



Biyoinsektisitler ve Bal Arıları

Zihni Serbay SANDALCIOĞLU¹, Sibel BORAK^{*2}, Fazlı ÖZTÜRK³, Cengiz ERKAN²

¹Hakkari Üniversitesi, Çölemerik Meslek Yüksekokulu, Veterinerlik Bölümü, 30001, Hakkari, Türkiye

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootehni Bölümü, 65090, Van, Türkiye

³Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji, 65090, Van, Türkiye

Zihni Serbay SANDALCIOĞLU, ORCID No: [0000-0002-5960-1009](https://orcid.org/0000-0002-5960-1009), Sibel BORAK, ORCID No: [0009-0007-0069-6043](https://orcid.org/0009-0007-0069-6043), Fazlı ÖZTÜRK, ORCID No: [0000-0003-1728-7944](https://orcid.org/0000-0003-1728-7944), Cengiz ERKAN, ORCID No: [0000-0003-3510-2800](https://orcid.org/0000-0003-3510-2800)

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
Derleme Geliş: 12.12.2025 Kabul: 17.12.2025	Biyopestisitler, sürdürülebilir tarım uygulamalarında sentetik pestisitlere alternatif olarak giderek önem kazanan, doğal kökenli bileşikler veya mikroorganizmalardır. Kimyasal pestisitlerin bal arıları gibi hedef dışı tozlayıcılar üzerindeki olumsuz etkileri biyoinsektisitlere yönelimi hızlandırmıştır. Ancak biyopestisitlerin doğal olmaları, tamamen zararsız oldukları anlamına gelmemektedir. Bu derlemede, mikrobiyal ve botanik biyoinsektisitler genel tanımlamaları ile birlikte bal arıları üzerindeki letal ve subletal etkilerini ortaya koyan güncel bilimsel bulgular değerlendirilmiştir. Mikrobiyal biyoinsektisitlerden <i>Bacillus thuringiensis</i> (Bt) genellikle güvenli kabul edilse de bazı suş ve formülasyonların larval gelişim, uçuş performansı ve bağırsak mikrobiyotasında bozulmalara yol açabilmektedir. <i>Beauveria bassiana</i> ve <i>Metarhizium anisopliae</i> gibi entomopatojenik funguslar çoğunlukla düşük toksisite gösterse de yüksek dozlarda mortalite artışı veya davranışsal değişiklikler bildirilmiştir. Spinosad ise bal arıları için ciddi nörotoksik ve immün baskılayıcı etkiler oluşturabilmektedir. Botanik biyoinsektisitlerden azadirachtin başta olmak üzere bazı bileşiklerin larva dönemindeki gelişimini bozduğu, uçuş aktivitesini azalttığı veya yüksek dozlarda mortaliteye yol açtığı bildirilmiştir. Buna karşın bazı uçucu yağlar düşük toksisite profili sergilemektedir. Sonuç olarak biyoinsektisitlerin ekolojik açıdan daha güvenli seçenekler olduğu kabul edilse de arılar üzerindeki potansiyel risklerini ele alan yeni araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır.
Anahtar Kelimeler Biyopestisit Bal arısı (<i>Apis mellifera</i> L.) Subletal etki Mikrobiyal biyopestisit Botanik biyoinsektisit	
* Sorumlu Yazar brksibel.1439@gmail.com	

Bioinsecticides and Honey Bees

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Review Received : 12.12.2025 Accepted : 17.12.2025	Biopesticides, which are natural compounds or microorganisms, have been gaining increasing importance as alternatives to synthetic pesticides within sustainable agricultural practices. The adverse effects of chemical pesticides on non-target pollinators such as honey bees have accelerated the shift toward bioinsecticides. However, the fact that biopesticides are of natural origin does not imply that they are entirely harmless. This review evaluates current scientific findings that reveal

Keywords

Biopesticide
Honey bee (*Apis mellifera* L.)
Sublethal effects
Microbial biopesticide
Botanical bioinsecticide

*** Corresponding Author**

brksibel.1439@gmail.com

the lethal and sublethal effects of microbial and botanical bioinsecticides on honey bees, together with their general definitions. Among microbial bioinsecticides, *Bacillus thuringiensis* (Bt) is generally considered safe; nevertheless, certain strains and formulations can cause disruptions in larval development, flight performance, and gut microbiota. Entomopathogenic fungi such as *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* typically exhibit low toxicity, though increased mortality or behavioral alterations have been reported at high doses. In contrast, spinosad can induce pronounced neurotoxic and immunosuppressive effects in honey bees. Among botanical bioinsecticides, compounds such as azadirachtin have been reported to impair larval development, reduce flight activity, or cause mortality at elevated doses. Conversely, some essential oils exhibit low toxicity profiles. In conclusion, although bioinsecticides are generally regarded as more ecologically safe alternatives, further research addressing their potential risks to bees is needed.

Giriş

Bal arıları (*Apis mellifera* L.) ürünlerinin yanında bitkisel ürün miktarına ve kalitesine önemli katkıda bulunurlar (Libardoni ve ark., 2021). Yabani ve kültür bitkilerinin tozlaşmasındaki rolleri nedeniyle dünya çapında en değerli tozlayıcılar arasında kabul edilmektedirler (Carlesso ve ark., 2020; Cai ve Dimopoulos, 2025). Ancak son yıllarda küresel olarak gözlemlenen Koloni Çöküş Bozukluğu (CCD), arı popülasyonlarında endişe yaratan azalmalara neden olmaktadır. Gıda üretimi ve biyoçeşitlilik açısından önemli bir sorun olan (Santos ve ark., 2018; Libardoni ve ark., 2021; Araujo ve ark., 2023) bu azalma, CCD ile birlikte habitat bozulması, bal arısı hastalık ve zararlılarının artan baskısı, iklim değişikliği ve bitkisel üretim amaçlı kimyasalların yoğun kullanımı gibi çok sayıda stres faktörüne bağlanmaktadır (Santos ve ark., 2018; Araujo ve ark., 2023).

