



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

BİYOTEKNOLOJİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**BİBER BİTKİSİNİN RİZOSFERİNDE BULUNAN ENTOMOPATOJEN
NEMATODLARIN ŞEFTALİ YAPRAK BİTİ *Myzus persicae*'YE DOLAYLI
ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYDAN TERZİOĞLU

DANIŞMAN

DOÇ. DR. TUFAN CAN ULU

BİLECİK, 2026

10837430

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI
BİYOTEKNOLOJİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**BİBER BİTKİSİNİN RİZOSFERİNDE BULUNAN ENTOMOPATOJEN
NEMATODLARIN ŞEFTALİ YAPRAK BİTİ *Myzus persicae*'YE DOLAYLI
ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYDAN TERZİOĞLU

DANIŞMAN

DOÇ. DR. TUFAN CAN ULU

BİLECİK, 2026

10837430

BEYAN

Biber Bitkisinin Rizosferinde Bulunan Entomopatojen Nematodların Şeftali Yaprak Biti *Myzus persicae*'ye Dolaylı Etkileri başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) TOVAG 223O257 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Aydan Terzioğlu

.../.../2026

İmza:

	YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN ÖĞRENCİ BEYAN FORMU	BŞEÜ-KAYSİS Belge No	DFR-516
		İlk Yayın Tarihi/Sayısı	30.04.2026/16
		Revizyon Tarihi	00
		Revizyon No.su	00
		Toplam Sayfa	1

Bölüm I. Yapay Zekâ Kullanım Durumu

- ☒ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faaydalandım**.
☐ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı herhangi bir araçtan **faaydalanmadım**.

Bölüm II. Yapay Zekâ Kullanım Detayları

**Bu bölüm yalnızca yapay zekâ kullanımı beyan edilmiş ise doldurulacaktır. Aksi durumda boş bırakılmalıdır.*

Tezinizde/projenizde kullandığınız yapay zekâ araçlarını ve sürümünü listeleyiniz:

Google Gemini 3.1 Pro
Google NotebookLM
ChatGPT 5.6 Luna
Claude Sonnet 4.6

**Yapay zekâ araçlarını tezin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım.
(Birden fazla seçenek işaretlenebilir):**

- ☒ Cümle oluşturma
☒ Literatür tarama
☒ Çeviri
☒ Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☐ Görüntü üretme
☐ Kaynakça düzenleme
☐ Diğer (Belirtiniz):.....

Bu çalışmada yapay zekâ kullanımı **Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber**'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup yapay zekâ araçlarından alınan destek, etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir. Yapay zekâ kullanımı, çalışmanın özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmayacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Usulsüz yapay zekâ kullanımı (örneğin: kaynak göstermeksizin metin üretimi, otomatik içerik üretiminin özgün eser gibi sunulması, yanıltıcı kaynak gösterimi vb.) tarafımdan kesinlikle yapılmamıştır. Yapay zekâ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Aydan Terzioğlu

../../2026

İmza:

ÖN SÖZ

Yaprak bitleri, kültür bitkilerinde doğrudan beslenerek oluşturdıkları zararların yanı sıra birçok bitki virüsünün taşınmasında da önemli rol oynayan ekonomik açıdan önemli zararlılar arasında yer almaktadır. Günümüzde yaprak bitleriyle mücadelede yaygın olarak kimyasal insektisitler kullanılmakta; ancak bu uygulamalar zararlılarda direnç gelişimi, doğal düşmanların olumsuz etkilenmesi, çevre kirliliği ve insan sağlığı açısından çeşitli riskleri de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle çevre dostu, sürdürülebilir ve etkili alternatif mücadele yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Entomopatojen nematodlar (EPN), toprak altında yaşayan, biyolojileri gereği bir konukçuya ihtiyaç duyan ve gelişimleri sırasında konukçuyu öldürerek tarımsal zararlılara karşı biyolojik mücadelede kullanılan mikroskobik organizmalardır. Son yıllarda farklı zararlı türleri üzerinde yürütülen çalışmalar, EPN'lerin yaprak bitlerinin kontrolünde de potansiyel bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Bu tez çalışması, EPN'lerin yaprak bitlerine karşı biyolojik mücadeledeki potansiyelinin belirlenmesi ve elde edilen bulguların sürdürülebilir bitki koruma uygulamalarına katkı sağlaması amacıyla yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının her aşamasında engin bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, değerli görüş ve önerileriyle çalışmama önemli katkılar sağlayan, sabrı, anlayışı ve desteğiyle her zaman yanımda olan, akademik birikimi ve rehberliğiyle bana örnek teşkil eden çok kıymetli danışmanım Sayın Doç. Dr. Tufan Can ULU'ya en içten saygı, şükran ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve birikimleriyle bana destek olan, değerli görüşleriyle yol gösteren ve akademik gelişimime önemli katkılar sağlayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gizem Berber Tortop'a, laboratuvar olanaklarının kullanılması noktasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Sayın Prof. Dr. Alev AKPINAR BORAZAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak her zaman yanımda olan değerli arkadaşım Rabia Nur AKSU'ya içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatımın başlangıcından itibaren yanımda bulunan, bana maddi ve manevi her türlü imkânı sağlayarak hiçbir konuda desteklerini esirgemeyen kıymetli ailem Arzu TERZİOĞLU ve Arslan TERZİOĞLU'na , ayrıca her zaman yanımda olan ve desteğini hiçbir

zaman esirgemeyen sevgili kardeşlerim Aysun, Ayfer, Songül, Gönül, Oğuzhan, Mustafa Can TERZİOĞLU'na sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) TOVAG 223O257 numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

ÖZET

Biber, dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen, insan beslenmesinde önemli yere sahip ve yüksek ekonomik değeri bulunan sebze türlerinden biridir. Biber üretim sürecinde birçok zararlı türün saldırısına maruz kalmakta ve bu durum önemli verim ile kalite kayıplarına neden olmaktadır. Biber yetiştiriciliğinde en önemli zararlılardan biri olan yeşil şeftali yaprak biti *Myzus persicae*, bitki özsuğunu emerek doğrudan zarar oluşturmasının yanı sıra çok sayıda bitki virüsünün vektörlüğünü yaparak ekonomik kayıpları daha da artırmaktadır. Bu zararlı ile mücadelede kimyasal insektisitler yaygın olarak kullanılmasına rağmen, yoğun ve bilinçsiz kullanım sonucu direnç gelişimi, çevre kirliliği, hedef dışı organizmalar üzerindeki olumsuz etkiler ve insan sağlığına yönelik riskler alternatif mücadele yöntemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Entomopatojen nematodlar (EPN), birçok zararlı böceğe karşı etkili olan biyolojik mücadele etmenidir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, bitki kök bölgesine uygulanan EPN'lerin bitkide dolaylı etkiler oluşturarak toprak üstünde beslenen zararlıları da etkileyebileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, EPN uygulamalarının biber bitkisinde *M. persicae*'nin biyolojik özellikleri üzerine bitki aracılı dolaylı etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Canlı EPN ve EPN enfekteli larva uygulamalarının yaprak bitlerinin yaşam tablosu parametrelerine etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda canlı *Heterorhabditis bacteriophora* infektif juvenilleri ve *H. bacteriophora* ile enfekteli larva uygulamalarının yaprak bitinin yaşam süresi, ergin yaşam süresi, ovipozisyon süresi ve doğurganlığını önemli düzeyde azalttığı belirlenmiştir. *Steinernema carpocapsae* içeren uygulamalarda ise etkinin daha sınırlı olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte donmuş larva uygulamasında gelişim süresinin uzadığı, ancak yaşam süresi üzerindeki etkinin paralel şekilde artmadığı saptanmıştır. Elde edilen bulgular, doğrudan EPN uygulamalarının bitkide sistemik savunma mekanizmalarını uyararak yaprak bitlerinin gelişim ve üreme performansını olumsuz yönde etkileyebildiğini göstermiştir. Sonuç olarak, EPN'lerin bitkide savunma mekanizmalarını harekete geçirerek yaprak biti popülasyonlarının baskılanmasında önemli bir potansiyele sahip olduğu ve sürdürülebilir biyolojik mücadele programlarında değerlendirilebilecek umut verici bir potansiyel oluşturduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bitki savunma sistemi, biyolojik mücadele, *Heterorhabditis bacteriophora*, *Steinernema carpocapsae*, yaşam tablosu parametreleri

ABSTRACT

Pepper is one of the most widely cultivated vegetable crops worldwide, with an important role in human nutrition and high economic value. During pepper production, plants are attacked by numerous pest species, resulting in significant yield and quality losses. One of the most important pests of pepper is the green peach aphid, *Myzus persicae*, which causes direct damage by sucking plant sap and further increases economic losses by acting as a vector of numerous plant viruses. Although chemical insecticides are widely used to control this pest, the intensive and indiscriminate use of these chemicals has increased the need for alternative control methods due to the development of insecticide resistance, environmental pollution, adverse effects on non-target organisms, and risks to human health. Entomopathogenic nematodes (EPNs) are biological control agents that are effective against a wide range of insect pests. Recent studies have shown that EPNs applied to the plant root zone can affect aboveground-feeding pests through indirect, plant-mediated effects. Therefore, this study aimed to determine the indirect plant-mediated effects of EPN applications on the biological characteristics of *M. persicae* on pepper plants. The effects of EPN infective juveniles and EPN-infected larval applications on the life-table parameters of the aphids were evaluated. The results of the study revealed that applications of live *Heterorhabditis bacteriophora* infective juveniles and *H. bacteriophora*-infected larvae significantly reduced total longevity, adult lifespan, oviposition period, and fecundity of the aphids. Conversely, treatments involving *Steinernema carpocapsae* exhibited a more limited effect. In addition, the freezed larva application prolonged the developmental duration; however, this effect was not accompanied by a parallel increase in the effect on longevity. The findings demonstrated that direct applications of EPNs can induce systemic defense mechanisms in plants, thereby adversely affecting the development and reproductive performance of aphids. In conclusion, EPNs have considerable potential for suppressing aphid populations by activating plant defense mechanisms and may represent a promising tool for inclusion in sustainable biological control programs.

Keywords: Biological control, *Heterorhabditis bacteriophora*, life table parameters, plant defense, *Steinernema carpocapsae*

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. Materyal.....	21
3.1.1. Biber bitkisi.....	21
3.1.2. Yaprak biti	21
3.1.3. Petek güvesi.....	22
3.1.4. Entomopatojen nematodlar (EPN)	22
3.1.5. İnsektisit	24
3.2. Yöntem	24
3.2.1. Biber bitkilerinin üretimi	24
3.2.2. Petek güvesi üretimi.....	26
3.2.3. Entomopatojen nematodların <i>in vivo</i> üretimi.....	27
3.2.4. Entomopatojen nematodların <i>in vitro</i> üretimi.....	28
3.2.5. <i>Myzus persicae</i> 'nin üretimi	33
3.2.6. Deneme deseni ve uygulama grupları.....	34
3.2.7. Yaşam tablosu parametreleri ve istatistiksel analizler	39
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
4.1. Uygulamaların ergin öncesi dönem sürelerine etkisi	42
4.2. Uygulamaların ergin süresi ve yaşam uzunluğuna etkisi	45
4.3. Uygulamaların doğurganlık parametreleri üzerine etkisi.....	48
4.4. Uygulamaların popülasyon parametreleri üzerine etkisi	52
4.5. Genel değerlendirme	58
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	60
KAYNAKÇA	62

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Uygulamaların <i>Myzus persicae</i> 'nin ergin öncesi dönemlerinin süresine etkisi.	42
Tablo 4.2. Uygulamaların <i>Myzus persicae</i> 'nin ergin süresi ve yaşam uzunluğuna etkisi.....	46
Tablo 4.3. Uygulamaların <i>Myzus persicae</i> 'nin doğurganlık parametrelerine etkisi.....	49
Tablo 4.4. Uygulamaların <i>Myzus persicae</i> 'nin popülasyon parametreleri üzerine etkisi.	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Denemelerde kullanılan biber tohumu.....	21
Şekil 3.2. Yeşil şeftali yaprak bitinin mikroskop görüntüsü.....	22
Şekil 3.3. Tez çalışmasında kullanılan son dönem <i>G. mellonella</i> larvaları.	22
Şekil 3.4. +4 °C’de muhafaza edilen <i>H. bacteriophora</i> HBH hibrit ırkının kültürleri.	23
Şekil 3.5. <i>Steinernema carpocapsae</i> türü EPN’yi içeren Ekobioset ürünü.	23
Şekil 3.6. Conoro 50 WG insektisit.	24
Şekil 3.7. Petride çimlendirilmiş biber tohumları.	25
Şekil 3.8. Viyole şaşırtılmış biber bitkileri.	25
Şekil 3.9. Deneme boyuna ulaşmış biber fideleri.	26
Şekil 3.10. <i>Galleria mellonella</i> larvaları için hazırlanan besin.....	26
Şekil 3.11. <i>Galleria mellonella</i> dönemleri.....	27
Şekil 3.12. Enfeksiyon için hazırlanan <i>G. mellonella</i> larvaları.	27
Şekil 3.13. <i>Heterorhabditis</i> (A) ve <i>Steinernema</i> (B) türleri ile enfekte edilmiş <i>G. mellonella</i> larvalarının görüntüleri.....	28
Şekil 3.14. White trap düzeneğinde enfeksiyon görüntüsü.....	28
Şekil 3.15. Enfekte kadavranın steril kabin içerisinde delinme görüntüsü.....	29
Şekil 3.16. <i>Photorhabdus</i> ve <i>Xenorhabdus</i> bakterilerinin saf kültürleri.....	30
Şekil 3.17. Orbital çalkalayıcıda bulunan erlen şişeleri.....	30
Şekil 3.18. Erlen şişelerinde sıvı ortamda üretilen <i>X. nematophila</i> (sol) ve <i>P. thracensis</i> (sağ) bakterileri.	31
Şekil 3.19. Sıvı YS ortamında <i>P. thracensis</i> için uygulanan NaOH testi.....	31
Şekil 3.20. Wouts agar üzerine inoküle edilen bakterilerin 48 saat sonraki görüntüsü.	32
Şekil 3.21. Wouts üzerinde üretilen nematod görüntüsü.	32
Şekil 3.22. Tül kafes içerisinde biber bitkisinde üretilen <i>M. persicae</i> popülasyonu.	33
Şekil 3.23. <i>Myzus persicae</i> ’nin petride üretimi.....	34
Şekil 3.24. Bir deneme biriminin günlük kontrolü.	35
Şekil 3.25. Kontrol grubunun petrillerdeki görüntüsü.	35
Şekil 3.26. İlacın tartımı (A), ilaçlı karışıma yaprağın daldırılışı (B), daldırılan yaprakların kurutuluşu (C).	36
Şekil 3.27. Dondurulmuş larvaların gömülüp bitki dikilmesi.....	36
Şekil 3.28. <i>Heterorhabditis bacteriophora</i> infektif juvenillerinin mikroskopta sayımı.....	37

Şekil 3.29. İnfektif juvenillerin bitkiye verilşi.....	37
Şekil 3.30. <i>Steinernema carpocapsae</i> uygulama dozunun mikroskopta hesaplanması.....	38
Şekil 3.31. SCN uygulama grubunun iklim kabinindeki görüntüsü.	38
Şekil 3.32. <i>Heterorhabditis bacteriophora</i> ile enfekteli larvaların bitki kök bölgesine uygulanışı.	38
Şekil 3.33. <i>Steinernema carpocapsae</i> ile enfekteli larvaların bitki kök bölgesine gömülmesi.	39
Şekil 4.1. <i>Myzus persicae</i> 'nin yaş ve döneme özgü canlılık eğrileri (s_{xj}). N1-2-3-4: Nimf dönemleri.....	43
Şekil 4.2. <i>Myzus persicae</i> 'nin yaş ve döneme özgü beklenen yaşam süresi (e_{xj}). N1-2-3-4: Nimf dönemleri.....	47
Şekil 4.3. <i>Myzus persicae</i> 'nin doğurganlık (f_{xj}) eğrileri.....	50
Şekil 4.4. <i>Myzus persicae</i> 'nin yaşa özgü canlılık (l_x), doğurganlık (m_x), ve maternite ($l_x m_x$) eğrileri	55

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

°C: Santigrat Derece

cc: Santimetreküp

CFS: Hücresiz Süpernatant (Cell Free Supernatant)

cm: Santimetre

EPN: Entomopatojen Nematodlar (Entomopathogenic Nematodes)

F0, F1, F2: Nesiller (Anaç nesil, 1. ve 2. oğul döller)

FAO: Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (Food and Agriculture Organization)

g: Gram

GRR: Brüt Üreme Oranı (Gross Reproductive Rate)

HIPV: Herbivorlar Tarafından Tetiklenen Bitki Uçucu Bileşikler (Herbivore-Induced Plant Volatiles)

IJ: İnfektif Jüvenil

IPM: Entegre Zararlı Yönetimi (Integrated Pest Management)

IRAC: İnsektisit Direnci Eylem Komitesi (Insecticide Resistance Action Committee)

ISR: Uyarılmış Sistemik Direnç (Induced Systemic Resistance)

JA: Jasmonik Asit

L: Litre

LC: Öldürücü Doz (Lethal Concentration)

µL: Mikrolitre

mm: Milimetre

N1, N2, N3, N4: Nimf dönemlerinin süreleri

NBTA: Nutrient Bromothymol Blue Agar

ρ (r): Kalıtsal Üreme Yeteneği (Intrinsic Rate of Increase)

R₀: Net Üreme Oranı (Net Reproductive Rate)

SA: Salisilik Asit

SAR: Edinilmiş Sistemik Direnç (Systemic Acquired Resistance)

T: Ortalama Döl Süresi (Mean Generation Time)

TPRP: Toplam Ergin Öncesi Dönem (Total Pre-oviposition Period)

TÜİK: Türkiye İstatistik Kurumu

VOCs: Uçucu Organik Bileşikler (Volatile Organic Compounds)

WG: Suda Dağılıbilir Granül (Water Dispersible Granule)

1. GİRİŞ

Tarım, insanlık tarihinin en temel ekonomik ve sosyo-kültürel faaliyetlerinden biri olup, toplumların gıda güvenliğini sağlama, istihdam yaratma ve ekonomik kalkınmaya katkıda bulunma açısından kritik bir rol oynamaktadır. Dünya genelinde tarım, yaklaşık 2,5 milyar insan için geçim kaynağı sağlamakta ve küresel gıda üretiminin sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır (FAO, 2022). Tarımsal üretim, sadece besin maddesi temini ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda ham madde üretimi, enerji kaynakları ve ihracata dayalı ekonomik gelir gibi çok boyutlu işlevler üstlenmektedir.

Türkiye, sahip olduğu iklim çeşitliliği ve verimli toprakları sayesinde tarımsal üretimde önemli bir potansiyele sahiptir. Ülke tarımında başta buğday, mısır, arpa, ayçiçeği, pamuk, zeytin ve çeşitli meyve-sebze türleri olmak üzere çok sayıda ürün yetiştirilmektedir. Sebze üretimi içerisinde domates, biber, patlıcan, salatalık ve fasulye ekonomik açıdan öncelikli konuma sahiptir. Özellikle biber, hem taze tüketimde hem de işlenmiş gıda sanayinde yaygın kullanımı ile Türkiye tarımı için stratejik bir ürün olarak değerlendirilmektedir (Güvenç, 2020).

Biber (*Capsicum annuum* L.), Solanaceae (Patlıcangiller) familyasına ait önemli bir kültür bitkisidir. Bu türün Orta Amerika orijinli olduğu düşünülmektedir ve bu bölge bitkinin genetik çeşitliliğinin en yüksek olduğu yer olarak kabul edilmektedir (Kraft vd., 2014). Biber, ılık iklim koşullarında tek yıllık, tropik bölgelerde ise çok yıllık olarak yetiştirilebilmektedir. Yüksek adaptasyon yeteneği sayesinde geniş ekolojik alanlarda üretilebilmekte olup, hem ekonomik değeri hem de beslenme açısından taşıdığı önem nedeniyle dünya genelinde de yaygın olarak yetiştirilmektedir. Türkiye, dünya biber üretiminde Çin ve Meksika'nın ardından yaklaşık %6,5'lik payla üçüncü sırada yer alarak küresel pazarda söz sahibi bir konumdadır (FAO, 2024). Ülkemizde yıllık yaklaşık 2,2 milyon ton biber üretilmekte olup, üretimin %53,81 gibi büyük bir bölümü Akdeniz bölgesinden karşılanmaktadır (TÜİK, 2024). Biber; taze tüketimin yanı sıra salça, turşu, baharat (pul ve toz biber), dondurulmuş gıda, çocuk maması, boya ve hatta ilaç sanayisi gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Besin değeri açısından değerlendirildiğinde biber; insan sağlığı için kritik öneme sahip A ve C vitaminleri bakımından zengin olup, aynı zamanda yüksek antioksidan kapasiteye sahiptir. İçerdiği fenolik bileşikler, karotenoidler ve diğer biyoaktif maddeler sayesinde oksidatif stresin azaltılmasına katkı sağlayan fonksiyonel bir gıda olarak kabul edilmektedir. Bu özellikleriyle biber, yalnızca temel bir sebze türü değil, aynı zamanda insan sağlığını destekleyici biyolojik aktif bileşenler içeren önemli bir besin kaynağıdır. Biberin en stratejik biyolojik aktif maddesi kapsaisin (capsaicin) bileşiğidir. Özellikle acı biber çeşitlerinde yüksek

konsantrasyonlarda bulunan bu sekonder metabolit, biberin acılık derecesini belirleyen temel faktör olarak kabul edilmektedir. Güçlü antioksidan, antienflamatuar ve antimikrobiyal özellikleriyle öne çıkan kapsaisin, bitki savunma sisteminde zararlılara karşı doğal bir bariyer görevi üstlenmesinin yanı sıra, farmakolojik ve tıbbi araştırmalarda da çok yönlü biyoaktivitesi nedeniyle yaygın biçimde incelenmektedir (Reyes-Escogido vd., 2011).

