



Avrupa Birliği tarafından
ortak finanse edilmektedir

"Erasmus+ / Avrupa Dayanışma Programı kapsamında Avrupa Komisyonu tarafından desteklenmektedir. Burada yer alan içerik yazarın görüşlerini yansıtmaktadır ve bu görüşlerden Avrupa Komisyonu ve Türkiye Ulusal Ajansı sorumlu tutulamaz."

Pestisite alternatif mücadele yöntemleri



“Çevresel Sürdürülebilirlik için Pestisit Kullanımını Azaltma ve Alternatif Mücadele Yöntemleri Konusunda Çiftçilerin Bilinçlendirilmesi; Tüketici için Güvenli Gıda”

[SafeFoodTR]

2025-1-TR01-KA220-VET-000349539

2026



Avrupa Birliği tarafından
ortak finanse edilmektedir

"Erasmus+ / Avrupa Dayanışma Programı kapsamında Avrupa Komisyonu tarafından desteklenmektedir. Burada yer alan içerik yazarın görüşlerini yansıtmaktadır ve bu görüşlerden Avrupa Komisyonu ve Türkiye Ulusal Ajansı sorumlu tutulamaz."

Pestisite alternatif mücadele yöntemleri



safeFoodTR

“Çevresel Sürdürülebilirlik için Pestisit Kullanımını Azaltma ve Alternatif Mücadele Yöntemleri Konusunda Çiftçilerin Bilinçlendirilmesi; Tüketici için Güvenli Gıda”

[SafeFoodTR]

2025-1-TR01-KA220-VET-000349539

Proje Koordinatörü: Gaziantep Üniversitesi (Gaziantep, Türkiye)

Hazırlayanlar: Loreta Bašinskienė, Dalia Čižeikienė, Kaunas Teknoloji Üniversitesi (Litvanya)

Şubat, 2026

İçindekiler

Sayfa Numarası

1. Giriş.....	4
2. Biyopestisitler	5
2.1. Mikrobiyal Pestisitler	6
2.2. Biyokimyasal Pestisitler	27
2.3. Bitkiye Entegre Edilmiş Koruyucular	40
3. Biyopestisit Formülasyonları.....	41
3.1. Kuru Formülasyonlar.....	42
3.2. Sıvı Formülasyonlar	43
3.3. Biyopestisit Uygulama Metotları.....	44
4. Yararlı Böcekler – Biyolojik Mücadele Ajanları Olarak Zararlıların Doğal Düşmanları	48
4.1. Uğur Böcekleri	49
4.2. Dantel Kanatlılar.....	50
4.3. Parasitik Yaban Arıları	51
4.4. Predatör Akarlar	52
4.5. Parazitik Sinekler.....	52
4.6. Biyolojik Mücadelede Predatör ve Parazitoit Makroorganizmaların Uygulanması.....	53
5. Eşlikçi Bitkilendirme	54
5.1. Zararlıları Uzaklaştıran (Başka Yöne Çeken) Bitkiler	54
5.2. Uzaklaştırıcı (Repellent) Bitkiler.....	56
5.3. Maskeleyici Bitkiler	57
5.4. Kamufle Eden veya Fiziksel Olarak Engelleyen Bitkiler.....	57
5.5. Eşlikçi Bitkilendirme Tekniklerinin Kombinasyonları	57
5.6. Yararlı Böcekleri Çeken Bitkiler	58
5.7. Yaprak Biti Bulaşmasını Azaltmak İçin Eşlikçi Bitkilerin Kullanımı	58
6. Nöbetleşe Ekim	60
7. Fiziksel Bariyerler.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış. 0
8. Entegre Zararlı Yönetiminde Biyopestisitler	62
9. Öneriler	Hata! Yer işareti tanımlanmamış. 3
10. Sonuçlar	65
11. Kaynaklar	66

1. Giriş

Modern tarım, hem yeterli miktarda ve yüksek kaliteli gıda üretme hem de insan sağlığını ve çevreyi koruma konusunda ikili bir sorumluluğa sahiptir. Uzun yıllar boyunca kimyasal pestisitler, zararlıların kontrol altına alınmasında ve ürün veriminin güvence altına alınmasında önemli bir rol oynamıştır. Ancak pestisitlerin aşırı veya yanlış kullanımı; çevre kirliliği, faydalı organizmalara zarar, gıdalarda pestisit kalıntıları ve zararlılarda direnç gelişimi gibi ciddi sorunlara yol açmıştır. Bu nedenlerle, pestisit kullanımının azaltılması ve alternatif zararlı kontrol yöntemlerinin benimsenmesi giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu hedefe ulaşmada temel bir çerçeve Entegre Zararlı Yönetimidir (bundan sonra – EZY). EZY, zararlı popülasyonlarını ekonomik zarar eşliğinin altında tutarken; insanlara, faydalı organizmalara ve çevreye yönelik riskleri en aza indirmeyi amaçlayan, farklı zararlı kontrol stratejilerinin uyumlu bir şekilde bir arada kullanıldığı bilimsel temelli bir yaklaşımdır.

Pestisit kullanımının azaltılmasına yönelik olarak çiftçilerin farkındalığının artırılması, sürdürülebilir tarımın sağlanması ve tüketiciler için güvenli gıdanın temin edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüzde çiftçiler, etkili, ekonomik olarak uygulanabilir ve çevre dostu alternatif zararlı kontrol yöntemlerini benimsemeye giderek daha fazla teşvik edilmektedir. Bu yöntemler yalnızca zararlıları kontrol etmeyi değil; aynı zamanda ekolojik dengenin korunmasını, toprak ve su kalitesinin sürdürülebilirliğini ve tozlayıcılar ile zararlıların doğal düşmanlarının korunmasını da hedeflemektedir.

Bu eğitim materyali, günlük tarım uygulamalarına entegre edilebilecek alternatif zararlı kontrol stratejilerinin teorik temellerine odaklanmaktadır. Amacı, çiftçilere farklı kontrol stratejilerinin nasıl çalıştığını ve EZY çerçevesi içinde birbirlerini nasıl tamamladıklarını açık bir şekilde anlatmaktır. Ele alınan yöntemler arasında; biyokimyasal pestisitler, mikrobiyal pestisitler ve bitkiye aktarılmış koruyucular gibi biyopestisitlerin kullanımı ile doğal düşmanlara dayalı biyolojik mücadele, yardımcı/arkadaş bitkilendirme (companion planting), ürün rotasyonu gibi kültürel yöntemler ve fiziksel engellerin kullanımı yer almaktadır.

Bu yöntemlerin arkasındaki ilkelerin ve EZY içindeki rollerinin anlaşılması sayesinde, çiftçiler kimyasal pestisitlere bağımlılığı azaltan, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve daha güvenli gıda üretimine katkı sağlayan zararlı yönetimi stratejileri konusunda bilinçli kararlar alabilirler. Bu

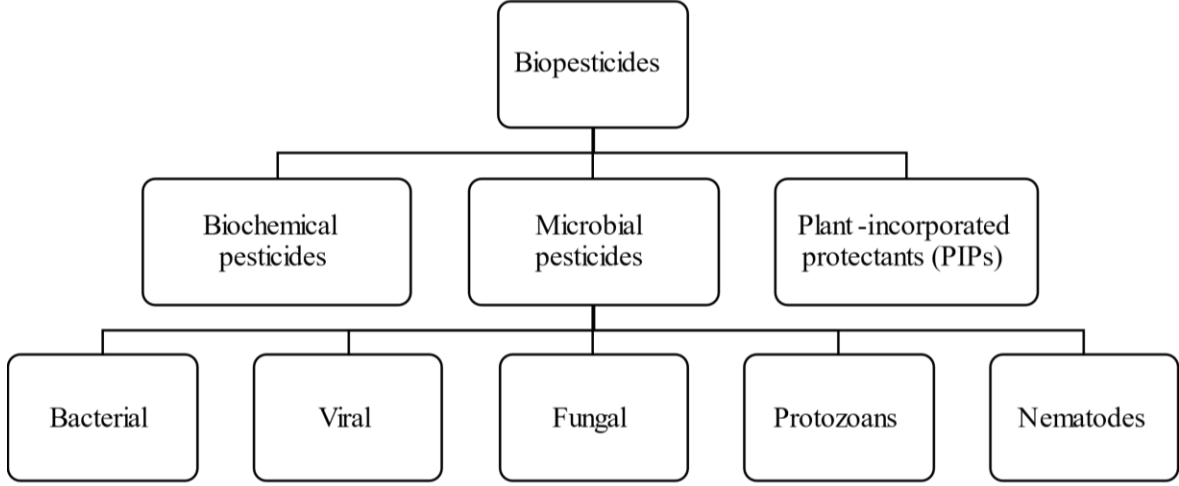
teorik eğitimin amacı, ilerleyen aşamalarda etkili ve sorumlu zararlı yönetimi uygulamalarını destekleyecek güçlü bir bilgi altyapısı oluşturmaktır.

2. Biyopestisitler

Biyopestisitler, tarımsal zararlıları, yabancı otları ve hastalık etmenlerini belirli biyolojik etkiler yoluyla kontrol etmek veya baskılamak amacıyla doğal organizmalardan ya da maddelerden elde edilen kimyasallardır. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'na (EPA) göre biyopestisitler; hayvanlar, mikroorganizmalar, bazı mineraller ve bitkiler gibi doğal kaynaklardan üretilmektedir [1]. Zararlı mücadelesinde doğal maddelerin kullanımı, tarihsel olarak oldukça etkili olmuş ve uzun yıllara dayanan geleneksel teknik bilginin bir parçasıdır. Ancak bu bilginin büyük bir bölümü, kimyasal pestisitlerin ortaya çıkışı ve yaygın olarak benimsenmesiyle birlikte zamanla gerilemiştir [2, 3].

Biyopestisitler, çevreye ve insan sağlığına daha az zarar veren daha güvenli bir alternatif sunmaktadır. Sentetik pestisitlerle karşılaştırıldığında genellikle daha düşük toksisiteye sahiptirler, çoğu zaman belirli hedef zararlılar üzerinde etki gösterirler, çevrede çok az ya da hiç kalıntı bırakmazlar ve organik tarım sistemlerinde kullanıma uygundur [4, 5, 6]. Bitki korumada biyopestisitlerin kullanımı, gıdalardaki pestisit kalıntılarının azalması gibi birçok avantaj sağlar ve bu durum tüketiciler açısından potansiyel risklerin düşürülmesine katkıda bulunur.

Biyopestisitler genellikle yüksek derecede seçicidir; esas olarak hedef zararlıları etkilerken hedef dışı organizmalar için çok az risk oluştururlar. Ayrıca, biyopestisitlerin çoğu çevrede hızlı bir şekilde parçalanır ve semiyokimyasallar gibi bazıları çok küçük miktarlarda uygulandığında bile etkili olabilmektedir [2, 3, 6]. EPA, biyopestisitleri üç ana sınıfa ayırmaktadır: biyokimyasal pestisitler, mikrobiyal pestisitler ve bitkiye entegre koruyucular (PIP'ler) (**Şekil 1**) [1,7].



Şekil 1. Biyopestisitlerin sınıflandırılması [7]

2.1. Mikrobiyal Pestisitler

Mikrobiyal pestisitler; bakteri, virüs, mantar, protozoa ve entomopatojen nematodlar gibi mikroorganizmalardan elde edilen ve ana aktif bileşen olarak mikroskopik canlı organizmalar (veya bunların yan ürünlerini) içeren bir biyopestisit grubudur. Bu pestisitler, belirli bitki zararlılarına karşı etki gösterirler [7]. Örneğin, bazı mantarlar yabancı otların kontrolünde kullanılırken, bazıları belirli böcek türlerini öldürmektedir.

Mikrobiyal pestisitler, zararlıları enfekte ederek hastalık oluşturmaları, besin ve yaşam alanı için rekabet etmeleri, doğal toksinler üretmeleri ve diğer biyolojik etki mekanizmaları yoluyla zararlı popülasyonlarını azaltırlar. Bu özellikleri sayesinde Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) stratejilerinde kritik bir rol oynar ve çevresel etkilerin azaltılması ile pestisit direnci riskinin en aza indirilmesine katkı sağlayarak sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklerler [9]. Son on yılda mikrobiyal biyopestisitler üzerine yapılan yoğun araştırmalar, çok sayıda yeni ürünün tanımlanmasına ve geliştirilmesine olanak sağlamış; aynı zamanda bu ürünlerin ticari potansiyelini de güçlendirmiştir [8].

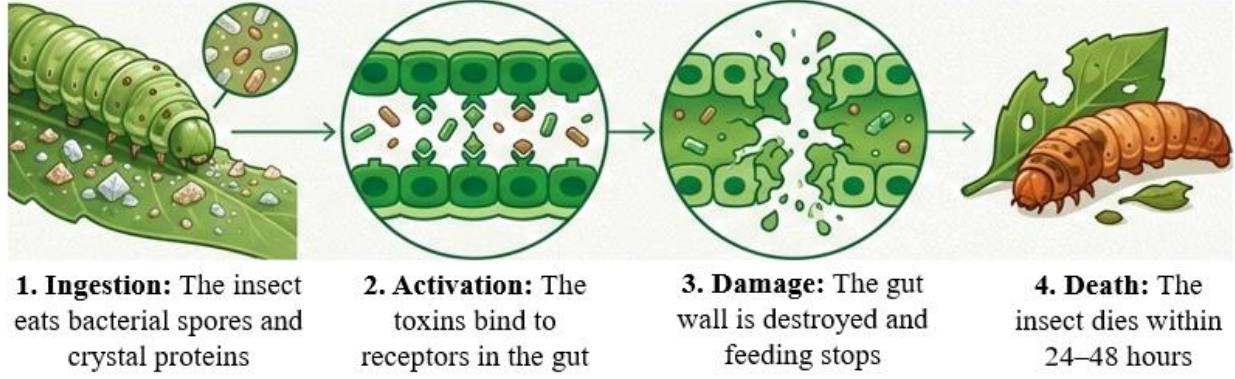
2.1.1. Bakteriyel Biyopestisitler

Bakteriyel biyopestisitler, mikrobiyal zararlı mücadelesi etmenleri arasında en yaygın kullanılan gruptan biridir. Başlıca uygulama alanları böcek zararlılarının kontrolü olmakla birlikte, bazıları bitki patojeni bakteriler ve mantarlara karşı da etkilidir. Bu ürünler genellikle güveler, kelebekler,

kınkanatlılar, sinekler ve sivrisinekler gibi belirli böcek grupları üzerinde etki gösterir. Etkili bir kontrol sağlanabilmesi için böceklerin bakteriyel etmenle temas etmesi ve çoğu durumda bu etmeni ağız yoluyla alması gerekmektedir.

Biyopestisit üretiminde kullanılan bakteriler dört ana grupta sınıflandırılabilir: kristal oluşturan spor üreticileri (örneğin *Bacillus thuringiensis*), zorunlu patojenler (örneğin *B. popilliae*), fakültatif patojenler (örneğin *Pseudomonas aeruginosa*) ve potansiyel patojenler (örneğin *Serratia marcescens*) [10].

Kristal üreten bakteriler arasında en önemlilerinden biri *B. thuringiensis* ile onun *kurstaki*, *tenebrionis*, *aizawai* ve *israelensis* alt türleridir. Bu bakteriler, böcek zararlılarının kontrolünde yüksek derecede özgül, güvenli ve etkili etmenler olarak yaygın biçimde tanınmaktadır [11]. *B. thuringiensis*; Lepidoptera larvaları (örneğin yaprak kurtları ve elmas sırtlı güve), sivrisinek larvaları, kara sinekler ve çeşitli kınkanatlı türleri dâhil olmak üzere geniş bir böcek zararlı grubuna karşı etkilidir. *B.thuringiensis*, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki biyopestisit pazarının yaklaşık %90'ını oluşturmakta olup, biyopestisit endüstrisinde baskın organizmadır. Tarımsal sistemlerde ticari böcek mücadelesinde en yaygın kullanılan bakteriyel türdür ve Lepidoptera, Hemiptera ve Coleoptera takımlarına ait farklı zararlı gruplarına karşı etkinlik göstermektedir. *B. thuringiensis*, her biri kendine özgü insektisidal kristal (Cry) proteinleri üretebilen çok sayıda suştan oluşur ve bu proteinler genellikle belirli zararlı grupları üzerinde etkilidir. Cry proteinleri, ağız yoluyla alındıktan sonra böceğin sindirim sistemindeki reseptörlere bağlanan toksinler olarak görev yapar; bağırsak epitelini tahrip ederek normal sindirim fonksiyonlarını bozar. Bu durum sindirim sisteminin felce uğramasına, böceğin beslenmeyi bırakmasına ve sonuçta iç hasar ve açlık nedeniyle ölmesine yol açar. Süreç, bağırsak duvarının bütünlüğünün bozulmasıyla bağırsak içeriğinin vücut boşluğuna (hemosel) sızmasına, septisemiye ve beslenmenin hızla durmasına neden olur. Sonuç olarak larva genellikle 24–48 saat içinde ölür (**Şekil 2**). Bu etki mekanizmasının yüksek derecede özgül olması nedeniyle, bakteriyel biyopestisitler yalnızca belirli zararlı türleri hedef alacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece ürünler korunurken faydalı organizmalar ve hedef dışı türler üzerindeki olumsuz etkiler en aza indirilmektedir [9,10,12].



Şekil 2. *B. thuringiensis*'in böcek larvaları üzerindeki etki mekanizması. Kaynak: ChatGPT (DALL·E) kullanılarak oluşturulmuş ve yazar tarafından Microsoft Paint ile düzenlenmiştir (2026).

Bakteriyel pestisitler arasında *Pseudomonas fluorescens* (Trevisan), *B. subtilis* (Ehrenberg) ve *Pseudomonas aureofaciens* (Kluyver) de tarımsal uygulamalarda çeşitli bitki patojenlerine karşı kullanılmaktadır [13]. Ticari *B. thuringiensis* ürünleri; sporlar ve kristal toksinler içeren kuru tozlar ile sıvı süspansiyonlar dâhil olmak üzere farklı formülasyonlarda piyasada bulunmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan bir diğer tür olan *Lysinibacillus sphaericus*, ikili (Bin) toksin üretimi yoluyla sivrisinek popülasyonlarını (*Culex* ve *Anopheles*) kontrol altına almaktadır [14]. *Saccharopolyspora spinosa* da zararlı mücadelesinde uygulanmakta olup *Aedes aegypti* ve *Spodoptera littoralis* gibi böceklere karşı etkilidir [15,16]. Patojenite açısından bakıldığında, *Pseudomonas aeruginosa* fakültatif bir patojen olarak görev yaparken, *B. popilliae* biyopestisit geliştirilmesinde yer alan zorunlu patojen bakterileri temsil etmektedir [17].

Bu dört bakteri grubu arasında, kristal oluşturan spor üreticileri ticari biyopestisit formülasyonlarında baskın konumdadır. Güçlü etkinlikleri, operasyonel güvenilirlikleri ve olumlu güvenlik profilleri nedeniyle *B. thuringiensis* ve *B. sphaericus* böcek zararlılarının kontrol programlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bazı entomopatojen bakteriler entomopatojen nematodlarla simbiyotik ilişkiler kurmakta ve güçlü insektisidal aktivite göstermektedir; bu bakteriler başlıca *Photorhabdus* ve *Xenorhabdus* cinslerine aittir [13].

Piyasada bulunan bakteriyel biyopestisitlerin ticari formülasyonları **Tablo 1**'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Bakteriye biyopestisitlerin ticari formülasyonları [18]

Bakteriyel biyopestisit	Kullanım alanı	Etkin madde	Önerilen doz	Hedef Organizma
Bactur®WDG	Yapraklarla Beslenen Tırtıllara Karşı	<i>Bacillus thuringiensis</i> var. <i>kurstaki</i>	0.5 g/lit	Tırtıllar
Plant's buddy	Zararlılara karşı endotoksin (parasporal kristal) ve ekzotoksin üretir; bu toksinler, zararlıların beslenmesini durdurmasını sağlar. Zararlılar, açlık, hücre duvarı yırtılması ve sinir zehirlenmesi nedeniyle ölür.	<i>B. thuringiensis</i> var. <i>kurstaki</i>	10 ml/lit	Kelebek ve güve tırtılları
SM Srimalar Enterprises®	Etken madde, sinek larvalarının mide zarını delip geçebilen enzimler salgılar. Ayrıca, etkili bir fungusit olarak da görev yapar.	<i>B. thuringiensis</i>	2–3 ml/lit	Sivrisinekler, kara sinekler ve mantarlar
Bio larvicide	Bt tarafından üretilen kristal proteinler, bazı böcek larvalarına toksiktir.	<i>B. thuringiensis</i> var. <i>kurstaki</i>	2–3ml/lit	Larvalar
Utkarsh BT	Utkarsh BT, böceğin sindirim sistemini bloke eden bir protein üreterek etki gösterir ve böceği etkili bir şekilde aç bırakır. Enfekte böcek, proteini aldıktan birkaç saat içinde beslenmeyi durdurur ve birkaç gün içinde ölür.	<i>B. thuringiensis</i> var. <i>kurstaki</i>	2–3 ml/lit	Larvalar
Mahastra	Tırtılların kontrolünde etkilidir.	<i>B. thuringiensis</i> var. <i>kurstaki</i>	5-10 g/lit	Tırtıllar
Thuricide®	Tırtıllar ve kurtlar üzerinde etkilidir.	<i>B. thuringiensis</i> var. <i>kurstaki</i>	2 - 4 tsp. per gallon	Tırtıllar ve solucanlar
Bactospeine®	Toksik bileşen nedeniyle böceğin bağırsakları etkilenir ve çürümeye başlar, bu da 24–72 saat içinde ölümle sonuçlanır.	<i>B. thuringiensis</i> var. <i>kurstaki</i>	1 g/lit	Larvalar

Bakteriyel biyopestisit	Kullanım alanı	Etkin madde	Önerilen doz	Hedef Organizma
Green Heal Larvicide	Konukçuya girdikten sonra böceğin sindirim sistemini felç eder ve ölümüne yol açar.	<i>B. thuringiensis</i> var. <i>kurstaki</i>	5ml/lit	Tırtıllar
VectoLex® Granules	Bir sivrisinek larvasiti, mide bağırsaklarında toksinler üreterek hücrelerin parçalanmasına neden olur ve larvaların ölmesini sağlar.	<i>B. thuringiensis sphaericus</i>	4 tsb/272 square feet	Sivrisinekler
VectoMax® Granules	Bir sivrisinek larvasiti, mide bağırsaklarında toksinler üreterek hücrelerin parçalanmasına neden olur ve larvaların ölmesini sağlar.	<i>B. thuringiensis sphaericus</i>	30 lbs/ft3	Sivrisinekler
VectoBac® WDG	Bir sivrisinek larvasiti, mide bağırsaklarında toksinler üreterek hücrelerin parçalanmasına neden olur ve larvaların ölmesini sağlar.	<i>B.thuringiensis</i> sub sp. <i>israelensis</i>	2–8 g/1000lit	Sivrisinekler
Teknar® CG	Bir sivrisinek larvasiti, mide bağırsaklarında toksinler üreterek hücrelerin parçalanmasına neden olur ve larvaların ölmesini sağlar.	<i>B. thuringiensis</i> sub sp. <i>israelensis</i>	2.5–10.0lbs/acre	Sivrisinekler
Gnatrol® SC	Bt kristal proteinleri, toksinlere parçalanır; bu toksinler bağırsak duvarına bağlanır ve tahrip eder, böylece larvalar hızla ölür.	<i>B. thuringiensis</i> sub sp. <i>israelensis</i>		Mantar sineği
Majestene®	Bionematikidler, bitkide RKN'lerin yaşam döngüsünü etkiler ve onları öldürür.	<i>Burkholderia rinojensis</i>	9.5 L/ha	Kök-ur hastalığı nematodları (RKNs)
Tracer™ 120 SC	Özellikle ısırıcı ve tırtıklayan böceklerin kontrolü için kullanılır.	<i>Saccharopolyspora spinosa</i>	0.375 ml/lit	Böcekler
BioNemagon™	Çok sayıda bitki patojenik nematodu hem larva hem de erişkin evresinde enfekte eder ve öldürür.	<i>Bacillus firmus</i>	10–30 kg/acre	Nematodlar

Bakteriyel biyopestisit	Kullanım alanı	Etkin madde	Önerilen doz	Hedef Organizma
Grandevo® WDG	Çoklu etki mekanizmalarına sahiptir: böcekleri uzaklaştırma, yeme yoluyla etkileme ve üreme döngüsünü bozma.	<i>Chromobacterium subtsugae</i>	3 lbs / 100 gallons	Tripsler Beyaz sinekler
Novodor@	Larvaları öldüren protein kristalleri üretir	<i>Bacillus thuringiensis</i> subsp. <i>tenebrionis</i>	3 to 4 quarts per acre	Colorado patates böceği, Karaağaç yaprak böceği
Agree-WP	Güçlü ve etkili mide etkisi, böceğin ölümüne yol açar	<i>B. thuringiensis</i> subsp. <i>aizawai</i>	0.5–2.0lbs/acre	İlmek tırtılları, ordu kurdu

Bakteriyel pestisitlerin avantajları [12]

- **Güvenli etki mekanizması:** Bakteriyel biyopestisitler, insanlara, yaban hayatına ve diğer hedef dışı organizmalara yönelik riski en aza indiren biyolojik mekanizmalar yoluyla etki gösterir.
- **Hedefe özgü etki:** Etkileri yüksek derecede seçicidir; yalnızca hedef zararlı türleri etkilerken faydalı böcekleri korur.
- **EZY ile uyumluluk:** Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programları kapsamında, kimyasal pestisitler de dâhil olmak üzere diğer kontrol stratejileriyle birlikte etkili bir şekilde kullanılabilirler.
- **Kalıntısız koruma:** Bu ürünler ürünler üzerinde zararlı kalıntılar bırakmaz; bu nedenle hasada yakın dönemlerde bile uygulanabilir.
- **Çevrede kalıcılık:** Birçok bakteriyel biyopestisit çevrede varlığını sürdürebilir ve doğal olarak yeniden yerleşebilir; bu da sonraki üretim sezonlarında zararlı baskısının devamlı olarak azaltılmasını sağlar.

