bu da flumetrin direncinin Yeni Zelanda'da bağımsız olarak evrimleştiğini düşündürmektedir. Amitraza karşı direnç ise gözlemlenmemiştir; çünkü amitrazın LC_{50} değeri 12 $\mu\text{g/g}$ olarak bulunmuş ve bu değer, 2003 yılındaki çalışmada bildirilen 141 $\mu\text{g/g}$ 'lık değerden daha düşük çıkmıştır. Küresel arıcılığı tehdit eden bu ektoparazitin etkili bir şekilde yönetilebilmesi için, entegre zararlı yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır (McGruddy vd. 2024). Kanada'nın Ontario eyaletinde *V. destructor* popülasyonlarına karşı sentetik akarisit etkinliğinin izlenmesine yönelik farklı bir çalışmada, Pettis testi kullanılarak *V. destructor* enfestasyonunun kontrolü için onaylanmış üç sentetik akarisit olan amitraz (Apivar™), tau-fluvalinate (Apistan®) ve flumetrinin (Bayvarol®) etkinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. *V. destructor* popülasyonlarında akarisitlere bağlı akar mortalite oranları arasında farklılık gözlemlenmiştir. Amitraz, flumetrin (%78) ve tau-fluvalinat (%72) ile karşılaştırıldığında, anlamlı derecede daha yüksek bir akar ölüm oranı (%92) sağlamıştır. Amitraz, %90–97 arasında değişen etkinliğiyle "çoğunlukla etkili" olarak sınıflandırılmış; flumetrin ve tau-fluvalinat ise %80'in altında kalan etkinlik oranları nedeniyle "minimum düzeyde etkili" olarak değerlendirilmiştir. Akarisit maruziyetine bağlı olarak akar ölümlerinde, farklı aralıklar ve bölgeler arasında değişkenlik gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, entegre zararlı yönetim stratejileri uygulanırken parazit kontrolüne yönelik kararları desteklemek amacıyla, akarisitlerin *Varroa* öldürücü etkinliğinin periyodik olarak değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır (Morfin vd. 2022). *V. destructor* akarlarında tau-fluvalinat direncinin saptanmasına yönelik gerçekleştirilen bir çalışmada, VGSC genindeki kdr mutasyonlarının varlığı biyoanaliz flakon testi ve PCR-RFLP metodu ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Akar direncini tespit etmek amacıyla tau-fluvalinat'ın 0,25 $\mu\text{g/mL}$ 'lik ayırt edici konsantrasyonu biyoanaliz için kullanılmıştır. Ayrıca, biyolojik testten elde edilen akar örneklerinde kdr mutasyonunun varlığı, voltaj kapılı sodyum kanal geninin kısmi bir bölgesinin PCR ile çoğaltılması, RFLP ve hayatta kalan ya da ölen akar havuzlarında yapılan densitometri analizleri ile doğrulanmıştır. Dirençli alele ait densitometri değerleri, akarların hayatta kalma durumları ile ilişkilendirilmiştir. Biyoanaliz flakon testinde, kontrol grubundaki hayatta kalma oranı (%70,4), tau-fluvalinate uygulanan gruptaki hayatta kalma oranından (%34,3) anlamlı

derecede yüksek bulunmuştur. Tüp testinde gözlemlenen akar hayatta kalma oranları ile ortalama direnç değeri oranı arasında anlamlı bir korelasyon saptanmıştır. Tau-fluvalinate uygulaması sonrasında ölen bireylerin ortalama direnç değeri 0,0783 iken, hayatta kalan bireylerde bu değer 0,400 olarak hesaplanmıştır. VGSC gen fragmanına yönelik PCR-RFLP analiz sonuçları, flakon (vial) biyoanaliz testinin, *V. destructor*'da kdr mutasyonuna dayalı tau-fluvalinate direncinin aralıklarda tespiti için uygun, hızlı ve maliyet açısından etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur (Stara vd. 2019). Belçika'nın Flandre bölgesinde yer alan *V. destructor* popülasyonlarında VGSC genine ait 925. pozisyonundaki piretroit hedef direnç mutasyonları araştırılmıştır. Doz-tepki biyoanalizleri neticesinde, çoğunlukla gözlemlenen L925V değişiminin flumetrin direncindeki rolünü desteklediğini ve büyük oranda homozigot 925 V/V akarlardan oluşan bir *Varroa* popülasyonunda LC50'nin 12,64 kat artışa neden olduğu bildirilmiştir. Çalışma alanında incelenen 10 farklı arılığın yaklaşık 4'ünde L925 varyantlarının mevcut olması nedeniyle, bölgede piretroit bazlı sentetik akaristlerin kullanılmasının tekrar gözden geçirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır (Vlogiannitis vd. 2021). Akarisit direncinin yönetiminde, direnç alel frekansının popülasyon içinde kontrol edilebilir bir düzeyde tutulması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, dirençli akarların erken tespiti, direnç gelişimini bastırmak veya geciktirmek amacıyla uygulanan direnç yönetim sisteminin kritik bir unsurudur. Bu durum özellikle sentetik akaristlerin tamamına karşı direnç geliştirmiş olan *Varroa* akarları için geçerlidir (Elzen ve Westervelt, 2002; Rinkevich, 2020; Adjlane vd. 2013). Akar direncinin izlenmesinde yaygın olarak kullanılan biyoanaliz yöntemleri, akarist kaplı petri kabı veya petri kabına yerleştirilen akarist şeridi kullanılarak gerçekleştirilen temas toksisitesi ölçümleridir (Maggi vd. 2008; Higes vd. 2020) Fakat, *Varroa* akarları sentetik akarist şeritlerinden veya akaristler ile tedavi edilen petri kabı tabanından kaçabilir. Bu durum da biyotest sonuçlarının tutarsız olmasına neden olabilir (Lee vd. 2023). Pestisitle kaplanmış şişelerin kullanıldığı artık temas şişesi (Residual Contact Vial, RCV) yöntemi, hedef zararlıların test kimyasallarıyla eşit şekilde kaplanmış yüzeyle zorunlu temas etmesini sağlar ve daha taşınabilir olması nedeniyle saha koşullarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle, RCV yöntemi *Frankliniella occidentalis*, *Tetranychus urticae* ve *Thrips palmi* gibi çeşitli zararlı türlerinde sahada direnç izleme amacıyla kullanılmaktadır (Kim vd.

2019; Kwon vd. 2010; Kwon vd. 2015). Parazit evresindeki veya karışık evrelerdeki akarların kullanıldığı RCV yöntemi, *Varroa* akarı direncinin izlenmesinde de uygulanmıştır; bu yöntemde cam şişeler (Hubert vd. 2014) ya da polipropilen şişeler (Kamler vd. 2016; Stara vd. 2019) kullanılmıştır. Ancak, RCV biyotesti de dâhil olmak üzere biyotest temelli direnç izleme yöntemleri, çok sayıda canlı akar örneği gerektirmektedir ve deneysel koşulların tutarsız olması durumunda farklı sonuçlar elde edilebilmektedir (Lee vd. 2023).

Sentetik akarisit amitraz, *V. destructor* bal arısı akarlarına karşı mücadelede yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu durum, direnç gelişimi nedeniyle piretroitlerin ve coumaphos'un etkinliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Son yıllarda amitrazın *Varroa* akarları üzerinde sürekli uygulanması, çok yüksek bir seçim baskısı oluşturarak bu akariste karşı direnç gelişimini desteklemektedir (Hernández-Rodríguez vd. 2025). Dünya genelinde *V. destructor* popülasyonlarındaki diğer kimyasal akarisitlere karşı dirence kıyasla amitraz direncinin daha az yaygın olduğu düşünülmektedir. Ancak, farklı kıtalarda birçok direnç vakası çok net bir şekilde bildirilmiştir (Mitton vd. 2022). Aslında amitraz direnç durumunun Amerika ve Avrupa'daki birkaç ülkede çok net bir şekilde tespit edildiği bildirilmektedir (Almecija vd. 2020; Rinkevich, 2020). Hedef bölgede meydana gelen mutasyonların, *Varroa* ve kenelerde amitraz direncinin başlıca mekanizması olduğu önerilmiştir (Corley vd. 2013; Hernández-Rodríguez vd. 2022; Jonsson vd. 2018; Rinkevich vd. 2023). Daha spesifik olarak, N87S ve Y215H mutasyonlarının, sırasıyla Fransız ve Amerikan *V. destructor* popülasyonlarında Oct β 2R geninde rapor edildiği bildirilmiştir. (Hernández-Rodríguez vd. 2022). Coğrafi konuma bağlı olarak akarisitlerin dirençle ilişkili hedef bölgelerinde farklı polimorfizmlerin bir araya gelmesi yaygın bir durumdur (De Rouck vd. 2023). Sonuçta, amitraz direncine bağlı moleküler belirteçleri tanımlayan çalışmalar, *Varroa* akarlarındaki oktopamin reseptörlerinde meydana gelen mutasyonlara odaklanmıştır. Çünkü bunlar amitraz ve diğer formamidin pestisitlerin hedef bölgeleri olarak bilinmektedir (Evans ve Gee 1980). İspanya'nın en önemli arıcılık bölgelerinden biri olan Valencia'da farklı sentetik akarisitlere karşı *Varroa* akar duyarlılığı büyük ölçekli ve kapsamlı olarak incelenmiştir. 2018 ve 2019 yılları arıcılık sezonlarında, İspanya'da izin verilen üç sentetik akarisit grubunun (coumaphos, amitraz ve piretroitler) test edildiği yerlerde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, arıcılara arı kovanlarındaki akarların uzun

vadeli kontrolü için en iyi alternatifin ne olacağına karar vermelerine yardımcı olmak için zamanında bilgi sağlanması hedeflenmiştir. Fenotipik direncin belirlenmesi için biyoanaliz ve genotipik direnci ortaya koymak amacıyla ise TagMan genotiplendirmeyi içeren bir birleşik metodolojik yaklaşım kullanarak, İspanya'nın en önemli arıcılık bölgelerinden birindeki arı kovanlarında, coumaphos, amitraz ve piretroitler içeren akarisit tedavilerin beklenen etkinliği değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, bölgedeki coumaphos ve piretroitlerin beklenen etkinliğinde önemli bir farklılık olduğunu, her popülasyonda bu akaritlere karşı dirençli bireylerin farklı oranlarda bulunduğunu göstermiştir. Öte yandan, amitrazın ise beklenen etkinliğinin daha tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bilgi, paraziti yönetmek için en uygun şekilde bilinçli ve bilim temelli kararlar alabilmeleri için bölgedeki arıcılar ile paylaşılmıştır (Hernández-Rodríguez vd. 2021). Pestisitlere karşı dirençte rol oynayan moleküler mekanizmaların ortaya çıkarılması, hızlı tespit ve etkili yönetim yaklaşımlarının tasarlanması için çok önemlidir. Sentetik akarisit bileşiklerine karşı gelişen direncin takibi, belirli bir tedavinin başarılı olma olasılığının değerlendirilmesi ve hedef direnç mutasyonları taşıyan akarların artmasına yol açabilecek seçim baskılarından kaçınılması açısından büyük önem taşımaktadır (Hernández-Rodríguez vd. 2022). Fransa ve ABD'deki farklı arılıklara ait bal arısı kolonilerindeki *V. destructor* akarlarında tespit edilen amitraz direncinin mekanizmasını araştırmak amacıyla, amitrazın bilinen hedefleri olan oktopamin ve tiramin reseptörleri tanımlanarak detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Farklı tedavi rejimlerine sahip arı kovanlarından toplanan *Varroa* akar örneklerine ait dizilerinin/sekansların karşılaştırması, Oct β ₂R reseptöründeki N87S veya Y215H amino asit değişikliklerinin sırasıyla Fransız ve ABD'deki arı kovanlarında bildirilen tedavi başarısızlıkları ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Fakat bu mutasyonlar ile amitraz direncinin evrimi arasında nedensel bir ilişki kurulabilmesi için gelecekte daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulacağı açıktır. Çalışmada elde edilen verilere dayanarak, bu reseptördeki mutasyonları taşıyan akarları doğru bir şekilde tespit edebilen daha önce *V. destructor*'da piretroit direnciyle ilişkili VGSC mutasyonlarının belirlenmesinde kullanılan (González-Cabrera vd. 2013, 2016) TaqMan temelli yüksek verimli alel ayırım testi geliştirilmiş ve test edilmiştir (Hernández-Rodríguez vd. 2022). Bu test; nispeten düşük maliyetli, hızlı, güvenilir olup, kalitesi düşük örneklerde dahi

bireysel akarların doğru şekilde genotiplenmesini mümkün kılmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada tanımlanan alel ayırım testleri gibi yaklaşımlar, yerel *Varroa* popülasyonlarında dirençle ilişkili mutasyonların dağılım ve frekansının belirlenmesi açısından özellikle uygun olacaktır. Elde edilen bu bilgiler, *Varroa* ile mücadelede daha rasyonel bir kontrol stratejisi geliştirilmesine katkı sağlayarak, her seferinde arılıklar için en uygun akarisitlin seçilmesine olanak tanıyacaktır (Hernández-Rodríguez vd. 2022). Fransa ve ABD'de sırasıyla amitraz direnci ile ilişkilendirilmiş olan β 2-adrenejik benzeri oktopamin reseptörü (Oct β 2R) üzerindeki N87S ve Y215H mutasyonları, amitrazın hedef yeri olan mutasyonlardır. Bunun üzerine İspanya'da amitraz direnci ile ilişkili olabilecek oktopamin reseptöründe yeni bir mutasyon varlığının tespiti üzerine bir çalışma planlanmıştır. Farklı arılıklara ait bal arısı kolonileri, 2 yıl boyunca farklı akarisitlerle 6 ay ara ile 4 kez tedavi edilmiştir. Tedaviye bağlı olarak sekiz koloniden oluşan iki grup oluşturularak bir grup amitraz ile tedavi edilirken, diğer grup farklı akarisitlerle tedavi edilmiştir (dört koloni coumaphos ile dört koloni tau-fluvalinat ile tedavi edilmiştir). Amitraz şeritlerine maruz bırakılarak gerçekleştirilen biyoanaliz testleri, sahadaki akar popülasyonlarında amitraza karşı fenotipik direnç gösteren bireylerin tespit edilmesinde kullanılmıştır. İspanyol arılıklarına ait *V. destructor* akarlarında Oct β 2R geninin DNA sekans analizi neticesinde yeni bir mutasyon olarak F290L mutasyonu tespit edilmiştir. Biyoanaliz edilmiş akarlar TagMan testi ile genotiplendirildiğinde, amitraz ile tedavi edilen kolonilerden toplanan akarların, amitraz dışında farklı akarisitler ile tedavi edilen kolonilerdeki akarlar göre L290 mutant alelinin frekansında artış kaydedilmiştir. Bu durum F290L mutasyonunun amitraz tedavisine olan duyarlılığın azalması ile olası bir ilişkisinin olduğunu göstermektedir. Çalışmanın saha denemesinde, L290 mutasyonlu alellerin daha yüksek frekansa sahip olduğu kolonilerdeki *Varroa* akarların, vahşi tip alel taşıyan (F290/mutasyonsuz) akarlar kıyasla ölümü daha uzun sürdüğü gözlemlenmiştir. Homozigot mutantların (L290) yüksek frekansa sahip olduğu arılıklarda amitraza karşı duyarlılık düşük oranlarda tespit edilmiştir. Çalışma verileri, Oktopamin reseptöründeki F290L mutasyonunun İspanya'daki *V. destructor* popülasyonlarında amitraz direnci ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Arılıklardaki mutant akarların sıklığını belirlemek, sahada amitraz tedavisinin etkinliğini tahmin etmek ve uygun direnç yönetim stratejileri geliştirmek açısından faydalı olabileceği

bildirilmektedir (Hernández-Rodríguez vd. 2025). Kore’de fluvalinata karşı yaygın direnç ve amitrazın görünüşte korunan etkinliği, arıcıların *Varroa* akarı kontrolü için amitraza giderek daha fazla bağımlı hale gelmesine ve böylece ona karşı seleksiyon baskısını yoğunlaştırmasına neden olmuştur. 2023 ve 2024 yıllarında gerçekleştirilen müteakip gözetim çalışmaları, amitraz etkinliğinde hızlı bir düşüş olduğunu ortaya çıkardı ve bu da direncin ortaya çıktığını ve yayıldığını gösterdi (Lee vd. 2025). Bu bulgu, potansiyel olarak yeni bir amitraz direnci mekanizmasına işaret etmekte ve daha fazla araştırmaya duyulan ihtiyacın altını çizmektedir. Bu bağlamda, Kore *Varroa* akar popülasyonlarında Oct β ₂R genindeki yeni bir mutasyonu tanımlamaya ve karakterize etmeye odaklanarak, amitraz direncinin altında yatan mekanizmaları araştırmaya yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Kore’deki *Varroa* akarlarının β 2-adrenerjik benzeri oktopamin reseptörü geninde (Oct β ₂R) T115N adlı yeni bir mutasyon tanımlanmış ve bunun amitraz direncindeki rolü doğrulanmıştır. Bu mutasyon ve amitraz direnci arasındaki ilişki, değişen zehirlenme tepkileri sergileyen akarların RCV biyoanaliz ve genotip analizi yoluyla değerlendirilmiştir. Amitrazın tanı dozu ile zamana bağlı zehirlenme yanıtlarına dayanan bireysel akarların genotiplenmesi, genotip ile direnç fenotipi arasında güçlü bir korelasyon olduğunu ortaya çıkarmıştır. Erken zehirlenme yanıtları olan akarlar T115 aleli için homozigot iken, gecikmiş yanıtları olan akarlar ağırlıklı olarak homozigot N115 alellini taşımaktadır. Homozigot N115 genotipine sahip akarların ortalama mortalite süresi, T115 genotipine sahip akarlara göre yaklaşık 2,8 kat daha uzun olup, bu da T115N mutasyonunun sağladığı amitraz direncini doğrulamaktadır. Kore’de *Varroa* akar popülasyonlarındaki T115N mutasyonunun yayılma dinamiklerini takip etmek amacıyla nicel dizileme yöntemi geliştirilmiş ve beş yıl boyunca (2020-2024) ülkede uygulanmıştır. 2020’den 2022’ye kadar mutasyon nadir iken, 2023’te frekansı keskin bir şekilde artış gösterilmiş ve 2024’te Kore genelinde yaygın hale gelmiştir. Bu durum, artan amitraz kullanımı ile aynı zaman dilimine denk gelmektedir. Toplu olarak, bu bulgular bölgeye özgü direnç mekanizmaları, amitraz maruziyeti tarafından yönlendirilen T115N mutasyonu için bölgeye özgü bir seçim olduğunu önermektedir. Ayrıca *Varroa* akarı yönetim stratejileri üzerindeki etkileri hakkında kritik bilgiler sağladığı bildirilmektedir (Lee vd. 2025). Kanada’da ektoparazitik *V. destructor* akar popülasyonlarında amitraz ve piretroitlere karşı direnç mutasyonları

incelenmiştir. Sentetik akarisit amitraza karşı direnç gelişimini değerlendirmek ve *V. destructor* akarlarında amitraz ve piretroit direnciyle daha önce ilişkilendirilmiş mutasyonların varlığını ve sıklığını araştırmak amaçlanmıştır. Araştırmanın biyoanaliz sonuçları, Alberta popülasyonunda amitraza dirençli akarların varlığını doğrulamıştır. Bu fenotipik sonuçlar, TagMan genotipleme testi ile desteklenmiştir. Oct β ₂R oktopamin reseptör geninde tespit edilen Y215H mutasyonunun, ziyaret edilen arlıkların %90'ında varlığı tespit edilmiştir. Y215H mutasyonunun lokal allel frekansları ise %5 ila %95 arasında değiştiği bildirilmiştir. Biyoanaliz neticesinde akarların fenotipik direnci ile mutasyonun varlığı arasında aralıklar genelinde anlamlı bir korelasyon saptanmıştır. Paralel olarak, voltaj kapılı sodyum kanalındaki L925I ve L925M mutasyonları, test edilen arlıkların tamamında (%100'ünde) %33 ila %97 arasında değişen frekanslarla tespit edilmiştir. Bu durum bölgede piretroitlere karşı direncin hala yaygın olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, uzun bir süre boyunca tek bir tedaviye bağımlı kalmanın mevcut akarisitlere karşı direnç oranlarını artırabileceği düşüncesini desteklemektedir. Çalışma bulguları, bölgedeki arıcılara ve arıcılık kurumlarına zamanında bilgi sağlamak için genotipleme yoluyla geniş ölçekli direnç izleme ihtiyacını vurgulamaktadır. Bu sayede, mevcut tedavilerin rotasyonunu içeren etkili bir yönetim planı yapmalarını sağlayacak ve *V. destructor* popülasyonlarında direncin gelişimini baskılamak veya en azından geciktirmek için kullanılacaktır (Bahreini vd. 2025). *V. destructor* akarlarında β 2-adrenerjik benzeri oktopamin reseptöründeki (Oct β ₂R) Y215H mutasyonunun Amerika Birleşik Devletleri'ndeki güncel amitraz direnci vakalarıyla ilişkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda ABD'deki amitraz direnci sergileyen *Varroa* akar örneklerinde β 2-adrenerjik benzeri oktopamin reseptöründeki (Oct β ₂R) 215. pozisyonunda bulunan tirozin (Y) aminoasidinin histidine (H) yer değiştirmesi ile gerçekleşen bir mutasyon (Y215H) tespit edilmiştir. Bu çalışmada, ABD'den alınan *Varroa* örnekleri, amitraz biyoanaliz testlerine dayanarak amitraza karşı dirençli veya duyarlı olarak fenotiplendirilmiştir. Akabinde bu fenotipik duyarlı ve dirençli akar örnekleri TagMan yüksek verimli alel ayırma testi kullanılarak Y215H mutasyonu için genotiplendirilmiştir. Çalışma bulguları, biyoanaliz neticesinde duyarlı ve dirençli akar fenotiplerine karşılık gelen duyarlı ve dirençli genotipler arasında güçlü bir korelasyon ortaya koymuştur. Bu durumun tersinin de geçerli olduğu belirtilmiştir. Direnç biyotestleri sonucuna çevresel

koşulların etkisi nedeniyle direnç seviyelerini düşük gösterebilir. Bu durumda amitraz dirençli bir genotipe sahip *Varroa* akarının, duyarlı bir fenotip sergileyebileceği saptanmıştır. *Varroa* akarlarında β 2-adrenerjik benzeri oktopamin reseptöründeki (Oct β 2R) Y215H mutasyonunun, amitraz direncindeki rolünün doğrulanması, amitraz direncinin gelişimini değerlendirmek için düşük maliyetli, yüksek verimli genotipleme protokollerinin geliştirilmesine ve doğrulanmasına katkı sağlayacağı bildirilmiştir. Genotipleme yoluyla direnç izleme, direnç gelişimi olduğu bilinen arılıkların hedefli örneklemesinden ziyade, amitraz direncinin prevalansını doğru bir şekilde belirlemek için geniş ölçekli pasif izleme imkânı sağlayacaktır. Arıcılık sezonunun başlarında amitraz direnci için *Varroa*'nın genotiplenmesi, koloni düzeyindeki sezon sonu direncini tahmin edebilecek ve arıcılara etkili bir *Varroa* yönetim stratejisi geliştirmek için yeterli zaman sağlayabilecektir (Rinkevich vd. 2023). *Varroa* akar popülasyonlarında amitraz direnci, özellikle Fransa ve ABD'deki bazı arıcıların bildirdiği amitraz tedavilerinin saha etkinliğindeki azalma nedeniyle son yıllarda ilgiyle takip edilen bir konu haline gelmiştir. Amitraz'ın, sahada *Varroa* akar enfestasyonunu etkili bir şekilde azaltmak için güvenilir bir akarisit olan amitrazın kaybı, arıcıların kolonilerindeki *Varroa* enfestasyon oranlarını düşük seviyelerde tutma mücadelesini ciddi bir şekilde zorlaştırabilir. Fransa'da 2020-2021 yıllarında farklı arılıklarda gerçekleştirilen bir çalışma kapsamında, onaylı amitraz bazlı *Varroa* akar tedavisinin (Apivar®, Vêto-pharma, Fransa) saha etkinliği ve referans LC90 konsantrasyonuna maruz kalan *Varroa* akarlarının laboratuvar duyarlılık testlerinin sonucunda fenotipik karakterleri araştırılmıştır. Ayrıca Fransa'nın Doğu, Orta ve Güney bölgelerinden biyoanaliz test neticesinde 'hassas/duyarlı' veya 'dirençli' olarak sınıflandırılan toplam 240 adet *Varroa* akarının genotiplendirilmiştir. Akar örneklerinin genetik analizleri, *Varroa* akarlarında amitraz direnci için ana hedef bölge olarak düşünülen β -adrenerjik benzeri oktopamin reseptör (Oct β 2R) geninin 260. pozisyonundaki (A-G) tek nükleotid polimorfizmi (SNP) üzerinde durulmuştur. Genetik analizler neticesinde, N87S mutasyonu ile amitraz direnci arasında net bir korelasyon olmadığını 260. pozisyonundaki (A-G) tek nükleotid polimorfizmin amitraz direnci gelişiminden doğrudan sorumlu olduğu hipotezin sorgulanabilir olduğu bildirilmiştir (Marsky vd. 2024). Arjantin'de, *V. destructor*'un coumaphos'a karşı direnç gösterdiği daha önce bildirilmiştir.

Ancak, diğer sentetik akarisitlere karşı akar duyarlılığının durumu henüz bilinmemektedir. Amitraz tedavisinin ardından *Apis mellifera* kolonilerinde *V. destructor*'un yüksek enfestasyon seviyeleri tespit edildiği bildirilmiştir. Bunun üzerine Arjantin'nin amitraz akarisiti ile tedavi edildikten sonra yüksek akar yoğunluğuna sahip üç farklı arılığına ait *V. destructor* popülasyonlarının in vitro biyoanalizi ile amitraz LC50 doz değerinin belirlenmesini amaçlayan bir çalışma planlanmıştır. Farklı üç arılıktan elde edilen akarlar için LC50 değerleri sırasıyla 3.9, 3.5 ve 3.7 µg/Petri kabı olarak belirlenmiştir. Fenotipik açıdan dirençli ve duyarlı akarlar arasında LC50 değeri açısından önemli farklar tespit edilmiştir. LC50 değerleri, karşılık gelen referans değerleri ile kıyaslandığında 35-39 kat arttığı bunun da direnç gelişimini düşündürdüğü bildirilmiştir. Çalışma sonuçları, Arjantin'deki *V. destructor*'da amitraz direncinin ilk raporudur ve ülkedeki akar suşlarına karşı direnç durumu hakkında bilgi birikimini genişletmektedir (Maggi vd. 2010). Parazitik akar *V. destructor* ve taşıdığı virüsler, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki çoğu bal arısı kolonisi kaybından sorumludur. Bu nedenle, arıcılar *Varroa* popülasyonlarını kontrol etmek için çeşitli sentetik akarisitler kullanmaktadır. Fluvalinat ve coumaphos gibi akarisitlere karşı yaygın bir direnç geliştiği bilinmektedir. Fakat, *Varroa* uzun ve kapsamlı bir kullanım geçmişine rağmen, amitraza karşı duyarlılığını büyük ölçüde korumuştur. Bununla birlikte ABD'de amitraz etkinliğindeki azalmaya dair anekdot niteliğindeki sözlü raporlar, ticari arıcılar arasında son dönemde yaygın olarak tartışılan güncel bir konu haline gelmiştir. Bu kapsamda ABD'deki birkaç ticari arıcılık işletmesinde amitraz direnci, teknik amitraz ile yapılan in vitro biyoanalizler ve Apivar® etkinlik testi ile ölçülerek araştırılmıştır. Amitraz direnci, Louisiana, New York ve Güney Dakota'daki ticari arıcılık işletmelerinde uzun süreli amitraz kullanımıyla değerlendirildi. Araştırma bulgularına göre, amitrazın birçok işletmede hala etkili bir *Varroa* kontrol ürünü olmaya devam ettiğini göstermektedir. Ancak, ticari işletmeler arasında hiç direnç göstermeyenden yüksek direnç seviyesine kadar değişen geniş bir amitraz direnç aralığı sergilediği gözlemlenmiş olup, bu durumunda *Varroa* kontrol başarısızlıklarına neden olacağı vurgulanmıştır. In vitro amitraz biyoanaliz testlerinden elde edilen direnç oranları, azalan Apivar® etkinliği ile ilişkilendirilmiş ve amitraz direncine bağlı olarak gerçekleşen gerçek *Varroa* kontrol başarısızlığı vakalarını doğrulamıştır. Bu nedenle amitraz direnci izleme protokollerinin geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. *Varroa* kontrolü

için akarisit kullanımının sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla bir direnç izleme ağı kurulmasının gerekliliği bildirilmiştir (Rinkevich, 2020). *V. destructor*, bal arılarının (*Apis mellifera* L.) dış parazitlerinden biridir ve Kanada’da koloni kayıplarının başlıca nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu dış paraziti kontrol altına almak amacıyla sentetik akarisitler geliştirilmiş ve tescillenmiştir. Ancak, Kanada’da ruhsatlı piretroit ve organofosfat sınıfı *Varroa* ilaçlarına karşı direnç geliştiği bildirilmiştir. Akarisitlerin toksisitesini test etmek amacıyla mevcut temas temelli biyoanaliz yöntemleri, akarları ve arıları ayrı ayrı değerlendirmek üzere tasarlanmıştır. Ancak bu yöntemlerin, akarisitlerin koloni düzeyinde nasıl etkileşimde bulunduğunu doğru bir şekilde yansıtmaması olası değildir. Bu nedenle, amitraz adlı referans kimyasal kullanılarak hem bal arıları hem de *Varroa* akarları üzerinde eşzamanlı toksisite testi yapılmasına olanak tanıyan bir biyoanaliz kafesi geliştirmeyi amaçlayan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 100–150 arı barındırabilen 800 mL’lik polipropilen bir plastik kafes tasarlanmış ve resmi olarak “Apiarium” olarak adlandırılmıştır. Amitrazın üç farklı seyreltme oranındaki etkileri; cam tüplere yerleştirilen *Varroa* akarları, cam Mason kavanozlarında bulunan bal arıları ve Apiarium içine yerleştirilen *Varroa* ile enfeste arılar üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlarımız, Apiarium’da 4 saatlik ve 24 saatlik değerlendirmelerde kümülatif *Varroa* mortalitesinin doza bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, 24 saatlik Apiarium ve cam tüp uygulamalarında yüksek akar ölümleri gözlenmiş ve *Varroa* mortalitesi ile amitraz dozu arasında pozitif bir polinomsal regresyon bulunmuştur. Bununla birlikte, Apiarium’da kimyasal uygulamanın arılar için Mason kavanoz yöntemine göre daha az toksik olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında, Apiarium biyoanalizi, hem *V. destructor* hem de *A. mellifera* üzerinde eşzamanlı kimyasal tarama yapılmasına olanak tanıyan basit, ucuz ve güvenilir bir yöntem sunmaktadır. Ayrıca, akarlar ve arılar birlikte test edildiğinden, Apiarium koloni benzeri bir ortamı simüle ederek laboratuvar biyoanalizleri ile saha denemeleri arasında gerekli olan bir köprü işlevi görmektedir. Apiarium’un çok yönlülüğü, araştırmacıların sadece akar tarama çalışmaları değil, kimyasal ürünlerin uygulanma yöntemleri veya yeni akar direnç testi yöntemlerinin geliştirilmesi gibi çok çeşitli bal arısı biyoanaliz deneylerini gerçekleştirmelerine olanak sağlamaktadır (Bahreini vd. 2021). Arıcılar, on yıllardır *Varroa* akarlarında kullanılan sentetik akarisitlere

(organofosfatlara, piretroitlere ve formamidine) karşı direncin dünya genelinde birçok yerde rapor edildiği bildirilmiştir. Kanada’da yer alan arılıklarda *Varroa* akarlarında kullanılan farklı ticari akaristlerin etkinliğini belirlemek ve akarların fenotipik direncini değerlendirmek için güvenilir bir biyotest geliştirmeyi amaçlayan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sentetik akaristlerin ve *V. destructor*’un fenotipik direncinin etkinliğini, Apiarium ve Mason kavanozu biyotest teknikleri kullanarak karşılaştıralı olarak incelenmiştir. Araştırma bulgularına göre, akaristler arasında amitraz etken maddeli Apivar’ın 24 saatlik değerlendirme sürecinde %89 ile en yüksek etkinliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Bu oran, Flumethrin (Bayvarol %58), Tau-fluvalinat (Apistan %44) ve Coumaphos (CheckMite %6) ile karşılaştırıldığında anlamlı derecede yüksek bir orana sahiptir. Ayrıca, Mason kavanozu yöntemi ile yapılan değerlendirmelerde, Coumaphos (CheckMite)’un bal arıları için toksik bir etkiye sahip olduğu da tespit edilmiştir. Apiarium tekniği ile, incelenen akar popülasyonlarında Bayvarol, Apistan ve CheckMite’a karşı fenotipik direnç vakalarını ortaya koymuştur. Çalışma neticesinde, Apiarium metodolojisinin Varroasit etkinliğini ölçmede ve *V. destructor* akarlarında fenotipik direnç varlığını belirlemede güvenilir bir teknik olduğu bildirilmiştir (Bahreini vd. 2023). Türkiye’de amitrazın yoğun kullanımı ve arıcıların bal arısı kolonilerindeki etkinliğinin azalmasına yönelik raporları göz önüne alındığında, bu akariste karşı son zamanlardaki direnç gelişiminin arttığı düşünülmektedir.

Varroa akarlarında akarist direncinin gelişimi dünya genelinde belgelenmiştir. Direnç gelişiminin önlenmesi veya baskılanması için etkili bir direnç yönetimi oldukça önemlidir (Roush ve Miller, 1986). Bu yönetim, öncelikle sürekli direnç izlemeyi gerektirir. Ancak, *Varroa* akarlarında geleneksel direnç izleme yöntemleri, hem parazitik evre akarlardan örnekleme yapılmasındaki zorluklar hem de petri kaplarındaki biyoyararlanım testleri nedeniyle çeşitli güçlükler oluşturmakta ve genel izleme verimliliğini düşürmektedir. Bu zorluklar göz önüne alındığında, Resistant Contact Vial tabanlı direnç izleme protokolünün, şeker tozu kullanılarak yapılan foretik akar toplama yöntemiyle birlikte uygulanması, izleme verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Ayrıca, foretik evredeki akarlar kullanıldığında, besin veya su verilmemesine rağmen, 24 saatlik uygulama sonrasında kontrol tüplerinde sürekli olarak %0 mortalite gözlemlenmiştir. Bu bulgu, parazitik evredeki dışı

akarlara benzer bir cam tüp biyoyararlanım testinde yaklaşık %30 mortalitenin rapor edildiği önceki çalışmanın (Hubert vd. 2014) sonuçlarıyla çalışmaktadır. Bu durum, biyoyararlanım testlerinde foretik evredeki akarlardan yararlanmanın avantajlarını daha da vurgulamaktadır. RCV yöntemi, geleneksel olarak kullanılan petri kabı biyoyararlanım testlerine kıyasla birçok avantaja sahiptir. Petri kabı kullanılarak yapılan biyoyararlanım testlerinde, *Varroa* akarlarının akarisisle teması zorunlu kılınmaz ve akarisit kaplaması için daha fazla miktarda (1 mL) akarisit çözeltisine ihtiyaç duyulur (Higes vd. 2020; Maggi vd. 2008). Buna karşılık, RCV yöntemiyle akarların akarisit ile zorunlu temas sağlaması, daha tutarlı biyoyararlanım sonuçlarının elde edilmesine imkân tanır. Ayrıca, RCV yöntemi, tüm tüpü kaplamak için sadece 100 µl akarisit çözeltisi gerektirdiğinden, kullanılan toksik madde miktarında tasarruf sağlar. RCV yönteminin diğer avantajları arasında, teknik bilgiye daha az bağımlı olması, seri üretime uygunluğu ve uzun süreli depolanabilirliği yer alır. Akarisit kaplı tüplerin 20°C'de saklandığında en az bir yıl boyunca stabil kaldığı bildirilmiştir (Kwon vd. 2010).

8. Türkiye’de Sentetik Akarislere Karşı Direncin Seyri ve Durumu

Türkiye, coğrafi konumu, zengin florası, bitki örtüsü çeşitliliği ve iklim koşulları nedeniyle dünyanın en eski ve en popüler arıcılık ve bal üretim merkezlerinden birisidir (Kekecoglu vd.2007). (Çelikkol ve Doğaç 2025). Bu nedenle, ülkenin neredeyse her bölgesinde arıcılık yapılmaktadır (Sirali ve Aricili, 2002). Bal, antik çağlardan bu yana arıcılıkla özdeşleşmiş başlıca ürün olarak kabul edilmiştir (Çelikkol ve Doğaç 2025). Türkiye, 95.386 şirket, 8.984.676 arı kovanı ve yıllık yaklaşık 114.886-ton bal üretimi ile dünya genelinde arı ürünleri üretiminde ikinci sırada yer almaktadır (TÜİK 2023; FAOSTAT 2023). Ancak, Türkiye'deki arı kovanı başına ortalama verim (15 kg), dünya ortalamasının (40 kg) çok altındadır (Terin vd. 2018). Beklenen bal üretim verimi çeşitli faktörler nedeniyle sağlanamamıştır. Bu faktörler arasında, *Varroa* akarları ve kimyasal kontrolün başarısız olmasına neden olan direnç geliştirme yetenekleri, birincil ve önemli bir tehdit olarak değerlendirilmektedir (Erdem vd. 2024).

Arıcılıkta *Varroa* akarları dünya genelinde bal arısı kolonisi kaybının en önemli zararlılarından ve etkenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Potts

vd. 2010; Steinhauer vd. 2018; Noël vd. 2020). *V. destructor* Anderson ve Trueman (Acari: Varroidae), dünya çapında Batı bal arısı *A. mellifera* L.'nin en önemli zararlı dış parazitidir (Thoms vd. 2019; Traynor vd. 2020). *Varroa* akarları, hemolenf ve vücut yağ dokularından beslenerek arı kolonilerine önemli zararlar verebilir ve bu da bal arılarında vücut ağırlığının azalmasına ve yaşam süresinin kısalmasına yol açar (Rosenkranz vd. 2010; Ramsey vd. 2019). Ayrıca, *Varroa* akarlarının, arıların çeşitli ölümcül patojenlerini ileten virüs vektörleri olarak bilindiği de bildirilmektedir (McMenamin ve Genersch, 2015; Martin ve Brettell 2019). Akarlar yeterince kontrol edilmediğinde, bal arısı kolonileri birkaç yıl içinde çökebilir ve bu durum arı popülasyonunda dramatik bir düşüşe yol açabilir. Bu nedenle, *V. destructor*'un yönetimi arı kovanlarında koloni sağlığını sürdürmek için büyük önem taşımaktadır (Rosenkranz vd. 2010). *Varroa*, Türkiye'ye 1976 yılında Bulgaristan üzerinden Trakya bölgesine yayılarak girmiştir. Göçebe arıcılık faaliyetleri yoluyla 4-5 yıl gibi çok kısa bir süre içerisinde ülke genelinde yayılmıştır (Çakmak ve Sevençakmak 2016; Akyol ve Korkmaz 2005). Türkiye'nin coğrafyası, iklimi, arı ticareti ve göçebe arıcılık uygulamaları, *Varroa*'nın yayılmasını hızlandırmıştır (Warrit vd. 2004; Koç vd. 2021). Türkiye'deki *Varroa* kontrolünün beklenen düzeyde olmadığı görünmektedir. Zira daha önceden yapılan çalışmalarda farklı arılıklardaki tüm kovanlarda *Varroa* akarları tespit edilmiş olup enfestasyon oranlarının %100 olduğu bildirilmiştir (Yalçinkaya ve Keskin 2010; Koç vd. 2021; Erdem vd. 2024). Haplodiploid üreme sistemine dayanan arrhenotokous üreme, genetik çeşitliliğin kontrolü, popülasyonun hızlı artışı ve özellikle dirençli/ressistant (RR) bireylerin yayılması açısından önem taşımaktadır. Ektoparazitik akar *V. destructor*'de bu üreme biçimi, ilaçlara karşı dirençli bireylerin daha hızlı çoğalmasına ve yayılmasına neden olabilmektedir (Erdem vd. 2024). Dünya çapında birçok arıcının yaptığı gibi, Türkiye'deki arıcılar *V. destructor* istilalarını kontrol etmek için coumaphos, amitraz ve tau-fluvalinate gibi kimyasal bileşenleri yaygın olarak kullanmaktadır (Girişgin ve Aydın 2010). Türkiye'de *Varroa* kontrolü için çeşitli piretroitler (ticari olarak ruhsatlandırılmış, tau-fluvalinate etken maddeli Apistan %10 ile flumetrin etken maddeli Bayvarol, Flumevar, Varostop ve Beevarflu olmak üzere dört farklı ruhsatlı ilaç (Özdemir ve Muz 2021) kullanılsa da akarlar üzerindeki bu kimyasallara karşı direncin belirlenmesi üzerine sınırlı çalışma bulunmaktadır. Bugüne kadar, Türkiye'den üç nokta

mutasyonu (L925M, L925V ve L925I) bildirilmiştir (Erdem vd. 2024; Koç vd. 2021; Karakaya vd. 2024; Yarsan vd. 2024; Çelikkol ve Doğaç 2025). 2020 yılı içerisinde gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin beş farklı ilindeki (Ankara, Eskişehir, Ordu, Zonguldak ve Muğla) 17 farklı lokalizasyonundan toplanan *V. destructor* popülasyonları arasındaki genetik varyasyon ve piretroit direnciyle ilişkili mutasyonların varlığı araştırılmıştır. *V. destructor* popülasyonlarında voltaj kapılı sodyum kanalında direnç mutasyonlarının varlığı tespit edilmiş olup, piretroit direnç ile daha önce ilişkilendirilmiş olan iki direnç mutasyonu (L925V ve L925I), popülasyonların %75'inden fazlasında bulunduğu bildirilmiştir. Örneklenen kovanlar için direnç mutasyonların varlığı ile akarisit kullanım geçmişi arasında genel bir korelasyon gözlemlenmiştir (Koç vd. 2021). Benzer şekilde arıcılık faaliyetlerinin yoğun olarak yapıldığı farklı illerden toplanan *V. destructor* popülasyonlarına karşı flumetrim direnci araştırılmıştır. Piretiroid direnç oluşumundan sorumlu VGSC geninin 925. amino asidini kodlayan bölgenin DNA sekans analizi neticesinde toplamda 332 adet akar örneğinin %31'inin flumethrine duyarlılık gösterdiği, %69'unun ise direnç geliştirdiği gözlemlenmiştir. Dirençli örnekler arasında %27'sinde homozigot izolösün mutasyonu (L925I/I), %28'inde homozigot valin mutasyonu (L925V/V), %2,8'inde heterozigot izolösün mutasyonu (L925L/I); %8,5'inde heterozigot valin mutasyonu (L925L/V) ve %2,8'inde heterozigot metiyonin mutasyonu (L925L/M) belirlenmiş ve bunların tümü flumetrim direnci ile ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak, parazitlerde flumethrin direnci oranı farklı iller arasında %51 ile %94 arasında değişiklik göstermiştir (Yarsan vd. 2024). Türkiye'nin Orta Anadolu Bölgesi'ndeki Kayseri ve Sivas illerinden toplanan *V. destructor* popülasyonlarında piretroitlerin hedefi olan VGSC geninde direnç mutasyonlarının varlığı incelenmiştir. Çalışma kapsamında 2023 yılı boyunca iki ildeki 20 farklı arılıktan toplamda 200 adet *V. destructor* akar örneği toplanılmıştır. *Varroa* örneklerindeki mutasyonları araştırmak amacıyla, VGSC geninin alan (domain) II bölgesi PCR kullanılarak amplifiye edilmiş ve DNA sekans analizi ile dizilenmiştir. VGSC geninin IIS4-IIS5 bağlantı bölgesinin nükleotid sekans analizi neticesinde, 925. pozisyonunda bir lösün ile izolösün (L925I) amino asit değişikliği ortaya çıkarmıştır. Diğer pozisyonlarda herhangi bir mutasyon tespit edilmemiştir. Homozigot dirençli alleller, araştırma alanlarındaki dizilenen 50 örneğin 20'sinde (%40), kalan örneklerde (%60, 50/30) ise homozigot duyarlı allel (vahşi/wild tip allel, L925)

tespit edilmiştir. Ayrıca, incelenen akar örneklerinde, daha önce farklı *V. destructor* popülasyonlarında elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak (Alissandrakis vd. 2017; Erdem vd. 2024; Koç vd. 2021) 918., 929., 932., 933. ve 936. pozisyonlarında herhangi bir mutasyon tespit edilmemiştir. (Karakaya vd. 2024). Türkiye'nin Güneydoğu ve Doğu Anadolu bölgelerindeki farklı illere ait arılıklardan toplanan *Varroa* popülasyonlarında sentetik akarisitlerden piretroitlerin ve coumaphos'un hedef noktaları olan VGSC ve AChE üzerindeki direnç mutasyonlarının oluşumu ve akarların genetik çeşitliliği incelenmiştir. Tüm *Varroa* örnekleri Kore haplotipine ait olduğu ve sitokrom c oksidaz alt birimi 1 (CO1) gen dizilimleri temelinde çok düşük bir genetik mesafe gözlemlendiği ayrıca AChE'nin ana kalıntılarında amino asit değişiklikleri belirlenmediği bildirilmiştir. Öte yandan, daha önce piretroit direnci ile ilişkili olduğu belirtilen üç amino asit değişimi (L925V/I/M), Türk *Varroa* popülasyonlarının yaklaşık %80'inde tespit edilmiştir. Önemli olarak, ABD'de baskın mutasyon olan L925M, Türk *Varroa* popülasyonlarında %14,3 prevalans oranı ile ilk kez tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, arı yetiştiricileri sadece piretroitler kullanırsa, *Varroa* kontrolünün yakında sorunlu hale geleceğini önermektedir. *V. destructor* popülasyonlarındaki piretroit direnç mutasyonlarının varlığını ve coğrafi dağılımını ortaya koymak, *Varroa* akar yönetimi için daha etkili stratejilerin geliştirilmesini artıracaktır (Erdem vd. 2024). L925M mutasyonu ilk olarak ABD'de bildirilmiş ve Avrupa'daki varlığı yalnızca yakın zamanda belgelenmiştir (González-Cabrera vd. 2016; Millán-Leiva et al. 2021b). *V. destructor*'ın VGSC haplotiplerinin filogenetik analizi, bu mutasyonların ardışık evrimini önerdi: L925M (CTG → ATG) önce ortaya çıktı ve ardından L925I (ATG → ATA) geldi (Millán-Leiva vd. 2021b). Ancak Erdem vd. (2024)'de, Avrupa'dan bildirilen önceki raporlarla uyumlu olarak (Alissandrakis vd. 2017; Vlogiannitis vd. 2021b), L925I mutasyonunun kökeni olduğu öne sürülen L925M mutasyonu olmaksızın, L925V ve L925I mutasyonlarını taşıyan birden fazla popülasyon tespit edilmiştir. L925M mutasyonu için varsayılan bir fitness maliyetinin varlığının önerildiği, bu durumun L925I'nin mevcut olduğu vakalarda neden bulunmadığını açıklayabileceği belirtilmiştir (Millán Leiva vd. 2021b). Ancak, bu iddiayı destekleyecek deneysel veri hala eksiktir. Ayrıca, Türk *V. destructor* popülasyonlarında L925M mutasyonunu, Asya'da ilk kez %14,3 prevalans ile belirlendiği bildirilmektedir (Erdem vd. 2024). Direnç gelişimi, böceklerin

insektisit maruziyetine karşı hayatta kalmalarını sağlar; ancak bu durum genellikle böceğin yaşam döngüsünün diğer evrelerinde veya doğal ortamında verimli bir şekilde varlığını sürdürme yetisini etkileyen bir bedelle veya ödünle birlikte gelir. Bu duruma "uyum maliyeti veya uygunluk maliyeti (fitness cost)" denir (Kliot ve Ghanim 2012; Ffrench-Constant ve Bass 2017). Gerçekten, Milani ve Della Vedova (2002) tarafından seleksiyon baskısı (selecetion pressure) olmadan piretroitlere dirençli *Varroa* akarlarının sayısında bir azalma belgelendi. Daha sonra, mutasyon sıklığı ile önceki akarisit kullanımındaki gözlemlenen korelasyona dayanarak, L925V/M mutasyonları ile varsayılan bir "fitness cost" ile ilişkilendirilmiştir (González-Cabrera vd. 2018; Millán-Leiva vd. 2021b). Erdem vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 925. pozisyonundaki duyarlı lösin, 44 örnekten dokuzunda sabitlenmiştir. Ayrıca, duyarlı genotiplerin neredeyse yarısında bulunduğu dikkate değer bir bulgu olarak saptanmıştır. Bu duyarlı bireylerin varlığı, piretroit kullanımının durmasının ardından direnç seviyelerinde bir düşüşe yol açmıştır. Bu durum, esas olarak ilişkili fitness maliyetinden (fitness cost) kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, Türk arıcıları arasında döngüsel olarak farklı etki mekanizmasına sahip alternatif kontrol yöntemleri veya akarisitlerin dikkate alınması gerekmektedir (Erdem vd. 2024). Türkiye'nin Akdeniz, Ege ve Karadeniz bölgelerinde örneklenen *Varroa* popülasyonlarında VGSC hedef gen bölgesindeki direnç mutasyonlarının sıklığı, PCR-RFLP yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Tüm akar örnekleri göz önünde bulundurularak elde edilen analiz sonuçları ile direnç allel frekansının ortalama %83,29 olduğu tespit edilmiştir. Bu durum dirençli alellerin nispeten yüksek bir frekansa sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmada, Akdeniz, Ege ve Karadeniz bölgelerinden örneklenen popülasyonlarda sırasıyla %94,58, %85,71 ve %69,58 dirençli alel frekansları gözlemlenmiştir. Araştırmanın sonuçları, Türkiye genelinde *Varroa* popülasyonları arasındaki dirençli alellerin frekanslarında önemli bölgesel farklılıklar gösterdiği ve özellikle Akdeniz ve Ege bölgelerinde artmış direnç seviyeleri gözlemlendiği ortaya konulmuştur (Çelikkol ve Doğaç 2025). Ülkemizde farklı lokasyonlarda (il veya bölge olarak) bulunan arılıklarda yer alan *Varroa* popülasyonlarına karşı yaygın kullanılan piretroitlere karşı gelişen önemli direnç mutasyon frekans farklılıkları nedeniyle, bu zararlının etkili kontrolü için direnç alellerinin uzun vadeli izlenmesi ve bölgesel kontrol stratejilerinin planlanması gerekmektedir. Bu kapsamda moleküler mutasyon

taraması yoluyla genotipik direncin izlenmesi doğal olarak direnç yayılımının izlenmesi ve azaltılması için de çok önemlidir.