Biber yetiştiriciliğinde verim ve kaliteyi sınırlandıran çok sayıda hastalık ve zararlı etmen bulunmaktadır. Fungal, bakteriyel veya viral kökenli patojenler ile farklı beslenme stratejilerine sahip fitofag zararlılar, biber bitkisinin kök, gövde, yaprak ve meyve dokularında doğrudan veya dolaylı hasarlar meydana getirmektedir. Söz konusu biyotik stres faktörleri, bitkinin fizyolojik ve metabolik süreçlerini sekteye uğratarak yalnızca doğrudan kantitatif verim kayıplarına yol açmakla kalmamaktadır. Bu etmenler aynı zamanda, biber meyvesinin ticari kalitesini, pazar değerini ve insan sağlığı açısından büyük önem taşıyan vitamin, mineral ile kapsaisinoidler gibi biyoaktif içerik zenginliğini de ciddi oranda erozyona uğratmaktadır. Biber yetiştiriciliğinde ekonomik açıdan en önemli zararlı gruplarından biri yaprak bitleridir. Yaprak bitleri biber üretiminde önemli ekonomik kayıplara yol açmakta; yoğun kimyasal mücadele maliyetleri, ihracatta ürün geri dönmeleri ve doğrudan verim kayıpları da dikkate alındığında bazı bölgelerde toplam kaybın %30–50'ye kadar ulaştığı gözlemlenmektedir (Blackman ve Eastop, 2006; Ali vd., 2023).

Yaprak bitleri, Hemiptera takımının Sternorrhyncha alt takımında yer alan ve dünya genelinde tanımlanmış 5.000'den fazla türüyle tarımsal ekosistemlerin en başarılı ve en yıkıcı zararlıları arasında kabul edilen kozmopolit böceklerdir (Sorensen, 2009; Van Emden - Harrington, 2017). Mevcut türlerin yaklaşık 450'si kültür bitkilerinde beslenirken, 100 kadarı tarımsal üretimde çok ciddi ekonomik kayıplara yol açan kilit zararlılar olarak öne çıkmaktadır (Ali vd., 2023; Van Emden ve Harrington, 2017). Morfolojik olarak genellikle 1–3 mm uzunluğunda, yumuşak vücutlu bireyler olup; abdomenlerinin arka kısmında bulunan kornikulus yapıları ile bilinirler. Yaprak bitleri, sokucu-emici ağız yapıları sayesinde doğrudan bitkinin floem dokusuna ulaşarak bitki özsuyunu emerler. Beslenme sırasında bitkiye salgıladıkları kimyasal maddeler ile bitki savunma mekanizmalarını baskılayan bu zararlılar, doğrudan oluşturdukları hücresel hasar ve besin kaybının yanı sıra çok sayıda tehlikeli bitki virüsünün de vektörü olarak işlev görürler (Wondrafrash vd., 2013; Huang ve Xuan, 2024).

Yaprak bitlerinin ekolojik başarısının temelinde olağanüstü üreme kapasiteleri yer almaktadır. Özellikle sıcak iklim koşullarında eşeyli üremeye gerek duymaksızın partenogenez (döllensiz üreme) ve vivipari (canlı doğum) yoluyla çoğalabilmekte; bir dişi birey yaşamı

boyunca yaklaşık 100 kadar nimf üretebilmektedir (Douglas, 2003). Nesillerin iç içe geçmesi sayesinde popülasyon artış hızı katlanarak yükselmekte, uygun çevre koşullarında yıl boyunca aktif kalabilmeleri ve popülasyon yoğunluğu ya da konukçu kalitesine bağlı olarak kanatlı (alatae) formlar oluşturabilmeleri ise kısa sürede geniş alanlara yayılmalarını sağlamaktadır (Sorensen, 2009; Van Emden ve Harrington, 2017).

Yaprak bitlerinin morfolojik ve davranışsal özellikleri de kimyasal kontrolü zorlaştırmaktadır. Salgıladıkları balımsı madde ve bazı türlerde görülen mumsu örtüler, insektisitlerin doğrudan kütikula ile temasını ve penetrasyonunu engelleyebilmektedir (Berkvens vd., 2014; Stokwe ve Malan, 2016). Kolonilerin çoğunlukla yaprak altlarında, kıvrılmış yaprak dokuları içinde veya kök bölgesinde gizlenmesi uygulama başarısını düşürmekte; özellikle toprak altında yaşayan edafik popülasyonlara insektisitlerin ulaşmasını güçleştirmektedir (Stokwe ve Malan, 2016; Van Emden ve Harrington, 2017). Ayrıca yoğun vejetatif gelişim gösteren bitkilerde kapalı kanopi yapısı, ilaç dağılımını heterojen hale getirmekte ve bazı kolonilerin uygulamadan kaçmasına olanak tanımaktadır. Bu çok yönlü biyolojik, fizyolojik ve ekolojik özellikler nedeniyle kimyasal mücadele çoğu üretim sisteminde tek başına sürdürülebilir ve yeterli bir çözüm olmaktan uzaklaşmaktadır (Ali vd., 2023; Kayahan ve Kayahan, 2026; Toledo-Hernández vd., 2025).

Bu genel özelliklerin tipik ve ekonomik açıdan en önemli örneklerinden biri yeşil şeftali yaprak biti, *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae)'dir. Polifag bir tür olan şeftali yaprak biti, 40'tan fazla bitki familyasına ait 400'ün üzerinde konukçu türde beslenebilmekte ve tarımsal üretimde ciddi kayıplara yol açmaktadır (Akköprü, 2021; Özgökçe vd., 2023). Ergin bireyleri 1-2 mm uzunluğunda olup açık sarıdan yeşile, nadiren pembe tonlarına kadar değişen vücut rengine sahiptir ve belirgin polifenizm göstererek kanatlı veya kanatsız formlar oluşturabilmektedir (Blackman - Eastop, 2006; Van Emden - Harrington, 2007). Ilıman bölgelerde kışı birincil konukçusu olan *Prunus* türlerinde yumurta evresinde geçirip yazın otsu bitkilere göç ederken, sıcak bölgelerde veya seralarda kışlık yumurta evresine ihtiyaç duymadan yıl boyu partenogenetik olarak çoğalabilmektedir (Bass vd., 2014; Van Emden ve Harrington, 2007). Ayrıca 100'den fazla bitki virüsünün, özellikle Patates Y Virüsü (PVY) ve Patates Yaprak Kıvrılma Virüsü (PLRV)'nin önemli vektörlerinden biri olması, bitki savunma mekanizmalarını efektör proteinler aracılığıyla baskılayabilmesi ve çok sayıda farklı aktif maddeye karşı güçlü direnç mekanizmaları geliştirmiş olması, bu türü entegre zararlı yönetimi programlarının en zorlu hedeflerinden biri haline getirmektedir (Akköprü, 2021; Ali vd., 2023; Bass vd., 2014).

Diğer birçok zararlı organizmada olduğu gibi yaprak bitleriyle mücadeledeki temel zorluklar arasında, sentetik insektisitlere karşı hızlı direnç gelişimi, kimyasal ilaçların gıdalarda kalıntı bırakması ve hedef olmayan organizmalar ile çevre sağlığı üzerindeki olumsuz etkiler ön plana çıkmaktadır. Bu durum, kimyasal mücadele yöntemlerinin etkinliğini sınırlamakta ve sürdürülebilir tarım açısından ciddi bir zorluk oluşturmaktadır. Bu kapsamda üreticiler, biyolojik mücadele başta olmak üzere çeşitli alternatif yöntemlere başvurmaktadır (Bass vd., 2014). Biyolojik mücadele, zararlıları doğal düşmanlar, parazitoitler, predatörler veya mikrobiyal etmenler aracılığıyla kontrol etmeyi hedefleyen entegre bir zararlı yönetimi stratejisidir. Bu yöntem, kimyasal mücadeleye kıyasla çevre ve insan sağlığı açısından daha güvenli bir alternatif sunmakta, doğal dengeyi koruma ve hedef olmayan organizmalara zarar vermeme avantajları ile öne çıkmaktadır. Dezavantajları ise etkinliğinin zararlının biyolojisine, popülasyon yoğunluğuna ve çevresel koşullara (sıcaklık, nem, UV ışını) bağlı olarak değişkenlik göstermesi, yöntemin uzmanlık gerektirmesi ve uygulama başarısının doğal düşmanların yavaş popülasyon artışı nedeniyle sınırlı olabilmesi olarak sayılabilir (Kılınçer vd., 2010).

Biyolojik mücadelede birçok farklı organizma kullanılmaktadır. Makrobiyolojik organizmalar arasında Hymenoptera ve Diptera takımında yer alan birçok parazitoit ile başta Coleoptera ve Hemiptera takımı olmak üzere birçok takıma bağlı predatörler yer almaktadır. Bu organizmalar doğrudan zararlıyı avlayarak veya parazitleyerek popülasyonları baskılayabilmektedir. Mikrobiyal biyolojik mücadele etmenleri arasında entomopatojen bakteriler, funguslar ve nematodlar öne çıkmaktadır. Dünya genelinde pazar payı olarak özellikle *Bacillus thuringiensis* türüne ait preparatlar öne çıkmakta ve bu türe ait ırklar birçok böcek grubunda etkili olmaktadır (Jouzani vd., 2017; Bravo vd., 2011). Ayrıca *Pseudomonas fluorescens* gibi bazı rizosfer bakterileri, bitkide indüklenmiş sistemik direnci (ISR) tetikleyerek yaprak biti performansını dolaylı olarak azaltabilmektedir (Ali vd., 2023; Stokwe ve Malan, 2016; Wu vd., 2022). Son dönemde entomopatojen fungus ve nematodların da önemli bir paya sahip olduğu bilinmektedir.

Entomopatojen nematodlar (EPN), Nematoda şubesi Rhabditida takımı içerisinde yer alan, Steinernematidae ve Heterorhabditidae familyalarına ait olan ve böceklerde obligat endoparazit olarak yaşayan özelleşmiş organizmalardır. Ayrıca son yıllarda Rhabditidae familyasına ait *Oscheius* cinsi de entomopatojen özellikler gösteren bir grup olarak tanımlanmıştır (Li vd., 2023). Bu nematodlar gelişimleri sırasında bir konukçu böceğe ihtiyaç duymakta ve yaşam döngülerini tamamlarken konukçularını öldürmektedir. Morfolojik açıdan

mikroskobik, segmentsiz ve silindirik bir yapıya sahip olan EPN'lerin yaşam döngüsündeki tek serbest yaşayan form, "infektif juvenil" (IJ) olarak adlandırılan üçüncü juvenil dönemidir. Infektif juveniller, beslenmeyen, çevresel streslere dayanıklı ve morfolojik olarak diğer dönemlerden farklı bir yapıdadır. *Steinernema* türlerinde IJ'ler genellikle bir önceki dönemin kütikulasını kaybederken, *Heterorhabditis* türlerinde IJ'ler genellikle ikinci dönem kütikulası (kılıf) ile kaplıdır ve konukçuya girmek için özelleşmiş bir dorsal dişe sahiptirler (Li vd., 2023).

Entomopatojen nematodların böcekleri öldürme yeteneği, Enterobacteriaceae familyasına ait bakterilerle kurdukları simbiyotik ilişkiye dayanır. *Steinernema* türleri *Xenorhabdus* cinsi bakterilerle, *Heterorhabditis* türleri ise *Photorhabdus* cinsi bakterilerle simbiyotik bir ortaklık içindedir. Etki mekanizması, IJ'lerin konukçu böceğe ağız, anüs, stigma gibi doğal açıklıklardan veya kütikulayı delerek girmesi ve ardından taşıdıkları simbiyotik bakterileri böceğin hemosölüne (vücut boşluğuna) bırakmasıyla başlar. Serbest kalan bakteriler hızla çoğalarak böceğin bağışıklık sistemini baskılayan toksinler ve sekonder metabolitler üretir, bu durum böceğin 24-48 saat içinde septisemi (kan zehirlenmesi) nedeniyle ölmesine yol açar. Bakteriler, böcek kadavrasını besin kaynağına dönüştürürken, ürettiği antibiyotikler kadavrayı diğer mikroorganizmalardan korur. Konukçu içerisindeki bu bakteri yığını ile beslenen EPN'ler, konukçu içerisinde birkaç döl verebilir. Besin tükenmeye başladığında ise yaşam döngüsü IJ formunda durur ve yeni nesil IJ'ler kadavrayı terk ederek yeni konukçu ararlar (Grewal vd., 1999). *Steinernema* türleri amfimiktik (erkek ve dişi) bir üreme yapısına sahip olup erkek ve dişi bireylerin çiftleşmesini gerektirirken, *Heterorhabditis* türlerinde IJ'lerden gelişen ilk nesil hermafrodit (otomiktik) bireylerden oluşur, sonraki nesillerde ise amfimiktik bireyler görülebilir. EPN'ler konukçu bulma stratejilerine göre, aktif olarak konukçu arayan "gezginler" (cruisers), toprak yüzeyinde pasif olarak bekleyen "pusucular" (ambushers) veya her iki stratejiyi de kullanabilen "ara formlar" (intermediate) olarak sınıflandırılırlar. Örneğin, *Heterorhabditis bacteriophora* tipik bir gezgin iken, *Steinernema carpocapsae* pusucu strateji izleyerek konukçusunu arar (Labaude ve Griffin, 2018). Ekolojik olarak Antarktika hariç tüm kıtalarda bulunabilen EPN'lerin dağılımı ve etkinliği; sıcaklık, nem, toprak yapısı ve UV radyasyonu gibi abiyotik faktörler ile nematofag mantarlar ve predatörler gibi biyotik faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir.

Entomopatojen nematodlar kitle üretimine uygun bir biyolojiye sahiptir. Üretimler *in vivo* (canlı konukçu içinde) ve *in vitro* (yapay besiyerinde) olmak üzere iki temel yöntemle gerçekleştirilmektedir. *In vivo* üretim, genellikle *Galleria mellonella* veya *Tenebrio molitor* larvaları kullanılarak "White trap" yöntemiyle yapılır ve daha çok laboratuvar araştırmaları,

küçük çaplı sera veya tarla denemeleri ve niş pazarlara hitap eden küçük işletmelerin kendi ihtiyaçlarını karşılaması için idealdir (Shapiro-Ilan vd., 2012). Ticari ölçekte üretim için ise katı veya sıvı fermentasyon tekniklerini içeren yöntemler tercih edilmektedir. Küresel çapta endüstriyel üretim için ise en uygun teknoloji, biyoreaktörlerde gerçekleştirilen *in vitro* sıvı kültür yöntemidir. Bununla birlikte, sıvı kültür yöntemi başlangıçta yüksek bir sermaye yatırımı ile ileri düzey mühendislik ve mikrobiyoloji uzmanlığı gerektirirken, elde edilen nematodların kalitesinde bazen düşüşler yaşanabilmesi ve her yeni tür için formülasyon optimizasyonunun zorunlu olması gibi dezavantajlar barındırdığından ağırlıklı olarak büyük biyoteknoloji şirketlerinin endüstriyel amaçlı kitle üretimleri için uygundur (Shapiro-Ilan ve Gaugler, 2002; Dunn vd., 2021). EPN'ler standart tarımsal ekipmanlar olan basınçlı spreyleyiciler, sisleyiciler, elektrostatik spreyleyiciler veya havadan spreyleme ve mikrojet sulama sistemleri aracılığıyla doğrudan hedef alana aktarılabilir (Shapiro-Ilan vd., 2012).

Entomopatogen nematodlar, laboratuvar koşullarında 11 takıma ve 75 familyaya ait 250'den fazla böcek türünü enfekte edebilen, oldukça geniş bir konukçu aralığına sahip canlılardır (Dey Roy - Kumar Mukhopadhyay, 2025; Peters, 1996). EPN'lerin genel olarak etkili olduğu böcekler arasında Diptera, Coleoptera, Blattodea, Hymenoptera, Lepidoptera, Orthoptera, Siphonaptera ve Isoptera takımlarına ait türler bulunmaktadır (Abate vd., 2017; Ulu vd., 2015; Şahin ve Susurluk, 2020; Dede vd., 2023). EPN'lerin en stabil olduğu doğal habitatı toprak olduğundan, günümüzdeki başarılı EPN uygulamalarının büyük bir kısmı öncelikle toprak altında yaşayan böcek evrelerini hedeflemek üzere geliştirilmiştir (Belien, 2018). Ancak, EPN'ler sadece toprak uygulamalarında değil, aynı zamanda gizli habitatlarda veya bitki örtüsünde bulunan toprak üstü böceklerle karşı da yaprakten spreyleme yöntemiyle başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir (Divya ve Sankar, 2009; van Niekerk ve Malan, 2015; Steyn vd., 2019; Şahin vd., 2018). Nitekim son yıllarda yapılan araştırmalar, formülasyon teknolojilerindeki ilerlemelerin de yardımıyla EPN'lerin toprak üstü zararlılara karşı kullanımına güçlü bir şekilde odaklanmış durumdadır (Belien, 2018). Örneğin yakın zamanda yapılan çalışmalar, *S. feltiae* ve *S. carpocapsae* gibi EPN türlerinin, yaprakta beslenen Lepidoptera türlerinin mücadelesinde yüksek potansiyel gösterdiğini ve yaprak yüzeyi biyolojik kontrolünde kilit bir oyuncu haline gelmeye başladığını ortaya koymaktadır (Ramatsitsi vd., 2025; Gözel vd., 2020).

Son yıllarda tarımsal biyoteknoloji ve bitki koruma çalışmalarında bitkilerin doğal savunma mekanizmalarını aktive etmeye yönelik yaklaşımlar ön plana çıkmış olup, bu stratejilerin temelini bitkilerde savunma sistemini uyaran biyolojik veya kimyasal moleküller

olarak tanımlanan elisitörler oluşturmaktadır (Walters vd., 2013). Bu elisitörlerin bitki tarafından algılanmasıyla birlikte İndüklenmiş Sistemik Direnç (ISR) mekanizması devreye girmekte; salisilik asit (SA) ve jasmonik asit (JA) gibi sinyal iletim yolları ile antioksidan enzim aktiviteleri indüklenmektedir (Molinari vd., 2014; Martínez-Medina vd., 2017). Bunun sonucunda oluşan hormonal ve metabolik değişimler, bitkinin uçucu organik bileşik (VOC) profilini ve ikincil metabolit sentezini değiştirerek yalnızca lokal değil, bitkinin tamamında hem toprak altı hem de toprak üstü zararlılara karşı çok yönlü bir savunma ağı oluşturmaktadır (Turlings ve Erb, 2018; Dicke ve Baldwin, 2010).