Bakteriyel pestisitlerin dezavantajları [12]

- **Dar hedef etki alanı:** Mikrobiyal insektisitler yalnızca belirli böcek türleri veya sınırlı zararlı grupları üzerinde etkilidir. Bu seçicilik avantaj sağlasa da, hedef dışı zararlılar etkilenmeyerek ürünlere zarar vermeye devam edebilir.

- **Faydalı organizmaların hassasiyeti:** Biyolojik mücadele programlarında kullanılan predatörler ve parazitoitler, uyumsuz kimyasal pestisitlerden zarar görebilir; bu nedenle ürün seçiminin dikkatle yapılması gerekir.
- **Çevresel koşullara bağımlılık:** Biyolojik aktiviteleri ultraviyole ışınım, yüksek sıcaklıklar ve hava koşulları gibi çevresel faktörlerden güçlü şekilde etkilenir ve bu durum etkinliği azaltabilir. Mikrobiyal etmenlerin güneş ışığıyla bozunmasını önlemek için uygulamalar genellikle sabah erken saatlerde veya akşam geç saatlerde daha etkilidir.
- **Formülasyon ve kullanım gereksinimleri:** Mikrobiyal pestisitler özel formülasyonlara, uygun depolama koşullarına ve organizma canlılığını ile performansını korumak için etiket talimatlarına sıkı şekilde uyulmasına ihtiyaç duyar.
- **Üretim ve bulunabilirlik kısıtları:** Biyolojik etmenlerin yıl boyunca kitlesel üretimi teknik olarak zordur ve bu durum büyük ölçekli erişilebilirliği sınırlandırır.
- **Mevzuat ve pazar sınırlamaları:** Düzenleyici gereklilikler ve sınırlı ürün bulunabilirliği, geleneksel kimyasal pestisitlere kıyasla benimsenme oranını düşürmektedir.
- **Tarla koşullarına bağlı performans:** Başarılı bir zararlı kontrolü; biyolojik mücadele etmenlerinin hayatta kalmasını ve çoğalmasını destekleyen uygun sıcaklık, nem ve yağış koşullarına bağlıdır.

2.1.2. Viral Biyopestisitler

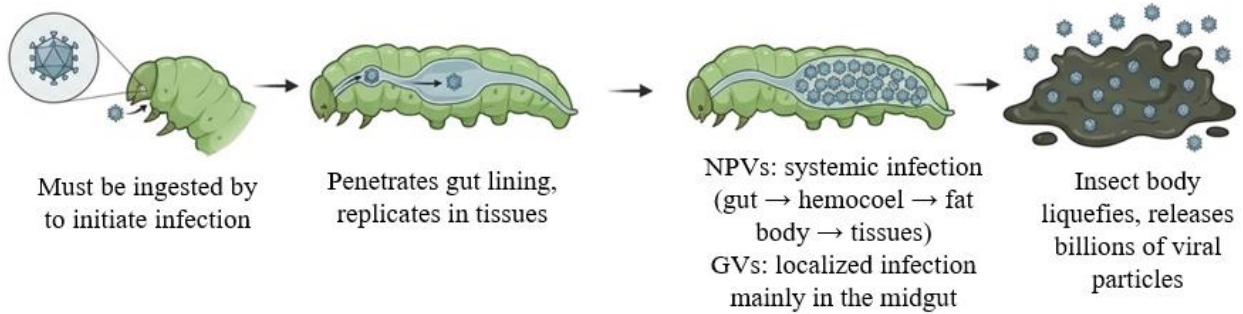
Birçok virüs ailesinin böcekleri enfekte ettiği bilinmektedir; ancak **Baculoviridae** ailesine ait virüsler, böcek zararlılarının kontrolünde kullanılan en yaygın ticari viral biyopestisitler olarak kabul edilmektedir [19,20]. Bakulovirüsler, yalnızca böcekleri ve diğer küçük eklembacaklıları enfekte eden **entomopatojen virüsler** grubuna aittir. Kimyasal pestisitlerin aksine, bakulovirüsler insanlara, hayvanlara ve faydalı böceklere karşı güvenlidir; bu özellikleri onları zararlı mücadelesinde çevre dostu bir seçenek haline getirmekte [21] ve EZY programlarına dâhil edilmek için ideal adaylar yapmaktadır [19].

Bakulovirüsler, çift sarmallı DNA'dan oluşan genetik materyal içerir ve **oklüzyon cisimcikleri** olarak adlandırılan özel protein yapılarıyla korunur. Bu yapılar, virüsün uygun bir böcek konak tarafından tüketilene kadar çevrede canlılığını sürdürmesini sağlar. Oklüzyon cisimcikleri, virüsün konak dışında hayatta kalmasına yardımcı olur [22]. Virüs böceğin vücuduna girdikten sonra çoğalır ve sonunda zararlının ölümüne neden olur. Bakulovirüslerin üç ana tipi bulunmaktadır [12]:

NPV'ler (nükleer polihedrozis virüsleri), **CPV'ler** (sitoplazmik polihedrozis virüsleri) ve **GV'ler** (granülozis virüsleri). Bu virüsler, koruyucu protein kılıflarının boyutu ve yapısı bakımından farklılık gösterse de, tümü böcek zararlılarını enfekte edip öldürme prensibiyle etki eder.

Bakulovirüsler yüksek derecede spesifiklerdir ve başlıca pamuk, pirinç, sebzeler, mısır ve fasulye gibi ürünlere zarar veren güve ve kelebek larvalarını hedef alırlar. Yaygın olarak bilinen bir örnek, ilk başarılı viral insektisitlerden biri olan **Helicoverpa zea nükleopoliedrozis virüsü (HzNPV)**'dür. Bu virüs; soya fasulyesi, mısır, domates ve sorgum gibi ürünlerde zararlı kontrolünde kullanılmaktadır. Böcekleri enfekte eden başka virüsler de bulunmakla birlikte, bakulovirüsler tarımda en yaygın kullanılan viral etmenlerdir [12,23].

Viral biyopestisitler, etki mekanizması bakımından bakteriyel etmenlere benzer ve enfeksiyonun başlayabilmesi için böcek larvaları tarafından ağız yoluyla alınmaları gerekir. Alımın ardından virüs partikülleri bağırsak epitelini geçerek duyarlı dokularda çoğalmaya başlar ve konak hücrelerde sistemik bir enfeksiyona yol açar. Enfeksiyonun son aşamasında, böcek vücudu parçalanır ve sıvılaşır; bu süreçte çok sayıda oklüzyon cisimciği açığa çıkar ve bunlar başka böcekler tarafından alındığında yeni enfeksiyonlara neden olur. Granülovirüslere dayalı enfeksiyon ve çoğalma süreci konak böcek üzerinde **Şekil 3**'te gösterilmektedir. Bir virüs duyarlı bir hücreye girdikten sonra çoğalma, çekirdek veya sitoplazma içinde gerçekleşir ve üç ana aşamada ilerler: erken dönem (0–6 saat), ikincil dönem (6–24 saat) ve çok geç dönem (24–72 saat). Son aşamada virüs, çok sayıda viral partikül içeren ve oklüzyon cisimcikleri olarak bilinen koruyucu protein yapıları üretir. Bu yapılar enfeksiyonun yayılmasını sağlar ve zararlı popülasyonlarını önemli ölçüde azaltabilen doğal epizootiklerin oluşumunu tetikleyebilir [12,23].



Şekil 3. Granülovirüs temelli bir biyopestisitinin bir larva üzerindeki etki mekanizması. Kaynak: ChatGPT (DALL·E) kullanılarak oluşturulmuş ve yazar tarafından Microsoft Paint ile düzenlenmiştir (2026).

Ölüm anında, başlangıçtaki enfektif doz yalnızca 1.000 partikül kadar düşük olsa bile, tek bir tırtıl 10^9 'dan fazla oklüzyon virüs cisimciği içerebilir. Uygun çevresel koşullar altında duyarlı zararlılar 3–7 gün içinde ölebilir; ancak koşulların daha az elverişli olduğu durumlarda ölüm 3–4 haftaya kadar gecikebilir. Granülovirüs temelli biyopestisitler, başta elma içkurdu (*Cydia pomonella*) ve elmas sırtlı güve (*Plutella xylostella*) gibi türler olmak üzere, özellikle Lepidoptera takımına ait zararlıların larva dönemlerinin kontrolünde kullanılmaktadır [24]. Viral biyopestisitler son derece özgülüdür; yalnızca belirli zararlıları hedef alır ve diğer böceklere zarar vermez. Zararlı popülasyonlarını önemli ölçüde azaltabilirler. Tarımda kullanılan viral ürünlere örnek olarak pamuk koza kurdu (*Helicoverpa zea*), pancar yaprakkurdu (*Spodoptera exigua*) ve elma içkurdunu (*Cydia pomonella*) kontrol eden virüsler verilebilir. Ticari viral biyopestisitlerin bir listesi **Tablo 2**'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Viral biyopestisitlerin ticari formülasyonları [12]

Hedef zararlı	Konak	Mevcut ürünler
NPV of <i>H. armigera</i> (HaNPV)	<i>Helicoverpa zea</i> <i>H. armigera</i>	Biokill-H, BioVirus-H, Heli-Cide, Heliokill, Heliman-NPV, Helixus, Jas Viro-H, Helicop, Heligard, Somstar-Ha
NPV of <i>S. litura</i> (SINPV)	<i>Spodoptera litura</i> <i>S. exigua</i>	BioVirus-S, Jas Viro-S, Spodo-Cide, Spodopterin, Somsta-SL
Çingene güvesi için nükleer poliedroz	Çingene güvesi tırtılları	Gypchek virus
Püsküllü güve NPV	Püsküllü güve tırtılları	TM Biocontrol-1
Çam testere arısı NPV	Çam testere arısı larvaları	Neochek-S
Elma iç kurduna karşı granülozis virüsü (GV)	Elma iç kurdu tırtılları	Madex, Carpovirusine, CYD-X

Güneş ışığı bir sınırlayıcı faktördür; çünkü oklüzyon cisimcikleri 280–320 nm aralığındaki ultraviyole (UV) radyasyona maruz kaldıklarında hızla etkinliklerini kaybederler [25]. Ancak araştırmalar, plastik sera örtülerinin UV-B radyasyonunun %90'dan fazlasını engelleyerek bu olumsuz etkiyi azalttığını ve böylece larvalardaki enfeksiyon oranlarını artırdığını göstermektedir [26].

Yüksek derecede seçici etki mekanizmaları nedeniyle bakulovirüsler yalnızca hedeflenen zararlı türleri enfekte eder. İnsan sağlığı açısından risk oluşturabilecek toksik bileşikler veya metabolitler üretmezler. Ayrıca bakulovirüsler ultraviyole radyasyona maruz kaldıklarında zamanla

aktivitelerini kaybeder; bu durum hasat edilen ürünlerde aktif kalıntıların birikmesini önler. Bu özellikleri sayesinde, bakulovirüs temelli bitki koruma ürünleri Avrupa Birliği mevzuatı kapsamında (örneğin, (EC) No 396/2005 sayılı Tüzük) maksimum kalıntı limiti (MRL) gerekliliklerinden muaf tutulmuştur. Bu düzenleyici yaklaşımla uyumlu olarak, Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD), bakulovirüslerin kullanıcılar ve tüketiciler için güvenli olduğunu ve bitkiler, sucül organizmalar ile memeliler açısından toksik olmadığını belirtmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise bakulovirüs temelli ürünler Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) denetimi altındadır [27].

Hedef böceklerin virüsü bitki dokuları yoluyla ağızdan alması gerektiğinden, granülovirüs temelli biyopestisitler zararlıların normalde beslendiği bitki kısımlarına uygulanmalıdır. Örneğin larvalar yapraklarla besleniyorsa, uygulama doğrudan yaprak yüzeyine yapılmalıdır. Genel olarak granülovirüs ürünlerinin kullanımı, geleneksel kimyasal pestisitlere benzer uygulama esaslarını takip eder. Bu biyopestisitler en yaygın olarak sıvı formülasyonlar halinde bulunur ve standart ilaçlama ekipmanlarıyla uygulanabilir. Bazı durumlarda ise alternatif uygulama yöntemleri için toz veya pudra formunda da temin edilebilmektedir.

Viral pestisitlerin avantajları [12]

- **Hedef dışı organizmalarla güvenli etkileşim:** Viral biyopestisitler yalnızca belirli zararlı türleri üzerinde etki gösterir; insanlara, faydalı böceklere ve diğer hedef dışı organizmalara zarar vermez.
- **Uzun süreli zararlı kontrolü:** Hedef böceklerde direnç gelişimi görülmez; bu sayede virüsler uzun süre boyunca etkinliğini korur.
- **EZY ile uyumluluk:** Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programları kapsamında, kimyasal insektisitler de dâhil olmak üzere diğer mücadele yöntemleriyle kolaylıkla birlikte kullanılabilir.
- **Çevrede kalıcılık:** Uygulama sonrası virüsler çevrede aktif kalır ve zararlı popülasyonlarını doğal yollarla baskılamaya devam eder.
- **İkincil zararlı salgınlarının olmaması:** Hedefe özgü etkileri sayesinde ikincil zararlı problemlerinin ortaya çıkmasını önler.
- **Kalıntısız koruma:** Ürünler üzerinde kimyasal kalıntı bırakmaz; hasat öncesi bekleme süresine ihtiyaç duyulmaz.

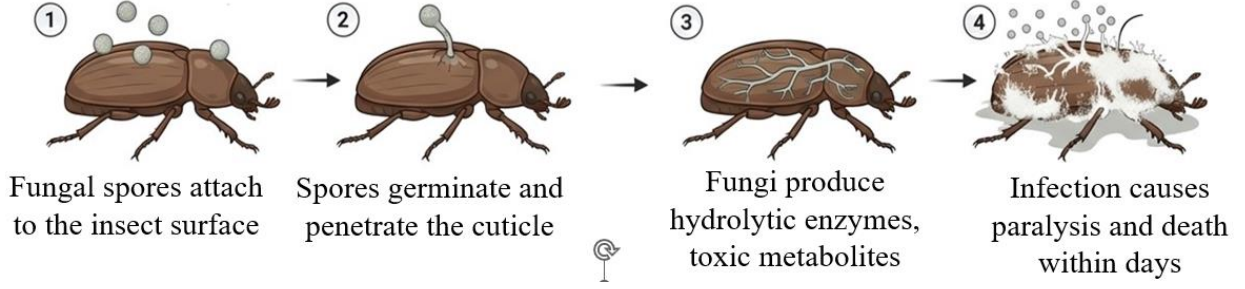
Viral pestisitlerin dezavantajları [12]

- **Dar hedef etki alanı:** Viral biyopestisitler yalnızca belirli zararlı türleri üzerinde etkilidir; geniş spektrumlu kimyasal pestisitlerin aksine aynı anda birden fazla zararlıyı kontrol edemezler.
- **Gecikmeli ölüm:** Enfeksiyondan sonra virüsün böcek içinde çoğalması zaman aldığından, zararlının ölümü ani değil kademeli olarak gerçekleşir.
- **Çevresel duyarlılık:** Ultraviyole radyasyon, yüksek sıcaklıklar ve diğer olumsuz çevresel koşullar virüsü etkisiz hâle getirebilir ve tarla koşullarındaki etkinliğini azaltabilir.

2.1.3. Fungal Biyopestisitler

Fungal biyopestisitler; böcek zararlıları, bitki patojenleri ve hatta bazı yabancı otların kontrolünde, diğer biyolojik ajanlarla birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Etki mekanizmaları, kullanılan fungal türe ve hedeflenen zararlı tipine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Fungal biyopestisitlerin, birçok bakteriyel ve viral alternatifine kıyasla en önemli avantajlarından biri, etkili olabilmeleri için ağız yoluyla alınmalarının gerekmemesidir; doğrudan temas yoluyla zararlıları enfekte edebilirler. Fungus böceğin vücuduna girdikten sonra, içeride gelişir ve felce yol açan toksinler üreterek nihayetinde böceğin ölümüne neden olur. Entomopatojenik mantarlar arasında en yaygın kullanılan dört cins *Beauveria*, *Isaria*, *Metarhizium* ve *Paecilomyces*'tir [28]. *Beauveria bassiana* türü özellikle beyaz sinekler, tripsler ve yaprak bitleri gibi zararlılara karşı oldukça etkilidir. Böceklere uygulandığında, mantar onların vücuduna nüfuz eder ve birkaç gün içinde enfeksiyon ölümüyle sonuçlanır.

Doğal olarak bulunan mantarlara veya bunların hücresel bileşenlerine dayanan fungal biyopestisitler, hedef organizmaları konak yüzeyine yapışan adeziv sporlar aracılığıyla enfekte eder. Tutunmanın ardından sporlar çimlenir ve böcek kütikulasını delen ince filamentöz yapılar oluşturur. Bu süreçte mantarlar, güçlü hidrolitik enzimler ve toksik bileşikler salgılayarak iç fizyolojik işlevleri bozar ve sonuçta konağın ölümüne yol açar [29]. Konak ölümünü takiben, fungal gelişim kadavranın dışına doğru yayılır ve biyolojik zararlı baskılamasının sürmesini ve yayılmasını sağlayan yeni sporlar üretir [30]. Mantara dayalı biyopestisitlerin etki mekanizması ve bu biyopestisitlerin hedef böcek zararlılarına saldırırken izlediği aşamalar **Şekil 4**'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Mantar temelli biyopestisitlerin etki mekanizması. Kaynak: ChatGPT (DALL·E) kullanılarak oluşturulmuş ve yazar tarafından Microsoft Paint ile düzenlenmiştir (2026).

Piyasada yaygın olarak bulunan ticari fungal biyopestisitlerin en bilinenleri *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Nomuraea rileyi*, *Trichoderma viride*, *Paecilomyces farinosus* ve *Verticillium lecanii* kökenlidir. Bu biyopestisitler; düşük maliyetleri, çevresel açıdan güvenli olmaları ve kimyasal pestisit kullanımına bağlı zararlı etkileri azaltma konusundaki güçlü yetenekleri nedeniyle değer görmektedir [2, 18, 31]. Bunlar arasında *B. bassiana* ve *M. anisopliae*, yaprak bitleri, böcekler ve larvaları, çekirgeler, yaprak ve bitki pireleri, bakla kurdu, tel kurtları (cutworms) ile diğer lepidopter ve koleopter zararlılar dâhil olmak üzere geniş bir zararlı yelpazesine karşı etkili olmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [12]. Bu etmenler genellikle konidi (spor) ya da miselyal preparatlar formunda uygulanır; uygulama sonrasında sporlanma gerçekleşir ve bu durum, uygulanan ortamlarda zararlıların uzun süreli baskılanmasını sağlar [32]. *Metarhizium fungusunun* Asya gergedan böceği (*Oryctes rhinoceros*) larvalarını enfekte etme aşamaları **Şekil 5**'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Metarhizium fungusunun Asya gergedan böceği (*Oryctes rhinoceros*) larvalarında oluşturduğu enfeksiyonun aşamaları. Kaynak: Milksloong tarafından Wikimedia Commons üzerinden paylaşılan görsel, CC BY-SA 4.0 lisansı [33].

Fungal biyopestisitler, çok çeşitli böcek ve akar zararlılarının kontrolünde çevre dostu araçlar olarak güçlü bir potansiyel sunmaktadır. Biyolojik mücadeledeki temel avantajlarından biri yüksek seçicilikleridir; esas olarak hedef zararlıları etkilerken tozlayıcılar ve doğal avcılar gibi faydalı organizmalara zarar vermezler. Buna ek olarak, bu ürünler genellikle solucanlar ve yaykuyruklar (springtails) dâhil olmak üzere diğer yararlı toprak organizmalarının büyüme ve gelişimini olumsuz yönde etkilemez. Bu özellikleri sayesinde fungal biyopestisitler, biyolojik çeşitliliği destekleyen ve çevresel etkiyi azaltan Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programları ve sürdürülebilir tarım sistemleri için son derece uygundur [9].

Ayrıca, birçok fungal tür halihazırda başarıyla büyük ölçekli olarak üretilmiş ve ticari mikoinsektisitler şeklinde formüle edilmiştir; bu durum, zararlı yönetimi uygulamalarında daha yaygın bir şekilde benimsenmelerini mümkün kılmaktadır [34]. Zararlıların biyolojik kontrolü amacıyla geliştirilmiş veya geliştirilmekte olan fungal biyopestisitler **Tablo 3**'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Ticari fungal biyopestisit formülasyonları [2]

Ürün	Fungus	Hedef Zararlılar	Üreticiler, şirketler ve ülkeler
BIO 1020	<i>Metarhizium anisopliae</i>	Asma hortumlu böcekleri	Licensed to Taensa, US
Bio-Blast	<i>Metarhizium anisopliae</i>	Termitler	EcoScience, US
Biogreen	<i>Metarhizium anisopliae</i>	Meralarda bulunan skarabe (<i>Scarabaeidae</i>) larvaları	Bio-care Technology, Australia
Bio-Path	<i>Metarhizium anisopliae</i>	Hamam böcekleri	EcoScience, US
Boverin	<i>Beauveria bassiana</i>	Colorado patates böceği	Former USSR
Conidia	<i>Beauveria bassiana</i>	Kahve meyve delicisi	Live Systems Technology, Colombia
Corn Guard	<i>Beauveria bassiana</i>	Avrupa mısır kurdu	Mycotech, US
Engerlingpilz	<i>Beauveria brongniartii</i>	Mayıs böcekleri	Andermatt, Switzerland
Jas Bassi	<i>Beauveria bassiana</i>	Colorado patates böceği	Shri Ram Solvent Ext. Pvt., India
Jas Meta	<i>Metarhizium anisopliae</i>	Şeker kamışı köpük böcekleri, termitler	Shri Ram Solvent Ext. Pvt., India
Jas Verti	<i>Verticillium lecanii</i>	Beyaz sinekler ve tripsler	Shri Ram Solvent Ext. Pvt., India
Laginex	<i>Lagenidium giganteum</i>	Sivrisinek larvaları	AgraQuest, US
Metaquino	<i>Metarhizium anisopliae</i>	Köpük böcekleri	Brazil
Mycotal	<i>Verticillium lecanii</i>	Beyaz sinekler ve tripsler	Koppert, The Netherlands
Mycotrol WP	<i>Beauveria bassiana</i>	Beyaz sinekler, yaprak bitleri ve tripsler	Mycotech, US

Ürün	Fungus	Hedef Zararlılar	Üreticiler, şirketler ve ülkeler
Naturalis-L	<i>Beauveria bassiana</i>	Pamuk zararlıları (koza kurtları dâhil)	Troy Biosciences, US
Ostrinil	<i>Beauveria bassiana</i>	Mısır kurtları	Natural Plant Protection (NPP), France
Pae-Sin	<i>Paecilomyces fumosoroseus</i>	Beyaz sinekler	Agrobiossa, Mexico
PFR-97	<i>Paecilomyces fumosoroseus</i>	Beyaz sinekler	ECO-tek, US
Proceol	<i>Beauveria bassiana</i>	Ordu kurtları	Probiagro, Venezuela
Schweizer Beauveria	<i>Beauveria brongniartii</i>	Mayıs böcekleri	Eric Schweizer, Switzerland
Vertalec	<i>Verticillium lecanii</i>	Yaprak bitleri	Koppert, The Netherlands

Fungal biyopestisitlerin konvansiyonel insektisitlerle birlikte uygulanması durumunda, zararlı kontrolünde kayda değer iyileşmeler bildirilmektedir ve bu uygulamalar çoğu zaman zararlı ölümlerinde belirgin artışlar sağlamaktadır. Örneğin, yapılan araştırmalar *Beauveria bassiana*'nın azaltılmış dozlarda insektisitlerle birlikte kullanımının Colorado patates böceğinin kontrolünü iyileştirdiğini; neem yağı ile kombine uygulamasının ise tütün tripsinin yumurta ve nimf evrelerine karşı etkili olduğunu göstermektedir [32, 35, 36].