Genel anlamda bitkisel üretimin artırılması amaçlı sentetik pestisitlerin yaygın olarak kullanılması, tozlaştırıcılar gibi hedef dışı organizmalar üzerindeki olumsuz etkiler yaratmakta, bu ise ciddi kaygılara neden olmaktadır (Santos ve ark., 2018; Catania ve ark., 2023). Bazı kimyasal insektisitlerin ölümcül olmasalar da organizmalara zarar veren dozlarının (subletal) arıların yön bulma, öğrenme ve hafıza yeteneklerini bozarak önemli hasarlara yol açabildiği ve bu durumun koloninin zayıflamasına veya sönmesine neden olabileceği bilinmektedir (Santos ve ark., 2018; Libardoni ve ark., 2021; Araujo ve ark., 2023; Tullah ve ark., 2023). Ayrıca kimyasal orijinli pestisitlerin gıdalarda kalıntı bırakabiliyor ve çevreye zarar verebiliyor olması yönündeki artan toplumsal baskılar üreticilerin daha sürdürülebilir tarım uygulamalarına yönelmesine yol açmış; böylece biyopestisitlere yönelimi hızlandırmıştır (Santos ve ark., 2018; Ayılara ve ark., 2023; Catania ve ark., 2023).

Biyopestisitler, bitki ve mikroorganizmalar (bakteri, fungus, virüs) gibi doğal kaynaklardan elde edilen ve genellikle geleneksel kimyasal pestisitlere oranla hedef organizmalara yönelik daha spesifik etki, çevreye daha az kalıcılık ve daha düşük toksisite sunan ürünler olarak tanımlanmaktadır (Oguh ve ark., 2019; Ayılara ve ark., 2023; Catania ve ark., 2023; Tadesse Mawcha ve ark., 2024; Cai ve Dimopoulos, 2025). Bu özellikleri biyopestisitleri bitkisel üretimde zararlılar ile mücadelede dikkate değer bir alternatif haline getirmektedir (Santos ve ark., 2018; Cai ve Dimopoulos, 2025). Bununla birlikte, doğal kökenli olmalarına rağmen biyopestisitlerin toksisitelerinin her zaman düşük olduğu söylemek mümkün

değildir. Ayrıca bal arıları üzerindeki potansiyel etkileri konusunda da çalışma sayısı oldukça sınırlıdır (Santos ve ark., 2018; Araujo ve ark., 2023; Catania ve ark., 2023).

Yaygın olarak kullanılan mikrobiyal biyoinsektisitlerden *Beauveria bassiana*'nın, bal arıları için yüksek ölüm riski yaratmadığı düşünülmekle birlikte öğrenme performansı başta olmak üzere hafızaya yönelik bazı özelliklerini olumsuz etkilediği bilinmektedir (Carlesso ve ark., 2020; Catania ve ark., 2023). Benzer şekilde, toprakta yaşayan bir bakteri olan *Saccharopolyspora spinosa* tarafından üretilen ve doğal bir ajan olan spinosad arılarda nörotoksik etkilere ve hücrel bağışıklık sisteminde bozulmalara neden olabilmektedir (Araujo ve ark., 2023).

Biyoinsektisitler özelinde, biyopestisitlerin genel karakteristikleri ve etki mekanizmaları gibi temel bilgileri konu alan bu çalışmada, bal arıları ile ilişkili şekilde letal ve subletal etkilerine dair bilimsel bulgular değerlendirilerek sürdürülebilirlikleri ile tozlayıcıların korunması arasındaki hassas dengeye dikkat çekilecektir.

Biyopestisit Kavramı

Doğal kaynaklardan elde edilmiş biyopestisitler bitki koruma ürünleridir ve tarımsal uygulamalarda sentetik kimyasallara oranla daha doğa dostu çözümler sunmaktadır (Ayılara ve ark., 2023; Shamsuddeen ve ark., 2024).

Biyopestisitlerin temel avantajları

Biyopestisitlerin ekolojik, sağlık ve ekonomik açılardan birtakım avantajları bulunmaktadır.

Biyopestisitler doğada hızla parçalanabilen yapıda olmalarının yanında kimyasal pestisitlerden farklı olarak çevre kirliliğine neden olmazlar (Eze ve ark., 2016; Mascarin ve Jaronski, 2016; Oguh ve ark., 2019; Jena ve Sahoo, 2022; Ayılara ve ark., 2023; Shamsuddeen ve ark., 2024). Ayrıca, genel anlamda hedef dışı organizmalara ve doğal yaşama daha az zarar verirler (Kumar, 2012; Eze ve ark., 2016; Ndolo ve ark., 2019; Jena ve Sahoo, 2022; Ayılara ve ark., 2023; Shamsuddeen ve ark., 2024; Cai ve Dimopoulos, 2025). Uygulama sonrasında toprak, su veya bitkilerde daha az kalıcılık göstererek gıdalarda kimyasal kalıntı riskini azaltan biyopestisitler (Kumar, 2012; Popp ve ark., 2013; Mascarin ve Jaronski, 2016; Ndolo ve ark., 2019; Oguh ve ark., 2019; Ayılara ve ark., 2023; Catania ve ark., 2023; Cai ve Dimopoulos, 2025), bitkisel üretimde ekolojiye yansımaları olası olumsuz etkileri azaltma potansiyelleri ile bilinmektedirler (Eze ve ark., 2016; Ayılara ve ark., 2023; Cai ve Dimopoulos, 2025).