Rizosfer, bitki kökleri ile topraktaki mikroorganizmalar arasındaki yoğun biyolojik etkileşimlerin gerçekleştiği dinamik bir ekosistemdir. Güncel araştırmalar, bitkisel savunma sistemini ve buna bağlı şekillenen savunma mekanizmasını tetikleyen unsurların yalnızca kimyasal elisitörlerle sınırlı olmadığını; EPN'ler ve bunlarla ilişkili simbiyotik bakteriler gibi yararlı toprak organizmalarının da rizosferde biyolojik elisitör olarak görev yapabildiğini ortaya koymuştur (Helms vd., 2019; Jagodič vd., 2019; Manosalva vd., 2015). Hem EPN'ler hem de *Xenorhabdus* ve *Photorhabdus* bakterilerinin, çok sayıda sekonder metabolit ürettiği bilinmektedir (Stock ve Hazir, 2025). Bu metabolitler bitkilerde sistemik uyarılmış direnci tetikleyebilmekte ve bu biyolojik uyarılma sonucunda bitki genelinde meydana gelen fizyolojik ve metabolik değişimler, yaprak gibi toprak üstü organlarda beslenen herbivorların biyolojik performansını, beslenme etkinliğini ve konukçu tercihlerini olumsuz yönde etkilemektedir (Kaur vd., 2026; Li vd., 2020). Nitekim rizosferde EPN uygulamalarına maruz kalan bitkilerde domates güvesi, beyazsinek, yaprak bitleri ve patates böceği gibi farklı beslenme karakterlerine sahip zararlıların doku tüketim miktarlarında ve ovipozisyon (yumurta bırakma) oranlarında belirgin azalmalar, larva gelişiminde yavaşlama ve mortalite oranlarında artışlar kaydedilmiştir (Kamali vd., 2022; Kansman vd., 2025). Ayrıca EPN tarafından enfekte edilen böcek kadvralarının da bitkide uçucu organik bileşik (VOC) profilini değiştirdiği, bunun zararlılar üzerinde kaçırıcı (repellent) etki oluşturduğu ve aynı zamanda parazitoit arılar gibi doğal düşmanları bitkiye çekerek dolaylı savunma mekanizmasını güçlendirdiği bildirilmektedir (Helms vd., 2019; Kansman vd., 2025). Benzer etkileşimler EPN-yaprak biti eşleşmesinde de görülmektedir. Örneğin, tütün bitkisinde *H. bacteriophora* ve *S. carpocapsae* türlerinin rizosfere uygulanması sonucunda yapraklardaki nikotin ve glikoz seviyelerinin arttığı, bunun ise *M. persicae* popülasyonlarının artışı önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir (Li vd., 2020). Bu durum, yaprak bitlerinin beslenme kalitesini düşürerek üreme ve popülasyon gelişimini baskılayan bitki aracılı (plant-mediated) savunma mekanizmalarının etkinliğini

desteklemektedir. Bunun yanında EPN'ler çoklu trofik etkileşimleri de değiştirerek ekolojik dengeyi etkileyebilmekte; normal koşullarda yaprak bitleri ile kök-ur nematodları arasında oluşabilecek etkileşimler EPN uygulamasıyla değişmekte ve hem kök hem de yaprak zararlılarının performansı eş zamanlı olarak azalabilmektedir (Kaur vd., 2026).

Tüm bu bulgular, EPN'lerin yalnızca toprak altında yaşayan böcek zararlılarını doğrudan enfekte eden organizmalar olmadığını; aynı zamanda bitkilerin kök bölgesinde biyolojik elisitör görevi üstlenerek SAR ve ISR mekanizmalarını aktive eden, SA ve JA sinyal yollarını, antioksidan enzim aktivitelerini, ikincil metabolit sentezini ve VOC üretimini düzenleyen, böylece hem toprak altı hem de toprak üstü zararlılara karşı doğrudan ve dolaylı savunmayı güçlendiren çok yönlü biyolojik mücadele etmenleri olduğunu ortaya koymaktadır (Ali vd., 2023; Kansman vd., 2025; Zhao vd., 2026). Bu özellikleri sayesinde EPN'ler, yalnızca hedef zararlıyı baskılamakla kalmayıp doğal düşmanların bitkiye çekilmesini sağlayarak entegre zararlı yönetiminde (IPM) stratejik bir biyolojik ajan hâline gelmekte olup, özellikle biber üretiminde bitki-toprak-zararlı etkileşimlerinin yönetilmesi açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır (Del Valle vd., 2013).

Bu tez çalışmasında, biber bitkisinin rizosferinde bulunan EPN'lerin, şeftali yaprak biti *M. persicae* üzerindeki dolaylı etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Çalışmanın temel çıkış noktası, yaprak bitleriyle mücadelede kimyasal yöntemlerin etkinliğinin direnç gelişimi, uygulama zorlukları ve çevresel riskler nedeniyle sınırlı kalması; biyolojik mücadelede ise özellikle toprak kökenli etmenlerin bitki aracılı dolaylı etkilerinin yeterince aydınlatılmamış olmasıdır. Bu kapsamda, EPN uygulamalarının biber bitkisinde oluşturduğu fizyolojik ve savunma yanıtlarının, yaprak bitinin gelişimi, üremesi ve popülasyon artış parametreleri üzerindeki etkileri kontrollü koşullarda değerlendirilmiştir. Elde edilen bulguların, rizosfer kaynaklı biyolojik ajanların yalnızca doğrudan patojenite potansiyeliyle değil, bitkide tetiklenen sistemik direnç mekanizmaları üzerinden de zararlı baskılamadaki rollerini ortaya koyarak sürdürülebilir tarım uygulamalarına bilimsel katkı sağlaması beklenmektedir. Ayrıca bu çalışma, entegre zararlı yönetimi programlarında toprak kökenli biyolojik etmenlerin daha etkin biçimde konumlandırılmasına zemin oluşturmayı hedeflemekte, gelecekte ise farklı EPN tür ve izolatlarının, farklı konukçu bitki-zararlı kombinasyonlarında uzun dönemli ve saha ölçekli çalışmalarla değerlendirilmesinin gerekliliğine işaret etmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Toprak altı ve toprak üstü ekosistemleri, bitki ve rizosfer mikrobiyomu aracılığıyla sürekli bir kimyasal ve biyolojik iletişim içerisinde. Bu bağlamda, rizosfere uygulanan yararlı EPN'lerin ve bunlara ait simbiyotik bakterilerin etkileri yalnızca toprak altı ortamıyla sınırlı kalmamakta; bitkinin vasküler ve savunma ağları üzerinden toprak üstü herbivorlara kadar uzanan çoklu trofik (multi-trophic) etkileşimleri tetiklemektedir. EPN'lerin elisitör benzeri uyarılarla bitki savunma hormonlarını (jasmonik asit, salisilik asit vb.), antioksidatif enzimleri ve uçucu organik bileşik (HIPV) profillerini modüle ederek toprak üstü zararlıların yaşam parametrelerini ve üreme performansını dolaylı olarak olumsuz etkilediği bilinmektedir. Bu bölümde; EPN'lerin, simbiyotik bakteriyel metabolitlerinin ve indüklenmiş sistemik direnç mekanizmalarının yaprak bitleri ve diğer bazı herbivorların popülasyon dinamikleri ile biyolojileri üzerindeki etkilerini inceleyen literatür çalışmaları özetlenmiştir. Bu tez çalışması; toprak altı biyolojik mücadele elemanı olan EPN'lerin, önemli bir toprak üstü zararlı olan yeşil şeftali yaprak biti *M. persicae*'nin yaşam tablosu parametrelerine dolaylı ve sistemik etkilerini ilk kez inceleyerek, EPN'lerin entegre zararlı yönetimindeki geniş spektrumlu “ekolojik düzenleyici” rolünü kanıtlaması bakımından literatüre yenilikçi bir katkı sağlamaktadır.

Özgökçe ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, beş farklı biber çeşidinde yetiştirilen yeşil şeftali yaprakbitinin biyolojik performansı ve antioksidan savunma tepkileri karşılaştırılmıştır. Yaşam tablosu analizleri sonucunda, yaprakbitinin gelişme süresi, üreme kapasitesi ve popülasyon artış parametrelerinin biber çeşitlerine göre önemli farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle Kanyon çeşidinde zararlının en düşük kalıtsal üreme oranı ve yavru verimi saptanırken, Tufan çeşidinde en yüksek popülasyon gelişimi gözlenmiştir. Ayrıca detoksifikasyon ve antioksidan savunma mekanizmalarının da konukçu bitki çeşidine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, biber çeşitleri arasındaki genetik ve biyokimyasal farklılıkların yaprakbiti performansını doğrudan etkilediğini ve dayanıklı çeşitlerin belirlenmesinin biyolojik mücadele ve entegre zararlı yönetimi programlarına katkı sağlayabileceğini göstermektedir (Özgökçe vd., 2023).

Ali ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, *M. persicae*'nin beş farklı konukçu bitki üzerindeki hayatta kalma, üreme ve gelişim parametreleri değerlendirilmiştir. Kontrollü iklim odası koşullarında yetiştirilen yaprakbitlerinin yaşam tablosu parametreleri TWOSEX-MSChart programı ile 100.000 bootstrap simülasyonu kullanılarak analiz edilmiş ve Timing-MSChart programıyla da 60 günlük popülasyon projeksiyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen

önemli bulgulara göre; acı biberin zararlıının en hızlı gelişim gösterdiği ve en yüksek üreme oranını sergilediği en duyarlı konukçu olduğu, buna karşın beyaz lahananın ise en uzun gelişim süresi ile en düşük doğurganlık ve hayatta kalma oranlarına neden olarak yaprakbiti için en az elverişli bitki olduğu saptanmıştır. Çalışmada, konukçu bitki kalitesindeki varyasyonların, böceğin biyotik potansiyelini, yaş-dönem yapısını ve popülasyon dinamiğini ne ölçüde değiştirdiği kapsamlı yaşam tablosu analizleriyle net bir şekilde ortaya konmuştur (Ali vd., 2021).

Baral ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, *M. persicae* Flonicamid aktif maddesinin sublethal etkileri yaşam tablosu analizi ile incelenmiştir. Flonicamid'e maruz kalan bireylerde erişkin ömrü ve doğurganlık parametrelerinde azalma gözlenmiş; bu etkinin F_1 ve F_2 nesillerde de sürdüğü, F_1 ve F_2 nesillerinde toplam ömür, dişi erişkin ömrü, yumurtlama süresi ve toplam doğurganlık gibi yaşam tarihçesi özelliklerinin kısaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, bazı gelişim evrelerinde (özellikle birinci ila dördüncü instar nimf dönemlerinde) uyarıcı etkiler de gözlenmiş, bu da Flonicamid'in sublethal dozlarının yalnızca engelleyici değil bazen uyarıcı etkilere de yol açabildiğini göstermiştir. Bu morfolojik değişimlerle uyumlu olarak, F_2 neslindeki ortalama nesil zamanı (T) artarken, içsel artış hızı (r), sınırlı artış hızı (λ) ve net üreme hızı (R_0) gibi yaşam tablosu parametrelerde düşüş kaydedilmiştir. F_1 neslinde bu yaşam tablosu parametrelerinin ise önemli ölçüde etkilenmediği belirlenmiştir (Baral vd., 2023).

Koo ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, Flonicamid ve Imidacloprid insektisitlerinin sublethal dozlarının pamuk yaprakbiti (*Aphis gossypii*) üzerindeki etkileri yaşa ve döneme bağlı yaşam tablosu analizleri ile değerlendirilmiştir. Araştırmada ayrıca elektriksel penetrasyon grafiği (EPG) tekniği kullanılarak böceklerin beslenme davranışları incelenmiştir. Sonuçlar, Flonicamidin floem özsuyu emilimini önemli ölçüde engelleyerek yaprakbitlerinde beslenme yetersizliği oluşturduğunu ve buna bağlı olarak yaşam süresi ile üreme performansını azalttığını göstermiştir. Buna karşılık Imidaclopridin daha çok temas etkili bir insektisit gibi davrandığı ve beslenme davranışını Flonicamid kadar baskılamadığı belirlenmiştir. Çalışma, sublethal pestisit etkilerinin yaprakbiti popülasyon dinamiklerini değiştirebileceğini ve bu etkilerin entegre zararlı yönetimi programlarında dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur (Koo vd., 2015).

Abd-Elgawad, çalışmasında, EPN'lerin simbiyotik bakterileri olan *Xenorhabdus* türlerinin biyolojik mücadeledeki kullanım alanlarını, etki mekanizmalarını ve uygulama potansiyellerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Derlemede, farklı araştırmalardan elde

edilen bulgular bir araya getirilerek *Xenorhabdus* türlerinin ürettiği antibiyotikler, enzimler, toksinler ve diğer ikincil metabolitlerin böcekler, akarlar, fitopatojen mantarlar, bakteriler ve bitki paraziti nematodlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, hücre süspansiyonu ve toz formülasyon gibi farklı uygulama şekillerinin biyolojik mücadeledeki etkinlikleri değerlendirilmiştir. Çalışmada, *Xenorhabdus* türlerinin ürettikleri biyoaktif metabolitler sayesinde hedef organizmalar üzerinde yüksek biyolojik aktivite gösterdiği, sıvı ve toz formülasyonlarının zararlı popülasyonlarının baskılanmasında başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bunun yanında, bu bakterilerin yalnızca entomopatojen özellik göstermediği, aynı zamanda fungusit, bakterisit, nematisit ve antiprotozoal etkiye sahip doğal biyolojik ürünlerin önemli bir kaynağı olduğu vurgulanmış; sürdürülebilir tarım uygulamaları için raf ömrü uzun ve uygulaması kolay formülasyonların geliştirilmesinin gerekliliği ifade edilmiştir (Abd-Elgawad, 2022).

Elbrense ve arkadaşları, *Heterorhabditis bacteriophora* ve *Steinernema riobravus* türleri EPN'ler ile bu türlerin simbiyontları olan *Photorhabdus* ve *Xenorhabdus* bakterilerinin biyolojik mücadele potansiyellerini değerlendirmiştir. Çalışmada, EPN'ler ve simbiyotik bakteriler, büyük beyaz kelebek (*Pieris rapae*) ile haziran böceği (*Pentodon algerinus*) larvalarına uygulanmış ve uygulamaların zararlıların ölüm oranları üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda hem EPN'ler hem de simbiyotik bakterilerin her iki zararlı türünde önemli düzeyde ölümlere neden olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, *Photorhabdus* ve *Xenorhabdus* bakterilerinin tek başına uygulanması, bazı uygulamalarda EPN'lerden daha yüksek biyolojik etkinlik göstermiştir. Araştırmacılar, elde edilen bulgular doğrultusunda EPN'lerin simbiyotik bakterilerinin tek başına da etkili biyolojik mücadele etmeni olarak kullanılabileceğini ve entegre zararlı yönetimi programlarında değerlendirilme potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir (Elbrense vd., 2021).

Stokwe ve Malan tarafından yürütülen çalışmada, elma pamuklu biti (*Eriosoma lanigerum*) gibi kök ve gövde bölgesinde koloniler oluşturarak elma ağaçlarında önemli ekonomik kayıplara neden olan özsu emici bir zararlıya karşı EPN'lerin biyolojik mücadele potansiyeli değerlendirilmiştir. Bulgular, bazı EPN türlerinin pamuklu bit popülasyonlarını anlamlı düzeyde baskılayabildiğini, özellikle *S. carpocapsae* uygulamalarının kök bölgesindeki kolonileri önemli ölçüde azalttığını ve *S. yirgalemense* ile *H. zealandica* izolatlarının da yüksek biyolojik kontrol potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, EPN'lerin etkinliğinin tüm uygulamalarda aynı düzeyde gerçekleşmediği; bazı bireylerde nematodların konukçuya giriş yapmasına rağmen zararlının fizyolojik savunma mekanizmalarının nematod

gelişimini ve simbiyotik bakterilerin çoğalmasını sınırlandırabildiği belirlenmiştir. Araştırmacılar, EPN performansının tür ve izolat farklılıklarının yanı sıra çevresel koşullar ve uygulama stratejilerinden de önemli ölçüde etkilendiğini vurgulamışlardır (Stokwe ve Malan, 2016).

Grunseich ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, salatalık (*Cucumis sativus*) bitkisinde çizgili salatalık böceği (*Acalymma vittatum*) larvalarının köklerde oluşturduğu beslenme zararının bitkinin savunma mekanizmaları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı sürelerde gerçekleştirilen kök beslenmesinin bitki köklerinden salgılanan uçucu organik bileşikler (HIPV'ler) ile bu bileşiklerin EPN davranışları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, larvaların köklerde 24 saat süreyle beslenmesi, salatalık köklerinde uçucu bileşik üretimini önemli ölçüde artırmış; salgılanan bu uçucu bileşikler EPN'leri hasarlı kök bölgesine çekerek böcek larvalarının baskılanmasına katkı sağlayan dolaylı bir savunma mekanizması oluşturmuştur. Buna karşın, kökte beslenmenin 7 gün boyunca devam etmesi, köklerden salınan uçucu bileşik miktarının kontrol bitkileriyle benzer seviyelere düşmesine neden olmuş ve buna bağlı olarak EPN'lerin köklere yönelimi ile larvalar üzerindeki biyolojik mücadele etkinliği belirgin şekilde azaltmıştır. Araştırmacılar, bu durumun uzun süreli kök beslenmesinin bitkinin dolaylı savunma sinyallerini baskılayarak zararlının doğal düşmanlardan kaçınmasına olanak sağlayabileceğini belirtmiştir. Sonuç olarak çalışma, beslenme süresine bağlı olarak bitkinin savunma sinyalleşmesinin değişebildiğini, köklerden salınan uçucu bileşiklerin EPN'lerin yönlendirilmesinde kritik rol oynadığını ve bitki–zararlı–doğal düşman arasındaki çoklu trofik etkileşimlerin dinamik bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur (Grunseich vd., 2020).

Zhang ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, *H bacteriophora* ile enfekte olmuş böcek kadavralarından salınan uçucu organik bileşiklerin (VOCs) ekolojik işlevi ve bu bileşiklerin zararlı böcek davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, EPN ile enfekte edilen böcek larvalarından yayılan uçucu bileşikler kimyasal analizlerle belirlenmiş ve bu bileşiklerin mısır kök kurdu *Diabrotica virgifera virgifera* larvalarının davranışları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda, enfekte kadavralardan salınan uçucu bileşiklerin sağlıklı larvalar için güçlü bir kimyasal çekici görevi gördüğü belirlenmiştir. Bu davranışın, sağlıklı larvaların IJ'lerle karşılaşma olasılığını artırarak EPN'lerin konukçu bulma ve enfeksiyon başarısını yükselttiği ortaya konmuştur. Çalışmada ayrıca, EPN kaynaklı uçucu bileşiklerin yalnızca nematodların yayılımını kolaylaştıran kimyasal sinyaller olmadığı, aynı zamanda bitki–zararlı–doğal düşman etkileşimlerini şekillendiren önemli ekolojik

faktörler olduğu vurgulanmıştır. Elde edilen bulgular, enfekte böcek kadavralarından salınan VOC'lerin zararlı davranışlarını değiştirerek biyolojik mücadele etkinliğini artırabildiğini ve EPN'lerin sürdürülebilir entegre zararlı yönetiminde yalnızca doğrudan patojenik etkileriyle değil, oluşturdıkları kimyasal iletişim ağı sayesinde de önemli rol oynadığını göstermektedir (Zhang vd., 2019).

Noureldeen ve arkadaşları çalışmalarında, beş farklı tıbbi bitki özütünün (*Citrullus colocynthis*, *Tagetes erecta*, *Rosmarinus officinalis*, *Thymus vulgaris* ve *Withania somnifera*) tek başına ve entomopatojen bakteri *X. budapestensis* ile birlikte uygulanmasının gül yaprak biti (*Macrosiphum rosae*) üzerindeki öldürücü etkisini incelemişlerdir. Araştırmada, metanol, etanol ve aseton ile hazırlanan bitki ekstraktları ile bakterinin farklı hücre süspansiyonu konsantrasyonları, laboratuvar koşullarında temas (kontakt) ve kalıntı (residüel) teknikleri kullanılarak ergin yaprak bitlerine uygulanmış ve ölüm oranları 24, 48 ve 72 saat sonunda belirlenmiştir. Sonuçlar, hem bitki ekstraktlarının hem de *X. budapestensis* uygulamalarının yaprak biti üzerinde yüksek toksisite gösterdiğini, özellikle *T. erecta* bitkisinin metanol ekstraktının en etkili uygulama olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, bakteri ile bitki ekstraktlarının birlikte uygulanmasının tek başına yapılan uygulamalara göre sinerjistik etki oluşturarak daha yüksek ölüm oranları sağladığı belirlenmiş ve bu kombinasyonun entegre zararlı yönetimi programlarında çevre dostu bir biyolojik mücadele alternatifi olabileceği belirtilmiştir (Noureldeen vd., 2022).