Böcek kontrolüne ek olarak, fungal kökenli ürünler istilacı bitki türlerinin yönetiminde mikohersit (mycoherbicide) olarak da kullanılmaktadır. Bu kapsamda, *Cylindrobasidium laeve*'nin *Acacia mearnsii* (kara akasya) kontrolünde, *Colletotrichum acutatum*'un ise *Hakea sericea* (ipeksi hakea) türünün yönetiminde kullanılması, yabancı ve istilacı türlerin kontrolüne yönelik entegre yaklaşımları desteklemektedir [9].

Fungal temelli biyopestisitlerin avantajları [12]

Geniş enfeksiyon kapasitesi: Entomopatojenik funguslar doğrudan temas ve kütikula penetrasyonu yoluyla etki gösterir; bu sayede tarla, depolama ortamları ve toprakta çok çeşitli zararlıları enfekte edebilirler. Bu kapsam, çoğu bakteri veya virüse kıyasla daha geniştir.

- Etkili biyolojik üretim: *Beauveria*, *Metarhizium*, *Lecanicillium* ve *Isaria* gibi temel fungal etmenler, düşük maliyetli substratlar üzerinde basit fermantasyon yöntemleriyle büyük ölçekli olarak üretilebilir; bu da yaygın ve ölçeklenebilir uygulamayı mümkün kılar.
- Yüksek etkinlik ve özgüllük: Bu funguslar, belirli böcek türlerini hedef alırken güçlü bir zararlı kontrolü sağlar.
- Çevre dostu: Ekosistemler üzerindeki etkileri sınırlı olan, kimyasal pestisitlere sürdürülebilir bir alternatif sunarlar.

Fungal temelli biyopestisitlerin dezavantajları [12]

- Sıkı çevresel gereksinimler: Fungal aktivite çevresel koşullardan güçlü biçimde etkilenir. Spor çimlenmesi ve eklembacaklı kütikulasına başarılı penetrasyon için yüksek nem (>%80) gereklidir.
- Sıcaklık ve UV ışığına duyarlılık: Aşırı sıcaklıklar ve ultraviyole radyasyona maruz kalma, fungusların hayatta kalma oranını ve etkinliğini önemli ölçüde azaltabilir.
- Formülasyon zorlukları: Hassas konidilerin ya da uzun ömürlü dinlenme evrelerinin üretilmesi ve stabilize edilmesi teknik açıdan güçtür.
- Daha yüksek maliyet: Diğer mikrobiyal mücadele yöntemleriyle karşılaştırıldığında, fungal biyopestisitler genellikle daha pahalıdır.

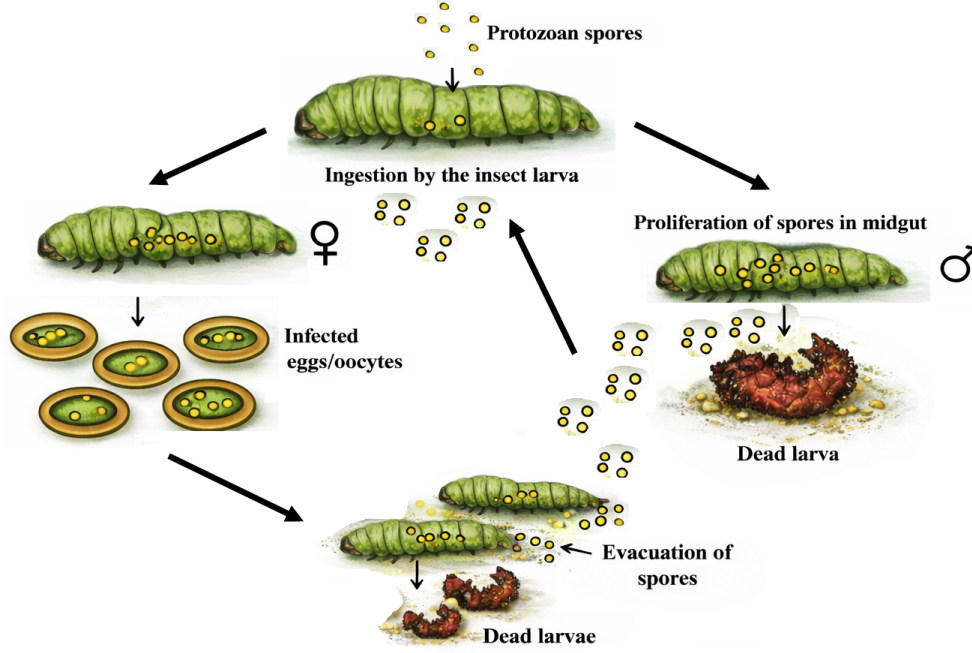
2.1.4. Biyopestisit Olarak Protozoalar

Protozoalar (mikrosporidiyalar olarak da adlandırılır), böcek hücreleri içinde yaşayan, spor oluşturan tek hücreli parazitlerden oluşan bir gruptur. Güveler ve çekirgeler gibi zararlı böcekleri enfekte edebildikleri için Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programlarında kullanılabilirler. Bu gruba *Nosema* ve *Vairimorpha* türleri örnek olarak verilebilir. Protozoalar belirli zararlı türlerine karşı yüksek derecede özgül olup, böcekleri zaman içerisinde zayıflatırlar. Ancak etki mekanizmaları yavaş olduğundan, protozoan biyopestisitler bakteriyel, viral veya fungal biyopestisitlere kıyasla daha sınırlı bir kullanım alanına sahiptir. Hedef organizmalar üzerinde kronik ve yıpratıcı etkiler oluşturmalarına rağmen, başarı oranları diğer biyopestisit gruplarına göre daha düşüktür [12].

Mikrosporidial bir protozoa olan *Nosema pyrausta*, Avrupa mısır kurdunun (*Ostrinia nubilalis*) yaygın ve önemli bir patojenidir. Bu etmen, larva gelişimini, ergin bireylerin yaşam süresini ve üreme başarısını olumsuz yönde etkileyerek popülasyon üzerinde doğal bir düzenleyici rol oynamaktadır [37].

Protozoalar, birçok böcek için enfektif form olan sporlar aracılığıyla yayılır. Mikrosporidialar yalnızca sporlarının ağız yoluyla alınması durumunda böcekleri enfekte edebilir. Bir böcek *Nosema* sporlarını tükettiğinde, sporlar orta bağırsakta çimlenir ve sporoplazmayı serbest bırakır. Sporoplazma, böceğin bağırsak hücrelerine penetre olur ve parazit daha sonra vücuttaki diğer doku ve organlara yayılır. Enfeksiyon ilerledikçe organizmalar çoğalır, doku ve organlara zarar verir ve septisemiye yol açarak böceği zayıflatır ya da ölümüne neden olur. Enfekte böcek içinde yeni sporlar üretilir. Bu sporlar çevreye salındığında ve başka böcekler tarafından tüketildiğinde enfeksiyon döngüsü devam eder ve zararlı popülasyonu içinde yayılabilir [38]. Avrupa mısır kurdunun (*Ostrinia nubilalis*) *Nosema pyrausta* ile enfeksiyonu üzerine yapılan çalışmalar, bu protozoanın konak popülasyonları içinde hem yatay hem de dikey bulaşma yoluyla yayılabildiğini göstermiştir (**Şekil 6**). Yatay bulaşmada, protozoa sporları ağız yoluyla konağa girer ve orta bağırsakta çoğalarak çok sayıda yeni spor üretir. Bu sporlar böceğin vücudunda kalır ve daha sonra dışkı yoluyla çevreye atılır. Enfekte böcek zamanla ölse de, çevreye yayılan sporlar canlılığını korur ve diğer larvalar tarafından alınarak enfeksiyon döngüsünü sürdürür. Sporların dişi bir larva tarafından alınması durumunda ise dikey bulaşma gerçekleşebilir. Bu durumda ergin dişinin üreme dokuları enfekte olur ve kontamine yumurtalar oluşur. Bu yumurtalardan çıkan larvalar *Nosema* enfeksiyonu nedeniyle ölür ve çevreye canlı sporlar bırakarak hastalığın daha da yayılmasına katkı sağlar [39].

Ticari olarak tescil edilmiş en bilinen protozoan biyopestisit örneği *Nosema locustae*'dir ve çekirge popülasyonlarının kontrolünde kullanılmaktadır (ticari protozoan biyopestisitlerin bir listesi **Tablo 4**'te sunulmuştur [40]). Özellikle nimf evrelerine uygulandığında etkilidir ve yaklaşık altı hafta içinde ölüme neden olabilmektedir. Bir diğer önemli mikrosporidial tür olan *Nosema pyrausta*, Avrupa mısır kurdu larvalarını öldürmesi ve ergin bireylerin yaşam süresi ile üreme kapasitesini azaltmasıyla bilinmektedir [39, 12].



Şekil 6. Lepidopter böceklere karşı entomopatojen protozoaların parazitlenme mekanizması. Kaynak: ChatGPT (DALL•E) ile oluşturulmuş ve yazar tarafından Microsoft Paint kullanılarak düzenlenmiştir (2026).

Tablo 4. Protozoa temelli biyopestisitlerin ticari formülasyonları [40]

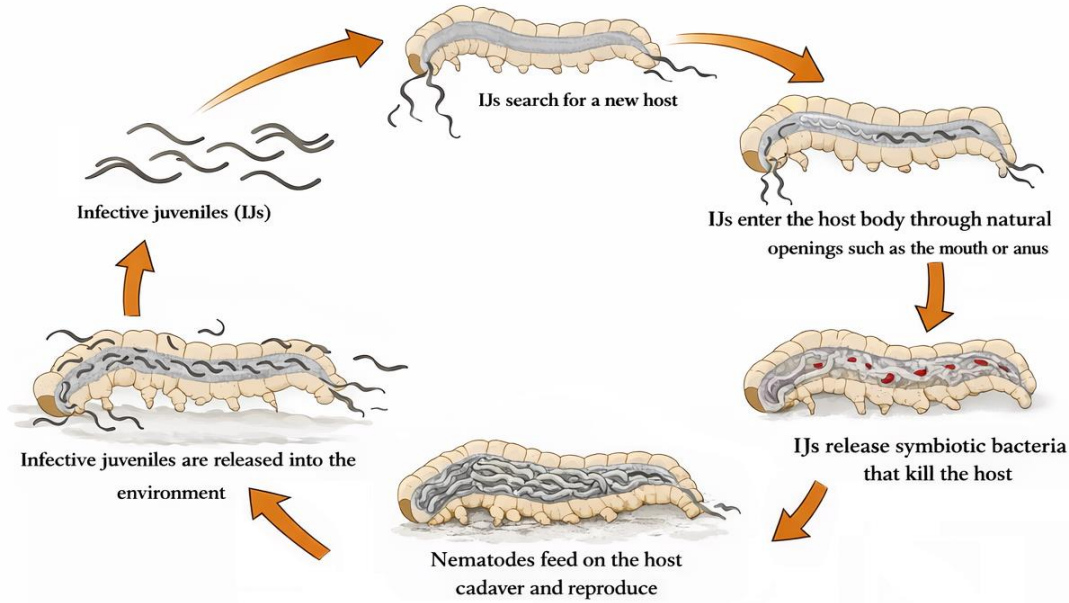
Protozoan	Konukçu aralığı	Ürünler
<i>Nosema locustae</i>	Avrupa mısır kurdu larvaları, çekirgeler ve Mormon cırcır böcekleri	NOLO Bait, Grasshopper attack

2.1.5. Biyopestisit Olarak Entomopatojen Nematodlar

Entomopatojen nematodlar, toprakta yaşayan ve esas olarak toprak taneciklerinin etrafındaki ince su tabakasında bulunan mikroskobik yuvarlak solucanlardır. Karbondioksit, hareket ve böcekler tarafından salınan kimyasal maddeler gibi sinyaller aracılığıyla böcek zararlılarını bulur, onları enfekte eder ve öldürürler [12]. Nematodlar, güçlü insektisidal potansiyele sahip bazı böcek patojeni bakterilerle (*Xenorhabdus spp.* ve *Photorhabdus spp.*) özel bir simbiyotik ilişki içerisinde [39]. Bu bakteriler nematodların içinde onlara zarar vermeden yaşar; ancak böcek zararlıları için son derece toksiktir ve konağın öldürülmesinde temel rol oynar [41].

Nematodlar, enfektif juvenil evredeyken konak zararlılara girerler (Şekil 7). Nematodlar konaklarıyla temas ettiklerinde, ağız, solunum delikleri (spiraküller) veya anüs gibi doğal

açıklıklardan vücuda girerler. Vücut içine girdikten sonra, simbiyotik bakterileri serbest bırakırlar. Bu bakteriler toksinler üreterek zararlı içinde enfeksiyona yol açar ve enfeksiyondan sonraki 24–48 saat içinde konağın ölümüne neden olur. Bakteriyel simbiyontlar, virülens faktörleri ve toksinlerin salınımıyla birlikte böceğin hemolenfinde hızla çoğalarak konağın zayıflamasını sağlar [39]. Nematodlar, enfekte ettikleri böceğin vücudu içinde çoğalır ve böcek enfeksiyon sonucu öldüğünde dışarı salınır. Serbest kalan nematodlar, birkaç gün içinde başka bireyleri enfekte ederek zararlıları öldürebilir. Nematodlar ölü böceklerle beslenir, onun içinde çoğalır ve yeni genç nematodlar üretir. Yeni oluşan nematodlar daha sonra ölü böceği terk ederek yeni bir konak arayışına girer ve zararlı kontrolünü sürdürür.



Şekil 7. Böceklerde nematodların parazitlenme mekanizması. Kaynak: ChatGPT (DALL•E) ile oluşturulmuş ve yazar tarafından Microsoft Paint kullanılarak düzenlenmiştir (2026).

Tarımda biyolojik zararlı mücadelesi ajanları (biyonematodisitler) olarak yaygın biçimde kullanılan iki ana grup *Steinernematidae* ve *Heterorhabditidae* familyalarıdır [12]. *Steinernema feltiae*, fungus sivrisinekleri ve yaprak galeri sinekleri gibi toprakta yaşayan zararlı larvalara karşı etkili olup, özellikle toprak kökenli zararlıların kontrolünde kullanılmaktadır. Benzer şekilde, *Heterorhabditis bacteriophora*, asma hortumlu böceği (*Otiorynchus sulcatus*) ile mücadelede yaygın olarak tercih edilmektedir; zira bu nematod, söz konusu zararlının hem larva hem de pupa evrelerini enfekte ederek öldürebilmektedir [41]. Bu entomopatojen nematodlar, toprakta yaşayan böcek zararlı popülasyonlarının azaltılmasına katkı sağlamak ve çevre dostu zararlı yönetim

stratejilerinin önemli bir bileşenini oluşturmaktadır. Ticari olarak temin edilebilen entomopatojen nematod temelli biyopestisitlerin listesi **Tablo 5**'te sunulmaktadır.

Tablo 5. Entomopatojen nematod temelli biyopestisitlerin ticari formülasyonları [12]

Entomopatojenik nematodlar	Konukçu aralığı	Ticari ürünler
<i>H. bacteriophora</i>	Kök hortumlu böcekler, kesici kurtlar, pireler, delici zararlılar ve mantar sineklerine karşı etkilidir. Siyah bağ hortumlu böceği popülasyonlarını %56–100 oranında azaltmada etkilidir.	BioSafe, Larvanem, Nemaplant, NemaShield-HB, Nematop, Nematech-H, Nematriend-H, NemaTrident-C, Nema-green, Optimem-H
<i>H. indica</i>	<i>H. armigera</i> , <i>Conogethes punctiferalis</i> , <i>Athalia proxima</i>	Soldier, Nema power, GrubTerminator, Grubcure, Calterm, Armour
<i>H. downsi</i>	Siyah bağ hortumlu böceği	NemaTrident-CT
<i>Steinernema feltiae</i> , <i>S. riobrave</i>	Siyah bağ hortumlu böceği, çilek kök hortumlu böceği, kesici kurtlar, kızılçık kök boğaz kurdu ve termitlere karşı etkilidir.	Biosafe, Ecomask, Hortscan, Guardian, Millenium, Nematac C, NoFlea, Savior WG, Scanmask, Termask, Vector
<i>S. carpocapsae</i>	Odun delici böcekler, tırtıllar, uzun bacaklı sinek larvaları, güve larvaları ve hindistancevizi gergedan böceği.	Capsamen, Carpocapsae-system, Exhibitline SC, Optimem-C, NemaGard, Nemastar, NemaTrident-T, NemaRed, NemasyS-C, Palma-life

Nematodların uygulanması, yırtıcılar ve parazitoitlerden farklıdır. Kullanımdan önce nematodların su ile karıştırılması ve ardından bitki üzerine ya da toprağa uygulanması gerekir. Yaygın uygulama yöntemleri; püskürtme, toprak uygulaması (soil drenching) ve damla sulamadır.

Püskürtme: Nematodlar çok küçük oldukları için standart püskürtücüler kullanılarak toprağa veya bitki yüzeyine uygulanabilir.

Toprak uygulaması: Nematod–su karışımı doğrudan toprağa dökülür. Bu sayede nematodlar aşağı doğru hareket ederek zararlı böcekleri bulabilir.

Damla sulama: Nematodlar sulama sistemleri aracılığıyla da uygulanabilir. Bu yöntemde, tıkanmayı önlemek ve aynı zamanda nematodların canlılığını korumak için uygun filtrelerin kullanılması gerekmektedir.

Entomopatojen nematodların avantajları [12]

- Güvenli kullanım: İnsanlar, hayvanlar, bitkiler ve çevre için zararsızdırlar. Koruyucu giysi veya yeniden giriş süresi gerekmez ve kimyasal kalıntı bırakmazlar.
- Toprak kökenli zararlılara karşı etkilidir: Cranberry girdler, siyah asma hortumlu böceği, kök hortumlu böcekleri, kesici kurtlar, ağ kurtları, odun delici böcekler ve ordu kurtları gibi zararlıları kontrol ederler.
- Nemli toprakta iyi performans gösterirler: Nematodlar en iyi ıslak ve gölgeli toprakta hayatta kalır; güçlü güneş ışığına ve yüksek sıcaklıklara karşı bu koşullarda daha iyi korunurlar.
- Diğer ürünlerle uyumludur: Birçok kimyasal ve biyolojik insektisit, fungusit, herbisit, gübre ve büyüme düzenleyicisine kısa süreli (2–24 saat) maruziyete dayanabilirler. Bu nedenle entegre zararlı yönetimi (EZY) programlarında kullanılabilirler.

Entomopatojen nematodların dezavantajları [12]

- Çevresel koşullara duyarlıdırlar: Güneş ışığına (UV) ve yüksek sıcaklıklara karşı hassastırlar.
- Daha pahalıdırlar: Genellikle kimyasal insektisitlere kıyasla daha yüksek maliyetlidirler.
- Tekrarlı uygulama gerektirirler: Zararlılar öldürüldükten sonra nematod popülasyonu azalır; bu nedenle yeniden uygulama sıklıkla gereklidir.
- Sadece toprakta etkilidirler: Yapraklarda veya toprak üstünde yaşayan böcekleri kontrol edemezler.
- Kısa raf ömrü: Depolama süreleri kısadır; bu nedenle hızlı bir şekilde kullanılmaları gerekir.
- Özel uygulama koşulları isterler: Sabah erken saatlerde veya akşam uygulanmalıdırlar; ayrıca toprağın, nematodların toprak içine hareketini kolaylaştırmak için uygulama öncesinde ve sonrasında sulanması gerekir.

2.2. Biyokimyasal Pestisitler

Biyokimyasal pestisitler, doğal kaynaklardan elde edilen ve doğal olarak oluşan kimyasallarla aynı yapı ve işleve sahip olan; zararlıları toksik olmayan mekanizmalar yoluyla kontrol eden bir biyopestisit grubudur. Genellikle bitki kökenli ekstraktlar, semiyokimyasallar ve böcek gelişim düzenleyicileri olarak sınıflandırılırlar [7]. Bu kimyasallar, böceklerin fizyolojisini değiştirerek etki gösterir ve zararlıları doğrudan öldürmeden kontrol altına alırlar [42].

2.2.1. Bitki Kökenli Ekstraktlar

Fitokimyasallar; botanik ya da bitkisel pestisitler olarak da adlandırılan, bitki kökenli maddelerdir (bitkisel ekstraktlar ve uçucu yağlar) ve etkili zararlı yönetimi için sentetik insektisitlere çevre dostu alternatifler olarak giderek daha fazla kabul görmektedir. Bu doğal ürünler; böceklerin konak tanıma, yumurta bırakma davranışı ve beslenme faaliyetlerini engelleyerek çekici, itici ya da beslenme caydırıcı (antifeedant) olarak işlev görebilen çeşitli biyoaktif bileşikler içerirler [7, 43]. Her bir fitokimyasal, kendine özgü bir kimyasal yapıya sahiptir ve bitkilerde koruma, büyümenin uyarılması ve üreme gibi farklı biyolojik roller üstlenir [44]. Botanik ekstraktlar ve uçucu yağlar; meyve, kabuk, yaprak ve tohumlar dâhil olmak üzere bitkinin farklı kısımlarından elde edilir. Bu maddeler ağırlıklı olarak böcek zararlılarının kontrolünde kullanılsa da, bazıları bitki hastalıklarına karşı da etki göstermektedir [12]. Antiparaziter, antibakteriyel, antifungal, antiviral ve insektisidal özelliklere sahip çok sayıda biyoaktif bileşen içermeleri nedeniyle fitokimyasallar, sentetik pestisitlere umut vadeden alternatifler olarak değerlendirilmektedir. Bu bileşiklerin büyük çoğunluğu; (1) fitovolatilleri ve glikozitleri içeren terpenler ile (2) fenolik asitler, lignin, tanenler, alkaloidler gibi steroller ve fenolik maddeler ile insektisidal etki gösteren kükürt ve azot içeren bileşikler dâhil olmak üzere bitkisel ikincil metabolitlerden oluşmaktadır. İkincil metabolitler, toksin, büyüme düzenleyici, itici ve beslenme caydırıcı olarak işlev görerek bitkilerin böcek zararlılarına karşı savunmasında merkezi bir rol oynar [45]. Ayrıca solunumu inhibe ederek ve metabolik bozukluklara yol açarak da etkili olabilirler. Fitokimyasallar; içerdiği bileşiklerin türüne bağlı olarak çözücü ekstraksiyonu, mikrodalga destekli ekstraksiyon ve ultrason destekli ekstraksiyon gibi yöntemlerle bitkisel materyallerden izole edilebilir [46]. Bazı uçucu yağların pestisit etkileri **Tablo 6**'da sunulmaktadır.