Biyopestisitlerin bir çoğu kimyasal pestisitlerden farklı olarak sadece bir zararlı türünü veya yakın grubu hedef alırlar (Gupta ve Diskshit, 2010; Eze ve ark., 2016; Jena ve Sahoo, 2022; Ayılara ve ark., 2023). Böylece bal arıları gibi diğer canlıların zarar görmesi önlenmiş olur (Kumar, 2012; Eze ve ark., 2016; Jena ve Sahoo, 2022; Shamsuddeen ve ark., 2024; Tadesse Mawcha ve ark., 2024). Biyopestisitler, diğer taraftan, zararlıların sentetik pestisitlere karşı direnç geliştirme sürecini yavaşlatmalarına da katkı sağlamaktadır (Gupta ve Diskshit, 2010; Eze ve ark., 2016; Mascarin ve Jaronski, 2016; Oguh ve ark., 2019; Daraban ve ark., 2023).

Biyopestisitlerin geleneksel pestisitlere göre geliştirme ve ruhsatlandırma maliyetleri daha düşüktür. Bunun yanı sıra ruhsatlandırma aşamaları genellikle 3–5 yıl sürerken sentetik pestisitlerde bu süre 10 yıldan fazla olabilmektedir (Mascarin ve Jaronski, 2016; Jena ve Sahoo,

2022; Daraban ve ark., 2023). Ayrıca, doğal kökenli olmaları nedeniyle kolayca temin edilebilmektedirler ve üreticiler tarafından basit yöntemlerle hazırlanabilmeleri mümkündür (Eze ve ark., 2016; Oguh ve ark., 2019; Ayılara ve ark., 2023). Organik tarım uygulamalarında da kullanıma onaylı olmaları (Kumar, 2012; Eze ve ark., 2016) ve hasat dönemine yakın, çok kısa aralıklarla uygulanabilmeleri, özellikle sebze ve meyve gibi ürünler için önemli bir esneklik sağlamaktadır (Kumar, 2012; Oguh ve ark., 2019; Shamsuddeen ve ark., 2024).

Biyopestisitlerin kullanımı sınırlandıran faktörler ve temel riskler

Biyopestisitlerin yaygın olarak kabul görülmesini engelleyen ve kullanımda dikkat edilmesi gereken bazı kısıtlayıcı durumlar bulunmaktadır.

Biyopestisitler, kimyasal pestisitlere oranla genel anlamda daha yavaş bir etki hızına sahiptir ve yoğun zararlı salgınlarında yetersiz kalabilmektedirler (Eze ve ark., 2016; Jena ve Sahoo, 2022; Rad ve ark., 2022; Ayılara ve ark., 2023; Daraban ve ark., 2023; Tadesse Mawcha ve ark., 2024). Ayrıca etkinliklerinde belirsizlikler gözlenebilmekte ve bu etkinlikleri özellikle sıcaklık, nem ve UV radyasyonu gibi çevresel koşullara göre değişkenlik gösterebilmektedir (Mishra ve ark., 2015; Oguh ve ark., 2019; Ayılara ve ark., 2023; Tadesse Mawcha ve ark., 2024). Hedef organizma dışındaki zararlılara karşı yetersiz kalmalarından dolayı (Jena ve Sahoo, 2022; Ayılara ve ark., 2023) da birden fazla zararlının bulunması durumunda genellikle diğer mücadele yöntemleriyle birlikte kullanılması gerekebilmektedir (Jena ve Sahoo, 2022).

Biyopestisitlerin canlı organizmalar içermeleri nedeniyle raf ömürleri kısadır ve depolama ve nakliye sırasında özel sıcaklık ve nem koşulları gerekebilmektedir (Mascarin ve Jaronski, 2016; Oguh ve ark., 2019; Jena ve Sahoo, 2022; Ayılara ve ark., 2023; Tadesse Mawcha ve ark., 2024). Ayrıca yüksek maliyetli olmaları, küçük ölçekli üreticilerin bu ürünleri benimsemesini zorlaştırmaktadır (Eze ve ark., 2016; Oguh ve ark., 2019; Rad ve ark., 2022; Ayılara ve ark., 2023; Daraban ve ark., 2023; Tadesse Mawcha ve ark., 2024). Diğer taraftan ticari ürünlerin bulunabilirliği ve kalitesi konusunda da güven eksikliği bulunmaktadır (Mascarin ve Jaronski, 2016; Ayılara ve ark., 2023).

Her ne kadar biyopestisitler genel olarak güvenli kabul edilse de bazıları (örneğin *Beauveria bassiana* veya spinosad gibi mikrobiyaller ile azadiraktin gibi botanikler) hedef dışı organizmalar üzerinde olumsuz etkiler gösterebilmektedir (Araujo ve ark., 2023; Catania ve ark., 2023; Daraban ve ark., 2023; Cai ve Dimopoulos, 2025). Özellikle bal arıları üzerinde yapılan çalışmalar biyopestisitlere maruz kalmanın subletal etkilere yol açabileceğini ortaya koymaktadır (Carlesso ve ark., 2020; Araujo ve ark., 2023; Catania ve ark., 2023). Yine bazı botanik pestisitlerin (örneğin rotenon veya nikotin) memeliler veya balıklar gibi diğer hedef dışı canlılar için hala yüksek derecede toksik olabileceği düşünülmektedir (Oguh ve ark., 2019; Catania ve ark., 2023).

Biyoinsektistler

Biyopestisitler, zararlı organizmaları kontrol etmek amacıyla doğal kaynaklardan (hayvanlar, bitkiler, mikroorganizmalar veya belirli mineraller gibi) üretilmiş bileşikler veya ajanlar (Gupta ve Diskshit, 2010; Eze ve ark., 2016; Oguh ve ark., 2019; Balcı ve Durmuşoğlu, 2020; Ayılara ve ark., 2023; Daraban ve ark., 2023; Shamsuddeen ve ark., 2024; Tadesse Mawcha ve ark., 2024) biyoinsektisitler genel biyopestisit kategorisinin, özellikle böcek zararlılarını hedef alan bir alt grubudur (Gupta ve Diskshit, 2010; Balcı ve Durmuşoğlu,

2020).