Wu ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, *P. luminescens* ve *X. bovienii*'nin ürettiği metabolitlerin pekan cevzinde zararlı iki yaprak biti türü *Melanocallis caryaefoliae* ve *Monellia caryella* ile bu zararlıların doğal düşmanı olan Asya uğur böceği (*Harmonia axyridis*) üzerindeki biyosidal etkileri değerlendirilmiştir. Denemelerde bakteriler standart bir konsantrasyonda böcekler üzerine ilaçlama kulesi yardımıyla doğrudan uygulanmıştır. Uygulamayı takiben 3., 5. ve 7. günlerde kaydedilen ölüm verileri sonucunda, her iki bakteriyel kültürün de *M. caryella* üzerinde sentetik insektisit bifentrin ile eşdeğer düzeyde yüksek toksisite sergilediği, *P. luminescens* kültürünün ise *M. caryaefoliae*'ye karşı besiyeri kontrolüne kıyasla belirgin derecede yüksek etki gösterdiği saptanmıştır. Söz konusu çalışmada hedef zararlı yaprak bitlerine karşı yüksek seviyede ölümcül olan bu bakteriyel metabolitlerin, test edilen dozlarda faydalı bir predatör olan *H. axyridis* erginlerine karşı herhangi bir toksisite göstermemiş olması dikkat çekici olarak ifade edilmiştir. Ayrıca kontrol amacıyla kullanılan besiyeri uygulamasının dahi fırsatçı mikroorganizmaların gelişimine zemin hazırlayarak yumuşak vücutlu yaprak bitleri üzerinde kısmi bir ölüme yol açtığı kaydedilmiştir.

Araştırmacılar, elde edilen bu seçici ve yüksek etkinliğe dayanarak gelecek çalışmalarda bakteriyel metabolitlerin farklı böcek biyolojik evreleri üzerindeki etkilerinin test edilmesini ve pekan bahçelerinde yaprak biti yönetimi için söz konusu metabolitlerin tarla koşullarındaki performanslarının değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır (Wu vd., 2022).

Wondafrash ve arkadaşları çalışmalarında, küresel ölçekte önemli bir polifag zararlı olan yeşil şeftali yaprak bitinin neden olduğu ekonomik kayıpları ve bu zararlıya karşı geliştirilen güncel mücadele yaklaşımlarını ele almışlardır. Derlemede, zararlının sentetik insektisitlere karşı geliştirdiği direnç mekanizmaları, konukçu bitkilerle olan ilişkisi, bitki virüslerinin taşınmasındaki vektörlük rolü ile entomopatojen bakteriler, entomopatojen funguslar, predatörler ve parazitoitler gibi biyolojik mücadele etmenlerine ilişkin güncel araştırmalar bir araya getirilmiştir. Literatür verileri, *M. persicae*'nin kimyasal insektisitlere kısa sürede direnç geliştirebildiğini, buna karşılık entomopatojen bakteriler ve diğer biyolojik mücadele etmenlerinin dayanıklı bitki çeşitleri ve doğal kökenli bileşiklerle birlikte entegre kullanımının zararlı popülasyonlarını etkili biçimde baskılayabildiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, laboratuvar koşullarında başarılı sonuçlar veren biyolojik ve biyoteknolojik mücadele yöntemlerinin; üreticilerin bilgi eksikliği, ekonomik kısıtlar ve kimyasal insektisitlerin hızlı etki beklentisi gibi nedenlerle saha uygulamalarında istenilen düzeyde yaygınlaşamadığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, sürdürülebilir zararlı yönetiminin sağlanabilmesi için üretici eğitimlerinin yaygınlaştırılması, biyolojik mücadeleyi destekleyen tarım politikalarının geliştirilmesi ve özellikle entomopatojen bakteri ile fungus temelli biyopestisitlerin uygulamaya aktarılmasına yönelik çalışmaların artırılması gerektiğini vurgulamışlardır (Wondafrash vd., 2013).

Berkvens ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, elma pamuklu biti *E. lanigerum*'un biyolojik mücadelesinde farklı EPN türlerinin potansiyelini değerlendirmek ve sahada gözlemlenen enfeksiyon başarısızlıklarının altında yatan fizyolojik nedenleri ortaya koymak amaçlanmıştır. Denemeler, *in vitro* koşullarda çok kuyucuklu plakalarda (24-well plate) gerçekleştirilmiş, yaprak biti ölüm oranı ile nematod penetrasyonu takip edilmiş, kontrol amacıyla bitki paraziti bir nematod türü kullanılmış ve EPN'lere ait simbiyotik bakterilerin yaprak bitlerindeki üreme kapasiteleri analiz edilmiştir. Araştırma sonucunda, test edilen nematod türlerinin elma pamuklu bitini başarılı bir şekilde parazitleyemediği saptanmıştır. Çalışmada, *E. lanigerum*'un hemolenfinin, EPN'lerin bakteriyel simbiyotlarının gelişimini tamamen baskıladığı (inhibe ettiğinin) tespit edilmiştir. Bu durum, zararlının EPN'lere ve onların simbiyotik bakterilerine karşı, diğer yaprak biti türlerinde rastlanmayan son derece

güçlü, spesifik ve bakterisidal nitelikte fizyolojik bir savunma mekanizmasına sahip olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, elma pamuklu bitinin hemolenfinde bakteri gelişimini engelleyen bu spesifik faktörün biyokimyasal olarak karakterize edilmesi ve söz konusu direnç mekanizmasının farklı coğrafi popülasyonlar ile kök kolonilerinde de korunup korunmadığının ileri araştırmalarla incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir (Berkvens vd., 2014).

Toledo-Hernández ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, tarımsal açıdan önemli zararlılar arasında yer alan yaprak bitlerine karşı entomopatojen bakterilerin ve bu bakteriler tarafından üretilen toksik bileşiklerin biyolojik mücadeledeki potansiyelini kapsamlı bir şekilde değerlendirmişlerdir. *Bacillus thuringiensis*, *Photorhabdus* ve *Xenorhabdus* cinslerine ait entomopatojen bakterilerin etki mekanizmaları ile uygulama olanaklarını ele alan çok sayıda araştırma incelenmiştir. Ayrıca bu bakterilerin genetik yapıları ile Cry, Cyt ve Vip toksin gruplarının yeşil şeftali yaprak biti, bezelye yaprak biti ve pamuk yaprak biti gibi farklı yaprakbiti türleri üzerindeki biyolojik etkileri değerlendirilmiştir. Derlemede, entomopatojen bakteriler tarafından üretilen toksinler ve sekonder metabolitlerin laboratuvar koşullarında çeşitli yaprak biti türlerine karşı yüksek insektisidal aktivite gösterdiği, zararlı popülasyonlarının artışı önemli ölçüde baskıladığı ve kimyasal insektisitlere çevre dostu bir alternatif oluşturabilecek biyolojik mücadele etmenleri olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında, bu bakterilerin yalnızca doğrudan biyopestisit olarak kullanılabilecek organizmalar olmadığı, aynı zamanda genetik mühendisliği ve biyoteknolojik uygulamalarda değerlendirilebilecek çok sayıda biyoaktif molekülün kaynağını oluşturduğu vurgulanmıştır. Araştırmacılar, bu bakterilere ait toksinlerin etki mekanizmalarının ve ikincil metabolit profillerinin daha ayrıntılı olarak ortaya konulmasının, gelecekte yaprak bitlerine karşı yeni biyopestisitlerin ve biyoteknolojik mücadele stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacağını ifade etmişlerdir (Toledo-Hernández vd., 2025).

Nermut ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, EPN simbiyotik bakterileri olan *Xenorhabdus* ve *Photorhabdus* türlerinden elde edilen hücresiz süpernatantların (CFS), patatest virüs vektörü olan yeşil şeftali yaprakbiti üzerindeki insektisidal potansiyeli, sentetik kimyasallara çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında farklı bakteri ırklarından izole edilen CFS'ler farklı konsantrasyonlarda patates yapraklarındaki kanatsız yaprakbitlerine uygulanmış ve ölüm oranları 5 gün boyunca takip edilmiştir. İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda CFS uygulamalarının yaprakbiti ölüm oranını anlamlı ölçüde artırdığı; özellikle *X. boviendii*, *X. khoisanae* ve *X. budapestensis* türlerinin en yüksek ölümcül etkiyi göstererek zararlının gelişimini baskıladığı saptanmıştır. Kimyasal pestisitlere

karşı direnç geliştiren *M. persicae* mücadelesinde bu doğal bakteriyel metabolitlerin yüksek bir biyopestisit potansiyeli taşıdığı kanıtlanmış olup, gelecek çalışmalarda bu etkilerden sorumlu spesifik biyoaktif bileşiklerin tanımlanmasına, bakteriyel büyüme hızlarının metabolit üretimine etkisine ve sürdürülebilir tarım için verimli kitle üretim yöntemlerinin geliştirilmesine odaklanılması gerektiği vurgulanmaktadır (Nermut vd., 2025).

Zhao ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, Çin pırasasında (*Allium tuberosum*) *S. feltiae*, pırasa sineği (*Bradysia odoriphaga*) ve rizosfer mikrobiyomu arasındaki etkileşimlerin incelenmesi, EPN uygulamasının kökteki mikrobiyal topluluk yapısını ve fonksiyonunu biyolojik mücadele etkinliğini ve ürün verimini artıracak şekilde nasıl modüle ettiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sonuçlara göre EPN uygulamasının zararlı popülasyonunu güçlü şekilde baskılayarak ürün verimini belirgin düzeyde artırdığı saptanmıştır. Mikrobiyal analizlerde EPN uygulamasının rizosferdeki mikrobiyal alfa çeşitliliğini ve tür zenginliğini değiştirmediği, ancak beta çeşitliliği düzeyinde mikrobiyal topluluk yapısında belirgin kaymalara yol açtığı belirlenmiştir. Taksonomik olarak EPN'lerin yararlı bakteriyel ve fungal cinsleri zenginleştirirken, patojenik *Fusarium* cinsini baskıladığı; fonksiyonel düzeyde ise bakteriyel toplulukların stres yanıtı ve genetik bilgi işleme süreçlerinin güçlendiği tespit edilmiştir. Çalışmada, EPN uygulamasının rizosferdeki genel mikrobiyal çeşitliliği bozmadan kök mikrobiyomunun taksonomik ve fonksiyonel yapısını selektif olarak yeniden şekillendirdiği ve zararlı fungusları baskılayıp yararlı grupları teşvik ederek biyolojik mücadele başarısını ve bitki sağlığını dolaylı yoldan desteklediği tespit edilmiştir (Zhao vd., 2026).

Guo ve Ge, tarafından yapılan ve domates bitkisi üzerinde yürütülen çalışmada, kök-ur nematodu *Meloidogyne incognita* ile oluşturulan kök enfeksiyonunun, bitkinin sistemik savunma mekanizmaları üzerindeki etkileri ve bu savunma yanıtının toprak üstü bir zararlı olan beyazsinek (*Bemisia tabaci*) performansına yansımaları araştırılmıştır. Bu amaçla, domates bitkilerinin kökleri *M. incognita* ile enfekte edilmiş, daha sonra yapraklarda salisilik asit kaynaklı savunma tepkileri ile beyazsineğin gelişim ve performans parametreleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, köklerde meydana gelen *M. incognita* enfeksiyonunun bitkide sistemik bir savunma yanıtını tetiklediği, yapraklarda salisilik asit birikimini artırarak savunma sinyal iletimini aktive ettiği ve bunun sonucunda *Bemisia tabaci*'nin bitki üzerindeki biyolojik performansının önemli ölçüde olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, kök bölgesinde gerçekleşen nematod enfeksiyonunun yalnızca lokal bir savunma yanıtı oluşturmadığını, aynı zamanda bitki genelinde sistemik savunma mekanizmalarını

harekete geçirerek toprak üstü herbivorlara karşı direnci artırdığını ve kök ile yaprak arasında savunma sinyallerinin koordineli bir şekilde çalıştığını ortaya koymuştur (Guo ve Ge, 2017).

Akköprü, tarafından yayınlanan çalışmada, iki farklı vermisüspansiyon gübre (VS1 ve VS2) uygulamasının biber bitkisi üzerinde beslenen *M. persicae* popülasyonunun gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma iklim odalarında 25 ± 1 °C sıcaklık, 60 ± 5 bağıl nem ve 16:8 (L:D) fotoperiyot koşullarında yürütülmüş; vermisüspansiyonlar 1/100 seyreltilerek saksılara uygulanmıştır. Yaş ve döneme bağlı iki eşeyli yaşam tablosu analiziyle elde edilen yaşam tablosu parametreleri değerlendirilmiştir. VS1 uygulaması, kontrol grubuna kıyasla yaprakbiti popülasyonunun net üreme oranı (R_0), kalıtsal üreme yeteneği (r) ve artış oranı sınırı (λ) değerlerini düşürerek zararlı gelişimini baskılamıştır. Bu bulgular, vermisüspansiyon uygulamalarının özellikle biber bitkisi üzerinde yaprak biti popülasyonunun gelişimini azaltmada potansiyel bir mücadele yöntemi olabileceğini ortaya koymaktadır (Akköprü, 2021).

Labaude ve Griffin, tarafından yayımlanan derleme çalışmada, EPN'lerin biyolojik mücadeledeki rollerinin yalnızca böcek zararlılarını enfekte etmesiyle sınırlı olmadığı, aynı zamanda bitki-toprak ekosistemi içerisinde çok yönlü ekolojik etkileşimler kurarak bitki fizyolojisi ve bağışıklık sistemini modüle edebildikleri kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Derlemede, EPN'lerin bitki rizosferinde aktif olarak bulunmaları ve burada salgılanan kimyasal sinyaller aracılığıyla bitkiyle karşılıklı etkileşime girmeleri sonucunda, bitkide İndüklenmiş Sistemik Direnç (ISR) başta olmak üzere çeşitli savunma mekanizmalarının uyarılabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, EPN'lerin rizosferdeki yaşam stratejileri, konukçu arama davranışları, bitki kökleriyle kurdukları ilişkiler ve toprak mikrobiyotasıyla olan etkileşimleri ekolojik açıdan ele alınarak, bu organizmaların böcekler, bitkiler ve diğer toprak canlıları arasında karmaşık ve çok trofikli etkileşim ağlarının önemli bileşenleri olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, EPN'lerin oluşturduğu bu etkileşimlerin bitki savunma sinyallerini, kök salgılarını ve rizosfer mikrobiyal topluluklarını etkileyerek zararlılara karşı dolaylı savunmayı güçlendirebildiği ifade edilmiştir. Sonuç olarak derleme, EPN'lerin biyolojik mücadeledeki etkinliğinin yalnızca doğrudan patojenik etkileriyle değil, aynı zamanda bitki bağışıklığını düzenleyen, bitki gelişimini destekleyen ve bitki-toprak-zararlı etkileşimlerini şekillendiren çok yönlü ekolojik fonksiyonlarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Labaude ve Griffin, 2018).

Helms ve arkadaşları tarafından yürütülen araştırma, toprakta bulunan EPN'lerin ve onların ürettiği kimyasal sinyallerin, bitkiler tarafından algılanarak sistemik savunma

yanıtlarının tetiklenmesinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. EPN'ler tarafından enfekte edilmiş böcek kadavralarının çevresel salınımı sonucunda ortaya çıkan uçucu bileşikler, bitkiler tarafından algılanabilir bir sinyal olarak işlev görmektedir. Bu kimyasal ipuçları, kök bölgesinde EPN kaynaklı riskin varlığını göstererek bitkilerde savunma hormonları (örneğin salisilik asit) ve bu hormonlarla ilişkili savunma genlerinin (örneğin PR genleri) ifadesini artırmakta; aynı zamanda antioksidan enzim aktivitelerinde yükselmeye neden olmaktadır. Bu sistemik savunma sinyallemesi, bitkinin yaprak dokusunun kimyasal profillerini değiştirerek toprak üstünde beslenen herbivorlar için daha az cazip bir ortam oluşturmuştur. Özellikle Colorado patates böceği (*Leptinotarsa decemlineata*) gibi zor kontrol edilen zararlıların bu sinyallere duyarlı olduğu ve enfekte olmayan kontrol bitkilerine kıyasla EPN sinyali algılayan bitkilerde daha az yumurta bıraktığı, larva gelişiminin yavaşladığı ve besin tüketiminin azaldığı raporlanmıştır. Bu bulgular, EPN'lerin doğrudan toprağa uygulanan biyolojik kontrol ajanları olarak işlev görmelerinin ötesinde, bitkilerin kimyasal savunma mekanizmalarını tetikleyerek herbivor davranışı ve performansını olumsuz etkileyen dolaylı savunma yollarını da aktive ettiğini ortaya koymaktadır (Helms vd., 2019).

Kamali ve arkadaşları tarafından domates bitkisinde, kök-ur nematodu *M. javanica* ile EPN türlerinin bitki bağışıklık mekanizmaları üzerindeki etkilerini ve bu toprak altı etkileşimlerinin toprak üstündeki *Tuta absoluta* üzerindeki dolaylı yansımalarını inceleyen bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda, EPN uygulamalarının kök-ur nematodunun köke penetrasyonunu, gal oluşumunu, yumurta kümesi sayısını ve yumurta açılım oranını belirgin düzeyde baskıladığı tespit edilmiştir. Kök dokularında savunma enzim aktivitelerinin hızla indüklendiği saptanmıştır. Toprak üstünde ise *T. absoluta* ergin dişilerinin EPN uygulanan bitkilere yumurta bırakmaktan kaçındığı, pupa gelişim sürelerinin uzadığı ve pupa ölüm oranının arttığı belirlenmiştir. Transkriptomik analizler, EPN ve kök-ur nematodlarının bitki tarafından benzer bir tehlike sinyali olarak algılandığını ve Sistemik Kazanılmış Direnç (SAR) ve ISR savunma mekanizmalarını ortak gen ekspresyonlarıyla aktive ettiğini ve bu sayede hem toprak altı nematodlarına hem de toprak üstü yaprak zararlılarına karşı eş zamanlı bir koruma sağladığını göstermiştir. Araştırmacılar, EPN'lerin yalnızca böcek patojeni olarak değil, bitki bağışıklık sistemini ve rizosfer mikrobiyomunu modüle ederek entegre zararlı yönetiminde geniş spektrumlu direnç indükleyici ajanlar olarak kullanılabileceğini öngörmektedirler (Kamali vd., 2022).

Martín-Cacheda ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, patates (*Solanum tuberosum*) bitkisinde iki farklı toprak altı yaşam süren organizma olan arbusküler mikorizal

fungus (*Rhizophagus irregularis*) ile EPN türlerinin (*S. carpocapsae* ve *H. bacteriophora*) tekil ve kombine uygulamalarının bitki büyümesi, doğrudan savunma (yaprak fenolikleri), dolaylı savunma (uçucu organik bileşik salınımı) ve toprak üstü çiğneyici herbivor böcek zararına karşı direnç üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen bulgularda, EPN uygulamalarının tek başına bitki boyunu anlamlı derecede artırdığı ve yaprak flavonoid konsantrasyonunu düşürdüğü tespit edilmiştir. Mikoriza uygulamasının tek başına ana bir etkisi görülmezken, *H. bacteriophora* ile birlikte uygulandığında mikorizalı bitkilerde toplam uçucu organik bileşik emisyonunun arttığı, mikoriza ile *S. carpocapsae*'nin birlikte bulunmasının ise tekil uygulamalarda görülmeyen bir şekilde toprak üstü herbivor böcek hasarını belirgin şekilde baskıladığı saptanmıştır. Çalışma, tekil olarak belirgin bir savunma etkisi göstermeyen organizmaların birlikte uygulandığında toprak üstü herbivor zararını azaltabildiğini ve dolaylı savunma tepkilerini modüle edebildiğini göstermiştir (Martín-Cacheda vd., 2026).

Wang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, mısır bitkilerinde EPN ile enfekte olmuş böcek kadavralarının rizosfere yerleştirilmesinin bitki savunma tepkileri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırmada, EPN ile enfekte edilmiş *G. mellonella* kadavraları mısır kök bölgesine eklendiğinde, bitkilerin savunma hormonları düzeyinde sistemik değişimler gözlenmiştir. Özellikle salisilik asit seviyelerinde belirgin bir artış tespit edilmiş ve bu artış hem doğrudan bitki savunma genlerinin ifade düzeyini hem de savunmayla ilişkili enzim aktivitelerini (SOD, POD, CAT) yükseltmiştir. Ayrıca bu değişimlerin sonucunda EPN enfekte kadavralarla yetişen mısır bitkilerinin yapraklarında *Spodoptera frugiperda* gibi böceklerin beslenme ve yumurta bırakma davranışlarının azaldığı gösterilmiştir. Bu da, EPN enfekte kadavraların rizosferde tetiklediği salisilik birikiminin bitkide üst düzeyde savunma tepkilerini aktive ettiğini ortaya koymaktadır. Çalışma, bu biyolojik stratejinin bitkilerde hem doğrudan etkileşimlerinin sürdürülebilir zararlı yönetiminde potansiyel bir araç olduğunu vurgulamıştır (Wang vd., 2025).