Tablo 6. Bazı uçucu yağların pestisit etkileri [2]

Uçucu yağ	Etki modu
<i>Insektisitler ve Büyüme Düzenleyiciler</i>	
Eugenol	Termitisit, fumigant, beslenme engelleyici ve birçok türe karşı toksik
Orange oil extracts from citrus peel (containing 92% d-Limonene)	Formosan yeraltı termitinde (<i>Coptotermes formosanus shiraki</i>) beş gün içinde %96 ve %98 ölüm oranı
Citronellal, eugenol, menthol, pulegone, and thymol	Çeşitli akar türlerine karşı orta düzeyde etkilidir
Diterpene, 3-epicaryotin	Avrupa mısır kurdunun gelişimini azaltır
Menthol	Avrupa mısır kurdunun gelişimini azaltır
1, 8-Cineole from <i>Artemisia annua</i>	Potansiyel insektisit
Turmeric plant oil	Zararlı mücadelesinde oldukça etkilidir
<i>Fumigantlar</i>	
Pulegone, linalool, and limonene	Pirinç böceklerine karşı etkili fumigantlar
Mentha citrata oil containing linalool and linalylacetate	Pirinç böcekleri için önemli derecede toksiktir
Trans-anethol, thymol, 1, 8-cineole, carvacrol, terpineol, and linalool	<i>Tribolium castaneum</i> 'a karşı etkili fumigantlar
Anethol combined with 1, 8-cineole (1:1)	<i>T. castaneum</i> popülasyonunu azaltır
<i>Beslenme engelleyiciler</i>	
Thymol, citronellal, and a-terpineol	Tütün yaprak kurduna karşı beslenmeyi engelleyici olarak etkilidir.
1, 8- Cineol	<i>T. castaneum</i> 'a karşı beslenme engelleyici
Terpenoid lactone	Ambar böceğine karşı beslenme engelleyici
Essential oil of marjoram and rosemary oil	Soğan tripsine karşı beslenme engelleyici
Essential oils from <i>Elsholtzia densa</i> and <i>E. piulosa</i>	<i>S. litura</i> 'nın üçüncü larva dönemine karşı beslenme engelleyici
<i>Uzaklaştırıcılar</i>	

Uçucu yağ	Etki modu
Monoterpenes, eremophilane sesquiterpenes, eremophilane sesquiterpenes derivatives from the heartwood of Alaska yellow cedar	<i>Ixodes scapularis</i> ve <i>Aedes aegypti</i> erginlerine karşı etkilidir
Carvacrol	Keneler, pireler ve sivrisineklere karşı etkilidir
Citronellal	Sivrisineklere karşı eugenol ve cineolden daha etkilidir
Essential oils from <i>Cinnamomum</i> species	Sivrisinek larvasitlerine karşı etkilidir
Fruit oil of <i>Piper retrofractum</i>	%0,5–2 konsantrasyonda <i>T. castaneum</i> 'a karşı yüksek derecede (%52–90) repellens etkisi vardır
<i>Yumurtlama Engelleyiciler ve Ovikidler</i>	
1, 8-Cineole and marjoram at concentrations of 1.0%	Yumurta bırakma oranını %30–50 azaltır
Calamus oil	<i>Callosobruchus maculatus</i> 'un yumurta bırakmasını engeller
Garlic oil	yumurta bırakmayı engelleyici, yumurtalara karşı toksiktir
Essential oil of <i>Aegle marmelos</i>	<i>Spilosoma obliqua</i> 'da (250 mg/250 yumurta) yumurta açılımını %99,5 oranında azaltmaktadır
1-carvone	7,22 mg/cm ² yüzey uygulamasında <i>T. castaneum</i> 'un yumurta açılımını tamamen baskılar
Carvacrol, carveol, geraniol, carvones, linalool, menthol, terpinol, thymol, fenchone, menthone, pulegone, thujone, verbenone, cinnamaldehyde, citral, citronellal, and cinnamic acid	<i>Musca domestica</i> yumurtalarına karşı ovisidal etki
<i>Çekiciler</i>	
Geraniol and eugenol	Japon böceklerini cezbetmek için tuzaklarda kullanılan etkili çekiciler

Uçucu yağ	Etki modu
Methyl-eugenol	Doğu meyve sineklerini yakalamak için kullanılır
Cinnamyl alcohol, 4-methoxy-cinnamaldehyde, geranylacetone, and a-terpineol	Ergin mısır kök kurdu böcekleri için çekicidir
1, 8-Cineole	Batı çiçek tripsine karşı çekici
Terpenes and geraniol from lemon essential oil	Tripsler, mantar sinekleri, unlu bitler, kabuklu bitler ve Japon böcekleri için çekicidir
Cis-jasmone	Ergin Lepidoptera bireyleri için etkili çekici
Sandalwood oil, basil oil, grapefruit oil, and other aromatics	Sera beyazsineğine yönelik çekicidir

Uçucu yağlar doğru şekilde kullanıldığında insanlar ve hayvanlar için kimyasal pestisitlere göre genellikle daha güvenlidir, ancak bazıları dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Etkileri çoğu zaman tek bir bileşenden değil, bir arada çalışan birçok doğal bileşenin kombinasyonundan kaynaklanır. Bir yağın kalitesi, kullanılan bitki kısmına, ekstraksiyon yöntemine, yetiştirildiği yere ve mevsime bağlı olarak değişebilir [47].

En yaygın kullanılan bitkisel böcek ilaçlarından biri, neem ağacından (*Azadirachta indica*) elde edilen neem yağıdır. Etkin bileşenleri, özellikle azadirachtin ve solanin, böceklerin gelişimini bozar ve beslenmelerini engeller [48]. Neem ürünleri, unlu bitler, yaprak bitleri, tripsler, beyaz sinekler ve çekirgeler dahil çeşitli böcekleri kontrol edebilir. Azadirachtin bir böcek vücuduna (yutma veya fiziksel temas yoluyla) girdiğinde, normal şekilde beslenmesini veya büyümesini engeller. Ayrıca itici özelliklere sahiptir [49].

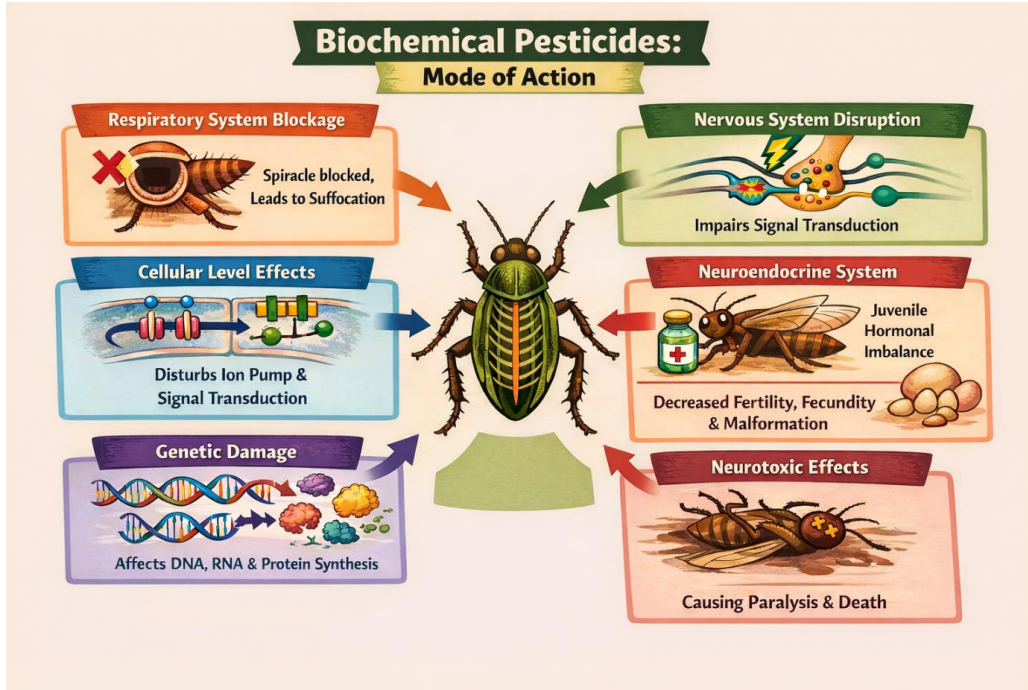
Ticari olarak satılan biyokimyasal pestisitler genellikle %3 neem yağı formülasyonları veya %5 neem tohumu özüt konsantreleri içerir ve ana tarım zararlılarıyla mücadele için yaklaşık 25 kg ha⁻¹ uygulama yapılır [12]. Araştırmalar, neem yağının entomopatojen fungus *Beauveria bassiana* ile kombinasyonunun sebze kültürlerinde emici zararlılara karşı güçlü bir kontrol sağlayabileceğini göstermiştir [50]. Ancak azadirachtin konsantrasyonu, hedef olmayan organizmalara olumsuz etkileri önlemek için dikkatlice optimize edilmelidir [51]. Diğer önemli bitki kaynaklı böcek ilacı bileşenlerinden biri, krizantem çiçeklerinden (*Tanacetum cinerariifolium*) elde edilen piretrin'dir. Piretrinler, öncelikle otçul böceklerin beslenmesini engelleyerek etkili olur ve böcek öldürücü

özellikleri açısından geniş çapta incelenmiştir [52]. Diğer bir aktif bileşen ise kekik bitkisinin yapraklarından elde edilen kekik yağıdır ve başlıca aktif bileşenlerinden biri timoldür. Zararlıları uzaklaştırarak etkili olmasının yanı sıra bazı mantar kaynaklı bitki hastalıklarına karşı da aktivite gösterir [49]. Bunun yanı sıra yaygın olarak kullanılan bitki bazlı biyopestisitler arasında Nikotin (*Nicotiana* türlerinden), Piretrum (*Dalmatia pyrethrum*), Ryanodin (Ryania; *Ryania speciosa*'dan) bulunur [12]. Ticari olarak satılan biyokimyasal bitki bazlı pestisitler **Tablo 7**'de verilmiştir.

Tablo 7. Ticari olarak temin edilebilen biyokimyasal pestisitler listesi [12]

Bitki kaynağı	Hedef zararlı	Ticari ad / bileşenler
<i>Azadirachta</i> spp., <i>Nicotiana</i> spp.,	Bakla yaprak biti, koza kurtları, yaprak bitleri, yaprak pireleri, tripsler, beyaz sinek, Bakla/kapsül kurdu, meyve kurdu, lahana güvesi	Essential oils, nicotine, azadirachtin, salanin, nimbin, (leaf, seed, kernel) nimbecidin, bionimbecidin
<i>Chrysanthemum cinerariaefolium</i> <i>Lonchocarpus</i> spp. <i>Ryania</i> spp.	Hamamböcekleri, karıncalar, sivrisinekler ve termitler gibi sürünen ve uçan böcekler	Pyrethrium, rotenone, ryanodine
<i>Artemisia annua</i>	<i>Helicoverpa armigera</i>	Essential oils from leaf and seed
<i>Vinca rosea</i>	<i>Helicoverpa armigera</i>	Essential oils from leaf and seed
<i>Ocimum basilicum</i> , <i>Salvia Officinalis</i>	<i>Aphis craccivora</i> Koch, <i>Agrotis ipsilon</i>	Essential oils form aerial parts leaves
<i>Citrus</i> spp.	Pireler, yaprak bitleri, akarlar, kâğıt yaban arısı, ev cırcır böceği	D-limonene linalool
<i>Schoenocaulon officinale</i>	Böcekler, kabarcık böcekleri, sinek, tırtıllar, patates yaprak piresi	Sabadilla dust
<i>Adenium obesum</i>	Pamuk zararlısı	Chacals Baobab (Senegal)

Bitkisel pestisitler çeşitli şekillerde etki gösterir. Bir böcek vücuduna dış deri yoluyla, solunum yoluyla ya da besinle birlikte girilebilirler. Vücuda girdiklerinde, böceğin vücut fonksiyonlarını, kimyasal süreçlerini ve sinir sistemini etkilerler. Bu maddelerden bazıları, böceğin solunum deliklerini (spiraküller) tıkararak böceğin boğulmasına yol açar. Hücre düzeyinde, bitkisel pestisitler, hücre zarlarındaki iyon kanalları ve pompalarını bozarak böceğin vücudunda sinyallerin iletilme şeklini bozar. Ayrıca böceğin hormon sistemini, özellikle büyüme ve gelişmeden sorumlu hormonları etkileyerek şekil bozukluklarına neden olabilirler. Diğer etkiler arasında çiftleşme süresinin kısalması, daha az yumurta üretilmesi ve yumurta hayatta kalma oranının düşmesi bulunur. Uçucu yağlardaki bazı bileşikler, örneğin monoterenler, böceğin sinir sisteminde, sinir sinyalleri için gerekli önemli bir enzimi (asetilkolinesteraz) bloke ederek etki gösterir. Bu durum felce ve sonunda böceğin ölümüne yol açar. Bu maddeler ayrıca böcek hücrelerinde DNA, RNA ve protein üretimini de bozabilir [12] (Şekil 8).



Şekil 8. Biyokimyasal pestisitlerin etki mekanizması. Kaynak: ChatGPT (DALL•E) tarafından oluşturulmuştur.

2.2.2 Semiyokimyasallar

Semiyokimyasallar, organizmalar tarafından doğal olarak üretilen ve kimyasal sinyaller aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurmalarını sağlayan kimyasal bileşiklerdir. Böceklerin besin, tehlike ve çiftleşme gibi konularda birbirleriyle iletişim kurmasına yardımcı olurlar. Semiyokimyasallar, zararlı yönetiminde zararlıların izlenmesi ve kontrol edilmesi amacıyla kullanılabilir. Ancak zararlıları doğrudan öldürmezler; bunun yerine zararlıların iletişim biçimlerini etkileyerek ve normal davranışlarını bozarak etki gösterirler.

Semiyokimyasallar iki ana gruba ayrılır: aynı tür içerisindeki bireyler arasında etkili olan feromonlar ve farklı türler arasında etkili olan allelokimyasallar [49, 53].

Feromonlar arasında, alıcı organizmada anında davranışsal değişikliklere neden olan salıcı (releaser) feromonlar yer alır. Bu gruba eşeyssel feromonlar, agregasyon feromonları, alarm feromonları ve iz feromonları dahildir. Bazı feromonlar zararlıların davranışlarını doğrudan ve hızlı bir şekilde değiştirir. Örneğin agregasyon feromonları böcekleri bir besin kaynağına çekerken, alarm feromonları tehlikeyi bildirerek bireylerin uzaklaşmasını sağlar; iz feromonları böceklerin bir yolu takip etmesine yardımcı olurken, eşeyssel feromonlar dişi ve erkek bireylerin çiftleşmek üzere birbirlerini bulmalarını sağlar. Sentetik eşeyssel feromonlar, zararlı mücadelesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu feromonlar, zararlı popülasyonlarının izlenmesi, çiftleşmenin engellenmesi ve böcek popülasyonlarının toplu olarak tuzaklanması amacıyla sıklıkla uygulanmaktadır. Yapay eşeyssel feromonlar; bir tarladaki zararlı yoğunluğunu belirlemek, böcekleri şaşırtarak çiftleşmelerini önlemek ve çok sayıda zararlıyı tuzaklarla yakalamak için kullanılmaktadır. Bu yöntem, zararlı popülasyonlarını azaltırken zararlı ve çevre için riskli kimyasal ilaçların kullanımını da sınırlandırmaktadır [12].

Allelokimyasallar, bir organizma tarafından salınan ve başka bir türe ait bireyler tarafından algılanarak tepki verilen maddelerdir. Allelokimyasallar dört gruba ayrılır: allomonlar (verici organizma için faydalı), kairomonlar (alıcı organizma için faydalı), sinomonlar (her iki taraf için faydalı) ve apneumonlar (canlı olmayan kaynaklardan salınanlar). Örneğin kairomonlar genellikle bitkilerden türetilir ve zararlılar için çekici etki gösterir. Bu maddeler esas olarak Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programları kapsamında zararlı izleme amacıyla kullanılır. Bir kairomonun kahve meyve kurdunun kontrolünde kullanımı buna örnek olarak verilebilir. Olgun kahve meyvelerinin aromasını taklit eden bu kairomon, dişi böcekleri cezbederek tuzaklara yönlendirir. Tuzak

sistemleriyle birlikte kullanıldığında, bulaşıklık düzeylerinin etkin biçimde izlenmesine olanak sağlar ve zararlı mücadelesine yönelik zamanında karar alınmasını destekler [49].

Semiyokimyasalların çeşitli davranışsal ve fizyolojik etkileri bilinmekle birlikte, zararlı yönetiminde pest davranışlarını etkilemeleri temel olarak üç mekanizma yoluyla gerçekleşir [49]:

- Çekicilik: Semiyokimyasal, zararlıları belirli bir noktaya çeken bir yem görevi görür ve burada yakalanmalarını sağlar.
- Çiftleşmenin engellenmesi/şaşırtma: Semiyokimyasal, zararlıların yön bulma ve iletişim sistemlerini bozarak bireylerin eş bulmasını engeller. Bunun sonucunda üreme azalır ve zararlı popülasyonu düşer.
- Uzaklaştırma: Bazı semiyokimyasallar zararlıları bitkilerden uzaklaştırarak ürünlerin zarar görmesini önler.

Çiftçiler ve zararlı yönetimi uzmanları, yalnızca kimyasal pestisitlere bağımlı kalmadan semiyokimyasalları kullanarak zararlıları izleyebilir, çekebilir, uzaklaştırabilir veya şaşırtabilir. Gerek geleneksel gerekse alternatif pestisitlerin etkin şekilde uygulanabilmesi için zararlı popülasyonlarının sürekli izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Ek bir yaklaşım olarak, böceklerin beslenmesini baskılayan semiyokimyasallar da kullanılabilir. Ancak en yaygın ve pratik yöntem, semiyokimyasalların zararlıları tuzaklara çekmek amacıyla uygulanmasıdır. Bu sayede zararlılar yakalanarak etkisiz hale getirilir, popülasyonlar azaltılır ve kimyasal ilaçlama ihtiyacı önemli ölçüde düşürülür [54].

Semiyokimyasalların uygulanması büyük ölçüde ürün formülasyonuna ve etki mekanizmasına bağlıdır. Çoğu durumda bu maddeler, aktif bileşiği çevreye yavaş ve kontrollü bir şekilde salan dağıtıcılar (dispenserler) içerisine yerleştirilir. Bu dağıtıcılar flakon, küçük kesecik, kauçuk tüp, kapsül veya benzeri yapılar şeklinde olabilir. Örneğin domates yaprak galeri güvesini çekmek üzere tasarlanan feromon salıcı kapsüller, böcekleri yakalamak amacıyla tuzakların içerisine yerleştirilebilir (**Şekil 9**). Etkinliğin sağlanabilmesi için semiyokimyasal dağıtıcıların tarlada stratejik noktalara yerleştirilmesi gerekmektedir. Çoğu zaman tuzak sistemleriyle birlikte kullanılarak zararlı kontrolü veya izleme gerçekleştirilir. Aktif bileşiklerin etki alanı sınırlı olduğundan, tüm tarla alanının kapsanabilmesi için genellikle birden fazla dağıtıcıya ihtiyaç duyulur. Tatlı mısır zararlılarında üremeyi baskılamak amacıyla bir dala asılmış feromon dağıtıcısı **Şekil 10**'da gösterilmiştir. Ticari olarak temin edilebilen semiyokimyasalların listesi **Tablo 8**'de sunulmaktadır.



Şekil 9. Domates yaprak galerigüvesinin ergin bireylerini delta tuzağına çeken bir feromon dağıtıcısı. GörSEL: CABI tarafından sağlanmış olup CC BY-NC-SA 4.0 lisansı kapsamında kullanılmaktadır [55].



Şekil 10. Tatlı mısır zararlılarının üremesini engellemek amacıyla bir dala tutturulmuş semiyokimyasal (feromon) dağıtıcısı. © Eugene E. Nelson / Bugwood.org [55].

Semiyokimyasallar iki temel amaç doğrultusunda kullanılabilir: doğrudan ve dolaylı kontrol. Bu kapsamda başlıca stratejiler şunlardır [49]:

- *Kitle halinde tuzaklama ve çek-öldür:* Semiyokimyasal dağıtıcılar tuzakların içine yerleştirilir veya feromon kaplı yapışkan tuzaklar gibi tuzak sistemlerine entegre edilir. Bu yöntemle zararlılar ya popülasyondan uzaklaştırılır (kitle halinde tuzaklama) ya da doğrudan etkisiz hale getirilir (çek-öldür).
- *Çiftleşmenin engellenmesi:* Eşeyssel feromon dağıtıcıları, zararlıların eş bulmasını önlemek amacıyla tarla genelinde stratejik olarak dağıtılır.
- *Tespit ve izleme:* Feromon veya kairomonla cezbedilmiş tuzaklar, zararlıların varlığını belirlemek ya da popülasyon yoğunluğunu tahmin etmek için kullanılır. Bu sayede zararlı mücadelesinin en uygun zamanda uygulanmasına karar verilmesine yardımcı olunur.

Tablo 8. Ticari olarak mevcut semiyokimyasallar

Ürün adı (Üretici, ülke)	Zararlılar	Etki
Pherogen Spray FAW® (Provivi do Brasil Serviços Agrícolas Ltda, Brasil)	Fall Armyworm (<i>Spodoptera frugiperda</i>)	Erkeklerin dişileri bulmasını engelleyen cinsiyet feromonlarına dayanır. Sonuç olarak, Fall Armyworm popülasyonu azalır. Fall Armyworm, dünya çapında en yıkıcı tarım zararlılarından biridir ve özellikle mısır, soya, pamuk ve diğer bitkileri etkiler.
Pherodis® (Koppert B. V., The Netherlands)	To attract male moths, beetles, mealybugs and flies to traps	Domates yaprak delgini böceğinin erkeklerini çeken cinsiyet feromonları içeren bir üründür. Zararlıyı kontrol etmek için ürün, tuzaklarla birlikte kullanılır ve zararlıların erken tespitini sağlar.
Bio Broca® (Bio Controle - Métodos de Controle de Pragas)	Coffee berry borer (<i>Hypothenemus hampei</i>)	Kairomon içeren bir semiyokimyasal maddedir. Kahve meyvesi böceğini (coffee berry borer) yönetebilir. Bu durumda, kairomon olgun kahve meyvesi kokusunu taklit eder ve zararlının dişilerini çeker. Bio Broca®, tuzaklarla birlikte kullanılarak kahve meyvesi böceği istilasının seviyesini izlemeye ve müdahale zamanını belirlemeye yardımcı olur.

Feromonların Avantajları [2]

- Düşük dozlarda yüksek etkinlik: Çok küçük miktarlardaki feromonlar, geniş böcek popülasyonlarını çekmek ve kontrol etmek için yeterlidir; bu durum yöntemi ekonomik açıdan avantajlı kılar.
- Çevre dostu ve güvenli: Feromon temelli uygulamalar toksik değildir ve ekosistemler ile insan sağlığı açısından herhangi bir risk oluşturmaz.
- Yüksek tür özgüllüğü: Yalnızca hedef zararlı tür etkilenir; hedef dışı organizmalar ve faydalı böcekler zarar görmez.

- Uzun mesafeden çekicilik: Feromon tuzakları böcekleri uzak mesafelerden cezbederek daha az iş gücüyle etkili kontrol sağlar.
- Güvenilir popülasyon izleme: Zararlı popülasyon dinamiklerinin takip edilmesi için basit ve doğru bir yöntem sunar.
- Çok yönlü izleme imkânı: Feromon teknikleri, zararlıların hareketlerinin ve giriş noktalarının izlenmesine uygundur.
- İstilacı türlerin erken tespiti: Yeni veya istilacı zararlıların hızlı bir şekilde belirlenmesini sağlayarak zamanında önleme ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesine katkı sunar.

Feromon Temelli Teknolojilerin Sınırlılıkları [2]

- Zararlı türleri açısından sınırlı kapsama alanı: Ekonomik açıdan önemli tüm zararlılar için henüz feromonlar tanımlanmamış veya geliştirilmemiştir.
- Cinsiyete özgü etki: Yüksek özgülükleri nedeniyle birçok eşeyssel feromon yalnızca tek bir cinsi (genellikle erkekleri) çekerken, diğer cins zararlı olmaya devam edebilir.
- Uzmanlık gereksinimi: Başarılı uygulama, teknik bilgi ve beceriye sahip eğitimli personel gerektirir; bu hizmetler çoğunlukla bireysel çiftçilerden ziyade kamu kurumları veya uzman kuruluşlar tarafından sağlanmaktadır.
- Kısa vadeli mücadeleye uygun olmama: Feromonlar, kimyasal pestisitler gibi ani ve hızlı bir baskılama sağlamaz; bu nedenle uzun vadeli EZY stratejilerinin bir parçası olarak kullanılmaları daha uygundur.
- Çevresel faktörlere duyarlılık: Feromon teknolojileri teknik açıdan hassas olup sıcaklık, rüzgâr, yağış ve basınç gibi çevresel koşullardan etkilenir; bu nedenle üretim, depolama, taşıma ve tarla uygulamalarında dikkatli bir yönetim gerektirir.

2.2.3. Böcek Gelişim Düzenleyicileri

Böcek gelişim düzenleyicileri (Insect Growth Regulators, IGR'ler), böceklerin büyüme ve gelişim süreçlerine müdahale eden insektisitlerdir. Doğal hormonları taklit ederek veya bu hormonların etkisini engelleyerek böceklerin gelişimini ve üremesini bozarlar. Böcekleri doğrudan ve hemen öldürmezler; bunun yerine erginleşmelerini ya da çoğalmalarını önleyerek zamanla popülasyonun azalmasına neden olurlar. Sivrisinekler, pireler ve hamam böcekleri gibi farklı böcek gruplarına karşı etkilidirler. IGR'lerin türleri ve etki mekanizmaları **Tablo 9**'da özetlenmiştir. Bu grup başlıca juvenil hormon analogları (JHA'lar), ekdisteroid analogları ve kitin sentez inhibitörlerini (CSI'ler) içermektedir [2, 56].