Piretroitler dışında *Varroa* kontrolünde kullanılan diğer pestisitlere karşı da yüksek direnç seviyeleri gelişmiştir (Akkaya ve Vurusaner 1997; Mitton vd. 2022). Literatür çalışmaları gözden geçirildiğinde, *Varroa* direncinin zamanla sürekli olarak arttığı açıkça görülmektedir (Yarsan vd. 2024). Diğer taraftan; Türkiye’de kimyasal akarisitlerden, özellikle amitraz, kovan içindeki seçicilikleri nedeniyle *Varroa* kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır (Erdem vd. 2024; Koç vd. 2021; İnak vd. 2024). Dünyada amitraz ile alakalı sınırlı çalışma bildirilirken Türkiye’de amitraz direnç mutasyonlarının varlığının ortaya konulmasına yönelik sadece bir çalışma bulunmaktadır (İnak vd. 2024). *V. destructor*’da amitraz direnci ile ilişkili yeni bir β -adrenerjik benzeri oktopamin reseptör mutasyonunun tanımlanması ve CRISPR-Cas9 ile doğrulanmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, amitrazın hedef bölgesi olan β -adrenerjik-benzeri oktopamin reseptör (Oct β 2R) geni üzerinde, Türkiye’den 66 ve Belçika’dan 63 farklı *V. destructor* popülasyonunda kapsamlı bir moleküler tarama gerçekleştirilmiştir. Belçika *Varroa* örneklerinin hiçbirinde mutasyon tespit edilmemiştir. Bu bulgu, Belçikalı arıclar arasında amitraz kullanımının sınırlı olmasıyla uyumludur (Brodtschneider vd. 2023). Daha önce bildirilen amitraz direnç mutasyonlarına rastlanmasa da moleküler taramalar Türkiye’deki *Varroa* popülasyonlarında Oct β 2R’nin 7. transmembran bölgesinde (TM7) yer alan yeni bir Y337F mutasyonunu ortaya çıkarmıştır. Dikkat çekici bir şekilde, bu mutasyon, G-protein bağlı reseptörlerin (GPCR) aktivasyonu ile ilişkili olan ve yüksek derecede korunan NPxxY motifinin son kalıntısında yer almaktadır. Türkiye’den toplanan 66 *Varroa* örneğinden yirmisinde Y337F mutasyonu tespit edilirken, sekiz örnekte bu mutasyonun sabitlendiği (tüm bireylerde bulunduğu) gözlemlenmiştir. Bu durum Belçika’daki arılıklardan farklı olarak, Türkiye’deki farklı arılıklarda amitrazın flumetrin ile birlikte en yaygın kullanılan akarisitler arasında yer aldığını açıkça göstermektedir (Erdem vd. 2024; Koç vd. 2021). Sonrasında yapılan biyoanaliz testlerinde, Y337F mutasyonunu taşıyan akar popülasyonlarında amitraza karşı sekiz katın üzerinde bir dirence sahip olduğu belirlenmiştir. 10 mg a.i./l amitraz maruziyeti sonrası yapılan genotiplendirmede, hayatta kalan tüm akarların Y337F mutasyonu açısından homozigot dirençli alelle sahip olduğunu, ölen akarların

ise hassas (duyarlı) alelleri taşıdığını göstermiştir. Bu durum, mutasyon ile dirençli fenotip arasında genetik bir bağlantı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, model organizma olan *Tetranychus urticae*'de, CRISPR-Cas9 düzenleme yöntemiyle benzer Y337F mutasyonu Oct β 2R genine yerleştirilmiş, bu bireyler, amitraza karşı üç kattan fazla direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada amitraza karşı yeni bir direnç mutasyonunu tanımlamış ve geçerliliğini doğrulamıştır. Ancak, bu mutasyonun mevcut tedavi stratejileri bağlamında operasyonel direnç üzerindeki fenotipik etkisini daha iyi değerlendirmek için ek araştırmalara ihtiyaç olduğu belirtilmiştir (İnak vd. 2024).

9. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Varroa destructor, günümüzde bal arısı kolonilerinin sağlığını ve sürdürülebilirliğini tehdit eden en önemli ektoparazitlerden biri olmaya devam etmektedir. Bu parazite karşı mücadelede uzun yıllardır yoğun şekilde kullanılan sentetik akarisitler, başlangıçta yüksek etkinlik göstermiş olsa da, zamanla akar popülasyonlarında gelişen direnç nedeniyle kimyasal kontrol stratejilerinin güvenilirliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Özellikle piretroitler (flumethrin ve tau-fluvalinate), organofosfatlar (coumaphos) ve formamidinler (amitraz) gibi sınırlı sayıdaki etken maddeye dayalı kontrol uygulamaları, *V. destructor* üzerinde güçlü bir seçim baskısı oluşturarak hem fenotipik hem de genotipik direnç mekanizmalarının ortaya çıkmasına yol açmıştır.

Bu bölümde ele alınan güncel bulgular, sentetik akarisit direncinin yalnızca tek bir mekanizma ile açıklanamayacağını; aksine hedef bölge mutasyonları, detoksifikasyon enzimlerinin düzenlenmesi ve davranışsal/fizyolojik adaptasyonların birlikte rol oynadığı karmaşık bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır. Voltaj kapılı sodyum kanalındaki (VGSC) L925V/I/M ve M918L gibi mutasyonların piretroit direnci ile güçlü biçimde ilişkili olduğu, oktopamin reseptörü (Oct β 2R) genindeki N87S, Y215H, F290L ve T115N gibi amino asit değişikliklerinin ise amitraz direncinin gelişiminde potansiyel belirteçler olarak öne çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte, bazı bölgelerde fenotipik direnç saptanmasına rağmen bilinen hedef bölge mutasyonlarının tespit edilememesi, alternatif ve henüz tanımlanmamış direnç mekanizmalarının varlığına işaret etmektedir.

Gelecekteki çalışmalar açısından en kritik gereksinimlerden biri, direnç gelişiminin erken aşamada tespit edilmesine olanak tanıyan entegre izleme sistemlerinin kurulmasıdır. Fenotipik biyoanaliz yöntemlerinin moleküler belirteç temelli yaklaşımlarla (örneğin TaqMan allel ayırım testleri, kantitatif dizileme ve yeni nesil dizileme teknikleri) birlikte kullanılması, saha koşullarında akarisit etkinliğinin daha doğru öngörülmesini sağlayacaktır. Bu tür entegre yaklaşımlar, yalnızca mevcut direnç durumunun belirlenmesine değil, aynı zamanda direnç alellerinin zamansal ve mekânsal yayılım dinamiklerinin izlenmesine de katkı sunacaktır.

Öte yandan, sentetik akarisitlere aşırı bağımlılığın uzun vadede sürdürülebilir olmadığı açıktır. Bu nedenle, entegre zararlı yönetimi (IPM) ilkeleri doğrultusunda kimyasal, biyoteknik ve biyolojik kontrol yöntemlerinin dengeli biçimde bir arada kullanıldığı stratejilerin geliştirilmesi kaçınılmazdır. Akarisitlerin rotasyonlu ve bilinçli kullanımı, dirençli popülasyonların seçilimini baskılamak açısından kritik öneme sahiptir. Buna ek olarak, *Varroa*'ya karşı tolerans veya direnç özellikleri gösteren bal arısı hatlarının selektif ıslahı, gelecekte kimyasal kontrol ihtiyacını azaltabilecek önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, *Varroa destructor*'da sentetik akarisit direnci, yalnızca parazit kontrolüne ilişkin teknik bir sorun değil; aynı zamanda arıcılığın ekonomik sürdürülebilirliği, ekosistem hizmetlerinin devamlılığı ve küresel gıda güvenliği ile doğrudan ilişkili çok boyutlu bir problemdir. Direnç mekanizmalarının moleküler temellerinin daha iyi anlaşılması, bu bilginin saha uygulamalarına entegre edilmesi ve bilim temelli politika kararlarıyla desteklenmesi, bal arısı sağlığının korunması ve arıcılık sektörünün geleceği açısından hayati önem taşımaktadır.

Kaynaklar

- Adjlane, N., Doumandji, S., Haddad, N., 2013. Varroa destructor resistance to fluvalinate in Algeria. *Trends Entomol.* 12, 123–125.
- Akkaya A, Vurusaner C (1997) Field experiment to determine the efficacy of flumethrin and coumaphos against varroasis according to the state of the honey bee colonies. *Acta Parasitol Turc* 21(1):83–86
- Akyol E, Korkmaz A (2005) Bal arısı (*Apis mellifera*) zararlısı Varroa destructor'un biyolojisi. *U Arı D* 5(3):122–127
- Aliano, NP; Ellis, MD (2005) A strategy for using powdered sugar to reduce varroa populations in honey bee colonies. *Journal of Apicultural Research* 44:54-57. <https://doi.org/10.1080/00218839.2005.11101148>
- Alissandrakis, E., Ilias, A., Tsagkarakou, A., 2017. Pyrethroid target site resistance in Greek populations of the honeybee parasite Varroa destructor (Acari: Varroidae). *J. Apicult. Res.* 56, 625–630. <https://doi.org/10.1080/00218839.2017.1368822>.
- Almecija G, Poirot B, Cochard P and Suppo C, Inventory of Varroa destructor susceptibility to amitraz and tau-fluvalinate in France. *Exp Appl Acarol* 82:1–16 (2020).
- Almecija, G., Schimmerling, M., Del Cont, A., Poirot, B., & Duquesne, V. (2022). Varroa destructor resistance to tau-fluvalinate: relationship between in vitro phenotypic test and VGSC L925V mutation. *Pest Management Science*, 78(12), 5097-5105.
- Anderson DL, Trueman JWH (2000) Varroa jacobsoni (Acari: Varroidae) is more than one species. *Exp Appl Acarol* 24(3):165–189
- Bahreini, R., Docherty, C., Feindel, D., & Muirhead, S. (2024). Comparing the efficacy of synthetic Varroacides and Varroa destructor phenotypic resistance using Apiarium and Mason jar bioassay techniques. *Pest Management Science*, 80(3), 1577-1592.
- Bahreini, R., González-Cabrera, J., Hernández-Rodríguez, C. S., Moreno-Martí, S., Muirhead, S., Labuschagne, R. B., & Rueppell, O. (2025). Arising amitraz and pyrethroids resistance mutations in the ectoparasitic Varroa destructor mite in Canada. *Scientific Reports*, 15(1), 1587.

- Bahreini, R., Nasr, M., Docherty, C., Feindel, D., Muirhead, S., & de Herdt, O. (2021). New bioassay cage methodology for in vitro studies on *Varroa destructor* and *Apis mellifera*. *Plos one*, 16(4), e0250594.
- Bak, B; Wilde, J; Siuda, M (2012) Characteristics of north-eastern population of *Varroa destructor* resistant to synthetic pyrethroids. *Medycyna weterynaryjna* 68:606-603. <http://www.medycynawet.edu.pl/231summary-2012/summary-2012-10/4222-summary-med-weter-68-10-603-606-2012>
- Benito-Murcia, M., Bartolomé, C., Maside, X., Bernal, J., Bernal, J.L., del Nozal, M.J., Meana, A., Botías, C., Martín-Hernández, R., Higes, M., 2021. Residual tau-fluvalinate in honey bee colonies is coupled with evidence for selection for *Varroa destructor* resistance to pyrethroids. *Insects* 12, 731. <https://doi.org/10.3390/insects12080731>.
- Blacquièrre T, Altreuther G, Krieger KJ (2017) Evaluation of the efficacy and safety of flumethrin 275 mg bee-hive strips (PolyVar Yellow®) against *Varroa destructor* in naturally infested honey bee colonies in a controlled study. *Parasitol Res* 116(1):109–122
- Bogdanov S (2006) Contaminants of bee products. *Apidologie* 37(1):1–18
- Bonzini, S; Tremolada, P; Bernardinelli, I; Colombo, M; Vighi, M (2011) Predicting pesticide fate in the hive (part 1): experimentally determined τ -fluvalinate residues in bees, honey and wax. *Apidologie* 42:378-390. <https://doi.org/10.1007/s13592-011-0011-2>
- Brodtschneider R, Schlagbauer J, Arakelyan I, Ballis A, Brus J, Brusbardis V et al (2023) Spatial clusters of *Varroa destructor* control strategies in Europe. *J Pest Sci* 96(2):759–783
- Calatayud-Vernich, P; Calatayud, F; Simó, E; Picó, Y (2018) Pesticide residues in honey bees, pollen and beeswax: Assessing beehive exposure. *Environmental Pollution* 241:106-114. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.062>
- Calderone, NW (1999) Evaluation of formic acid and a thymol-based blend of natural products for the fall control of *Varroa jacobsoni* (Acari: Varroidae) in colonies of *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae). *Journal of Economic Entomology* 92:253-260. <https://doi.org/10.1093/jee/92.2.253>

- Calderone, NW (2010) Evaluation of Mite-Away-II (TM) for fall control of Varroa destructor (Acari: Varroidae) in colonies of the honey bee Apis mellifera (Hymenoptera: Apidae) in the northeastern USA. *Experimental and Applied Acarology* 50:123-132. <https://doi.org/10.1007/s10493-009-9288-5>
- Calderone, NW; Spivak, M (1995) Plant extracts for control of the parasitic mite Varroa jacobsoni (Acari: Varroidae) in colonies of the western honey bee (Hymenoptera: Apidae). *Journal of Economic Entomology* 88: 1211-1215. <https://doi.org/10.1093/jee/88.5.1211>
- Calis, JNM; Boot, WJ; Beetsma, J; van den Eijnde, JHPM; de Ruijter, A; van der Steen, JJM (1998) Control of Varroa by combining trapping in honey bee worker brood with formic acid treatment of the capped brood outside the colony: putting knowledge on brood cell invasion into practice. *Journal of Apicultural Research* 37:205-215. <https://doi.org/10.1080/00218839.1998.11100973>
- Carletto J, Martin T, Vanlerberghe-Masutti F, Brévault T (2010) Insecticide resistance traits differ among and within host races in Aphis gossypii. *Pest Manag Sci* 66(3):301–307
- Catterall, WA (2000) From ionic currents to molecular mechanisms: the structure and function of voltage gated sodium channels. *Neuron* 26:13-25. [https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(00\)81133-2](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(00)81133-2)
- Celikkol, E., Dogac, E. (2025). The status of pyrethroid resistance mutation frequencies in Varroa destructor populations in the most important beekeeping areas of Türkiye. *Experimental and Applied Acarology*, 94(2), 32.
- Cheng X, Umina PA, Lee SF, Hoffmann AA (2019) Pyrethroid resistance in the pest mite, Halotydeus destructor: dominance patterns and a new method for resistance screening. *Pestic Biochem Physiol* 159:9–16. <https://doi.org/10.1016/j.pestb.2019.04.010>
- Corley, S.W., Jonsson, N.N., Piper, E.K., Cutull'e, C., Stear, M.J., Seddon, J.M., 2013. Mutation in the Rm β AOR gene is associated with amitraz resistance in the cattle tick Rhipicephalus microplus. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 16772–16777.
- Çakmak I, Sevençakmak S (2016) Beekeeping and recent colony losses in Turkey. *Uludag Bee J* 16(1):31–48

- Çakmak, İ., Aydın, L., Güleğen, A.E. 2003. Güney Marmara Bölgesinde balarısı zararlı ve hastalıkları. Uludağ Arıcılık Dergisi, 3: 33-35.
- Dang K, Doggett SL, Veera Singham G and Lee C-Y, Insecticide resistance and resistance mechanisms in bed bugs, *Cimex spp* (Hemiptera: Cimicidae). *Parasites Vectors* 10:318 (2017).
- De Rouck S, İnak E, Dermauw W, Van Leeuwen T (2023) A review of the molecular mechanisms of acaricide resistance in mites and ticks. *Insect Biochem Mol Biol* 159:103981
- Dong, K; Du, Y; Rinkevich, F et al. (2014) Molecular biology of insect sodium channels and pyrethroid resistance. *Insect Biochemistry* <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2014.03.012> and *Molecular Biology* 50:1-17.
- Eguaras, M; Palacio, MA; Faverin, C; Basualdo, M; Del Hoyo, ML; Velis, G; Bedascarrasbure, E (2003) Efficacy of formic acid in gel for *Varroa* control in *Apis mellifera* L.: importance of the dispenser position inside the hive. *Veterinary Parasitology* 111:241-245. [https://doi.org/10.1016/S0304-4017\(02\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4017(02)00377-1)
- Eischen, F (1998) Trials (and tribulations) with formic acid for *Varroa* control. *American bee journal* 138:734-735
- Elzen, P., Westervelt, D., 2002. Detection of coumaphos resistance in *Varroa destructor* in Florida. *Am. Bee J.* 142, 291–292.
- Elzen, PJ; Baxter, JR; Spivak, M; Wilson, WT (1999a) Amitraz resistance in *Varroa*: New discovery in North America. *American bee journal* 139:362-362.
- Elzen, PJ; Eischen, FA; Baxter, JB; Pettis, J; Elzen, GW; Wilson, WT (1998) Fluvalinate resistance in *Varroa jacobsoni* from several geographic locations. *American bee journal* 138:674-676.
- Erdem, E., Koç-Inak, N., Rüstemoğlu, M., İnak, E., 2024. Geographical distribution of pyrethroid resistance mutations in *Varroa destructor* across Türkiye and a European overview. *Exp. Appl. Acarol.* <https://doi.org/10.1007/s10493-023-00879-z>.
- Evans PD and Gee JD, Action of formamidine pesticides on octopamine receptors. *Nature* 287:60–62 (1980).
- Fakhimzadeh, K; Ellis, JD; Hayes, JW (2011) Physical control of *Varroa* mites (*Varroa destructor*): the effects of various dust materials on *Varroa* mite

- fall from adult honey bees (*Apis mellifera*) in vitro. *Journal of Apicultural Research* 50:203-211. <https://doi.org/10.3896/IBRA.1.50.3.04>
- FAOSTAT (2021) Livestock primary production. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QL>. Accessed 15 Jan 2021
- Feyereisen R, Dermauw W, Van Leeuwen T (2015) Genotype to phenotype, the molecular and physiological dimensions of resistance in arthropods. *Pestic Biochem Physiol* 121:61–77
- Field, LM; Emyr Davies, TG; O'Reilly, AO; Williamson, MS; Wallace, BA (2017) Voltage-gated sodium channels as targets for pyrethroid insecticides. *European Biophysics Journal* 46:675-679. <https://doi.org/10.1007/s00249-016-1195-1>
- Gajic B, Radulovic Z, Stevanovic J, Kulisic Z, Vucicevic M, Simeunovic P, Stanimirovic Z (2013) Variability of the honey bee mite *Varroa destructor* in Serbia, based on mtDNA analysis. *Exp Appl Acarol* 61(1):97–105
- Girisgin and Aydın, 2010. Efficacies of formic, oxalic and lactic acids against *Varroa destructor* in naturally infested honeybee (*Apis mellifera* L.) colonies in Turkey. *Kafkas Vet. Fak. Derg.* 16 (6), 941–945. <https://doi.org/10.9775/kvfd.2010.1965>.
- Gonzalez-Cabrera J, Davies TE, Field LM, Kennedy PJ, Williamson MS (2013) An amino acid substitution (L925V) associated with resistance to pyrethroids in *Varroa destructor*. *PLoS ONE* 8(12):1–6.
- González-Cabrera J, Rodríguez-Vargas S, Davies TE, Field LM, Schmehl D, Ellis JD, Krieger K, Williamson MS (2016) Novel mutations in the voltage-gated sodium channel of pyrethroid-resistant *Varroa destructor* populations from the Southeastern USA. *PLoS ONE* 11(5):2–8.
- González-Cabrera, J; Bumann, H; Rodríguez-Vargas, S et al. (2018) A single mutation is driving resistance to pyrethroids in European populations of the parasitic mite, *Varroa destructor*. *Journal of Pest Science* 91:1137-1144. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0968-y>
- González-Cabrera, J; Bumann, H; Rodríguez-Vargas, S et al. (2018) A single mutation is driving resistance to pyrethroids in European populations of the parasitic mite, *Varroa destructor*. *Journal of Pest Science* 91:1137-1144. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0968-y>

- Gracia-Salinas, MJ; Ferrer-Dufol, M; Latorre-Castro, E; Monero-Manera, C; Castillo-Hernández, JA; Lucientes-Curd, J; Peribáñez-López, MA (2006) Detection of fluvalinate resistance in *Varroa destructor* in Spanish apiaries. *Journal of Apicultural Research* 45:101-105. <https://doi.org/10.1080/00218839.2006.11101326>
- Gregorc A, Alburaki M, Sampson B, Knight PR, Adamczyk J (2018) Toxicity of selected acaricides to honey bees (*Apis mellifera*) and varroa (*Varroa destructor* Anderson and Trueman) and their use in controlling varroa within honey bee colonies. *Insects* 9(2):20. <https://doi.org/10.3390/insects9020055>
- Haber AI, Steinhauer NA, vanEngelsdorp D (2019) Use of chemical and nonchemical methods for the control of *Varroa destructor* (Acari: Varroidae) and associated winter colony losses in U.S. beekeeping operations. *J Econ Entomol* 112:1509–1525. <https://doi.org/10.1093/jee/toz088>
- Hemingway J, Hawkes NJ, McCarroll L, Ranson H (2004) The molecular basis of insecticide resistance in mosquitoes. *Insect Biochem Mol Biol* 34(7):653–665. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2004.03.018>
- Hernández-Rodríguez CS, Marín Ó, Calatayud F, Mahiques MJ, Mompó A, Segura I, Simó E, González Cabrera J (2021) Large-scale monitoring of resistance to coumaphos, amitraz, and pyrethroids in *Varroa destructor*. *InSects* 12(1):27
- Hernández-Rodríguez CS, Moreno-Martí S, Almecija G, Christmon K, Johnson JD, Ventelon M, vanEngelsdorp D, Cook CS, González-Cabrera J (2022) Resistance to amitraz in the parasitic honey bee mite *Varroa destructor* is associated with mutations in the β -adrenergic-like octopamine receptor. *J Pest Sci* 95:1179–1195. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01471-3>
- Hernández-Rodríguez, C. S., Moreno-Martí, S., Emilova-Kirilova, K., & González-Cabrera, J. (2025). A new mutation in the octopamine receptor associated with amitraz resistance in *Varroa destructor*. *Pest Management Science*, 81(1), 308-315.
- Higes, M., Martín-Hernández, R., Hernández-Rodríguez, C.S., González-Cabrera, J., 2020. Assessing the resistance to acaricides in *Varroa*

- destructor from several Spanish locations. *Parasitol. Res.* 119, 3595–3601.
- Hubert, J., Nesvorna, M., Kamler, M., Kopecky, J., Tyl, J., Titera, D., Stara, J., 2014. Point mutations in the sodium channel gene conferring tau-fluvalinate resistance in *Varroa destructor*. *Pest Manag. Sci.* 70, 889–894. <https://doi.org/10.1002/ps.3679>.
- Imdorf, A; Bogdanov, S; Ochoa, R, Ibáñez; Calderone, N, W. (1999) Use of essential oils for the control of *Varroa jacobsoni* Oud. in honey bee colonies. *Apidologie* 30:209-228. <https://doi.org/10.1051/apido:19990210>
- İnak, E., De Rouck, S., Koç-İnak, N., Erdem, E., Rüstemoğlu, M., Dermauw, W., & Van Leeuwen, T. (2024). Identification and CRISPR-Cas9 validation of a novel β -adrenergic-like octopamine receptor mutation associated with amitraz resistance in *Varroa destructor*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 204, 106080.
- Jack CJ, Ellis JD (2021) Integrated pest management control of *Varroa destructor* (Acari: Varroidae), the most damaging pest of (*Apis mellifera* L.(Hymenoptera: Apidae)) colonies. *J Insect Sci* 21(5):6
- Johnson RM, Huang ZY, Berenbaum MR (2010) Role of detoxification in *Varroa destructor* (Acari: Varroidae) tolerance of the miticide tau-fluvalinate. *Int J Acarol* 36(1):1–6
- Jonsson, N.N., Klafke, G., Corley, S.W., Tidwell, J., Berry, C.M., Koh-Tan, H., 2018. Molecular biology of amitraz resistance in cattle ticks of the genus *Rhipicephalus*. *Frontiers in Bioscience: Landmark* 23, 796–810.
- Kamler, M., Nesvorna, M., Stara, J., Erban, T., Hubert, J., 2016. Comparison of tau- f luvalinate, acrinathrin, and amitraz effects on susceptible and resistant populations of *Varroa destructor* in a vial test. *Exp. Appl. Acarol.* 69, 1–9.
- Karakaya, İ., Arslanhan, B. A., & Önder, Z. (2024). Detection of mutations in the voltage-gated sodium channel gene of *Varroa destructor* (Acari: Varroidae) populations. *Veterinary Parasitology: Regional Studies and Reports*, 56, 101121.
- Karatolos N, Gorman K, Williamson MS, Denholm I (2012) Mutations in the sodium channel associated with pyrethroid resistance in the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum*. *Pest Manag Sci* 68:834–838

- Katsavou E, Vlogiannitis S, Karp-Tatham E, Blake DP, Ilias A, Strube C, Kioulos I, Dermauw W, Van Leeuwen T, Vontas J (2020) Identification and geographical distribution of pyrethroid resistance mutations in the poultry red mite *Dermanyssus gallinae*. *Pest Manag Sci* 76(1):125–133
- Kekecoglu M, Gurcan E, Soysal M (2007) The status of beekeeping for honey production in Turkey. *JOTAF* 4(2):227–236
- Khambay B, Jewess P (2005) Pyrethroids. In: Iatrou K, Gilbert LI, Gill SS (eds) *Comprehensive molecular insect science*, vol 6. Elsevier, Oxford, pp 1–29
- Kim, M.J., Kim, K., Ding, T.-B., Kim, J.H., Jeong, I.H., Kwon, D.H., Lee, S.H., 2019. Residual contact vial method for the rapid on-site detection of insecticide resistance in *Thrips palmi*. *J. Asia Pac. Entomol.* 22, 584–588.
- Kim, S., Yoon, K.A., Cho, S., Lee, J., Lim, Y., Lee, S.H., 2022. Molecular and kinetic properties of three acetylcholinesterases in the *Varroa* mite, *Varroa destructor*. *Pestic. Biochem. Physiol.* 188, 105277.
- Koç N, İnak E, Jonckheere W, Van Leeuwen T (2021) Genetic analysis and screening of pyrethroid resistance mutations in *Varroa destructor* populations from Türkiye. *Syst Appl Acarol* 84(2):433–444. <https://doi.org/10.1007/s10493-021-00626-2>
- Kraus B, Page RE Jr (1995) Population growth of *Varroa jacobsoni* Oud in Mediterranean climates of California. *Apidologie* 26(2):149–157
- Kwon, D.H., Kim, K., Kang, T.-J., Kim, S.-J., Choi, B.-R., Kim, J.I., Lee, S.H., 2015. Establishment of an insecticide resistance monitoring protocol based on the residual contact vial bioassay for *Frankliniella occidentalis*. *J. Asia Pac. Entomol.* 18, 311–314.
- Kwon, D.H., Song, D.Y., Kang, S., Ahn, J.J., Lee, J.-H., Choi, B.R., Lee, S.W., Kim, J.-H., Lee, S.H., 2010. Residual contact vial bioassay for the on-site detection of acaricide resistance in the two-spotted spider mite. *J. Asia Pac. Entomol.* 13, 333–337.
- Lee SH, Kim YH, Kwon DH, Cha DJ, Kim JH (2015) Mutation and duplication of arthropod acetylcholinesterase: implications for pesticide resistance and tolerance. *Pestic Biochem Physiol* 120:118–124
- Lee, J., Lee, J. H., Lim, Y., Cho, S., Moon, K., Kim, S., ... & Lee, S. H. (2025). Rapid spread of Amitraz resistance linked to a unique T115N mutation

- in the octopamine receptor of Varroa mites in Korea. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 210, 106387.
- Lee, J., Moon, K., Cho, S., Lim, Y., Kim, S., Kim, S.-B., Han, S.-M., Kim, Y.H., Lee, S.H., 2023. Establishment and application of bioassay-and molecular marker-based methods for monitoring fluvalinate resistance of Varroa mites. *Pestic. Biochem. Physiol.* 197, 105655.
- Liu Z, Tan J, Huang ZY, Dong K (2006) Effect of a fluvalinate-resistance-associated sodium channel mutation from varroa mites on cockroach sodium channel sensitivity to fluvalinate, a pyrethroid insecticide. *Insect Biochem Mol Biol* 36(11):885–889
- Lodesani, M; Colombo, M; Spreafico, M (1995) Ineffectiveness of Apistan® treatment against the mite Varroa jacobsoni Oud in several districts of Lombardy (Italy). *Apidologie* 26:67-72. <https://doi.org/10.1051/apido:19950109>
- Maggi MD, Ruffinengo SR, Gende LB, Eguaras M Jand Sardella NH, LC50 baseline levels of amitraz, coumaphos, fluvalinate and flumethrin in populations of Varroa destructor from Buenos Aires Province, Argentina. *J Apic Res* 47:292–295 (2008).
- Maggi, MD; Ruffinengo, SR; Damiani, N; Sardella, NH; Eguaras, MJ (2009) First detection of Varroa destructor resistance to coumaphos in Argentina. *Experimental and Applied Acarology* 47:317–320. <https://doi.org/10.1007/s10493-008-9216-0>
- Maggi, MD; Ruffinengo, SR; Negri, P; Eguaras, MJ (2010) Resistance phenomena to amitraz from populations of the ectoparasitic mite Varroa destructor of Argentina. *Parasitology research* 107:1189-1192. <https://doi.org/10.1007/s00436-010-1986-8>
- Marsky, U., Rognon, B., Douablin, A., Viry, A., Rodríguez Ramos, M. A., & Hammaidi, A. (2024). Amitraz resistance in French Varroa mite populations—more complex than a single-nucleotide polymorphism. *Insects*, 15(6), 390.
- Martin SJ, Brettell LE (2019) Deformed wing virus in honeybees and other insects. *Annu Rev Virol* 6:49–69
- Martin, SJ (2004) Acaricide (pyrethroid) resistance in Varroa destructor. *Bee World* 85:67-69. <https://doi.org/10.1080/0005772X.2004.11099632>

- McGruddy, R. A., Bulgarella, M., Felden, A., Baty, J. W., Haywood, J., Stahlmann-Brown, P., & Lester, P. J. (2024). Are increasing honey bee colony losses attributed to Varroa destructor in New Zealand driven by miticide resistance? *Journal of Apicultural Research*, 63(4), 648-659.
- McMenamin AJ, Genersch E (2015) Honey bee colony losses and associated viruses. *Curr Opin Insect Sci* 8:121–129
- Milani, N (1995) The resistance of Varroa jacobsoni Oud to pyrethroids: a laboratory assay. *Apidologie* 26:415-429. <https://doi.org/10.1051/apido:19950507>
- Milani, N (1999) The resistance of Varroa jacobsoni Oud. to acaricides. *Apidologie* 30:229-234. <https://doi.org/10.1051/apido:19990211>
- Millán-Leiva A, Marín O, Christmon K, VanEngelsdorp D, Gonzalez-Cabrera J (2021a) Mutations associated with pyrethroid resistance in Varroa mites, a parasite of honey bees, are widespread across the USA. *Pest Manag Sci* 77(7):3241–3249. <https://doi.org/10.1002/ps.6366>
- Millán-Leiva A, Marín Ó, De la Rúa P, Muñoz I, Tsagkarakou A, Eversol H, Christmon K, Van Engels dorp D, González-Cabrera J (2021b) Mutations associated with pyrethroid resistance in the honey bee parasite Varroa destructor evolved as a series of parallel and sequential events. *J Pest Sci* 94:1505
- Millán-Leiva, A. I. (2022). Pyrethroid resistance in Varroa destructor: Investigating the role of mutations in the voltage-gated sodium channel.
- Miozes-Koch, R; Slabezki, Y; Efrat, H; Kalev, H; Kamer, Y; Yakobson; Dag, A (2000) First detection in Israel of fluvalinate resistance in the Varroa mite using bioassay and biochemical methods. *Experimental and Applied Acarology* 24:35-43. <https://doi.org/10.1023/a:1006379114942>
- Mitton GA, Meroi Arcerito F, Cooley H, Fernández de Landa G, Eguaras MJ, Ruffinengo SR, Maggi MD (2022) More than sixty years living with Varroa destructor: a review of acaricide resistance. *Int J Pest Manag.* <https://doi.org/10.1080/09670874.2022.2094489>
- Mitton GA, Quintana S, Mendoza Y, Eguaras M, Maggi MD, Ruffinengo SR (2021) L925V mutation in voltage-gated sodium channel of Varroa destructor populations from Argentina and Uruguay, with different degree of susceptibility to pyrethroids. *Int J Acarol* 47(5):374–380

- Morfin, N., Rawn, D., Petukhova, T., Kozak, P., Eccles, L., Chaput, J., ... & Guzman-Novoa, E. (2022). Surveillance of synthetic acaricide efficacy against Varroa destructor in Ontario, Canada. *The Canadian Entomologist*, 154(1), e17.
- Noël A, Le Conte Y, Mondet F (2020) Varroa destructor: how does it harm Apis mellifera honey bees and what can be done about it? *Emerg Top Life Sci* 4(1):45–57
- O'Reilly AO, Williamson MS, González-Cabrera J, Turberg A, Field LM, Wallace BA, Davies TE (2014) Predictive 3D modelling of the interactions of pyrethroids with the voltage-gated sodium channels of ticks and mites. *Pest Manag Sci* 70(3):369–377
- Ogihara MH, Kobayashi E, Morimoto N, Yoshiyama M, Kimura K (2021) Molecular analysis of voltage-gated sodium channels to assess τ -fluvalinate resistance in Japanese populations of Varroa destructor (Acari: Varroidae). *Appl Entomol Zool* 56:277–284
- Orantes-Bermejo, FJ; Pajuelo, AG; Megías, MM; Fernández-Piñar, CT (2010) Pesticide residues in beeswax and beebread samples collected from honey bee colonies (Apis mellifera L.) in Spain. Possible implications for bee losses. *Journal of Apicultural Research* 49:243-250. <https://doi.org/10.3896/IBRA.1.49.3.03>
- O'Reilly, AO; Khambay, BPS; Williamson, MS; Field, LM; Wallace, BA; Davies, TGE (2006) Modelling insecticide-binding sites in the voltage-gated sodium channel. *Biochemical Journal* 396:255-263. <https://doi.org/10.1042/BJ20051925>
- Ozdemir N, Muz MN (2021) *Veterinary Sciences and Toxicology*. Ozdemir N (ed) Control of Varroa destructor by Licensed Veterinary Medicinal Products, Efficacy and Resistance Studies, 1st edn. *Turkiye Clin ics*, Ankara, pp 64–78
- Panini M, Reguzzi MC, Chiesa O, Cominelli F, Lupi D, Moores G, Mazzoni E (2019) Pyrethroid resistance in Italian populations of the mite Varroa destructor: a focus on the Lombardy region. *Bull Insectol* 72(2):227–232
- Pettis, JS (2004) A scientific note on Varroa destructor resistance to coumaphos in the United States. *Apidologie* 35:91-92. <https://doi.org/10.1051/apido:2003060>

- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE (2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol Evol* 25(6):345–353
- Ramsey SD, Ochoa R, Bauchan G, Gulbranson C, Mowery JD, Cohen A, Lim D, Joklik J, Cicero JM, Ellis JD, Hawthorne D, vanEngelsdorp D (2019) Varroa destructor feeds primarily on honey bee fat body tissue and not hemolymph. *Proc Natl Acad Sci USA* 116(5):1792–1801
- Rinkevich FD, Du Y, Dong K (2013) Diversity and convergence of sodium channel mutations involved in resistance to pyrethroids. *Pestic Biochem Physiol* 106(3):93–100
- Rinkevich, F.D., Moreno-Martí, S., Hernández-Rodríguez, C.S., González-Cabrera, J., 2023. Confirmation of the Y215H mutation in the $\beta 2$ -octopamine receptor in Varroa destructor is associated with contemporary cases of amitraz resistance in the United States. *Pest Manag. Sci.* 79, 2840–2845.
- Rinkevich, FD (2020) Detection of amitraz resistance and reduced treatment efficacy in the Varroa Mite, Varroa destructor, within commercial beekeeping operations. *PLOS ONE* 15:e0227264. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227264>
- Rodríguez-Dehaibes, SR; Otero-Colina, G; Sedas, VP; Jiménez, JAV (2005) Resistance to amitraz and flumethrin in Varroa destructor populations from Veracruz, Mexico. *J Apicult Res* 44:124-125.
- Rosenkranz P, Aumeier P, Ziegelmann B (2010) Biology and control of Varroa destructor. *J Invertebr Pathol* 103:S96–S119. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2009.07.016>
- Roush, R. T., & Miller, G. L. (1986). Considerations for design of insecticide resistance monitoring programs. *Journal of economic entomology*, 79(2), 293-298.
- Sammataro D, Untalan P, Guerrero F, Finley J (2005) The resistance of varroa mites (Acari: Varroidae) to acaricides and the presence of esterase. *Int J Acarol* 31(1):67–74
- Sirali, R., Aricili, Y., 2002. General Beekeeping Structure of Turkey. *Uludag Bee J.*

- Smodiš Škerl MI, Nakrst M, Žvokelj L, Gregorc A (2011) The acaricidal effect of flumethrin, oxalic acid and amitraz against *Varroa destructor* in honey bee (*Apis mellifera carnica*) colonies. *Acta Vet Brno* 80(1):51–56
- Soderlund DM (2012) Molecular mechanisms of pyrethroid insecticide neurotoxicity: recent advances. *Arch Toxicol* 86(2):165–181
- Sparks TC, Crossthwaite AJ, Nauen R, Banba S, Cordova D, Earley F, Ebbinghaus-Kintscher U, Fujioka S, Hirao A, Karmon D, Kennedy R, Nakao T, Popham HJR, Salgado V, Watsona GB, Wedel BJ, Kennedy R (2020) Insecticides, biologics and nematicides: updates to IRAC's mode of action classification—a tool for resistance management. *Pestic Biochem Physiol* 167:104587
- Sparks, TC; Nauen, R (2015) IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 121:122-128. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.11.014>
- Spreafico M, Eördegh FR, Bernardinelli I, Colombo M (2001) First detection of strains of *Varroa destructor* resistant to coumaphos. Results of laboratory tests and field trials. *Apidologie* 32(1):49–55
- Stanimirović, Z; Glavinić, U; Ristanić, M; Aleksić, N; Jovanović, N; Vejnović, B; Stevanović, J (2019) Looking for the causes of and solutions to the issue of honey bee colony losses. *Acta Veterinaria Beograd* 69:1-31. <https://doi.org/10.2478/acve-2019-0001>
- Stara J, Pekar S, Nesvorna M, Kamler M, Daskocil I, Hubert J (2019) Spatio-temporal dynamics of *Varroa destructor* resistance to tau-fluvalinate in Czechia, associated with L925V sodium channel point mutation. *Pest Manag Sci* 75(5):1287–1294
- Steinhauer N, Kulhanek K, Antúnez K, Human H, Chantawannakul P, Chauzat MP (2018) Drivers of colony losses. *Curr Opin Insect Sci* 26:142–148
- Surlis C, Carolan JC, Coffey MF, Kavanagh K (2016) Proteomic analysis of Bayvarol® resistance mechanisms in the honey bee parasite *Varroa destructor*. *J Apic Res* 55(1):49–64
- Tang W, Wang D, Wang J, Wu Z, Li L, Huang M, Xu S, Yan D (2018) Pyrethroid pesticide residues in the global environment: an overview. *Chemosphere* 191:990–1007

- Terin M, Yıldırım İ, Aksoy ADEM, Sarı MM (2018) Competition power of Turkey's honey export and comparison with Balkan Countries. *Bulg J Agric Sci* 24(1):17–22
- Thompson, HM; Brown, MA; Ball, RF; Bew, MH (2002) First report of *Varroa destructor* resistance to pyrethroids in the UK. *Apidologie* 33:357–366. <https://doi.org/10.1051/apido:2002027>
- Thoms CA, Nelson KC, Kubas A, Steinhauer N, Wilson ME (2019) Beekeeper stewardship, colony loss, and *Varroa destructor* management. *Ambio* 48(10):1209–1218
- Traynor KS, Mondet F, de Miranda JR, Techer M, Kowallik V, Oddie MA, Chantawannakul P, McAfee A (2020) *Varroa destructor*: a complex parasite, crippling honey bees worldwide. *Trends Parasitol* 36(6):592–602
- Trouiller J, Monitoring *Varroa jacobsoni* resistance to pyrethroids in western Europe. *Apidologie* 29:537–546 (1998).
- TÜİK (2023) Türkiye İstatistik Kurumu veri portalı. <https://data.tuik.gov.tr/> Accessed 2 February 2024
- Umpiérrez, ML; Santos, E; González, A; Rossini, C (2011) Plant essential oils as potential control agents of varroaosis. *Phytochemistry Reviews* 10:227–244. <https://doi.org/10.1007/s11101-010-9182-0>
- Underwood, RM; Currie, RW (2003) The effects of temperature and dose of formic acid on treatment efficacy against *Varroa destructor* (Acari: Varroidae), a parasite of *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae). *Experimental and Applied Acarology* 29:303. <https://doi.org/10.1023/A:1025892906393>
- Usherwood PNR, Davies TGE, Mellor IR, O'reilly AO, Peng F, Vais H, Khambay BPS, Field LM, Williamson MS (2007) Mutations in DIIS5 and the DIIS4–S5 linker of *Drosophila melanogaster* sodium channel define binding domains for pyrethroids and DDT. *Febs Lett* 581(28):5485–5492. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.10.057>
- Vais H, Atkinson S, Pluteanu F, Goodson SJ, Devonshire AL, Williamson MS, Usherwood PNR (2003) Mutations of the para sodium channel of *Drosophila melanogaster* identify putative binding sites for pyrethroids. *Mol Pharmacol* 64:914–922

- Van Leeuwen T, Dermauw W (2016) The molecular evolution of xenobiotic metabolism and resistance in chelicerate mites. *Annu Rev Entomol* 61:475–498
- Vlogiannitis S, Jonckheere W, Laget D, de Graaf DC, Vontas J, Van Leeuwen T (2021a) Pyrethroid target-site resistance mutations in populations of the honey bee parasite *Varroa destructor* (Acari: Varroidae) from Flanders, Belgium. *Exp Appl Acarol* 85(2–4):205–221
- Vlogiannitis S, Mavridis K, Dermauw W, Snoeck S, Katsavou E, Morou E, Harizanis P, Swevers L, Hemingway J, Feyereisen R, Van Leeuwen T, Vontas J (2021) Reduced proinsecticide activation by cytochrome P450 confers coumaphos resistance in the major bee parasite *Varroa destructor*. *PNAS* 118(6):e2020380118
- Vlogiannitis S, Mavridis K, Dermauw W, Snoeck S, Katsavou E, Morou E, Harizanis P, Swevers L, Hemingway J, Feyereisen R, Van Leeuwen T, Vontas J (2021b) Reduced proinsecticide activation by cytochrome P450 confers coumaphos resistance in the major bee parasite *Varroa destructor*. *PNAS* 118(6):e2020380118
- Vu, P.D., 2016. Toxicological Analysis of Acaricides for Varroa Mite Management (Thesis) (Virginia Tech).
- Wang R, Liu Z, Dong K, Elzen PJ, Pettis J, Huang Z (2002) Association of novel mutations in a sodium channel gene with fluvalinate resistance in the mite. *Varroa Destr J Apic Res* 41(1–2):17–25
- Warrit N, Hagen TA, Smith DR, Çakmak I (2004) A survey of *Varroa destructor* strains on *Apis mellifera* in Turkey. *J Apic Res* 43(4):190–191. <https://doi.org/10.1080/00218839.2004.11101137>
- Weill, M., Fort, P., Berthomieu, A., Dubois, M.P., Pasteur, N., Raymond, M., 2002. A novel acetylcholinesterase gene in mosquitoes codes for the insecticide target and is non-homologous to the ace gene *Drosophila*. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 269, 2007–2016.
- Williamson, MS; Denholm, I; Bell, CA; Devonshire, AL (1993) Knockdown resistance (kdr) to DDT and pyrethroid insecticides maps to a sodium channel gene locus in the housefly (*Musca domestica*). *Molecular and General Genetics* MGG 240:17-22. <https://doi.org/10.1007/BF00276878>
- Williamson, MS; Martinez-Torres, D; Hick, CA; Devonshire, AL (1996) Identification of mutations in the housefly para-type sodium channel

gene associated with knockdown resistance (kdr) to pyrethroid insecticides. Molecular and General Genetics MGG 252:51-60. <https://doi.org/10.1007/BF02173204>

Wu S, Nomura Y, Du Y, Zhorov BS, Dong K (2017) Molecular basis of selective resistance of the bum blebee BiNav1 sodium channel to tau-fluvalinate. PNAS 114(49):12922–12927

Yalçınkaya A, Keskin N (2010) The investigation of honey bee diseases after colony losses in Hatay and Adana provinces of Turkey. Mellifera 10(20):24–31

Yarsan, E., Yilmaz, F., Sevin, S., Akdeniz, G., Celebi, B., Ozturk, S. H., ... & Pehlivan, S. (2024). Investigation of resistance against to flumethrin using against Varroa destructor in Türkiye. *Veterinary Research Communications*, 48(3), 1683-1696.