Li ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, tütün (*Nicotiana tabacum*) bitkisinde kök-ur nematodu (*M. arenaria*) ile yeşil şeftali yaprak biti (*M. persicae*) arasındaki dolaylı etkileşimlerin EPN'ler tarafından birincil ve ikincil metabolitler üzerinden nasıl modüle edildiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırma kapsamında sera koşullarında saksılarda yetiştirilen tütün bitkilerine kök-ur nematodu, EPN türleri ve yaprak bitleri uygulanarak faktöriyel deney tasarımı oluşturulmuş; yaprak biti popülasyon artışı ve üreme hızı klip kafeslerle takip edilmiş, sürgün ve kök kuru biyokütleleri ölçülmüş, GC-MS cihazı ile yapraklardaki glikoz ve nikotin konsantrasyonları analiz edilmiştir. Elde edilen bulgularda,

rizosfere EPN uygulanmasının yaprak bitlerinin popülasyon artışı ve üreme oranını belirgin şekilde düşürdüğü, kök-ur nematodunun yaprak biti üzerindeki olumsuz etkisinin yalnızca EPN varlığında (özellikle *H. bacteriophora* ile) ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Ayrıca yaprak biti beslenmesinin tek başına köklerdeki kök-ur nematodu sayısını artırdığı, ancak EPN uygulamalarının yaprak bitlerinin nematod popülasyonu üzerindeki bu pozitif etkisini tamamen ortadan kaldırdığı belirlenmiştir. Kimyasal analizlerde EPN varlığının yapraklardaki glikoz seviyesini artırdığı, yaprak biti varlığında ise EPN uygulamalarının ikincil bir metabolit olan nikotin konsantrasyonunu yükselttiği gösterilmiştir. Sonuç olarak, EPN'lerin rizosferde bulunmasının bitkinin savunma kimyasallarını ve besin içeriğini değiştirerek hem toprak altı hem de toprak üstü herbivorlar arasındaki etkileşimlerin yönünü değiştirebildiği ve yaprak bitlerinin kök-ur nematodunu teşvik edici etkisini azalttığı belirlenmiştir (Li vd., 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Biber bitkisi

Bu çalışmada, yeşil şeftali yaprak biti *M. persicae*'nin uygun konukçularından biri olan ve yaprak bitine karşı duyarlı olduğu önceki çalışmalarla ortaya konulmuş Mitofarm markasına ait Demre çeşidi sivri biber (*Capsicum annuum* L.) kullanılmıştır (Akköprü, 2021). Bitki materyalinde homojenlik ve güvenilirliği sağlamak amacıyla kullanılan tüm tohumlar aynı firmadan temin edilmiştir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Denemelerde kullanılan biber tohumu.

3.1.2. Yaprak biti

Tez çalışmasında zararlı etmen olarak yeşil şeftali yaprak biti *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae) kullanılmıştır. Yaprak bitleri arasında geniş konukçu yelpazesi ve yüksek ekonomik zarar potansiyeli nedeniyle *M. persicae* önemli bir yere sahiptir. Bu özellikleri ve laboratuvar koşullarında sürdürülebilir popülasyon oluşturabilmesi nedeniyle, çalışmada hedef zararlı olarak *M. persicae* tercih edilmiştir (Bass vd., 2014; Sorensen, 2009; Van Emden - Harrington, 2017). Yaprak biti popülasyonu Bursa Gürsu İlçesinde bulunan bir şeftali ağacından toplanmış ve klasik morfolojik yöntemlerle tür doğrulaması yapılmıştır (Blackman ve Eastop, 2006; Özdemir - Özdem, 2026) (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Yeşil şeftali yaprak bitinin mikroskop görüntüsü.

3.1.3. Petek güvesi

Laboratuvar ortamında EPN'lerin *in vivo* üretimlerinde çoğunlukla petek güvesi *Galleria mellonella* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera: Pyralidae) türü larvalarının son dönemi kullanılmaktadır. Bu tür, EPN'lere karşı yüksek duyarlılığı, diğer larvalara kıyasla iri yapısı ve laboratuvar koşullarında kolay üretilmesi nedeniyle tercih edilmektedir (Bedding ve Akhurst, 1975; Kaya ve Stock, 1997; Shapiro-Ilan vd., 2002) (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Tez çalışmasında kullanılan son dönem *G. mellonella* larvaları.

3.1.4. Entomopatojen nematodlar (EPN)

Çalışmada iki EPN türü kullanılmıştır: İlki, *Heterorhabditis bacteriophora* Poinar, 1976 (Rhabditida: Heterorhabditidae) türüne ait HBH hibrit ırkıdır. Bu hibrit ırk, Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü Nematoloji Laboratuvarı'nda 2010–2013 yılları arasında yürütülen TÜBİTAK projesi (TOVAG 110O161) kapsamında geliştirilmiş ve

2018 yılında Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından patentlenmiştir (Patent No: TR 2013 06141 B). HBH hibrit ırkı, Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinden izole edilen çeşitli *H. bacteriophora* popülasyonlarının kombinasyonu ile elde edilmiştir. Yüksek çoğalma kapasitesi, değişken sıcaklık koşullarına tolerans ve hedef zararlılara karşı güçlü etkisi ile ön plana çıkan HBH hibrit ırkı, araştırma ve ticari biyolojik mücadele uygulamalarında kullanılabilecek etkin bir biyolojik kontrol ajanıdır (Susurluk vd., 2013; Ulu ve Susurluk, 2021; Ulu ve Susurluk, 2024) (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. +4 °C'de muhafaza edilen *H. bacteriophora* HBH hibrit ırkının kültürleri.

İkinci olarak, *Steinernema carpocapsae* (Weiser, 1955) Wouts, Mráček, Gerdin & Bedding, 1982 (Rhabditida: Steinernematidae) türü kullanılmıştır. Bu tür için e-Nema GmbH (Schwentinental, Almanya) firmasına ait ticari bir ürün kullanılmış ve laboratuvar koşullarında çoğaltılarak denemelerde kullanılmıştır. Ticari ürün, Ekobioset adı altında Bioglobal A.Ş. firmasından temin edilmiştir. *S. carpocapsae*, farklı simbiyotik bakteri türüne sahip olması, farklı konukçu arama stratejisi ve ticari preparatlarda yaygın olarak kullanılması sebebiyle tercih edilmiştir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. *Steinernema carpocapsae* türü EPN'yi içeren Ekobioset ürünü.

3.1.5. İnsektisit

Denemelerde ilaçlı kontrol grubu için insektisit olarak, ülkemizde biberde yaprak bitine karşı ruhsatlı olan flonicamid aktif maddesi kullanılmıştır. Bu amaçla, Agrotez firmasına ait ve %50 flonicamid içeren Conoro 50 WG ticari preparatı tercih edilmiştir. IRAC (Insecticide Resistance Action Committee) sınıflandırmasına göre flonicamid, Grup 29 içinde yer almakta olup, kordotonal organların işlevini modüle ederek hedef zararlıların beslenme davranışını bozmak suretiyle etkili olmaktadır. Bu etki, böceklerin emme ve beslenme davranışlarını engelleyerek zararlı organizmaların ölümüne yol açmakta ve böylelikle bitki üzerindeki zarar derecesini azaltmaktadır. Uygulama genellikle bitki yapraklarına püskürtme şeklinde yapılmakta ve bitki dokusuna nüfuz ederek hedef zararlıların yiyecek alımını durdurması sağlanmaktadır (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Conoro 50 WG insektisit.

3.2. Yöntem

3.2.1. Biber bitkilerinin üretimi

Çalışmada kullanılan biber bitkileri tohumdan çimlendirilerek denemeler hazırlanmıştır. Tohumlar, ekim öncesinde yüzey sterilizasyonu amacıyla %1'lik sodyum hipoklorit çözeltisine 2–3 dakika daldırılmış, ardından steril saf su ile üç kez yıkanmıştır. Sterilizasyon işleminin ardından tohumlar, 9 cm çapındaki cam petri kapları içerisine, çift kat steril kurutma kâğıdı arasına yerleştirilmiş ve steril saf su ile nemlendirilmiştir (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Petride çimlendirilmiş biber tohumları.

Petri kapları iklim odasında 25 °C sıcaklık ve %60-70 oransal nem şartlarında inkübe edilmiş ve çimlenme süresince düzenli kontroller yapılmıştır. Tohumlardan çıkan kotiledon yaprakları tamamen açıldıktan sonra homojen gelişim gösteren sağlıklı fideler seçilmiş ve torf (700 cc), perlit (200 cc), bahçe toprağı (700 cc) ve silika kum (700 cc) karışımından oluşan önceden hazırlanmış ve sterilize edilmiş yetiştirme ortamını içeren termoform saksılara şaşırtılmıştır. Yetiştirme ortamı, kök gelişimini destekleyecek şekilde iyi drene olabilecek ve hava-su dengesini koruyacak biçimde hazırlanmıştır (Göze Özdemir vd., 2022) (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Viyole şaşırtılmış biber bitkileri.

Şaşırtılan fideler, kontrollü iklim kabininde yetiştirilmiştir. Bu süreçte 16:8 saatlik (aydınlık:karanlık) fotoperiyot uygulanmış, sıcaklık 25 °C’de sabit tutulmuş ve bağıl nem %60–70 aralığında kontrol edilmiştir. Bitki gelişimi için uygun ışık şiddeti, floresan/laboratuvar tipi büyüme lambalarıyla sağlanmış, sulama ise bitkilerin ihtiyacına göre düzenli olarak uygulanarak su stresine maruz kalmaları önlenmiştir (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Deneme boyuna ulaşmış biber fideleri.

3.2.2. Petek güvesi üretimi

Petek güvesi larvalarının yetiştirilmesi amacıyla yaklaşık 11 cm çapında ve 15 cm yüksekliğinde, 1500 mL hacimli cam kavanozlar kullanılmış; üst kısımları 2 mm gözenekli metal tel ile kaplanarak hem hava dolaşımı sağlanmış hem de larvaların kaçışı önlenmiştir. Kùltürler karanlık inkübatör ortamında 30–32 °C’de tutulmuş ve larvaların dört hafta içerisinde altıncı dönem evresine ulaştığı gözlemlenmiştir. Larvaların beslenmesinde kullanılan yapay besin; bal (200 g), gliserin (200 g), kepek (200 g), mısır unu (150 g), soya unu (100 g), süt tozu (100 g) ve mayadan (50 g) oluşturulmuştur. Besinin hazırlanmasında öncelikle kuru bileşenler homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmış, ardından bal ve gliserin ilave edilerek yaklaşık 200 °C sıcaklıkta kavrulmuş ve yarı katı kıvamda olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. *Galleria mellonella* larvaları için hazırlanan besin.

Hazırlanan besin kavanozlara kavanoz hacminin 1/3’ü oranına doldurulmuş ve yumurtalardan çıkan larvaların gelişimi bu ortamda sağlanmıştır. Üretimin sürekliliğini temin etmek amacıyla bazı altıncı dönem larvalar besin ortamında pupaya dönüşmeleri için bırakılmış ve ergin bireylerin çiftleşip yumurta bırakmasıyla kùltür devam ettirilmiştir (Kaya ve Stock, 1997; Shapiro-Ilan vd., 2002) (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. *Galleria mellonella* dönemleri.

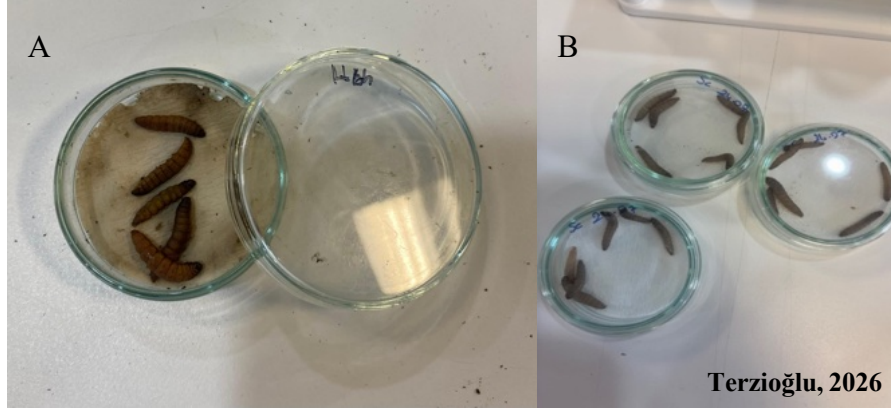
3.2.3. Entomopatojen nematodların *in vivo* üretimi

In vivo üretimler 6 veya 9 cm çaplı cam petri kaplarında gerçekleştirilmiştir. Enfeksiyon için petrilerin tabanlarına steril filtre kâğıdı yerleştirilmiş ve her bir petri kabına 5 adet petek güvesi larvası yerleştirilmiştir. İnfektif juveniller (IJ), mikropipet yardımıyla larvaların üzerine veya filtre kâğıdı yüzeyine damlatılmış; larva başına yaklaşık 100 IJ gelecek dozda uygulanmıştır. Uygulama sonrası kaplar karanlık inkübatör ortamında 25 ± 2 °C’de bekletilmiş ve enfeksiyon süreci birkaç gün boyunca takip edilmiştir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Enfeksiyon için hazırlanan *G. mellonella* larvaları.

Başarılı enfeksiyonlar, *Steinernema* türlerinde açık sarı tonlarda, *Heterorhabditis* türlerinde kırmızımsı-mor tonlarda olmaktadır. Enfeksiyon sonrası günlük takiplerde larvalarda renk değişimleri takip edilmiş, siyahlaşma ve kötü koku oluşumu kontaminasyon göstergesi olarak değerlendirilmiş ve bu kadavralar ortamdan uzaklaştırılmıştır (Şekil 3.13.).



Şekil 3.13. *Heterorhabditis* (A) ve *Steinernema* (B) türleri ile enfekte edilmiş *G. mellonella* larvalarının görüntüleri.

Ölü larvalar, nematodların konukçu içerisinde çoğalabilmesi için 2–3 gün daha aynı koşullarda tutulmuş ve ardından IJ'lerin toplanması için modifiye edilmiş White trap sistemine aktarılmıştır (White, 1927). Bu sistemde kadavralar, ortasında yükseltilmiş platform bulunan ve çevresi steril su ile doldurulmuş petrilere yerleştirilmiş, besin kaynakları tükenen nematodların kadavrayı terk ederek suya geçmesi sağlanmıştır (Şekil 3.14.). Suya geçen IJ'ler steril pipet yardımıyla toplanarak kültür kaplarına alınmış, kalıntılardan arındırılmak amacıyla distile su ile birkaç kez yıkanmış ve homojen bir süspansiyon hâline getirilmiştir. Elde edilen IJ'ler Ringer çözeltisinde muhafaza edilmiş ve kullanılabilecek kadar karanlık koşullarda 8–10 °C'de depolanmıştır.



Şekil 3.14. White trap düzeneğinde enfeksiyon görüntüsü.

3.2.4. Entomopatojen nematodların *in vitro* üretimi

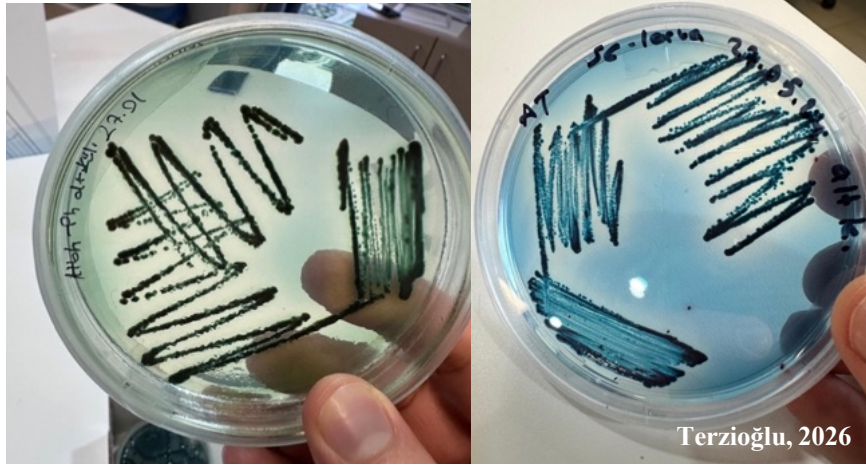
In vitro üretim çalışmalarında ilk olarak simbiyotik bakteri izolasyonu yapılmıştır. Bu amaçla larvalara petri kaplarında larva başına yaklaşık 100 IJ gelecek dozda EPN uygulaması yapılmış ve enfeksiyondan yaklaşık 24-36 saat sonra larvaların hareketi takip edilmiştir. Hareketleri ağırlaşan ve ölmek üzere olan larvalar ayıklanarak %70 etanol içerisinde 4 dakika bekletilmiş ve yüzey sterilizasyonuna tabi tutulmuştur. Sterilizasyon sonrasında steril kabin

içerisine alınan larvaların yüzeyi steril saf su ile durulanmıştır. Daha sonra steril enjektör iğnesi yardımıyla larvaların abdomen segmentleri arasındaki intersegmental membran delinerek hemolenf örnekleri alınmış ve steril öze ile NBTA (Nutrient Bromothymol Blue Tetrazolium Agar) besiyerine ekim yapılmıştır (Ulu ve Susurluk, 2021) (Şekil 3.15.). NBTA ortamı Nutrient Agar (37 g/L) + 25 mg/L Bromthymol mavisi + 4 ml/L %1 2,3,5-Triphenyl-tetrazoliumchloride solüsyonu kullanılarak hazırlanmıştır. Ekim yapılan kültürler 28 °C’de 48 saat inkübe edilmiştir ve koloni gelişimleri incelenmiştir. İnkübasyon sonunda gelişen tipik Faz I kolonileri seçilmiştir. *Photorhabdus* sp. kolonileri koyu kırmızımsı pigment ve biyolüminesans özelliği gösterirken, *Xenorhabdus* sp. kolonileri mavi-yeşil tonlarda pigment oluşturmuştur. Üretim sürecinin başarısı büyük ölçüde simbiyotik bakterilerin Faz I (primer faz) formda bulunmasına bağlı olduğundan, tüm üretim aşamalarında koloni morfolojisi, pigment üretimi, biyolüminesans (*Photorhabdus* sp. için), katalaz ve oksidaz reaksiyonları değerlendirilerek faz doğrulaması yapılmıştır.



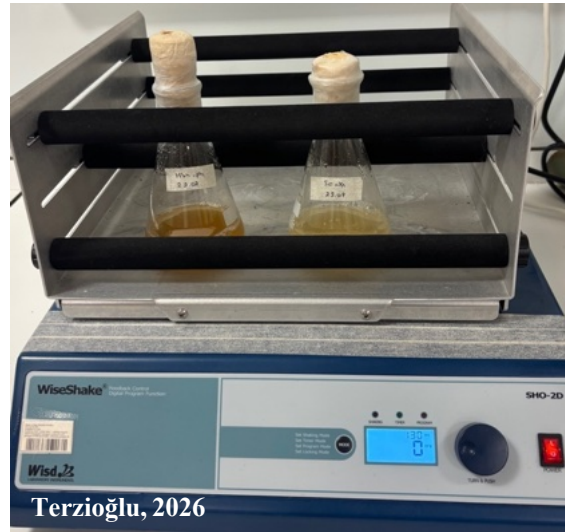
Şekil 3.15. Enfekte kadavranın steril kabin içerisinde delinme görüntüsü.

Agar üzerinde simbiyotik bakterilerin karakteristik özelliklerini taşıyan kolonilerden alt kültürler yapılmış ve saf kültürler elde edildikten sonra bakteri izolasyonu tamamlanmıştır (Şekil 3.16.).

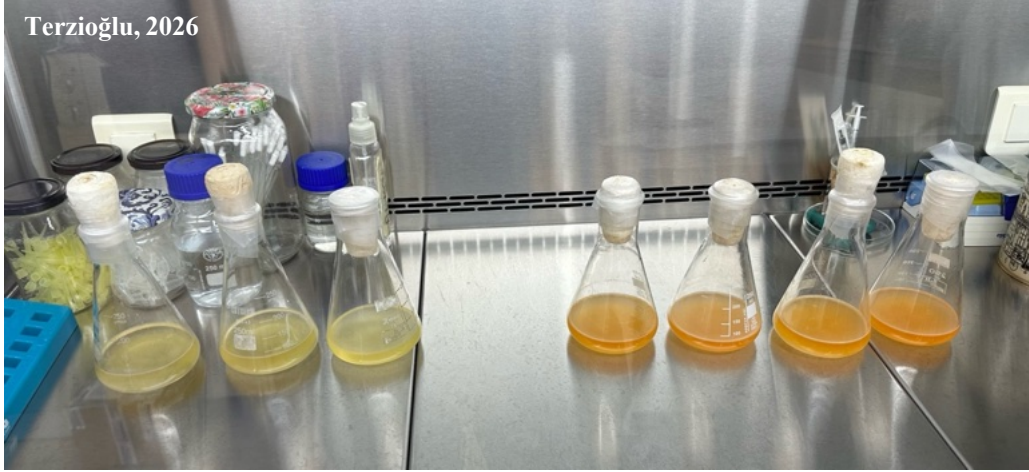


Şekil 3.16. *Photorhabdus* ve *Xenorhabdus* bakterilerinin saf kültürleri.