Tarımsal zararlılarla mücadelede doğal ajanların ve ürünlerin kullanımına olan ilginin antik çağlara kadar uzanmasına rağmen 19. yüzyılda mikrobiyal bilimin ilerlemesiyle biyoinsektisitlerin gelişimi hız kazanmıştır.

Antik Sümer’de M.Ö. 4500’lerde, zararlı mücadelesinde saf kükürt tozu kullandıklarına ve M.Ö. 1000’li yıllarda bit, pire ve eşek arılarına karşı insektisit hazırlıklarına dair kayıtlar pestisit kullanımının oldukça erken dönemlere dayandığını göstermektedir (Kekillioğlu ve Bıçak, 2020; Tullah ve ark., 2023). Daha yakın dönemlerdeki belgelerde ise 17. yüzyılda bitki özlerinin kullanımının yaygınlaştığı ve nikotin erik böceklerini kontrol etmek amacıyla uygulandığı (Eze ve ark., 2016; Shamsuddeen ve ark., 2024), 19. yüzyılda ise krizantemden elde edilen piretrum ve tropikal sebzelerin köklerinden elde edilen rotenon doğal pestisit olarak uygulandığı ortaya çıkmaktadır (Eze ve ark., 2016; Kekillioğlu ve Bıçak, 2020).

Mikrobiyal kontrol, zararlı böceklerin hastalıklarla mücadele edilebileceği fikri üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşımın temelini 1835 yılında atan Agostino Bassi, *Beauveria bassiana* mantarının ipekböceği hastalıklarını kontrol etmekte kullanılabileceğini göstermiştir (Lord, 2005; Eze ve ark., 2016). Daha sonra, 1879–1884 yılları arasında Elie Metchnikoff, tahıl böceği üzerinde *Metarhizium anisopliae* hastalığını tanımlamış ve öğrencisi Isaak Krassiltschik, bu mantarın ilk endüstriyel üretimini başlatmıştır. Ardından, 1888 civarında ABD’de yapılan saha uygulamaları ile *B. bassiana*, kertenkele böceklerinin kontrolünde başarılı bir şekilde kullanılmıştır (Lord, 2005).

Bacillus thuringiensis (Bt) 1901 yılında ipekböceğinde bir hastalık etkeni olarak keşfedilmiş ve 1938 yılında Bt’ye dayalı ilk ticari ürün piyasaya sürülmüştür (Ağar ve ark., 1991; Lord, 2005; Mishra ve ark., 2015). 1916–1948 yılları arasında yürütülen bir program kapsamında, Bt ve *Bacillus popilliae* ile birlikte entomopatojenik nematodlar (*Steinernema glaseri*) kullanılarak zararlılar kontrol altına alınmaya çalışılmıştır. O dönemde etkinliği ile öne çıkan Bt ürünleri kısa sürede mikrobiyal kontrol pazarının büyük bir kısmını ele geçirmiştir (Lord, 2005; Mishra ve ark., 2015). Sıralanan gelişmeler ile birlikte 1962 yılında Rachel Carson tarafından hazırlanan eser (Silent Spring), kimyasal pestisitlerin çevresel zararlarına dikkat çekmiş; bu da biyoinsektisitlere olan ilgiyi artırmıştır (Mishra ve ark., 2015; Daraban ve ark., 2023). Daha sonraları ABD Çevre Koruma Ajansı (U.S. Environmental Protection Agency-EPA) 1994 yılında biyopestisitlerin geliştirilmesini teşvik etmek amacıyla ilgili birimlerini kurmuş ve 1995’ten itibaren genetik materyal içeren bitkiye aktarılmış koruyucuları (Plant-Incorporated Protectants -PIPs) biyopestisit olarak tescillemiştir (Hurley, 2015; Balcı ve Durmuşoğlu, 2020; Daraban ve ark., 2023). 1990’lardan itibaren *Beauveria bassiana* ve botanik kaynaklı insektisitler (örneğin azadiraktin) yaygınlaşmış ve biyopestisit pazarı hızla büyümüştür (Al-Mazra’Awi ve ark., 2007; Mishra ve ark., 2015; Catania ve ark., 2023).

Biyoinsektisitlerin etki mekanizmaları

Bitkisel üretimdeki zararlılara karşı koymak için türlere özgü yollarla etki gösteren doğal kaynaklı bileşikler veya ajanlar olan biyoinsektisitlerin etki mekanizmaları genel anlamda biyokimyasal süreçlere müdahale, fiziksel enfeksiyon ve sinir sistemi üzerindeki spesifik eylemleri içermektedir (Tadesse Mawcha ve ark., 2024).

Mikrobiyal biyopestisitlerden bakteriyel olanlarına en iyi örneklerinden bir Bt, sporlanma sırasında böcek öldürücü kristal proteinler (özellikle delta-endotoksinler veya Cry

proteinleri) üreten bir entomopatojenik bakteridir (Mishra ve ark., 2015; Tadesse Mawcha ve ark., 2024). Larva tarafından yutulduktan sonra ürettiği proteinler zararlının orta bağırsağının alkali ortamında çözünür ve aktif hale geçerek (Libardoni ve ark., 2021; Ayilara ve ark., 2023; Tadesse Mawcha ve ark., 2024) bağırsak duvarındaki spesifik reseptörlere bağlanır (Tadesse Mawcha ve ark., 2024). Bu bağlanma, iyon dengesizliğine yol açan gözeneklerin oluşmasına neden olarak sindirim kanalının zarar görmesine ve zamanla da felce, sepsisemiye ve sonunda zararlının açlıktan ölüme neden olur (Libardoni ve ark., 2021; Ayilara ve ark., 2023; Daraban ve ark., 2023; Tadesse Mawcha ve ark., 2024). Toksisite, Cry proteininin böcek bağırsağı reseptörüne bağlanma şekline göre belirlenir (Kumar, 2012). Bt ile enfekte olan zararlı böcekler beslenmeyi durdururlar (Tadesse Mawcha ve ark., 2024).