BÖLÜM 9

TARIMDA İLAÇ (PESTİSİT) KULLANIMINI AZALTMA: SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNTEMLER

Emre GÜLTEKİN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986690>

¹ Bayburt Üniversitesi Organik Tarım İşletmeciliği Anabilim Dalı, Bayburt, Türkiye.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3601-6085>, emreglt4406@gmail.com.tr

GİRİŞ

İnsanlık geçmişi boyunca su, hava ve yiyecek gibi unsurlar yaşamın en önemli temel kaynakları olmuştur. Dünya genelindeki nüfusun hızlı bir şekilde artışı, gıda ihtiyacını ciddi anlamda yükseltmiş ve bu ihtiyacı karşılamak için birim alandan daha fazla verim elde etme yöntemleri geliştirilmiştir(Dağ ve Akbay 2022). Bu bağlamda, tarımsal üretimde mevcut verimin korunması ve artırılması için bitki koruma yöntemleri, gübreleme, çeşitli yetiştirme teknikleri, tarımsal mekanizasyon, teknoloji entegrasyonu ve suyun yönetimi gibi unsurlar giderek daha önemli hale gelmiştir. Tarımsal kimyasalların kullanımı, ürünlerin verimini ve kalitesini olumlu etkileyebilse de, aynı zamanda çevresel sorunlara yol açmaktadır. Özellikle yüksek miktarda pestisit kullanımı veya uygun olmayan aletlerle yapılan uygulamalar, tüm ekosistemi tehdit eden zararlar doğurabilmektedir(Boz ve Kılıç 2021). Pestisitler, meyve ve sebzeler de dahil olmak üzere tarımsal ürünlerin yetiştirilmesi sırasında zararlıların gelişimini engellemek ve hasattan sonra ürünlerin depolanma süresini ve kalitesini artırmak amacıyla sıkça kullanılmaktadır(Acoğlu ve Ömeroğlu 2021).

Pestisitlerin kullanımı, ürünlerin korunmasında ve bu nedenle tarımsal verimliliğin artırılmasında yarar sağlayabilir. Ancak, farklı pestisitlerin birden çok kez veya aşırı miktarda uygulanması, gıda ürünlerinde kalıntılara neden olabilir. Meyveler için, hasat dönemine en yakın zamanda pestisit uygulamaları gerekli olduğundan, meyvelerde hasat zamanında yüksek pestisit kalıntıları görülebilir (Özbey ve Ark 2017). Bu durum, dünya üzerinde olduğu gibi Türkiye’de de tarım politikalarının ve üretim yöntemlerinin gözden geçirilmesine neden olmuştur. Türkiye, çeşitli iklim koşulları ve zengin biyolojik çeşitliliği sayesinde birçok farklı tarım ürününü yetiştirebilen bir ülkedir. Ancak geleneksel tarım uygulamalarının yaygınlaşması ve yüksek düzeyde kimyasal girdi kullanımı, çevresel tehditlerin artmasına ve tüketicilerin gıda güvenliği konusunda kaygılar duymalarına yol açmıştır. Bu bağlamda Türkiye’de hem kamu hem de özel sektörde çevre dostu ve sürdürülebilir üretim sistemlerine yönelik bilinçlenme artmaya başlamıştır. Özellikle 2000’li yıllardan itibaren organik tarıma ve iyi tarım uygulamalarına yönelik ilgi büyümüş; bu süreçte organik tarım alanı yaklaşık üç kat artarken, iyi tarım uygulamalarının alanı da 88 kat yükselmiştir (Eryılmaz ve Ark 2018). Artan güvenli gıda talebi, insan sağlığını olumsuz etkileyen

pestisitlerin dikkate alınarak gıdaların işlenmesinin önemini artırmaktadır. Pestisit kalıntılarının ticari işlemlerle ne ölçüde ortadan kaldırıldığı; pestisitlerin kimyasal özellikleri, gıda ürününün yapısı, işleme aşamaları ve bileşiğin gıda ile temas süresi gibi çeşitli unsurlara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Pestisit kalıntılarını ortadan kaldırmada etkili unsurların tespit edilmesi, gıda üretim yöntemlerinin pestisit kalıntılarının etkisi üzerine bir inceleme yapılması ve işleme unsurlarının tespit edilmesi, güvenli gıda tüketimi ve insan sağlığına katkı sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır(Açoğlu ve Ömeroğlu 2021).

2. PESTİSİTLERİN SINIFLANDIRILMASI

Pestisitler çeşitli şekillerde kategorize edilebilir. Bunlar; görünümleri, fiziksel yapı özellikleri, hastalık türleri ve bunların biyolojik dönemleri, içerdiği aktif maddelerin türü ve sınıfı, toksisite seviyeleri ve uygulama yöntemleri ile ilişkilidir. En yaygın sınıflandırmalar ise formülasyon türleri ve etkili oldukları zararlılara göre yapılmaktadır. Etkili oldukları zararlı organizmalara dayanarak fungusit, herbisit, nematisit, insektisit, akarisit, bakterisit, mollusisit ve rodentisit gibi kategorilere ayrılmaktadırlar. Formülasyon türlerine göre yapılan sınıflama ise şu şekildedir: Islanabilir tozlar, toz ilaçlar, emülsiyon konsantreleri, solüsyon konsantreleri, suda çözünebilen tozlar, yağlardan yaz mevsimi ve kış mevsimi için olanlar, granüle şekilleri, pelet formundakiler, tablet formları, toz halindeki tohum ilaçları, sıvı formdaki tohum ilaçları, aerosoller, toksik yemler, akışkan konsantreler ve toz halinde bulunan kuru maddeler. Etki yöntemlerine göre sınıflandırma: Bitkilerde, sistemik, yarı sistemik ve sistemik olmayan şeklinde ayrılır. Zararlılarda ise, mide zehiri, temas zehiri ve solunum zehiri olarak gruplandırılabilir. İçeriğindeki aktif madde grubuna dayalı sınıflandırma: Organik fosfor bileşenleri, Karbamat bazlı insektisitler ve Pyrethroid (Piretroit) insektisitler olarak ayrılmaktadır. (Duman 2022).

2.1 Bazı Önemli Pestisitler

2.1.1 İnsektisitler

Yaklaşık 1 milyon böcek türü arasından 10 bini tarımsal ürünlere hasar oluşturan cinstendir ve bu türlerin yediyüz tanesi, yeryüzünde bulunan tarlalarda, depolar içinde toplanan gıdalara çok fazla miktarda zarar verir.

1941 yılına yakın zamanda kullanılan insektisitler; nikotin, petrol bazlı yağlar, arsenikler nikotin, pirekapan, rotenon, sülfür, kriyolit ve hidrojen siyanür gazı ile sınırlıydı(Ware 1994).

2.1.2 Herbisitler

Herbisitler, kimyasal bitki öldürücüler olarak adlandırılan maddeler, yoğun ve yüksek teknolojiye sahip tarım uygulamalarının yaygın olduğu ülkelerde, yabancı otların kontrolünde fiziksel yöntemlerin yerini almıştır. Bu kimyasallar, toprak işleme, çapalama ve elle temizleme işlemlerine göre daha etkili ve maliyet açısından avantajlı bir yabancı ot kontrolü sunar. Herbisitler, tarım alanlarının dışında, örneğin sanayi bölgelerinde, yol kenarlarında, su kenarlarında, çitlerle çevrili alanlarda, dinlenme yerlerinde, demiryolu kenarlarında ve enerji hatlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu maddeler, zarar verebilecek, yangın riski taşıyan ve insanların işlerini aksatabilecek istenmeyen bitkileri ortadan kaldırarak, mahsul biçme maliyetlerini düşürmektedir(Ware 1994). Bazı herbisitlerin sürekli etkileri, hem olumlu hem de olumsuz yönleriyle ele alınabilir. Bu maddelerin toprakta uzun süre kalmaları, çevresel açıdan pek önerilmez. Diğer yandan, çiftçiler için yabancı otları kontrol altında tutmak, ürün büyüme döneminin başından itibaren hem finansal olarak hem de ürün elde etme açısından değerlidir. Herbisitlerin su kaynaklarına nüfuz etme ihtimalleri farklılık göstermektedir. Bazı herbisitler, yağış ya da sulama suyu sayesinde çözünme potansiyeline sahip olacak kadar suya dirençlidir(Güvensoy 2000).

2.1.3 Fungisitler

Fungisitler, mantarları ya da mantar sporlarını kontrol etmek veya ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan kimyasal maddeler ve biyolojik varlıklardır. Hedef mikroorganizmaların birçoğu, mantarlarla bağlantılı olan organizmalardan oluşan biyolojik canlılar grubunun üyeleridir. Ancak ABD'deki süreç daha büyük bir alana yayılmaktadır. US-FIFRA (1947 tarihli Federal Pestisit, Fungisit ve Rodentisit Yasası), fungi tanımını “klorofilsiz tallı bitkiler gibi; yaşayan tüm canlıların hayatında yer alan, buna ek olarak belirli bir işleminden geçen gıdaların üzerinde veya içinde olmayan zehirli mantarlar, kurumlar, yararlı olmayan küfler ve bakteriler” şeklinde açıklamaktadır (Güvensoy 2000).

2.2 FAO-WHO-EPA PESTİSİT SINIFLANDIRMA SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Pestisitlerin dünya genelindeki güvenli yönetimi, FAO, WHO ve EPA gibi kuruluşların oluşturduğu çeşitli tehlike ve toksisite sınıflandırmalarına dayanmaktadır. Bu kuruluşlar, pestisitleri toksisite düzeyleri, sağlık üzerindeki etkileri ve çevresel tehlikeleri bakımından farklı kriterler ile analiz eder (FAO ve WHO 2020).

FAO ve WHO tarafından yayımlanan WHO Tavsiye Edilen Pestisitlerin Tehlikeye Göre Sınıflandırılması sistemi, pestisitleri akut oral ve dermal LD₅₀ değerlerine göre gruplandırmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre pestisitler Ia (son derece tehlikeli), Ib (çok tehlikeli), II (orta derecede tehlikeli), III (az tehlikeli) ve U (genellikle akut tehlike arz etmeyen) kategorilerine yerleştirilmektedir (WHO 2009).

FAO ve WHO tarafından belirlenen yüksek riskli pestisitler (HHP) kriterleri yalnızca kısa vadeli zararlılığı değil; aynı zamanda kanser yapıcı etki, genetik değişiklik riski, üreme sağlığı üzerindeki etkiler, çevresel kalıcılık ve uluslararası antlaşmalarla ilgili ayrıntıları da kapsar. WHO sınıflandırmasında Ia/Ib grubuna girenler, GHS sisteminde 1A/1B olarak tanımlanan maddeler ve Stockholm/Rotterdam sözleşmeleri kapsamında yasaklı veya kısıtlı sayılan pestisitler bu kategoride değerlendirilir (FAO ve WHO 2020).

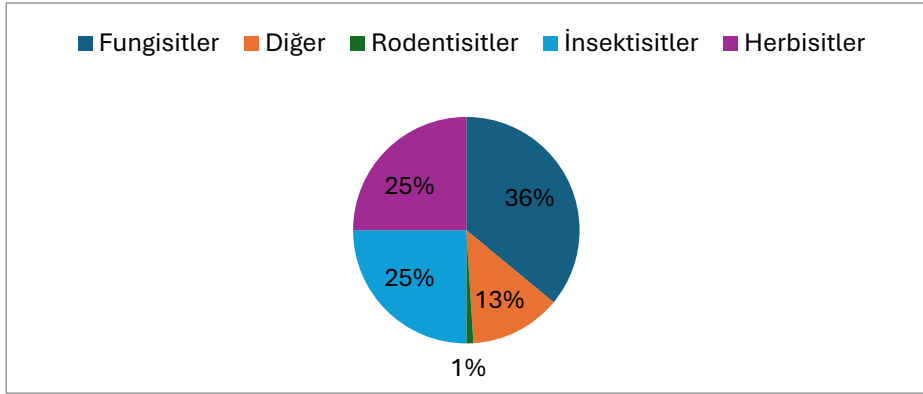
ABD Çevre Koruma Kurumu (EPA), pestisitleri etiketleme ve yasal düzenlemeler için dört ayrı akut toksisite kategorisine ayırmaktadır. Bu sınıflama, ürün etiketlerinde bulunan DANGER/POISON, WARNING ve CAUTION gibi uyarı kelimelerini tanımlar. EPA'nın bu sınıflandırması, akut oral LD₅₀, dermal LD₅₀, inhalasyon LC₅₀, göz/deri tahrişi gibi çeşitli biyolojik ölçütlere dayanmaktadır (EPA 2018).

FAO/WHO sistemi, tehlikeye dayalı şekilde uluslararası kullanıma yönelik olarak oluşturulmuştur; buna karşın, EPA sistemi ABD iç pazarında pestisitlerin güvenli şekilde etiketlenmesine odaklanmaktadır (WHO 2009).

FAO/WHO'nun HHP yaklaşımı, EPA yöntemine oranla daha geniş kapsamlıdır ve kronik etkileri de hesaba katmaktadır (FAO ve WHO 2020). EPA sistemi genellikle akut toksisite göz önünde bulundurarak dört ana kategori sunarken, WHO'nun sınıflandırması beş kategori içermektedir (EPA 2018).

3. TÜRKİYE'DE PESTİSİT KULLANIMI

Dünya genelindeki hastalıklar, zararlı böcekler ve yabancı otlar nedeniyle tarımsal üretimin yaklaşık %26 ila %40 oranında kaybı söz konusu olmakta, eğer önlem alınmazsa bu kayıpların iki katına çıkabileceği belirtilmektedir. Türkiye'de tarımsal üretiminde yer alan 165 farklı bitkide 657 zararlı organizmanın bulunduğu ve bunlardan resmi olarak 335'ten fazlası ile mücadele gerçekleştirildiği bildirilmiştir (Erdoğan 2024).



**Türkiye'de Pestisit Gruplarına Göre
Kullanım Miktarları (FAOSTAT, 2024)**

Türkiye'de toplamda 53. 515 ton pestisit kullanımı mevcuttur. Pestisitlerin gruplara göre kullanım miktarlarına ve dağılımına bakıldığında, %36 ile ilk sırayı fungisitler ve bakteriyositler almaktadır. Ardından %25'ini herbisitler, %25'ini insektisitler, %1'ini rodentisitler ve %13'ünü diğer gruptaki pestisitler oluşturmaktadır (Şekil 2. 4) Türkiye'de hektar başına düşen pestisit kullanımı 22. 2 kg/ha'dır (FAOSTAT, 2024).

4. PESTİSİT KULLANIMININ ETKİLERİ

4.1 Çevresel etkiler

Kimyasal böcek ilaçları toprakta birikim yaparak yer altı sularına karışmakta ve ekosistem canlılarına zarar vermektedir. Özellikle organofosfat ve neonikotinoid sınıfındaki pestisitlerin arı ölümlerine ve polinatörlerin kaybına neden olduğu kanıtlanmıştır (Sánchez Bayo ve Goka 2014). Topraktaki mikroorganizmaların aktivitesindeki düşüş, uzun vadede verim kaybına yol açmaktadır (Walsh ve ark 2021).

4.2 İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkiler

Akut (Kısa Süreli) Etkiler

Organofosfatlar, kolinerjik krize yol açabilir: aşırı salya, terleme, kas spazmları ve bronkospazm görülebilir (Eddleston ve ark 2008).

Akut maruziyet durumunda, doz ile etki ilişkisi, maruz kalınan doz yükseldikçe klinik belirtilerin yoğunluğunun artması ile tanımlanmaktadır. Kısa bir süre içinde yüksek seviyelere maruz kalmak çoğunlukla aniden toksik etkiler yaratır (Eddleston ve ark 2008).

Kronik (Uzun Süreli) Etkiler

Kanser riski: Glifosat, IARC tarafından Grup 2A: Olası kanserojenler arasında yer alır (IARC, 2015).

Hormonal dengesizlikler: Bazı pestisitler, endokrin sistemi etkileyen kimyasallardır ve üreme sağlığına zarar verebilir (Gore ve ark 2015).

Nörogelişimsel sorunlar: Hamilelik döneminde pestisitlere maruziyet, çocuklarda zekada gerileme ve davranışsal bozukluk riskini artırabilir (Rauh ve ark 2011).

Akut – Kronik Maruziyet ve Doz İlişkisi

Pestisitlerin insanlar üzerindeki etkileri, "doz-maruz kalma süresi ilişkisi" ile anlaşılır. Bu duruma göre:

Yüksek miktar + kısa süre → Akut zehirlenme meydana gelir (Eddleston ve ark 2008).

Düşük/orta miktar + uzun süre → Kanser, hormonal bozukluklar ve nörogelişimsel problemler gibi kronik etkiler ortaya çıkar (Gore ve ark 2015).

4.3 Ekonmi Üzerine Etkileri

Pestisitlerin aşırı kullanılması, toprakta bulunan mikroorganizmaların faaliyetlerini azaltarak zamanla verim kaybına yol açar. Toprakta bulunan canlıların azalmasının, yıllık %5-15 oranında verim kaybı yaratabileceği belgelenmiştir. Pestisit kalıntılarının neden olduğu toprak bozulması, çiftçilere gübre ve toprak iyileştirme maliyetlerinde artış yaşatmaktadır. Bu durum, özellikle monokültür tarımın yapıldığı alanlarda ekonomik sürdürülebilirliği olumsuz bir şekilde etkiler. (Aktar ve ark 2009).

Türkiye'de 2024 yılına ait verilere göre toplam pestisit satışının 53,5 milyon litreye ulaştığı, bu durumun toprak üzerindeki kimyasal etkilerin devam ettiğini ortaya koyduğunu ve daha önce belirtilen verim kaybı

tehlikesinin ülke tarımında da geçerli olduğunu doğruladığını göstermektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı 2024).

Pestisitlerin yüzey ve yer altı suyu kaynaklarına sızması, arıtma giderlerini artırmakta ve balıkçılık endüstrisinde büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. ABD'de pestisitlerle kirlenen içme suyunun temizlenmesinin yıllık giderinin 1. 8 milyar dolar civarında olduğu ifade edilmiştir(Pimental 2005). Su ekosistemlerinde meydana gelen biyolojik zararlar, balıkların sayısındaki düşüş nedeniyle balıkçılıkta %10 oranında ekonomik kayıplara yol açabilmektedir(Aktar ve Ark 2009).

Türkiye'de pestisitlerin yoğun olarak kullanıldığı, özellikle tarımın gelişmiş olduğu Adana, Mersin, Antalya ve Manisa gibi illerde bu durumun yüksek seviyelerde olduğu belirtilmiştir. Bu, Türkiye açısından su kaynaklarındaki kimyasal yük artışının ve bununla birlikte gelen ekonomik tehditlerin önem taşıdığını göstermektedir. (Yeşilis Platformu 2024).

Pestisit artıkları, özellikle küresel piyasalarda titizlikle kontrol edildiği için ekonomik zararlar doğurmaktadır. Avrupa Birliği'nde ihraç edilmeyen tarım ürünlerinin yaklaşık %30'u bu pestisit kalıntılarından kaynaklanmaktadır. İade edilen ürünler, üretici ülkelerde milyonlarca dolarlık ihracat kaybına neden olmaktadır (EFSA, 2020).

Türkiye, 2024 yılında AB sınırından pestisit kalıntıları sebebiyle ürünleri en fazla reddedilen ikinci ülke olmuştur. Bu durum, Türkiye'nin ihracat kayıplarının artmasına ve üreticilerin ekonomik sürdürülebilirliğinin kötüleşmesine neden olmuştur (İklim Haber 2024).

5. PESTİSİT KULLANIMINI AZALTMAYA YÖNELİK KULLANILAN SÜRDÜRÜLEBİLİR YÖNTEMLER

5. 1. Entegre Zararlı Yönetimi (Integrated Pest Management – IPM)

IPM, zararlıların kontrolünde kimyasal maddeleri en son çare olarak kullanan kapsamlı bir yönetim sistemidir. Gözlem, öngörü modelleri, ekonomik zarar düzeyi ve kültürel-biyolojik yöntemlerin bir birleşimine dayanmaktadır. IPM uygulamaları ile pestisit kullanımı %50 oranında azaltılabilir(Kogan, 1998).

- IPM bileşenleri:
- Zararlı türlerin düzenli takibi
- Ekonomik zarar düzeyine göre uygulama gerçekleştirme
- Dayanıklı çeşitlerin kullanımı
- Biyolojik ve kültürel yöntemlerle destekleme(Kogan, 1998).

5.1.1. Avantaj ve Dezavantajları

Pestisit kullanımı %30-70 oranında düşüş göstermektedir (Pimentel 2005). Yoğun bir eğitim süreci gerektirir (Barzman 2015).

Eşik değerlerin belirlenmesi zorlayıcı olabilir (Naranjo 2001).

Ekosistemler için büyük fayda sağlar (Barzman 2015).

Yönetim stratejisi karmaşık hale gelebilir (Naranjo 2001).

5.1.2.Türkiye’den Bazı Örnekler

Mısırdaki feromon tuzakları ve eşik uygulama yöntemleri ile kimyasal kullanımı %40 oranında azalmıştır (TAGEM 2022).

Elma içkurdu tahminleme sistemi sayesinde ilaçlamalar daha verimli hale getirilmiştir (Isparta Uyg. Üniv. 2020).

5.1.3. Tarla Düzeyi Modeli

Tahmin ve ön uyarı sistemi: Sıcaklık ile uçuş çizelgeleri aracılığıyla karar verme desteği (Naranjo 2001).

Ekonomik kayıp sınırı modeli: Maliyet-fayda esaslı eşik hesaplaması (Barzman 2015).

5. 2. Biyolojik Mücadele

Biyolojik mücadele, zararlıların sayısını doğal düşmanlar—avcılar, parazitoitler veya zararlı mikroorganizmalar—kullanarak azaltmayı amaçlar.

Örnek uygulamalar:

Trichogramma türü parazitoit arıların mısır kurdu kontrolünde kullanılması

Bacillus thuringiensis (Bt) bakterisinin tırtıllara karşı kullanımı

Biyolojik mücadele, çevreye zarar vermemesi ve uzun vadeli denge sağlaması açısından sürdürülebilir bir yöntemdir (van Lenteren, 2012).

5.2.1. Avantaj ve Dezavantajları

Hedef dışı organizmalara verilen zarar minimaldir (Ehlers 2011) .
Etki süresi kimyasallara kıyasla daha yavaştır (van Lenteren 2012).
Direnç gelişme olasılığı düşüktür (Parra 2014) .
Uygulama şartlarına duyarlıdır (van Lenteren 2007).
Kalıntı bırakmaz (FAO ve WHO 2020).
İlk yatırım maliyeti yüksektir (Lacey 2015).

5.1.2. Türkiye’den Bazı Örnekler

Trichogramma bırakılması (Bağ bölgeleri) Salkım güvesi ile mücadele (TAGEM 2021).

Amblyseius swirskii (Seralar) Tripsler ve beyaz sineklerin kontrol edilmesi (Antalya Tarım İl Müdürlüğü 2020).

5.1.3. Tarla Düzeyi Modeli

Zararlı yoğunluk - parazitoit bırakma oranı Eşik bazlı bırakma iyileştirmesi (van Lenteren 2007).

Avcı-av ilişkileri Sera içindeki yayılım simülasyonu (Parra 2014).

5. 3. Kültürel Yöntemler

Tarım uygulamalarında yapılan bazı değişiklikler, doğal olarak zararlı popülasyonlarını azaltabilir.

Temel kültürel teknikler:

Ekim nöbeti uygulaması

Toprak işleme yöntemlerinin düzenlenmesi

Sağlıklı tohum ve fidelerin kullanımı

Uygun ekim zamanının belirlenmesi

Bitki yoğunluğunun ayarlanması

Bu teknikler, zararlıların yaşam döngülerini etkileyerek pestisit ihtiyacını önemli ölçüde düşürmektedir. (Gurr ve ark 2003)

5.3.1. Avantaj ve Dezavantajları

Pestisit kullanımını düşürür (Gurr 2017).
Sonuçları uzun süre sonra ortaya çıkabilir (FAO 2019).
Toprak kalitesini iyileştirir (Altieri ve Nicholls 2018).
Ekstra iş gücü ihtiyacı olabilir (Gurr 2017).

Uygulaması basittir (Altieri ve Nicholls 2018).

Geniş tarım alanlarında uygulanması zor (FAO 2019).

5.3.2. Türkiye’den Bazı Örnekler

Pamuk ve buğdayın dönüşümlü ekiminde toprak hastalıklarında %35 azalma görüldü (Çukurova Üni. 2017).

Zeytin ağaçlarında bahçe temizliği yapıldığında, zeytin sineği sayısında bir düşüş yaşandı (Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü 2020).

5.3.3. Tarla Düzeyi Modeli

Münavebe iyileştirmesi Hastalık etkileri ve yer altı yapısı üzerinde bir model oluşturur (Altieri ve Nicholls 2018).

Bitki yoğunluğu - zararlılar modeli Yoğun ekim → zararlı sayısındaki artışı değerlendirme (Gurr 2017).

5. 4. Biyopestisitler

Doğal kaynaklardan elde edilen biyopestisitler, kimyasal pestisitlere kıyasla daha güvenli alternatifler sunar.

Ana biyopestisit türleri:

Mikrobiyal pestisitler (örneğin Bt)

Bitkisel özler (örneğin neem yağı – Azadirachta indica)

Feromonlar

RNAi tabanlı biyopestisitler (gelişen bir teknoloji)

Biyopestisitler, biyobozunur özellikleri ve hedef dışı canlılara zarar vermemesi nedeniyle sürdürülebilir tarımın önemli bileşenlerindendir. (Marrone, 2019).

5.4.1. Avantaj ve Dezavantajları

Kimyasal kullanımında ciddi bir düşüş gözlemlenir (Witzgall ve ark 2010).

İlk yatırım maliyeti oldukça fazladır (Howse ve ark 1998).

Kalıntı bırakmaz, çevreye zarar vermez (Witzgall ve ark 2010).

Çok yoğun nüfuslarda etkisi kısıtlıdır (Howse ve ark 1998).

5.4.2. Türkiye’den Bazı Örnekler

Elma bitkisinde çiftleşmeyi önlemek için kullanılan pestisit oranı %60 oranında azaldı (TAGEM 2020).

Zeytin sineği için kullanılan çekici tuzakların sprey sayısı 4'ten 1'e düştü (Bornova ZM Enst. 2019).

5.4.3. Tarla Düzeyi Modeli

Feromon yayılımı modeli Rüzgâr ve bölge yapısı temelinde yayıcı dağılımı (Witzgall ve ark 2010).

Tuzak yoğunluğu modeli Yakalama miktarı → nüfus azalışı (Howse ve ark 1998).

5. 5. Hassas Tarım Teknolojileri

Gelişen sensör teknolojileri, dronlar ve yapay zeka destekli karar verme sistemleri sayesinde pestisit uygulamaları yalnızca gerekli alanlarda ve doğru dozlarda gerçekleştirilmektedir.

Örnek teknolojiler:

Bitki sağlığının uydu görüntüleri ile izlenmesi

Noktasal (spot) pestisit uygulamaları

Değişken oranlı ilaçlama makineleri

Bu yöntemler sayesinde pestisit kullanımının %30-90 oranında azaltılabileceği rapor edilmektedir. (Zhang ve Kovacs, 2012).

5.5.1. Avantaj ve Dezavantajları

%20–40 pestisit tasarrufu sağlar(Zhang 2018)

Teknoloji maliyeti fazladır(Gebbers ve Adamchuk 2010).

Teknoloji eğitimi gereklidir(Gebbers ve Adamchuk 2010).

5.5.2.Türkiye’den Bazı Örnekler

Pamukta drone ile uygulama sayesinde %32 tasarruf sağlanıyor (TAGEM 2023).

Buğdayda NDVI kullanılarak hastalık analizi yapıldı, böylece gereksiz ilaçlamaların önüne geçildi (Konya Tarım İl Md. 2023).

5.5.3. Tarla Düzeyi Modeli

NDVI eşik modeli Bitki stres zonlaması (Zhang 2018).

5. 6. Agroekolojik Yaklaşımlar

Agroekoloji, tarım ekosistemlerini doğal bir dengede tutmayı amaçlamaktadır.

- Agroekolojik uygulamalar:
- Polikültür uygulaması
- Habitat çeşitliliğini artırma
- Kenar bitkilendirme
- Doğal düşmanların yaşam alanlarını destekleme

Bu uygulamalar, ekosistem hizmetlerini artırarak kimyasal pestisit gereksinimini azaltır(Altieri, 2002).

6. DAHA ÖNCE BU KONUDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Niğde'de gerçekleştirilen çalışmada, pekmez toprağından alınan örneklerde farklı pestisit kalıntıları ve polisiklik aromatik hidrokarbonların varlığının incelenmesi hedeflenmiştir. Bu çerçevede, il genelinden toplam 17 pekmez toprağı örneğı temin edilmiştir. Bu örneklerde, bazı önemli pestisit çeşitleri denenmiştir. pekmez örneklerinin herhangibirinde belirtilen pestisit kalıntılarına rastlanmamıştır. Ancak, polisiklik aromatik hidrokarbon analizi sırasında bir örnekte Benzo[a]antrasen ve dört örnekte naftalin seviyesi, beklenilenden yüksek bulunmuştur (Battaloğlu, 2009).

Günümüz tarımında pestisitlerin kullanımı kaçınılmaz bir gerçek olarak karşımıza çıkıyor. Fakat pestisitlerin kullanımı sırasında, ürünlerin hastalık, zararlı organizmalar ve yabancı bitkilere karşı korunması ile canlı sağlığı ve çevre üzerindeki istenilmeyen etkiler aynı anda göz önünde bulundurulmalıdır. Entegre Zararlı Yönetimi (IPM) olarak bilinen bu yaklaşım, tarımsal ürünlerin hem kalite hem de miktar açısından artış göstermesine olanak tanırken, gıda güvenliği ve tarımsal ekosistem üzerinde de olumsuz bir etki yaratmamaktadır. 2010 yılında gerçekleştirdiğı araştırmada, Türkiye'deki pestisit kullanımı AB ülkeleri ve dünya genelindeki durumla kıyaslanmış ve pestisitlerin avantajları, dezavantajları ile tarımsal ekosistem içindeki davranışları açıklığa kavuşturulmuştur. Ayrıca, güvenli ve etkili pestisit uygulamaları, ürünlerde olası kalıntılar ve bu kalıntıları etkileyen faktörler gibi konular da ele alınmıştır. Bunun yanı sıra, AB'nin hızlı alarm sisteminde yayımlanan kalıntı uyarısı alan ülkelerin durumu da karşılaştırılmıştır (Tiryaki ve Ark 2010).

Özbey ve Uygun (2006) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, hasat sonrası pestisit bulunmayan nanelerin organofosforlu insektisitlerle (Malathion, Fenitrothion, Chlorpyrifos, Dimethoate ve Pyrimiphos-ethyl)

tedavi edilerek, doğal kurutmanın nanelerdeki pestisit kalıntıları üzerindeki etkileri incelenmiş ve pestisitlerin fizikokimyasal özellikleri ile kurutma sürecindeki kalıntıların bozunma hızları araştırılmıştır. Bu çalışmada, doğal gölgede kurutma işlemi 10 gün sürmüştür ve bu süre zarfında nanelerin nem oranı %85,00'den %10,40'a gerilemiştir. Kurutmanın ilk dört günü boyunca daha yüksek bir kuruma hızı gözlemlenmiştir. Bu aşamada suyun yaklaşık %85,70'inin uzaklaştırıldığı tespit edilmiştir. Kurutma sürecinde yapılan çoklu pestisit kalıntı analizleri, kalıntıların kayda değer ölçüde azaldığını göstermiştir. Pestisitlerin çoğu, kuruma hızının en fazla olduğu başlangıç aşamasında ortadan kaybolmuştur. Chlorpyrifos ise incelenen pestisitler arasında en hızlı bozunma gösteren olmuştur. İlk dört gün boyunca Dimethoate kalıntılarında bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, Pyrimiphos-ethyl dışında, kurutma sürecinde pestisit kalıntılarının dağılma oranının yüksek oktanol-su dağılım katsayısı ve düşük buhar basıncı dolayısıyla tatmin edici olduğunu ortaya koymuştur.

Acoğlu ve Ömeroğlu (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, portakal dilimlerinde bulunan pestisit kalıntı seviyelerinin kurutma sürecindeki bozulma hızıyla fizikokimyasal özellikleri arasındaki bağlantı incelenmiş ve nihai olarak kurutma işlemi için etken faktörler tahmin edilmiştir. Pestisit uygulanan kontrol portakal örnekleri ve kurutulmuş portakal dilimlerinde Abamectin, Buprofezin, Imazalil ve Tiophanate-methyl kalıntılarının sırasıyla 0,4400 ile 1,5000 mg/kg, 1,1660 ile 3,4460 mg/kg, 5,1300 ile 14,7930 mg/kg ve 2,1930 ile 7,7030 mg/kg aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen istatistiksel bulgular, portakal dilimlerinde bulunan pestisit kalıntılarının konsantrasyonunun kurutma işlemi sonrasında kayda değer şekilde yükseldiğini göstermektedir. Bu durumda, yapılan çalışma çerçevesinde incelenen pestisit kalıntılarının kurutma sonrasında portakal dilimlerinde yoğunlaştığı sonucuna ulaşılabilir. Bu durum, ürünün kütlesinin ve nem oranının azalmasına neden olan kurutma işlemi sırasında suyun buharlaşması ile açıklanmaktadır. Analizler doğrultusunda, pestisitlerin bozulma hızının oktanol-su dağılım katsayısı ($\log PO/W$) ile ters orantılı olduğu, yani oktanol-su dağılım katsayısı düşük olan pestisitlerin daha hızlı bozulduğu belirlenmiştir. Pestisitlerin oktanol-su dağılım katsayısı, bir bileşenin oktanoldeki (apolar bir çözücü) çözünürlüğünün suyun çözünürlüğüne (polar bir çözücü) oranını ifade etmektedir.

Zhao ve arkadaşları (2017) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, hünnap meyvelerinde 11 farklı pestisit kalıntısının (Dichlorvos, Malathion, Chlorpyrifos, Triadimefon, Hexaconazole, Myclobutanil, Kresoxim-methyl, Tebuconazole, Epoxiconazole, Bifenthrin ve Cyhalothrin) davranışları, dört değişik kurutma yöntemi (dondurarak, fırında, güneşte ve mikrodalgada kurutma) çerçevesinde incelenmiştir. Bu çalışmada, hünnap ağaçlarına OECD (2008) kriterlerine uygun olarak yeterli düzeyde pestisit kalıntısı sağlamak amacıyla pestisit formülasyonları (emülsifiye edilebilir konsantre veya süspansiyon konsantresi) uygulanmıştır. Yıkama ve bölme gibi ön işlemlerden sonra, ürünler; güneşte, fırında, dondurarak veya mikrodalgada kurutulma işlemlerine tabi tutulmuştur. 70 °C'de 8 saat süreyle etüvde kurutma, -50 °C'de 48 saat dondurarak kurutma ve 700 W gücündeki bir mikrodalgada fırında 4 dakikalık mikrodalgada kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her bir kurutma işlemi üç kez tekrarlanmıştır.

Dağlı (2008) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, Türkiye'nin en önemli tahıl üretim alanlarından olan Konya bölgesindeki buğdayların organik klorlu pestisit kirlenmesi gaz kromatografisi yöntemi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Avrupa Birliği (EC) direktifleri ve WHO/FAO standartlarına göre değerlendirilmiştir. Araştırmada toplam 36 numune, bu bölgedeki çiftçilerden temin edilmiştir. Cis-klordan ve metoksiklor kalıntıları tüm buğday örneklerinde tespit edilmiştir. Klordan izomerleri, metoksiklor, DDT ve metabolitleri, aldrin, beta HCH ile heptaklor en yüksek kalıntı seviyesine sahip olan organik klorlu pestisitlerdir. Bu örneklerde çeşitli organik klorlu pestisitler EC ve WHO/FAO maksimum kalıntı limitlerinin (MRLs) üzerinde bulunmuştur. Aldrin, trans-klordan ve metoksiklor birer numunede, oksiklordan ise sekiz numunede EC veya WHO/FAO MRL değerlerini aşmıştır.

Konya bölgesinde gerçekleştirilen bir araştırmada, yerel pazarlardan ve marketlerden elde edilen domates, biber ve patlıcan örneklerinde toplamda 203 adet pestisit kalıntı seviyesinin tespit edilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Kalıntı analizleri LC-MS/MS ve GC-MS yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Araştırma bulgularına göre, incelenen bir domates numunesinde yasaklı madde olan Oxamyl'in (TGK limit değeri 10.0 µg/kg) yaklaşık yedi kat üzerinde kalıntı içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca bir biber örneğinde ise iki ayrı pestisitinin tespit edildiği görülmüş; bu pestisitler 112.0 µg/kg düzeyinde

Ethion ve 75.0 µg/kg düzeyinde Triazophos olarak kaydedilmiştir. Ayrıca başka bir biber örneğinde, 120 µg/kg Benomyl-carbendazim'in TGK'nın tolerans seviyesinin 100. 0 µg/kg üzerinde olduğu belirlenmiştir. Araştırmaya dahil edilen 10 patlıcan örneğinde ise, yasaklı olan Oxamyl'in yaklaşık 11 kat yani 107. 0 µg/kg düzeyinde bulunduğu saptanmıştır. Ek olarak, üç farklı patlıcan örneğinde Imidacloprid (TGK tolerans değeri 20. 0 µg/kg) sırasıyla 49. 0, 190. 0 ve 64. 0 µg/kg seviyelerinde tespit edilmiştir (Ersoy ve ark. , 2011).