Saf kültürler elde edildikten sonra sıvı kültürde üretime geçilmiştir. Sıvı besiyeri olarak maya özütü ve çeşitli tuzlar içeren YS (Yeast salt) ortamı kullanılmıştır litre başına 5 g maya ekstraktı (yeast extract), 5 g NaCl, 0,5 g $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 0,5 g K_2HPO_4 ve 0,2 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ içerecek şekilde hazırlanmıştır (Ulu ve Susurluk, 2024). Ortamın başlangıç pH değeri 1N NaOH çözeltisi kullanılarak yaklaşık 7.0 olacak şekilde ayarlanmıştır. Kültürler karanlık ortamda bulunan orbital çalkalayıcıda 28 °C’de 150 devir hızda 48–72 saat inkübe edilmiş ve süre sonunda bakteriler sıvı ortamda başarıyla üretilmiştir (Şekil 3.17. ve 3.18.).



Şekil 3.17. Orbital çalkalayıcıda bulunan erlen şişeleri.



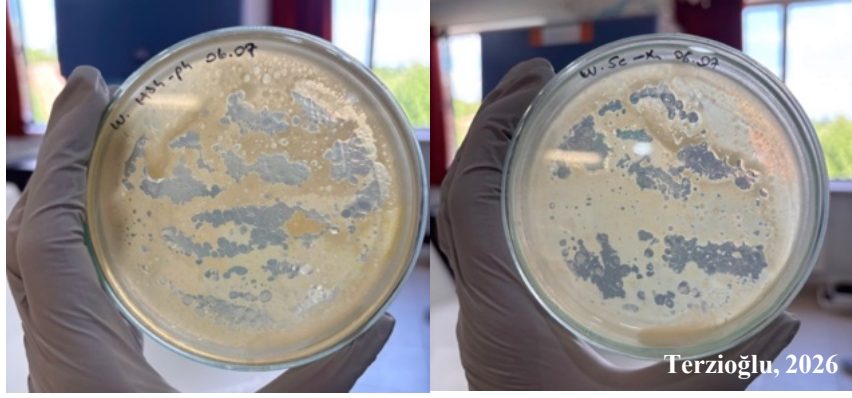
Şekil 3.18. Erlen şişelerinde sıvı ortamda üretilen *X. nematophila* (sol) ve *P. thracensis* (sağ) bakterileri.

Üretilen bakteriler görüntü olarak simbiyotik bakteri karakteristiklerini yansıtsa da ek biyokimyasal testler yapılmıştır. Örneğin *Photorhabdus* için YS ortamına NaOH eklenmiş ve renk değişimi görülerek pigment oluşumu onaylanmıştır (Ulu ve Susurluk, 2018) (Şekil 3.19.).



Şekil 3.19. Sıvı YS ortamında *P. thracensis* için uygulanan NaOH testi.

Bakteri üretimi başarıyla gerçekleştikten sonra katı ortamda üretime geçilmiştir. Katı ortam üretiminde Wouts agar kullanılmıştır (Ulu ve Susurluk, 2021; Wouts, 1981). Ortam Bacto Nutrient Broth (16 g/L), Bacto Agar (12 g/L) ve lipit kaynağı olarak ayçiçek yağı (5 g/L) içerecek şekilde hazırlanmış, 121 °C’de 15 dakika otoklavlanmıştır. Besiyeri steril şartlarda hazırlandıktan sonra, sıvı kültür ortamından elde edilen bakteri kültürü cam pipet yardımıyla agar yüzeyine (1–2 mL) inoküle edilmiş ve bakteriyel kolonizasyonun sağlanması amacıyla 28 °C’de 48 saat inkübe edilmiştir (Şekil 3.20.).



Şekil 3.20. Wouts agar üzerine inoküle edilen bakterilerin 48 saat sonraki görüntüsü.

Wouts agar üzerinde bakteri kolonizasyonu sağlıklı biçimde oluştuktan sonra White trap düzeneğinden elde edilen IJ'ler steril saf su ile yıkanmıştır. Yüzey temizliği yapılan IJ'ler sonrasında santrifüj tüpleri içerisinde %0,5 sodyum hipoklorit çözeltisinde 8 dakika bekletilerek yüzey sterilizasyonuna tabi tutulmuştur. Süre sonunda 2000 RPM hızda 2 dakika boyunca santrifüjlenen tüplerden süpernatantlar çekilmiş yüzey sterilizasyonu gerçekleşmiş IJ'ler steril saf su ile birkaç tur yıkanarak inokülasyona hazır hale getirilmiştir. Yaklaşık 1000 adet IJ içeren nematod süspansiyonu, simbiyotik bakteri gelişiminin tamamlandığı ve kontaminasyon içermediği doğrulanan besiyerlerine inoküle edilmiştir. İnokülasyon sonrasında petri kapları parafilm ile kapatılmış ve kültürler 25 °C'de inkübasyona bırakılmıştır. Inkübasyon süresince nematodların gelişimi düzenli olarak takip edilmiş ve yaklaşık bir hafta sonunda yeni nesil IJ'ler elde edilmiştir (Şekil 3.21.).



Şekil 3.21. Wouts üzerinde üretilen nematod görüntüsü.

Üretim tamamlandıktan sonra petri kapları steril saf su ile yıkanarak agar yüzeyinde bulunan nematodlar bir beher içerisinde toplanmıştır. Elde edilen süspansiyon, vakum pompasına bağlı filtrasyon düzeneğinden geçirilmiş ve filtrasyon sırasında kaba filtre kâğıdı kullanılmıştır. Filtre kâğıdı üzerinde tutulan nematodlar Ringer çözeltisi içerisinde alınarak steril

kültür kaplarına aktarılmıştır. Kültür kapları 8 °C’de muhafaza edilmiş, depolama süresince periyodik canlılık kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Denemeler öncesinde nematod popülasyonlarının canlılık oranları değerlendirilmiş ve ölüm oranı %1’in altında olan kültürler deneylerde kullanılmıştır.

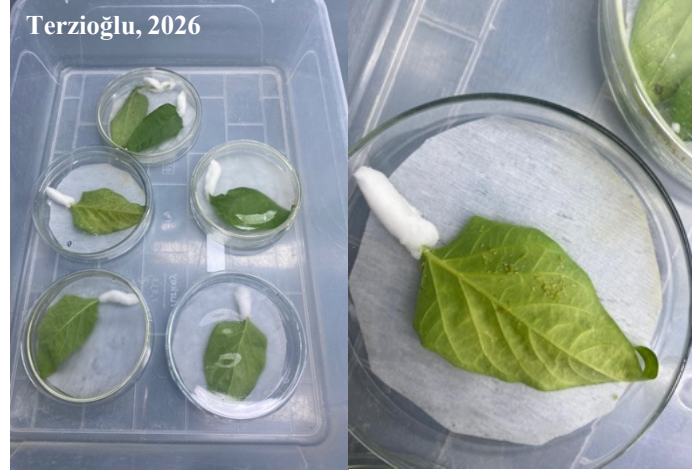
3.2.5. *Myzus persicae*’nin üretimi

Myzus persicae üretimi, biyolojik deneylerin güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla kontrollü çevre koşullarında gerçekleştirilmiştir. Denemelerde konukçu bitki olarak "Demre" markasına ait biber fideleri kullanılmıştır. Fideler, 15–20 cm boya ulaştığında ve en az altı gerçek yaprağa sahip olduğunda yaprak biti kolonisi ile enfekte edilmiştir. Yaprak bitlerinin beslenmesi ve çoğalması için bitkiler, 50x50x50 cm boyutlarında ağ kaplı kafeslerde tutulmuştur. Yaprak biti popülasyonunun devamlılığını sağlamak amacıyla koloniler düzenli aralıklarla kontrol edilmiş ve konukçu bitkiler düzenli olarak sulanmıştır. Kolonilerde yoğun gömlek birikimi ve kanatlı birey oluşumunun gözlenmesi ile bitkilerin yoğun beslenme sonucu zarar görerek uygunluğunu kaybetmesi durumunda, popülasyonun sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla ortama yeni ve sağlıklı bitkiler eklenmiştir (Şekil 3.22.).



Şekil 3.22. Tül kafes içerisinde biber bitkisinde üretilen *M. persicae* popülasyonu.

Kafes koşullarında gerçekleştirilen üretime ek olarak yaprak diski yöntemi kullanılarak da üretim yapılmıştır. Bu amaçla, yaklaşık 4 cm çapında yaprak diskleri hazırlanmış ve plastik petri kaplarına, alt yüzeyleri üste gelecek şekilde yerleştirilerek yaprak bitlerinin doğal beslenme davranışları için uygun bir ortam oluşturulmuştur. Yaprak disklerinin altına nemin korunmasını sağlamak amacıyla filtre kâğıdı yerleştirilmiştir. Yaprakların sap kısımları nem kaybını önlemek amacıyla pamuk ile sarılmış ve ince parafilm ile kaplanmıştır. Pamuklar günlük olarak kontrol edilmiş ve gereksinim duyuldukça su ilavesi yapılmıştır (Şekil 3.23.).



Şekil 3.23. *Myzus persicae*'nin petride üretimi.

Kültürler 25 °C sıcaklık, %60-70 oransal nem ve 16:8 saat (aydınlık:karanlık) fotoperiyot koşullarında muhafaza edilmiştir. Deneme süresince petri kapaklarında oluşan yoğunlaşma düzenli olarak temizlenmiş, ölü bireyler, gömlek kalıntıları ve oluşan kanatlı formlar ortamdan uzaklaştırılmıştır. Yaprak diskleri günlük olarak kontrol edilmiş; solma, sararma veya bozulma belirtileri göstermeleri ya da yaprak biti yoğunluğu nedeniyle besin kaynağı olarak yetersiz hâle gelmeleri durumunda yenileri ile değiştirilmiştir.

3.2.6. Deneme deseni ve uygulama grupları

Tüm denemeler laboratuvar ortamında iklim kontrollü bir kabin içerisinde yürütülmüş ve deneme tesadüf parselleri düzeninde planlanmıştır. Biber fideleri 15 cm çapında şeffaf saksılara, torf, kum, bahçe toprağı ve perlit karışımından oluşan ortamda, aynı iklim kabininde, 25 °C sıcaklık ve %60-70 oransal nem ortamında 16:8 fotoperiyot şartlarında yetiştirilmiştir. Her bir uygulama grubu için en az 10 adet biber fidesi yetiştirilmiştir. Denemelerde 8–10 gerçek yaprağına sahip homojen boyutlu biber fidelerinden alınan yapraklar kullanılmıştır. Biber fidelerine uygulamalar yapıldıktan beş gün sonra fidelerden uygun büyüklükteki yapraklar kopartılmış, yaprak sapları nem kaybını önlemek amacıyla nemli pamuk ile sarılarak parafilm ile kapatılmış ve 9 cm çapındaki plastik petri kaplarına yerleştirilmiştir. Kapaklara havalandırmayı sağlamak amacıyla delikler açılmıştır. Her uygulama için en az 40 petri hazırlanmıştır. Ancak deneme sürecinde bazı uygulamalarda fungal bulaşması meydana gelmesi nedeniyle tüm gruplarda tekerrür sayıları eşit tutulamamıştır.

Denemeler kurulmadan bir gün önce, pre-ovipozisyon döneminde bulunan (şişkin abdomenli) ergin bireyler 9 cm çapındaki cam petri kaplarına aktarılmıştır. Bu bireylerin yumurtlamaya geçmesi sağlanmış ve bir gün sonra yeni doğan nimfler elde edilmiştir. Elde

edilen eşit büyüklükteki yeni doğmuş nimfler, ince fırça yardımıyla deneme petrilere aktarılmış ve deney başlangıcında homojen birey grupları oluşturulmuştur.

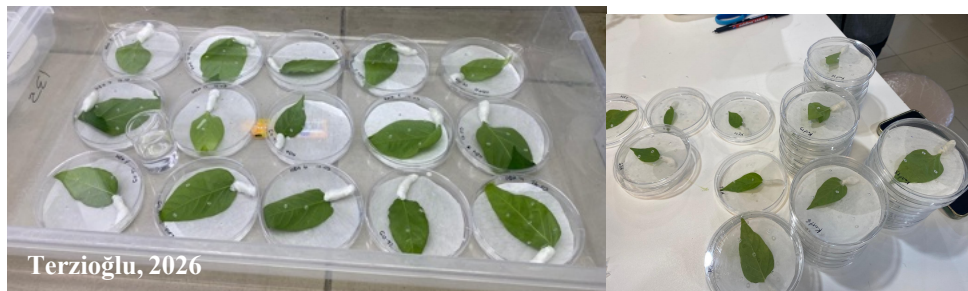
Deneme süresince yaprakların canlılığını korumak amacıyla pamuklar düzenli olarak nemlendirilmiş, aktarılan bireyler ise ölüm gerçekleşinceye kadar her gün kontrol edilerek sayımları kaydedilmiştir (Şekil 3.24.). Yaprak bitlerine ait gömlekler düzenli olarak toplanmış ve gelişim dönemlerinin izlenebilmesi amacıyla N1, N2 ve N3 dönemlerine ait bireyler bu gömlekler üzerinden değerlendirilmiştir. N4 döneminden sonra gömlek gözlemlenmesi durumunda bireyler ergin olarak kabul edilmiştir. Deneme boyunca yeni doğan nimfler petriden uzaklaştırılmıştır. Bu işlem, ilk aktarılan nimfler ölene kadar (deneme sona erece kadar) 24 saatte bir düzenli olarak tekrarlanmıştır.



Şekil 3.24. Bir deneme biriminin günlük kontrolü.

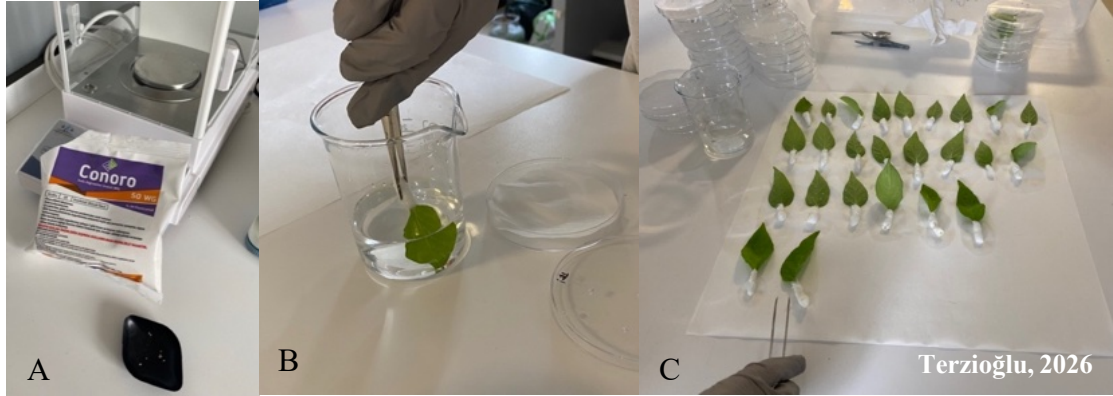
Uygulama grupları aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir:

Negatif kontrol uygulaması (KON): Kontrol uygulamasında bitkiler saksılara dikildikten sonra beş gün boyunca yalnızca düzenli sulama yapılmış, bu süre zarfında herhangi bir ek uygulama gerçekleştirilmemiştir (Şekil 3.25.). Beş gün sonunda bitkilerden yapraklar toplanarak denemeler kurulmuştur.



Şekil 3.25. Kontrol grubunun petrilerdeki görüntüsü.

İnsektisit kontrol uygulaması (FLO): Bu grupta bitkiler saksılara dikildikten sonra beş gün boyunca yalnızca sulama yapılmış ve bu süre sonunda bitkilerden yapraklar toplanmıştır. Daha sonra yapraklar, önerilen dozda hazırlanan ilaçlı su karışımına 10 saniye süreyle daldırılmış ve kurutma kâğıdı üzerinde kuruması beklenmiştir (Şekil 3.26.). Elde edilen ilaçlı yaprakların sapları nem kaybını önlemek amacıyla pamuk ile sarılmış ve parafilm ile kapatılmıştır.



Şekil 3.26. İlacın tartımı (A), ilaçlı karışıma yaprağın daldırılışı (B), daldırılan yaprakların kurutuluşu (C).

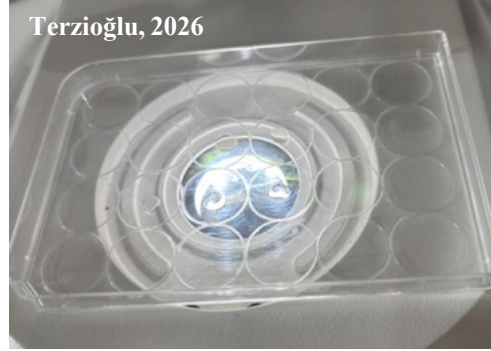
Dondurulmuş larva uygulaması (FRE): Dondurulmuş larva uygulaması için petek güvesi larvaları -20 °C’de 24 saat süreyle dondurulmuştur. Sonrasında her bir biber fidesi kök bölgesine beşer adet donmuş larva konmuştur (Şekil 3.27.). Uygulamadan 5 gün sonra bitkilerden yapraklar toplanarak denemeler kurulmuştur.



Şekil 3.27. Dondurulmuş larvaların gömülüp bitki dikilmesi.

Heterorhabditis bacteriophora IJ uygulaması (HBN): Bu grupta bitki köklerine *H. bacteriophora* uygulaması yapılmıştır. Uygulamada kullanılacak IJ yoğunluğu stereomikroskop altında sayım lamı kullanılarak belirlenmiş; her bir kültür kabından 20–30 µL hacminde beş ayrı örnek alınarak her örnekteki IJ sayısı tespit edilmiştir. Elde edilen ortalama değerlerden birim hacimdeki nematod yoğunluğu hesaplanmış, bu değerler kültür kabının

toplam hacmine oranlanarak toplam IJ sayısı belirlenmiştir (Şekil 3.28.). Hesaplamalara göre süspansiyonlar gerekli durumlarda seyreltilmiş veya yoğunlaştırılmış ve tüm uygulamalarda bitki kök bölgesine standart olarak 60.000 IJ dozunda nematod uygulanmıştır (Şekil 3.29.). Uygulama dozu, ön denemelerden elde edilen veriler ve saksı büyüklüğü baz alınarak hesaplanmıştır. Nematod uygulamasından 5 gün sonra bitkilerden yapraklar toplanarak denemeler kurulmuştur.



Şekil 3.28. *Heterorhabditis bacteriophora* infektif juvenillerinin mikroskopta sayımı.



Şekil 3.29. İnfektif juvenillerin bitkiye verililişi.

Steinernema carpocapsae IJ uygulaması (SCN): Bu grupta bitki köklerine *S. carpocapsae* uygulaması yapılmıştır. Uygulamada kullanılacak IJ yoğunluğu stereomikroskop altında sayım lamı kullanılarak belirlenmiş; her bir kültür kabından 20–30 µL hacminde beş ayrı örnek alınarak her örnekteki IJ sayısı tespit edilmiştir. Elde edilen ortalama değerlerden birim hacimdeki nematod yoğunluğu hesaplanmış, bu değerler kültür kabının toplam hacmine oranlanarak toplam IJ sayısı belirlenmiştir (Şekil 3.30.). Süspansiyonlar gerekli durumlarda seyreltilmiş veya yoğunlaştırılmış ve tüm uygulamalarda bitki kök bölgesine standart olarak 60.000 IJ dozunda nematod uygulanmıştır (Şekil 3.31.). Uygulama dozu, ön denemelerden elde edilen veriler ve saksı büyüklüğü baz alınarak hesaplanmıştır. Uygulamadan 5 gün sonra bitkilerden yapraklar toplanarak denemeler kurulmuştur.



Şekil 3.30. *Steinernema carpocapsae* uygulama dozunun mikroskopta hesaplanması.



Şekil 3.31. SCN uygulama grubunun iklim kabindeki görüntüsü.