Tablo 9. Ticari olarak temin edilebilen IGR (Böcek Gelişim Düzenleyicisi) formülasyonları [2]

IGR	IGR bileşiği/ ticari adı	Etki modu	Hedef Zararlı	Faydaları
Gençlik hormonu benzeri maddeler (JHAs)	Methoprene (Altosid) Hydroprene (Gencrol) Kinoprene (Enstar AQ) Fenoxycarb (Insegar 25 WG) Pyriproxyfen (NyGuard, Admiral 10 EC)	Bu madde, juvenil hormonu (JH) taklit ederek böceklerin erişkin evreye geçişini engeller. Etkilenen bireyler larva veya nimf evresinde kalır ve sonuçta ölümlerle sonlanır.	Pireler, sivrisinekler, hamamböcekleri, karıncalar ve depo zararlıları.	Böcek yaşam döngülerinde uzun süreli kontrol için etkilidir. İnsanlar, evcil hayvanlar ve yararlı böcekler için güvenlidir. Sıvı, aerosol, yem ve sisleme formülasyonlarında iyi çalışır.
Kitin sentez inhibitörleri (CSIs)	Diflubenzuron (Dimilin) Chlorfluazuron (Atabron) Flufenoxuron (Cascade) Hexaflumuron (Consult 10 EC) Lufenuron (Match®) Bistrifluoron (Xterm) Novaluron (Pedestal, Mosquiron) Noviflumuron (Recruit III) Teflubenzuron (Nomolt SC) Triflumuron (Alsystin) Fluazuron (Acatek) Flucycloxuron (Andalin) Buprofezin (Applaud) Etoxazole (TetraSan 5 WDG) Cyromazine (Larvade, Neporex) Dicyclanil (Clikzin)	Böceklerin dış iskeletin temel bileşeni olan kitin üretimini engeller. Dökülme (larvalardan ergin evreye geçiş) başarısızlığına yol açar ve ölümlerle sonuçlanır	Sivrisinekler, hamamböcekleri, pireler, termitler ve depo zararlıları	Böceklerin ergin evreye ulaşmasını ve üremesini engeller. Yem, sprey ve granül formülasyonlarda iyi çalışır
Ecdyoidler, dökülme hormonu olarak da adlandırılır (MH)	Tebufenozide (Mimic) Methoxyfenozide (Runner 24% SC) Halofenozide (Mach 2) Chromafenozide (Matrif FI, Matric DI)	Dökülme hormonu ekdizon ile etkileşime girer. Böceklerin yaşam evreleri arasında geçiş yapmasını engeller.	Beyazsinekler, yaprak bitleri, tırtıllar, tripsler ve sivrisinekler	Organik ve bitkisel kaynaklı bir seçenektir. Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programlarında iyi çalışır. Bazı böceklerde beslenmeyi engeller ve böcekleri uzaklaştırır

Juvenil Hormon Analogları (Juvenoidler, JHA taklitçileri). Juvenoidler, juvenil hormonu taklit eden sentetik bileşiklerdir ve en etkili hormonal insektisitler arasında yer alır. Olgunlaşmamış böceklerde normal metamorfozu engelleyerek onların juvenil durumda kalmasına neden olurlar (ergin döneme deri değiştirmelerini önlerler). Bunun sonucunda böcekler anormal deri değiştirme geçirir; aşırı büyümüş larvalar veya larva, pupa ve ergin evreleri arasında yer alan, yaşama yeteneği olmayan anormal ara formlar oluşur. *Methoprene*, horn fly larvaları, depolanmış tütün zararlıları, sera homopteri, kırmızı karıncalar ve sebze ile süs bitkilerindeki yaprak galerisi sineklerine karşı etkili, yaygın kullanılan bir juvenil hormon taklitçisidir.

Ekdisteroid Analogları (Ekdisoidler). Bu bileşikler, doğal böcek hormonu olan ekdizonu taklit eder. Böceklere uygulandığında normal kutikula oluşumunu bozarak kusurlu bir dış örtü oluşmasına neden olurlar. Gelişim anormal şekilde hızlanır, gerekli büyüme evreleri atlanır ve balmumu veya pul gibi koruyucu tabakalardan yoksun bir integüment oluşur. Bu durum su kaybına, hassasiyete ve nihayetinde ölüme yol açar.

Kitin Sentezi İnhibitörleri (CSI'lar). Benzoilfenil üre grubundaki bileşikler, kitin sentaz enzimini inhibe ederek kitin üretimini engeller. Önemli örnekler arasında diflubenzuron (Dimilin) ve penfluron bulunmaktadır. Bu insektisitler: Deri değiştirmeyi engeller, ağız parçalarında deformasyonlara neden olur, pupadan ergin çıkışını engeller, çoğu zaman ölüme yol açar, güçlü ovisit (yumurta öldürücü) etki gösterir. CSI'lar birçok ülkede ruhsatlıdır ve soya fasulyesi, pamuk, elma, meyve ve sebzeler, orman ağaçları, sivrisinekler ve depolanmış tahıl zararlılarına karşı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Anti-juvenil hormon bileşikleri (prekosenler) ve neem bazlı doğal IGR'ler de kullanılmaktadır. *Anti-Juvenil Hormon Bileşikleri (Prekosenler).* *Ageratum houstonianum* gibi bitkilerde bulunan prekosenler, erken metamorfoza (prekos metamorfoz) ve kısırılığa neden olarak böcek gelişimini bozar. Juvenil hormon üreten bezler olan corpora allata'yı hedef alarak potansiyel insektisit olarak etki gösterirler. Bu bezlere zarar vererek juvenil hormon üretimini engeller ve normal böcek gelişimini bozarlar. Olgunlaşmamış böceklere uygulandığında, üreme yeteneği olmayan küçük yapılı erginlerin erken oluşmasına neden olur ve bu bireyler kısa süre sonra ölür.

Neem Bazlı Doğal IGR'ler. Neem yaprak ve tohum ekstraktları, başlıca aktif bileşen olarak azadiraktin içerir. Böceklere uygulandığında bu bileşikler: büyümeyi engeller, şekil bozukluklarına neden olur, yaşama oranını azaltır, üreme kapasitesini düşürür. Bu özellikleri sayesinde etkili doğal böcek gelişim düzenleyicileri olarak kullanılmaktadır.

Böcek gelişim düzenleyicilerinde uygulama zamanlaması büyük önem taşır. Ürünlerin kalıntı etkisi kısa sürelidir ve ultraviyole ışık dayanıklılığı azaltabilir; bu nedenle genellikle tekrarlanan uygulamalar gereklidir. IGR'ler, tam başkalaşım geçiren böceklerin erken yaşam evrelerinde (yumurta, larva, pupa ve ergin) en etkilidir. Duyarlı yaşam evreleri görüldüğünde uygulanmalı ve bitkinin tüm kısımları iyice kaplanmalıdır.

IGR'lerin Avantajları

- Haftalar hatta aylar boyunca etkili kalabilen uzun süreli kalıntı etki sağlar
- Böcek yaşam döngüsünü kesintiye uğratarak gelecekteki zararlı salgınlarını önlemeye yardımcı olur
- İnsanlar, evcil hayvanlar ve hedef dışı organizmalar için düşük risk taşır
- Kombine etki sağlamak amacıyla geleneksel insektisitlerle birlikte kullanılabilir
- Zararlı popülasyonlarında pestisit direncinin gelişimini yavaşlatmaya yardımcı olur

2.3. Bitkiye Entegre Edilmiş Koruyucular

Bitkiye entegre edilmiş koruyucular (PIP'ler), belirli genetik materyalin bitki DNA'sına aktarılmasından sonra bitki tarafından doğrudan üretilen zararlı kontrol maddeleridir [57]. Örneğin, bilim insanları *Bacillus thuringiensis* Cry proteinini kodlayan bir geni bir ürüne aktarabilir. Bitki bu şekilde değiştirildiğinde, bitkiyle beslenen bazı böcekler için toksik olan bu proteini sürekli olarak üretir [7]. Birinci nesil insektisit PIP'ler, toprak bakterisi *B. thuringiensis*'ten alınan transgenleri içeren genetiği değiştirilmiş bitkilerde ifade edilen Cry proteinleridir. Son nesil çift iplikli ribonükleik asit (dsRNA) PIP'leri ise yakın zamanda onaylanmıştır. Bu stratejide zararlılar, hücrelerindeki temel haberci RNA'nın parçalanmasını tetikleyen çift iplikli RNA moleküllerini alır; bu durum büyümenin baskılanmasına veya ölüme yol açar [57].

Amerika Birleşik Devletleri'nde PIP'ler, ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından pestisit olarak düzenlenmektedir. Ajans, bitkinin tamamını değil, pestisit özelliği gösteren proteinin kendisini ve bitkinin bu proteini üretmesini sağlayan genetik materyali denetlemektedir [58]. Bir PIP'in kullanımına izin verilmeden önce EPA, insan sağlığı veya çevre için kabul edilemez riskler oluşturmadığından emin olmak amacıyla ayrıntılı bir risk değerlendirmesi yürütür [59]. 1995–2025 yılları arasında kayıt altına alınmış PIP aktif maddeleri ABD EPA'nın web sayfasında mevcuttur [60]. Ticari olarak mevcut PIP'lerin listesi Tablo 10'da sunulmaktadır.

Tablo 10. Tarım zararlılarına karşı kullanılan bitkiye entegre edilmiş koruyucuların listesi [12]

Bitki	Entegre edilmiş gen	Böceğe karşı direnç	Ticari adı
Pamuk	Cry1Ac toxins from <i>Bacillus thuringiensis</i>	Pamuk ve tütün koza kurtları	Bollgard
Mısır	Cry1Ab, 1F, 9c toxins from <i>Bacillus thuringiensis</i>	Avrupa mısır kurdu	Yieldgard, Knockout, Herculex I, Starlink, Maximizer
Pirinç	Cry1C from <i>Bacillus thuringiensis</i>	Yaprak bükenler (<i>Cnaphalocrocis medinalis</i>) ve gövde kurtları	Trait in development
Tütün	QB protein of photosystem II from mutant <i>Amaranthus</i>	Atrazine dirençli	
Patlıcan	Cry1Ac from soil <i>Bacillus thuringiensis</i>	Sürgün ve meyve kurdu (<i>Leucinodes orbonalis</i>)	Bt Brinjal
Domates	Cry1Ab gene of <i>Bacillus thuringiensis</i>	<i>H. armigera</i> ve <i>S. litura</i> 'nın ikinci instar (evre) larvaları	Bt tomato

3. Biyopestisit Formülasyonları

Çoğu durumda biyopestisitler, çiftçilerin standart ekipmanlarla kolayca uygulayabilmesini sağlamak amacıyla geleneksel sentetik pestisitlere benzer şekilde formüle edilir. Ancak biyopestisitler canlı organizmalardan elde edildiği için, formülasyon ve depolama sırasında biyolojik canlılıklarının korunması büyük önem taşır. Biyopestisit ürünleri hem aktif maddeler hem de inert (etkisiz) bileşenler içerir. Aktif madde hedef zararlıyı kontrol etmekten sorumluyken, inert bileşenler ürünün stabilitesini, uygulama etkinliğini ve genel performansını artırmaya hizmet eder. Esasen bir pestisit formülasyonu, bu aktif ve inaktif maddelerin birleşiminden oluşur [12]. Formülasyon tipine göre biyopestisitler genel olarak iki ana gruba ayrılır [12, 61]: Kuru ve sıvı formülasyonlar

3.1. Kuru formülasyonlar

Kuru formülasyonlar; toz halinde uygulanan preparatlar, granüller, tohum ilaçları, ıslanabilir tozlar ve suda dağılabilen granülleri içerir.

Toz formülasyonlarında aktif madde genellikle ürünün yaklaşık %10'unu oluşturur ve talk veya kil gibi ince öğütülmüş mineral taşıyıcılara adsorbe edilerek uygulanır. Parçacık boyutları genellikle 50–100 µm arasındadır. Kalan bileşenler; ultraviyole koruyucular, yüzeylere tutunmayı artıran yapıştırıcı ajanlar (stickerlar) ve topaklanmayı önleyen akış düzenleyicilerden oluşur.

Granül formülasyonlar genellikle %2–20 oranında aktif madde içerir. Aktif madde granüllerin yüzeyine kaplanabilir veya iç yapısına emdirilebilir. Uygulamadan sonra aktif maddenin salım hızını düzenlemek amacıyla granüller reçine veya polimer tabakalarla kaplanabilir. Bu ürünler başlıca toprakta yaşayan böcekler, yabancı otlar ve nematodların kontrolünde kullanılır ve bitki kökleri aracılığıyla alınır. Granüller genellikle 100–600 µm büyüklüğünde iri partiküllerden oluşur ve kaolin, silika, nişasta, polimerler ve yer fıstığı artıkları gibi materyallerden üretilir.

Tohum ilaçları, aktif maddenin toz bir taşıyıcı ve uygun inert maddelerle karıştırılarak tohum yüzeyine etkili şekilde yapışmasını sağlayan biyopestisit formülasyonlarıdır. Bu tozlar, tohumların formülasyonla tamburlanması veya karıştırılması yoluyla uygulanır ve ürünün tohum kabuğunu eşit şekilde kaplaması sağlanır. Ayrıca, tohum ilaçlama ürünleri genellikle kırmızı pigmentler gibi renklendiriciler içerir. Bu renklendiriciler, işlem görmüş tohumların açıkça tanınmasını sağlayan bir güvenlik işareti görevi görür ve gıda veya yem olarak yanlışlıkla kullanılmasını önler.

Islanabilir tozlar, su ile karıştırılarak süspansiyon oluşturacak şekilde uygulanan ince öğütülmüş kuru formülasyonlardır. Aktif maddelerin; dağıtıcı ajanlar, yüzey aktif maddeler, sinerjistler, erime düzenleyiciler ve inert taşıyıcılarla birleştirilmesiyle üretilir. Bu ürünler toz oluşturduğundan, üretim ve uygulama sırasında sağlık risklerini azaltmak için sıkı güvenlik önlemleri gereklidir. Buna rağmen, uzun raf ömrü, su ile iyi uyumluluk ve standart püskürtme ekipmanlarıyla kullanılabilirlikleri nedeniyle değer görürler.

Suda dağılabilen granüller, su içinde süspansiyon olacak şekilde tasarlanmıştır ve ıslanabilir tozlarla ilişkili birçok sınırlamayı ortadan kaldırır. Neredeyse tozsuz olmaları ve geliştirilmiş depolama stabilitesi sunmaları sayesinde daha güvenli ve kullanımı daha pratiktir.

3.2. Sıvı formülasyonlar

Sıvı formülasyonlar; emülsiyonlar, süspansiyon konsantreleri, süspansiyon-emülsiyon konsantreleri, yağ dispersiyonları ve kapsül süspansiyon formülasyonları ile ultra düşük hacimli sıvıları içerir.

Emülsiyon formülasyonları uygulamadan önce su ile seyreltilmek üzere tasarlanmıştır ve yağ- içinde-su (O/W) veya su- içinde-yağ (W/O) sistemleri şeklinde olabilir. Ürün stabilitesini sağlamak ve faz ayrışmasını önlemek için uygun emülgatörlerin seçimi kritik öneme sahiptir. Yağın dış fazı oluşturduğu su- içinde-yağ emülsiyonlarında, buharlaşma ve püskürtme sürüklenmesi (spray drift) kaynaklı kayıplar azalır ve uygulama etkinliği artar.

Süspansiyon konsantreleri, ince öğütülmüş katı aktif maddelerin genellikle su olan bir sıvı ortam içinde dağıtılmasıyla üretilir. Katı partiküller çözünmediği için, uygulama öncesinde ve sırasında homojen dağılımı sağlamak amacıyla sürekli karıştırma gereklidir. Bu formülasyonlar genellikle 1–10 µm aralığında partiküller içerir. Küçük partikül boyutu bitki dokularına daha iyi nüfuz etmeyi sağlayarak biyolojik etkinliği artırır. Operatörler ve çevre için nispeten düşük risk taşımaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilirler.

Süspansiyon-emülsiyon formülasyonları hem emülsiyonların hem de süspansiyon konsantrelerinin özelliklerini bir araya getirir. Stabil bir emülsiyon fazının askıda katı faz ile başarılı şekilde birleştirilmesi gerektiğinden teknik açıdan zorlu formülasyonlardır. Nihai ürünün zaman içinde homojen ve etkili kalmasını sağlamak için dikkatli formülasyon geliştirme ve depolama süresince kapsamlı stabilite testleri gereklidir.

Yağ dispersiyonları, süspansiyon konsantrelerine benzer bir süreçle hazırlanır; ancak temel fark, katı aktif maddenin su yerine yağ bazlı bir ortamda dağıtılmasıdır. Formülasyon stabilitesini artıran uygun inert bileşenlerin dikkatle seçilmesi, olası kararsızlık sorunlarını en aza indirebilir.

Kapsül Süspansiyon Formülasyonlarında aktif maddeler mikrokapsüller içine alınarak stabil bir sıvı ortamda dağıtılır ve uygulamadan önce su ile seyreltilir. Jelatin, nişasta, selüloz ve diğer polimerler gibi kapsülleme materyalleri, biyolojik ajanları olumsuz çevresel koşullara karşı korumak için yaygın olarak kullanılır. En yaygın tekniklerden biri, özellikle fungal biyopestisitler için küçük boyutlu ve yüksek etkinlikte formülasyonların üretimini mümkün kılan arayüzey polimerizasyonu yöntemidir.

Ultra düşük hacimli formülasyonlar, su ile önceden seyreltilmeden uygulanan yüksek konsantrasyonlu ürünlerdir. Taşınmaları kolaydır ve aktif bileşen olarak askıda biyolojik kontrol

ajanları kullanılarak hazırlanabilirler. Bu özellikleri sayesinde minimum püskürtme hacmi gerektiren uygulamalar için uygundur.

3.3. Biyopestisit Uygulama Metotları

Biyopestisitlerin performansı; biyolojik aktiviteleri, formülasyonları ve uygulama yöntemleri dâhil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir. Biyopestisitlerin optimum etkinliğini sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılan uygulama yöntemleri şunlardır [62]: tohum uygulaması, fide daldırma, yapraktan uygulama, havadan uygulama, toprak uygulaması ve mikrobiasyon.

Tohum uygulaması, biyopestisitlerin uygulanmasında en etkili ve yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, ekimden önce tohumların bakteri, mantar veya virüs gibi yararlı biyolojik ajanlarla kaplanmasını içerir. Uygulamadan sonra bu ajanlar tohum etrafında koruyucu bir tabaka oluşturur ve çimlenme ile erken büyüme döneminde gelişen fideleri toprak kaynaklı patojenlere ve böcek zararlılarına karşı korur.

Fide daldırma yöntemi, fidelerin köklerinin dikimden önce belirli bir süre biyopestisit süspansiyonu içine daldırılmasını içerir. Bu yöntem genç bitkileri toprak kaynaklı patojenlere karşı korumak için yaygın olarak kullanılır. Örneğin, *Trichoderma spp.* ve *Pseudomonas fluorescens* bu teknikle sıklıkla uygulanmaktadır.

Yapraktan uygulama, özellikle bitkilerin toprak üstü kısımlarını etkileyen zararlı ve hastalıkların yönetiminde biyopestisitlerin uygulanması için en basit ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, biyolojik kökenli ürünlerin el püskürtücüleri, sırt pülverizatörleri veya bomlu püskürtücüler gibi ekipmanlar kullanılarak doğrudan yaprak yüzeylerine uygulanmasını içerir. Uygulamadan sonra aktif maddeler hızla emilir veya yaprak yüzeyinde kalarak bitkilerin böcek zararlılarına ve mikrobiyal patojenlere karşı hızlı tepki vermesini sağlar. Yapraktan uygulamalar, özellikle bitki yüzeyini kolonize eden böcekler, fungal patojenler ve bakterilere karşı etkilidir ve önemli ürün kayıpları oluşmadan önce zararlı popülasyonlarının azaltılmasına yardımcı olur. Bu yöntemin temel avantajlarından biri, biyopestisitlerin zararlı baskısının en yoğun olduğu bölgelere hassas şekilde uygulanabilmesidir.

Havadan uygulama, tarımsal uygulamaların uçaklar veya insansız hava araçları (drone'lar) kullanılarak dağıtılmasını ifade eder. Bu yöntem, geniş tarım alanlarının verimli bir şekilde işlenmesine olanak tanırken iş gücü gereksinimini azaltır ve homojen kaplama sağlar. Bu yaklaşım; hız, doğruluk ve operasyonel verimlilik açısından değerli olup etkili zararlı kontrolüne, ürün

performansının artmasına ve toprak sıkışmasının azaltılmasına katkı sağlar. Havadan püskürtmenin başarısı çevresel koşullardan büyük ölçüde etkilenir: Sprey sürüklenmesini sınırlamak için düşük rüzgâr hızları (10 mph / ~16 km/saat altı) gereklidir, orta düzey sıcaklıklar hızlı buharlaşmayı önler, %50'nin üzerindeki bağıl nem, damlacıkların bitki yüzeyine yeterli şekilde tutunmasını destekler. Bu nedenle, sabah erken saatler ve öğleden sonra geç saatler genellikle uygulama için en uygun zaman dilimleridir.

Toprak uygulaması, biyopestisitlerin su bazlı çözeltiler kullanılarak doğrudan kök bölgesine verilmesini sağlayan pratik bir yöntemdir. Bu yaklaşım, yararlı mikroorganizmaların ve biyoaktif maddelerin toprağa taşınmasına olanak tanır; burada zararlıları baskılayabilir ve aynı zamanda genel bitki sağlığını destekleyebilirler. Toprak uygulamasının etkinliği, uygun çevresel koşullar ve doğru uygulama şartlarına bağlıdır.

Mikrobigasyon, biyolojik zararlı kontrol ajanlarının sulama sistemleri aracılığıyla uygulanmasını ifade eder. Bu yaklaşım, yararlı mikroorganizmalar ve entomopatojen nematodların toprağa verilmesi yoluyla zararlı patojenlerin baskılanmasını, bitki direncinin güçlendirilmesini ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının desteklenmesini sağlayarak zararlı yönetimi ile toprak sağlığını birleştirir. Biyopestisit uygulamasının sulama ve besin maddesi taşınımı ile entegre edilmesi sayesinde, aktif ajanların hem kök bölgesine hem de bazı durumlarda bitkinin toprak üstü kısımlarına ulaşması sağlanır. Bu özellik, mikrobigasyonu özellikle toprak kaynaklı hastalıkların kontrolünde ve agroekosistemlerde mikrobiyal çeşitliliğin artırılmasında etkili kılar. Sulama sistemleri aracılığıyla kontrollü uygulama, biyopestisitlerin topraktaki etkinlik süresini uzatarak tekrarlanan uygulama ihtiyacını azaltır. Etkili dağıtımın sağlanması ve sulama ekipmanlarının tıkanmasının önlenmesi için mikrobiyal biyopestisitler uygun stabilizatörler ve yüzey aktif maddelerle hazırlanmalıdır. Optimum çalışma koşulları şunlardır: Çökme ve tıkanmayı önlemek için su pH'sının 5.5–7.0 arasında tutulması, mikrobiyal aktiviteyi desteklemek için su sıcaklığının 18–25 °C aralığında olması, artıkları uzaklaştırmak için 100–200 mikron gözenek boyutuna sahip filtrasyon sistemlerinin kullanılması. *Bacillus thuringiensis* ve *Trichoderma spp.* gibi mikrobiyal ajanlar, toprak kaynaklı patojenler ve böcek zararlılarına karşı etkinlikleri nedeniyle bu yönteme özellikle uygundur.

Gövde enjeksiyonu, biyopestisitlerin uygulanmasında hedefe yönelik bir yöntem olup zararlı kontrol ajanlarının odunsu bitkilerin gövde veya sapına doğrudan verilmesini içerir. Aktif maddeler ksileme enjekte edildiğinde, transpirasyon akımıyla bitki boyunca taşınarak delici böcekler gibi

zararlılara ve fungal hastalıklara karşı sistemik koruma sağlar. Bu teknik, yapraktan püskürtmenin veya toprak uygulamasının etkisiz, pratik olmayan ya da çevresel riskler oluşturduğu durumlarda; özellikle ağaçlar ve yüksek değerli çok yıllık bitkilerin korunmasında oldukça yararlıdır. Gövde enjeksiyonunun başlıca avantajı, yüksek uygulama verimliliği ile birlikte minimal çevresel etki sağlamasıdır. Havadan püskürtme veya toprak uygulamalarının aksine bu yöntem: Sprey sürüklenmesini önler, uygulayıcı maruziyetini sınırlar, hedef dışı organizmaların kontaminasyonunu azaltır. Bu nedenle gövde enjeksiyonu ormancılıkta, kentsel ağaç yönetiminde ve ticari ürün yetiştiriciliğinde (örneğin avokado ve turunçgil plantasyonlarında) yaygın olarak kullanılmaktadır. Gövde enjeksiyonu ile uygulanan biyopestisitler genellikle mikrobiyal ajanlar, bitki kökenli ekstraktlar ve vasküler sistem içinde taşınmayı destekleyen taşıyıcı bileşikleri içerir. *Beauveria bassiana* ve *Metarhizium anisopliae* gibi entomopatojen mantarlar, böcek zararlılarını enfekte ederek ve fizyolojik süreçlerini bozarak etki gösterir. Ayrıca nane ve tarçın gibi uçucu yağlar içeren botanik ürünlerin bitki dokuları içinde taşınabildiği ve zararlılara karşı koruyucu etki sağlayabildiği gösterilmiştir.

Çeşitli uygulama yöntemlerinin güçlü yönlerini, zayıf yönlerini, fırsatlarını ve tehditlerini özetleyen bütünleşik bir değerlendirme **Tablo 11**'de sunulmaktadır.