7.SONUÇ

Tarımda kimyasalların kullanımını azaltmak, çevresel sürdürülebilirlik, insan sağlığının korunması, toprak verimliliğinin artırılması ve uzun vadede ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak açısından önemli bir zorunluluk haline gelmiştir. Yakın dönemde gerçekleştirilen araştırmalar, tarımsal üretimde kimyasal pestisitlere fazla bağımlı olmanın, ekosistem hizmetlerini zayıflatmış, biyolojik çeşitliliği azaltmış ve üreticileri yüksek maliyetli girdi bağımlısı hale getirdiğini göstermektedir. Bu sebeple, sürdürülebilir tarım yöntemleri yalnızca alternatif çözümler olarak değil, aynı zamanda kapsamlı bir üretim anlayışı olarak değerlendirilmelidir. Biyolojik mücadelenin uygulanması, entegre zararlı yönetimi (IPM), kültürel önlemler, bitkilerin direncinin artırılması ve dijital tarım teknolojileri, kimyasal giderimlerin gerekliliğini azaltmak için etkili, uygulanabilir ve ekonomik çözümler sunar. Özellikle IPM yöntemi, üretici davranışları ve tarımsal ekosistem dinamikleri göz önünde bulundurularak en uygun mücadelebilirliği belirlemekte esnek bir yapı sağlar. Bu sistemin yaygın bir şekilde benimsenmesi, pestisit kullanımını %30 ila %70 oranında azaltabilir ve daha dengeli bir ekolojik yapı oluşturabilir. Bunun yanı sıra, organik tarım, agroekoloji, toprak sağlığını ön planda tutan üretim yöntemleri ve hassas tarım teknolojileri, kaynakların kullanımını optimize ederek hem kimyasal yükü azaltmakta hem de üretim verimliliğini korumaktadır. Tarım politikalarının bu yöntemleri destekleyecek şekilde düzenlenmesi, çiftçilerin eğitilmesi ve sürdürülebilir yöntemlere geçiş için ekonomik teşviklerin sağlanması, pestisit kullanımının azaltılması sürecini daha etkili ve uygulanabilir hale getirecektir. Sonuç olarak, pestisit kullanımını azaltmak yalnızca tek bir yöntemle değil, bilimsel bilgiyle desteklenen çok yönlü bir

strateji setinin uygulanması ile mümkün olmaktadır. Bu değişim; sağlıklı gıdalar, temiz bir çevre, dayanıklı bir tarım sistemi ve gelecek nesillere aktarılabilir bir üretim modeli oluşturmak açısından hayati bir öneme sahiptir. Tarımın sürdürülebilirliğini artırmak, ancak ekolojik, ekonomik ve sosyal unsurları bir arada ele alan bütünleşik politikalar ve çiftçi odaklı uygulamalarla gerçekleştirilebilir. Bunlara örnek verecek olursak

Sürdürülebilir üretim modellerini teşvik eden destek sistemleri oluşturulmalıdır. Pestisit kayıt ve izleme sistemleri güçlendirilmelidir. Yüksek riskli aktif maddelerin kademeli yasaklanması için geçiş politikaları oluşturulmalıdır. Ar-Ge yatırımları artırılmalıdır. Düzenli tarla gözlemi yapılmalı ve zararlı yoğunluğu ekonomik zarar eşiğine ulaşmadan kimyasal kullanımına başvurulmamalıdır. Münavebe (ekim nöbeti) uygulanarak hastalık ve zararlı baskısı azaltılmalıdır. Toprak sağlığını artırıcı uygulamalar (yeşil gübreleme, kompost, malçlama) ile bitkilerin doğal direnci desteklenmelidir. Yerel biyolojik mücadele ajanlarının tanımlanması ve geliştirilmesi halen yetersizdir. Yerli predatör ve parazitoit türlerinin etkinliğini ölçen çalışmalara ihtiyaç vardır. Biyopestisitlerin depolama, raf ömrü ve arazi şartlarındaki performansı konusunda daha fazla saha denemesi gerekmektedir. Hassas tarımda kullanılan sensör, kamera ve yapay zekâ tabanlı modellerin düşük maliyetli, çiftçi ölçeğine uygun versiyonlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Pestisitlerin toprak mikrobiyomuna uzun dönem etkileri hâlen tam olarak açıklanamamıştır. Toprak biyolojik çeşitliliği üzerine uzun süreli gözlem çalışmalarına ihtiyaç vardır. Çiftçi davranışları ve benimseme engelleri üzerine sosyo-ekonomik araştırmalar sınırlıdır; sürdürülebilir yöntemlere geçişte psikolojik ve ekonomik bariyerler daha detaylı incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- Acoglu, B. ve Ömeroglu Yolcu, P.(2021). The effect of drying processes on pesticide residues in orange (*Citrus sinensis*), *Drying Technology*, 39(13): 2039-2054 p.
- Aktar, M. W., Sengupta, D., ve Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), 1–12.
- Altieri, M. A. (2002). Agroecology: The science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1–3), 1–24.
- Altieri, M. A. ve Nicholls, C. I. (2018). *Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems* (2nd ed.). CRC Press.
- Antalya Tarım İl Müdürlüğü. (2020). Sera biyolojik mücadele raporu. Antalya: İl Tarım ve Orman Müdürlüğü. (Resmi saha raporu).
- Barzman, M. (2015). *IPM principles in practice*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Battaloğlu, R. (2009). Niğde Ğlinden Toplanan Pekmez Toprağı Örneklerinde Pestisit Kalıntıları ve Polisiklik Aromatik Hidrokarbon (PAH) Aranması, 1.Tıbbi Jeoloji Çalıştay, 207-213.
- Bornova Zirai Mücadele Enstitüsü. (2019). Zeytin sineği biyoteknik kontrol sonuçları. İzmir: TAGEM. (Teknik araştırma raporu).
- Boz, İ. ve Kılıç, O. (2021). “Türkiye’de organik tarımın gelişmesi için alınması gereken önlemler”. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 8(3), 390-400.
- Çukurova Üniversitesi. (2017). Pamuk münavebe denemeleri. Adana: ÇÜ Ziraat Fakültesi. (Araştırma projesi raporu).
- Dağ, M. M. ve Akbay, C. (2022). “Sürdürülebilir tarımsal uygulamalar ile küresel gıda krizine karşı alternatif çözümler”. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 8(2), 101-113.
- Dağlı, Z. (2008). Konya Bölgesindeki Buğdaylarda Organik Klorlu Pestisit Seviyelerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 1-37.
- Duman, A.(2022). Üretici Koşullarında Pestisit Uygulanan Sultani Çekirdeksiz Üzümlerinde Pestisit Kalıntılarının Araştırılması, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitki Koruma Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale.
- Eddleston, M. Buckley, N. A. Eyer, P. ve Dawson, A. H.(2008). Management of acute organophosphorus pesticide poisoning. *The Lancet*, 371(9612), 597-607.

- EFSA (European Food Safety Authority). (2020). Cumulative dietary risk characterisation of pesticides that have acute effects on the nervous system. EFSA Journal, 18(4):e06087.
- Ehlers, R.-U. (2011). Entomopathogenic nematodes: From laboratory to field application (2nd ed.). Springer.
- US Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Label Review Manual – Chapter 7: Precautionary Statements and Acute Toxicity.
- Erdoğan.C. (2024). Entegre Zararlı Yönetimi Programlarında Kullanılacak Bitki Koruma Ürünlerinin Risk Değerlendirmesi ve Seçimi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 16(1), 277–284.
- Ersoy, N. Tatlı, Ö. Özcan, S. Evcil, E. Coşkun, L. ve Erdoğan, E.(2011). LCMS/MS ve GC-MS” le Bazı Sebze Türlerinde Pestisit Kalıntılarının Tespiti, Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 25 (3), 79-85.
- Eryılmaz, G. A. ve Kılıç, O. (2018). “Türkiye’de Sürdürülebilir Tarım Ve İyi Tarım Uygulamaları”. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tarım ve Doğa Dergisi,21(4), 624-631.
- FAO. (2019). The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- (FAO). (2024). FAOSTAT: Pesticides Use dataset. FAO Statistics Division. Erişim adresi: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>
- Gebbers, R. Ve Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. Science, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Güvensoy, G. (2000). Fate of Pesticides on Soil and Their Impact on Water Environment, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gore, A. C. Chappell, V. A. Fenton, S. E., Flaws, J. A. Nadal, A. Prins, G. S. Zoeller, R. T.(2015). The Endocrine Society's Second Scientific Statement on Endocrine-Disrupting Chemicals. Endocrine Reviews, 36(6), E1–E150.
- Gurr, G. M. Wratten, S. D. ve Luna, J. M. (2003). Multi-function agricultural biodiversity: Pest management and other benefits. Basic and Applied Ecology, 4(2), 107–116.
- Gurr, G. M., Wratten, S. D., Landis, D. A., ve You, M. (2017). Habitat Management to Suppress Pest Populations: Progress and Prospects, Annual Review of Entomology, 62, 91–109. DOI: 10.1146/
- Howse, P. E., Stevens, I. D. R., ve Jones, O. T. (1998). Insect pheromones and their use in pest management. Springer.

- IARC.(2015).IARC Monographs Volume 112: Evaluation of Five Organophosphate Insecticides and Herbicides. Lyon, France: IARC.
- İsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi. (2020). Elma içkurdurdu erken uyarı modeli (IAM) sonuç raporu. İsparta. (Teknik uygulama raporu).
- İklim Haber. (2024). Pestisit krizi büyüyor: 2024'te Avrupa sınırından ürünleri en çok dönen ikinci ülke olduk. <https://www.iklimhaber.org/pestisit-krizi-buyuyor-2024te-avrupa-sinirindan-urunleri-en-cok-donen-2-ulke-olduk/>
- Kogan, M. (1998). Integrated pest management: Historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology*, 43(1), 243–270.
- Konya İl Tarım ve Orman Müdürlüğü. (2023). 2022 Konya çevre durum raporu [Rapor]. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/konya-ilcdr-2022-20230823154609.pdf>
- Lacey, L. A. (Ed.). (2015). Microbial control of insect and mite pests: From theory to practice. Academic Press.
- Marrone, P. G. (2019). Pesticidal natural products—Status and future potential. *Journal of Organic Chemistry*, 84(22), 13309–13315.
- Naranjo, S. E. (2001). Conservation and evaluation of natural enemies in IPM systems for Bemisia tabaci. *Crop Protection*, 20(9), 835–852.
- Özbey, A. Uygun, U.(2006). Effect of Drying on Organophosphorus Pesticide Residues in Peppermint (Mentha piperita L.). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 77(5): 638–642 p.
- Özbey, A.Karagöz, Ş.Cingöz, A. (2017). Effect of Drying Process on Pesticide Residues in Grapes, *Gıda Dergisi*, 42(2): 204-209 p.
- Parra, J. R. P. (2014). Biology and mass rearing of Trichogramma pretiosum on alternative hosts. In J. E. Peña (Ed.), *Biological Control in Latin America and the Caribbean* (pp. 259–276). CAB International.
- Pimentel, D. (2005). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. *Environment, Development and Sustainability*, 7(2), 229–252.
- Rauh, V. Arunajadai, S. Horton, M. Perera, F. Hoepner, L. Barr, D. B. ve Whyatt, R.(2011). Seven-year neurodevelopmental scores and prenatal exposure to chlorpyrifos, a common agricultural pesticide. *Environmental Health Perspectives*, 119(8), 1196–1201.
- Sánchez-Bayo, F. Goka, K. (2014). Pesticide residues and bees – A risk assessment.*PLoS ONE*,9(4),e94482.

- Tarım ve Orman Bakanlığı.(2024). Pestisitsonuç larıaçıkladı: En çok hangi ilde kullanılıyor? Gıda Bülteni.<https://www.gidabulteni.com/tarim/bakanlik-pestisit-sonuclarini-acikladi-en-cok-hangi-ilde-kullaniliyor/1206>
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM). (2020). TAGEM 2020 Yılı Faaliyet Raporu. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. <https://www.tarimorman.gov.tr> (erişim bağlantısı)
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, TAGEM. (2021). TAGEM Faaliyet Raporu 2021. <https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM> (Erişim tarihi)
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM). (2022). TAGEM 2022 faaliyet raporu. Ankara, Türkiye: T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM). (2023). 2023 TAGEM Faaliyet Raporu [Rapor]. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. <https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/Faaliyet%20Raporlar%C4%B1/2023%20TAGEM%20Faaliyet%20Raporu.docx>
- Tiryaki, O. Canhilal, R. ve Horuz, S.(2010). Tarım Gıaçları Kullanımı Ve Riskleri. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26-2 (tarım), 154-169.
- Van Lenteren, J. C. (2007). Biological control: A global perspective. In J. C. Van Lenteren (Ed.), Biological control: A global perspective (pp. 1–19). CABI Publishing.
- Van Lenteren, J. C. (2012). The state of commercial augmentative biological control: Plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. BioControl, 57(1), 1–20.
- Yeşilis Platformu. (2024). Türkiye’de pestisit kullanımı dünya ortalamasının üç katı.<https://www.yesilisplatformu.com/turkiyede-pestisit-kullanimi-dunya-ortalamasinin-uc-kati/>.
- Zhang, C. ve Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. Precision Agriculture, 13(6), 693–712.
- Zhang, W. (2018). Global pesticide use: Profile, trend, cost/benefit, and more. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, 8(1), 1–27.
- Zhao, L. Liu, F. Ge, J. Ma, L. Wu, L. Xue, X. (2017). Changes in elevenpesticide residues in jujube (Ziziphus jujuba Mill.) during drying processing. Drying Technology, 36(8): 965–972 p
- Walsh, A. Khan, H. Grunseich, J. Helms, K. Ing, N. ve Rangel, J. (2021). Pesticide exposure during development does not affect the larval pheromones, feeding

- rates, or morphology of adult honey bee queens. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 681506.
- Ware, G. W. (1994). *The Pesticide Book*, 4th Edition, Thomson Publications, Fresno, CA.
- Witzgall, P., Kirsch, P., ve Cork, A. (2010). Sex pheromones and their impact on pest management. *Journal of Chemical Ecology*, 36(1), 80–100.
- World Health Organization (WHO). (2009). *The WHO Recommended Classification of Pesticides by Hazard and Guidelines to Classification 2009*.
- World Health Organization & Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). *Guidance on Highly Hazardous Pesticides (HHPs): Criteria, Identification and Risk Mitigation*.

BÖLÜM 10

ANTİMİKROBİYAL BAKIRLI BİLEŞİKLERİN TARIMDA KULLANIMI

Dr. Öğr. Üyesi Benian Pınar AKTEPE*

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986744>

*Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Organik Tarım İşletmeciliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye
benianaktepe@osmaniye.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4731-9954

1. GİRİŞ

Bordo bulamacının 1885 yılında bitki hastalıklarının kontrolünde ilk kez kullanılmasıyla başlayan bakır bazlı antimikrobiyal bileşiklerin tarımsal uygulama süreci, günümüze kadar bitki korumada önemli bir yer edinmiştir. Bu bileşikler, geniş spektrumlu etki gösteren yapıları, nispeten düşük maliyetleri, memeliler için görece düşük toksisite ve kalıcı etki sağlayan kimyasal kararlılıkları sayesinde uzun yıllar boyunca tercih edilmiştir. Bununla birlikte, sürekli ve yoğun kullanımları sonucunda toprakta bakır birikimi, fitotoksisite, bakıra dirençli patojen popülasyonlarının gelişimi ve toprak mikrobiyotası üzerinde olumsuz etkiler gibi sorunlar ortaya çıkmıştır. Günümüzde hem bu bileşiklerin etkinliğini koruyacak hem de çevresel etkilerini azaltacak sürdürülebilir kullanım stratejilerinin geliştirilmesi ve alternatif kontrol yöntemlerinin araştırılması büyük önem taşımaktadır.

2. Bakır Esaslı Bileşiklerin Tarihçesi ve Kullanımı

Bordo bulamacı keşfinden önce de bakır sülfatın antifungal özellikleri bilinmekteydi. Nitekim bu bileşik, buğday tohumlarının rastık sporlarına karşı işlenmesinde ve ahşabın korunmasında kullanılmaktaydı (Johnson, 1935). Ancak, bakır sülfatın suda yüksek çözünürlüğü ve bakır iyonlarının aktif olarak büyüyen bitki dokularına nüfuz etme kapasitesi, yaprak ve meyve üzerinde koruyucu uygulamalar açısından ciddi fitotoksisite riskleri doğurmaktaydı. Bordo bulamacı hazırlanması sırasında kalsiyum hidroksitin bakır sülfat ile reaksiyonu, suda pratik olarak çözünmeyen ve kalsiyum sülfat adsorpsiyonu ile stabilize edilmiş kolloidal mavi bir bakır hidroksit süspansiyonunun oluşmasına neden olur. Sabit veya kompleks formda bulunan bakır, bitki dokusu tarafından kolayca emilmediğinden, fitotoksisite riski önemli ölçüde azalır ve bakır sülfatın tarımsal kullanım alanı genişler.

Bordo bulamacı fungisit olarak kullanımının ardından, yirminci yüzyıl tarımında ve özellikle bitki koruma alanında devrim yaratan bakır esaslı antimikrobiyal bileşikler hızla geliştirilmiştir. Bitki patojenlerine karşı nispeten yüksek toksisite, düşük maliyetleri, sabit bakır bileşiklerinin memeliler için görece düşük toksisitesi, kimyasal kararlılıkları ve bitki yüzeylerinden kolayca uzaklaşmalarını engelleyerek uzun süreli kalıntı etkisi sağlamaları, bu bileşiklerin en önemli avantajları arasında yer almaktadır (Cha ve Cooksey, 1991). Bu özellikler, bakırın yaprak patojenlerini kontrol etmek amacıyla

yaygın kullanımını teşvik etmiş ve tatmin edici düzeyde hastalık yönetimine olanak tanımıştır. Sonuç olarak, bakır esaslı antimikrobiyal bileşikler, hastalık yönetiminde uzun vadeli çözümler sunmayı amaçlayan entegre mücadele sistemlerinin önemli bir bileşeni hâline gelmiştir.

3. Bakırın Bitkilere Etkisi: Koruyucu Rolü ve Fitotoksisite

Entegre mücadele uygulamalarında bakır esaslı antimikrobiyal bileşikler, dirençli veya toleranslı çeşitlerin yetiştirilmesi, kültürel, fiziksel ve biyolojik kontrol yöntemleri ile birlikte kullanılmaktadır. Bu bileşikler, hem bitkileri etkileyen bakteriyel hastalıkların kontrolünde hem de çok sayıda mantar ve oomikete karşı yaygın olarak uygulanmaktadır. Özellikle organik tarımda, antraknoz, bağlarda tüylü küf, patates geç yanıklığı ve çeşitli ürünlerde külleme hastalıkları gibi pek çok patojene karşı en etkili aktif bileşenler arasında yer almaktadır (Finckh ve ark., 2015). Bakır bileşikleri iyileştirici veya sistemik etkiye sahip olmadıklarından yalnızca koruyucu olarak kullanılmaktadır. Bu durum, hassas yaprak dokularında enfeksiyonun önlenmesi ve inokulum birikiminin azaltılması yoluyla hastalık yönetimini geliştirmektedir.

Bakır iyonlarının yavaş salınımı sayesinde, sabitlenmiş bakır bileşikleri bitkiler için daha az fitotoksik olup, sabitlenmemiş bakır bileşiklerine kıyasla hastalıklara karşı daha uzun süreli kalıntı aktivitesi sağlamaktadır. Bitkilerde sabitlenmiş bakır bileşikleri genellikle çözünmez formdadır (Menkissoglu ve Lindow, 1991) ve uygulama sonrasında yaprak yüzeylerine yapışarak koruyucu bir film tabakası oluşturabilir. Bu film, su ve düşük pH ile temas ettiğinde mikrobiyal hücreler için toksik olan bakır iyonlarını yavaşça salan bir rezervuar görevi görmektedir.

Bununla birlikte, bakır fitotoksisitesi riski çeşitli faktörlere bağlıdır. Bakır sülfat gibi yüksek oranda çözünür formülasyonların aşırı veya sık kullanımı, asidik pH'a sahip sprey çözeltileri, yüksek sıcaklıklar, kuru hava koşulları ve uygulanan ürünlerdeki safsızlıklar fitotoksisiteyi artırabilir (Behlau ve ark., 2017). Ayrıca, bitkilerin bazı gelişim aşamalarında (örneğin çiçeklenme veya meyve kızarma dönemi) bakıra karşı duyarlılık artmakta, bu da fitotoksik belirtilerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Renick ve ark., 2008).

4. Bakır Direnci ve Kullanımın Optimizasyonu

Bakır esaslı antimikrobiyal bileşikler çoklu hedefli etki mekanizmalarına sahip olmalarına rağmen, dünya genelinde bazı bitki patojeni bakterilerinde bakıra karşı direnç vakaları artmaktadır (Marco ve Stall, 1983; Martin ve ark., 2004). Özellikle *Xanthomonas perforans* gibi domates bakteriyel lekesine neden olan ksantomonadlarda bu sorun kritik boyuttur (Horvath ve ark., 2012). Dirençli bakteri suşları standart bakır uygulamalarından etkilenmeden çoğalmakta ve hastalıkların kontrolünü zorlaştırmaktadır.

Sürekli bakır uygulamaları, dirençli patojen popülasyonlarının yaygınlaşmasına ve bakır etkinliğinin azalmasına neden olur (Sundin ve ark., 1989). Direnç mekanizmaları arasında bakır iyonlarının sekestrasyonu ve hücre dışına atılması gibi stratejiler bulunmakta olup (Cooksey, 1993), sideroforlar da ağır metalleri şelatlayarak bakıra karşı direnç gelişimine katkı sağlamaktadır (Schalk ve ark., 2011; Braud ve ark., 2009, 2010). Bu durum, bakır kullanımının sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir ve biyolojik kontrol ürünleri ile entegre çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Optimum bakır kullanımının sağlanması için uygulama zamanlaması, doz ve püskürtme sayısının doğru belirlenmesi gerekmektedir. Gelişmiş püskürtme teknolojileri ve karar destek sistemleri, bakırın daha etkin ve çevre dostu kullanılmasına imkân tanımaktadır (Behlau ve ark., 2017).

5. Alternatifler ve Sürdürülebilir Bitki Koruma Yaklaşımları

Bakır esaslı bileşiklerin çevresel etkileri ve direnç gelişimi endişeleri, daha az zararlı alternatiflerin araştırılmasını teşvik etmektedir. Biyolojik mücadele elemanları genellikle dar spektrumlu olmakla birlikte, direnç gelişimi riskini azaltmaları ve biyolojik çeşitliliğe olan olumlu etkileri nedeniyle önem kazanmaktadır (van Lenteren ve ark., 2018). Örneğin, *Aureobasidium pullulans*, *Pantoea agglomerans* ve *Pseudomonas fluorescens* gibi mikroorganizmalar bazı hastalıklarda ticari olarak kullanılmaktadır. Biyolojik mücadele elemanları, toprak, su, bitki ve diğer doğal ortamlar gibi çeşitli ekosistemlerden izole edilen mikroorganizmalardan elde edilmektedir. Özellikle toprak ortamı, zengin mikrobiyal çeşitliliği ve biyokimyasal etkileşimleri nedeniyle antimikrobiyal bileşiklerin keşfi için en önemli kaynaklardan biridir. Aynı şekilde, bitki köklerinin rizosfer bölgesi de antimikrobiyal bileşik üretimi açısından yoğun mikroorganizma aktivitesine

sahiptir. Bu doğal kaynaklardan izole edilen antimikrobiyaller, bitki hastalıklarının yönetiminde etkili ve çevre dostu biyolojik mücadele elemanları olarak kullanılmaktadır (Horuz ve Aysan, 2018; GÜldoğan ve ark., 2022; Tümen ve ark., 2022; Aktepe ve Aysan, 2023; Yıldız ve ark., 2023; Aktepe ve ark., 2024; Okur ve ark., 2024).

Bu kapsamda, mikroorganizmalardan elde edilen biyolojik mücadele elemanları arasında özellikle bakteriyofajlar, hastalık kontrolünde kimyasal yöntemlere alternatif ve çevre dostu çözümler sunmasıyla büyük ilgi görmektedir. Hastalık kontrolünde bakteriyofajların kullanımı, günümüzde yaygın olarak tercih edilen kimyasal kontrol yöntemlerinin yerini alma potansiyeli taşıyan ve hızla gelişen bir bitki koruma alanıdır (Jones ve ark., 2007). Fajlar, entegre hastalık yönetimi stratejileri içerisinde etkin bir şekilde değerlendirilebilir (Çemen ve ark., 2018). Faj uygulamalarının hazırlanmasının görece kolay olması ve üretim maliyetlerinin düşük olması, bu biyolojik ajanları özellikle gelişmekte olan ülkelerde yaygın kullanıma uygun adaylar haline getirmektedir. Ancak, diğer birçok biyolojik mücadele elemanında olduğu gibi, fajların etkinliği büyük ölçüde çevresel koşullar ve hedef bakterinin duyarlılığına bağlıdır. Bu nedenle, faj uygulamalarının geliştirilmesi, üretimi ve uygulanması aşamalarında titiz bir yaklaşım gerekmektedir. Ayrıca, direnç gelişiminin izlenmesi ve kontrol edilmesi de süreklilik arz eden önemli bir husustur. Bakteriyofajlar, bakterileri enfekte eden virüsler olup, yirminci yüzyılın başından itibaren, özellikle bitki kaynaklı bakteriyel hastalıkların kontrolünde yoğun şekilde araştırılmıştır (Svircev ve ark., 2006; Çemen ve ark., 2018; Gayder ve ark., 2024).

Doğada yaygın olarak bulunan bakteriyofajlar, kendi kendini çoğaltabilme yetenekleri, patojen bakterilerin hücre yüzeyindeki reseptörlerine özgüllükleri ve ökaryotik organizmalar için toksik olmamaları nedeniyle yüksek biyolojik kontrol potansiyeline sahiptir. Ayrıca, yerel mikrobiyal flora zarar vermeden sadece hedef bakteri türlerine veya suşlarına özgü etkiler gösterebilirler. Fajların izole edilmesi, üretimi ve depolanması kolay ve maliyeti düşüktür; bu durum, teknolojik altyapının sınırlı olduğu bölgelerde bile kullanımını mümkün kılar. Bununla birlikte, faj kullanımına ilişkin bazı zorluklar mevcuttur. Bakterilerin hızlı mutasyona uğrayarak tek bir faja karşı direnç geliştirebilmesi, kontrol uygulamalarında tek bir fajın kullanımını riskli hale getirmektedir. Ayrıca, güneş ışığı başta olmak üzere UV radyasyonu,

kuruma, sıcaklık ve diğer çevresel faktörler faj popülasyonlarının hızla azalmasına neden olabilir; özellikle UV ışınları önemli bir azalma sebebidir. Bu problemler, fajların koruyucu formülasyonlarla stabil hale getirilmesi veya çoğalabileceği taşıyıcı bakterilerle uygulanması yoluyla aşılmaya çalışılmaktadır. Fajlar, diğer biyolojik mücadele elemanlarıyla kullanıldığında entegre hastalık yönetimi programlarında önemli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, asetil salisilik asit (ASM) ile uygulandığında, yaprak hastalıklarında tek başına ASM, faj veya bakır-makozeb uygulamalarına kıyasla daha yüksek bir kontrol etkinliği sağlanmıştır. Ayrıca, fajların konakçı bakteriler ve diğer biyolojik mücadele elemanları ile eş zamanlı kullanımı, çift düzeyde biyolojik kontrol sağlayarak hastalık yönetiminde sinerjik etkiler ortaya koymaktadır.

Nanopartiküller de yeni bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Gümüş ve çinko nanopartikülleri, bazı sera ve saha denemelerinde bakır bileşiklerine eşdeğer veya daha iyi performans göstermiştir (Ocsoy ve ark., 2013; Graham ve ark., 2016; Abdulrazzaq ve ark., 2024). Ancak, nanopartiküllerin insan sağlığı ve çevresel riskleri üzerine çalışmalar henüz sınırlıdır. Sistemik direnç indükleyiciler ve bitki özleri gibi başka alternatifler de araştırılmakta, ancak bu yaklaşımların etkinlikleri ve yaygın kullanıma girmeleri için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

6. Çevresel Etkiler ve Gelecek Perspektifleri

Bakır, tarımsal ekosistemlerde önemli bir mikro element olmasına rağmen, yüksek konsantrasyonlarda toprakta birikerek bitki sağlığını olumsuz etkileyebilir (Dumestre ve ark., 1993). Toprakta aşırı bakır birikimi, ürün verimi ve kalitesini düşürmekte, toprak verimliliğinde azalmaya yol açmaktadır. Ayrıca, bakırın besin zincirine girmesi yüzey ve yer altı sularının kirlenmesine ve potansiyel halk sağlığı sorunlarına neden olabilir.

Bu nedenlerle, özellikle organik tarımda bakır bileşiklerinin kullanımını kısıtlamak üzere uluslararası düzenleyici kurumlar ve topluluklar baskı uygulamaktadır. Sürdürülebilir bitki hastalıkları yönetimi için entegre yaklaşımlar geliştirilmekte, toprak verimliliği iyileştirilmekte ve bakır kullanımının azaltılması hedeflenmektedir (Lamichhane ve ark., 2018).

Gelecekte, bakırın çevresel etkilerini hassas biçimde değerlendirecek yeni ekolojik risk değerlendirme yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bakırın uzun vadeli tarımsal ekosistem üzerindeki etkilerinin

öngörülmesinde mevcut belirsizliklerin azaltılması için kapsamlı araştırmalar önem taşımaktadır.

7. SONUÇ

Bakır bileşikleri, Bordeaux bulamacının 1885 yılında kullanılmaya başlanmasından bu yana, geniş etki spektrumu, düşük maliyeti ve kimyasal kararlılığı ile bitki korumanın temel taşlarından biri olmuştur. Bu bileşikler, başta bakteriyel ve fungal hastalıklar olmak üzere pek çok patojene karşı koruyucu bir bariyer oluşturmuş ve özellikle organik tarımda vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Ancak, uzun yıllar süren yoğun ve sürekli kullanım, kaçınılmaz olarak önemli çevresel ve tarımsal sorunları da beraberinde getirmiştir.

Toprakta bakır birikimi, fitotoksisite riski, bakıra dirençli patojen suşlarının ortaya çıkışı ve toprak mikrobiyal çeşitliliği üzerindeki olumsuz etkiler, mevcut kullanım stratejilerinin sürdürülebilir olmadığını açıkça göstermektedir. Direnç mekanizmalarının karmaşıklığı ve çevresel kalıcılık, tarımsal üretimde bakıra bağımlılığı azaltmayı ve entegre, çok yönlü yaklaşımları zorunlu kılmaktadır.

Bu bağlamda, bakırın etkinliğini korurken çevresel ayak izini en aza indirmek için akıllı uygulama tekniklerine, hassas tarım teknolojilerine ve karar destek sistemlerine ihtiyaç vardır. Bakır bileşiklerinin dirençli çeşitler, kültürel önlemler, biyolojik kontrol ajanları ve bitki aktivatörleri ile entegre bir şekilde kullanılması ve farklı etki mekanizmalı ürünlerle rotasyona tabi tutulması, sürdürülebilirliğin anahtarıdır. Aynı zamanda, biyolojik kontrol (özellikle bakteriyofajlar ve faydalı mikroorganizmalar), bitki ekstraktları, sistemik direnç indükleyiciler ve dikkatle formüle edilmiş nanopartiküller gibi alternatifler üzerine araştırmalar yoğunlaştırılmalı ve bu alternatifler pratik uygulamaya kazandırılmalıdır. Toprak sağlığının izlenmesi, uzun vadeli ekolojik risk değerlendirmelerinin yapılması ve bakır birikimi konusunda katı ancak gerçekçi düzenlemelerin getirilmesi gelecek için kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, bakır bileşiklerinin tarımdaki rolü, "tek başına mucizevi çözüm" olmaktan çıkıp, "sürdürülebilir bir hastalık yönetimi sisteminin parçalarından biri" olarak evrilmelidir. Bilimsel araştırma, teknolojik yenilik ve sahadaki iyi tarım uygulamalarının bir araya gelmesiyle, hem bitki sağlığını ve verimliliği koruyan hem de çevresel etkileri sınırlayan, gelecek nesillere daha

sağlıklı topraklar ve ekosistemler bırakmamızı sağlayacak dengeli bir yol haritası çizilebilir. Bu geçiş süreci, tarımın geleceği ve gezegenin sağlığı için kaçınılmaz ve acil bir gerekliliktir.

KAYNAKLAR

- Abdulrazzaq OH., Aktepe BP., Aysan Y. Nanopartiküller, Bitki Aktivatörü ve Bazı Kimyasalların Domates Bitkilerinde Bakteriyel Kanseri ve Solgunluk Hastalığının Baskılanması Üzerine Antibakteriyel Etkisi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2024; 7(4): 1526-1539.
- Aktepe, B. P., Aysan, Y. (2023). Biological control of fire blight disease caused by *Erwinia amylovora* on apple. *Erwerbs-Obstbau*, 65(4): 645-654.
- Aktepe, B. P., Okur, M., Esgicioğlu, B., & Aysan, Y. (2024) Farklı *Bacillus* ve *Trichoderma* türleriyle domateste bakteriyel leke (*Xanthomonas euvesicatoria*) ve bakteriyel solgunluk (*Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*) hastalıklarının biyolojik mücadelesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(3), 1281-1292.
- Behlau, F., Scandellari, L. H. M., da Silva Junior, G. J., & Lanza, F. E. (2017). Soluble and insoluble copper formulations and metallic copper rate for control of citrus canker on sweet orange trees. *Crop Protection*, 94, 185-191.
- Braud, A., Hannauer, M., Mislin, G. L., & Schalk, I. J. (2009). The *Pseudomonas aeruginosa* pyochelin-iron uptake pathway and its metal specificity. *Journal of bacteriology*, 191(11), 3517-3525.
- Braud, A., Geoffroy, V., Hoegy, F., Mislin, G. L. A., & Schalk, I. J. (2010). The siderophores pyoverdine and pyochelin are involved in *Pseudomonas aeruginosa* resistance against metals: another biological function of these two siderophores. *Environ Microbiol Rep*, 2, 419-425.
- Cemen, A., Aysan, Y., Horuz, S., and Saygılı, H., (2018). Potential of bacteriophages to control bacterial speck of tomato (*Pseudomonas syringae* pv. *tomato*). *Fresenius Environmental Bulletin*, vol.27, 9366-9373.
- Cha, J. S., & Cooksey, D. A. (1991). Copper resistance in *Pseudomonas syringae* mediated by periplasmic and outer membrane proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 88(20), 8915-8919.

- Cooksey, D. A. (1993). Copper uptake and resistance in bacteria. *Molecular microbiology*, 7(1), 1-5.
- Dumestre, A., Sauve, S., McBride, M., Baveye, P., & Berthelin, J. (1999). Copper speciation and microbial activity in long-term contaminated soils. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 36(2), 124-131.
- Finckh, M. R., Tamm, L., & Bruns, C. (2015). Chapter 5.1: Organic Potato Disease Management. In *Plant diseases and their management in organic agriculture* (pp. 239-257). The American Phytopathological Society.
- Gayder, S., Kammerecker, S., & Fieseler, L. (2024). Biological control of the fire blight pathogen *Erwinia amylovora* using bacteriophages. *Journal of Plant Pathology*, 106(3), 853-869.
- Graham, J. H., & Myers, M. E. (2016). Evaluation of soil applied systemic acquired resistance inducers integrated with copper bactericide sprays for control of citrus canker on bearing grapefruit trees. *Crop Protection*, 90, 157-162.
- Güldoğan, Ö., Aktepe, B. P., Aysan, Y. (2022). Domates bakteriyel benek hastalığının biyolojik mücadelesinde farklı *Bacillus* türlerinin kullanımı. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(4): 829-839.
- Horuz, S., ve Aysan Y., (2018) *Curtobacterium*, *Microbacterium* ve *Pseudomonas* cinslerinden antagonistik bakteriler kullanılarak *Acidovorax citrulli*'nin neden olduğu karpuz fide yanıklığının biyolojik kontrolü. *Bitki Koruma Bilimi*, 54(3): 138-146.
- Horvath, D. M., Stall, R. E., Jones, J. B., Pauly, M. H., Vallad, G. E., Dahlbeck, D., ... & Scott, J. W. (2012). Transgenic resistance confers effective field level control of bacterial spot disease in tomato.
- Johnson, G. F. (1935). The early history of copper fungicides. *Agricultural History*, 9(2), 67-79.
- Jones, J. B., Jackson, L. E., Balogh, B., Obradovic, A., Iriarte, F. B., & Momol, M. T. (2007). Bacteriophages for plant disease control. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 45(1), 245-262.
- Lamichhane, J.R., Osdaghi, E., Behlau, F. et al. Thirteen decades of antimicrobial copper compounds applied in agriculture. A review.

- Agron. Sustain. Dev. 38, 28 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0503-9>
- Marco, G. M., & Stall, R. E. (1983). Control of bacterial spot of pepper initiated by strains of *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* that differ in sensitivity to copper. *Plant disease*.
- Martin, H. L., Hamilton, V. A., & Kopittke, R. A. (2004). Copper tolerance in Australian populations of *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* contributes to poor field control of bacterial spot of pepper. *Plant disease*, 88(9), 921-924.
- Menkissoglu, O., & Lindow, S. E. (1991). Chemical forms of copper on leaves in relation to the bactericidal activity of cupric hydroxide deposits on plants. *Phytopathology*, 81(10), 1263-1270.
- Renick, L. J., Cogal, A. G., & Sundin, G. W. (2008). Phenotypic and genetic analysis of epiphytic *Pseudomonas syringae* populations from sweet cherry in Michigan. *Plant disease*, 92(3), 372-378.
- Schalk, I. J., Hannauer, M., & Braud, A. (2011). New roles for bacterial siderophores in metal transport and tolerance. *Environmental microbiology*, 13(11), 2844-2854.
- Sundin, G. W., Jones, A. L., & Fulbright, D. W. (1989). Copper resistance in *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* from cherry orchards and its associated transfer in vitro and in planta with a plasmid.
- Svircev AM, Lehman SM, Kim W, Barszcz E, Schneider KE, Castle AJ. 2006. Control of the fire blight pathogen with bacteriophages. Proc. Int. Symp. Biol. Control Bact. Plant Dis., 1st, Seeheim/Darmstadt, Germany, 259. Berlin: Dtsch. Bibl., CIP-Einh.aufn.
- Tümen, B., Aktepe, B. P., Aysan, Y. (2022). Tohuma uygulanan bakteriyel antagonistlerin biberde bakteriyel leke hastalığına etkisi. Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 37(2): 211-220.
- Van Lenteren, J. C., Bolckmans, K., Köhl, J., Ravensberg, W. J., & Urbaneja, A. (2018). Biological control using invertebrates and microorganisms: plenty of new opportunities. *BioControl*, 63(1), 39-59.
- Yildiz, H. N., Altinok, H. H., Dikilitas, M., Günacti, H., and Ay, T. (2023). Suppression of tomato bacterial speck disease (*Pseudomonas syringae* pv. *tomato* (Okabe) Young, Dye, & Wilkie) via induced systemic

resistance by *Pseudomonas* and *Bacillus* strains. *Botany*, 101(9), 391-399.

BÖLÜM 11

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMSAL TEDARİK ZİNCİRLERİNDE KARBON AYAK İZİ YÖNETİMİ: KAVRAMSAL TEMELLER, YAPISAL ANALİZ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ YAKLAŞIMLARI

Dr. Öğr. Üyesi Pırıl TEKİN¹

Dr. Öğr. Üyesi Nurcan DEDEOĞLU²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986947>

¹ Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2326-7571>, ptekin@atu.edu.tr

² Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4008-2587>, ndedeoglu@atu.edu.tr

GİRİŞ

Küresel ölçekte artan nüfus, hızlanan kentleşme ve değişen tüketim alışkanlıkları, tarımsal üretim ve gıda tedarik zincirlerinin yalnızca ekonomik bir faaliyet olmaktan çıkarak çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir nitelik kazanmasına yol açmıştır. Tarım sektörü; biyolojik çeşitlilik, iklimsel belirsizlik, arazi kullanımına ilişkin kısıtlar ve doğal kaynak tüketimi gibi kendine özgü dinamikler barındırmakta olup bu özellikler sektörü sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezine yerleştirmektedir. Üretimden dağıtıma uzanan tüm süreçlerde gerçekleşen enerji kullanımı, kimyasal girdi tüketimi ve lojistik faaliyetler, önemli miktarda sera gazı emisyonuna neden olmakta; bu durum tarımsal tedarik zincirinin karbon ayak izi perspektifinden bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Son yıllarda iklim değişikliği ile mücadele kapsamında geliştirilen uluslararası politika çerçeveleri, tarım sektöründe çevresel performansın iyileştirilmesine yönelik baskıyı belirgin biçimde artırmıştır. Paris İklim Anlaşması, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ve Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi küresel stratejiler, üretim süreçlerinde karbon emisyonlarının azaltılmasını bir gereklilik olarak ortaya koymakta; tedarik zinciri aktörlerinin şeffaf, ölçülebilir ve sürdürülebilir uygulamaları benimsemesini teşvik etmektedir. Bu bağlamda tarımsal üretimde kaynak verimliliğinin artırılması, lojistik süreçlerin optimize edilmesi, gıda kaybı ve israfının azaltılması ile yenilikçi teknolojilerin tedarik zincirine entegrasyonu, sürdürülebilirlik gündeminin temel bileşenleri hâline gelmiştir.

Tarımsal tedarik zinciri; girdilerin temin edilmesi, üretim faaliyetleri, hasat sonrası işlemler, işleme ve paketleme, depolama, soğuk zincir yönetimi, ulusal ve uluslararası taşımacılık, perakende dağıtım ve tüketim aşamalarından oluşan çok katmanlı ve çok aktörlü bir yapıya sahiptir. Zincirin her bir aşaması, kendine özgü çevresel yükler yaratmakta; bu yüklerin etkin yönetilememesi karbon emisyonlarının artmasına, ürün kayıplarının yükselmesine ve ekonomik kayıpların yanı sıra gıda güvenliğinin zayıflamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla tarımsal tedarik zincirinin sürdürülebilirliği, çevresel etkilerin azaltılması ile ekonomik ve operasyonel verimliliğin geliştirilmesini eş zamanlı olarak gerektirmektedir.

Geleneksel yönetim yaklaşımlarının parçalı yapısı, veri eksikliği ve süreçler arası entegrasyonun yetersizliği, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı güçleştirmektedir. Bu noktada çalışma disiplini; modelleme, optimizasyon, süreç tasarımı, veri analitiği ve karar destek sistemleri gibi araçlarıyla kritik bir rol üstlenmektedir. İşletme sırasında kullanılan mühendislik yaklaşımları, tedarik zincirinin bütüncül bir sistem olarak ele alınmasını sağlayarak maliyet, zaman, kalite ve çevresel etki bileşenlerinin dengeli ve entegre bir biçimde yönetilmesine olanak tanır. Tarımsal üretim ve lojistik süreçlerinin analitik modellere dayalı olarak incelenmesi, karar vericilere senaryo analizleri sunarak karbon azaltım stratejilerinin bilimsel temellere oturmasına katkı sağlar.

Dijitalleşme sürecinin hızlanmasıyla birlikte sensör teknolojileri, IoT tabanlı izleme sistemleri, yapay zekâ destekli tahmin modelleri, blockchain tabanlı izlenebilirlik uygulamaları ve dijital ikiz teknolojileri, sürdürülebilir tarımsal tedarik zinciri yönetimine yeni olanaklar sunmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde enerji tüketimi ve çevresel etkiler daha hassas biçimde izlenebilmekte, üretim ve lojistik operasyonları gerçek zamanlı optimize edilebilmekte ve karbon ayak izi hesaplamaları daha yüksek doğruluk düzeyiyle gerçekleştirilebilmektedir.

Bu gelişmeler doğrultusunda tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin etkin yönetimi, yalnızca çevresel bir zorunluluk değil; aynı zamanda uluslararası pazarlarda rekabet edebilirlik, işletme verimliliği ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından stratejik bir unsur hâline gelmiştir. Dolayısıyla karar vericilerin politika, teknoloji ve yönetim stratejilerini bütüncül bir çerçevede değerlendirmesi; mühendislik ve veri bilimi temelli yaklaşımları sistematik biçimde kullanması gerekmektedir.

Bu bölümün temel amacı, tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin yönetimine yönelik olarak yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), endüstri mühendisliği temelli optimizasyon yaklaşımları ve dijital/yenilikçi teknolojileri bütüncül bir çerçevede ele almaktır. Mevcut literatürde çoğunlukla üretim, lojistik veya teknoloji odaklı çalışmaların parçalı ve birbirinden kopuk biçimde incelendiği; karbon ayak izi yönetiminin ise tedarik zincirinin tüm aşamalarını kapsayacak şekilde entegre olarak ele alınmadığı görülmektedir. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmak üzere, tarımsal tedarik zincirlerinde emisyonların yapısal analizini, yaşam döngüsü değerlendirmesi temelli hesaplama

çerçevesini, optimizasyon ve çok kriterli karar verme yaklaşımlarını ve inovatif dijital teknolojileri aynı analitik yapı içinde bir araya getirerek özgün bir değerlendirme sunmaktadır. Böylece hem politika yapıcılar hem de uygulayıcılar için karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik bütüncül, uygulanabilir ve teknoloji destekli bir yol haritası ortaya koyulması hedeflenmektedir.

TARIMSAL TEDARİK ZİNCİRLERİNDE KARBON AYAK İZİNİN ÖNEMİ

Tarımsal tedarik zincirleri; üretim, işleme, depolama, lojistik, perakende dağıtımı ve tüketim aşamalarını kapsayan çok katmanlı ve dinamik bir yapıya sahiptir. Bu çok aşamalı süreçler, yüksek enerji gereksinimi, yoğun girdi kullanımı ve karmaşık lojistik ağları nedeniyle önemli miktarda sera gazı emisyonu üretmektedir. Küresel iklim değişikliğinin etkilerinin belirginleşmesiyle birlikte karbon ayak izi, tarım ve gıda sektöründe yalnızca çevresel bir gösterge değil; aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik, tedarik zinciri dayanıklılığı ve uluslararası rekabet gücü açısından stratejik bir performans kriteri hâline gelmiştir.

1. Tarımsal Emisyonların Yapısal Özellikleri

Tarım sektörü hem doğrudan hem dolaylı sera gazı emisyonlarının önemli bir kaynağıdır.

Doğrudan emisyonlar:

- Gübre kullanımına bağlı nitröz oksit (N_2O) salımları,
- Hayvancılıkta enterik fermantasyon sonucu ortaya çıkan metan (CH_4) emisyonları,
- Toprak işleme süreçlerinde açığa çıkan CO_2 emisyonlarıdır.

Dolaylı emisyonlar ise:

- Tarımsal girdilerin üretim süreçlerinde kullanılan enerji,
- Elektrik ve mekanik enerji tüketimi,
- Lojistik operasyonlar,
- Ambalajlama ve diğer işleme faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır.

Tarımsal emisyonların sektörel bileşenleri şu temel gruplarda toplanabilir:

Üretim Aşaması Emisyonları

- Dizel yakıt kullanan tarım makineleri,
- Kimyasal gübre ve pestisit üretimi ile saha uygulamaları,
- Sulama süreçlerinde kullanılan enerji,
- Toprak işleme kaynaklı karbon salımı.

Özellikle nitrojen bazlı gübreler, N₂O salımı nedeniyle karbon ayak izinin belirleyici bileşenlerinden biridir.

Hasat Sonrası İşlem Emisyonları

- Kurutma, temizleme, ayıklama, fermente etme ve pastörizasyon gibi enerji yoğun işlemler,
- Plastik, karton ve cam gibi ambalaj malzemelerinin üretimi,
- İşleme tesislerindeki elektrik ve su tüketimi.