Heterorhabditis bacteriophora ile enfekteli larva uygulaması (HBE): Bu grupta kullanılacak enfekteli larvalar, *H. bacteriophora* enfeksiyonuna özgü tipik kırmızı renklenme gösteren bireyler arasından seçilmiştir. Bu amaçla enfeksiyondan 24–48 saat sonra yapılan değerlendirme sonucunda, karakteristik renk değişimi sergileyen larvalar belirlenmiş ve denemelerde kullanılmak üzere ayrılmıştır. Hazırlanan her şeffaf bardağa, iri ve benzer büyüklükte beş adet enfekteli larva yerleştirilmiş ve ardından biber bitkileri bu larvaların bulunduğu ortama dikilmiştir (Şekil 3.32.). Enfekteli kadavra yerleştirilip bitki dikiminden 5 gün sonra her bitkiden yapraklar toplanmış ve denemeler kurulmuştur.



Şekil 3.32. *Heterorhabditis bacteriophora* ile enfekteli larvaların bitki kök bölgesine uygulanışı.

Steinernema carpocapsae ile enfekte larva uygulaması (SCE): Bu grupta kullanılacak enfekteli larvalar, *S. carpocapsae* enfeksiyonuna özgü tipik kahverengi renklenme gösteren bireyler arasından seçilmiştir. Bu amaçla enfeksiyondan 24–48 saat sonra yapılan değerlendirme sonucunda, karakteristik renk değişimi sergileyen larvalar belirlenmiş ve denemelerde kullanılmak üzere ayrılmıştır. Hazırlanan her şeffaf bardağa, iri ve benzer büyüklükte beş adet enfekteli larva yerleştirilmiş ve ardından biber bitkileri bu larvaların bulunduğu ortama dikilmiştir (Şekil 3.33.). Uygulamadan 5 gün sonra bitkilerden yapraklar toplanarak denemeler kurulmuştur.



Şekil 3.33. *Steinernema carpocapsae* ile enfekteli larvaların bitki kök bölgesine gömülmesi.

3.2.7. Yaşam tablosu parametreleri ve istatistiksel analizler

Denemelerden elde edilen ham veriler, yaş ve döneme bağlı, iki eşeyli yaşam tablosu (age-stage, two-sex life table) yaklaşımına göre analiz edilmiştir (Chi, 1988; Chi ve Liu, 1985). Yaşam tablosu analizinde adı üzerinde dişi ve erkek bireyler birlikte olmak üzere iki cinsiyete ait verileri kullanılmaktadır. Ancak *M. persicae* türünün partenogenetik üremeye sahip olması nedeni ile analizlerde sadece dişi bireylere ait veriler kullanılmıştır.

Analizler sonucunda x yaş ve j dönem olmak üzere popülasyonun yaş ve döneme özgü canlılık oranı (s_{xj}) (F.1), yaş ve döneme özgü beklenen yaşam süresi (e_{xj}) (F.2), yaş ve döneme özgü doğurganlık (f_{xj}) (F.3), yaşa özgü canlılık oranı (l_x) (F.4), yaşa özgü doğurganlık (m_x) (F.5) ve yaşa özgü net üreme oranı ($l_x m_x$) hesaplanmıştır.

Yaprak bitinin farklı gelişim dönemlerine ait süreler (Nimf 1-2-3-4, ergin öncesi toplam süre, ergin süresi ve yaşam uzunluğu/longevity) ile üreme özellikleri; ovipozisyon süresi, ovipozisyon günleri, toplam ergin öncesi üreme dönemi ($TPRP$) ve doğurganlık (F) değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, popülasyona ait temel yaşam tablosu parametrelerinden kalıtsal üreme yeteneği (r) (F.6), artış oranı sınırı (λ) (F.7), net üreme oranı (R_0) (F.8), brüt üreme oranı (GRR) (F.9) ve ortalama döl süresi (T) (F.10) hesaplanmıştır.

Bu parametrelerin hesaplanmasında kullanılan formüller aşağıda verilmiştir (Chi ve Su, 2006; Chi vd., 2022; Chi vd., 2023):

$$s_{xj} = \frac{n_{xj}}{n_{0,1}} \quad (\text{F.1})$$

$$e_{xj} = \sum_{i=x}^{\infty} \sum_{y=j}^m s'_{iy} \quad (\text{F.2})$$

$$f_{xj} = \frac{f_{x,total}}{n_{xj}} \quad (\text{F.3})$$

$$l_x = \sum_{j=1}^k s_{xj} \quad (\text{F.4})$$

$$m_x = \frac{\sum_{j=1}^k s_{xj} f_{xj}}{l_x} \quad (\text{F.5})$$

$$r = \sum_{x=0}^{\infty} e^{-r(x+1)} l_x m_x = 1 \quad (\text{F.6})$$

$$\lambda = e^r \quad (\text{F.7})$$

$$R_0 = \sum_{x=0}^{\infty} l_x m_x \quad (\text{F.8})$$

$$\text{GRR} = \sum_x m_x \quad (\text{F.9})$$

$$T = \frac{\ln R_0}{r} \quad (\text{F.10})$$

Yaşam tablosu parametrelerinin ortalama değerleri ve standart hataları (SH), 100.000 bootstrap örnekleme kullanılarak hesaplanmıştır. Uygulama grupları arasındaki ortalamaların istatistiksel karşılaştırılması ise Eşleştirilmiş Bootstrap Testi (Paired Bootstrap Test) ile $\alpha = 0,05$ önem seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Yaşam tablosu parametrelerinin ve bu parametrelere ait istatistiksel değerlerin hesaplanmasında TWO-SEX-MSChart Version v6 yazılımı kullanılmıştır (Chi, 2026). İnsektisit kontrol (FLO) uygulamasında bireyler henüz erken nimf dönemlerinde öldüğü için ilgili uygulamanın yaşam tablosu analizi tamamlanamamıştır. Bu nedenle söz konusu uygulama sonuçları istatistiksel karşılaştırmalara ve tablolara dahil edilememiş, yalnızca grafiklerde yer almıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Uygulamaların ergin öncesi dönem sürelerine etkisi

Nimf dönem süreleri, *M. persicae* bireylerinin her bir nimf evresini tamamlayarak bir sonraki gelişim dönemine geçmeleri için geçen süreyi ifade eden temel gelişim parametrelerindendir. Bu sürelerin uzaması bireylerin gelişim hızının yavaşladığını ve ergin döneme ulaşmalarının geciktiğini, kısalması ise gelişimin hızlandığını ve bireylerin daha kısa sürede bir sonraki gelişim evresine ulaştığını göstermektedir. Birinci ve ikinci nimf dönem süreleri bakımından uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık belirlenmemiştir ($p > 0,05$). Üçüncü nimf döneminde ise uygulamalar arasında anlamlı farklılık saptanmış ($p < 0,05$), en uzun gelişim süresi SCN uygulamasında, en kısa süre ise KON uygulamasında belirlenmiştir. Dördüncü nimf döneminde FRE uygulaması, diğer tüm uygulamalara kıyasla daha uzun gelişim süresi göstermiştir ($p < 0,05$). Ergin öncesi toplam gelişim süresi de uygulamalara bağlı olarak anlamlı şekilde değişmiş ve FRE uygulamasında belirlenen süre diğer tüm uygulamalardan daha uzun bulunmuştur ($p < 0,05$) (Tablo 4.1.).

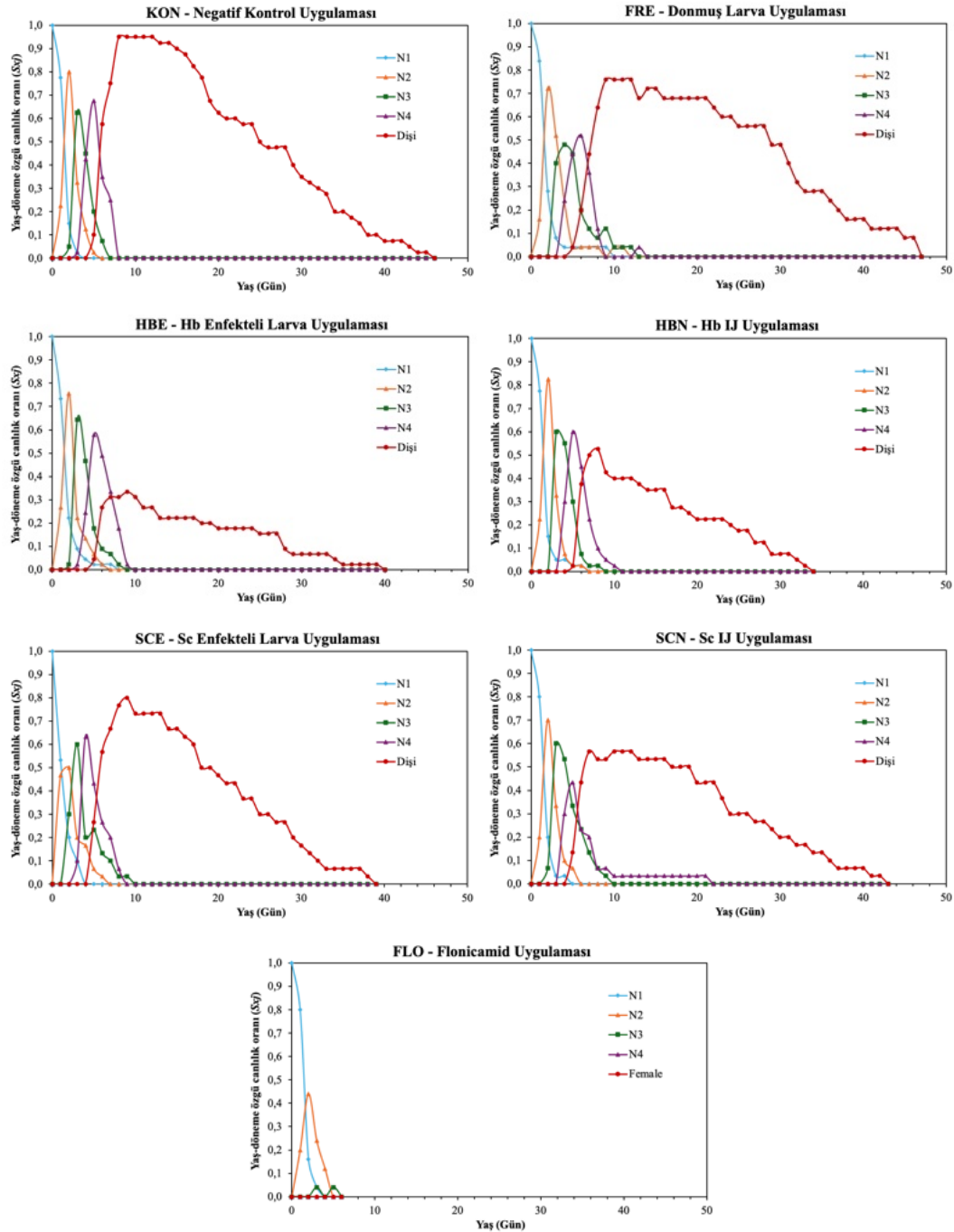
Tablo 4.1. Uygulamaların *Myzus persicae*'nin ergin öncesi dönemlerinin süresine etkisi.

Uygulama	n	Nimf 1 Süresi	n	Nimf 2 Süresi	n	Nimf 3 Süresi	n	Nimf 4 Süresi	n	Ergin Öncesi Toplam Süre
KON	40	1,950±0,106 a	40	1,500±0,111 a	40	1,400±0,077 b	38	1,658±0,093 b	38	6,500±0,152 b
HBN	38	1,947±0,123 a	37	1,568±0,111 a	33	1,515±0,097 ab	24	1,833±0,097 ab	24	6,458±0,157 b
HBE	42	1,952±0,130 a	40	1,525±0,106 a	36	1,611±0,107 ab	19	1,737±0,167 ab	19	6,526±0,244 b
SCN	29	2,069±0,154 a	29	1,448±0,134 a	25	1,840±0,157 a	19	1,474±0,175 b	19	6,316±0,272 b
SCE	30	1,833±0,177 a	30	1,433±0,122 a	29	1,586±0,133 ab	25	1,560±0,127 b	25	6,240±0,236 b
FRE	25	2,440±0,339 a	24	1,875±0,190 a	21	1,619±0,158 ab	20	1,950±0,086 a	20	7,600±0,411 a

Aynı sütunda yer alan farklı harfler, uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılığın olduğunu göstermektedir (Eşleştirilmiş bootstrap testi, $p < 0,05$). Standart hatalar (SH), bootstrap tekniği ile oluşturulan 100.000 yeniden örnekleme ile hesaplanmıştır.

Yaş ve döneme özgü canlılık eğrileri (s_{xj}), yeni doğan bir bireyin x yaşına kadar hayatta kalarak j döneminde bulunma olasılığını ifade etmektedir. Kontrol (KON) uygulamasında bireylerin yaklaşık %95'i ergin dişi dönemine ulaşmış ve en yüksek dişi s_{xj} değeri 8–12. yaşlar arasında 0,95 olarak gerçekleşmiştir (kırmızı çizgi). Dönem geçişleri belirgin ve birbirinden iyi ayrılmış eğriler oluşturmıştır (Şekil 4.1.). EPN uygulamaları arasında en düşük dişi s_{xj} maksimumu HBE uygulamasında 0.311 ile kaydedilmiş, bu grupta dönem eğrileri en geniş yaş aralığına yayılmış ve bireysel gelişim değişkenliği en yüksek düzeyde gerçekleşmiştir. İnsektisit kontrol (FLO) uygulamasında ise grafiklerde yer almakla birlikte hiçbir birey dişi dönemine ulaşamamış, popülasyon erken nimf dönemlerinde tükenmiştir. Genel olarak EPN uygulamaları, kontrol grubuna kıyasla dişi s_{xj} maksimumunu düşürmüş ve dönem geçişlerinin

gerçekleştiği yaş aralığını genişletmiştir (Şekil 4.1.). Bu durum, EPN'lerin bitki köküne uygulanmasının *M. persicae*'nin hayatta kalma ve gelişim hızı üzerinde dolaylı olumsuz etkiler oluşturduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.1. *Myzus persicae*'nin yaş ve döneme özgü canlılık eğrileri (s_{xj}). N1-2-3-4: Nimf dönemleri

Nimf dönem süreleri, *M. persicae* bireylerinin gelişim hızının değerlendirilmesinde önemli göstergeler olup, bu sürelerdeki uzama bireylerin bir sonraki gelişim evresine ve dolayısıyla ergin döneme daha geç ulaştığını göstermektedir. Bu çalışmada EPN uygulamalarının birinci ve ikinci nimf dönemleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi

belirlenmemiştir. Her iki dönemde de FRE uygulamasında sayısal olarak daha uzun gelişim süreleri gözlenmesine rağmen, uygulamalar arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı olmaması, EPN kaynaklı bitki aracılı etkinin erken nimf dönemlerinde sınırlı kaldığını düşündürmektedir. Benzer şekilde, Sial vd., (2018) ve Wang vd., (2017), *M. persicae*'de subletal stres uygulamalarının erken nimf dönemlerinin gelişim süresi üzerinde belirgin bir değişikliğe neden olmayabileceğini bildirmiştir. Li vd. (2020) ise kök bölgesine uygulanan EPN'lerin bitki savunma mekanizmalarını aktive ederek *M. persicae*'nin biyolojik performansını etkileyebileceğini, ancak bu etkinin özellikle yaşam tablosu grafikleri ve popülasyon parametrelerinde daha belirgin hale geldiğini bildirmiştir. Bu bulgular, bu tez çalışmasındaki N1 ve N2 dönemlerinde anlamlı bir farklılık gözlenmemesiyle uyumludur.

Buna karşılık, gelişimin ilerleyen dönemlerinde uygulamaların etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Üçüncü nimf döneminde uygulamalar arasında anlamlı farklılık bulunmuş ve en uzun gelişim süresi SCN uygulamasında belirlenmiştir. Sial vd. (2018) de farklı stres kaynaklarının *M. persicae*'nin üçüncü nimf döneminde gelişim süresini uzatabildiğini bildirmiştir. Li vd. (2020)'nin EPN uygulamalarının bitki savunmasını uyarak yaprak bitlerinin gelişim ve üreme performansını baskılayabildiğine ilişkin bulguları da tez çalışmasındaki sonuçları desteklemektedir. Bununla birlikte, Wang vd. (2017)'nin bazı düşük doz insektisit uygulamalarında gelişim süresinin kısalabildiğini bildirmesi, stres faktörünün türü ve uygulama biçiminin gelişim yanıtını belirleyebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla çalışmamızda N3 döneminde gözlenen gelişim uzaması, EPN uygulamalarının etkisinin erken nimf dönemlerinden ziyade gelişimin ilerleyen aşamalarında ortaya çıkabildiğini düşündürmektedir.

Dördüncü nimf döneminde ise en belirgin farklılık FRE uygulamasında ortaya çıkmış ve bu uygulamada gelişim süresi diğer uygulamalara göre anlamlı şekilde uzamıştır. Son nimf dönemindeki bu gecikme, erginliğe geçişin de gecikmesine neden olarak ergin öncesi toplam gelişim süresine yansımıştır. Sial vd. (2018) ve Polat Akköprü (2021) tarafından bildirilen sonuçlarda da farklı stres kaynaklarının veya kök uygulamalarının *M. persicae*'nin son nimf dönemini uzatabildiği gösterilmiştir. Li vd. (2020)'nin EPN uygulamalarının bitki savunma mekanizmalarını aktive ederek yaprak bitlerinin gelişim ve üreme performansını baskılayabildiğine ilişkin bulguları da bu sonuçla genel olarak uyumludur. Buna karşılık Wang vd. (2017)'de düşük düzeyli stresin N4 süresi üzerinde anlamlı bir değişiklik oluşturmaması, farklı uygulama biçimlerinin böcek gelişimi üzerindeki etkilerinin aynı düzeyde olmayabileceğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, uygulamaların *M. persicae*'nin gelişim süresi üzerindeki etkisi erken nimf dönemlerinde sınırlı kalırken, özellikle üçüncü ve dördüncü nimf dönemlerinde daha belirgin hale gelmiştir. FRE uygulamasında son nimf döneminin uzaması, ergin öncesi toplam gelişim süresinin de anlamlı şekilde artmasıyla sonuçlanmıştır. Bu durum, kök bölgesine uygulanan EPN kaynaklı etkinin doğrudan bir toksik etkiden ziyade bitki aracılı mekanizmalar üzerinden yaprak bitinin gelişim ve yaşam tablosu özelliklerini etkileyebileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, bitki savunma mekanizmaları veya metabolik değişimler doğrudan ölçülmediğinden, söz konusu mekanizmalar olası açıklamalar olarak değerlendirilmelidir. Sonuçlar genel olarak, EPN uygulamalarının etkisinin tek bir nimf dönemi üzerinden değil, bireyin tüm gelişim süreci ve diğer yaşam tablosu parametreleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4.2. Uygulamaların ergin süresi ve yaşam uzunluğuna etkisi

Ergin süresi, *M. persicae* bireylerinin ergin döneme ulaştıktan sonra yaşamını sürdürdüğü süreyi, yaşam uzunluğu ise doğumdan ölüme kadar geçen toplam yaşam süresini ifade eden önemli yaşam tablosu parametreleridir. Bu sürelerin uzaması bireylerin daha uzun süre hayatta kalmasını, kısalması ise yaşam süresinin ve dolayısıyla potansiyel üreme fırsatlarının azalmasını göstermektedir. Bu sürelerdeki değişimler, bireylerin yaşam ve üreme faaliyetlerini sürdürebilecekleri zaman aralığını doğrudan etkilediğinden, popülasyonun başarısının değerlendirilmesinde diğer gelişim ve üreme parametreleriyle birlikte ele alınmalıdır.