Tablo 11. Seçilmiş biyopestisit uygulama yöntemlerinin SWOT analizi [62]

Eleman	Hava yoluyla uygulama	Yapraktan uygulama	Toprak uygulaması	Tohum uygulaması	Fide daldırma yöntemi	Mikrobigasyon	Gövde enjeksiyonu
Güçlü yönler	Geniş alanların hızlı şekilde taranması; ulaşılamayan araziler için ideal	Hızlı biyoçevre ilacı emilimi; yapraklardaki zararlılara doğrudan hedefleme	Kök bölgesi patojenlerini hedefler; uzun süreli etkiler sağlar	Bitkilerin erken korunması; daha az kimyasal kullanımı	Fide dikiminde hızlı koruma; fidanlıklarda uygulanması kolay	Toprak sağlığını destekler; etkili dağılım sağlar	Doğrudan etki; çevresel maruziyet minimum düzeyde
Zayıf yönler	Yüksek sürüklenme riski; pahalı ekipman ve eğitim gerektirir	Kısa kalıcı etki; yanlış uygulandığında yaprak yanmasına neden olabilir	Geniş arazilerde yoğun iş gücü gerektirir	Sadece erken aşama koruma ile sınırlıdır; fazla doz uygulanırsa çimlenmeyi etkiler	Yoğun iş gücü gerektirir; küçük ölçekli veya fide bitkilerle sınırlıdır	Uygun sulama sistemi gerektirir; tıkanma riski vardır	Doğrudan etki sağlar, ancak sadece odunsu bitkilerle sınırlıdır
Fırsatlar	Hassas tarım için dron ve GPS ile entegrasyon	İletim için nanoformülasyonlar; sürdürülebilir biyoformülasyonlar	Yavaş salınımlı formülasyonlar; gübreleme sistemleri ile entegrasyon	Tohum canlılığını artırma; hassas tohum kaplama teknolojileri	Faydalı mikroorganizmaların kullanımıyla bitki tutunmasının iyileştirilmesi	“Organik tarımda kullanımın yaygınlaştırılması; gübreleme ile sinerji	Yüksek değerli ürünler/ağaçlar için; otomatik enjeksiyon araçlarının geliştirilmesi
Tehditler	Düzenleyici kısıtlamaları müzakere etmek	Sürüklenme ve akış riski; zararlı direnç gelişimi	Toprak yapısına etkisi; yeraltı suyu kirlenmesi	Direnç oluşumu	Kök hasarı riski	Sistemlerde biyofilm oluşumu	Ağaç hasarı riski
Vaka çalışması notları	Tarım amaçlı insansız hava araçları (İHA'lar) ürün izleme, toprak ve arazi analizi ile kuş kontrolüne kadar genişletilmiştir	Tarımda drone destekli yaprak spreyi, manuel iş gücü ihtiyacını %50'ye kadar azaltır	Kök boğazı nematodları, mantar patojenleri, yaprak bitleri ve pul böceklerini kontrol etmeye yardımcı olur	En çok bildirilen tohum kaplama türleri tohum preparasyonu, film kaplama ve peletlemedir	Fosfor, fide kök daldırma uygulamasının ve bitki sağlığının başarısı için kritik öneme sahiptir	Konidial süspansiyonlar (10^6 konidi ml^{-1}), boyut fark etmeksizin damlatıcılardan tıkanmadan geçer ve canlılıklarını korur	Bu uçucu yağlar tarafından potansiyel olarak sistemik kazanılmış direnç (SAR) indüksiyonunun vurgulanması

4. Yararlı Böcekler – Biyolojik Mücadele Ajanları Olarak Zararlıların Doğal Düşmanları

Parazitoitler ve yırtıcılar gibi doğal düşmanlar, tarım ürünlerinde böcek ve akar zararlılarının kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoğu parazit ve hastalık etmeni ile birçok yırtıcı, yüksek derecede konukçu özgülüğü gösterir ve genellikle yalnızca birbirine yakın akraba olan dar bir zararlı tür grubunu hedef alır. Doğal düşmanların Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programlarına entegre edilmesi, popülasyon baskılanmasını, ürün sağlığını ve kimyasal kullanımının azaltılmasını sağlayarak başarının temelini oluşturur [63]. Bu yararlı organizmalar, belirli zararlılara özel bir tercih gösteren yerli ya da dışarıdan getirilmiş türler olabilir ve çevreye ya da hedef dışı organizmalara zarar vermeden zararlı popülasyonlarını azaltmada oldukça etkilidirler [64].

Parazitoitler, tek bir zararlı böceğin üzerinde veya içinde gelişen ve sonunda onu öldüren böceklerdir. Yumurtalarını zararlının vücudunun üzerine ya da içine bırakırlar. Larvalar yumurtadan çıktığında, zararlının iç dokuları ve vücut sıvılarıyla beslenirler. Parazitoit gelişimini tamamladığında zararlı ölür. Tarımda kullanılan en önemli parazitoitler, Ichneumonidae ve Braconidae familyalarına ait yaban arılarıdır. Bazı parazitik yaban arıları ve sinekler tırtıllara saldırır ve yaprak bitleri gibi diğer zararlıları da kontrol edebilir. Tachinid sinekler özellikle faydalıdır; çünkü tırtıllar, böcek larvaları ve ergin böcekler dâhil birçok zararlıyı parazitleştirirler. Biyolojik mücadelenin etkili olabilmesi için parazitoitlerin: belirli zararlıları hedeflemesi, etkili şekilde çoğalabilmesi ve farklı hava ile tarla koşullarına uyum sağlayabilmesi gerekir.

Yırtıcılar ise yaşamları boyunca zararlıları avlayıp tüketen serbest yaşayan böcekler veya akarlardır. Genellikle avlarından daha büyüktürler ve zaman içinde çok sayıda zararlı tüketebilirler. Yırtıcılar, ürünler üzerinde zararlı böcekleri aktif olarak arayabilir ya da sabit bir yerde kalarak av yaklaştığında saldırabilirler. Zararlıyı tespit ettikten sonra onu yakalar, öldürür ve tüketirler. Bazı türlerde hem larva hem de ergin dönem avcıdır (örneğin uğur böcekleri); ancak bazı türlerde yalnızca yaşam evrelerinden biri avcıdır (örneğin yeşil dantel kanatlılar sadece larva döneminde avcıdır) [49]. Yaygın ve etkili yırtıcılar arasında *Brumoides* (uğur böcekleri), *Chrysoperla* (yeşil dantel kanatlılar), kızböcekleri ve yusufçuklar, parazitik yaban arıları, predatör akarlar ve diğerleri yer alır. Bu yararlı böcekler; yaprak bitleri, beyaz sinekler, tripsler, unlu bitler ve kırmızı örümcek akarları gibi birçok yaygın zararlı ile beslenen güçlü avcılarıdır [12]. Sera ortamına salındıklarında,

zararlı popülasyonlarını düşük ve yönetilebilir seviyelerde tutarak doğal bir denge oluşmasına yardımcı olurlar [65]. Bazı zararlılar ve onların yaygın doğal düşmanları **Tablo 12**'de verilmiştir.

Tablo 12. Bazı zararlılar ve onların yaygın doğal düşmanları [66]

Zararlılar	Doğal düşmanlar				
	Ağkanatlılar	Uğur böcekleri	Parazitik sinekler	Parazitik yaban arıları	Yırtıcı akarlar
Yaprak bitleri	X	X		X	
Marangoz kurdu, cam kanatlı güve larvaları				X	
Tırtıllar (örneğin California meşe tırtılı)	X		X	X	
Pamuksu koşnil		X	X		
Karaağaç yaprak böceği			X	X	
Okaliptüs uzun antenli delici böcekleri				X	
Okaliptüs kırmızı sakız lerp psillidi				X	
Dev beyaz sinek	X	X		X	
Cam kanatlı keskin emici	X			X	
Ağ böcekleri	X	X		X	
Unlu bitler	X	X		X	
Psillidler	X	X		X	
Kabuklu bitler (koşniller)	X	X		X	X
Sümüklü böcekler, salyangozlar			X		
Kırmızı örümcekler	X	X			X
Tripsler	X			X	X
Hortumlu böcekler (kök veya toprakta yaşayan)				X	
Beyaz sinekler	X	X		X	

4.1. Uğur böcekleri

Uğur böcekleri (ladybird beetles) buna iyi bir örnektir. Sera koşullarında en zararlı türlerden biri olan yaprak bitleriyle beslenmeleriyle iyi bilinirler. Tek bir uğur böceği bir günde onlarca yaprak biti tüketebilir; bu da onları zararlı yönetiminde oldukça etkili bir araç haline getirir. Genellikle içinde canlı ergin bireyler bulunan küçük plastik kaplar aracılığıyla uygulanırlar. Yoğun bulaşma durumlarında, dönüm başına yaklaşık 5.000–8.000 uğur böceği gerekebilir. Yapılan çalışmalar,

uğur böceği kullanımının çoğu durumda yaprak biti popülasyonunu %50'den fazla azaltabildiğini göstermiştir [67].

Ergin uğur böcekleri (**Şekil 11, sağ**) siyah benekli kırmızı veya turuncu gövdeleriyle kolayca tanınır. Ancak olgunlaşmamış evreleri (**Şekil 11, sol**) çok daha zor ayırt edilir ve birçok yararlı larva ya da pupa, faydalı böcek oldukları anlaşılmadığı için yanlışlıkla yok edilebilir. Hem larvalar hem de erginler birçok küçük böcek beslenir ve yakalayabilecekleri kadar küçük olan her zararlı evresine saldırırlar.



Şekil 11. Uğur böceğinin erginleşmemiş yaşam evresi (sol) ve ergin yaşam evresi (sağ). © CABI (left) and Gilles San Martin via Flickr CC BY-SA 2.0 (right) [41]

4.2. Dantel kanatlılar

Dantel kanatlılar narin görünebilir; ancak özellikle yaprak bitlerine ve küçük, yumuşak vücutlu böceklere karşı son derece etkili avcılardır. Dantel kanatlıların gelişimi dört farklı yaşam evresinden oluşur. Süreç yumurta evresiyle başlar: yumurtalar ince ipeksi sapların üzerine tek tek bırakılır. Yaklaşık beş gün sonra yumurtalar açılır ve larva evresi başlar. Bu evre yaklaşık iki ila üç hafta sürer. Bu süre boyunca larvalar genel görünümünü korur, ancak beslenerek düzenli biçimde büyürler. Tam gelişim sağlandıktan sonra larvalar ipeksi bir koza örür ve pupa evresine girer. Bu evrede yaklaşık 10–14 gün boyunca kozanın içinde kalarak başkalaşım geçirirler. Son evre ergin dantel kanatlıdır; yaklaşık 12–20 mm uzunluğunda, büyük ve narin dantel görümlü (şeffaf veya açık kahverengi) kanatları, uzun antenleri ve yumuşak vücuduyla tanınır [68].

Ergin dantel kanatlılar çoğunlukla nektar ve polenle beslenirken, larvaları zararlıların güçlü doğal düşmanlarıdır (**Şekil 12, sol**). Uzun ve iğne benzeri ağız parçalarına sahip olan larvalar, küçük ve yumuşak vücutlu böcekleri aktif olarak avlar, yakalar ve tüketir. Bu güçlü avcı özellikleri ve büyük miktarlarda üretilebilme imkânı, dantel kanatlıları takviye edici biyolojik mücadelede güvenilir ve

yaygın olarak tercih edilen bir seçenek hâline getirmiştir. Ürün yönetiminde, özellikle yaprak biti popülasyonlarını baskılamak amacıyla dantel kanatlı larvaları salınır; tek bir larva gelişimi boyunca yaklaşık 200–400 yaprak bitini yok edebilir. Yaprak bitlerinin yanı sıra unlu bitler, yaprak pireleri, kırmızı örümcek akarları ve ekonomik açıdan önemli diğer birçok zararlı ile bunların yumurtalarına karşı da etkilidirler (**Şekil 12, sağ**).

Dantel kanatlılar yumurta, larva veya ergin formda satın alınabilir ve en uygun form uygulamanın amacına bağlıdır. Yumurtalar tarlaya dağıtılması kolay bir seçenektir; ancak açılmaları zaman aldığı için, ani zararlı baskısını azaltmaktan ziyade önleyici kullanım için daha uygundur.



Şekil 12. Dantel kanatlı larvasının bir yaprak bitini yemesi (sol) ve batı fasulye kurtunun yumurtaları (sağ). Photo by: Cristhian Ochoa (left) and John Obermeyer (right) [68]

4.3. Parazitik yaban arıları

Parazitik yaban arılarının çoğu çok küçüktür ve kolayca gözden kaçabilir; böcek yumurtalarına saldıran türler ise daha da küçüktür — çoğu zaman neredeyse mikroskobik boyuttadır. Bu nedenle çiftçiler ve bahçıvanlar, bu parazitoitlerin zararlı popülasyonlarını baskılamaya aktif olarak yardımcı olduklarının çoğu zaman farkında değildir. Bazen yaprak yüzeyleri üzerinde hızla hareket ederken ve potansiyel konukçuların bıraktığı kimyasal izleri ararken antenleriyle yoklama yaparken gözlemlenebilirler.

Parazitik yaban arıları yumurtalarını diğer böceklerin üzerine ya da içine bırakırlar; bu genellikle konukçunun yumurta veya larva evresinde gerçekleşir. Gelişen yaban arısı larvası, konukçu böceğin içinde ya da yüzeyinde büyür ve sonunda onu öldürür. Parazitlenmenin tipik belirtileri arasında, içinden parazitoit larvaları çıkan zayıflamış tırtıllar veya üzerinden bir koza sarkan ölü

konukçular yer alır. Bu yaban arıları; tırtıllar, böcek larvaları, beyaz sinekler ve yaprak bitleri dâhil olmak üzere birçok tarımsal zararlının doğal düşmanı olarak hayati bir rol oynar [69].

4.4. Predatör Akarlar

Phytoseiulus persimilis ve *Neoseiulus californicus* gibi predatör akarlar yüksek derecede özelleşmiştir ve özellikle çok küçük olmalarına rağmen kontrol edilmediklerinde ciddi ürün kayıplarına yol açabilen kırmızı örümcek akarlarına karşı oldukça etkilidirler [63]. *Phytoseiulus persimilis*, yumurta, larva ve ergin dâhil olmak üzere kırmızı örümcek akarlarının farklı yaşam evrelerinde uzmanlaşmış bir avcıdır. Sıcak ve nemli koşullarda salgınların kontrolünde son derece etkilidir. Kırmızı renkli bu predatör akar, günlük olarak çok sayıda kırmızı örümcek tüketir. Buna karşılık, geneli (generalist) bir avcı olan *Neoseiulus californicus* daha geniş çevresel koşullara tolerans gösterir ve düşük yoğunluktaki kırmızı örümcek popülasyonlarıyla beslenebilir. Bu özelliği sayesinde önleyici mücadele için idealdir.

Predatör akar kullanımının avantajları [63]

- *Hassas zararlı kontrolü:* Predatör akarlar, kırmızı örümcekleri yaşam döngülerinin her evresinde hedef alır.
- *Yararlı organizmalar için güvenli:* Tozlayıcılara ve diğer faydalı türlere zarar vermeden doğal bir kontrol sağlarlar.
- *Direnç sorunu yoktur:* Kimyasal uygulamaların aksine, zararlılar biyolojik avcılara karşı direnç geliştirmez.
- *Kalıntı bırakmaz:* Kimyasal kalıntı oluşturmadıkları için üreticilerin kalıntı limitlerine ve organik üretim standartlarına uymasına yardımcı olur.
- *EZY uyumlu:* Predatör akarlar, Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programlarında diğer biyolojik ajanlar ve seçici pestisitlerle kolayca entegre edilebilir.

4.5. Parazitik Sinekler

Birkaç parazitik sinek türünün böcek zararlılarına saldırdığı bilinmektedir. Çoğu durumda yumurtalar doğrudan konukçunun vücut yüzeyine bırakılır. Yumurtadan çıktıktan sonra larvalar konukçunun vücuduna girer ve sonunda onun ölümüne neden olur. Ancak çoğu parazitik yaban

arısından farklı olarak, parazitik sineklerde yumurtaları konukçu dokularının içine yerleştirmek için kullanılan uzun bir ovipozitör (yumurta borusu) bulunmaz [69].

4.6. Biyolojik Mücadelede Predatör ve Parazitoit Makroorganizmaların Uygulanması

Yırtıcılar ve parazitoitler genellikle doğrudan ürün yetiştirme ortamına salınır; bu da özel uygulama ekipmanlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Erginleşmemiş, henüz avcı olmayan evrelerinde (örneğin yumurta halinde) ya da aktif avcı evrelerinde bırakılabilirler. Erginleşmemiş organizmaların zararlı baskılamada etkili hâle gelmeleri için gelişimlerini tamamlamaları gerekirken, avcı formda salınan bireyler zararlıları hemen kontrol etmeye başlayabilir. Predatör ve parazitoitleri araziye vermek için yaygın olarak kullanılan çeşitli uygulama yöntemleri bulunmaktadır [49]:

- *Yavaş salınımlı (üretici) saşeler*: Bu saşeler hem yararlı organizmaları hem de bir besin kaynağını içerir. Böylece organizmalar daha uzun süre hayatta kalabilir, çoğalabilir ve kademeli olarak salınabilir. Saşeler genellikle bitkilere asılır ve biyolojik mücadele etmenlerinin birkaç hafta boyunca sürekli olarak yayılmasını sağlar.
- *Salım kartları*: Bu yöntem özellikle *Trichogramma* parazitoitleri için yaygın olarak kullanılır. Parazitoit yumurtaları kartlara yapıştırılır; daha sonra bu kartlardan çıkan ergin bireyler konukçu zararlıları aramaya başlar. Kartlar doğrudan bitkilere asılır veya sabitlenir.
- *Şişeler*: Bazı predatör türler kaplar içinde temin edilir ve içerikleri doğrudan bitki üzerine dökülerek manuel olarak dağıtılır.
- *Delikli torbalar*: Bu yöntemde yararlı organizmalar küçük delikleri olan torbalara yerleştirilir. Bitkilere asıldıklarında, predatörler veya parazitoitler bu deliklerden yavaşça çıkarak bitki örtüsüne yayılır.

Predatör böcekler ve parazitoitlerden en iyi sonucu almak için, onların tarla veya serada hayatta kalmalarını ve etkili şekilde çalışmalarını desteklemek önemlidir. Bu yararlı böcekler sağlıklı olduğunda çoğalabilir ve zararlıları daha uzun süre kontrol altında tutabilirler. Başlıca iyi uygulamalar [49]:

- *Kimyasal ilaçlamadan kaçının*: Yararlı böceklerin salındığı alanlarda kimyasal pestisit kullanmayın. Birçok pestisit hem zararlıları hem de faydalı böcekleri öldürür.

- *Ek besin sağlayın:* Yararlı böceklere nektar ve polen sağlamak için çiçek şeritleri veya örtü bitkileri ekin. Zararlı yoğunluğunun düşük olduğu dönemlerde özel besin ürünleri de kullanılabilir.
- *Barınak sunun:* Çit bitkilerini, tarla kenarlarını ve diğer doğal alanları koruyun. Bu alanlar yararlı böcekleri olumsuz hava koşullarından korur ve onlara yaşam alanı sağlar.

5. Eşlikçi Bitkilendirme

Eşlikçi bitkilendirme, polikültürün özel bir türüdür. Bu yöntemde, büyümelerini karşılıklı olarak olumlu yönde etkilediği bilinen ya da düşünülen iki bitki türü birlikte yetiştirilir. İki ya da daha fazla bitki türünün bir arada yetiştirilmesiyle, bir bitki diğerini böcek zararlılarına karşı korumaya yardımcı olur. Eşlikçi bitkiler şu şekillerde etki gösterebilir: Zararlıları şaşırtabilir, zararlıları uzaklaştırabilir, zararlıları ana üründen uzak bir bitkiye çekebilir, yararlı böcekleri (predatörler ve parazitoitler) cezbedebilir. Bu strateji, özellikle organik üreticiler tarafından Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) kapsamında yaygın olarak kullanılmaktadır [70].

Böcek zararlıları konukçu bitkilerini bulmak ve seçmek için farklı sinyaller kullanır. Bu nedenle, bir zararlının ürünü nasıl aradığını anlamak, etkili bir eşlikçi bitki seçerken çok önemlidir. Zararlılar konukçu bitkileri temel olarak iki tür sinyal ile bulur: koku ve görme. Koku (kimyasal sinyaller): Uzun mesafelerde etkilidir. Böcekler rüzgârla taşınan bitki kokularını takip eder. Görme (görsel sinyaller): Daha kısa mesafede önem kazanır. Böcekler bitkinin boyutu, şekli ve rengine bakarak konup konmayacaklarına ve yumurta bırakıp bırakmayacaklarına karar verir. Bu nedenle iyi bir eşlikçi bitki şu şekillerden biri ya da birkaçıyla etkili olmalıdır: Bitki kokularını bozarak zararlının ürünü kolayca tespit etmesini engellemek, ürünü görsel olarak gizlemek veya maskelemek, tanınmasını zorlaştırmak, hem koku hem görsel etkiyi birlikte kullanarak zararlıyı aynı anda iki yönden şaşırtmak.

5.1. Zararlıları Uzaklaştıran (Başka Yöne Çeken) Bitkiler

Tuzak bitkiler, zararlı böcekleri korunan ana üründen uzaklaştırmak amacıyla özel olarak yetiştirilen bitkilerdir. Zararlıları ayrı bir alana çekerek, onların daha kolay yönetilmesini sağlar. Bu yöntem, ana ürünün yakınına zararlılar için çok cazip bir bitki dikildiğinde ve zararlıların ana ürün yerine tuzak bitkiyi tercih edip oraya yönelmesiyle işe yarar. Çiftçiler tuzak bitkiyi izleyebilir

ve tüm tarlayı ilaçlamak yerine yalnızca tuzak bitkiyi yok edebilir veya uygulama yapabilir. Tuzak bitkilerin etkili olabilmesi için ana üründen daha çekici olması ve doğru yere (genellikle tarla kenarlarına) dikilmesi gerekir. Uygulamada başarılı birçok tuzak bitki örneği bulunmaktadır (**Tablo 13**).

Tuzak bitkinin kendi içinde zararlı yönetimi ihtiyacı, “çıkılmaz tuzak bitkiler (dead-end trap crops)” kullanılarak azaltılabilir. Bu yaklaşım, zararlıların yumurta bırakması için oldukça çekici olan; ancak yavrularının gelişmesine izin vermeyen bitkilere dayanır. Örneğin, lahana ve diğer Brassica türlerinin önemli bir zararlısı olan lahana güvesi (*Plutella xylostella*), sarı roka bitkisinin G-tipine, yani *Barbarea vulgaris* üzerine kolaylıkla yumurta bırakır. Ancak bu bitki, monodesmosidik triterpenoid saponinler gibi beslenmeyi engelleyici bileşikler içerdiği için larvalar bu bitki üzerinde hayatta kalamaz ve normal gelişimlerini tamamlayamaz.

Tablo 13. Eşlikçi bitkilerle tuzak bitkilendirmeye ilişkin bazı başarılı örnekler [70]

Ana ürün (korunmuş)	Zararlı	Kullanılan tuzak bitki	Tuzak bitki tipi	Anahtar neden/Not
Pamuk (Kaliforniya)	<i>Lygus</i> böcekleri	Yonca	Standart tuzak bitki	Zararlıları yoncada yoğunlaştırarak insektisit püskürtmesini neredeyse tamamen ortadan kaldırdı
Soya fasulyesi	Meksika fasulye böceği	Taze fasulye	Standart tuzak bitki	Böcekler, soya fasulyesine kıyasla taze fasulyeyi güçlü biçimde tercih etti
Patates (Belarus, >50 yaş)	Colorado patates böceği	Erken-ekilmiş patates	Standart tuzak bitki	Erken ekilen patatesler, daha sonraki ekimleri onlarca yıl boyunca korudu
Turpgiller (lahana grubu) bitkileri	Elmas sırtlı güve (lahana güvesi)	<i>Barbarea vulgaris</i> (G-tipi)	Çıkılmaz tuzak bitki	Larvalar, toksik saponinler nedeniyle hayatta kalamadı
Patates	Colorado patates böceği	<i>B. thuringiensis</i> ile modifiye edilmiş patates (erken ekilmiş)	Çıkılmaz tuzak bitki	Erken gelen böcekler, <i>B. thuringiensis</i> toksinleri tarafından öldürüldü
Karnabahar (Finlandiya)	Polen böceği (<i>Meligethes aeneus</i>)	Çin lahanası + kadife çiçeği + kolza + ayçiçeği	Çeşitlendirilmiş tuzak bitki	Çok türlü tuzak, tek türe kıyasla daha çekicidir
Brokoli	Turpgiller pire böceği	Pacific Gold hardalı + pak choi (Çin lahanası türü) + kolza	Çeşitlendirilmiş tuzak bitki	Üç türden oluşan karışım, en yüksek ürün korumasını sağladı

Tuzak bitkilerin etkinliği, aynı anda birden fazla bitki türü kullanılarak artırılabilir. Çeşitli tuzak bitkiler; farklı kimyasal özelliklere, fiziksel yapılara ve büyüme desenlerine sahip bitkileri bir araya getirerek, tek türden oluşan tuzaklara kıyasla zararlılar için daha cazip hâle gelir. Tuzak bitkilerin başarısı; fiziksel yerleşim düzeni (örneğin büyüklük, şekil ve konum) ile zararlıların hareket davranışları gibi birçok değişkene bağlıdır. Tuzak bitkiler, ana üründen daha uzun süre cazibesini koruduğunda ve tuzak bitkiler ile korunan bitkiler arasında kolayca hareket edebilen mobil zararlılara karşı kullanıldığında en etkili sonucu verir [70].