Çoğunlukla temas patojenleri olarak işlev gören entomopatojenik fungusların böcekler tarafından yutulmaları gerekli değildir (Mascarin ve Jaronski, 2016). Fungusun sporları böceğin dış kütikülüne yapışırlar (Mascarin ve Jaronski, 2016; Ayilara ve ark., 2023). Buralarda sporlar filizlenir ve kütikülü fiziksel olarak delerek içine giren mikroskobik tüpler meydana gelir. Bu sırada kütikülü parçalamak için proteazlar ve kitinazlar gibi hidrolitik enzimler ve toksinler salgılanır (Ayilara ve ark., 2023; Tadesse Mawcha ve ark., 2024). Etken, böcek vücudunun içine yayılarak çoğalır. Sonuçta bağışıklık sistemi baskılanan zararlının iç dokuları tahrip olur (Mascarin ve Jaronski, 2016; Ayilara ve ark., 2023).

Viral biyoinsektisitlerin etki mekanizması, virüs partiküllerini taşıyan protein esaslı oklüzyon cisimciklerinin zararlı larvalar tarafından alınmasına dayanır. Larvanın alkali pH'a sahip orta bağırsağında bu protein kapsül çözünerek virüsleri serbest bırakır ve enfeksiyon süreci başlar. Serbest kalan virüsler orta bağırsak hücrelerini enfekte ederek çoğalırlar. Enfeksiyonun son aşamasında konak larva sıvılaşır ve virüs diğer böcekleri enfekte etmek üzere çevreye yayılır (Tadesse Mawcha ve ark., 2024).

Böcekleri karbondioksit, titreşim ve kimyasal sinyaller yoluyla bulan enfektif juvenil nematodları ise böceğin ağız, anüs veya solunum delikleri gibi doğal açıklıklarından içeri girerler. Vücut boşluğuna girdiklerinde de bağırsaklarından toksin üreten simbiyotik bakterileri serbest bırakarak böceğin iç organlarının sıvılaşmasına ve genellikle 24-48 saat içinde ölümüne neden olurlar (Tadesse Mawcha ve ark., 2024).

Mikrobiyal biyoinsektisitlerden farklı olarak bitkilerden elde edilen biyokimyasal ve botanik biyoinsektisitler, genellikle hedef böceğin sinir, hormonal veya metabolik sistemlerine müdahale eden aktif maddeler içermektedirler

Nörotoksinlerin iyi bir örneği olan nikotin, sinir sinapslarında asetilkolin ile rekabet ederek kontrolsüz sinir uyarımına neden olan bir sinaptik zehir olarak işlev görmektedir. Diğer bir örnek olan piretrinler ise böceğin sinir sistemine saldırarak tekrarlanan ve uzun süreli sinir deşarjlarına neden olurlar. Bu durum da hızlı bir felç etkisiyle sonuçlanmaktadır (Oguh ve ark., 2019; Catania ve ark., 2023).

Bazı tropikal ve subtropikal bitkilerin kök ve tohumlarından izole edilen botanik biyoinsektisitlerden retonon, yutulduktan sonra böcekte etkili olan bir mitokondri zehridir. Elektron taşıma sistemindeki (Electron transport system - ETS) Kompleks I'i inhibe ederek ATP sentezini ve enerji üretimini engelleyerek felce ve ölüme yol açmaktadır (Oguh ve ark., 2019).

Hint leylağı (*Azadirachta indica* - Neem ağacı) bitkisinden elde edilen ve limonoidler sınıfına ait bir biyopestisit aktif maddesi olan azadirachtin (Oguh ve ark., 2019; Catania ve ark., 2023; Daraban ve ark., 2023) ise erginleşmemiş böceklerde deri değiştirme hormonlarının

(ekdisteroidler) sentezini ve salınımını bloke etmektedir. Böylece eksik deri değişimine ve erginlerde kısırlığa neden olan azadirachtin aynı zamanda beslenmeyi engelleyici güçlü bir etkiye de sahiptir (Oguh ve ark., 2019; Catania ve ark., 2023).

Biyoinsektisitlerin Arılar Üzerine Etkileri

Biyoinsektisitler sentetik yapıdaki alternatiflerine oranla daha spesifik etki mekanizmalarına sahip olmaları nedeniyle genellikle hedef dışı organizmalar için daha düşük risk taşımaktadırlar. Bununla birlikte, bal arıları başta olmak üzere tozlayıcılara olası olumsuz etkilerinden dolayı kullanımları sırasında dikkatli olunması gerekmektedir (Santos ve ark., 2018).

Mikrobiyal biyoinsektisitlerin arılar üzerine etkileri

Zararlılarla mücadele etmek için bakteri, fungus, virüs, protozoa ve nematod gibi mikroorganizmalardan elde edilen mikrobiyal biyoinsektisitler (Azizoğlu ve ark., 2012; Ayılara ve ark., 2023; Tadesse Mawcha ve ark., 2024), genellikle sentetik pestisitlere göre daha çevre dostu ve hedef türe özgü olarak kabul edilmelerine rağmen bazı tür ve formülasyonların bal arıları ve diğer tozlayıcılar üzerinde önemli subletal etkilere sahip olabilmektedirler.

Bakteriyel biyoinsektisitlerin en yaygın kullanılanı Bt, genellikle bal arıları için güvenli kabul edilmektedir (Soni ve Thakur, 2011; Libardoni ve ark., 2021). Ancak, Bt'nin özellikle larval dönemde ve bağırsak mikrobiyomunda yarattığı etkiler, bu genel kanının karmaşık olduğunu göstermektedir.