Dağıtım ve Lojistik Emisyonları

- Taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonları,
- Soğuk zincir süreçlerinde yüksek enerji tüketimi,
- Depolama tesislerinin iklimlendirme ve aydınlatma gereksinimi.

Bu emisyon bileşenlerinin toplamı, bir tarımsal ürünün “tarladan çatala” tüm yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu karbon ayak izini temsil etmektedir.

2. Soğuk Zincirin Karbon Ayak İzindeki Payı

Üretim kaynaklı emisyonların ardından, tarımsal karbon ayak izini önemli ölçüde etkileyen bir diğer kritik bileşen soğuk zincirdir. Bozulabilir nitelikteki ürünlerin kalite kaybı yaşamadan tüketiciye ulaşabilmesi için uygun sıcaklık ve nem koşullarında muhafaza edilmesi gerekmektedir. Meyve-sebze, süt ürünleri, et ve balık gibi ürün gruplarında soğuk zincir, tedarik zincirinin en kritik bileşenlerinden biridir. Ancak soğuk zincirin sağlanması yüksek enerji gerektirdiği için karbon ayak izinin önemli bir kısmını oluşturur.

Çeşitli araştırmalar, soğuk zincirin toplam karbon ayak izi içindeki payının %20 ile %40 arasında değişebildiğini göstermektedir. Soğuk depolar, soğutuculu nakliye araçları, konteynerler ve perakende noktalarındaki soğutma ekipmanları, özellikle fosil yakıtla üretilen enerji kullanıldığında çevresel etkileri katlanarak artırmaktadır.

Soğuk zincirde enerji tüketimini artıran temel faktörler şunlardır:

- Uzun taşıma mesafeleri ve yüksek teslimat sıklığı,
- Yetersiz izolasyon ve buna bağlı ısı kayıpları,
- Verimsiz veya eski soğutma sistemleri,
- Depolarda sıcaklık dalgalanmaları,
- Perakende soğutucularının düşük enerji verimliliği veya açık kullanım biçimi.

Bu nedenle soğuk zincirin optimize edilmesi, tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin azaltılması açısından en etkili müdahale alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

3. Gıda Kaybı ve İsrafının Emisyonlara Etkisi

Soğuk zincirden kaynaklanan emisyonlara ek olarak, gıda kaybı ve israfı tedarik zincirinin görünmeyen ancak en yüksek karbon etkisine sahip alanlarından biridir. Gıda kaybı ve israfı, hem ekonomik hem de çevresel açıdan küresel tedarik zincirlerinin karşı karşıya olduğu en temel sorunlardan biridir. Bir gıdanın üretildikten sonra tüketilmeden kayba uğraması, onun yetiştirilmesi için kullanılan toprak, su, enerji, gübre, işçilik ve taşımacılık kaynaklarının da boşa gitmesi anlamına gelir. Bu durum, gereksiz sera gazı emisyonunun zincir boyunca katlanarak artmasına yol açmaktadır.

FAO verilerine göre dünya genelinde üretilen gıdanın yaklaşık üçte biri kaybolmakta veya israf edilmektedir; bu kayıp yıllık 3,3 gigaton CO₂ emisyonu karşılık gelmektedir. Bu miktar, pek çok ülkenin toplam emisyonuna eşdeğer büyüklükte olup, bu miktarı azaltacak çalışmalar yapılması günümüzde en öncelikli alanlardan birini oluşturmaktadır.

Tarımsal tedarik zincirinde gıda kayıplarına yol açan başlıca faktörler şunlardır:

- Uygunsuz veya aşırı hasat yöntemleri,
- Verimsiz ve kontrolsüz depolama koşulları,
- Standart dışı ürünlerin pazara kabul edilmemesi,
- Soğuk zincirin kırılması,
- Talep tahmini hatalarına bağlı stok fazlalıkları.

Bu nedenle talep tahmini, stok yönetimi, lojistik planlama ve süreç iyileştirme gibi uygulamalar, hem gıda kaybını hem de buna bağlı karbon emisyonlarını azaltmada kritik rol oynamaktadır.

4. Tarımsal Tedarik Zincirinde Karbon Ayak İzinin Ölçümü ve Yönetimi

Karbon ayak izinin doğru ve bütüncül biçimde ölçülmesi, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin temelini oluşturmaktadır. Ölçüm, raporlama ve azaltım süreçlerinin sistematik bir şekilde yürütülmesi, çevresel performansın artırılmasına olanak tanır.

1. Ölçüm (Measurement)

- Enerji tüketim verilerinin toplanması,
- Taşıma mesafelerinin ve araç türlerinin belirlenmesi,
- Girdi kullanım oranlarının analiz edilmesi,
- Gıda kaybı oranlarının izlenmesi.

2. Raporlama (Reporting)

- Ürün bazında karbon ayak izi beyanı,
- Tedarikçi performans raporlamaları,
- Emisyon azaltımına yönelik şeffaf veri paylaşımı.

3. Azaltım (Mitigation)

- Enerji verimli teknolojilerin kullanımı,
- Taşıma rotalarının optimize edilmesi,
- Sürdürülebilir ambalaj materyallerinin geliştirilmesi,
- Üretim süreçlerinin yeniden tasarlanması.

Bu bileşenlerin etkin yönetimi, yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmayıp operasyonel verimliliği de artırmaktadır. Analitik modelleme, optimizasyon ve dijital izleme araçları bu süreçlerin başarısında belirleyici rol oynamaktadır.

5. Sürdürülebilirlik Açısından Tarımsal Karbon Ayak İzinin Stratejik Önemi

Tarım sektöründeki karbon ayak izi, çevresel etkilerin ötesinde ekonomik, ticari ve toplumsal boyutlarıyla ele alınması gereken stratejik bir konudur.

1. Ekonomik Önemi

- Enerji maliyetlerinin düşürülmesi,
- Atık miktarının azaltılması,

- Lojistik süreçlerin verimliliştirilmesi,
- Karbon vergilerinin minimize edilmesi veya önlenmesi.

2. Pazar ve Ticaret Önemi

- Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında karbon sınır vergisi uygulamaları,
- Düşük karbonlu ürünlere yönelik artan tüketici talebi,
- Perakende zincirlerinin sürdürülebilirlik standartlarına uyum zorunluluğu.

3. Toplumsal Önemi

- Gıda güvenliğinin güçlendirilmesi,
- Kırsal kalkınmanın desteklenmesi,
- Tarımsal kaynakların gelecek nesiller için sürdürülebilir kullanımının sağlanması.

Bu çok boyutlu çerçeve, tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izi yönetiminin yalnızca çevresel bir gereklilik değil, aynı zamanda politika ve yönetim açısından bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gereken stratejik bir alan olduğunu göstermektedir. Tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin stratejik önemine ilişkin bu çerçeve, yalnızca mevcut durumun analizini değil, aynı zamanda politika yapıcılar ve işletmeler için uygulanabilir çözüm alanlarını da ortaya koymaktadır. Bu kapsamda karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik teşvik mekanizmalarının güçlendirilmesi, üretici ve tedarikçilerin karbon raporlama süreçlerine uyumunu kolaylaştıracak veri altyapılarının oluşturulması, soğuk zincir ve lojistikte enerji verimli teknolojilerin yaygınlaştırılması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı ile uyumlu karbon sertifikasyon sistemlerinin geliştirilmesi kritik politika öncelikleri arasında yer almaktadır. İşletmeler için ise yenilenebilir enerji yatırımlarının teşvik edilmesi, emisyon performansını tedarikçi seçim kriterlerine entegre eden yönetim modellerinin benimsenmesi ve gıda kayıplarını azaltmaya yönelik süreç iyileştirmelerinin sistematik biçimde uygulanması önemli iyileştirme alanlarını oluşturmaktadır. Böylece tarımsal tedarik zincirleri hem ekonomik dayanıklılığını artırabilir hem de düşük karbonlu üretim modeline geçiş sürecini hızlandırabilir.

6. Karbon Ayak İzi Yönetiminde Karşılaşılan Zorluklar ve Kritik Engeller

Tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izi yönetimi, teorik olarak güçlü araçlar ve metodolojilerle destekleniyor olsa da uygulamada çeşitli yapısal ve operasyonel zorluklar barındırmaktadır. En temel engellerden biri, çiftlik düzeyinde veri toplama süreçlerinin düzensiz, eksik veya standardize edilmemiş olmasıdır; bu durum hem LCA analizlerinin doğruluğunu azaltmakta hem de tedarik zinciri genelinde karşılaştırılabilirlik sorunları yaratmaktadır. Ayrıca küçük ölçekli işletmelerde dijital izleme teknolojilerine erişimin sınırlı olması, enerji verimliliği yatırımlarının yüksek maliyetleri ve lojistik altyapıdaki yetersizlikler karbon azaltım stratejilerinin uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Bölgesel ve coğrafi farklılıklar, üretim yöntemlerinin heterojenliği ve sezonsal değişkenlikler de karbon ayak izi hesaplamalarının standartlaştırılmasını zorlaştıran diğer unsurlardır. Bunun yanı sıra uluslararası pazarlarda artan sürdürülebilirlik gereklilikleri, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki üreticiler için önemli uyum baskıları yaratmakta olup, bu dönüşümün başarıyla gerçekleştirilebilmesi için finansal destek mekanizmalarının ve politik çerçevelerin güçlendirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak karbon ayak izi yönetiminin etkili biçimde uygulanabilmesi, teknolojik, ekonomik ve yönetsel engellerin bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasına bağlıdır.

YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ (LCA) İLE EMİSYON HESAPLAMA

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment – LCA), ürünlerin ve hizmetlerin yaşamları boyunca çevre üzerinde oluşturduğu etkileri kapsamlı ve sistematik bir şekilde analiz etmeye olanak sağlayan bilimsel bir yöntemdir. Tarımsal üretim sektöründe faaliyetlerin çok aşamalı, birbirine bağımlı ve karmaşık olması, LCA'yı çevresel performansın ölçülmesi açısından daha da kritik hâle getirmektedir. Özellikle üretim, işleme, depolama, dağıtım ve tüketim aşamalarının tamamının çevresel etkilerinin bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmesi, tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin doğru bir şekilde hesaplanmasını ve iyileştirme stratejilerinin daha etkili biçimde tasarlanmasını mümkün kılar. ISO 14040 ve ISO 14044 standartları doğrultusunda yapılandırılan LCA metodolojisi, amaç ve kapsam tanımı, yaşam döngüsü envanteri (LCI), yaşam döngüsü etki değerlendirme (LCIA) ve

yorumlama aşamalarından oluşarak tarım sektöründe emisyon analizleri için bilimsel bir çerçeve sunmaktadır.

LCA'nın tarım sektöründeki uygulamaları son yıllarda önemli ölçüde artmış olup, özellikle sera gazı emisyonlarının ürün bazında karşılaştırılabilir bir yöntemle hesaplanmasına imkân tanınması nedeniyle yaygın bir karar destek aracı hâline gelmiştir. Uluslararası literatürde, tarımsal üretim ve gıda sistemlerine yönelik LCA çalışmalarının sayısı 2000'li yıllardan itibaren yaklaşık dört kat artmış ve bu çalışmaların büyük bir bölümü bitkisel üretim, hayvansal üretim ve işlenmiş gıda kategorilerinde yoğunlaşmıştır (Notarnicola et al., 2017). Ayrıca LCA, karbon ayak izinin yanı sıra su tüketimi, arazi kullanımı ve biyoçeşitlilik üzerindeki etkilerin de değerlendirilmesine olanak tanıdığı için sürdürülebilir tarım stratejilerinin geliştirilmesinde bütüncül bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

1. Yaşam Döngüsü Değerlendirme-LCA Metodolojisinin Temel Aşamaları

1.1. Amaç ve Kapsamın Belirlenmesi

Amaç ve kapsam tanımlama aşaması, LCA çalışmasının genel yapısını belirleyen temel adımdır. Bu aşamada hem çalışmadan beklenen sonuçlar hem de analiz çerçevesi açıkça ortaya konur. Tarımsal ürünlerin üretim yöntemlerinin ve kullanım amaçlarının çeşitlilik göstermesi nedeniyle fonksiyonel birimin doğru tanımlanması büyük önem taşır. Fonksiyonel birim, değerlendirmede temel alınan referans noktasıdır ve bir kilogram domates, bir litre süt ya da bir ton buğday gibi ölçütlerle ifade edilir. Bunun yanı sıra sistem sınırlarının belirlenmesi, analize hangi aşamaların dahil edileceğini netleştirir; “tarladan çatala”, “çiftlik kapısından perakendeye” gibi sınır tanımları bu kapsamda değerlendirilir. Veri kaynaklarının niteliği, coğrafi kapsam ve çalışma süresi gibi varsayımlar ve sınırlılıklar da bu aşamada belirlenerek çalışmanın metodolojik tutarlılığı sağlanır.

Fonksiyonel birimin doğru tanımlanmaması, LCA sonuçlarında önemli belirsizliklere ve ürünler arası karşılaştırmaların geçersiz hâle gelmesine neden olabilmektedir. Örneğin bir litre süt üretiminin karbon ayak izi, yağ oranı, besleme rejimi ve bölgesel üretim koşullarına bağlı olarak iki katına kadar değişebilmektedir (Flysjö et al., 2011). Benzer şekilde domates gibi bitkisel ürünlerde, sera üretimi ile açık tarla üretimi arasında birim ürün başına enerji

tüketimi yaklaşık 4–8 kat farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle kapsam aşamasında coğrafi bölge, üretim yöntemi, sezonsal koşullar ve veri kalitesi gibi unsurların açık şekilde tanımlanması, LCA sonuçlarının güvenilirliğini doğrudan artırmaktadır.

1.2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (LCI)

Yaşam döngüsü envanteri aşaması, ürünün yaşam döngüsü boyunca kullanılan tüm girdilerin ve ortaya çıkan tüm çıktılarının nicel olarak belirlendiği kapsamlı bir veri toplama sürecidir. Tarımsal üretim, enerji tüketimi, gübre ve pestisit gibi kimyasal girdiler, tohum ve sulama gibi temel üretim unsurları ve işleme süreçlerinde kullanılan ambalaj malzemeleri ile yardımcı kimyasallar gibi çok çeşitli girdiler içerir. Bunun yanında taşımacılık mesafeleri, araç türleri ve yakıt çeşitleri gibi lojistik parametreler de envanterde yer alır. Çıktı tarafında ise sera gazı emisyonları, atık su ve katı atık miktarları, enerji kayıpları ve ürün kayıpları değerlendirilir. LCI verileri genellikle saha ölçümleri, üretici anketleri ve tedarikçi veri tabanlarından elde edilir. Ayrıca uluslararası LCA veri tabanları, özellikle tarımsal süreçler için güvenilir ve karşılaştırılabilir veri sağlamada önemli bir rol oynar.

Tarım sektöründe LCI verilerinin toplanması çoğu zaman saha ölçümlerine değil, üretici beyanlarına dayandığından veri doğruluğu önemli bir sınırlılık oluşturabilmektedir. Gübre uygulama miktarlarının çiftçiden alınan tahmini değerlere dayanması, sulama suyu miktarının ölçülmemesi veya dizel tüketiminin kayıt altına alınmaması, envanter sonuçlarında %20–35’e varan sapmalara yol açabilmektedir (Jeswani et al., 2020). Bu nedenle LCI çalışmalarında Ecoinvent, Agrifootprint veya ulusal LCA veri tabanları gibi doğrulanmış kaynaklarla saha verilerinin birlikte kullanılması önerilmektedir.

1.3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (LCIA)

Etki değerlendirme aşaması, yaşam döngüsü envanterinde toplanan verilerin çevresel etki kategorileri ile ilişkilendirildiği analitik süreçtir. Tarımsal ürünlerde en sık değerlendirilen etki kategorileri arasında küresel ısınma potansiyeli (GWP), asitleşme ve ötrofikasyon, arazi kullanımı değişiklikleri ve su ayak izi yer almaktadır. Küresel ısınma potansiyeli, tüm sera gazlarının CO₂ eşdeğeri cinsinden hesaplanmasıyla belirlenir ve karbon ayak izi analizinin temel göstergesidir. Gübre kullanımından kaynaklanan amonyak ve nitrojen

bileşiklerinin neden olduğu asitleşme ve ötrofikasyon süreçleri, su ve toprak ekosistemlerinde önemli bozulmalara yol açar. Tarımsal faaliyetlerin arazi kullanımındaki değişiklikler ise karbon depolama kapasitesini etkileyerek dolaylı emisyonları artırabilir. Sulama gereksinimi ve bölgesel su kaynakları üzerindeki baskı da LCA'nın önemli değerlendirme alanlarından biridir. LCIA aşaması, çevresel etkilerin farklı boyutlarının anlaşılmasını sağlayarak karar vericilere çok yönlü bir analiz imkânı sunar.

Tarım sektörüne özgü LCIA uygulamalarında ozon tabakası incelenmesi, fotokimyasal ozon oluşumu, toksisite ve insan sağlığı etkileri gibi ek etki kategorileri de sıklıkla değerlendirilmektedir. Özellikle pestisit kullanımının yoğun olduğu üretim sistemlerinde ekotoksisite ve insan toksisitesi kategorileri kritik öneme sahiptir (Rosenbaum et al., 2008). Ayrıca su kıtlığına duyarlı bölgelerde su ayak izi ve bölgesel su stresi göstergeleri LCA çalışmalarında tamamlayıcı etki kategorileri olarak kullanılmaktadır.

1.4. Yorumlama ve Karar Verme

LCA'nın yorumlama aşaması, elde edilen bulguların analitik bir çerçevede değerlendirilmesini ve karar süreçlerine katkı sağlayacak şekilde yapılandırılmasını içerir. Bu aşamada kritik süreçler belirlenir; örneğin belirli bir ürünün toplam emisyonlarının önemli bir kısmının gübre kullanımından ya da lojistik süreçlerden kaynaklandığı tespit edilebilir. Ayrıca veri belirsizlikleri değerlendirilir, alternatif senaryolar karşılaştırılır ve çevresel etkilerin azaltılması için stratejik çözüm önerileri geliştirilir. Yorumlama aşaması, LCA'nın yalnızca bir değerlendirme yöntemi olmaktan çıkarak politika geliştirme, proses iyileştirme ve tedarik zinciri optimizasyonu için etkin bir karar destek aracına dönüşmesini sağlar.

Yorumlama aşamasında belirsizlik analizi ve duyarlılık analizi yapılması, özellikle tarım gibi veri değişkenliğinin yüksek olduğu sistemlerde LCA sonuçlarının güvenilirliğini artırmaktadır. Monte Carlo simülasyonu veya parametrik duyarlılık analizleri kullanılarak girdilerdeki değişikliklerin sonuçlar üzerindeki etkisi ölçülebilir; böylece kritik süreçlerin doğru şekilde tespit edilmesi sağlanır (Groen et al., 2014). Bu yaklaşımlar karar vericilere hem süreç iyileştirme hem de karbon azaltım stratejileri için daha güçlü bir bilimsel temel sunar.

2. Tarımsal Ürünlerde LCA Uygulama Örnekleri

2.1. Bitkisel Üretim

Bitkisel üretimin yaşam döngüsü değerlendirmesinde en belirgin emisyon kaynakları gübre uygulamaları, tarım makinelerinde kullanılan dizel yakıt, sulama süreçlerindeki enerji tüketimi ve hasat sonrası oluşan ürün kayıplarıdır. Örneğin sebze üretimine yönelik bir LCA çalışmasında, toplam karbon ayak izinin yaklaşık yarısının gübre kullanımından, önemli bir bölümünün ise enerji tüketiminden kaynaklandığı gösterilmiştir. Bu durum özellikle gübre yönetiminin ve enerji verimliliğinin bitkisel üretimde çevresel performansı belirleyen kritik unsurlar olduğunu ortaya koymaktadır.

Literatürde bitkisel ürünlerde gübre kullanımının toplam LCA emisyonlarının %40–60'ını oluşturduğu birçok çalışmada gösterilmiştir (Brentrup et al., 2004). Örneğin domates üretiminde yapılan bir çalışmada, nitrojen gübresi uygulamasının küresel ısınma potansiyeline katkısının, toplam emisyonların %48'ini oluşturduğu tespit edilmiştir (Page et al., 2013). Ayrıca seracılıkta enerji tüketimi, açık tarla üretimine kıyasla 5 kata kadar daha yüksek olabilmekte, bu durum bitkisel üretimde enerji kaynaklı emisyonların önemini artırmaktadır.

2.2. Hayvansal Üretim

Hayvansal üretimin LCA yapısı daha karmaşık olup çok sayıda doğrudan ve dolaylı emisyon kaynağı içerir. Hayvanların sindirim süreçlerinden kaynaklanan enterik fermentasyon metan emisyonlarının başlıca kaynağıdır. Yem üretimi, yüksek enerji ve arazi kullanımı gerektirmesi nedeniyle önemli bir çevresel yük taşır. Ayrıca hayvansal ürünlerde soğuk zincir gereksinimi ve gübre yönetimi süreçleri de toplam karbon ayak izine ciddi katkı sağlar. Bu nedenle süt ve kırmızı et gibi ürünler, diğer tarımsal ürünlere kıyasla daha yüksek karbon ayak izine sahip olma eğilimindedir.

Sığır eti üretiminin karbon ayak izi, literatürde en yüksek değerlerden biri olarak kabul edilmekte olup, 1 kg sığır eti başına 20–60 kg CO₂-eq emisyon aralığı yaygın şekilde raporlanmaktadır (Poore & Nemecek, 2018). Enterik fermentasyonun toplam emisyonlardaki payı %40–50 düzeyindedir. Ayrıca süt üretiminde yem üretimi, toplam çevresel etkinin yaklaşık %36'sını oluşturmakta ve coğrafi koşullar yem verimliliği üzerinde belirleyici olmaktadır (IDF, 2015). Bu bulgular, hayvansal üretimde emisyon azaltım stratejilerinin yem verimliliği,

hayvan besleme sistemleri ve metan azaltım teknolojilerine odaklanması gerektiğini göstermektedir.

2.3. İşlenmiş Gıdalar

İşlenmiş gıdaların LCA analizleri, özellikle işleme aşamasındaki enerji gereksinimi nedeniyle yüksek çevresel etki gösterebilir. Pastörizasyon, kurutma, pişirme gibi termal işlemler önemli miktarda elektrik ve ısı enerjisi tüketir. Ambalaj malzemelerinin üretimi de çevresel yükün bir diğer önemli bileşenidir. Bu nedenle işlenmiş gıdalarda çevresel performans iyileştirmeleri çoğunlukla enerji verimliliği ve ambalaj optimizasyonu etrafında şekillenir.

İşlenmiş gıdaların LCA analizlerinde ambalaj malzemelerinin etkisi özellikle plastik ve cam üretimi nedeniyle yüksek olabilmektedir. Örneğin hazır sos üretimine yönelik bir LCA çalışmasında, cam kavanoz üretiminin toplam küresel ısınma potansiyeline katkısının %35'i bulunduğu rapor edilmiştir (Heller et al., 2019). Enerji yoğun termal işlemlerle birlikte ambalajın çevresel etkileri, işlenmiş gıdaların karbon ayak izinde belirleyici unsurlar arasındadır.

3. LCA Sonuçlarının Tedarik Zinciri Yönetimine Entegrasyonu

LCA sonuçları, tarımsal tedarik zinciri yönetiminde kritik kararların verilmesine önemli katkılar sağlar. Bir ürünün emisyonlarının önemli bir bölümünün lojistik süreçlerden kaynaklandığının belirlenmesi durumunda, rota optimizasyonu ve taşıma modlarının yeniden tasarlanması öncelikli stratejiler hâline gelir. Tedarikçi seçiminde emisyon performanslarının dikkate alınması, tedarik zincirinin yeşil dönüşümüne destek olur. Ambalaj ve işleme teknolojileri değerlendirilirken LCA bulguları, karbon etkisi yüksek malzemeler yerine biyobozunur veya geri dönüştürülebilir alternatiflerin geliştirilmesi için yol gösterici olur. Ayrıca üretim planlaması süreçlerinde LCA verileri, çok amaçlı optimizasyon modellerine girdi sağlayarak çevresel ve ekonomik performansın birlikte iyileştirilmesine imkân tanır.

LCA bulgularının operasyonel kararlara entegrasyonu, özellikle lojistik ve ambalaj tasarımında önemli iyileştirmeler sağlayabilmektedir. Örneğin süt tedarik zincirine ilişkin bir çalışmada, taşıma modunun kamyon yerine demiryoluna kaydırılması hâlinde toplam emisyonlarda %28 azalma sağlanabildiği gösterilmiştir (Nguyen et al., 2013). Benzer şekilde ambalaj hacminin %15 azaltılması, bir işlenmiş gıda ürünüde taşımacılık kaynaklı

emisyonlarda %10 düşüş sağlamıştır. Bu tür bulgular, LCA'nın tedarik zinciri yönetiminde stratejik bir araç olarak kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır.

4. LCA Uygulamalarının Zorlukları ve Sınırlılıkları

Tarımsal ürünlerde LCA uygulamaları, veri ve metodoloji kaynaklı çeşitli güçlükler içerir. Çiftlik düzeyinde toplanan verilerin tutarsızlığı, belirsizliklerin artmasına neden olabilir. Coğrafi farklılıkların üretim süreçleri üzerindeki etkisi, LCA sonuçlarının standardize edilmesini güçleştirir. Tarımsal tedarik zincirlerinin çok aktörlü ve çok aşamalı yapısı, sistemin tam olarak modellenmesini zorlaştırır. Ürünlerin sezonsal özellikleri, emisyon miktarlarının yıl içinde değişmesine yol açarak analiz sürecine ek karmaşıklık getirir. Bunun yanında çalışma sınırlarının farklı araştırmalarda farklı şekillerde tanımlanması, sonuçların karşılaştırılabilirliğini azaltır. Bu nedenle LCA çalışmalarının optimizasyon modelleri, simülasyon ve gelişmiş veri analitiği yöntemleriyle desteklenmesi, sonuçların hem doğruluğunu hem de uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Veri belirsizliği LCA çalışmalarındaki en kritik sorunlardan biridir. Özellikle bölgesel üretim farklılıkları nedeniyle IPCC standart emisyon faktörleri birçok durumda yerel koşulları tam olarak temsil etmemektedir. Örneğin Güney Asya'da pirinç üretimine yönelik yapılan bir çalışmada, IPCC'nin Tier 1 metan faktörünün gerçek saha verilerinden %52 daha düşük olduğu belirlenmiştir (Yan et al., 2003). Bu nedenle tarımsal LCA çalışmalarında yerel emisyon faktörlerinin geliştirilmesi ve çiftlik düzeyinde yüksek çözünürlüklü veri toplanması büyük önem taşımaktadır.

5. Karbon Ayak İzi Hesaplamaları İçin Kullanılan Standartlar ve Araçlar

Karbon ayak izi analizlerinde kullanılan uluslararası standartlar ve veri tabanları, çalışmaların karşılaştırılabilir ve metodolojik olarak tutarlı biçimde yürütülmesini sağlar. ISO 14040 ve 14044 standartları LCA metodolojisinin temelini oluştururken, PAS 2050 standardı ürün bazlı karbon ayak izi hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. GHG Protocol tarafından yayımlanan tarımsal emisyon rehberi, özellikle tarıma özgü süreçlerin metodolojik tanımlanması açısından önemli bir kaynaktır. IPCC emisyon

faktörleri, küresel düzeyde kabul gören emisyon katsayılarını sağlayarak hesaplamaların bilimsel doğruluğunu güçlendirir. Ecoinvent ve Agrifootprint gibi veri tabanları, tarımsal girdilere ilişkin uluslararası düzeyde doğrulanmış yaşam döngüsü verileri sunar. SimaPro, GaBi ve OpenLCA gibi yazılım araçları ise bu verilerin analize entegre edilmesini kolaylaştırarak kapsamlı LCA çalışmaları yapılmasına imkân tanır.

Veri tabanı seçimi LCA sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Örneğin Ecoinvent veri tabanı Avrupa odaklı olduğundan, Avrupa dışındaki üretim sistemlerine doğrudan uygulanması hatalı sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle tarım sektörü için özel olarak geliştirilen Agrifootprint veri tabanı, gübre, yem, tohum ve tarımsal makine girdilerine ilişkin daha ayrıntılı ve tarım odaklı veri setleri sunmaktadır (Durlinger et al., 2017). SimaPro ve GaBi gibi yazılımlar ise bu veri tabanlarını bütüncül analiz çerçevesine entegre ederek hem süreç tabanlı hem de hibrit LCA çalışmalarının yürütülmesine imkân tanımaktadır.

KAYNAKÇA

- Akkerman, R., Farahani, P., & Grunow, M. (2010). Quality, safety and sustainability in food distribution: A review of quantitative operations management approaches and challenges. *OR Spectrum*, 32(4), 863–904.
- Bayssi, O., Naimi, M., Sabir, M., Chikhaoui, M., & Hallam, J. (2024). Carbon footprint of agro-industrial chains: A meta-analysis. *Moroccan Journal of Agricultural Sciences*, 5(2), 97–110.
- Behzadi, G., O’Sullivan, M. J., Olsen, T. L., & Zhang, A. (2018). Agribusiness supply chain risk management: A review of quantitative decision models. *Omega*, 79, 21–42.
- Čapla, J., Zájac, P., & Čurlej, J. (2025). The current state of carbon footprint quantification and tracking in the agri-food industry. *SciFood*, 19(1), 110–127.
- Chaabane, A., Ramudhin, A., & Paquet, M. (2012). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 37–49.
- Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., & Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *Computers & Operations Research*, 40(1), 64–75.
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52.
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90.
- Mandouri, J., Onat, N. C., Kucukvar, M., & Kazançoğlu, Y. (2025). Carbon footprint of food production: A systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, 15, 35630.
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992.
- Rong, A., Akkerman, R., & Grunow, M. (2011). An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 421–429.

- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. A. J. (2018). Modeling a green inventory routing problem for perishable products with horizontal collaboration. *Computers & Operations Research*, 89, 128–143.
- Spanos, K., Kladovasilakis, N., Achillas, C., & Aidonis, D. (2025). Mapping agricultural sustainability through life cycle assessment: A narrative review. *Environments*, 12(11), 436.
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2019). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157–169.
- Yazdani, M., Zarate, P., Coulibaly, A., & Zavadskas, E. K. (2017). A group decision-making support system in logistics and supply chain management. *Expert Systems with Applications*, 88, 376-392.
- Zhang, X., Jiang, D., & Li, J. (2024). Carbon emission oriented life cycle assessment and optimization strategy for meat supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 439, 140727.

BÖLÜM 12

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMSAL TEDARİK ZİNCİRLERİNDE KARBON AYAK İZİ AZALTIMINDA OPTİMİZASYON YAKLAŞIMLARI, DİJİTAL TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALI VAKA ANALİZLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Pırıl TEKİN¹
Dr. Öğr. Üyesi Nurcan DEDEOĞLU²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17986997>

¹ Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2326-7571>, ptekin@atu.edu.tr

² Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, Türkiye. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4008-2587>, ndedeoglu@atu.edu.tr

GİRİŞ

Tarımsal tedarik zincirleri; çok sayıda aktörün yer aldığı, süreçler arası bağımlılıkların güçlü olduğu ve iklimsel, operasyonel ve ekonomik belirsizliklerin belirgin şekilde hissedildiği karmaşık sistemlerdir. Bu çok katmanlı yapı içerisinde karbon ayak izinin azaltılması, yalnızca çevresel sorumlulukların yerine getirilmesine katkı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda lojistik maliyetlerinin düşürülmesi, ürün kayıplarının azaltılması, operasyonel verimliliğin artırılması ve uluslararası pazarlarda rekabet gücünün korunması açısından stratejik önem taşımaktadır. Endüstri mühendisliği; modelleme, optimizasyon, simülasyon, veri analitiği ve dijital teknolojiler gibi araçlarıyla bu süreçlerin bilimsel temelde analiz edilmesini sağlayarak sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin merkezinde yer almaktadır. Bu bölümde, tarımsal tedarik zincirlerinde karbon emisyonunun azaltılmasına yönelik endüstri mühendisliği uygulamaları kapsamlı ve literatür destekli bir biçimde ele alınmaktadır.

Ele alınan bu bölüm, tarımsal tedarik zincirlerinin sürdürülebilir dönüşümünü gerçekleştirmek için kullanılan optimization, simulation, decision analytics ve digital innovation araçlarını kapsamlı biçimde ele almaktadır. Endüstri mühendisliği temelli matematiksel modeller; çok amaçlı optimization, yeşil lojistik, çok kriterli karar verme (ÇKKV), simulation ve machine learning yaklaşımları ile karbon ayak izini azaltmayı hedefleyen güçlü karar destek çerçeveleri sunar. Bunun yanı sıra blockchain, IoT, digital twin, robotics, renewable energy ve smart packaging gibi teknolojiler, tedarik zincirinin hem çevresel hem operasyonel performansını artıran inovatif çözümler olarak analiz edilmektedir. Bölümün son kısmı, Avrupa, Türkiye, İsrail, Çin ve Hollanda'dan seçilmiş vaka çalışmalarını inceleyerek teorik modellerin sahadaki karşılıklarını göstermektedir.

1. Matematiksel Programlama ve Optimizasyon Modelleri

Matematiksel programlama, tedarik zincirinin farklı aşamalarında ortaya çıkan üretim, taşıma, depolama ve işlem kararlarının sayısal modeller aracılığıyla temsil edilmesini sağlayarak karar vericilere optimum çözümler sunar. Tarımsal tedarik zincirlerinde bu modeller, çoğunlukla karbon emisyonu, maliyet, teslimat süresi, bozulma riski ve enerji tüketimi gibi birden fazla performans bileşeninin birlikte değerlendirilmesi için kullanılmaktadır.

Tek Amaçlı Modeller

Tek amaçlı optimizasyon modelleri, çoğunlukla karbon emisyonunu minimize etmeye odaklanır. Örneğin taşıma emisyonu,

$$E=d \times q \times e_k$$

formülüyle (mesafe $\times$ ürün miktarı $\times$ araç emisyon katsayısı) modellenenir.

Burada:

E = toplam karbon emisyonu (kg CO₂-eq)

d = taşınan mesafe (km)

q = taşınan ürün miktarı (ton veya kg)

e_k = ilgili araç türüne ait emisyon katsayısı (kg CO₂-eq / ton·km)

Bu tür modeller, karbon yoğun süreçlerin belirlenmesi ve daha düşük emisyonlu taşıma modlarının seçilmesi açısından kritik rol oynar. Literatürde özellikle kısa raf ömrüne sahip ürünlerde karbon ve zaman ilişkisini inceleyen çalışmalar, dağıtım rotalarının optimizasyonunun emisyonları %10–30 oranında azaltabildiğini göstermektedir.

Çok Amaçlı Optimizasyon

Gerçek tedarik zinciri kararları çok boyutludur. Bu nedenle çok amaçlı optimizasyon (MOO) modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Karar vericiler karbon emisyonu ile birlikte maliyet, teslimat süresi, enerji tüketimi, raf ömrü ve ürün kalitesi gibi kriterleri dikkate alır. NSGA-II gibi evrimsel algoritmaların tarımsal tedarik zincirlerinde sıkça tercih edildiği ve Pareto-optimal çözümler üreterek işletmelere alternatif senaryolar sunduğu bilinmektedir.

Belirsizlik Altında Optimizasyon

Tarımsal sistemlerde iklimsel belirsizlik, ürün verimindeki değişkenlik, talep oynaklığı ve fiyat dalgalanmaları yaygındır. Bu nedenle stokastik optimizasyon ve robust optimizasyon modelleri son yıllarda önem kazanmıştır. Örneğin talep belirsizliğinin senaryolarla modellendiği iki aşamalı stokastik bir çalışmada, karbon emisyonunun %15'e varan oranda azaltılabildiği, maliyetin ise optimum seviyede tutulduğu gösterilmiştir.

1.2. Yeşil Lojistik Optimizasyonu

Bozulabilir ürünlerin taşınması ve depolanması süreçleri, tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin en büyük bileşenlerinden biridir. Yeşil lojistik

uygulamaları, hem çevresel hem operasyonel sürdürülebilirliği geliştirmeyi hedefler.

Yeşil Araç Rota Planlama (G-VRP)

G-VRP, bozulabilir ürünlerde karbon odaklı rota planlaması sağlayarak yakıt tüketimini azaltır. Literatürde hibrit veya elektrikli araçların entegrasyonuna dayalı G-VRP modellerinin, hem yakıt tüketiminde hem emisyonlarda %12–25 arasında azalma sağladığı gösterilmiştir. Rota optimizasyonuna soğutma birimlerinin enerji kullanımı da eklendiğinde karbon azaltım potansiyeli daha da artmaktadır.

Depo ve Soğuk Depo Konumlandırma

Depo yerleşim kararları, toplam taşıma mesafesini ve enerji tüketimini belirleyen temel faktörlerdendir. Yenilenebilir enerji kullanılan bölgesel mikrodepo sistemlerinin, özellikle süt, meyve-sebze ve et tedarik zincirlerinde emisyonu anlamlı biçimde azalttığı gösterilmiştir. Soğuk depolarda ısı yalıtımı ve verimli soğutma sistemleri ise toplam karbon ayak izini %10–20 azaltabilmektedir.

Ambalaj Optimizasyonu

Ambalaj malzemesi ve tasarımı, lojistik hacmi ve malzeme üretiminde oluşan karbon emisyonlarını doğrudan etkiler. Geri dönüştürülebilir ve hafifletilmiş ambalajların kullanılması, bazı gıda kategorilerinde karbon ayak izini %5–12 oranında düşürmektedir.

1.3. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Yaklaşımları

Tarımsal tedarik zincirlerinde karar verme süreçleri çok sayıda kriter içerdiğinden ÇKKV yöntemleri kritik bir rol oynar. AHP, ANP, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE ve PROMETHEE gibi yöntemler, özellikle sürdürülebilir tedarikçi seçimi, teknoloji seçimleri ve yatırım kararlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tedarikçi Seçimi

Örneğin zeytinyağı tedarik zincirinde yapılan bir çalışmada, tedarikçi seçim kriterleri karbon emisyonu (%30), ürün kalitesi (%25), maliyet (%20) ve lojistik kapasite (%15) gibi ağırlıklarla değerlendirilmiş ve TOPSIS yöntemiyle

düşük karbonlu üretim yapan tedarikçilerin en üst sıralarda yer aldığı rapor edilmiştir.

Teknoloji ve Yatırım Kararları

Soğutma teknolojisi seçimi, güneş enerjili depolama sistemlerine geçiş veya biyobozunur ambalaj yatırımlarında ÇKKV yöntemleri, hem ekonomik hem çevresel hem teknik kriterlerin birlikte değerlendirilmesini sağlayarak daha rasyonel kararlar alınmasına katkı sunar.

1.4. Simülasyon Modelleri

Tarımsal tedarik zincirlerinde yüksek belirsizlik nedeniyle simülasyon modelleri, sistem davranışının farklı senaryolar altında analiz edilmesini sağlayan güçlü araçlardır.

Süreç Simülasyonu

Depo operasyonları, soğuk oda yönetimi ve işleme tesislerinin performansı, Arena, FlexSim ve AnyLogic gibi simülasyon ortamlarında modellenebilir. Bu sayede enerji tüketimi, işlem süreleri, ürün kayıpları ve darboğazların davranışı analiz edilir.

Soğuk Zincir Simülasyonu

Soğuk zincirde sıcaklık dalgalanmaları ürün kalitesi üzerinde doğrudan belirleyicidir. Günümüze kadar yapılmış çalışmalar, soğuk zincirde 1–2°C’lik dalgalanmaların ürün kaybını %12 artırabildiğini göstermiştir. Simülasyon modelleri; gecikmeler, araç içi sıcaklık değişimleri veya depolama koşullarını farklı senaryolar altında test ederek en düşük karbon emisyonunu sağlayan operasyon planlarını sunar.

Ağ Simülasyonu

Tedarik zinciri ağ simülasyonları; tedarik, işleme, depolama ve dağıtım süreçlerini birlikte analiz ederek lojistik darboğazları ve karbon yoğun noktaları belirler. Simülasyon ile optimizasyonun birlikte kullanılması, güçlü bir karar destek çerçevesi oluşturur.

1.5. Veri Analitiği ve Yapay Zekâ Uygulamaları

Dijitalleşmeyle birlikte yapay zekâ ve veri analitiği, karbon ayak izinin tahmini ve azaltımı için güçlü araçlar hâline gelmiştir.

Emisyon Tahmin Modelleri

Random Forest, XGBoost, SVM ve yapay sinir ağları gibi algoritmalar, üretim süreçlerinden lojistik faaliyetlere kadar geniş bir veri setine dayanarak yüksek doğrulukta carbon footprint tahminleri sunabilir. Örneğin çilek tedarik zincirinde yapılan bir çalışmada XGBoost modeli %92 doğrulukla raf ömrü ve bozulma riskini tahmin etmiştir.

Gıda Kaybı Tahmini

Depolama koşulları, sıcaklık, nem, taşıma süresi ve ürün özellikleri gibi değişkenlere dayalı makine öğrenmesi modelleri, stok fazlalığı veya bozulma riskini erken aşamada tespit ederek gıda kaybına bağlı karbon emisyonlarını azaltmaktadır.

IoT Tabanlı Gerçek Zamanlı Analitik

IoT sensörlerinden elde edilen sıcaklık, nem, enerji tüketimi, araç konumu ve proses göstergeleri, yapay zekâ modelleri ile analiz edildiğinde operasyonel verimlilik artmakta, gereksiz enerji tüketimi azaltılmakta ve karbon emisyonu optimize edilmektedir.

1.6. Dijital İkiz (Digital Twin) Yaklaşımları

Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel sistemlerin gerçek zamanlı verilerle beslenen dijital bir kopyasını oluşturarak operasyonel kararların simülasyon ortamında test edilmesine olanak tanır.

Tarımsal tedarik zincirlerinde dijital ikiz uygulamaları henüz gelişim aşamasındadır; ancak enerji yoğun tesislerde önemli avantajlar sunmaktadır. Örneğin süt işleme tesislerinde oluşturulan dijital ikiz modelleriyle proses akışındaki değişikliklerin enerji ve karbon etkileri eş zamanlı analiz edilebilmekte; küçük proses iyileştirmeleriyle %6–10 arasında karbon azaltımı sağlanabilmektedir.

Dijital ikiz; soğuk zincir yönetimi, tesis yerleşimi, gerçek zamanlı enerji izleme, senaryo analizi ve operasyon planlaması gibi alanlarda sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için yenilikçi bir araç olarak öne çıkmaktadır.

İNOVATİF TEKNOLOJİLERLE SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMSAL TEDARİK ZİNCİRLERİ

Teknolojik yenilikler, tarımsal tedarik zincirlerinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında temel bir dönüştürücü unsur hâline gelmiştir. Uzun yıllar boyunca sezgisel karar verme, manuel uygulamalar ve düşük veri kullanımı ile yürütülen tarımsal üretim ve lojistik süreçleri, son on yılda dijitalleşme, otomasyon ve veri odaklı yönetim yaklaşımlarının gelişmesiyle köklü bir değişim yaşamıştır. Tedarik zincirinin karmaşık ve çok katmanlı yapısı düşünüldüğünde, izlenebilirlik, enerji verimliliği, gıda güvenliği, stok yönetimi, lojistik optimizasyon ve karbon ayak izi azaltımı gibi alanlarda yenilikçi teknolojilerin sunduğu katkı, sürdürülebilirlik açısından stratejik bir değer taşımaktadır. Bu bölümde blockchain tabanlı izlenebilirlik sistemlerinden Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamalarına, yapay zekâ ve veri analitiğinden robotik ve otomasyona, dijital ikiz modellerinden yenilenebilir enerji altyapılarına ve akıllı ambalaj teknolojilerine kadar uzanan yenilikçi yaklaşımlar bütüncül bir çerçevede ele alınmaktadır.

1. Blockchain Tabanlı İzlenebilirlik Sistemleri

Blockchain teknolojisi, dağıtık defter yapısı sayesinde tedarik zinciri boyunca gerçekleşen tüm işlemlerin güvenilir, şeffaf ve değiştirilemez şekilde kayıt altına alınmasını sağlar. Tarım sektöründe bu teknoloji, özellikle üretim koşullarının doğrulanması, organik ve coğrafi işaretli ürünlerin sertifikasyon süreçlerinin güvence altına alınması, gıda sahteciliğinin önlenmesi ve sürdürülebilirlik göstergelerinin doğrulanabilir biçimde raporlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Blockchain tabanlı sistemler, karbon ayak izinin tedarik zincirinin farklı aşamalarında nasıl oluştuğunu ayrıntılı biçimde takip etmeyi mümkün kılar. Bu sayede üreticiler, işleyiciler, lojistik şirketleri ve perakendeciler arasında güvene dayalı bir veri paylaşım modeli oluşturularak karbon raporlamasının doğruluğu artırılabilir. Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında gündeme gelen karbon sınır düzenlemeleri de işletmelerin bu teknolojiyi benimsemesini hızlandırmaktadır.

Yapılan bir araştırmada blockchain tabanlı izlenebilirlik sistemlerinin, taze meyve-sebze lojistiğinde gecikmelerin %18 azalmasını ve buna bağlı olarak soğuk zincirdeki enerji tüketiminin %12 düşmesini sağladığı rapor edilmiştir.

2. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Sensör Teknolojileri

IoT tabanlı sensör sistemleri, üretim, depolama ve taşımacılık süreçlerinde gerçek zamanlı veri toplanmasına olanak tanıyarak hem operasyonel hem çevresel performansın iyileştirilmesine katkı sağlar. Toprak nemi, sıcaklık, pH, bitki gelişimi ve güneşlenme süresi gibi parametrelerin sensörlerle izlenmesi, sulama, gübreleme ve enerji tüketiminin daha verimli yönetilmesini mümkün kılar.

Lojistik süreçlerde ise taşıma araçlarındaki sıcaklık, nem, konum ve titreşim sensörleri, soğuk zincirin takibini kolaylaştırarak bozulma riskini azaltır. Depolama alanlarında kullanılan IoT sistemleri enerji tüketim profillerini analiz ederek gereksiz enerji kullanımının önüne geçer.

Sensör destekli sulama sistemleriyle yürütülen bir çalışmada, su tüketiminin %25–30, enerji kullanımının ise %15'e kadar azaldığı gösterilmiştir. Benzer şekilde soğuk zincirde kullanılan IoT sensörlerinin sıcaklık ihlallerini %40'a varan oranda azalttığı belirlenmiştir.

3. Yapay Zekâ ve Veri Analitiği Uygulamaları

Yapay zekâ (YZ) ve veri analitiği, tarımsal tedarik zincirlerinde büyük hacimli ve çok değişkenli veri setlerinin işlenmesini mümkün kılarak karbon ayak izi analizlerini daha doğru, daha hızlı ve daha öngörülebilir hâle getirir. Makine öğrenmesi algoritmaları, enerji tüketimi, ürün bozulma riski, lojistik gecikmeleri ve karbon emisyonlarını yüksek doğrulukla tahmin edebilir.

Raf ömrü tahmin modelleri özellikle soğuk zincirde kritik öneme sahiptir. Depolama sıcaklığı, nem, ürün türü ve hasat sonrası uygulamalar gibi değişkenlerden beslenen sinir ağları, bozulma olasılığını önceden belirleyerek gıda kaybını düşürür.

Yapay sinir ağı modellerinin hassas ürünlerde raf ömrünü %90'ın üzerinde doğrulukla tahmin edebildiği; uygun stok planlamasıyla gıda kayıplarının %8–15 oranında azaltılabileceği bildirilmiştir.

Bu tür analizler, hem karbon emisyonlarının tahmininde hem de karar destek sistemlerinde kritik rol oynar.

4. Robotik, Otomasyon ve Tarım 5.0 Uygulamaları

Robotik ve otomasyon teknolojileri, Tarım 5.0 yaklaşımının temel bileşenidir. Otonom traktörler, robotik hasat makineleri, drone tabanlı ilaçlama

sistemleri ve otomatik sınıflandırma hatları gibi uygulamalar, hem operasyonel verimliliği hem de sürdürülebilirliği artırmaktadır.

Otonom tarım makineleri, yakıt tüketimini optimize ederek gereksiz hareketleri azaltır ve aynı zamanda daha hassas uygulamalar gerçekleştirir. Drone tabanlı ilaçlama sistemleri kimyasal uygulamaların doğruluğunu artırarak gereksiz pestisit kullanımının önüne geçer.

Drone temelli ilaçlama sistemlerinin kimyasal kullanımını %20–40, enerji tüketimini ise %15 oranında azaltabildiği rapor edilmiştir. Bu teknolojiler hem çevresel etkiyi hem iş gücü maliyetlerini düşürerek karbon azaltımına önemli katkı sağlar.

5. Dijital İkiz Teknolojisi

Dijital ikiz, fiziksel bir sistemin gerçek zamanlı verilerle beslenen dinamik bir dijital kopyasını oluşturur. Bu teknoloji, tarımsal tedarik zincirlerinde özellikle enerji tüketimi, soğuk zincir dinamikleri ve işleme tesislerinin performans analizi için önemli avantajlar sunmaktadır.

Dijital ikizler sayesinde farklı üretim, depolama veya dağıtım senaryoları düşük maliyetle test edilebilir. Böylece hem operasyonel hatalar hem de gereksiz enerji tüketimi erken aşamada tespit edilir.

Bir süt işleme tesisinde dijital ikiz uygulaması ile enerji tüketiminin %6–9 azaltıldığı, bunun toplam karbon emisyonunda %4–6 oranında azalmaya karşılık geldiği rapor edilmiştir.

6. Yenilenebilir Enerji Uygulamaları

Tarımsal tedarik zincirlerinde enerji maliyetlerinin yüksek olması ve fosil yakıtlara bağımlılık, yenilenebilir enerji teknolojilerini stratejik bir gereklilik hâline getirmiştir. Güneş enerjisi, biyogaz, rüzgâr enerjisi ve atık ısı geri kazanım sistemleri hem karbon emisyonlarını azaltan hem de enerji bağımsızlığını artıran çözümler sunar.

Güneş enerjili soğuk hava depoları, özellikle sıcak iklimlerde enerji tüketimini ciddi oranda azaltır. Hayvansal atıklardan biyogaz üretimi ise hem atık yönetimini iyileştirir hem de yenilenebilir enerji üretir.

Literatürde güneş enerjili soğuk hava depolarının elektrik tüketimini %40'a kadar, biyogaz sistemlerinin ise çiftlik işletmelerinin toplam enerji

gereksiniminin %20–35’ini karşılayabildiği bildirilmektedir. Bu yaklaşımlar, tarımsal üretimin karbon nötrlüğe geçiş sürecini hızlandırır.

7. Akıllı Ambalaj Teknolojileri

Ambalaj teknolojilerindeki yenilikler, hem gıda güvenliği hem de sürdürülebilirlik açısından önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Sensör destekli, biyobozunur, oksijen absorbe edici veya nem dengeleyici akıllı ambalaj türleri; ürün bozulmasını azaltmakta, raf ömrünü uzatmakta ve gıda kaybını düşürmektedir.

Bu teknolojiler, hem lojistik süreçlerde hem de perakende aşamasında karbon emisyonlarını dolaylı yoldan azaltır. Oksijen emici ambalajların taze et ürünlerinde raf ömrünü %25–40 artırdığı; RFID/QR destekli akıllı ambalajların sıcaklık ihlallerini %10 oranında azalttığı gösterilmiştir.

8. Sentez ve Değerlendirme

Genel olarak blockchain, IoT, yapay zekâ, dijital ikiz, robotik, otomasyon ve yenilenebilir enerji teknolojileri birlikte ele alındığında, tarımsal tedarik zincirlerinde bütüncül bir sürdürülebilirlik dönüşümü yaratmaktadır. Bu teknolojiler yalnızca karbon ayak izinin azaltılmasını değil; aynı zamanda izlenebilirlik, enerji verimliliği, gıda güvenliği, stok yönetimi, kalite kontrol ve lojistik optimizasyon gibi çok boyutlu kazanımların eş zamanlı elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla inovatif teknolojiler, geleceğin düşük karbonlu, dirençli ve rekabetçi tarımsal tedarik zincirlerinin temel yapı taşlarını oluşturmaktadır.

VAKA ÇALIŞMALARI VE DÜNYADAN ÖRNEKLER

Tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik politikalar ve uygulamalar, dünya genelinde farklı ölçeklerde başarıyla uygulanmaktadır. Bu bölüm, sürdürülebilirlik yaklaşımlarının pratikte nasıl işlediğini göstermek amacıyla çeşitli ülkelerden seçilmiş vaka çalışmalarını ele almakta; farklı sektörlerde karbon emisyonu kaynaklarının nasıl yönetildiğini, inovatif teknolojilerin nasıl hayata geçirildiğini ve endüstri mühendisliği yöntemlerinin pratikte nasıl iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır. Bu örnekler, teorik modellerin sahadaki karşılıklarını görmek, uygulama

süreçlerinde karşılaşılan zorlukları değerlendirmek ve diğer ülkelerde elde edilen deneyimlerden öğrenilebilecek dersleri ortaya koymak açısından önemlidir.

1. Süt Tedarik Zincirinde Karbon Ayak İzi Azaltımı: Avrupa Örneği

Avrupa Birliği'nde süt tedarik zincirine yönelik çeşitli projelerde karbon ayak izini azaltmaya yönelik kapsamlı stratejiler geliştirilmiştir. Süt tankerlerinin yüksek yakıt tüketimi, soğuk depolarda yoğun enerji kullanımı, işleme tesislerinde ısıtma-soğutma dengesizlikleri, enerji yoğun paketlenme süreçleri ve dağıtım aşamasındaki yüksek karbon yükü sektörün temel sorunları arasında yer almaktaydı. Bu sorunlara yönelik olarak tanker güzergâhlarının optimizasyonu, ısı geri kazanım teknolojilerinin kullanımı, yenilenebilir enerji ile çalışan soğutma sistemleri, enerji verimli pastörizasyon yöntemleri ve alternatif yakıtlı araçların kullanımı gibi çözümler geliştirilmiştir. Bu uygulamalar sonucunda toplam karbon emisyonunda %12–18 azalma, depolama enerji tüketiminde %22 tasarruf, yakıt tüketiminde %15 düşüş ve ürün bozulma oranlarında %8 iyileşme kaydedilmiştir.

2. Meyve-Sebze Tedarik Zincirinde Soğuk Zincir Optimizasyonu: Türkiye Örneği

Türkiye'de özellikle narenciye ve yaş sebze-meyve sektörlerinde soğuk zincir yetersizlikleri nedeniyle kayıplar oldukça yüksektir. Soğuk depolardaki yetersiz izolasyon, sıcaklık dalgalanmaları, sensör eksiklikleri ve taşıma sırasında soğuk zincirin sık sık kopması en önemli sorunlardır. Uygulanan çözümler arasında IoT tabanlı sıcaklık sensörlerinin araç ve depolara yerleştirilmesi, depo yerleşimlerinin yeniden tasarlanması, enerji verimli soğutma sistemlerinin kullanılması, raf ömrü tahmininde yapay zekâ modellerinin devreye alınması ve rota optimizasyonu gibi yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu iyileştirmeler sonucunda enerji tüketiminde %18–30, ürün kayıplarında %15–20 ve lojistik maliyetlerinde %8–12 oranında azalma sağlanmış; sıcaklık sapmalarında ise %40 düşüş gerçekleşmiştir.

3. Kurak Bölgelerde Su ve Enerji Yönetimi: İsrail Tarım Teknolojileri

İsrail, su kıtlığına rağmen yüksek tarımsal verimliliğiyle dikkat çekmektedir. Ülkede sulama için yüksek enerji kullanımı ve su kıtlığı nedeniyle maliyetli üretim süreçleri önemli bir sorun oluştururken, enerji yoğun gölgeleme ve soğutma sistemleri karbon ayak izini artırmaktadır. Ancak damla sulama teknolojisinin geniş çaplı kullanımı, güneş enerjisi destekli sulama sistemleri, bitki büyüme modellerine dayalı akıllı sulama algoritmaları ve hassas tarım teknolojileri bu sorunların yönetilmesini sağlamıştır. Sonuç olarak su tüketiminde %40–70 tasarruf, sulama enerji maliyetlerinde %50’ye yakın düşüş, üretim verimliliğinde %20 artış ve karbon emisyonunda belirgin azalma elde edilmiştir.

4. Blockchain ile İzlenebilirlik: Çin’in Gıda Güvenliği Projesi

Çin’de gıda sahteciliği ve tedarik zincirinde izlenebilirlik eksikliği, ulusal düzeyde blockchain tabanlı bir izlenebilirlik sisteminin hayata geçirilmesine neden olmuştur. Ürün menşe bilgilerinin doğrulanamaması, dağınık tedarik zinciri yapısı, karbon verilerinin manipülasyona açık olması ve sahte ürünlerin halk sağlığına yönelik tehdit oluşturması temel sorunlardır. Blockchain sistemi, RFID ve QR kod tabanlı kimliklendirme, gerçek zamanlı veri toplama ve orijin doğrulama süreçlerinin otomasyonu sayesinde tedarik zincirinde yüksek şeffaflık sağlamıştır. Bu uygulamalar sonucunda izlenebilirlik oranında %80’den fazla artış, karbon verisi doğruluğunda önemli iyileşme, sahte ürünlerde ciddi azalma ve tüketici güveninde belirgin artış elde edilmiştir.

5. Gıda İsrafının Azaltılması: Hollanda Lojistik Yenilikleri

Hollanda’nın yürüttüğü “Gıda İsrafını Yarıya İndirme Programı”, sürdürülebilir gıda lojistiği alanında önemli başarılar sağlamıştır. Depolama ve taşımada yaşanan ürün kayıpları, perakende stok fazlalığı ve raf ömrü yönetimindeki zorluklar programın başlangıç noktası olmuştur. Yapay zekâ tabanlı talep tahmin algoritmaları, raf ömrünü izleyen akıllı ambalajlar, soğuk zincir simülasyon modelleri ve yeniden dağıtım merkezleri gibi yenilikçi uygulamalar sonucunda gıda kayıplarında %35’e varan düşüş, karbon ayak izinde önemli azalma ve lojistik verimliliğinde kayda değer artış sağlanmıştır.

6. Türkiye İçin Model Bir Uygulama: Domates Tedarik Zincirinde Karbon Azaltımı

Türkiye’de domates tedarik zincirine yönelik geliştirilen model çalışma, mevcut sistemde tarladan perakendeye kadar uzanan süreçte yaklaşık %15 düzeyindeki ürün kaybını ve enerji verimsizliğini hedef almıştır. Soğuk zincir entegrasyonundaki yetersizlik, yakıt-yoğun çalışan lojistik araçlar ve depolardaki enerji verimsizliği başlıca sorunları oluşturmuştur. Modelde IoT destekli sensörlü taşıma konteynerleri, G-VRP tabanlı rota optimizasyonu, depo yerleşiminin yeniden tasarlanması, yenilenebilir enerji destekli soğutma sistemleri ve yapay zekâ temelli bozulma risk tahmin modelleri gibi çözümler kullanılmıştır. Bu uygulamaların toplam karbon emisyonunu %20, enerji tüketimini %15 ve ürün kaybını %10’a kadar azaltacağı, lojistik maliyetlerinde ise %7 iyileşme sağlayacağı öngörülmektedir. Model, Türkiye için uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir sürdürülebilirlik senaryosu sunmaktadır.

ARAŞTIRMA VE ÖNERİLER

Tarımsal tedarik zincirleri; küresel iklim değişikliği, artan nüfus ve gıda talebi, doğal kaynakların giderek azalması ve uluslararası ticaret politikalarındaki dönüşümler nedeniyle stratejik önemini her geçen gün artıran yapılardır. Bu çalışma kapsamında, tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izi yönetimi yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), optimizasyon teknikleri, dijital teknolojiler ve uluslararası iyi uygulama örnekleri çerçevesinde kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Bulgular, sürdürülebilirlik temelli dönüşümün yalnızca çevresel bir zorunluluk değil; aynı zamanda maliyet avantajı, rekabet gücü artışı ve operasyonel verimlilik sağlayan stratejik bir gereklilik olduğunu göstermektedir.

Tarım sektöründe ortaya çıkan karbon emisyonlarının önemli bir kısmı üretim, işleme, depolama, taşıma ve perakende aşamalarından kaynaklanmakta; bu süreçlerdeki verimsizlikler hem çevresel hem de ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Enerji tüketiminin optimize edilmesi, lojistik süreçlerin iyileştirilmesi, kayıp ve israf oranlarının düşürülmesi ve yenilenebilir enerji uygulamalarının yaygınlaştırılması karbon ayak izinin azaltılmasında belirleyici rol oynamaktadır. Endüstri mühendisliği, bu dönüşümün merkezinde yer alarak analitik modelleme, çok amaçlı optimizasyon, simülasyon, süreç iyileştirme ve veri analitiği araçlarıyla karar vericilere bilimsel temelli çözümler sunmaktadır.

Bununla birlikte blockchain, IoT, yapay zekâ, robotik, akıllı ambalaj ve dijital ikiz teknolojileri, tedarik zinciri boyunca veri akışını iyileştirmekte; izlenebilirliği artırmakta; operasyonel süreçlerde şeffaflık sağlayarak karbon yönetimini daha güvenilir ve bütüncül hale getirmektedir. Vaka çalışmaları, bu teknolojilerin enerji verimliliği, gıda kaybı ve lojistik maliyetlerinde önemli iyileştirmeler sağlayarak çevresel ve ekonomik etkileri eş zamanlı optimize edebildiğini doğrulamaktadır.

Ancak sürdürülebilir tarımsal tedarik zincirlerinin yaygınlaştırılmasında önemli engeller bulunmaktadır. Dijitalleşme olgunluğunun düşük olması, teknolojik altyapı eksiklikleri, veri yönetimindeki sorunlar, yatırım maliyetlerinin yüksekliği, sosyo-kültürel dirençler ve kurumsal koordinasyon eksiklikleri bu dönüşümü yavaşlatan başlıca faktörlerdir. Bu nedenle karbon azaltım politikalarının yalnızca teknolojik yeniliklere dayalı olması yeterli olmayıp; politika, düzenleme, finansman modelleri ve davranışsal dönüşüm bileşenleriyle desteklenmesi gerekmektedir.

Bu çerçevede, çalışmanın bulgularına dayanarak farklı paydaş gruplarına yönelik aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir.

1. Politik ve Kurumsal Öneriler

Ulusal ölçekte etkin bir sürdürülebilirlik dönüşümünün sağlanması için politika ve yönetim mekanizmalarının güçlendirilmesi önem taşımaktadır. Tarımsal ürünlerde karbon ayak izi hesaplamalarının güvenilir biçimde yapılabilmesi için ulusal karbon raporlama standartlarının yaygınlaştırılması ve LCA tabanlı veri tabanlarının oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca tarım, çevre, enerji ve ticaret kurumları arasında koordinasyonu artıracak ortak platformların kurulması, karbon azaltımına yönelik projelerin bütüncül bir yaklaşımla yürütülmesine katkı sağlayacaktır. Enerji verimli soğutma sistemleri, yenilenebilir enerji uygulamaları, dijitalleşme çözümleri ve gıda kaybını azaltan teknolojiler için teşvik mekanizmalarının genişletilmesi de dönüşümün hızlanmasına yardımcı olacaktır.

2. Üreticilere ve Tedarik Zinciri Aktörlerine Yönelik Öneriler

Üreticilerin ve tedarik zinciri aktörlerinin veri odaklı karar destek sistemlerini aktif biçimde kullanması sürdürülebilirlik performansını doğrudan etkileyen bir faktördür. IoT sensörleri, LCA çıktıları, talep tahmin modelleri ve

optimizasyon araçlarının entegrasyonu daha doğru ve hızlı karar alınmasını sağlar. Soğuk zincir yönetiminin iyileştirilmesi; sıcaklık sensörlerinin yaygınlaştırılması, enerji verimli soğutucuların kullanılması ve depolama süreçlerindeki dalgalanmaların minimize edilmesi yoluyla ürün kaybını ve enerji tüketimini azaltacaktır. Lojistikte rota optimizasyon araçlarının kullanımı, depo yerleşimlerinin veri analitiğiyle yeniden düzenlenmesi ve alternatif yakıtlı araçların değerlendirilmesi de karbon azaltımında önemli katkılar sunar. Raf ömrü tahmin modelleri ve akıllı ambalaj teknolojileri ise gıda kaybını azaltarak çevresel etkinin yanı sıra ekonomik verimliliği artırmaktadır.

3. Teknoloji Geliştiricileri ve Yenilik Ekosistemine Öneriler

Teknoloji sağlayıcılarının, küçük ve orta ölçekli tarımsal işletmelerin dijital dönüşümünü destekleyecek uygun maliyetli çözümler geliştirmesi kritik önem taşımaktadır. IoT tabanlı sensör sistemleri, enerji verimliliğini artıran otomasyon çözümleri ve sadeleştirilmiş blockchain platformları bu bağlamda önceliklidir. Dijital ikiz teknolojilerinin özellikle işleme ve depolama tesislerine transferi, çevresel senaryoların düşük maliyetle test edilmesini mümkün kılarak karbon yönetimini güçlendirebilir. Açık veri platformlarının geliştirilmesi ve yapay zekâ modellerinin tarımsal bağlam için uyarlanması ise hem kamu hem özel sektör için stratejik değer yaratacaktır.

4. Akademi ve Araştırmacılara Yönelik Öneriler

Akademik çalışmaların LCA, optimizasyon, simülasyon ve veri biliminin bütünleştirildiği hibrit modeller geliştirerek tedarik zinciri yönetimi literatürüne katkı sunması önem taşımaktadır. Türkiye gibi tarımsal çeşitliliğin yüksek olduğu ülkelerde bölgesel karbon yoğunluk haritalarının oluşturulması, politika yapıcılarının yerel düzeyde daha hedefli stratejiler geliştirmesine olanak sağlayacaktır. Teknolojik dönüşümün başarısının yalnızca teknik kapasiteye bağlı olmadığı göz önüne alındığında, üretici davranışları ve sosyo-ekonomik faktörlerin daha kapsamlı biçimde analiz edilmesi gerekmektedir. Ayrıca Yeşil Mutabakat, karbon sınır düzenleme mekanizmaları ve ulusal teşviklerin tarım sektörüne etkilerinin değerlendirilmesine yönelik politika etki analizlerinin artırılması gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma alanı sunmaktadır.

SONUÇ

Küresel ölçekte artan nüfus, değişen tüketim trendleri, iklim değişikliğinin yarattığı baskılar ve doğal kaynakların giderek daralan kapasitesi, tarımsal tedarik zincirlerinde sürdürülebilirlik odaklı dönüşümü zorunlu hâle getirmiştir. Bu çalışmada, tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izi yönetimi; yaşam döngüsü değerlendirmesi, endüstri mühendisliği temelli optimizasyon yöntemleri ve inovatif teknolojilerin sağladığı olanaklar çerçevesinde bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır.

Analizler, tarım sektöründeki karbon emisyonlarının yalnızca üretim faaliyetlerinden değil, işleme, depolama, paketleme ve lojistik süreçlerinden de önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuştur. Özellikle soğuk zincir operasyonları, enerji yoğun yapıları nedeniyle toplam emisyonun kritik bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle enerji yönetimi, depo tasarımı, rota optimizasyonu ve süreç kontrolü gibi alanlarda uygulanan iyileştirme stratejileri, karbon azaltımının önemli bir kısmını karşılamaktadır.

Çalışma boyunca ele alınan yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yöntemi, ürünün “tarladan çatala” uzanan tüm sürecindeki çevresel etkilerin nicel olarak belirlenmesinde önemli bir araç olduğunu göstermiştir. LCA sonuçlarının tedarik zinciri karar destek süreçlerine entegre edilmesi, üretim planlamasından ambalaj seçimine, tedarikçi performansından lojistik stratejilerine kadar uzanan geniş bir yelpazede çevresel ve ekonomik faydalar sunmaktadır.

Endüstri mühendisliği yaklaşımlarının kullanıldığı matematiksel modeller, çok amaçlı optimizasyon teknikleri, simülasyon analizleri ve çok kriterli karar verme yöntemleri, tarımsal tedarik zincirlerinde operasyonel verimliliği artırırken karbon ayak izini azaltma hedeflerine doğrudan katkı sağlamaktadır. Benzer şekilde yapay zekâ, IoT ve blockchain gibi inovatif teknolojiler; izlenebilirlik, veri doğruluğu, enerji yönetimi ve kayıp kontrolü gibi kritik alanlarda dönüşüm etkisi yaratmaktadır.

Uluslararası örnekler, teknolojik yenilikler ve süreç iyileştirmeleri yoluyla karbon emisyonlarının önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir. Avrupa Birliği ülkelerinde süt tedarik zincirine yönelik uygulanan optimizasyon modelleri, İsrail’deki su ve enerji yönetimi teknolojileri ve Hollanda’daki gıda israfı azaltım programları, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geniş ölçekli

etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Türkiye özelinde ele alınan model ise, dijitalleşme ve yapay zekâ destekli çözümlerin kaynak verimliliğini artırma ve karbon emisyonlarını düşürme potansiyelini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sürdürülebilir tarımsal tedarik zincirleri için karbon ayak izi yönetimi; teknolojik yeniliklerin, analitik yöntemlerin, politika destek mekanizmalarının ve paydaş iş birliklerinin eş zamanlı olarak devreye alınmasını gerektiren çok boyutlu bir süreçtir. Bu kapsamda, hem üreticilerin hem de politika yapıcılarının, çevresel performansı iyileştiren uygulamaları benimsemesi ve sürdürülebilirlik odaklı dönüşümü stratejik bir öncelik olarak değerlendirmesi kritik önem taşımaktadır.

Bu çalışma, tarımsal tedarik zincirlerinde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik bilimsel, teknolojik ve yönetsel yaklaşımları bütüncül bir çerçevede ele alarak hem akademik literatüre hem de uygulama alanına katkı sunmayı amaçlamıştır. Gelecek çalışmaların, bölgesel farklılıkları daha detaylı dikkate alan, büyük veri tabanlarına dayalı ve karar destek sistemleriyle entegre modeller geliştirmesi, sürdürülebilir tarım uygulamalarının etkisini daha da artıracaktır.

KAYNAKÇA

- Bayssi, O., Naimi, M., Sabir, M., Chikhaoui, M., & Hallam, J. (2024). Carbon footprint of agro-industrial chains: A meta-analysis. *Moroccan Journal of Agricultural Sciences*, 5(2), 97–110.
- Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Diamantoulakis, P., Liopa-Tsakalidi, A., Barouchas, P., Salahas, G., Karagiannidis, G., Wan, S., & Goudos, S. K. (2022). Internet of Things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. *Internet of Things*, 18, 100187.
- Cui, Y., Diarrassouba, I., Joncour, C., & Michel Loyal, S. (2024). Optimization and analysis of the impact of food hub location on GHG emissions in a short food supply chain. *Sustainability*, 16(17), 7781.
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52.
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90.
- Kiani Mavi, R., Semiari, M., Hosseini Shekarabi, S. A., Kiani Mavi, N., Moshkdanian, F., Nikraves, A., & Golsorkhi, S. (2025). Multi-objective optimization of a three-level sustainable food supply chain: Modeling the impact of government subsidies. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 26(3), 571–600.
- Mandouri, J., Onat, N. C., Kucukvar, M., & Kazançoğlu, Y. (2025). Carbon footprint of food production: A systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, 15, 35630.
- Plakantara, S. P., & Karakitsiou, A. (2025). Transforming agrifood supply chains with digital technologies: A systematic review of safety and quality risk management. *SN Operations Research Forum*, 6(3), 113.
- Spanos, K., Kladovasilakis, N., Achillas, C., & Aidonis, D. (2025). Mapping agricultural sustainability through life cycle assessment: A narrative review. *Environments*, 12(11), 436.
- Vahdanjoo, M., Sørensen, C. G., & Nørremark, M. (2025). Digital transformation of the agri-food system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, 108982.

Zhang, X., Jiang, D., & Li, J. (2024). Carbon emission oriented life cycle assessment and optimization strategy for meat supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 439, 140727.

CHAPTER 13

HISTORY, DEFINITION, AND PRODUCTION PURPOSES OF GENETICALLY MODIFIED ORGANISMS

PhD Student Şirvan KARAKOÇ¹,

Lecturer Muhammet Alperen HAMEŞ²,

Prof. Dr. Mehmet ÇİFTÇİ³,

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17987036>

¹ Department of Animal Nutrition and Nutritional Diseases, Faculty of Veterinary Medicine, University of Firat, 23119, Elazig, Türkiye; Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-8410-0307>; E-mail: srnbrlkr@gmail.com

² University of Harran, Birecik Vocational School, Laboratory and Veterinary Health, Birecik, Türkiye; Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0508-3488>; E-mail: alperenhames@harran.edu.tr

³ Department of Animal Nutrition and Nutritional Diseases, Faculty of Veterinary Medicine, University of Firat, 23119, Elazig, Türkiye; Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3009-8710>; E-mail: mciftci@firat.edu.tr

1. Introduction

Genetic modification refers to the use of biotechnological tools to introduce targeted alterations in the hereditary material of living organisms. Through these interventions, organisms that either contain genetic material originating from another species or whose genomes have been restructured to express specific traits are classified as genetically modified organisms (GMOs) (Kulaç et al., 2006; Vicini, 2017). The World Health Organization describes GMOs as biological entities whose genetic material has been modified through methods that fall outside the boundaries of natural reproductive or recombination processes (World Health Organization, 2024). Oliver (2014) highlights certain ambiguities in commonly used GMO definitions by referring to triticale, a cereal produced in the 19th century by hybridizing wheat and rye through conventional breeding. Although this process is rudimentary when compared with modern molecular techniques, triticale would technically meet several criteria used in GMO definitions. For this reason, Oliver proposes that a more functional interpretation would define a GMO as an organism whose genome has been modified through biotechnological intervention rather than solely through classical breeding. The term GMO is not strictly defined and is used interchangeably with terms such as modified living organisms (DCLMO) and genetically modified crops (GM) (Ergi and Yaman, 2013). GMO definitions also encompass gene inactivation approaches, in which endogenous genes are silenced or disrupted to produce desired phenotypic traits. For example, ripening and softening of fruits and vegetables largely depend on the biosynthesis of the ethylene hormone produced in fruit cells. Therefore, suppressing genes involved in ethylene production or inhibiting polygalacturonase, an enzyme responsible for degrading cell wall components can slow pectin degradation. Such genetic interventions delay ripening and help extend the postharvest shelf life of fruits and vegetables (Arslan and Tufan, 2019). In addition, genes transferred to genetically modified organisms are referred to as transgenes (Çelik and Balık, 2007).

1.1. History of Genetically Modified Organisms (GMOs)

The foundation of modern genetic engineering was laid in 1944 when researchers demonstrated that hereditary material could be transferred between species (Avery et al., 1944). Advances in recombinant DNA technology later

enabled gene transfer even between organisms lacking close taxonomic relationships (Zhang et al., 2016). A milestone occurred in 1983 with the development of the first genetically modified plant, an antibiotic-resistant tobacco line. In the early 1990s, China became the first country to commercialize a transgenic crop, releasing a virus-resistant tobacco variety (Bawa and Anilakumar, 2013). The first genetically modified product approved for commercial sale was the transgenic tomato known as Flavr Savr, which was authorized by the U.S. Food and Drug Administration (FDA) in 1994. This modification delayed the ripening process after harvest. Today, scientists can create genetically modified organisms (transgenic plants or animals) by transferring genes across unrelated species” by transferring genes from one species to another unrelated species (Figure 1). Foods produced through such techniques are collectively referred to as genetically modified (GM) foods (Singh et al., 2014).

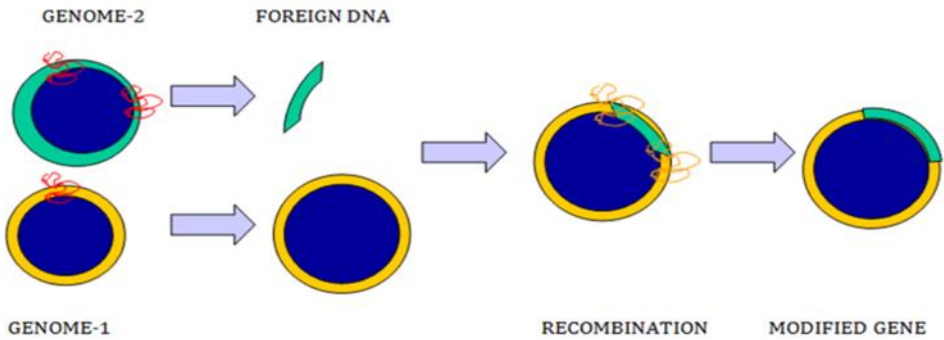


Figure 1. Genetic modifications (Singh et al., 2014).

1.2. Timeline of Genetic Modification in Agriculture

The development of genetic modification technology spans thousands of years, beginning around 8000 BC when early agricultural societies used selective breeding and crossbreeding to enhance desirable traits in plants and animals. In 1866, Gregor Mendel established the foundational principles of genetics through his experiments on pea plants. Commercial hybrid crops emerged in 1922, followed by the discovery in 1940 that radiation and chemicals could be used to alter DNA. A major breakthrough occurred in 1953 when Watson and Crick, building on Rosalind Franklin’s work, described the

structure of DNA. Modern genetic engineering began in 1973 with Boyer and Cohen's successful insertion of DNA from one bacterium into another. By 1982, the FDA had approved the first GMO based consumer product: genetically engineered insulin. Regulatory oversight strengthened in 1986 with the Coordinated Framework for the Regulation of Biotechnology, and in 1992 the FDA affirmed that GM foods must meet the same safety standards as traditionally bred foods. The first commercialized GM food, the Flavr Savr tomato, appeared in 1994. International safety guidelines followed in 2003 through WHO and FAO. Subsequent milestones include the approval of GM alfalfa and sugar beets in 2005, GM salmon in 2015, and mandatory labeling regulations in 2016. GM apples entered the market in 2017, and by 2019 the FDA completed its first consultation regarding food derived from a genome-edited plant. In 2020, U.S. consumers saw the introduction of genetically modified pink pineapple and the approval of GalSafe pork, the first GM pig designed for both food and medical applications (Anonymous, 2024).

1.3. The Purpose of Producing Genetically Modified Organisms

Before examining the benefits and drawbacks of genetically modified foods, it is essential to understand the underlying reasons behind their development. The substantial efforts invested in this field are driven by three major global challenges that compel us to seek innovative technological solutions.

1.3.1. Population Growth

According to the United Nations 2022 report, the world population was 7.8 billion in 2020 and is projected to reach approximately 8.5 billion in 2030, 9.7 billion in 2050, and stabilize at around 11 billion by the end of the century (United Nations, 2022). This demographic expansion continues to exacerbate global undernourishment; according to FAO data, 757 million people were undernourished in 2024. Meeting future food requirements will require substantial increases in crop yields on existing farmland. Current annual yield growth remains below 1.7%, yet an estimated 2.4% yearly increase is required to meet rising food demand, changing nutritional expectations, and declining

arable land availability. Achieving these targets depends on both improved agricultural practices and advances in crop genetics (Zhang et al., 2016).

1.3.2. Decline in Arable Land

FAO projections indicate that per-capita arable land will decline from the current 0.242 hectares to approximately 0.18 hectares by 2050 (Alexandratos and Ruinsma, 2012). Because opportunities for expanding cropland are increasingly limited, enhancing productivity per unit area remains the principal strategy for increasing global food production. This necessity underscores the importance of intensive agricultural inputs such as fertilizers, irrigation, and improved pest control as well as genetic improvement strategies (Oliver, 2014). This situation is further complicated by several interconnected factors (Zhang et al., 2016);

- a) Rising demand for land to support biofuel production;
- b) Rapid urbanization;
- c) Land degradation processes such as desertification, salinization, and erosion;
- d) Shifts in land use from staple crops to pasture driven by socio-economic pressures;
- e) Climate change;
- f) Increasing constraints on water resources.

1.3.3. Bottlenecks in Traditional and Modern Breeding

Traditional breeding relies on the sexual crossbreeding of one parent line with another in the expectation that desirable traits will emerge in the offspring (Oliver, 2014). To isolate preferred traits and dilute undesirable ones, breeders select the best-performing progeny and repeatedly backcross them with one of the original parent lines. This process is inherently slow and may require more than a decade in some crops, such as wheat, which has a generation time of 10-15 years. A fundamental requirement of conventional breeding is the presence of sufficient genetic variation, meaning an available gene pool containing the desired traits, as well as sexual compatibility among organisms carrying those traits. These biological constraints inherently limit the scope of traditional breeding. Moreover, genetic diversity has diminished over time due to historical optimization efforts, leaving breeders with increasingly limited

resources. In light of these challenges, the emergence of modern biotechnologies and genetic engineering approaches offer promising alternatives. These technologies can markedly shorten breeding timelines for developing new varieties and provide complementary approaches that support sustainable global food security (Zhang et al., 2016).

High-yielding and high-quality plant varieties commonly used in commercial production are generally not highly resistant to diseases and pests (e.g., insects). In addition to classical breeding methods, modern biotechnological techniques make it possible to develop plants that are fully resistant to these pests within a relatively short period, as illustrated in Figure 2. In this process, genes responsible for insect resistance are first isolated from the bacterium *Bacillus thuringiensis* (Bt). These genes are then transferred into plant cells using *Agrobacterium tumefaciens* mediated transformation or direct gene transfer methods, after which the introduced gene integrates into the plant genome. Consequently, all cells of the regenerated plant contain the transferred gene, and the protein naturally expressed by this gene exhibits toxic effects on specific insect pests. Insects that feed on these plants either die due to the toxic protein produced or avoid the plants altogether (Alişarlı, 2023).

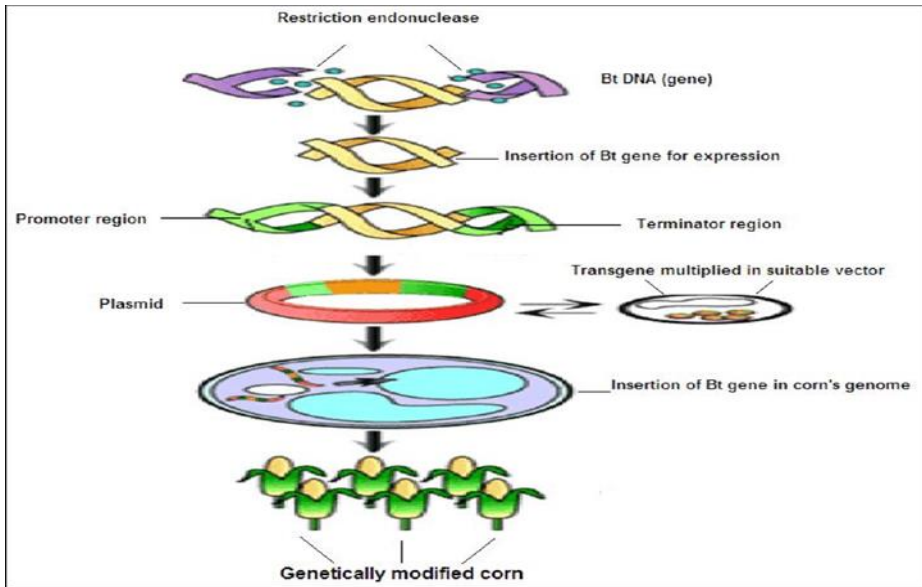


Figure 2. A schematic representation depicting the stages involved in GM crop development (Singh et al., 2011).

2. Conclusion

Advances in biotechnology have positioned genetically modified organisms (GMOs) as important tools for addressing contemporary challenges in agricultural production and global food security. Demographic growth, declining arable land, climatic pressures, and the limitations of conventional breeding have increased the relevance of modern genetic engineering approaches. The evolution from classical breeding to recombinant DNA and genome editing technologies has enabled targeted improvements in yield, quality, and tolerance to biotic and abiotic stresses. While GMOs offer significant potential to enhance agricultural productivity, their responsible and sustainable application requires careful consideration of biosafety, ethical, socio-economic, and regulatory frameworks.

3. References

- Alexandratos, N., Ruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Alişarlı, M. (2023). GDO: Devrim mi, kâbus mu? *Sağlık Düşüncesi ve Tıp Kültürü Dergisi*, 16: 80-83.
- Anonymous (04.12.2024). Erişim Adresi: <https://www.fda.gov/food/agricultural-biotechnology/science-and-history-gmos-and-other-food-modification-processes>
- Arslan, C., Tufan, T. (2019). GDO’lu yemlerin hayvan ve insan sağlığı açısından güvenilirliği. Arslan, C., (Editör). GDO’lu Yem Maddeleri ve Hayvan Beslemede Kullanımı. *Türkiye Klinikleri*, s: 48-58.
- Avery, OT., Macleod, CM., McCarty, M. (1944). Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types: Induction of transformation by a deoxyribonucleic acid fraction isolated from pneumococcus type III. *The Journal of Experimental Medicine*, 79 2: 137-158.
- Bawa, AS., Anilakumar, KR. (2013). Genetically modified foods: Safety, risks and public concerns-a review. *Journal of Food Science and Technology*, 50, 6: 1035-1046.
- Çelik, V., Balık, TD. (2007). Genetiği değiştirilmiş organizmalar (GDO). *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23, (1-2): 13-23.
- Ergi, SÖ., Yaman, H. (2013). Genetiği değiştirilmiş gıdalar ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 2, 2: 261-274.
- Kulaç, İ., Ağirdil, Y., Yakın, M. (2006). Sofralarımızdaki tatlı dert, GDO ve halk sağlığına etkileri. *Türk Biyokimya Dergisi*, 31, 3: 151-155.
- Oliver, MJ. (2014). Why we need GMO crops in agriculture. *Missouri Medicine*, 111, 6: 492-507.
- Singh, JS., Singh, DP., Gupta, RK. (2011). Genetically modified plants: Benefits and environmental problems. *The Scientific Temper*, 2, 1-2: 1-8.
- Singh, A., Poonam, KV., Gupta, HR. (2014). Genetically modified food: a review on mechanism of production and labeling concern. *Advances in Plants and Agriculture Research*, 1, 4: 121-127.

- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). World population prospects 2022: Summary of results.
- Vicini, JL. (2017). GMO crops in animal nutrition. *Animal Frontiers*, 7, 2: 9-14.
- World Health Organization, (2024). Erişim Adresi: http://www.who.int/foodsafety/areas_work/food-technology/faq-genetically-modified-food/en/ Erişim Tarihi: 04.12.2024.
- Zhang, C., Wohlhueter, R., Zhang, H. (2016). Genetically modified foods: A critical review of their promise and problems. *Food Science and Human Wellness*, 5: 116-123.

CHAPTER 14

GLOBAL TRENDS IN GENETICALLY MODIFIED CROP CULTIVATION AND THE REGULATORY FRAMEWORK IN TURKIYE

PhD Student Şirvan KARAKOÇ¹,
Lecturer Muhammet Alperen HAMEŞ²,
Prof. Dr. Mehmet ÇİFTÇİ³,

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17987059>

¹ Department of Animal Nutrition and Nutritional Diseases, Faculty of Veterinary Medicine, University of Firat, 23119, Elazig, Turkiye; Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-8410-0307>; E-mail: srvnbrlkr@gmail.com

² University of Harran, Birecik Vocational School, Laboratory and Veterinary Health, Birecik, Turkiye; Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0508-3488>; E-mail: alperenhames@harran.edu.tr

³ Department of Animal Nutrition and Nutritional Diseases, Faculty of Veterinary Medicine, University of Firat, 23119, Elazig, Turkiye; Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3009-8710>; E-mail: mciftci@firat.edu.tr

1. Introduction

Advances in biotechnology have enabled the precise modification of genetic sequences, giving rise to genetically modified organisms (GMOs), which play an increasingly significant role in contemporary agriculture. The steady growth of the global population, coupled with declining freshwater accessibility and the continuous reduction of arable land, has amplified concerns regarding future food and water security. Projections suggest that these pressures may lead to severe resource shortages by 2050, thereby strengthening the strategic importance of GMO based agricultural solutions (Ateş, 2020).

In crop production, genetic engineering enables the targeted introduction of traits such as enhanced yield potential, improved abiotic stress tolerance, and resistance to pests and diseases that are often unattainable through conventional breeding (Backgrounder, 2000). GM crops are therefore considered promising tools for mitigating global food insecurity (Sarihan Şahin et al., 2018). Their adoption has been associated with several agronomic advantages, including substantial reductions in pesticide use, decreased exposure to hazardous chemicals, and diminished environmental contamination (Klumper and Qaim, 2014). Herbicide tolerant varieties support conservation tillage practices, thereby lowering fuel consumption and carbon emissions while improving soil structure and reducing erosion (Brookes and Barfoot, 2018). Economically, GM crops contribute to reduced production costs and enhanced profitability due to decreased input requirements and increased yields (Qaim and Kouser, 2013). Additionally, simplified weed and pest management can reduce labor demands (Carpenter, 2010), and long term increases in supply may help lower commodity prices (Zilberman et al., 2018).

Globally, GM crop cultivation has expanded rapidly and is now integrated into the agricultural systems of major producer countries such as the United States, Brazil, Argentina, and Canada, which dominate the production of GM soybean, maize, and cotton (AgbioInvestor, 2024). In contrast, Türkiye maintains a prohibition on GM crop cultivation for agricultural purposes, limiting GMO-related activities mostly to the importation of feed materials (Güngör and Demiryürek, 2021). Consequently, Türkiye's engagement with GMOs remains primarily regulatory and consumer oriented, despite the growing global adoption of these technologies.

1.1. Global Area Planted with Genetically Modified Organisms

According to AgbioInvestor (2024), global GM crop cultivation reached 209.8 million hectares in 2024, representing a 1.9% increase compared to the previous year and spanning 28 countries. Since their commercial introduction in 1996 when GM crops were planted on only 1.7 million hectares the cumulative global cultivation area has expanded 121 fold, surpassing 3.4 billion hectares. This corresponds to approximately 13.38% of the world's total agricultural land (1,542 million hectares). Until 2011, developed countries held a greater share of global GMO cultivation; however, by 2011, their acreage converged with that of developing countries. From 2012 onward, developing countries have consistently accounted for the larger share of global GM crop area. By 2023, the gap had widened to 19.8 million hectares, with developing countries representing 54.78% of global GMO cultivation (Cheng et al., 2024).