5.2. Uzaklaştıracı (Repellent) Bitkiler

Bazı bitkiler, zararlı davranışlarını bozarak yumurta bırakmayı azaltan kokular salgılar. Aromatik özelliklere sahip bitkiler, uçucu yağlar yayarak zararlıların konukçu bitkiyi bulma, beslenme, hareket etme ve çiftleşme davranışlarını engelleyebilir; bu da zararlı popülasyonlarının azalmasına yol açabilir. Örneğin, domatesle birlikte yetiştirilen fesleğenin hem tripsleri hem de domates boynuzlu tırtılını uzaklaştırabildiği bildirilmiştir. Soğan ve sarımsak gibi *Allium* cinsine ait bitkilerin de; güveler, hamam böcekleri, akarlar ve yaprak bitleri dâhil olmak üzere çok çeşitli böcek ve diğer eklembacaklılara karşı uzaklaştıracı etki gösterdiği ortaya konmuştur. Ayrıca birçok çalışma, Brassica (lahana grubu) bitkilerinin zararlılarına karşı uzaklaştıracı etkiye sahip çok sayıda eşlikçi bitki belirlemiştir. Bunlar arasında adaçayı, biberiye, çördük otu (hyssop), kekik, dereotu, southernwood, nane, solucan otu (tansy), papatya, turuncu latin çiçeği (nasturtium), kereviz ve domates yer almaktadır. Benzer şekilde, domates ile lahananın birlikte yetiştirilmesi, Brassica ürünlerinin yaygın bir zararlısı olan *Plutella xylostella* (lahana güvesi) bulaşmasını azaltmanın bir yolu olarak önerilmiştir. Yine Brassica ürünlerinde yaygın bir zararlı olan *Phyllotreta cruciferae*'yi kara lahanadan uzaklaştırmak amacıyla *Ambrosia artemisiifolia* (ragweed) kullanılmıştır.

Bir uzaklaştıracı bitkinin etkinliği, hem böceğin davranışına hem de kullanılan bitki türüne bağlıdır. Bu nedenle bir zararlıyı uzaklaştıran bir bitki, başka bir zararlıya karşı etkili olmayabilir. Ayrıca, bitkilerin uzaklaştıracı özelliklerini inceleyen birçok çalışma laboratuvar koşullarında yapılmıştır; bu koşullar, tarladaki gerçek performansı her zaman tam olarak yansıtmayabilir. Uzaklaştıracı etkiler her zaman güvenilir değildir. Sonuçlar zararlı türüne ve tarla koşullarına bağlı olarak değişir. Bu nedenle uzaklaştıracı bitkiler, tek başına değil, bütüncül bir stratejinin parçası olarak kullanıldığında en iyi sonucu verir [70].

5.3. Maskeleyici Bitkiler

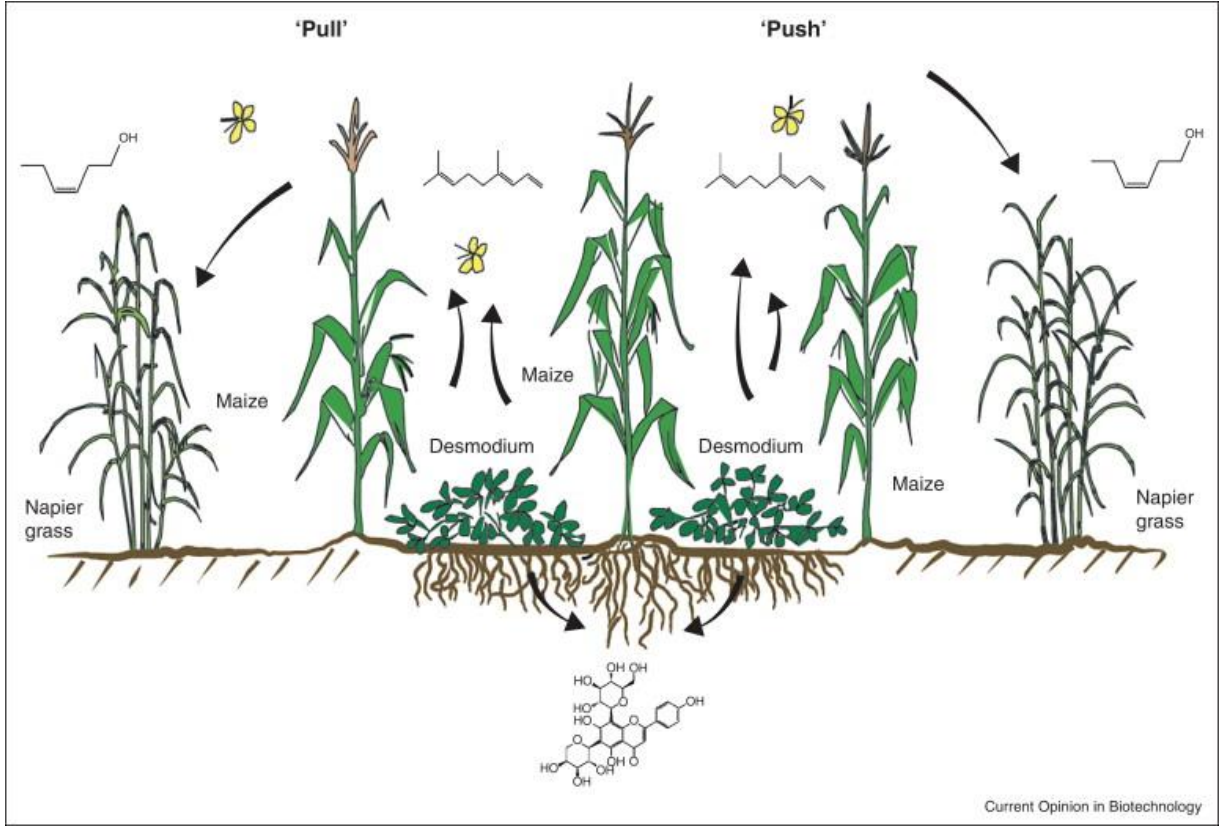
Eşlikçi bitkiler, ana ürünün kokusunu maskeleyen uçucu bileşikler salgılayarak zararlıların konukçu bitkiyi bulma yeteneğini bozabilir. Zararlılar ürünü bulmakta zorlandığı için, bitkiye iniş, yumurta bırakma ve ürün üzerindeki zarar azalır. Örneğin, lahana kök sineğinin (*Delia radicum*) konukçu bitkisini bulma yeteneği; ürünün çevresi mahmuz otu (*Spergula arvensis*), bezelye (*Pisum sativum*), çim otu (*Lolium perenne*) ve üçgül gibi çeşitli bitkilerle çevrelendiğinde bozulur [70].

5.4. Kamufle Eden veya Fiziksel Olarak Engelleyen Bitkiler

Zararlıları koku yoluyla etkilemenin yanı sıra, eşlikçi bitkiler ana ürünü görsel olarak gizleyerek ve zararlıların hareketini ile yumurta bırakmasını engelleyen fiziksel bariyerler oluşturarak da koruma sağlayabilir. Uzun veya sık gelişen bitkiler, zararlıların hareketini ve uçuşunu engelleyebilir. Mısır, ayçiçeği, sorgum ve dereotu gibi yaygın bariyer bitkileri, ürünler arasında sıralar veya şeritler hâlinde ekilerek zararlıların ana ürüne girişini sınırlandırmak için kullanılabilir. Bu yöntem özellikle uçan böceklere karşı etkilidir [70].

5.5. Eşlikçi Bitkilendirme Tekniklerinin Kombinasyonları

Bazı tarım sistemlerinde, zararlı kontrolünü artırmak için farklı eşlikçi bitkilendirme yöntemleri birlikte kullanılır. Bunun başarılı bir örneği, mısırdaki sap kurdu zararlılarının kontrolü için Kenya'da yaygın olarak kullanılan "it-çek (push-pull)" sistemidir (**Şekil 13**). Bu sistemde, zararlıları uzaklaştıran bitkiler ("it") ana ürünün içine ekilerek zararlıların tarladan uzaklaşmasını sağlar. Bu gruba melas otu (molasses grass) ve desmodium gibi bitkiler dahildir. Zararlıları cezbeden tuzak bitkiler ("çek") ise tarlanın çevresine ekilir ve zararlıları ana üründen uzaklaştırır. Bu amaçla Napier otu ve Sudan otu kullanılır. Böylece zararlılar mısırdan uzaklaştırılır ve tuzak bitkilere yönlendirilir; burada verdikleri zarar daha sınırlı olur [70]. Bu yöntem günümüzde Doğu Afrika'da binlerce çiftçi tarafından kullanılmaktadır ve pestisit kullanımını azalttığı, zararlı kontrolünü iyileştirdiği, ürün verimini artırdığı ve sürdürülebilir tarımı desteklediği gösterilmiştir [71].



Şekil 13. “Push–pull” (it–çek) tarım sistemi. CC-BY 4.0 lisansı altında yayımlanmıştır [71].

5.6. Yararlı Böcekleri Çeken Bitkiler

Zararlı popülasyonları, yerel olarak bulunan doğal düşmanların etkinliği güçlendirilerek kontrol altına alınabilir. Bu, üretim sistemine böcek çekici (insectary) olarak bilinen çiçekli bitkiler gibi tarım dışı bitki örtüsünün dâhil edilmesiyle sağlanabilir. Bu bitkiler yararlı böcekleri destekler ve tarlaya çeker. Çiçekli bitkiler nektar, polen ve barınak sağlayarak; uğur böcekleri, dantel kanatlılar, parazitik yaban arıları ve diğer yararlı böceklerin popülasyonlarını artırır. Bu böcekler yaprak bitleri, tırtıllar ve diğer zararlıları doğal olarak öldürür. Önerilen böcek çekici bitkiler şunlardır: dereotu, kişniş (koriander), karabuğday, phacelia ve alyssum [70].

5.7. Yaprak Biti Bulaşmasını Azaltmak İçin Eşlikçi Bitkilerin Kullanımı

Eşlikçi bitkilendirme, zararlı sayısını ve pestisit kullanımını azaltabilir, yararlı böceklerin sayısını artırabilir ve sürdürülebilirliği iyileştirebilir. En iyi sonuçlar, doğru bitki seçimi, iyi bir tarla tasarımı ve birden fazla yöntemin bir arada uygulanmasıyla elde edilir. Yaprak biti bulaşmasını

azaltmada eşlikçi bitkilerin nasıl etkili olabileceğine dair örnekler, böcekleri uzaklaştırma, konukçu kokularını maskeleyme ve ana ürünü daha az çekici hâle getirme gibi mekanizmaları gösteren **Tablo 14**'te verilmiştir. Tablo ayrıca temel mekanizmaları da vurgular: uzaklaştırma, koku maskelenmesi ve konukçu çekiciliğinin azaltılması [72]. Eşlikçi bitkilendirme, Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programının bir parçası olarak kullanıldığında en etkili sonuçları verir.

Tablo 14. Farklı yaprak biti türleri için eşlikçi bitkilerin konukçu bitki üzerindeki etkisini değerlendiren çalışmaların örnekleri [72]

Yaprak biti türleri	Konukçu bitki	Eşlikçi bitkiler	Önerilen mekanizma
<i>Myzus persicae</i>	<i>Capsicum annuum</i>	<i>Allium schoenoprasum</i>	Kokuların maskelenmesi; İtici etki; Konukçu bitkilerin çekiciliğini azaltır
<i>Brevicoryne brassicae</i>	<i>Brassica oleracea</i> <i>Bentley F1</i>	<i>Tagetes patula nana</i> ; <i>Calendula officinalis</i>	İtici etki
<i>Myzus persicae</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	<i>Allium sativum</i>	İtici etki; Caydırıcı etki
<i>Myzus persicae</i> ; <i>Aphis gossypii</i>	<i>Solanum tuberosum</i>	<i>Allium sativum</i>	İtici etki; Konukçu bitkilerin çekiciliğini azaltır
<i>Myzus persicae</i>	<i>Capsicum annuum</i>	<i>Ocimum basilicum</i> ; <i>Rosmarinus officinalis</i> ; <i>Lavandula latifolia</i>	İtici etki; Konukçu bitkilerin çekiciliğini azaltır
<i>Brevicoryne brassicae</i>	<i>Brassica oleracea</i>	<i>Allium cepa</i>	Konukçuyu bulma yeteneğini azaltır
<i>Brevicoryne brassicae</i>	<i>Brassica oleracea</i>	<i>Secale cereal</i>	Konukçuyu bulma yeteneğini azaltır
<i>Aphis fabae</i>	<i>Vicia faba</i>	<i>Satureja hortensis</i> ; <i>Ocimum basilicum</i>	Caydırıcı etki; İtici etki
<i>Aphis citricola</i>	<i>Pyrus communis</i>	<i>Satureja hortensis</i> ; <i>Ocimum basilicum</i>	İtici etki
<i>Lipaphis erysimi</i>	<i>Brassica napus</i>	<i>Allium cepa</i> ; <i>Allium sativum</i>	İtici etki; Caydırıcı etki; Davranışı bozar
<i>Macrosiphum rosae</i>	<i>Rosa chinensis</i>	<i>Tagetes patula</i>	İtici etki; Allelopatik etkinin değişimi
<i>Rhopalosiphum padi</i>	<i>Hordeum vulgare</i>	<i>Cirsium vulgare</i>	Allelopatik etkinin değişimi; Konukçu bitkilerin çekiciliğini azaltır

6. Nöbetleşe Ekim

Nöbetleşe Ekim (Crop Rotation), aynı tarlada her yıl aynı ürünü ekmek yerine, planlı bir sıra ile farklı ürünlerin yetiştirilmesi uygulamasıdır. Örneğin: 1. yıl: buğday; 2. yıl: baklagiller (bezelye, fasulye); 3. yıl: kök sebzeler (patates, pancar) [73]. Nöbetleşe ekimin etkili olabilmesi için, her yıl aynı ürünü veya aynı bitki familyasını aynı tarlada ekmekten kaçınmak ve tahıllar, baklagiller, kök sebzeler ve yağlı tohumlar arasında rotasyon sağlamak önemlidir. Bu yaklaşım, toprak verimliliğini artırır, zararlı ve hastalıkları kontrol etmeye yardımcı olur ve farklı ürünlerin çeşitli besin ihtiyaçları sayesinde topraktaki besin dengesini sağlar. Böylece zararlıların yaşam döngüsü bozulur ve ürün veriminde istikrar desteklenir.

Ürün rotasyonu ile çiftçiler, sürekli aynı ürünün yetiştirildiği alanlarda biriken zararlı ve hastalıkların yaşam döngülerini keser. Birçok zararlı ve hastalık belirli ürünlere özgüdür; toprakta veya bitki artıklarında hayatta kalır ve aynı ürün tekrar tekrar yetiştirildiğinde popülasyonları artar. Ürünün değiştirilmesi, belirli bir bitkiye bağımlı zararlılar için alanı elverişsiz hâle getirir. Örneğin, batı mısır kök kurdu (Western corn rootworm) larvaları, yonca ekiminde döngüye tabi olduğunda savunmasız hâle gelir. Bu nedenle, ürün rotasyonu mısır zararlılarının kontrolünde etkili bir yöntemdir.

Farklı ürünlerin rotasyonu, zararlı popülasyonlarını tarımsal açıdan etkileyebilecek çeşitli şekillerde tasarlanabilir. Bitki örtüsünün yönetimi, tarlanın kenarları, tür kompozisyonu ve diğer tür bariyerler aracılığıyla zararlı popülasyonlarını etkiler. Ayrıca, yabancı ot çeşitliliği de böcek dinamiklerini önemli ölçüde etkiler; yabancı otlar tarlada sınır bitkileri, sıra araları veya ürünün belirli gelişim dönemlerinde sağlanan kaynaklar olarak bulunabilir. Çeşitli ürün rotasyonları ile kontrol edilebilecek bazı böcek zararlılar şunlardır: lahana yaprak bitleri, pire böcekleri, lahana güvesi (diamondback moth), lahana kelebeği, buğday sineği (wheat midge), kırmızı şalgam böceği, buğday sap maggot ve buğday sap testere sineği [74].

7. Fiziksel Bariyerler

Fiziksel Kontroller, zararlıların bulaşmasını önlemek, azaltmak veya yönetmek için fiziksel veya mekanik yöntemlerin kullanıldığı zararlı yönetimi teknikleridir. Bu yöntemler arasında bariyerler, tuzaklar ve zararlıların elle uzaklaştırılması yer alır.

Bariyerler: Zararlıların bitkilere ulaşmasını engelleyen fiziksel engellerdir. Yaygın örnekler arasında meyve ağaçlarını kuşlardan korumak için böcek ağları, sebze tarlalarını ve bahçeleri tavşan ve diğer hayvanlardan korumak için ince file örtüler veya çitler bulunur. Bariyerler özellikle zararlılar ortaya çıkmadan önce kurulduğunda önleyici bir tedbir olarak en etkili yöntemdir. Ancak tüm zararlı türlerine karşı koruma sağlamayabilir ve kurulumu maliyetli veya yoğun iş gücü gerektirebilir. Zararlılar korunan alana girmeyi başarır, doğal düşmanlar yoksa popülasyonları hızla artabilir. Bariyerler hava yoluyla gelen zararlılara (meyve sinekleri, sebze sinekleri, beyaz sinekler, tripsler, yaprak bitleri, thecla vb.), kuşlara, meyve yaralarına ve bazı mantarlara karşı uygulanabilir.

Tuzaklama: Zararlıları ortamdan yakalayıp uzaklaştırmak için kullanılır. Tipik örnekler arasında bahçelerde salyangoz tuzakları ve seralarda veya tarlalarda güveler için feromon tuzakları bulunur. Ticari tarım sistemlerinde tuzaklar genellikle zararlıların varlığını ve popülasyon seviyesini izlemek için kullanılır, tam kontrol amacıyla değil. Tuzaklar bazen hedef dışı organizmaları da yakalayabilir; örneğin yararlı böcekler, kertenkeleler, kurbağalar veya diğer faydalı hayvanlar. Bu nedenle tuzakların türü ve yerleştirilme şekli dikkatle seçilmelidir.

Elle Uzaklaştırma: Zararlıların bitkilerden fiziksel olarak alınmasıdır. Yapraklardan tırtılları elle toplamak, sürgünlerden yaprak bitlerini vakumlamak veya böcekleri uzaklaştırmak için bitkileri güçlü su jetiyle yıkamak gibi yöntemleri içerir. Bazı çiftçiler yaprak yüzeylerinden zararlıları almak için yapışkan bant da kullanır; ancak bu işlem bitkinin koruyucu mumsu tabakasına (kutikula) zarar verebileceği için dikkatli yapılmalıdır. Elle uzaklaştırma zaman alıcı olabilese de, basit, düşük maliyetli ve kimyasal içermeyen bir yöntemdir ve özellikle küçük ölçekli tarım ve erken bulaşmalarda oldukça etkilidir [75, 76].

Etkili fiziksel kontrol yöntemleri, ürün çıkışından hasat sonrası işlemlere kadar üretim döngüsü boyunca bitkileri koruyabilir. Ancak, hasat sonrası koşullar fiziksel kontrol için özellikle uygundur; çünkü ortam daha sınırlıdır, depolanan ürünler yüksek ekonomik değere sahiptir ve insektisit kullanımı genellikle uygun değildir veya yasaklanmıştır. Mekanik ve fiziksel kontroller, doğal düşmanlar ve diğer hedef dışı organizmalar üzerinde nispeten az etkiye sahiptir ve biyolojik kontrol yöntemleri ile uyumludur. Hızlı ve etkili olabilirler ve ev bahçeleri veya peyzaj için oldukça uygundur [75]. Fiziksel bariyerler, yararlı organizmalara veya çevreye zarar vermeden zararlı baskısını azaltmaları nedeniyle Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) programlarının önemli bir parçasıdır. Pasif fiziksel kontrol yöntemlerine dair örnekler Tablo 15'te verilmiştir.

Tablo 15. Pasif Fiziksel Kontrol Yöntemlerine Örnekler [75]

Metot	Ana hedef zararlılar / durum	Temel avantajı
Hendekler	Yürüyen böcekler (örneğin Colorado patates böceği)	Göç eden böcekleri engeller ve tarlaya girişlerini azaltır
Çitler	Alçaktan uçan böcekler (örneğin lahana sinekleri)	Zararlıları kimyasal kullanmadan üründen uzak tutar
Organik malç	Colorado patates böceği, Yaprak bitleri	Doğal düşmanları destekler ve zararlı zararını azaltır
Yapay malçlar	Tripsler, yaprak bitleri, bitki tahtakuruları (Lygus türleri)	Işık yansımalarını değiştirerek böcekleri uzaklaştırır
Parçacık filmleri	Psillidler, yaprak bitleri, yaprak pireleri, güveler	Beslenmeyi ve yumurta bırakmayı bozar; meyve kalitesini artırır
İnert tozlar	Depolanmış-tahıl böcekleri ve güveleri	Dehidrasyona neden olur; depolanmış ürünler için güvenlidir
Tuzaklama	Meyve sinekleri, güveler, meyve bahçesi zararlıları	Zararlı girişini azaltır ve izlemeyi destekler
Yağlar	Yaprak bitleri, akarlar, kabuklu bitler, psillidler	Yumuşak vücutlu zararlıları boğar; yararlı canlılar için düşük risk taşır
Sabunlar / yüzey aktif maddeler	Yaprak bitleri, akarlar, yumuşak vücutlu böcekler	Deri örtüsünü yok eder ve boğulmaya neden olur; düşük kalıntı bırakır

8. Entegre Zararlı Yönetiminde Biyopestisitler

Entegre Zararlı Yönetimi (EZY), zararlı kontrolünde uzun vadeli ve çevreye duyarlı bir yaklaşımdır. EZY, ekosistemleri anlamaya dayanır ve yalnızca kimyasallara bağımlı olmak yerine çeşitli yöntemlerin bir arada kullanılmasını içerir. Biyolojik, kültürel, fiziksel ve kimyasal uygulamaları birleştirir; pestisitler yalnızca gerekli olduğunda ve son çare olarak uygulanır. Amaç, insan sağlığına, ürünlere, mülke ve çevreye olan riskleri azaltırken etkili ve ekonomik zararlı kontrolünü sürdürmektir. EZY, reaktif kimyasal tedavilere yalnızca dayanmaktan ziyade, zararlıların yaşam döngüsünü anlamak, habitatı değiştirmek, dayanıklı çeşitler kullanmak ve doğal düşmanları teşvik etmek gibi uzun vadeli önleyici yöntemleri ön planda tutar; bu sayede hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir yaklaşım sağlar [77].

EPA'ya göre, EZY tek bir zararlı kontrol yöntemi değildir; aksine, bir dizi zararlı yönetimi değerlendirmesi, kararı ve kontrol sürecidir [77]. EZY uygulayan üreticiler, zararlı bulaşma potansiyelinin farkında olarak dört aşamalı bir yaklaşımı takip eder:

Eylem eşiklerini belirleme: Kontrol önlemleri uygulanmadan önce, EZY hangi zararlı popülasyon seviyesi veya çevresel koşulda müdahalenin gerekli olacağını belirler. Ara sıra bir zararlı görmek otomatik olarak işlem gerektirmez. Kararlar, zararlıların ekonomik veya kabul edilemez hasara yol açma olasılığına göre alınır; böylece kontrol önlemleri gerekçeli ve zamanında olur.

Zararlıları izleme ve doğru tanımlama: Her böcek, yabancı ot veya organizma zararlı değildir; birçok tür zararsız veya faydalıdır. EZY, düzenli gözlem ve doğru tanımlamanın önemini vurgular, böylece yönetim seçenekleri gerçek ihtiyaçlara dayanır ve gereksiz pestisit kullanımını önler.

Önleme: Önleme, EZY'in temelidir. Amaç, tarım alanları, peyzaj veya kapalı ortamları, zararlı patlaması olasılığını azaltacak şekilde yönetmektir. Tarımda bu, ürün rotasyonu, dayanıklı bitki çeşitleri kullanımı ve temiz, zararsız materyal ekimi gibi uygulamaları içerebilir. Bu stratejiler genellikle ekonomik, etkili ve insan ile çevre açısından düşük risklidir.