Ticari bir *Bacillus thuringiensis* subsp. *aizawai* 'e (ABTS-1857 suşu) kovan içine verilen besin yoluyla maruz kalan bal arılarında, kontrol grubuna oranla yavru üretiminde belirgin bir azalma gözlenmiş, bu durum Bt ürününün larval gelişimini engellediği şeklinde yorumlanmıştır. Genç işçi arıların bağırsak mikrobiyomunda dengesizlik de aynı çalışmanın sonuçları arasında yer almaktadır. Bu durum da Bt sporlarının arıların sindirim sisteminde yoğun bir şekilde bulunduğunu gösteren ölçümlerle desteklenmiştir (Steinigeweg ve ark., 2021).

Farklı bir ticari Bt ürünü olan Xentari (*B.t.* var. *aizawai*) ile yürütülen araştırmada ise genç işçi arıların uçuş yeteneklerinde azalma belirlenmiş, bu durumun da polen ve nektar toplama verimliliğini düşürerek koloni gelişimini olumsuz etkileyebileceğini ifade edilmiştir. Bununla birlikte aynı çalışmada Bt'in Dipel ve Xentari gibi ticari formülasyonların besin yoluyla alındığında genç ve tarlacı işçi arılarının yaşam sürelerini, yürüme hızını, kat edilen mesafeyi veya dinlenme sürelerini etkilemediği gözlemlenmiştir (Libardoni ve ark., 2021).

Entomopatojenik funguslar, geniş konukçu aralıklarına sahip olmalarına rağmen bal arıları için çoğunlukla güvenli kabul edilirler. Bununla birlikte hafıza ve davranışsal etkileri dikkate alınmalıdır.

B. bassiana'nın bal arılarında koloni sağlığı üzerine etkisini de konu alan çalışmalarda maruziyetin koloni gelişim hızı, toplam yetişkin arı ağırlığı, kapalı yavru veya bal miktarları etkilenmediği orta çıkmıştır (Meikle ve ark., 2008; Soni ve Thakur, 2011). Bununla birlikte yüksek dozların yetişkin işçi arıların yaşam süresini azalttığı ve yavru üzerinde ölüm oranını artırdığını gözlemleyen çalışmalar bulunmaktadır (Soni ve Thakur, 2011; Carlesso ve ark., 2020).

Hafıza ve davranışsal etkiler bakımından yapılan değerlendirmeler sonunda fungusa (*B.*

bassiana) maruz kalan arıların metabolik değişikliklerle açıklanamayan, gelişmiş bir sakkaroz tepkisi gösterdiği belirlenen araştırma sonunda, maruziyetin orta veya uzun vadeli bellek performansını olumlu veya olumsuz yönde etkilemediği de belirtilmiştir (Carlesso ve ark., 2020).

Verticillium lecanii (*Lecanicillium lecanii*) ve *Metarhizium anisopliae* gibi entomopatojenik fungusların değerlendirme konusu yapılan araştırma sonunda *V. lecanii*, kafeslenmiş işçi arılarda kontrollere kıyasla daha lethal etki göstermiş (LT₅₀ değeri daha düşüktür), *M. anisopliae*'ın ise arılar üzerinde mortaliteye neden olmadığı, bu durumun kullanılan izolatın türüne bağlı olabileceği ifade edilmiştir (Soni ve Thakur, 2011).

Saccharopolyspora spinosa bakterisinin doğal metabolitlerinden elde edilen spinosad, biyoinsektisit olmasına rağmen arılar üzerinde ciddi toksik etkiler gösterebilmektedir.

Spinosad esas alınarak yürütülen bir çalışmada bal arılarının hayatta kalma oranını ve yiyecek tüketiminin düştüğü ve uçuş kapasitelerinin önemli ölçüde azaldığı ortaya çıkmıştır. Aynı çalışmada spinosad, arıların hücrel bağışıklık sistemi olan toplam hemolenf hücresi sayısını ve granülosit sayısını da azaltarak bağışıklık tepkisini ciddi şekilde etkilemiştir (Araujo ve ark., 2023).

Biyokimyasal ve botanik biyoinsektisitlerin arılar üzerine etkileri

Botanik biyopestisitler, yüksek seçicilikleri ve çevrede kısa süre kalmaları nedeniyle tarımsal zararlılarla mücadelede sentetik alternatiflere karşı potansiyel bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Oguh ve ark., 2019; Catania ve ark., 2023). Bununla birlikte söz konusu ürünlerin bal arıları (*Apis mellifera* L.), bombus arıları (*Bombus* spp.) ve iğnesiz arılar (Meliponini) gibi tozlayıcılar üzerindeki etkileri üzerine çalışma sayısı oldukça sınırlıdır (Catania ve ark., 2023).

Arılar üzerindeki etkisi en fazla çalışılan botanik biyoinsektisitlerden biri azadiraktindir. Çalışmalar, azadiraktin ile beslenen arı larvalarında malformasyonlar ve yaşama oranında azalma olduğunu göstermiştir. Azadiraktin, özellikle yüksek dozlarda uygulandığında, larva ve ergin bal arılarında yüksek mortaliteye neden olabilmekte, uçuş yeteneğini ve yürüme aktivitesini bozabilmekte; bazı formülasyonları da kışlama başarısını azaltabilmektedir (Catania ve ark., 2023).

Uçucu yağların toksisitesi ise büyük ölçüde değişim gösterse de sentetik pestisitlere göre daha güvenli kabul edilmektedir ve genellikle akut mortalite riskleri daha düşüktür (Santos ve ark., 2018; Catania ve ark., 2023).