1.2. Changes in the Planting Areas of Genetically Modified Organisms

The United States, Brazil, Argentina, India, and Canada constitute the five leading countries in terms of GM crop cultivation, collectively accounting for 90.56% of global production. Table 1 summarizes the 2024 distribution of GM crop cultivation areas and the annual percentage change relative to the previous year. The United States remains the largest adopter, with 75.40 million hectares under cultivation, reflecting a moderate 1.3% increase. Brazil follows with 67.90 million hectares (+1.4%), indicating continued expansion. Argentina displays the most pronounced growth among major producers, increasing by 8.3% to 23.80 million hectares. Conversely, Canada experienced a slight decline (−0.4%) despite maintaining more than 11 million hectares. India exhibited a substantial contraction of 7.1%, potentially attributable to regulatory constraints, market dynamics, or shifts in crop preferences. Among medium scale producers, Paraguay and Bolivia reported modest increases of 2.1% and 1.4%, respectively. China and South Africa each cultivated 3.50 million hectares; however, China recorded a substantial 17.9% growth, whereas South Africa experienced a slight decline (−0.5%). Pakistan exhibited the sharpest reduction, decreasing by 16.7% to 1.90 million hectares, suggesting

the influence of policy shifts, economic limitations, or environmental challenges (AgbioInvestor, 2024).

Overall, the distribution of GM crop cultivation reveals heterogeneous growth patterns across countries. While some nations exhibit rapid adoption, others show stagnation or decline. These disparities reflect the combined influence of regulatory frameworks, market conditions, technological capabilities, and agro ecological factors. Within the European Union (EU), stringent regulatory procedures and prolonged authorization timelines have limited GM crop adoption, prompting many private-sector investments to shift outside the region (Jones et al., 2017). All GMOs approved in the EU undergo comprehensive safety assessments conducted by the European Food Safety Authority (EFSA) in coordination with national authorities prior to market authorization.

Table 1. Table 1. Global distribution and annual variation of genetically modified (GM) crop cultivation areas by country in 2024 (AgbioInvestor, 2024)		
Country	GM area (million ha)	% Change
United States	75.40	+1.3
Brazil	67.90	+1.4
Argentina	23.80	+8.3
Canada	11.70	-0.4
India	11.20	-7.1
Paraguay	4.40	+2.1
China	3.50	+17.9
South Africa	3.50	-0.5
Pakistan	1.90	-16.7
Bolivia	1.80	+1.4

1.3. Production of Genetically Modified Organism Products in Türkiye

Although the cultivation of transgenic crops is legally prohibited in Türkiye, monitoring the presence of GMOs in imported products continues to pose challenges for food safety authorities. Türkiye imports soybean and maize primarily for feed from countries such as the United States and Argentina, where genetic engineering is widely integrated into agricultural production. This raises concerns regarding the potential entry of GMO containing products into the domestic market (Yavuz, 2005). Transgenic research in Türkiye began in 1999 when Niğde was designated as a pilot region for potato cultivation. Additional field trials were conducted in Akçakale and Nazilli for cotton and in Adana for cotton, maize, and potatoes. Subsequently, the State Planning Organization (SPO) established the “Biotechnology and Biosafety Commission” within the national five-year development plan to coordinate analytical and monitoring activities (Güngör and Demiryürek, 2021).

Regulatory oversight of GMOs is carried out by the Ministry of Agriculture and Forestry. Türkiye signed the Cartagena Protocol on Biosafety on 24 May 2000 and implemented it on 11 September 2003. The “Regulation on the Import, Processing, Export, Control, and Inspection of Genetically Modified Organisms and Products Intended for Food and Feed,” prepared by the Ministry, was published in Official Gazette No. 27388 on 26 October 2009 and entered into force amid significant public debate. Additionally, the “Draft Biosafety Law” addresses a wide range of GMO related activities including research, development, commercialization, use, import-export, transportation, storage, monitoring, and labeling and explicitly prohibits the production of genetically modified plants and animals (Kaynar, 2009).

2. Conclusion

This review shows that genetically modified (GM) crops have become an important component of global agriculture, driven by the need to increase productivity, improve resource efficiency, and ensure food security. Although global GM crop cultivation continues to expand, adoption varies across regions due to differences in regulatory frameworks and public perception. Türkiye represents a distinctive case with restrictive cultivation policies and a regulatory focus on imports and biosafety. Overall, the findings emphasize the need for science-based and transparent regulatory approaches to support the sustainable use of agricultural biotechnology.

3. References

- AgbioInvestor. (2024). Global GM crop area review. Erişim Adresi: <https://gm.agbioinvestor.com/> Erişim Tarihi:30.12.2024.
- Ateş, ZG. (2020). Genetiği değiştirilmiş organizmalara (GDO) ilişkin Avrupa Birliği'ndeki yasal düzenlemeler. *İnsan&İnsan*, 7, 24: 9-29.
- Backgrounder, A. (2000). Genetically modified organisms (GMO's). *Food Technology* 54: 42-45.
- Brookes, G., Barfoot, P. (2018). Environmental impacts of genetically modified crops. *GM Crops and Food*, 9, 3: 109–139.
- Carpenter, JE. (2010). Peer-reviewed surveys indicate positive impact of biotech crops. *Nature Biotechnology*, 28, 4: 319–321.
- Cheng, X., Li, H., Tang, Q., Zhang, H., Liu, T., Wang, Y. (2024). Trends in the global commercialization of genetically modified crops in 2023. *Journal of Integrative Agriculture*, 23, 12: 3943-3952.
- Güngör, E., Demiryürek, K. (2021). Türkiye'de genetiği değiştirilmiş organizmalar. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 7, 2: 140-154.
- Jones, PJ., McFarlane, ID., Park, JR., Tranter, RB. (2017). Assessing the potential economic benefits to farmers from various GM crops becoming available in the European Union by 2025: Results from an expert survey. *Agricultural Systems*, 155: 158-167.
- Kaynar, P. (2009). Genetik olarak değiştirilmiş organizmalara genel bir bakış. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 66, 4: 177-185.
- Klumper, W., Qaim, M. (2014). A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. *Plos One*, 9, 11: e111629.
- Qaim, M., Kouser, S. (2013). Genetically modified crops and food security. *Plos One*, 8, 6: e64879.
- Sarıhan Şahin, T., Aral, Y., Gökdağ, A. (2018). Dünyada genetiği değiştirilmiş ürünler pazar yapısı ve sosyo-ekonomik değerlendirme. *Vet Hekim Der Derg*, 89, 2: 85-108.
- Yavuz, F. (2005). Türkiye'de tarım. Erişim Adresi: www.tarimorman.gov.tr Erişim Tarihi: 06.01.2025.
- Zilberman, D., Kaplan, S., Kim, E., Hochman, G. (2018). The welfare economics of genetically modified food. *Annual Review of Resource Economics*, 10: 133-158.

BÖLÜM 15

BOMBUS TÜRLERİNİN TARIMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİKTEKİ ROLÜ VE TARIM-ÇEVRE MÜDAHALELERİ ÜZERİNDEKİ TÜR TEMELLİ TEPKİLERİ

Dr. Nimetullah KORKUT¹

Dr. Öğr. Üyesi Münire TURHAN²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17987151>

¹ Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Arı ve arı Ürünleri ABD, Bingöl, Türkiye

² Bingöl Üniversitesi, Gıda, Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim, Bingöl, Türkiye,
Email: nkorkut@bingol.edu.tr ORCID: 0000-0002-6016-0028

1. GİRİŞ

Bombus (yaban arısı) türleri, sürdürülebilir tarım tartışmalarında artık yalnızca “faydalı böcekler” olarak değil, modern tarımsal üretim sistemlerinin işlevsel bir bileşeni olarak ele alınmaktadır. Sürdürülebilir tarımın hedefi, üretimin devamlılığını sağlarken ekosistem süreçlerini korumak ve biyolojik çeşitliliği desteklemektir; Bombus türleri ise bu çerçevede hem ekolojik hem de ekonomik açıdan temel bir rol üstlenmektedir. Bugün domates, biber, yaban mersini, kolza ve kırmızı yonca gibi çok sayıda ürünün verim ve kalite parametreleri, büyük ölçüde Bombus kaynaklı tozlaşma etkinliğine bağlıdır (Bie ve ark., 2025; Westphal ve ark., 2003).

Bombus türlerinin tarımdaki bu belirleyici konumu, yalnızca yoğun çiçek ziyaretiyle açıklanamaz. Bu türler, birçok mahsulün gerektirdiği titreşimli tozlaşma (buzz pollination) davranışına sahip az sayıdaki tozlayıcı grubun başında gelir (Bie ve ark., 2025; Runnion, 2025). Bu mekanizma, Solanaceae gibi poleni sıkıca tutan bitki gruplarında meyve tutumunu belirgin biçimde artırır. Dahası, Bombus türleri düşük sıcaklık, rüzgâr ve düşük ışık gibi olumsuz koşullarda bile aktif kalabildikleri için, erken sezon ve marjinal iklim bölgelerinde tozlaşma hizmetini sürdürebilen ender pollinatörler arasındadır (Bie ve ark., 2025).

Bu ekolojik işlev, ekonomik açıdan da kritik bir bağımlılık yaratmaktadır. Yalnızca ABD’de tozlayıcıların tarımsal üretime yıllık katkısının 34 milyar doların üzerinde olduğu bildirilmektedir (Breeze ve ark., 2016). Bombus türleri ise özellikle sera tarımı ve yüksek yoğunluklu meyve sebze üretimi gibi sektörlerde adeta “teknolojik bir girdiye” dönüşmüştür. Bugün dünya genelindeki ticari Bombus kullanımının yaklaşık %95’i domates seralarına yöneliktir; çünkü Bombus kullanımının keşfinden önce bu bitkilerin tozlaşması işçiler tarafından bitkilerin elle sallanmasıyla sağlanıyordu ve bu süreç hem maliyetli hem verimsizdi (Runnion, 2025). Yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, Bombus ile tozlaştırılmış kiraz domates çeşitlerinde kimyasal hormon uygulamalarına kıyasla %5-6’ya varan verim artışı sağlandığını göstermektedir (Huang ve ark., 2024). Bu durum, Bombus türlerinin birçok ürün kategorisinde ikame edilmesi güç bir hizmet sunduğunu ortaya koymaktadır.

Ne var ki bu kritik rol, son yıllarda giderek artan çeşitli antropojenik baskılar nedeniyle ciddi ölçüde tehlike altındadır. Tarımsal yoğunlaşma, habitat

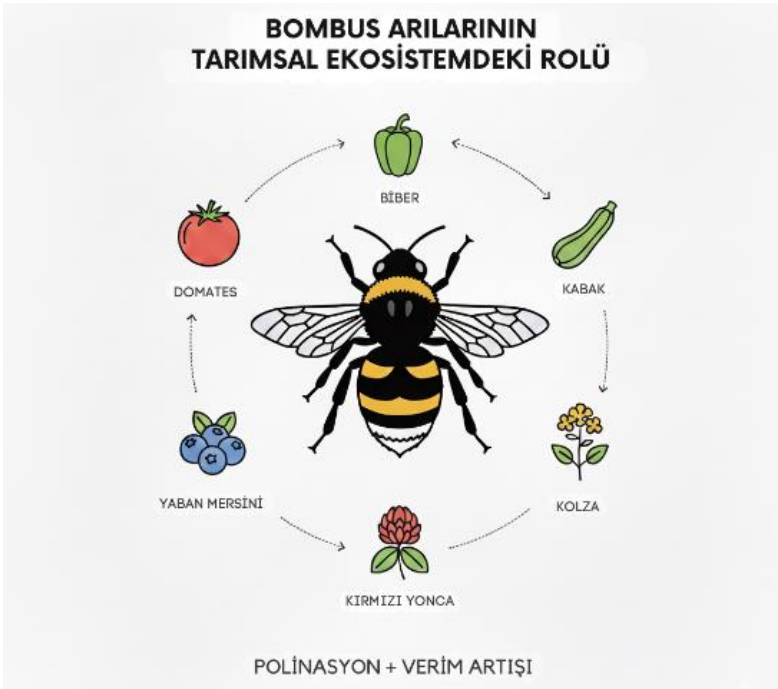
kaybı ve parçalanması, pestisitler, özellikle uzun süredir tartışılan neonicotinoid grubu, ve iklim değişikliğinin doğrudan ve dolaylı etkileri, *Bombus* popülasyonlarının birçok bölgede gerilemesine yol açmaktadır (Kosior ve ark., 2007; Hemberger ve ark., 2021; Dennis & Gibbs, 2025). Örneğin, iklimsel dalgalanmaların özellikle kışlayan kraliçeler üzerinde yarattığı stresin, koloni kurma başarısını belirgin biçimde azalttığı gösterilmiştir (Archer ve ark., 2025). Koloni düzeyinde ise neonicotinoidlerin çoğu zaman ölümcül olmayan fakat yön bulma, öğrenme ve foraging performansını zayıflatan etkileri, topluluk dinamiklerinde zincirleme çöktüşlere neden olabilmektedir (Siviter ve ark., 2021; Dennis & Gibbs, 2025).

Tüm bu baskılar, tarım-çevre müdahalelerinin (agri-environment schemes, AES) önemini daha da artırmaktadır. Çiçek şeritleri, yem bitkisi alanları, tarla kenarı yönetimi ve habitat bağlantısallığını artırıcı uygulamalar, literatürde hem *Bombus* popülasyonlarını destekleyen hem de uzun vadeli tarımsal sürdürülebilirlik açısından çift taraflı fayda sağlayan araçlar olarak öne çıkmaktadır (Carvell ve ark., 2006; Carvell ve ark., 2015; Carvell ve ark., 2017). İlk AES uygulamalarının *Bombus* için kaynak sağlama potansiyeli Pywell ve ark. (2006) tarafından gösterilmiş, daha sonraki çalışmalar bu etkinin nüfus ve koloni düzeyine yansıdığını ortaya koymuştur. Ancak yeni çalışmalar, bu müdahalelerin etkisinin türler arasında büyük farklılık gösterdiğini; dil uzunluğu, uçuş menzili, koloni büyüklüğü gibi özelliklerin *Bombus* türlerinin müdahalelere verdiği yanıtı büyük ölçüde biçimlendirdiğini belirtmektedir (Walther-Hellwig & Frankl, 2000; Mola & Williams, 2025).

Dolayısıyla, tek tip müdahale anlayışının (“one-size-fits-all”) artık bilimsel temeli kalmamıştır. *Bombus* türleri arasında görülen bu morfolojik ve davranışsal farklılıklar, tarım-çevre uygulamalarının tür-temelli (trait-based) yaklaşımla tasarlanmasını gerektirmektedir. Bu kitap bölümü, mevcut ampirik bulgular ışığında *Bombus* türlerinin ekolojik işlevlerini, farklı müdahale tiplerine verdikleri tepkileri ve bu tepkilerin mekânsal-zamansal bağlamını kapsamlı biçimde ele almayı amaçlamaktadır. Amaç yalnızca türlerin korunması değil, aynı zamanda tarımsal üretim sistemlerinde tozlaşma hizmetinin istikrarlı ve sürdürülebilir bir temel üzerine oturtulmasıdır.

2. BOMBUS TÜRLERİNİN EKOLOJİK İŞLEVLERİ

Bombus türleri, tarımsal ekosistemlerde sundukları tozlaşma hizmeti sayesinde hem üretim miktarının hem de ürün kalitesinin artmasında belirleyici rol oynayan temel biyolojik ajanlardır. Meyve, sebze ve yağlı tohum bitkileri başta olmak üzere pek çok ürünün verimliliği, Bombus kaynaklı etkin tozlaşma süreçlerine sıkı sıkıya bağlıdır (Bie ve ark., 2025). Bu işlev, sürdürülebilir tarımın ekolojik temellerinden biri olan biyotik etkileşimlerin sürekliliğini güvence altına aldığı için yalnızca üretim ekonomisi açısından değil, ekosistem sağlığı yönünden de kritik öneme sahiptir.



Şekil 1. Bombus arılarının tarımsal ekosistemlerde farklı ürün grupları (domates, biber, kabakgiller, yaban mersini, kolza ve kırmızı yonca) üzerindeki tozlaşma hizmetleri yoluyla verim artışına katkısı

Bu ekolojik katkı yalnızca varsayımsal değil, saha verileriyle de güçlü biçimde desteklenmiştir. Westphal ve ark. (2003), kolza tarlalarında yürüttükleri yoğun gözlemler sonucunda Bombus ziyaretlerinin m² başına 23,2 birey gibi dikkate değer bir yoğunluğa ulaştığını ve toplu çiçeklenen ürünlerde Bombus türlerinin yalnız arılara kıyasla çok daha etkin olduğunu göstermiştir.

Benzer şekilde, bumblebee topluluklarının meteorolojik dalgalanmalara rağmen foraging davranışını sürdürebilmesi, tarımsal üretimde yıllık istikrarın korunmasında önemli bir tampon görevi görür (Stability of Crop Pollinator Occurrence, 2022).

Bombus türlerinin "genelist" tozlayıcılar olarak tanımlanması çoğu zaman yanıltıcıdır; zira tür düzeyinde çiçek tercihi, foraging menzili, metabolik kapasite ve kaynak kullanım stratejileri arasında belirgin farklılıklar bulunur (Carvell ve ark., 2006; Walther-Hellwig & Frankl, 2000). Türler arası bu çeşitlilik, tozlaşma hizmetlerinin ekosistem düzeyinde sürekliliğini sağlayan önemli bir iş bölümünün ortaya çıkmasını mümkün kılar. Örneğin *Bombus terrestris* ve *Bombus lapidarius* geniş alanlara yayılarak uzak kaynaklara erişebilirken, *Bombus muscorum* ve *Bombus ruderals* gibi uzun dilli türler yüksek kaliteli habitat yamalarına ve çiçek-yuva yakınlığına daha fazla bağımlıdır (Walther-Hellwig & Frankl, 2000). Bu durum, uzun dilli türlerin habitat kaybı, tarla kenarı yönetimi veya çiçek kaynaklarının zamansal süreksizliği gibi değişimlere karşı daha hassas olmasına yol açar.

Bombus topluluklarının işlevsel çeşitliliği aynı zamanda ekosistem dayanıklılığını da doğrudan etkiler. Farklı türlerin aynı çevresel baskıya farklı tepkiler verebilmesi, tarımsal üretim için kritik olan "response diversity" mekanizmasını oluşturur. Bu çeşitlilik sayesinde, bir türün olumsuz koşullarda aktivitesi azalırken diğer türler boşluğu doldurabilir ve toplam tozlaşma hizmetinin devamı sağlanabilir (Rogers ve ark., 2014). Dolayısıyla, *Bombus* türlerinin sadece bireysel düzeyde değil, topluluk ölçeğinde üstlendiği işlev, tarımın uzun vadeli istikrarını doğrudan etkileyen bir ekolojik sigorta niteliğindedir.

Sonuç olarak, *Bombus* türleri hem üretim verimliliği hem de ekosistem işleyişi açısından vazgeçilmez bir konuma sahiptir. Bu nedenle tür çeşitliliğinin korunması, yalnızca ekolojik bir hedef değil, tarımsal sürdürülebilirliğin yapısal bir gerekliliği olarak değerlendirilmelidir.

3. TARIM-ÇEVRE MÜDAHALELERİNİN ETKİLERİ

Tarımsal peyzajlar son on yıllarda giderek artan bir üretim yoğunluğuna sahne olmakta; bu dönüşüm, *Bombus* türleri için hem besin kaynaklarının sürekliliğini hem de yuvalama alanlarının bütünlüğünü tehdit eden çok boyutlu bir baskı oluşturmaktadır. Monokültürlerin yaygınlaşması, çiçeklenme

dönemlerinin kısa süreli ve düzensiz bir yapıya bürünmesine yol açarken; kimyasal girdilerin yoğun kullanımı ve habitat parçalanması, *Bombus* topluluklarının uzun vadeli demografik sürdürülebilirliği açısından kritik riskler doğurmaktadır (Kosior ve ark., 2007; Hemberger ve ark., 2021). Bu nedenle tarım-çevre müdahaleleri (agri-environment interventions, AEI), yalnızca koruma odaklı önlemler olmaktan çıkmış, tarımsal üretimin devamlılığını güvence altına alan stratejik uygulamalara dönüşmüştür.

Bu kapsamda çiçek şeritleri, yem bitkisi alanları, ürün çeşitlendirme uygulamaları ve habitat bağlantısallığını artıran peyzaj düzenlemeleri, hem *Bombus* türlerinin popülasyon dinamiklerini destekleyen hem de çiftçilerin verim ve kalite artışı elde etmesini sağlayan çift yönlü müdahaleler olarak öne çıkmaktadır (Carvell ve ark., 2006; Carvell ve ark., 2015; Carvell ve ark., 2017). Nitekim kapsamlı çalışmalar, özellikle ilkbahar ve yaz sonu gibi kritik dönemlerde çiçek kaynağını destekleyen müdahalelerin koloni büyümesini doğrudan artırdığını ortaya koymuştur (Carvell ve ark., 2017).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, bu müdahalelerin yalnızca çiçek bolluğunu artırmakla kalmadığını, aynı zamanda habitat kalitesini istikrara kavuşturarak *Bombus* kolonilerinin soy devamlılığını güçlendirdiğini göstermektedir. Örneğin, Carvell ve arkadaşları (2017) tarafından yürütülen geniş ölçekli bir çalışmada, kaliteli habitat yamalarının 250-1000 m yarıçapındaki peyzaj içinde bulunmasının koloni soyundan gelen kraliçelerin hayatta kalma oranını anlamlı düzeyde artırdığı bildirilmiştir. Bu bulgu, tarım-çevre müdahalelerinin yalnızca lokal ölçekli değil, peyzaj ölçeğinde planlanması gerektiğini göstermektedir.

Aynı şekilde, çiçek şeritlerinin ve yem bitkisi karışımlarının sağlayacağı ek besin kaynaklarının kalitesi ve sürekliliği, türler arasındaki farklılıklar nedeniyle müdahalelerin etkinliğini belirleyen temel unsurlardır. Kısa dilli türlerin yerli yabani çiçek karışımlarına daha iyi yanıt verdiği, uzun dilli veya uzman türlerin ise baklagil temelli karışımların sunduğu derin tüplü çiçekleri tercih ettiği bilinmektedir (Carvell ve ark., 2006; Walther-Hellwig & Frankl, 2000). Dolayısıyla, tarım-çevre uygulamalarının doğru tasarlanması, tür-temelli ihtiyaçların dikkate alınmasını gerektirir.

Sonuç olarak, tarım-çevre müdahaleleri *Bombus* türlerinin korunmasında etkili bir araç olmakla birlikte, müdahalelerin başarısı büyük ölçüde peyzajın mekânsal yapısı, çiçek kaynaklarının zamansal sürekliliği ve

türlerin morfolojik-davranışsal özellikleri ile uyumlu tasarım ilkelerine bağlıdır. Bu nedenle sürdürülebilir tarım için AEI yaklaşımı, giderek daha fazla şekilde “hedef odaklı, ekolojik temelli ve uzun vadeli” bir çerçevede ele alınmakta ve *Bombus* popülasyonlarının yeniden güçlendirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

3.1. Çiçek Şeritleri ve Ekili Yem Bitkisi Alanları

Çiçek şeritleri ve ekili yem bitkisi alanları, tarım-çevre müdahalelerinin *Bombus* popülasyonları üzerindeki en doğrudan etkili bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu alanlar, özellikle yoğun tarım yapılan peyzajlarda giderek seyrekleşen besin kaynaklarının yerini kısmen doldurarak koloni büyümesi, işçi üretimi ve tozlaşma etkinliğinin sürdürülmesi için kritik işlev görür. Carvell ve çalışma arkadaşları (2015), farklı büyüklüklerdeki yem bitkisi alanlarını karşılaştırdıkları deneysel çalışmada, bu alanların mevcut tarım dışı habitatlara göre belirgin biçimde daha yüksek *Bombus* tür zenginliği ve işçi yoğunluğu sağladığını ortaya koymuştur. İlginç biçimde, daha küçük ekili alanların (0.25 ha), daha büyük alanlara (1.0 ha) kıyasla bazı türlerde daha yüksek birey yoğunluğu üretmesi, müdahale tasarımında yalnızca toplam alan büyüklüğüne değil, bu alanların peyzaj içindeki konumuna ve dağılımına odaklanılması gerektiğini göstermektedir. Bu bulgu, özellikle düşük hareket kapasitesine sahip türler için peyzaj ölçeğinde “çok sayıda küçük ancak stratejik biçimde yerleştirilmiş” kaynak yamalarının büyük tek bir bloktan daha işlevsel olabileceğine işaret eder.

Çiçek şeritlerinin içeriği ve kullanılan bitki karışımlarının niteliği de müdahalenin etkinliğini belirleyen temel faktörlerdendir. Carvell ve ark. (2006), tarla kenarı çiçek karışımlarını karşılaştırdıkları çalışmada, baklagil ağırlıklı karışımların hem tür zenginliğini hem de toplam *Bombus* bolluğunu artırdığını, buna karşılık yerli yabani çiçek karışımlarının özellikle kısa dilli türler için daha tercih edilir olduğunu göstermiştir. Uzun dilli türlerin derin tüplü çiçeklere bağlı olması, karışımların fonksiyonel çeşitliliğini daha da önemli hale getirir. Buradan hareketle, tek tip bitki karışımlarının genellikle belirli tür gruplarına avantaj sağladığı, dolayısıyla tür-temelli ihtiyaçları gözetken karma karışımların daha dengeli bir topluluk yapısı oluşturduğu söylenebilir.

Tarım-çevre müdahalelerinin etkisinin yalnızca Bombus popülasyonlarıyla sınırlı olmadığı, diğer yabancı tozlayıcı topluluklarını da dönüştürdüğü yakın dönem çalışmalarla ortaya konmuştur. Garratt ve arkadaşları (2023), elma bahçelerinde uygulanan çiçek şeritlerinin, Bombus bolluğunu artırmanın yanı sıra yalnız arı (solitary bee) popülasyonlarını da %20'nin üzerinde yükselttiğini bildirmiştir. Bu bulgu, farklı tozlayıcı gruplarının aynı müdahaleye farklı şekillerde yanıt verdiğini ve geniş bir ekolojik etkileşim ağı içinde değerlendirildiğinde çiçek şeritlerinin çok boyutlu kazanımlar sağlayabileceğini göstermektedir. Buna karşın, aynı çalışmada çıplak toprak bırakılarak oluşturulan yuvalama alanlarının yalnız arılar üzerinde beklenen etkiyi yaratmadığı saptanmıştır. Bu durum, habitat müdahalelerinin her bileşeninin eşit derecede etkili olmadığını, tasarımın ekolojik temelli olması gerektiğini açık biçimde ortaya koyar.

Çalışmanın en çarpıcı sonuçlarından biri ise müdahalenin yalnızca ekolojik değil, ekonomik çıktıları da dönüştürdüğünün gösterilmesidir. Garratt ve ark. (2023), Bombus bolluğundaki artışın meyve tutumu ve tohum sayısını yükselttiğini, yalnız arı bolluğundaki artışın ise özellikle meyve kalitesini iyileştirdiğini tespit etmiştir. Bu çift yönlü etki, farklı tozlayıcı gruplarının üretim sürecindeki görev dağılımını ve tarım-çevre müdahalelerinin üretim değerine doğrudan yansıyabilecek bir "ekolojik yatırım" niteliği taşıdığını göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, çiçek şeritleri ve yem bitkisi alanları yalnızca kaynak miktarını artıran yapılar değil, doğru tasarlandığında tür-temelli ihtiyaçların karşılanmasını, koloni performansının sürdürülmesini ve tarımsal çıktının istikrara kavuşmasını sağlayan stratejik müdahalelerdir. Bu nedenle müdahalelerin başarı düzeyi, bitki karışımının içeriği, alanların peyzajdaki konumu, kaynakların mevsimsel sürekliliği ve hedef türlerin ekolojik özellikleri gibi çok boyutlu parametrelerin birlikte ele alınmasına bağlıdır.

3.2. Ürün Çeşitliliği ve Sıralı Çiçeklenme

Tarımsal peyzajlarda ürün çeşitliliği, Bombus topluluklarının sürdürülebilirliğini belirleyen temel faktörlerden biridir. Hemberger ve çalışma arkadaşları (2021), hem çiftlik hem de peyzaj ölçeğinde artan ürün çeşitliliğinin Bombus tür zenginliği ve bolluğuyla pozitif yönde ilişkili olduğunu

göstermiştir. Bu bulgu, tarımsal üretimin tek tip ürün üzerine kurulu olduğu monokültür alanlarda gözlemlenen *Bombus* gerilemeleriyle doğrudan örtüşmektedir (Walther-Hellwig & Frankl, 2000). Monokültürler, kısa süreli ve yoğun çiçeklenme dönemleriyle kaynak sunan ancak sezonun geri kalanında geniş bir besin boşluğu oluşturan habitatlardır; çeşitlendirilmiş ürün sistemleri ise çiçeklenme dönemlerinin zaman içinde yayılmasını sağlayarak *Bombus* kolonilerinin yıl boyunca ihtiyaç duyduğu sürekli polen ve nektar akışını destekler.

Sıralı çiçeklenme stratejileri bu bağlamda özellikle önemlidir. Rao ve Stephen (2010), arı-tozlayıcı ürünlerin art arda ekilmesiyle oluşturulan mevsimsel kaynak sürekliliğinin *Bombus* faunası üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymuştur. İlkbaharda yaban mersini, yazın kırmızı yonca gibi farklı dönemlerde çiçeklenen ürünlerin ardışık ekimi, koloni büyümesi ve yeni kraliçe üretimi gibi kritik süreçlerin sürekliliğini sağlayan kesintisiz bir besin zinciri oluşturur. Bu yaklaşım, özellikle koloni kurulumunun gerçekleştiği erken sezonda ve sonbaharda kraliçe üretiminin en yoğun olduğu dönemde kaynak kıtlığı riskini azaltır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, çiçeklenme zamanlamasının yalnızca kaynak miktarı değil, aynı zamanda popülasyon dinamikleri üzerine mekanistik etkileri olduğunu da göstermektedir. Riggi ve çalışma arkadaşları (2024), erken sezon toplu çiçeklenen ürünlerin (örneğin kolza) çevredeki doğal habitatlardaki *Bombus* ve diğer yabani arı bolluğunu geçici olarak “seyrelttiğini”, yani arıları yoğun biçimde tarım alanlarına çekerek doğal bitkilerin tozlaşmasında azalmaya yol açtığını göstermiştir. Buna karşılık, yaz sonu ve sonbahara yakın çiçeklenen ürünlerin hem tarla içinde hem de çevredeki doğal habitatlarda tozlayıcı bolluğunu artırdığı bildirilmiştir. Bu bulgular, ürün çeşitliliği ve sıralı çiçeklenme stratejilerinin yalnızca kaynak sağlamakla kalmadığını, aynı zamanda peyzajdaki tozlayıcı akışını ve popülasyon sürekliliğini yönlendiren dinamik bir araç olduğunu göstermektedir.

Bombus kolonilerinin yıllık yaşam döngüsü dikkate alındığında, kaynak sürekliliğinin önemi daha da belirgin hale gelir. Koloni kuran kraliçeler erken ilkbaharda yüksek kaliteli polen kaynaklarına ihtiyaç duyar; yaz ortasında işçi üretiminin sürdürülebilmesi için yoğun nektar ve polen sağlanmalıdır; sonbaharda ise yeni kraliçelerin ve erkeklerin üretimi için enerji açısından

zengin kaynaklara gereksinim duyulur. Ürün çeşitliliği ve sıralı çiçeklenme stratejileri, bu çok aşamalı ihtiyaçları karşılayabildiği ölçüde işlevseldir.

Bu nedenle sıralı çiçeklenme yalnızca bir tarımsal planlama tekniği değil, Bombus popülasyonlarının uzun vadeli istikrarı açısından temel bir ekolojik müdahale olarak değerlendirilmelidir. Ürün rotasyonlarının, çiçeklenme takvimlerinin ve peyzaj düzeyinde bitki kompozisyonlarının bu perspektifle ele alınması, hem tozlayıcıların hem de üretim sistemlerinin dayanıklılığını artıran stratejik bir yaklaşım sunmaktadır.

3.3. Toplu Çiçeklenme Ürünlerinin Zamansal Etkileri

Toplu çiçeklenen ürünlerin, başta kolza olmak üzere, polinatör toplulukları üzerindeki etkisi uzun süredir bilinse de, bu etkinin yönü ve büyüklüğünün büyük ölçüde çiçeklenme zamanlamasına bağlı olduğu son yıllarda daha net şekilde ortaya konmuştur. Zamanlama, yalnızca kaynak bolluğunu değil, aynı zamanda peyzajdaki tozlayıcı akışını, doğal habitatların tozlaşma başarısını ve Bombus kolonilerinin yıllık yaşam döngüsünde kritik öneme sahip olan enerji dengesini doğrudan belirlemektedir.

Riggi ve çalışma arkadaşları (2024), erken sezonda çiçeklenen toplu ürünlerin polinatör ekolojisinde “mıknatıs etkisi” yarattığını gösteren güçlü kanıtlar sunmuştur. Erken ilkbaharda kolza gibi geniş ölçekli kaynakların aniden açılması, bölgedeki Bombus ve diğer yabani arıların önemli bir bölümünü bu alanlara çekmekte; bunun sonucunda yakın doğal habitatlarda polinatör bolluğu ve tür çeşitliliği geçici olarak düşmektedir. Bu durum, literatürde “seyreltme etkisi” (dilution effect) olarak tanımlanmakta ve özellikle ilkbaharda çiçeklenen doğal bitki topluluklarının tozlaşma başarısını olumsuz etkileyebilmektedir. Çünkü Bombus kolonileri yılın bu döneminde henüz küçük olup, kaynak kullanımı yoğun şekilde kraliçe ve erken dönem işçilerin ihtiyaçlarına yöneliktir; bu nedenle kaynakların peyzajda yanlış bir zamansal dağılımı, koloni büyümesi açısından beklenmedik maliyetler yaratabilir.

Buna karşılık, geç sezon toplu çiçeklenme ürünleri (yaz sonu-erken sonbahar döneminde çiçeklenen geniş alanlar) farklı bir ekolojik sonuç üretmektedir. Riggi ve ark. (2024), böyle dönemlerde açan toplu çiçeklerin hem tarım alanlarında hem de yakın doğal habitatlarda Bombus ve bal arısı bolluğunu artırdığını, hatta bazı çalışmalarda koloni büyümesini destekleyerek yeni kraliçe üretimini olumlu etkilediğini bildirmiştir. Çünkü bu dönem, birçok

habitatta çiçek kaynaklarının azalmasıyla karakterize edilir; dolayısıyla geç sezon kaynakları, koloni yaşam döngüsünün en enerji talep eden aşaması olan üreme döneminde bir “can simidi” işlevi görür.

Bu bulgular, toplu çiçeklenme ürünlerinin tek başına “olumlu” ya da “olumsuz” bir müdahale olarak değerlendirilemeyeceğini, etkinin zamanlama ve peyzaj bağlamına göre tamamen farklılaşabileceğini göstermektedir. Erken sezon toplu çiçeklenmeler doğal habitatların tozlaşma başarısını zayıflatılabilirken, geç sezon toplu çiçeklenmeler ekosistem içinde boş kalan bir zaman dilimini doldurarak hem tarımsal üretimi hem de polinatör popülasyonlarını destekleyebilir.

Dolayısıyla, toplu çiçeklenen ürünlerin tarım-çevre müdahalelerine entegre edilmesinde temel ilke, çiçeklenme zamanlamasının peyzaj ölçeğindeki kaynak sürekliliğiyle uyumlu biçimde planlanmasıdır. Bu yaklaşım, hem *Bombus* kolonilerinin yıllık döngüsünü hem de doğal bitki topluluklarının tozlaşma gereksinimlerini dikkate alan, zaman-mekan uyumuna dayalı bir strateji gerektirir.



Şekil 2. Erken ve geç sezon toplu çiçeklenen ürünlerin (örn. kolza) *Bombus* ve diğer yabani arı toplulukları üzerindeki zamansal etkileri: erken sezonda “seyreltme etkisi”, geç sezonda ise kaynak sürekliliği ve koloni desteği.

3.4. Habitat Bağlantısallığı ve Peyzaj Konfigürasyonu

Bombus türlerinin habitat kullanımı ve uçuş mesafeleri arasında belirgin farklılıklar bulunması, habitat bağlantısallığını yalnızca bir koruma aracı olmaktan çıkararak popülasyonların uzun vadeli sürdürülebilirliği için temel bir gereklilik haline getirmektedir. Türlerin kimisi birkaç yüz metre yarıçapında kaynak kullanımıyla sınırlıyken, kimileri uygun kaynaklara ulaşabilmek için birden fazla kilometrelik mesafeleri rutinde kat edebilmektedir. Bu nedenle peyzajın mekânsal düzeni, kolonilerin foraging verimliliğini, enerji bütçesini ve soy devamlılığını doğrudan belirleyen bir yapı taşına dönüşür.

Carvell ve çalışma arkadaşları (2017), koloni yuvalarının çevresindeki 250-1000 metrelik alanın kalitesinin, özellikle erken ilkbaharda koloni kuran kraliçelerin başarısı üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Bu dönem, Bombus yaşam döngüsünün en kırılgan aşamasıdır; kraliçe, yeni koloni oluşturabilmek için ilk işçileri yetiştirene kadar tamamen tek başına foraging yapmak zorundadır. Dolayısıyla yuva çevresinde ilkbaharda çiçeklenen yüksek kaliteli habitat yamalarının bulunması, koloni soyunun devam edip etmeyeceğini belirleyen temel faktörlerden biridir.

Walther-Hellwig ve Frankl (2000) ise bazı Bombus türlerinin yuvalama ve beslenme alanları arasında yakın mekânsal bağlantı olmadan koloni verimliliğini sürdüremediğini ortaya koymuştur. Özellikle kısa uçuş menziline sahip veya enerji bütçesi dar olan türlerde, besin kaynaklarının yuvaya uzak konumlandırılması koloni gelişiminde gecikmelere, işçi üretiminde düşüşlere ve sonuç olarak üreme başarısında kayıplara yol açmaktadır. Bu bağlamda “yakın habitat eşleştirmesi” yalnızca küçük türler için değil, erken ilkbahar gibi metabolik stresin yüksek olduğu dönemlerde tüm türler için önem taşır.

Daha güncel çalışmalar ise habitat bağlantısallığının önemini çok daha geniş bir mekânsal perspektife taşımıştır. Örneğin Oregon’da gerçekleştirilen bir araştırmada Bombus işçilerinin en az 11,6 km’ye kadar uzanan foraging mesafeleri kaydedilmiştir. Bu bulgu, günümüzde pek çok tarım-çevre programının temel aldığı 250-500 m’lik yönetim zonlarının birçok tür için yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu “ölçek uyumsuzluğu” koruma politikalarının en kritik sorunlarından biridir; çünkü bazı türler geniş ölçekli kaynak yamalarının sürekliliğine ihtiyaç duymakta, ancak mevcut uygulamalar çoğu zaman yalnızca tarla kenarı düzeyine odaklanmaktadır.

Habitat bağlantısallığı yalnızca yatay mesafelerle sınırlı değildir; peyzajın mozaik yapısı da kolonilerin hareket stratejilerini etkiler. Doğal ve yarı doğal bitki örtüsünün oluşturduğu koridorlar, *Bombus* türlerinin enerji maliyeti düşük yollar kullanarak geniş alanlar arasında geçiş yapmasına olanak tanır. Bu koridorlar özellikle gen akışının korunmasında, küçük ve izole popülasyonların çökmesini engellemede kritik rol oynar.

Sonuç olarak, habitat bağlantısallığı ve peyzaj konfigürasyonu *Bombus* türlerinin popülasyon dinamiklerinin merkezinde yer alan temel bileşenlerdir. Kısa menzilli türler için yerel ölçekli, yoğun ve kaliteli kaynak yamalarının sağlanması gerekirken; uzun menzilli türlerin sürdürülebilirliği, bölgesel ölçekli habitat bütünlüğünün korunmasına bağlıdır. Bu nedenle tarım-çevre müdahaleleri, yalnızca bitki karışımının niteliğini veya alan büyüklüğünü değil, peyzajın çok katmanlı mekânsal yapısını dikkate alan çok ölçekli bir tasarım yaklaşımına ihtiyaç duymaktadır.

4. TÜRLERE ÖZGÜ YANITLAR VE TASARIM İLKELERİ

Tarım-çevre müdahaleleri, çoğu zaman tüm *Bombus* topluluklarını bir bütün olarak ele alarak tasarlanırsa da, farklı türlerin bu müdahalelere verdiği tepkiler arasında belirgin ve çoğu zaman öngörülemeyen farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıkların temelinde, *Bombus* türlerini birbirinden ayıran morfolojik, fizyolojik ve davranışsal özellikler yer alır. Dil uzunluğu, uçuş menzili, habitat bağlantısallığına duyarlılık, koloni büyüklüğü ve floral kaynaklara yönelik tercih farklılıkları, her türün tarımsal peyzajdaki değişimlere verdiği yanıt büyük ölçüde şekillendirir (Carvell ve ark., 2006; Walther-Hellwig & Frankl, 2000).

Örneğin, kısa dilli türler genellikle sığ ve kolay erişilebilir çiçeklerle beslenirken, uzun dilli türler derin tüplü çiçeklere bağımlıdır. Bu morfolojik ayırım, çiçek şeritlerinde hangi bitki karışımlarının hangi türleri destekleyeceğini doğrudan belirler. Aynı çiçek karışımı bazı türlerde yoğun bir artışa yol açarken, diğerlerinde sınırlı bir fayda sağlayabilir. Bu nedenle müdahale tasarımında “fonksiyonel çeşitlilik” ilkesi, yani farklı dil uzunluklarına sahip türleri destekleyecek bitki kompozisyonlarının oluşturulması kritik bir gereklilik haline gelmiştir.

Türler arası farklılıklar yalnızca çiçek tercihlerine değil, hareket ekolojisine de yansır. *B. terrestris* veya *B. lapidarius* gibi geniş uçuş menziline

sahip türler kilometrelerce uzaklıktaki kaynaklara erişebilir; bu özellik onları peyzajdaki kaynak dağılımına karşı daha esnek hale getirirken, geniş ölçekli tarımsal baskılara da daha fazla maruz bırakır. Buna karşılık, *B. muscorum* veya *B. ruderatus* gibi düşük hareket kapasitesine sahip türler, besin kaynaklarının yuva çevresinde yoğunlaşmasını gerektirir. Bu türlerde habitat yamaları arasındaki bağlantının kopması, koloni gelişimini ve soy devamlılığını doğrudan tehdit eder. Bu nedenle aynı peyzaj düzenlemesi, türler arasında tamamen farklı ekolojik sonuçlar doğurabilir.

Türlere özgü farklılıkların bir diğer belirleyici boyutu koloni büyüklüğüdür. *B. terrestris* veya *B. impatiens* gibi büyük koloniler kuran türler, kısa süreli çevresel dalgalanmaları tolere edebilecek bir işçi tamponuna sahiptir. Buna karşılık, *B. pseudobaicalensis* veya *B. schrencki* gibi küçük kolonili türlerde birkaç işçinin kaybı bile kaynak akışını aksatabilir ve koloni gelişimini geri dönülmez biçimde sekteye uğratabilir. Bu nedenle, pestisitlerin subletal etkileri ya da ani besin kıtlıkları gibi stresörler küçük kolonili türlerde daha hızlı bir çöküşe yol açabilir.

Ek olarak, her türün pestisitlere, özellikle neonicotinoid sınıfına karşı duyarlılığı da farklıdır. Bazı türlerde uçuş süresinin ve navigasyon kapasitesinin hafifçe düşmesi bile koloni ekonomisini bozar; diğerlerinde ise bu etki daha yavaş ve birikimli biçimde ortaya çıkar (Siviter ve ark., 2021). Niche uzmanlığı da bu duyarlılığı artırabilir. Örneğin, belirli bitki türleriyle güçlü etkileşim geliştirmiş uzman *Bombus* türleri, bu bitkilerin kaybından veya tarım kimyasallarına maruz kalmasından daha hızlı etkilenir.

Bu farklılıklar göz önüne alındığında, tarım-çevre müdahalelerinin başarıya ulaşması için “tek tip yaklaşım”ın yeterli olmadığı açıktır. Tür-temelli tasarım ilkeleri, peyzaj ölçeğinde uygulanacak stratejilerin omurgasını oluşturmalıdır. Bu ilkeler şu temel çerçeveye dayanır:

- Fonksiyonel çeşitliği destekleyen çiçek karışımları oluşturmak: Hem kısa hem uzun dilli türlere uygun bitki türlerini bir arada bulundurmak.
- Hareket kapasitesine göre mekânsal ölçeklendirme yapmak: Düşük hareketli türler için yuva çevresinde yoğun kaynak alanları, yüksek hareketli türler için geniş ölçekli habitat koridorları sağlamak.
- Koloni büyüklüğüne göre risk azaltma stratejileri oluşturmak: Küçük kolonili türlerde pestisit maruziyetinin azaltılmasına öncelik vermek.

- Niche uzmanı türler için hedefli habitat yamaları planlamak: Uzman türlerin gerektirdiği spesifik floristik bileşenleri müdahaleye dahil etmek.

Sonuç olarak, *Bombus* türlerinin tarım-çevre müdahalelerine verdiği farklı tepkiler, tür-temelli ekoloji yaklaşımının yalnızca bir akademik kavram değil, pratik bir gereklilik olduğunu göstermektedir. Tarımsal peyzajda gerçek anlamda sürdürülebilir bir tozlaşma hizmeti sağlamak, bu farklılıkların tasarımın her aşamasına entegre edilmesiyle mümkün olacaktır.