Kontrol: İzleme ve eşik değerler, zararlıların yönetilmesi gerektiğini gösterdiğinde ve önleyici önlemler yetersiz kaldığında, EZY mevcut kontrol seçeneklerini etkililik ve güvenlik açısından değerlendirir. Öncelik, en düşük riskli yöntemlere verilir; örneğin eşeyssel davranışı bozmak için feromonlar veya tuzaklar, elle toplama gibi fiziksel ve mekanik teknikler. Bu önlemler yeterli kontrol sağlamazsa, dikkatle hedeflenen pestisit uygulamaları kullanılabilir. Geniş kapsamlı ve seçici olmayan pestisit püskürtme yalnızca son çare olarak düşünülür.

9. Öneriler

Kimyasal pestisitlere bağımlılığı azaltırken etkili zararlı kontrolü sağlamak için, çiftçiler Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) stratejisinin bir parçası olarak alternatif kontrol yöntemlerini uygulamaya teşvik edilir. Biyopestisitler ve diğer kimyasal olmayan yaklaşımların etkinliğini artırmak için aşağıdaki pratik öneriler uygulanabilir:

1. *Tarlaları düzenli olarak izleyin:* Ürünleri sık sık kontrol ederek zararlıları erken yaşam evrelerinde tespit edin. Erken tanı, zamanında müdahale olanağı sağlar ve biyolojik ile biyokimyasal kontrol yöntemlerinin etkinliğini artırır.

2. *Kontrol önlemlerini yalnızca gerektiğinde uygulayın:* Tarlaları sadece birkaç zararlının varlığına dayanarak tedavi etmeyin. Zararlı popülasyonlarının ekonomik zarar verebileceği eşiğe ulaştığında müdahale edilmesi için eylem eşiklerini kullanın.

3. *Doğru zararlıya uygun ürünü seçin:* Hedef zararlıya özel olarak etkili biyopestisitler ve biyolojik kontrol ajanları seçin. Uygulamadan önce zararlının doğru şekilde tanımlandığından emin olun.

4. *Biyopestisitleri uygun koşullarda uygulayın:* Çevresel faktörler biyopestisitlerin performansını büyük ölçüde etkiler. Ürünleri:

- Güçlü güneş ışığından kaçınmak için sabah erken veya akşam geç saatlerde uygulayın,
- Biyolojik ajanın uygun sıcaklık ve nem koşullarında uygulanmasını sağlayın,
- Uygulamadan kısa süre sonra yağmur beklenmediğinden emin olun.

5. *Etiket talimatlarına dikkatle uyun:* Önerilen dozları, uygulama zamanını, depolama koşullarını ve uyumluluk yönergelerini takip edin. Yanlış kullanım etkinliği azaltabilir ve kaynak israfına yol açabilir.

6. *Doğru kapsama ve tüketimi sağlayın:* Birçok biyopestisit, etkili olabilmesi için zararlılar tarafından yenilmelidir. Uygulamaları zararlıların beslendiğı bitki kısımlarına yapın ve yaprak, gövde veya toprak üzerinde gereken kapsamı sağlayın.

7. *Birden fazla EZY yöntemini birleştirin:* En iyi sonuçlar, biyopestisitleri diğer yöntemlerle birleştirerek elde edilir:

- Ürün rotasyonu ve dayanıklı çeşitler
- Eşlikçi bitkilendirme ve tuzak bitkiler
- Fiziksel bariyerler ve tuzaklama
- Doğal düşmanlar

Tek bir kontrol yöntemine güvenmekten kaçının.

8. *Yararlı böcekleri koruyun:* Özellikle predatör veya parazitoid salarken geniş spektrumlu kimyasal pestisitlerden kaçının. Yararlı böcekleri desteklemek için çiçekli bitkiler, tarla kenarları ve barınakları koruyun.

9. *Kimyasal pestisitlerle uyumluluğ u kontrol edin:* Kimyasal kontrol kaçınılmazsa, biyolojik ajanlarla uyumlu seçici ürünleri tercih edin. Ürünleri karıştırmadan önce uyumluluğ un doğrulandığ ından emin olun.

10. *Gerekirse tekrarlayan uygulamalar planlayın:* Bazı biyopestisitlerin kalıcı etkisi kısa sürelidir. Özellikle zararlı baskısının yüksek olduğ u dönemlerde takip uygulamalarına hazırlıklı olun.

11. *Kayıt tutun ve sonuçları değerlendirin:* Zararlı seviyeleri, hava koşulları, kullanılan tedaviler ve sonuçları kaydedin. Bu, gelecek sezonlarda karar vermeyi iyileştirir ve uzun vadeli tarım sürdürülebilirliğini destekler.

10. Sonuçlar

Modern tarım, etkili zararlı kontrolü ihtiyacı ile insan sağlığını, çevreyi ve biyolojik çeşitliliği koruma sorumluluğunu dengelemelidir. Bu eğitim materyali, alternatif zararlı kontrol yöntemleri Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) erevesinde uygulandığında, sentetik kimyasal pestisitlere bağımlılığı azaltmanın hem uygulanabilir hem de pratik olduğunu göstermektedir.

Biyopestisitler, mikroorganizmalar, biyokimyasal ajanlar ve bitkiye entegre koruyucuları kapsar. Zararlı popülasyonlarını etkili Şekilde baskılamakla birlikte, hedef dışı organizmalar, yararlı böcekler ve ekosistemler üzerindeki riskleri minimize eder. Yüksek özgüllükleri, düşük toksisiteleri ve sınırlı çevresel kalıcılıkları, biyopestisitleri sürdürülebilir ve organik tarım sistemleri için özellikle uygun kılar. Doğru seçilip uygulandıklarında, gıdalardaki pestisit kalıntılarını önemli lde azaltabilir ve zararlılarda direnç gelişimini yavaşlatabilirler.

Doğal düŐmanlarla biyolojik kontrol, predatörler, parazitoidler ve entomopatojen organizmalar gibi faydalı türleri kullanarak zararlı popülasyonlarını zararlı seviyelerin altında tutmada kritik bir rol oynar. Bu yararlı organizmaların habitat yönetimi, dikkatli pestisit seçimi ve uygun salım stratejileri ile desteklenmesi, uzun vadeli zararlı düzenlemesini ve ekosistem stabilitesini artırır.

EŞlikçi bitkilendirme, ürün rotasyonu ve diğer kültürel uygulamalar, zararlı yaşam döngülerini bozarak, konukçu bitki çekiciliğini azaltarak ve doğal düşmanları teşvik ederek zararlı yönetimini güçlendirir. Bu nleyici yaklaŐımlar, kimyasal müdahaleler gerekmeden önce zararlı baskısını azaltır ve daha sağlıklı ürünler ile topraklar sağlar.

Fiziksel kontrol yöntemleri, bariyerler, tuzaklama ve elle toplama gibi seçenekler, özellikle erken bulaŐmalar ve hasat sonrası koruma için değerli kimyasal olmayan yöntemlerdir. Bu yöntemler biyolojik ve kültürel önlemlerle birleŐtirildiėinde, pestisit kullanımını minimize ederken etkili zararlı kontrolünü sürdürmeye yardımcı olur.

Alternatif zararlı kontrol yöntemlerinin başarısı, zararlı biyolojisinin anlaşılması, düzenli izleme, doğru uygulama zamanlaması ve uygun çevresel koşullara bağlıdır. Biyopestisitler, proaktif kullanıldığında, etiket talimatlarına uygun Şekilde uygulandığında ve diğer EZY stratejileriyle entegre edildiğinde en etkili sonucu verir; tek başına kullanılmaları önerilmez.

Sonuç olarak, alternatif zararlı kontrol yöntemleri, modern tarım için uygulanabilir, vreye duyarlı ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir yaklaşımı temsil eder. EZY temelli stratejileri benimseyerek ve biyopestisitler ile kimyasal olmayan kontrol yöntemleri hakkında farkındalığı artırarak, çiftçiler

ürün verimliliğini koruyabilir, ekosistemleri destekleyebilir ve tüketiciler için daha güvenli gıda üretimine katkıda bulunabilir.

11. Kaynaklar

- [1] United States Environmental Protection Agency. (2026). Ingredients used in pesticide products: What are biopesticides? EPA. <https://www.epa.gov/Ingredients-used-pesticide-products/what-are-biopesticides>.
- [2] Nollet, L.M.L., & Mir, S. (Eds.). (2023). *Biopesticides Handbook* (2nd ed.). CRC Press.
- [3] Czaja, K., Góralczyk, K., Struciński, P., Hernik, A., Korcz, W., Minorczyk, M., Łyczewska, M., & Ludwicki, J.K. (2015). Biopesticides – towards increased consumer safety in the European Union. *Pest Management Science*, *71*(1), p. 3–6.
- [4] Mkindi, A., Mtei, K., Njau, K., & Ndakidemi, P. (2015). The potential of using indigenous pesticidal plants for insect pest control to small scale farmers in Africa. *American Journal of Plant Sciences*, *6*, p. 3164–3174.
- [5] Saddam, B., Idrees, M.A., Kumar, P., & Mohammad, M. (2024). Biopesticides: Uses and importance in insect pest control: A review. *International Journal of Tropical Insect Science*, *44*, p. 1013–1020.
- [6] 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.
- [7] Brohma, S., Guleria, A., Banerjee, S., Kalia, S., Sharma, R., Mondal, K., & Kaur, G. (2025). A review on new horizons in biopesticide development highlighting microbial advances for climate-smart agriculture. *Journal of Applied and Natural Science*, *17*(4), p. 1781–1798.
- [8] Ruiu, L. (2018). Microbial biopesticides in agroecosystems. *Agronomy*, *8*, 235.
- [9] Tadesse Mawcha, K., Malinga, L., Muir, D., Ge, J., & Ndolo, D. (2024). Recent advances in biopesticide research and development with a focus on microbials. *F1000Research*, *13*, 1071.
- [10] Kumar, J., Ramlal, A., Mallick, D., & Mishra, V. (2021). An overview of some biopesticides and their importance in plant protection for commercial acceptance. *Plants*, *10*(6), 1185.
- [11] Roh, J.Y., Choi, J.Y., Li, M.S, Jin, B.R., & Je, Y.H. (2007). *Bacillus thuringiensis* as a specific, safe, and effective tool for insect pest control. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *17*(4), p. 547–559.

- [12] Meenatchi, R., & Negi, A. (2021). Biopesticides for pest management. In V. Venkatramanan, S. Shah, & R. Prasad (Eds.), *Sustainable bioeconomy* (pp. 239–266). Springer Nature Singapore.
- [13] Mnif, I., & Ghribi, D. (2015). Potential of bacterial derived biopesticides in pest management. *Crop Protection*, 77, 52–64.
- [14] Filha, M. H. N. L. S., Berry, C., & Regis, L. (2014). *Lysinibacillus sphaericus*: Toxins and mode of action, applications for mosquito control and resistance management. In *Advances in insect physiology*, 47 (pp. 89–176). Elsevier.
- [15] Thavara, U., Tawatsin, A., Asavadachanukorn, P., & Mulla, M.S. (2009). Field evaluation in Thailand of spinosad, a larvicide derived from *Saccharopolyspora spinosa* (Actinomycetales) against *Aedes aegypti* (L.) larvae. *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, 40, p. 235–242.
- [16] Mahmoud, B.A., Metwally, M., & Atalla, F.A. (2005). Metabolites derived from fermentation of *Saccharopolyspora spinosa* as insecticide for the cotton leafworm *Spodoptera littoralis* (Boisd.) (Noctuidae: Lepidoptera). *Journal of Plant Protection and Pathology*, 30, p. 1685–1692.
- [17] Vedamurthy, A., Jogaiah, S., & Shruthi, S. (2022). Insights into the genomes of microbial biopesticides. In *Biopesticides* (pp. 225–236). Elsevier.
- [18] Tomar, P., Thakur, N., Jhamta, S., Chowdhury, S., Kapoor, M., Singh, S., Shreaz, S., Rustagi, S., Rai, P.K., Rai, A.K., & Yadav, A.N. (2024). Bacterial biopesticides: Biodiversity, role in pest management and beneficial impact on agricultural and environmental sustainability. *Heliyon*, 10(11), e31550.
- [19] Martínez-Balerdi, M., Caballero, J., Aguirre, E., Caballero, P., & Beperet, I. (2025) Baculoviruses as microbial pesticides: potential, challenges, and market overview. *Viruses*, 17, 917.
- [20] Harrison, R.L., & Hoover, K. (2012). Chapter 4: Baculoviruses and other occluded insect viruses. In F. E. Vega, H. K. Kaya (Eds.), *Insect Pathology*. 2nd edition (pp. 73–131). Academic Press.
- [21] Pavan S., Raghunandan, B.I., Nainesh, P., Rajarushi, M., Raiza, M.R., & Kalyanam, L. (2024). Baculoviruses in integrated pest management of fall armyworm. *Journal of Advances in Biology and Biotechnology*, 27, p. 261-271.
- [22] Cory, J.S. (2000). Assessing the risks of releasing genetically modified virus insecticides: progress to date. *Crop Protection*, 19(8–10), p.779–785.

- [23] Cory, J.S. Myers, J.H. (2003). The ecology and evolution of insect baculoviruses. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, p.239–272.
- [24] Deiss, F. (2025). Focus on granulovirus-based biopesticides: use, mode of action, and benefits. CABI. <https://bioprotectionportal.com/resources/granulovirus-based-biopesticides-use-mode-of-action-and-application/>
- [25] Killick, H.J. (1990). Influence of droplet size, solar ultraviolet light and protectants, and other factors on the efficacy of baculovirus sprays against *Panolis flammea* (Schiff.) (*Lepidoptera: Noctuidae*). *Crop Protection*, 9, p. 21–28.
- [26] Lasa, R., Ruiz-Portero, C., Alcázar, M.D., Belda, J.E., Caballero, P., & Williams, T. (2007) Efficacy of optical brightener formulations of *Spodoptera exigua* multiple nucleopolyhedrovirus (SeMNPV) as a biological insecticide in greenhouses in southern Spain. *Biological Control*, 40(1), p.89–96.
- [27] Landwehr, A. (2021). Benefits of baculovirus use in IPM strategies for open field and protected vegetables, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 593796.
- [28] Deiss, F. (2024). Application of bioprotection products: A beginner’s guide. CABI. <https://bioprotectionportal.com/resources/application-bioprotection-products/>
- [29] Langner, T., & Göhre, G. (2016). Fungal chitinases: function, regulation, and potential roles in plant/pathogen interactions. *Current Genetics*, 62, p. 243–254
- [30] Gabarty A, Salem, H.M., Fouda, M.A., Abas, A.A., & Ibrahim, A.A. (2014). Pathogenicity induced by the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* in *Agrotis ipsilon* (Hufn.). *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7, p. 95–100.
- [31] Ferreyra-Suarez, D., García-Depraect, O., & Castro-Muñoz, R. (2024). A review on fungal-based biopesticides and biofertilizers production. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 283, 116945.
- [32] Lacey, L.A., Grzywacz, D., Shapiro-Ilan, D.I., Frutos, R., Brownbridge, M., & Goettel, M.S. (2015). Insect pathogens as biological control agents: back to the future. *Journal of Invertebrate Pathology*, 132, p. 1–41.
- [33] M. majus infection stages on *Oryctes rhinoceros* grubs in field condition. Wikimedia. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M._majus_infection_stages_on_Oryctes_rhinoceros_grubs_in_field_condition.jpg

- [34] Chandler, D., Davidson, G., Grant, W.P., Greaves, J., & Tatchell, G.M. (2008). Microbial biopesticides for integrated crop management: an assessment of environmental and regulatory sustainability. *Trends in Food Science & Technology*, 19(5), p. 275–283.
- [35] Chandler, D., Bailey, A.S., Tatchell, G.M., Davidson, G., Greaves, J., & Grant, W.P. (2011). The development, regulation and use of biopesticides for integrated pest management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366, p. 1987–1998.
- [36] Sarwar, M. (2015). Biopesticides: an effective and environmentally friendly insect-pests inhibitor line of action. *International Journal of Engineering and Advanced Research Technology (IJEART)*, 1(2), p. 10–15.
- [37] Dorhout, D. L., Sappington, T. W., Lewis, L. C., & Rice, M. E. (2011). Flight behaviour of European corn borer infected with *Nosema pyrausta*. *Journal of Applied Entomology*, 135(6), 417–426.
- [38] Senthil-Nathan, S. (2015). A review of biopesticides and their mode of action against insect pests. In *Environmental sustainability* (pp. 49–63). Springer.
- [39] Kumari, I., Hussain, R., Sharma, S., Geetika, & Ahmed, M. (2022). Microbial biopesticides for sustainable agricultural practices. In A. Rakshit, V. S. Meena, P. C. Abhilash, B. K. Sarma, H. B. Singh, L. Fraceto, M. Parihar, & A. K. Singh (Eds.), *Advances in bio-inoculant science: Biopesticides* (pp. 301–317). Woodhead Publishing.
- [40] Usta, C. (2013). Microorganisms in biological pest control—bacterial toxin application and environmental effects. In M. Silva-Opps (Ed.), *Current progress in biological research* (pp. 287–317). IntechOpen.
- [41] Deiss, F. (2025). *Macrobials in biocontrol: Beginner’s guide – types and how to use*. CABI. <https://bioprotectionportal.com/resources/macrobials-in-biocontrol/>
- [42] Magierowicz, K., Górska-Drabik, E., & Sempruch, C. (2019). The insecticidal activity of *Satureja hortensis* essential oil and its active ingredient-carvacrol against *Acrobasis advenella* (Zinck.) (*Lepidoptera, Pyralidae*). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 153, 122–128.
- [43] Tripathi, A. K., Upadhyay, S., Bhuiyan, M., & Bhattacharya, P. R. (2009). A review on prospects of essential oils as biopesticide in insect-pest management. *Journal of Pharmacognosy and Phytotherapy*, 1, 52–63.

- [44] Huang, S. H., Xian, J. D., Kong, S. Z., Li, Y. C., Xie, J. H., & Lin, J. (2014). Insecticidal activity of pogostone against *Spodoptera litura* and *Spodoptera exigua*. *Pest Management Science*, 70(3), 510–516.
- [45] Mossa, A. T. H. (2016). Green pesticides: Essential oils as biopesticides in insect-pest management. *Journal of Environmental Science and Technology*, 9(5), 354.
- [46] Altemimi, A., Lakhssassi, N., Baharlouei, A., Watson, D., & Lightfoot, D. (2017). Phytochemicals: Extraction, isolation, and identification of bioactive compounds from plant extracts. *Plants*, 6(4), 42.
- [47] Khursheed, A., Rather, M. A., Jain, V., Wani, A. R., Rasool, S., Nazir, R., Malik, N. A., & Majid, S. A. (2022). Plant-based natural products as potential eco-friendly and safer biopesticides: A comprehensive overview of their advantages over conventional pesticides, limitations, and regulatory aspects. *Microbial Pathogenesis*, 173, 105854.
- [48] Abbey, L., Abbey, J., Leke-Aladekoba, A., Iheshiulo, E. M. A., & Ijenyo, M. (2019). Biopesticides and biofertilizers: Types, production, benefits, and utilization. In B.K. Simpson, A.N.A. Aryee and F. Toldrá (eds.), *Byproducts from agriculture and fisheries* (pp. 479–500). Wiley.
- [49] CABI BioProtection Portal. (2024). Practical biocontrol: Understanding the types of biological agents. <https://bioprotectionportal.com/>
- [50] Halder, J., Rai, A. B., & Kodandaram, M. H. (2013). Compatibility of neem oil and entomopathogens for management of vegetable sucking pests. *National Academy Science Letters*, 36, 19–25.
- [51] Mordue, A. J., Morgan, E. D., & Nisbet, A. J. (2005). Azadirachtin, a natural product in insect control. In L. I. Gilbert (Ed.), *Comprehensive molecular insect science* (pp. 117–135). Elsevier.
- [52] Kojima, T., Yamato, S., & Kawamura, S. (2022). Natural and synthetic pyrethrins as feeding deterrents against *Phormia regina*. *Insects*, 13(8), 678.
- [53] Abd El-Ghany, N. M. (2019). Semiochemicals for controlling insect pests. *Journal of Plant Protection Research*, 59(1).
- [54] Norin, T. (2007). Semiochemicals for insect pest management. *Pure and Applied Chemistry*, 79(12), 2129–2136.
- [55] Deiss, F. (2025). Semiochemicals: Beginner’s guide – types and how to use. CABI. <https://bioprotectionportal.com/resources/semiochemicals-beginners-guide/>

- [56] Singh, M., & Kumar, A. (2024). Insect growth regulators for insect pest control: A review. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(3S), 388–393.
- [57] Parker, K. M., & Sander, M. (2017). Environmental fate of insecticidal plant-incorporated protectants. *Environmental Science & Technology*, 51(21).
- [58] Ghumar, V., Sharma, N., Gavkare, O., Khachi, B., & Singh, D. K. (2014). Biopesticides—for future. *Journal of Industrial Pollution Control*, 30, 203–205.
- [59] United States Environmental Protection Agency. (2024). Overview of plant-incorporated protectants. <https://www.epa.gov/regulation-biotechnology-under-tsca-and-fifra/overview-plant-incorporated-protectants>
- [60] United States Environmental Protection Agency. (2024). Current and previously registered plant-incorporated protectants. <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/current-and-previously-registered-section-3-plant-incorporated>
- [61] Tijjani, A., Bashir, K. A., Mohammed, I., Muhammad, A., Gambo, A., & Habu, M. (2016). Biopesticides for pests control: A review. *Journal of Biopesticides and Agriculture*, 3(1), 6–13.
- [62] Fenibo, E. O., & Matambo, T. (2025). Biopesticides for sustainable agriculture: Feasible options for adopting cost-effective strategies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1657000.
- [63] Koppert Biological Systems. (2024). Effective spider mite control with predatory mites. <https://www.koppert.com/knowledge/effective-spider-mite-control-with-predatory-mites/>
- [64] Souza, B., dos Santos-Cividanes, T. M., Cividanes, F. J., & de Sousa, A. L. V. (2019). Predatory insects. In B. Souza, L. L. Vázquez, & R. C. Marucci (Eds.), *Natural enemies of insect pests in neotropical agroecosystems* (pp. 73–87).
- [65] WikiFarmer. (2024). Biological control of greenhouse pests using natural enemies. <https://wikifarmer.com/library/en/article/biological-control-of-greenhouse-pests-using-natural-enemies>.
- [66] UC IMP. <https://ipm.ucanr.edu/home-and-landscape/biological-control-and-natural-enemies-of-invertebrates/#gsc.tab=0>.
- [67] Riddick, E. W. (2017). Identification of conditions for successful aphid control by ladybirds in greenhouses. *Insects*, 8(2), Article 2.
- [68] Ochoa, C., & Ingwell, L. (2024). Insect spotlight: Lacewing (*Chrysoperla carnea*). *Facts for Fancy Fruit*, Issue 24-03. Purdue University.

- [69] Xavier, M., & Smith, H. A. (2022). Invertebrates as Biological Control Agents of Agricultural Pests. University of Florida IFAS Extension.
- [70] Parker, J. E., Snyder, W. E, Hamilton, G. C. & Cesar Rodriguez-Saona (2013). Companion planting and insect pest control. In S. Soloneski, M., & Larramendy (Eds.), *Weed and pest control: Conventional and new challenges*. InTech.
- [71] Pickett, J. A, Woodcock, C. M, Charles A. O. M., & Zeyaur R. K. (2014). Push–pull farming systems, *Current Opinion in Biotechnology*, 26, 125-132.
- [72] Ben-Issa, R., Gomez, L., & Gautier, H. (2017). Companion plants for aphid pest management. *Insects*, 8, 112.
- [73] Mohler, C. L., & Johnson S. E. (2009). *Crop rotation on organic farms: a planning manual*, NRAES.
- [74] Government of Saskatchewan. (2024). Organic crop management – insect management. <https://www.saskatchewan.ca/business/agriculture-natural-resources-and-industry/agribusiness-farmers-and-ranchers/crops-and-irrigation/organic-crops/organic-crop-management-insect-management>
- [75] Vincent, C., Hallman, G., Panneton, B., & Fleurat-Lessard, F. (2003). Management of agricultural insects with physical control methods. *Annual Review of Entomology*, 48, 261–281.
- [76] Vincent, C., Weintraub, P. G., Hallman, G. J., & Fleurat-Lessard, F. (2008). Insect management with physical methods. In E. B. Radcliffe, W. D. Hutchison, & R. E. Cancelado (Eds.), *Integrated pest management* (pp. 309–323). Cambridge University Press.
- [77] United States Environmental Protection Agency. (2024). Integrated pest management (IPM) principles. <https://www.epa.gov/safepestcontrol/integrated-pest-management-ipm-principles>