Araştırmalar *Cymbopogon martinii* ve geraniol, bal arıları için neonicotinoidlere göre çok daha az toksik olduğunu ifade eden araştırmalar, subletal dozlarının, arıların bağışıklık tepkilerini, bireysel ve toplu davranışlarını (besin aktarımı ve tımar etme davranışı) veya oral maruziyette çevreyi tanıma uçuşlarını önemli ölçüde etkilemediği göstermiştir (Santos ve ark., 2018; Catania ve ark., 2023). Bununla birlikte uçucu yağların ağız yoluyla alınması durumunda -genellikle güvenli olsa da- kontakt maruziyette hareket yeteneği ve kat edilen mesafede azalma gözlenmiştir; ancak bu olumsuz etki 24 saat sonra azalmıştır (Santos ve ark., 2018). Diğer taraftan bazı uçucu yağların (özellikle yüksek dozlarda) daha zararlı etkinin olabileceği dikkate alınmalıdır.

Botanik biyopestisitleri konu alan bir çalışmada, kekik (*Thymus vulgaris*) ve keklikotu (*Origanum vulgare*) yağlarının bal arılarında ve iğnesiz arılarda (*Trigona hyalinata*) mortaliteyi

artırdığı, hareketliliği ise azalttığı yönünde belirlemeler bulunmaktadır (Catania ve ark., 2023).

Alkaloidler ve piretrinler doğada sentetik pestisitlere benzer nörotoksik etkiler gösteren bileşikler içermektedirler. Tütün (*Nicotiana tabacum*) ekstrelerinden elde edilen nikotin bal arıları için yüksek derecede toksik olduğu ifade edilmektedir. Krizantemden (*Chrysanthemum cinerariifolium*) elde edilen piretrinlerin ise bal arıları üzerindeki etkisi karışık sonuçlar göstermekte, araştırmaların bazılarında düşük toksisite bildirilirken bazıları yüksek toksisite üzerinde durmuştur (Catania ve ark., 2023).

Sonuç

Biyoinsektisitler, bitkisel üretimde zararlı kontrolüne yönelik çevre dostu, seçici ve sürdürülebilir seçenekler olarak öne çıkmakla birlikte bal arıları başta olmak üzere tozlayıcılar üzerindeki etkilerinin dikkatle değerlendirilmesi gereken biyolojik ajanlardır. Sentetik insektisitlerin oluşturduğu çevresel baskı ve tozlayıcı kayıplarına ilişkin küresel kaygılar, biyopestisitlere yönelimi artırmış olmakla birlikte mevcut bulgular biyoinsektisitlerin tamamen zararsız olmadığını göstermektedir. Özellikle mikrobiyal ve botanik kökenli bazı ürünlerin, hedef dışı türlerde subletal etkiler oluşturabildiği; davranış, fizyoloji ve bağışıklık sistemi üzerinde kısa veya uzun vadeli değişimlere yol açabildiği görülmektedir.

Bt, *Beauveria bassiana* ve *Metarhizium anisopliae* gibi yaygın mikrobiyal ajanlar arılar için çoğunlukla düşük riskli görünse de larval gelişim, bağırsak mikrobiyomu dengesi ve uçuş performansı gibi bazı özellikler üzerinde tür, suş ve doz bağımlı etkiler gözlenmiştir. Benzer şekilde botanik kaynaklı insektisitlerin bazıları yaşlı işçi arılar için düşük akut toksisite taşısa da azadirachtin, nikotin ve bazı uçucu yağlar gibi bileşiklerin hem larval hem de yetişkin evrelerde davranışsal bozukluklar, mortalite artışı veya bağışıklık sisteminde zayıflama yaratabileceği görülmektedir. Bu nedenle biyoinsektisitlerin doğal olmaları tamamen güvenli oldukları yönünde değerlendirilmemelidir. Bu amaçla her etken için kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır.

Sonuç olarak biyoinsektisitlerin sürdürülebilir bitkisel üretim ve ekosistem açısından önemli bir konu olduğu açıktır. Bununla birlikte bal arıları ve diğer tozlayıcılar üzerindeki subletal etkiler göz ardı edilmemelidir. Çevresel koşullar, formülasyon tipi, uygulama zamanı ve doz gibi faktörlerin göz önünde bulundurulduğu entegre yaklaşımlarla hem zararlı yönetiminde etkinlik sağlamak hem de tozlayıcı popülasyonlarını korumak mümkündür. Bu nedenle biyoinsektisit kullanım stratejilerinin geliştirilmesinde, arı sağlığını merkeze alan ekotoksikolojik verilerin artırılması ve uygulamaya yönelik rehberlerin güçlendirilmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

- Ağar, S., Aydınoglu, H., Temel, O., İkizunal, K., Ece, H., 1991. Pestisit kullanımının tarihçesi, bugünü ve geleceği. Türkiye Entomoloji Dergisi, 15(4): 247-256.
- Al-Mazra'Awı, M.S., Kevan, P.G., Shipp, L., 2007. Development of *Beauveria bassiana* dry formulation for vectoring by honey bees *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) to the flowers of crops for pest control. Biocontrol Science and Technology, 17(7): 733-741.
- Araujo, R.D.S., Lopes, M.P., Viana, T.A., Bastos, D.S.S., Machado-Neves, M., Botina, L.L.,