4.1. Morfolojik Özellikler: Dil Uzunluğu ve Çiçek Seçimi

Bombus türleri arasında en belirgin ve işlevsel farklardan biri dil uzunluğudur. Dil uzunluğu, türlerin hangi çiçek morfolojilerine erişebileceğini, dolayısıyla hangi bitki topluluklarını tercih edeceğini belirleyen temel bir morfolojik özelliktir. Bir *Bombus* türünün dil uzunluğu, yalnızca besin toplama davranışını değil, aynı zamanda habitat seçiminden koloni verimliliğine kadar uzanan geniş bir ekolojik yelpazeyi etkiler.

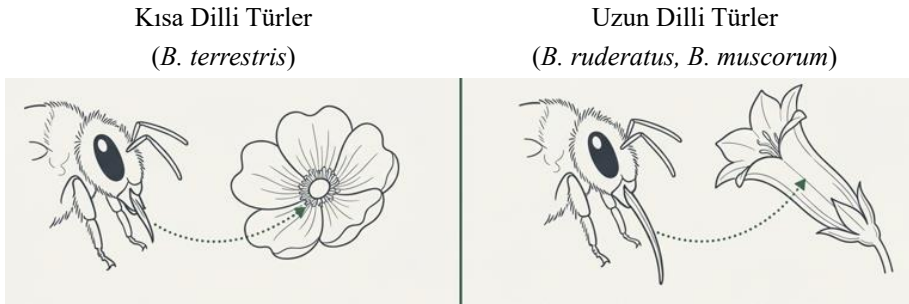
Kısa dilli türler (ör. *B. terrestris*, *B. lapidarius*), papatyagiller gibi sığ çiçekli türlerden kolayca nektar toplayabilir ve bu nedenle tarım alanlarında yaygın olan genelist bitki kompozisyonlarına hızla uyum sağlayabilirler. Bu türler çoğu zaman yüksek hareket kabiliyetine sahip oldukları için geniş alanlarda da etkili biçimde foraging yapabilir.

Buna karşılık uzun dilli türler (*B. ruderatus*, *B. muscorum*) boru şeklindeki, derin tüplü çiçeklere bağımlıdır. Bu çiçek morfolojisi genellikle baklagiller (Leguminosae) ve bazı özel kır çiçeği türleri tarafından sağlanır. Bu nedenle uzun dilli türler, kaynak sürekliliğinin bozulduğu tarım alanlarında daha kırılgan hale gelir ve habitat bağlantısallığının kesintiye uğramasından kısa dilli türlere kıyasla çok daha fazla etkilenir.

Carvell ve çalışma arkadaşlarının (2006) tarla kenarlarında yürüttüğü kapsamlı çalışma, bu ilişkiyi güçlü biçimde doğrulamaktadır. Baklagil ağırlıklı çiçek karışımlarının genel tür bolluğunu ve *Bombus* çeşitliliğini artırdığı, ancak yerli yabancı çiçek karışımlarının özellikle kısa dilli türleri daha fazla çektiği saptanmıştır. Bu bulgu, çiçek şeridi tasarımlarında fonksiyonel çeşitlilik ilkesinin zorunlu olduğunu göstermektedir: Yalnızca tür zenginliği değil, farklı dil uzunluklarına sahip *Bombus* türlerinin beslenme gereksinimlerini

karşılacak morfolojik çeşitliliğe sahip çiçek topluluklarının oluşturulması gerekmektedir.

Dil uzunluğu, aynı zamanda türlerin habitat eşleşmesini belirleyen bir özellik olarak öne çıkar. Örneğin *B. muscorum*, uzun dili nedeniyle derin tüplü çiçeklere bağımlıdır; ancak hareket kapasitesinin sınırlı olması, bu türün yalnızca çiçek kaynakları ile yuvalama alanlarının yakın eşleştiği peyzajlarda başarılı olabileceğini göstermektedir (Walther-Hellwig & Frankl, 2000; Carvell ve ark., 2017). Buna karşılık *B. terrestris*, kısa dili ve yüksek hareket kabiliyeti sayesinde hem monokültürlerde hem de geniş ölçekli çiçeklenme alanlarında etkili bir forager olabilir.



Şekil 3. Bombus türlerinde dil uzunluğuna bağlı çiçek kullanımının kavramsal gösterimi

Bu nedenle dil uzunluğu yalnızca bir morfolojik özellik değil, türlerin tarımsal peyzajdaki kaynaklardan nasıl yararlanacağını belirleyen bir “ekolojik anahtar” niteliğindedir. Tablo 1’de özetlenen bu tür-temelli uyum farklılıkları, tarım-çevre müdahalelerinin neden tüm türler için aynı etkiyi göstermediğini ve neden spesifik müdahale-tür eşleştirmesi yapılması gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Bombus türlerinin dil uzunlukları, habitat tercihleri ve müdahale uyumu

Bombus Türü	Dil Uzunluğu	Habitat Tercihi	Uygun Müdahale Tipi	Kaynak
<i>B. terrestris</i>	Kısa	Monokültürler, uzak alanlara erişebilir	Legume bazlı çiçek şeritleri, geniş alanlı çiçek tarımı	Carvell ve ark., 2006; Walther-Hellwig & Frankl, 2000
<i>B. lapidarius</i>	Kısa	Açık alanlar, yüksek hareket kabiliyeti	Kısa dilli türlere uygun yerel çiçek türleri	Carvell ve ark., 2006
<i>B. muscorum</i>	Uzun	Habitat bağlantısına bağımlı, lokal foraj alanları	Çiçek açan çitler, 250-1000m yakın kaynaklar	Walther-Hellwig & Frankl, 2000; Carvell ve ark., 2017
<i>B. pascuorum</i>	Orta-uzun	Çeşitli habitatları kullanır	Karma çiçek karışımları (legume + doğal)	Carvell ve ark., 2006
<i>B. ruderatus</i>	Uzun	Nadiren görülen, uzmanlaşmış tür	Habitat bağlantısı güçlü alanlarda sown margins	Carvell ve ark., 2006

4.2. Uçuş Menzili ve Alan Kullanımı

Bombus türleri arasındaki uçuş menzili farklılıkları, bu türlerin tarımsal peyzaj içerisindeki kaynaklara erişim kapasitesini ve tarım-çevre müdahalelerine verdikleri yanıtları doğrudan belirleyen temel ekolojik özelliklerden biridir. Erken dönem çalışmalar, bazı Bombus türlerinin yalnızca sınırlı mesafelerde foraj yapabildiğini, buna karşılık diğer türlerin geniş alanlara yayılarak uzak kaynakları etkin biçimde kullanabildiğini ortaya koymuştur (Walther-Hellwig & Frankl, 2000).

Son yıllarda yapılan ayrıntılı saha çalışmaları, Bombus türlerinin hareket ekolojisinin sanılandan çok daha karmaşık ve geniş ölçekli olduğunu göstermektedir. Rao ve Strange (2012), tarımsal peyzajlarda Bombus işçilerinin 11.6 km'ye varan foraj mesafeleri kat edebildiğini raporlayarak, kaynakların peyzaj içerisinde ne kadar dağınık hâle geldiğini ve kolonilerin bu dağınıklığa uyum sağlamak zorunda kaldığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, Bombus kolonilerinin yalnızca lokal kaynaklara değil, bölgesel ölçekte peyzaj sürekliliğine bağımlı olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, bu yüksek mobilite tüm *Bombus* türleri için geçerli değildir. Düşük hareket kabiliyetine sahip türler (örneğin *B. muscorum*), genellikle 1 km'den daha kısa mesafelerde foraj yapmakta ve beslenme ile yuvalama alanlarının mekânsal olarak birbirine yakın olduğu habitat yapılarına ihtiyaç duymaktadır. Buna karşılık, yüksek hareket kabiliyetine sahip türler (örneğin *B. lapidarius*), yuvalarından kilometrelerce uzaklıktaki büyük ve yoğun kaynak alanlarını değerlendirebilmektedir.

Bu tür-temelli farklar, Şekil 4'te şematik olarak sunulmuştur. Şeklin sol paneli, yüksek hareket kabiliyetine sahip *Bombus* türlerinin yuvalarından uzak konumdaki büyük kaynak alanlarına erişebildiği bir senaryoyu temsil ederken; sağ panel, düşük hareket kabiliyetine sahip türler için uzak kaynakların işlevsiz kaldığını ve buna karşılık yuva çevresine yakın, küçük ve dağınık kaynak yamalarının çok daha etkili bir tasarım sunduğunu göstermektedir (Şekil 4). Bu karşılaştırma, habitat tasarımının yalnızca kaynak miktarına değil, kaynakların türlerin uçuş menziline uygun mekânsal dağılımına göre planlanması gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 4. *Bombus* türlerinde uçuş menziline bağlı mekânsal kaynak kullanımının kavramsal gösterimi

Bombus türlerinin bu hareket ekolojisi, aynı zamanda tarım-çevre politikalarında önemli bir ölçek uyumsuzluğunu da gündeme getirmektedir. Uygulamada birçok çevre programı, genellikle *B. terrestris* gibi yaygın türlerin ortalama foraj mesafelerine (yaklaşık 250 m) göre tasarlanmış lokal müdahalelere dayanmaktadır. Ancak maksimum foraj mesafelerinin kilometreler düzeyinde olması, bu tür lokal müdahalelerin özellikle düşük bağlantısallığa sahip peyzajlarda yetersiz kalabileceğini göstermektedir (Rao & Strange, 2012).

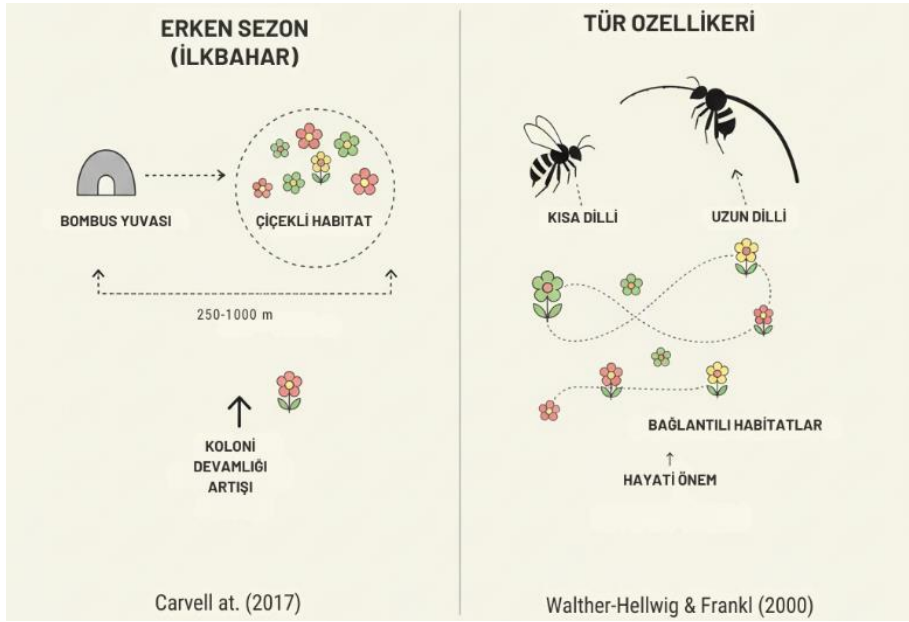
Yakın tarihli çalışmalar, *Bombus* türlerinin yalnızca işçi foraj davranışıyla değil, aynı zamanda kraliçelerin yuva arama ve kolonilerin mekânsal yayılım süreçleriyle de peyzaj kalitesine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Mola ve Williams (2025), *Bombus* türlerinde foraj ve dağılım davranışlarının yaşam evrelerine göre değiştiğini; özellikle koloni kuruluş döneminde uygun habitatların bulunabilirliğinin uzun vadeli koloni başarısı açısından belirleyici olduğunu vurgulamıştır.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, tarım-çevre müdahalelerinin etkinliği yalnızca çiçek kaynağı sağlamakla sınırlı değildir. Müdahalelerin başarısı; kaynakların konumu, büyüklüğü, birbirleriyle olan mesafesi ve bu mekânsal yapıların hedeflenen *Bombus* türlerinin uçuş menziliyle uyumu tarafından belirlenmektedir. Şekil 4'te sunulan kavramsal çerçeve, tür-temelli mekânsal ölçeklendirmenin sürdürülebilir tozlaşma hizmetleri için neden vazgeçilmez olduğunu bütüncül biçimde özetlemektedir.

4.3. Habitat Bağlantısallığına Duyarlılık

Bombus türleri için çiçek kaynaklarının varlığı tek başına yeterli değildir; bu kaynakların yuvalama alanlarına mekânsal olarak yakın, aynı zamanda birbirleriyle bağlantılı habitatlar içinde konumlanması koloni başarısı açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle koloni kuruluşunun gerçekleştiği erken sezon (ilkbahar) döneminde, besin kaynakları ile yuvalar arasındaki mesafenin artması, enerji maliyetlerini yükselterek koloni gelişimini sınırlandırabilmektedir.

Carvell ve arkadaşları (2017), koloni soyunun devamlılığı ile habitat kalitesi arasındaki ilişkiyi değerlendirdikleri çalışmalarında, yuvalara 250-1.000 metre mesafede bulunan çiçekli habitatların, özellikle ilkbaharda çiçeklenen bitkiler aracılığıyla koloni başarısını anlamlı biçimde artırdığını göstermiştir. Bu bulgu, erken sezonda sağlanan yerel kaynak sürekliliğinin, işçi üretimi ve koloni büyümesi üzerinde kritik bir eşik oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5'te gösterildiği üzere, yuva çevresindeki çiçekli habitatların sürekliliği, koloni gelişimini doğrudan destekleyen temel bir peyzaj bileşeni olarak öne çıkmaktadır. Habitat kalitesindeki düşüş yalnızca tarım alanlarında değil, kentleşme gradyanlarında da uzun dilli *Bombus* türlerini orantısız biçimde etkilemektedir (Ahrné ve ark., 2009).



Şekil 5. Habitat bağlantısallığının Bombus türleri üzerindeki etkisi

Habitat bağlantısallığının önemi, türler arasındaki ekolojik ve morfolojik farklılıklarla birlikte daha da belirginleşmektedir. Walther-Hellwig ve Frankl (2000), uzun dilli ve düşük hareket kabiliyetine sahip Bombus türlerinin (*B. muscorum*, *B. ruderatus* gibi), beslenme ve yuvalama alanları arasında yakın ve kesintisiz mekânsal bağlantılara güçlü biçimde bağımlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu türler için dağınık veya kopuk kaynak yapıları, pratikte erişilemeyen habitatlar anlamına gelmekte ve popülasyonların yerel düzeyde hızla gerilemesine yol açabilmektedir.

Buna karşılık, daha yüksek hareket kabiliyetine sahip ve genel özellikler gösteren türler (*B. terrestris*, *B. lapidarius*), daha geniş alanlara yayılmış kaynaklardan yararlanabilmekte ve peyzaj parçalanmasına görece daha toleranslı davranabilmektedir. Ancak bu durum, bağlantısallığın bu türler için önemsiz olduğu anlamına gelmemektedir; aksine, habitat ağlarının sürekliliği, uzun vadeli genetik akış ve popülasyon istikrarı açısından tüm Bombus türleri için ortak bir gereklilik oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, tarım-çevre müdahalelerinin tasarımında yalnızca çiçek şeritlerinin veya kaynak alanlarının varlığı değil, bu alanların yuvalara olan mesafesi, mekânsal düzeni ve peyzaj ölçeğinde bağlantısallığı dikkate alınmalıdır. Türlerin uçuş menzili ve hareket kabiliyeti göz önünde

bulundurulmadan yapılan yerel müdahaleler, bazı *Bombus* türleri için etkisiz kalabilmekte veya beklenen koruma faydasını sağlayamamaktadır. Bu nedenle, habitat bağlantısallığı, tür-temelli müdahale tasarımının merkezi bileşenlerinden biri olarak ele alınmalıdır.

4.4. Tasarım İlkeleri: Tür-Temelli Müdahale Planlaması

Bombus türleri arasında gözlenen morfolojik, davranışsal ve demografik farklılıklar, tarım-çevre müdahalelerinin “tek tip” yaklaşımlarla uygulanmasının neden sınırlı etki yarattığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Güncel literatür, bu tür genelleyici uygulamaların bazı yaygın ve yüksek toleranslı türleri desteklerken, düşük koloni büyüklüğüne, sınırlı uçuş menziline veya uzmanlaşmış beslenme gereksinimlerine sahip türler açısından yetersiz kaldığını göstermektedir (Dennis & Gibbs, 2025; Mola & Williams, 2025).

Özellikle koloni büyüklüğü, türlerin çevresel baskılara karşı dayanıklılığını belirleyen temel bir “biyolojik tampon” mekanizmasıdır. Büyük koloniler oluşturan türler (*B. terrestris*, *B. impatiens*), kısa süreli kaynak dalgalanmalarını veya bireysel kayıpları tolere edebilirken; küçük kolonili türlerde birkaç işçi kaybı dahi koloni başarısını ciddi biçimde sınırlandırabilmektedir (Dennis & Gibbs, 2025). Bu durum, müdahale tasarımında yalnızca bolluk artışının değil, koloni düzeyinde sürdürülebilirliğin hedeflenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede, literatür bulgularına dayalı olarak aşağıdaki tür-temelli tasarım ilkeleri öne çıkmaktadır:

Fonksiyonel ve floral çeşitliliğin birlikte yönetimi

Tarım-çevre müdahalelerinde kullanılacak bitki karışımları, yalnızca çiçek sayısını artırmayı değil; farklı dil uzunluklarına, beslenme stratejilerine ve mevsimsel aktivite paternlerine sahip türleri birlikte desteklemeyi hedeflemelidir. Bu yaklaşım, topluluk içinde tepki çeşitliliğini (response diversity) artırarak, iklimsel ve çevresel dalgalanmalara karşı tozlaşma hizmetlerinin istikrarını güçlendirmektedir (Rogers ve ark., 2014; Winfree & Kremen, 2009; Hutchinson ve ark., 2022).

Türlere göre mekânsal ölçeklendirme

Yeni çalışmalar, *Bombus* türlerinin uçuş menzillerinin türler arasında büyük farklılıklar gösterdiğini ve bazı türlerin 10 km'nin üzerindeki mesafelerde kaynak kullandığını ortaya koymuştur (Rao & Strange, 2012; Mola & Williams, 2025). Bu bulgu, yalnızca yuva çevresine odaklanan lokal müdahalelerin, geniş hareket kabiliyetine sahip türler için yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla düşük mobiliteli türler için yerel yoğun kaynaklar, yüksek mobiliteli türler için ise peyzaj ölçeğinde dağıtılmış kaynak ağları birlikte planlanmalıdır.

Bağlantısal peyzaj tasarımı ve çok ölçekli dayanıklılık

Habitat bağlantısalılığı, yalnızca bireysel foraj başarısını değil, aynı zamanda çapraz-ölçekli dayanıklılığı (cross-scale resilience) da belirleyen temel bir unsurdur. Farklı türlerin habitat kaybına farklı mekânsal ölçeklerde tepki vermesi, ekosistem hizmetlerinin ani çöküşler yerine kademeli değişimler göstermesini sağlar (Winfrey & Kremen, 2009; Hutchinson ve ark., 2022). Bu nedenle, müdahaleler hem yerel (tarla kenarı, çiçek şeridi) hem de bölgesel (ekolojik koridorlar, yarı-doğal alan sürekliliği) ölçeklerde eş zamanlı olarak ele alınmalıdır.

Müdahale araçlarının tür-hedefli eşleştirilmesi

Tarım-çevre araçlarının tüm *Bombus* türleri üzerinde aynı etkiyi göstermediği artık açık biçimde ortaya konmuştur. Çiçek şeritleri ve dar alanlı yem bitkisi ekimleri kısa dilli ve lokal foraj yapan türler için daha etkiliyken, geniş ölçekli ve toplu çiçeklenen ürünler yüksek mobiliteli türleri destekleme potansiyeline sahiptir (Westphal ve ark., 2003; Rao & Strange, 2012). Bu nedenle müdahale tipleri, hedeflenen tür gruplarının ekolojik profilleriyle bilinçli biçimde eşleştirilmelidir.

Politika ve izleme ölçeği uyumu

Yeni literatür, koruma politikalarının çoğunlukla yanlış mekânsal ölçekte tasarlandığını ve bu durumun “politika-ekoloji uyumsuzluğu” yarattığını vurgulamaktadır (Mola & Williams, 2025). Tür-temelli planlama, yalnızca müdahale tasarımını değil, izleme protokollerini ve başarı ölçütlerini de kapsamalıdır. Standartlaştırılmış, uzun dönemli ve çok ölçekli izleme

yaklaşımları, müdahalelerin gerçek etkilerini ortaya koymak açısından zorunludur (Levenson ve ark., 2024).

Sonuç olarak, *Bombus* türlerinin farklı morfolojik, davranışsal ve demografik özellikleri, tarım-çevre müdahalelerine verdikleri tepkilerin büyük ölçüde değişmesine neden olmaktadır. Etkili koruma ve sürdürülebilir tarım planlaması, bu farklılıkları ikincil ayrıntılar olarak değil, müdahale tasarımının merkezî belirleyicileri olarak ele almak zorundadır. Tür-temelli planlama, yalnızca *Bombus* popülasyonlarının korunmasını değil, aynı zamanda tozlaşma hizmetlerinin uzun vadeli istikrarını ve tarımsal üretim sistemlerinin ekolojik dayanıklılığını güvence altına almaktadır.

5. TOZLAŞMA HİZMETİ VE TARIMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Tozlaşma, sürdürülebilir tarımın temel ekosistem hizmetlerinden biri olup, yalnızca tarımsal üretim miktarını değil; ürün kalitesini, genetik çeşitliliği ve agroekosistemlerin uzun vadeli dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda *Bombus* türleri, özellikle sera tarımı, meyvecilik ve yağlı tohum üretimi gibi yüksek katma değerli üretim sistemlerinde sağladıkları etkin tozlaşma hizmetleriyle tarımsal sürdürülebilirliğin ekolojik omurgasını oluşturan başlıca biyotik aktörler arasında yer almaktadır (Velthuis & Van Doorn, 2006; Bie ve ark., 2025).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, *Bombus* arılarının rolünün yalnızca “yardımcı bir tozlayıcı” olmaktan öte, bazı üretim sistemleri için ikame edilemez bir biyolojik girdi niteliği taşıdığını ortaya koymuştur. Özellikle sera domates yetiştiriciliğinde, küresel ölçekte kullanılan ticari *Bombus* kolonilerinin yaklaşık %95’inin bu ürün için kullanılması, *Bombus* türlerine olan yapısal bağımlılığı açık biçimde göstermektedir (Runnion, 2025; Huang ve ark., 2024).

5.1. Ürün Verimi, Kalite ve Ekonomik Katkı

Bombus arılarının tarımsal üretime katkısı, yalnızca verim artışıyla sınırlı değildir; meyve şekli, büyüklüğü, simetrisi ve tohum sayısı gibi kalite parametreleri üzerinde de belirleyici etkiye sahiptir. Seralarda yürütülen kontrollü çalışmalarda, *Bombus* ile tozlanan domates bitkilerinde, hormon uygulamalarına kıyasla daha yüksek meyve tutumu ve daha homojen ürün

kalitesi elde edildiği gösterilmiştir (Velthuis & Van Doorn, 2006; Huang ve ark., 2024). Kuzey Çin’de yürütülen çok yıllık bir çalışmada, *Bombus* tozlaşmasının cherry domates verimini ortalama %5,75 oranında artırdığı rapor edilmiştir (Huang ve ark., 2024).

Açık alan tarımında da benzer sonuçlar gözlemlenmektedir. Westphal ve ark. (2003), kolza tarlalarında yürüttükleri çalışmada, *Bombus* türlerinin yoğun ve etkili ziyaretleri sayesinde m² başına ortalama 23,2 birey düzeyinde tozlaşma sağlandığını bildirmiştir. Bu yoğunluk, özellikle toplu çiçeklenen ürünlerde *Bombus* türlerinin üretim sürecine olan katkısını nicel olarak ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, son literatür, tozlaşma hizmetlerinin ekonomik değerinin yalnızca *Bombus* bolluğuna indirgenemeyeceğini göstermektedir. Garratt ve ark. (2023), elma bahçelerinde yürüttükleri çalışmada, *Bombus* bolluğunun meyve tutumu ve tohum sayısını artırdığını; yalnız arıların (solitary bees) ise özellikle meyve kalitesi üzerinde daha belirgin etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu farklı katkı profilleri, tozlaşma hizmetlerinin tamamlayıcı tür etkileşimleri yoluyla ekonomik çıktılara dönüştüğünü ve hektar başına ölçülebilir gelir artışları (£/ha) sağladığını göstermektedir (Garratt ve ark., 2023; Breeze ve ark., 2016).

5.2. Ürün Türleri Arası Farklılıklar ve Tozlayıcıya Bağımlılık

Tozlaşma hizmetlerinin tarımsal üretim üzerindeki etkisi, ürün türüne göre büyük farklılıklar göstermektedir. Layek ve ark. (2023), farklı bitki gruplarının tozlayıcılara olan bağımlılığını karşılaştırdıkları çalışmada, Cucurbitaceae familyasına ait türlerin (kabakgiller) meyve ve tohum oluşumu açısından zorunlu biçimde tozlayıcılara bağımlı olduğunu; Brassicaceae ve Rutaceae üyelerinin ise yüksek düzeyde bağımlılık gösterdiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada dikkat çeken bir diğer bulgu, polen-ovül oranının, bitkilerin tozlayıcıya bağımlılığını belirleyen temel üreme özelliklerinden biri olduğudur. Düşük polen-ovül oranına sahip türlerin hem tozlayıcı eksikliğine daha duyarlı olduğu hem de üretim kaybı riskinin daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Layek ve ark., 2023). Bu durum, tüm ürün grupları için tek tip tozlaşma müdahalelerinin yeterli olmayacağını; ürüne özgü tozlaşma stratejilerinin geliştirilmesinin zorunlu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

5.3. Ekosistem Hizmetlerinin Sürekliliği, Dayanıklılık ve Politika Boyutu

Bombus ve diğer yaban arılarının sağladığı tozlaşma hizmetleri, yalnızca kısa vadeli üretim artışlarıyla değil, tarımsal sistemlerin uzun vadeli istikrarı ve ekosistem dayanıklılığıyla da doğrudan ilişkilidir. Bitki popülasyonlarının genetik çeşitliliği ve üreme başarısı, farklı tozlayıcı türlerin sürekliliğiyle güvence altına alınmaktadır (Kosior ve ark., 2007; Hutchinson ve ark., 2022).

Son çalışmalar, tozlaşma hizmetlerinin istikrarının, tür çeşitliliği ve topluluk yapısıyla yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Yüksek tür çeşitliliğine sahip tozlayıcı toplulukları, çevresel dalgalanmalara karşı daha dayanıklı olup, yıllar arası üretim varyansını azaltmaktadır (Rogers ve ark., 2014; Winfree & Kremen, 2009). Bu mekanizma, literatürde “tepki çeşitliliği (response diversity)” olarak tanımlanmakta ve sürdürülebilir tarımın sigorta mekanizması olarak değerlendirilmektedir (Hutchinson ve ark., 2022).

5.4. Tarımsal Sürdürülebilirlik ve Peyzaj Ölçeği Yaklaşımı

Bombus arılarının sunduğu tozlaşma hizmetlerinden etkin biçimde yararlanabilmek, yalnızca tarla veya parsel ölçeğinde yapılan müdahalelerle sınırlı kalmamalıdır. Westphal ve ark. (2003), tozlaşma süreçlerinin peyzaj ölçeğinde ele alınmasının gerekliliğini vurgulamış; özellikle toplu çiçeklenme dönemlerinin bölgesel planlamaya entegre edilmesinin önemine dikkat çekmiştir.

Yeni çalışmalar, Bombus türlerinin bazı durumlarda 10 km’nin üzerindeki mesafelerde kaynak kullanabildiğini ve bu nedenle yerel ölçekli habitat iyileştirmelerinin tek başına yeterli olmayabileceğini göstermektedir (Rao & Strange, 2012; Mola & Williams, 2025). Bu durum, tarım-çevre politikalarında sıklıkla gözlenen ölçek uyumsuzluğu sorununa işaret etmektedir.

Carvell ve ark. (2017), yüksek kaliteli ve bağlantılı habitatların, özellikle ilkbahar döneminde koloni soyunun devamlılığı açısından belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, tarımsal sürdürülebilirliğin yalnızca yıllık verim hedefleriyle değil, Bombus türlerinin çok yıllık yaşam döngüleri ve koloni dinamikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Özetle, Bombus arılarının sağladığı tozlaşma hizmetleri, tarımsal üretimin nicel artışının ötesinde, ürün kalitesi, ekonomik değer, ekosistem

dayanıklılığı ve uzun vadeli gıda güvenliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir tarım politikalarında *Bombus* türlerinin korunması ve desteklenmesi, çevresel bir tercih değil; stratejik ve ekonomik bir zorunluluk olarak ele alınmalıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu kitap bölümü, *Bombus* türlerinin tarımsal sistemlerdeki işlevsel rollerini, tarım-çevre müdahalelerine verdikleri tür-temelli tepkileri ve sundukları tozlaşma hizmetlerinin tarımsal sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini disiplinlerarası bir bakış açısıyla değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, *Bombus* arılarının yalnızca üretimi destekleyen yardımcı organizmalar olmadığını; aksine, modern tarım sistemlerinin ekolojik istikrarı, üretim sürekliliği ve ekonomik dayanıklılığı açısından kilit ve ikame edilemez aktörler olduğunu ortaya koymaktadır (Bie ve ark., 2025; Velthuis & Van Doorn, 2006; Carvell ve ark., 2017).

Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar, *Bombus* türlerinin sağladığı tozlaşma hizmetlerinin yalnızca kısa vadeli verim artışlarıyla sınırlı kalmadığını; tür çeşitliliği, tepki çeşitliliği ve ölçekler arası dayanıklılık mekanizmaları yoluyla tarımsal sistemlerin çevresel dalgalanmalara karşı direncini artırdığını göstermektedir (Hutchinson ve ark., 2022; Winfree & Kremen, 2009).

6.1. Tür-Temelli Müdahale Tasarımı Kaçınılmazdır

Bu çalışmanın temel sonuçlarından biri, tarım-çevre müdahalelerinin “tek tip” olarak uygulanmasının ekolojik ve işlevsel açıdan yetersiz olduğudur. *Bombus* türleri; dil uzunluğu, koloni büyüklüğü, uçuş menzili ve beslenme uzmanlığı gibi özellikler bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, müdahalelere verilen yanıtların da türler arasında ciddi biçimde değişmesine neden olmaktadır (Carvell ve ark., 2006; Walther-Hellwig & Frankl, 2000; Dennis & Gibbs, 2025).

Kısa dilli ve yüksek mobiliteye sahip türler (örneğin *B. terrestris*, *B. lapidarius*), geniş ölçekli ve geçici kaynaklardan faydalanabilirken; uzun dilli ve düşük mobiliteli türler (*B. muscorum*, *B. ruderatus*) daha dar alanlara, yüksek habitat sürekliliğine ve yuvalara yakın kaynaklara ihtiyaç duymaktadır.

Bu nedenle, etkili bir tarım-çevre stratejisi ancak tür-temelli planlama yaklaşımıyla mümkün olabilir.

Genelist ekolojik stratejilerin her koşulda koruyucu olduğu varsayımı da yanıltıcı olabilir. Nitekim tarihsel olarak geniş bir coğrafi dağılıma ve esnek kaynak kullanımına sahip olan *Bombus affinis*, yaşam alanlarının %75'ten fazlasının kaybı sonrasında hızlı ve dramatik bir nüfus çöküşü yaşamış ve nesli tehlike altına girmiştir. Bu durum, türlerin ekolojik esnekliğinin mutlak bir güvence sağlamadığını; belirli bir habitat kaybı eşiğinin aşılması durumunda, genelist stratejilerin dahi hızla işlevsiz hale geldiğini açık biçimde ortaya koymaktadır (Szymanski ve ark., 2016).

6.2. Zamansal Planlama ve Ürün Takvimi Kritik Rol Oynar

Son literatür, tozlaşma hizmetlerinin yalnızca mekânsal değil, zamansal olarak da hassas bir şekilde yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Riggi ve ark. (2024), erken sezonda çiçeklenen toplu ürünlerin polinatörleri geçici olarak bu alanlara çekerek doğal habitatlarda bolluk ve çeşitliliği azaltabildiğini; buna karşın geç sezon toplu çiçeklenmenin hem tarımsal hem doğal alanlarda *Bombus* bolluğunu artırdığını göstermiştir.

Benzer şekilde, sıralı çiçeklenme stratejileriyle sezon boyunca kaynak sürekliliğinin sağlanması, özellikle koloni kuruluşunun gerçekleştiği ilkbahar döneminde hayati öneme sahiptir (Rao & Stephen, 2010; Carvell ve ark., 2017). Bu bulgular, ürün deseninin yalnızca ekonomik değil, ekolojik takvim dikkate alınarak planlanması gerektiğini göstermektedir.

6.3. Ürüne Özgü Tozlaşma Stratejileri Geliştirilmelidir

Bu bölümde ulaşılan önemli sonuçlardan biri de, tüm tarım ürünlerinin tozlayıcılara olan bağımlılığının eşit olmadığıdır. Layek ve ark. (2023), ürünler arasındaki bu farklılığın temelinde üreme biyolojisi özelliklerinin (özellikle polen-ovül oranı) yattığını ortaya koymuştur. Düşük polen-ovül oranına sahip türlerde tozlayıcı eksikliği, doğrudan ve yüksek verim kaybına yol açmaktadır.

Bu durum, tarımsal sürdürülebilirlik için ürün-tozlayıcı-müdahale eşleştirmesi yapılmasının zorunlu olduğunu göstermektedir. *Bombus* türlerinin yoğun olarak kullanıldığı sera sistemleri, meyvecilik ve kabakgiller gibi yüksek bağımlılığa sahip ürünlerde, hedeflenmiş tozlaşma yönetimi stratejileri geliştirilmelidir.

6.4. Ekonomik Değerin Açık Biçimde Ortaya Konması Gereklidir

Son yıllarda yapılan çalışmalar, Bombus ve diğer yaban arılarının sunduğu tozlaşma hizmetlerinin doğrudan ekonomik çıktılara dönüştüğünü net biçimde ortaya koymuştur. Garratt ve ark. (2023), Bombus bolluğunun meyve tutumu ve tohum sayısını; yalnız arıların ise özellikle meyve kalitesini artırdığını ve bu etkilerin hektar başına ölçülebilir ekonomik kazançlara yansıdığını göstermiştir.

Ayrıca küresel ölçekte, tozlayıcıların tarımsal ekonomiye katkısının milyarlarca dolarla ifade edilmesi (Breeze ve ark., 2016), Bombus türlerinin korunmasının yalnızca çevresel değil, stratejik bir ekonomik yatırım olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

6.5. Peyzaj ve Politika Ölçeğinde Entegrasyon Şarttır

Bu kitap bölümünde sunulan bulgular, tarım-çevre müdahalelerinin yalnızca parsel veya tarla ölçeğinde ele alınmasının yetersiz olduğunu açıkça göstermektedir. Bombus türlerinin bazı durumlarda 10 km'nin üzerindeki mesafelerde kaynak kullandığı göz önüne alındığında, yerel ölçekli habitat iyileştirmeleri tek başına uzun vadeli başarı sağlamamaktadır (Rao & Strange, 2012; Mola & Williams, 2025).

Hedeflenmiş tarım-çevre programlarının Bombus popülasyonları üzerindeki etkinliği, yalnızca bolluk değil nüfus büyüklüğü açısından da doğrulanmıştır (Wood ve ark., 2015). Bu nedenle tarım politikaları, çok ölçekli (local-landscape-regional) bir planlama yaklaşımını benimsemelidir. Doğru hedeflenmiş ve sürekliliği olan tarım-çevre programlarının (AES), yoğun tarım yapılan alanlarda dahi yüksek koruma ve üretim faydaları sağlayabildiği gösterilmiştir (Carvell ve ark., 2015).

6.6. Yöntemsel Standartlar ve Uzun Dönem İzleme Zorunludur

Son olarak, bu çalışmada kullanılan ve literatürde tartışılan saha verilerinin güvenilirliği, büyük ölçüde örnekleme yöntemlerine bağlıdır. Leclercq ve ark. (2022), ağ ile yakalama ve pan tuzaklama yöntemlerinin farklı taksonomik ve fonksiyonel sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Levenson ve ark. (2024) ise meta-analizlerinde, örnekleme süresi, zamanlaması ve alan sayısının

bolluk ve tür zenginliği tahminlerini ciddi biçimde etkilediğini ortaya koymuştur.

Bu bulgular, Bombus ve diğer tozlayıcılar üzerine yapılacak çalışmalar için standardize edilmiş, uzun dönemli ve karşılaştırılabilir izleme protokollerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Genel Öneriler

1. Tarım-çevre müdahaleleri, Bombus türlerinin morfolojik ve davranışsal özelliklerine göre tür-temelli olarak tasarlanmalıdır.
2. Ürün desenleri, mevsimsel çiçeklenme takvimi ve koloni yaşam döngüleriyle uyumlu hale getirilmelidir.
3. Toplu çiçeklenme ürünleri, zamansal ve mekânsal etkileri dikkate alınarak peyzaj ölçeğinde planlanmalıdır.
4. Tarım politikaları, Bombus türlerinin korunmasını çevresel bir yük değil, ekonomik ve stratejik bir yatırım olarak ele almalıdır.
5. Tozlayıcı izleme çalışmaları için yöntemsel standartlar belirlenmeli ve uzun süreli veri setleri oluşturulmalıdır.

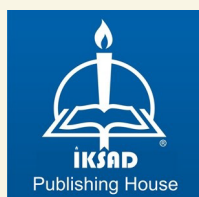
KAYNAKLAR

- Ahrné, K., Bengtsson, J., & Elmqvist, T. (2009). Bumble bees (*Bombus* spp) along a gradient of increasing urbanization. *PloS one*, 4(5), e5574. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005574>
- Archer, C. R., Schmid-Hempel, P., Schmid-Hempel, R., & Wilfert, L. (2025). Complex effects of climatic variation on bumblebee queen fitness. *J Anim Ecol.*, 94:2448-2460 <https://doi.org/10.1111/1365-2656.70140>
- Bie, M., Song, K., Dong, H., Zhao, W., Lin, H., Shi, D., & Liu, D. (2025). Advancing Sustainable Agriculture Through Bumblebee Pollination: Bibliometric Insights and Future Directions. *Sustainability*, 17(5), 2177.
- Breeze, T. D., Gallai, N., Garibaldi, L. A., & Li, X. S. (2016). Economic measures of pollination services: shortcomings and future directions. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(12), 927-939.
- Carvell, C., Bourke, A., Dreier, S., Freeman, S., Hulmes, S., Jordan, W. C., Sumner, S., Wang, J., & Heard, M. S. (2017). Bumblebee family lineage survival is enhanced in high-quality landscapes. *Nature*, 543, 547-549. <https://doi.org/10.1038/nature21709>
- Carvell, C., Bourke, A.F., Osborne, J.L., & Heard, M. (2015). Effects of an agri-environment scheme on bumblebee reproduction at local and landscape scales. *Basic and Applied Ecology*, 16, 519-530. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2015.05.006>
- Carvell, C., Meek, W. R., Pywell, R. F., Goulson, D., & Nowakowski, M. (2007). Comparing the efficacy of agri-environment schemes to enhance bumble bee abundance and diversity on arable field margins. *Journal of Applied Ecology*, 44(1), 29-40.
- Carvell, C., Meek, W., Pywell, R., Goulson, D., & Nowakowski, M. (2006). Comparing the efficacy of agri-environment schemes to enhance bumble bee abundance and diversity on arable field margins. *Journal of Applied Ecology*, 43(1), 1-9. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01249.x>
- Dennis, D. J., & Gibbs, A. J. (2025). The effect of neonicotinoids on bumblebees (*Bombus* spp.): a systematic review. *Frontiers in Bee Science*, 3, 1657493. <https://doi.org/10.3389/frbee.2025.1657493>

- Garratt, M. P. D., ve ark. (2023). Addressing pollination deficits in orchard crops through habitat management for wild pollinators. *Ecological Applications*, 33(2), e2687. <https://doi.org/10.1002/eap.2743>
- Hemberger, J., Crossley, M. S., & Gratton, C. (2021). Historical decrease in agricultural landscape diversity is associated with shifts in bumble bee species occurrence. *Ecology Letters*, 24(7), 1482-1493 <https://doi.org/10.1111/ele.13786>
- Huang X, Zhang Q, Sheikh UAA, Wang Y, Zheng L. Bumblebee Foraging Dynamics and Pollination Outcomes for Cherry Tomato and Pear Varieties in Northern China. *Insects*, 15(4):216. doi: <https://doi.org/10.3390/insects15040216>
- Hutchinson, L. A., Oliver, T. H., Breeze, T. D., Greenwell, M. P., Powney, G. D., & Garratt, M. P. (2022). Stability of crop pollinator occurrence is influenced by bee community composition. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 943309. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.943309>
- Kosior, A., Celary, W., Olejniczak, P., Fijał, J., Król, W., Solarz, W., & Pluciński, P. (2007). The decline of the bumble bees and cuckoo bees (Hymenoptera: Apidae: Bombini) of Western and Central Europe. *Oryx*, 41(1), 79-88. <https://doi.org/10.1017/S0030605307001597>
- Layek, U., Deka, B., Saha, S., & Kalita, M. C. (2023). Dependency of crops on pollinators and pollination deficits: An approach to measurement considering the influence of various reproductive traits. *Agriculture*, 13(5), 1047. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081563>
- Leclercq, N., ve ark. (2022). A comparative analysis of crop pollinator survey methods along a large-scale climatic gradient. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 333, 107961. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107871>
- Levenson, H. K., Carper, A. L., & Grab, H. (2024). Effects of study design parameters on estimates of bee abundance and richness in agroecosystems: A meta-analysis. *Annals of the Entomological Society of America*, 117(1), 1-15. <https://doi.org/10.1093/aesa/saae001>
- Mola, J. M., & Williams, N. M. (2025). Bumble bee movement ecology: foraging and dispersal across castes and life stages. *Annals of the Entomological Society of America*, 118(3), 175-188. <https://doi.org/10.1093/aesa/saaf010>

- Pywell, R. F., Warman, E. A., Hulmes, L., Hulmes, S., Nuttall, P., Sparks, T. H., ... & Sherwood, A. (2006). Effectiveness of new agri-environment schemes in providing foraging resources for bumblebees in intensively farmed landscapes. *Biological Conservation*, 129(2), 192-206.
- Rao, S., & Stephen, W. (2010). Abundance and diversity of native bumble bees associated with agricultural crops: The Willamette Valley experience. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2010, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2010/354072>
- Rao, S., & Strange, J. P. (2012). Bumble bee (Hymenoptera: Apidae) foraging distance and colony density associated with a late-season mass flowering crop. *Environmental entomology*, 41(4), 905-915. <https://doi.org/10.1603/EN11316>
- Riggi, L. G., Raderschall, C. A., Fijen, T. P. M., Scheper, J., Smith, H. G., Kleijn, D., ... & Lundin, O. (2024). Early-season mass-flowering crop cover dilutes wild bee abundance and species richness in temperate regions: A quantitative synthesis. *Journal of Applied Ecology*, 61(3), 452-464. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14566>.
- Rogers, S. R., Tarpy, D. R., & Burrack, H. J. (2014). Bee species diversity enhances productivity and stability in a perennial crop. *PloS one*, 9(5), e97307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097307>
- Runnion, E. N. (2025). *Effects of non-target pesticides and gut parasites on bumble bee health and pollination services*, Doctoral dissertation, The Ohio State University, USA.
- Siviter, H., Richman, S. K., & Muth, F. (2021). Field-realistic neonicotinoid exposure has sub-lethal effects on non-Apis bees: A meta-analysis. *Ecology letters*, 24(12), 2586-2597. <https://doi.org/10.1111/ele.13873>
- Szymanski, J., Smith, T., Horton, A., Parkin, M., Ragan, L., Masson, G., ... & Hill, L. (2016). Rusty Patched Bumble Bee (*Bombus affinis*) Species Status Assessment Final Report V1. https://learn.landscapepartnership.org/pluginfile.php/375/block_html/content/SSA_RustyPatchedBumbleBee_201606.pdf
- Velthuis, H. H., & Van Doorn, A. (2006). A century of advances in bumblebee domestication and the economic and environmental aspects of its commercialization for pollination. *Apidologie*, 37(4), 421-451. <https://doi.org/10.1051/apido:2006019>

- Walther-Hellwig, K., & Frankl, R. (2000). Foraging habitats and foraging distances of bumblebees, *Bombus* spp. (Hym., Apidae), in an agricultural landscape. *Journal of Applied Entomology*, 124(1-2), 299-306. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0418.2000.00484.x>
- Westphal, C., Steffan-Dewenter, I., & Tscharntke, T. (2003). Mass flowering crops enhance pollinator densities at a landscape scale. *Ecology Letters*, 6(11), 961-965. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00523.x>
- Winfree, R., & Kremen, C. (2009). Are ecosystem services stabilized by differences among species? A test using crop pollination. *Proceedings. Biological sciences*, 276(1655), 229-237. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.0709>
- Wood, T. J., Holland, J. M., Hughes, W. O., & Goulson, D. (2015). Targeted agri-environment schemes significantly improve the population size of common farmland bumblebee species. *Molecular ecology*, 24(8), 1668-1680. <https://doi.org/10.1111/mec.13144>



ISBN: 978-625-378-468-3