- Martins, G.F., 2023. Bioinsecticide spinosad poses multiple harmful effects on foragers of *Apis mellifera*. Environmental Science and Pollution Research, 30(25): 66923-66935.
- Ayılara, M.S., Adeleke, B.S., Akinola, S.A., Fayose, C.A., Adeyemi, U.T., Gbadegesin, L.A., Omole, R.K., Johnson, R.M., Uthman, Q.O., Babalola, O.O., 2023. Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. Frontiers in Microbiology, 14: 1040901.
- Azizoğlu, U., Bulut, S., Yılmaz, S., 2012. Organik tarımda biyolojik mücadele; entomopatojen biyoinsektisitler. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 28(5): 375-381.
- Balcı, H., Durmuşoğlu, E., 2020. Bitki koruma ürünü olarak biyopestisitler: tanımları, sınıflandırılmaları, mevzuat ve pazarları üzerine bir değerlendirme. Türkiye Biyolojik Mücadele Dergisi, 11(2): 261-274.
- Cai, P., Dimopoulos, G., 2024. Microbial biopesticides: A one health perspective on benefits and risks. One Health, 20: 100962.
- Carlesso, D., Smargiassi, S., Sassoli, L., Cappa, F., Cervo, R., Baracchi, D., 2020. Exposure to a biopesticide interferes with sucrose responsiveness and learning in honey bees. Scientific Reports, 10: 19929.
- Catania, R., Lima, M.A.P., Potrich, M., Sgolastra, F., Zappala, L., Mazzeo, G., 2023. Are botanical biopesticides safe for bees (Hymenoptera, Apoidea)? Insects, 14(3): e0247.
- Daraban, G.M., Hlihor, R.-M., Suteu, D., 2023. Pesticides vs. biopesticides: from pest management to toxicity and impacts on the environment and human health. Toxics, 11: 983.
- Eze, S.C., Mba, C.L., Ezeaku, P.I., 2016. Analytical review of pesticide formulation trends and application: The effects on the target organisms and environment. International Journal of Science and Environment Technology, 5(1): 253-266.
- Gupta, S., Dikshit, A.K., 2010. Biopesticides: an ecofriendly approach for pest control. Journal of Biopesticides, 3(1): 186-188.
- Hurley, T.M., 2005. Bacillus thuringiensis resistance management: experiences from the USA. In: Wesseler, J.H.H. (Ed.), Environmental Costs and Benefits of Transgenic Crops. Springer, Dordrecht, the Netherlands.
- Jena, M.K., Sahoo, S., 2022. Biopesticides: The future of agricultural pest management. Just Agriculture, 2(8): 1-6.
- Kekillioğlu, A., Bıçak, Z., 2020. Pestisitler ve arılar üzerindeki etkilerinin incelenmesi. EJONS International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences, 13: 26-44.
- Kumar, S., 2012. Biopesticides: a need for food and environmental safety. Journal of Fertilizers and Pesticides, 3(4): 1000e107.
- Libardoni, G., Neves, P.M.O.J., Abati, R., 2021. Possible interference of Bacillus thuringiensis on the survival and behavior of African honey bees (*Apis mellifera*). Scientific Reports, 11: 3482.
- Lord, J.C., 2005. From Metchnikoff to Monsanto and beyond: the path of microbial control. Journal of Invertebrate Pathology, 89: 19–29.
- Mascarin, G.M., Jaronski, S.T., 2016. Production and use of *Beauveria bassiana* as a microbial insecticide. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 32: 177.
- Meikle, W.G., Mercadier, G., Holst, N., et al., 2008. Effects of *Beauveria bassiana*

- (Deuteromycota: Hyphomycetes) treatment on honey bee (*Apis mellifera*) colony health and *Varroa destructor* mites (Acari: Varroidae). *Apidologie*, 39: 247–259.
- Mishra, J., Tewari, S., Singh, S., Arora, K., 2015. Biopesticides: where we stand? In: Arora, N.K. (Ed.), *Plant Microbes Symbiosis*. Springer, India, pp. 37–75.
- Ndolo, D.E., Njuguna, C.O., Adetunji, C., Harbor, A., Rowe, A., Den Breeyen, J., Sangeetha, G., Singh, B., Szewczyk, T.S., Anjorin, D., Thangadurai, R., Hospeti, V., 2019. Research and development of biopesticides: challenges and prospects. *Outlooks on Pest Management*, 30(6): 267–276.
- Oguh, C.E., Okpaka, C.O., Ubani, C.S., Okekeaji, U., Joseph, P.S., Amadi, E.U., 2019. Natural pesticides (biopesticides) and uses in pest management – a critical review. *Asian Journal of Biotechnology and Genetic Engineering*, 9(2): 1–18.
- Popp, J., Peto, K., Nagy, J., 2013. Pesticide productivity and food security: a review. *Agronomie*, 33: 243–255.
- Rad, S.M., Ray, A.K., Barghi, S., 2022. Water pollution and agriculture pesticide. *Clean Technologies*, 4(4): 1088–1102.
- Santos, A.C., Cristaldo, P.F., Araujo, A.P., Melo, C.R., Lima, A.P., Santana, E.D., Oliveira, B.M., Oliveira, J.W., Vieira, J.S., Blank, A.F., Bacci, L., 2018. *Apis mellifera* in the target of neonicotinoids: A one-way ticket? *Bioinsecticides can be an alternative. Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163: 28–36.
- Shamsuddeen, R., Mathew, T.S., Haladu, M., Ahmad, K.B., Adam, A.B., Abubakar, M.Y., 2024. Recent advances in biopesticides: a review of efficacy and environmental impact. *African Journal of Biochemistry and Molecular Biology Research*, 1(1): 706–725.
- Soni, J., Thakur, M., 2011. Effect of biopathogens on honey bees. *Pest Technology*, 5(1): 86–90.
- Steinigeweg, C., Alkassab, A.T., Beims, H., Eckert, J.H., Richter, D., Pistorius, J., 2021. Assessment of the impacts of microbial plant protection products containing *Bacillus thuringiensis* on the survival of adults and larvae of the honeybee (*Apis mellifera*). *Environmental Science and Pollution Research*, 28: 29773–29780.
- Tadesse Mawcha, K., Malinga, L., Muir, D., Ge, J., Ndolo, D., 2024. Recent advances in biopesticide research and development: a focus on microbial. *F1000Research*, 13: 1071.
- Tullah, Z., Ain, Q., Ahmad, F., 2023. Pesticides' taxonomy, functioning, their associated risks to human and environment, and degradation technologies. *Journal of Chemical Reviews*, 5(1): 31–55.