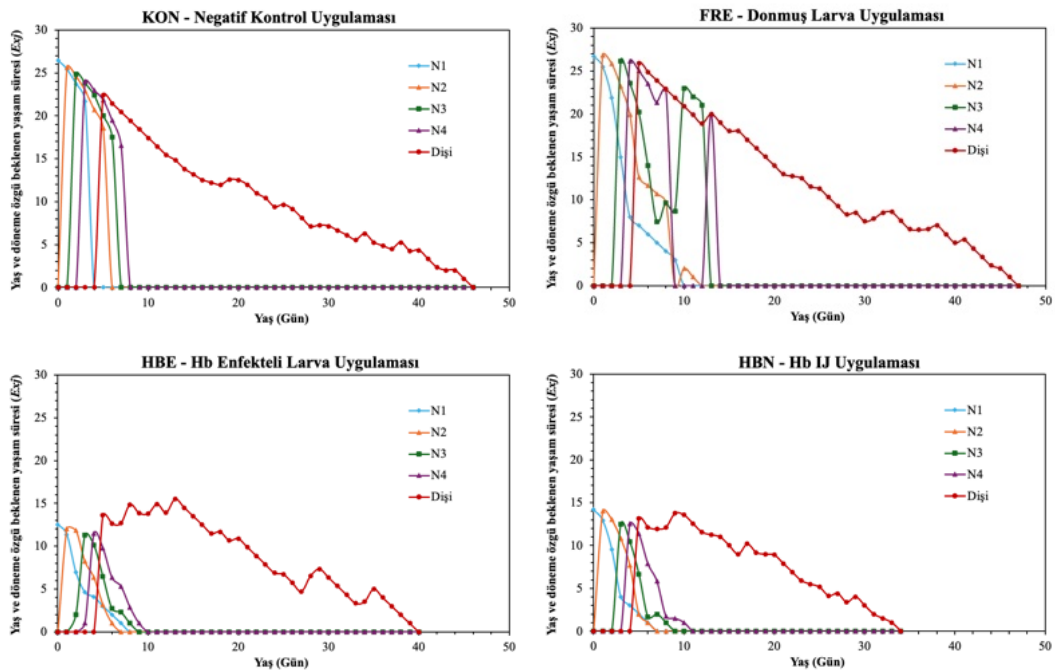
Uygulamaların ergin süresi ve yaşam uzunluğu üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri belirlenmiştir ($p < 0,05$). Ergin süresi FRE uygulamasında en yüksek, HBN ve HBE uygulamalarında ise en düşük düzeyde bulunmuştur. Yaşam uzunluğu bakımından ise en yüksek değerler FRE ve KON gruplarında, en düşük değerler HBN ve HBE gruplarında belirlenmiştir. SCN ve SCE uygulamaları her iki parametrede de ara gruplarda yer almıştır (Tablo 4.2.).

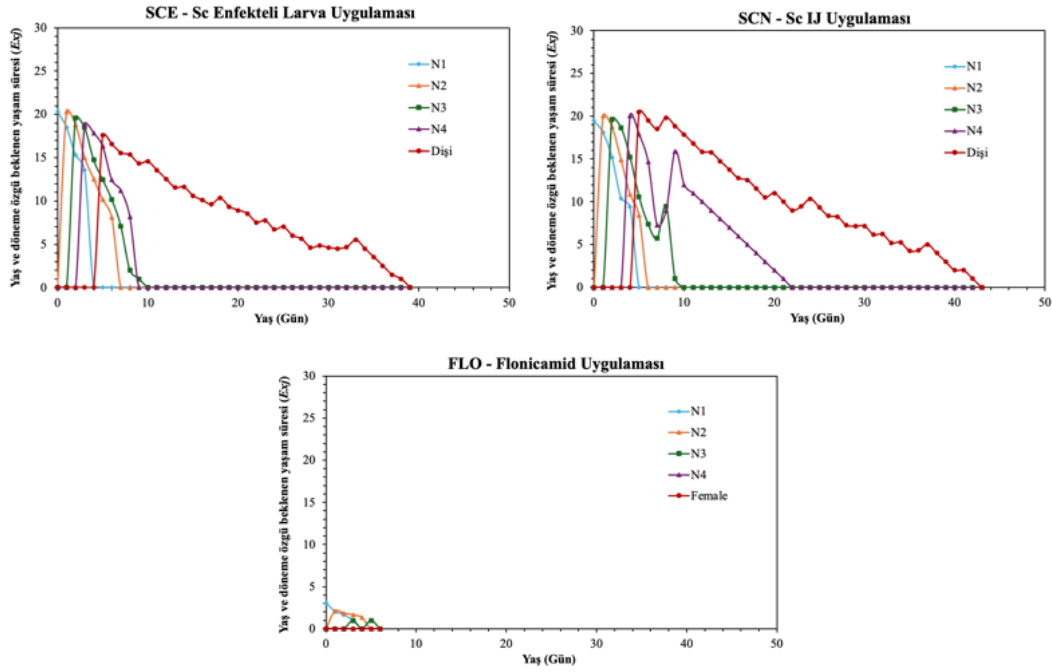
Tablo 4.2. Uygulamaların *Myzus persicae*'nin ergin süresi ve yaşam uzunluğuna etkisi.

Uygulama	n	Ergin Süresi (Gün ± SH)	n	Yaşam Uzunluğu (longevity) (Gün ± SH)
KON	38	20,921±1,441 ab	40	26,450±1,520 a
HBN	24	12,125±1,850 c	40	14,175±1,400 c
HBE	19	13,158±2,366 c	45	12,533±1,382 c
SCN	19	19,421±2,220 ab	30	19,467±2,148 b
SCE	25	16,480±1,718 bc	30	20,333±1,709 b
FRE	20	23,400±2,136 a	25	26,720±2,470 a

Aynı sütunda yer alan farklı harfler, uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılığın olduğunu göstermektedir (Eşleştirilmiş bootstrap testi, $p < 0,05$). Standart hatalar (SH), bootstrap tekniği ile oluşturulan 100.000 yeniden örnekleme ile hesaplanmıştır.

Yaş ve döneme özgü beklenen yaşam süresi (e_{xj}), x yaşında j döneminde bulunan bir bireyin gelecekte kaç gün daha yaşayabileceğini göstermektedir. Yeni doğan bireyler için hesaplanan N1 yaşam beklentisi, popülasyonun beklenen toplam yaşam uzunluğunu yansıtmaktadır. Kontrol (KON) uygulamasında bu değer 26,45 gün olarak gerçekleşirken, dondurulmuş larva (FRE) uygulamasında benzer biçimde 26,72 gün ile en yüksek düzeyde kalmıştır (Şekil 4.2.). EPN uygulamaları arasında en düşük yaşam beklentisi kontrol grubunun yaklaşık yarısına karşılık gelen HBE uygulamasında 12,53 gün ile kaydedilmiştir. İnsektisit kontrol (FLO) uygulamasında ise yalnızca 3,08 günlük yaşam beklentisiyle tüm gruplar arasında en dramatik düşüşü sergilemiş, bireylerin erken nimf dönemlerini tamamlayamadığını açıkça ortaya koymuştur. Genel olarak EPN uygulamaları, *M. persicae*'nin beklenen yaşam uzunluğunu kontrol grubuna kıyasla belirgin biçimde kısaltmış; bu etki özellikle kadavra formlarının uygulandığı gruplarda daha belirgin olmuştur.





Şekil 4.2. *Myzus persicae*'nin yaş ve döneme özgü beklenen yaşam süresi (E_{xy}). N1-2-3-4: Nimf dönemleri

Tez çalışmasında uygulamaların hem ergin süresi hem de toplam yaşam uzunluğu üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. FRE uygulamasında ergin süresi en uzun bulunurken, HBN ve HBE uygulamalarında en kısa değerler belirlenmiştir. Benzer şekilde toplam yaşam uzunluğu FRE uygulamasında yüksek düzeyde bulunmuş ve kontrol grubuyla aynı istatistiksel grupta yer alırken, HBN ve HBE uygulamalarında yaşam süresi belirgin şekilde azalmıştır. Bu sonuçlar, EPN uygulamasının formunun *M. persicae*'nin yaşam süresi üzerinde farklı etkiler oluşturabileceğini göstermektedir.

Dondurulmuş larva (FRE) uygulamasında gözlenen uzun yaşam süresi, subletal stres koşullarında böceklerin yaşam süresinin değişebildiğini bildiren çalışmalarla genel olarak uyumludur. Sial vd. (2018) ve Zeng vd., (2016), *M. persicae*'nin düşük düzeyli insektisit stresine maruz kalması sonucunda yaşam süresinin uzayabildiğini bildirmiştir. Çalışmamızda FRE grubunda benzer bir yaşam süresi uzaması gözlenmesine rağmen, aynı uygulamada ergin öncesi gelişim süresinin uzaması ve ovipozisyon ile doğurganlık değerlerinin azalması, uzun yaşam süresinin tek başına biyolojik avantaj olarak değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle FRE uygulamasında gözlenen yaşam süresi artışı, popülasyon performansındaki bir iyileşmeden ziyade bireyin yaşam ve üreme özelliklerinde meydana gelen farklılaşmanın bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

Buna karşılık, HBN ve HBE uygulamalarında hem ergin süresinin hem de toplam yaşam uzunluğunun belirgin şekilde azalması, bu uygulamaların *M. persicae* üzerinde daha güçlü bir biyolojik baskı oluşturduğunu düşündürmektedir. Bu sonuç, yüksek düzeyli stres koşullarında

M. persicae'nin yaşam süresinin kısaldığını bildiren çalışmalarla genel olarak uyumludur. Kayahan ve Kayahan (2026) da yüksek doz insektisit uygulamalarının *M. persicae*'nin yaşam süresini azalttığını bildirmiştir. Her ne kadar kimyasal insektisitler ile EPN uygulamaları farklı etki mekanizmalarına sahip olsa da, her iki durumda da yaşam süresindeki azalmanın organizmanın yaşam faaliyetlerini sürdürme kapasitesindeki düşüşle ilişkili olabileceği değerlendirilebilir.

Yaşam süresi sonuçları diğer yaşam tablosu parametreleriyle birlikte değerlendirildiğinde, daha belirgin bir biyolojik tablo ortaya çıkmaktadır. FRE uygulamasında bireylerin daha uzun yaşamasına rağmen ovipozisyon süresi ve doğurganlığın azalması, uzun yaşam süresinin daha yüksek üreme başarısı anlamına gelmediğini göstermektedir. Buna karşılık HBE ve HBN uygulamalarında yaşam süresindeki kısalma, ovipozisyon ve doğurganlıktaki azalmayla birlikte değerlendirilmekte ve popülasyon yenilenme kapasitesinin sınırlandığını düşündürmektedir. Dolayısıyla EPN uygulamalarının etkisi yalnızca bireylerin ne kadar süre yaşadığı üzerinden değil, bu sürenin ne kadarının üreme için kullanılabildiği ve yaşam boyunca ne kadar yavru üretildiği üzerinden değerlendirilmelidir.

Genel olarak, tez çalışmasında EPN uygulamalarının *M. persicae*'nin yaşam süresi ve üreme özelliklerini uygulamanın formuna bağlı olarak farklı biçimlerde etkilediği görülmüştür. Özellikle canlı *H. bacteriophora* IJ uygulamalarında yaşam süresindeki kısalma üreme performansındaki azalmayla birlikte görülürken, FRE uygulamasında yaşam süresinin uzamasına rağmen üreme performansının artmaması, yaşam süresi ile popülasyon başarısının her zaman paralel gitmediğini ortaya koymaktadır.

4.3. Uygulamaların doğurganlık parametreleri üzerine etkisi

Doğurganlık parametreleri, *M. persicae* bireylerinin üreme döneminin süresi, üreme faaliyetinin sürdürüldüğü gün sayısı, yaşam boyunca üretilen nimf sayısı ve üremeye başlama zamanını değerlendiren temel yaşam tablosu göstergeleridir. Ovipozisyon süresi ve ovipozisyon günlerindeki artış, üreme faaliyetinin daha uzun sürmesini; doğurganlıktaki artış ise birey başına daha fazla nimf üretimini ifade ederken, toplam üreme öncesi süre (TPRP) değerindeki artış bireylerin üremeye daha geç başladığını göstermektedir. Uygulamaların ovipozisyon süresi, ovipozisyon günleri ve doğurganlık üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri belirlenmiştir ($p < 0,05$). Her üç parametrede de en yüksek değerler KON grubunda, en düşük değerler ise HBE uygulamasında belirlenmiştir. Bununla birlikte, uygulamalar arasındaki farklılıkların düzeyi parametreye göre değişmiş; özellikle HBE uygulaması üreme süresi ve doğurganlık bakımından kontrol grubundan belirgin şekilde ayrılmıştır. SCN, SCE ve FRE

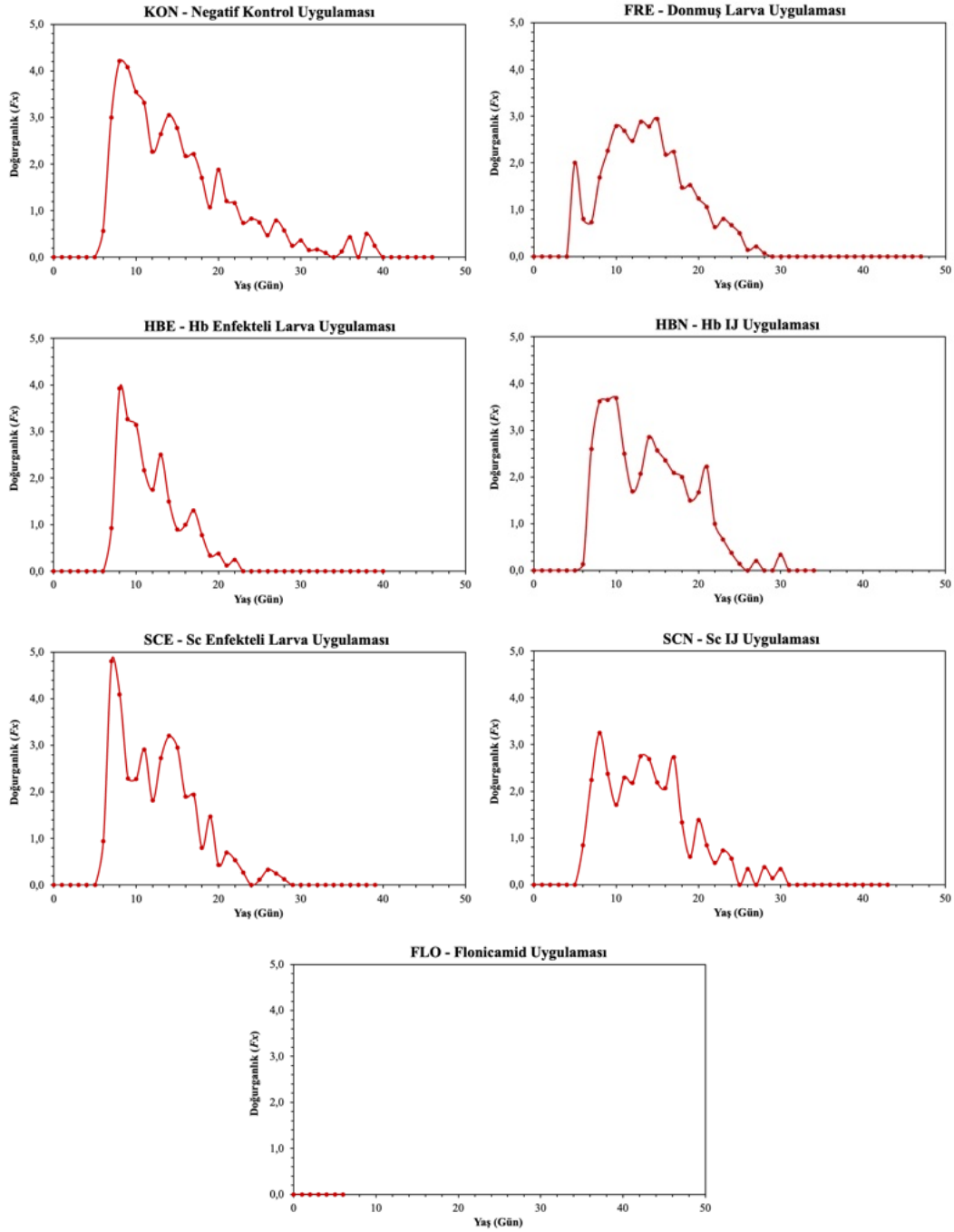
uygulamalarında doğurganlık değerleri kontrol grubuna göre daha düşük bulunurken, HBN uygulamasında da benzer yönde bir azalma gözlenmiştir. Buna karşılık, toplam üreme öncesi süre (*TPRP*) bakımından uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık belirlenmemiştir ($p > 0,05$). FRE grubunda *TPRP* sayısal olarak en yüksek değer göstermesine rağmen tüm uygulamalar aynı istatistiksel grup içerisinde yer almıştır (Tablo 4.3.).

Tablo 4.3. Uygulamaların *Myzus persicae*'nin doğurganlık parametrelerine etkisi.

Uygulama	n	Ovipozisyon (Yavrulama) Süresi (Gün)	n	Ovipozisyon (Yavrulama) Günleri	n	Doğurganlık (nımf) (F)	n	TPRP (Gün ⁻¹)
KON	38	16,368±1,318 a	38	13,053±0,872 a	38	39,947±3,36 a	38	7,237±0 a
HBN	18	11,278±1,275 bc	18	9,833±1,218 bc	24	23,917±4,333 bc	18	7,278±0 a
HBE	15	8,600±1,491 c	15	6,800±1,003 c	19	15,579±3,129 c	15	7,733±0 a
SCN	18	13,222±1,084 ab	18	10,333±1,011 b	19	27,684±4,078 b	18	7,222±0 a
SCE	22	12,136±1,254 bc	22	10,136±0,908 b	25	29,400±3,506 b	22	6,864±0 a
FRE	20	12,500±1,503 ab	20	11,200±0,952 ab	20	29,850±3,868 b	20	8,700±0 a

Aynı sütunda yer alan farklı harfler, uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılığın olduğunu göstermektedir (Eşleştirilmiş bootstrap testi, $p < 0,05$). Standart hatalar (SH), bootstrap tekniği ile oluşturulan 100.000 yeniden örnekleme ile hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan *M. persicae*'nin partenogenetik üremesi nedeniyle f_{xj} grafiklerinde yalnızca dişi dönemine ait değerler bulunmakta ve grafikler esas olarak yaşa özgü doğurganlığı yansıtmaktadır (Şekil 4.3.). İnsektisit kontrol (FLO) uygulamasında bireylerinde dişi döneme ulaşım gerçekleşmediğinden bu grup için f_{xj} verisi elde edilememiştir. Diğer uygulamalarda üreme genel olarak 5–7. yaşlarda (gün) başlamış; FRE uygulamasında en erken (5. yaş), HBE uygulamasında ise en geç (7. yaş) ilk üremeye ulaşılmıştır. Pik doğurganlık değerleri karşılaştırıldığında kontrol grubunda (KON) 8. yaşta 4,21 birey/dişi/gün olarak gerçekleşirken, bu değer HBN grubunda 3,69, SCN grubunda 3,25, HBE grubunda 3,93 olarak belirlenmiştir. FRE grubunda ise pik değer 2,94 ile nispeten düşük kalmış ve daha geç bir yaşta (15. yaş) gerçekleşmiştir. Genel olarak EPN uygulamaları günlük maksimum doğurganlık üzerinde belirleyici bir baskı oluşturmamış olmakla birlikte, HBE ve HBN gruplarında üreme döneminin daha geç başlaması ve pik doğurganlığın daha ileri yaşlara kayması dikkat çekici bir bulgu olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4.3. *Myzus persicae*'nin doğurganlık (f_{xj}) eğrileri.

Doğurganlık parametreleri, *M. persicae*'nin üreme performansının değerlendirilmesinde önemli göstergeler olup, ovipozisyon süresi ve ovipozisyon günleri üreme faaliyetinin devamlılığını, doğurganlık ise birey başına üretilen toplam nimf sayısını göstermektedir. Bu çalışmada EPN uygulamalarının ovipozisyon süresi, ovipozisyon günleri ve doğurganlık üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğu, genel olarak uygulama gruplarında kontrol grubuna kıyasla üreme performansının azaldığı belirlenmiştir. Özellikle HBE uygulamasında hem üreme döneminin hem de birey başına üretilen nimf sayısının belirgin şekilde azalması, bu

uygulamanın *M. persicae*'nin üreme kapasitesi üzerinde en güçlü baskılayıcı etkiyi oluşturduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, kök bölgesine uygulanan biyolojik materyallerin ve EPN'lerin bitki aracılı mekanizmalar yoluyla yaprak bitlerinin üreme performansını etkileyebildiğini bildiren çalışmalarla genel olarak uyumludur. Li vd. (2020), *H. bacteriophora* ve *S. carpocapsae* uygulamalarının bitki savunma yanıtlarını değiştirerek *M. persicae*'nin gelişim ve üreme performansını baskılayabildiğini bildirmiştir. Benzer şekilde Akköprü (2021), kökten uygulanan vermisüspansiyonun *M. persicae*'nin ovipozisyon süresi ve doğurganlığını azalttığını bildirmiştir. Bu çalışmalar, kök bölgesine yapılan uygulamaların zararlı ile doğrudan temas olmaksızın bitki üzerinden yaprak bitlerinin biyolojik performansını değiştirebileceğini desteklemektedir.

Bununla birlikte, farklı stres kaynaklarının yaprak bitlerinde üreme yanıtı her zaman aynı yönde olmayabilmektedir. Wang vd. (2017) ve Sial vd. (2018), bazı düşük düzeyli insektisit streslerinde doğurganlığın korunabildiğini veya artabildiğini ve bu durumun hormesis ile ilişkili olabileceğini bildirmiştir. Buna karşılık çalışmamızda özellikle HBE uygulamasında ovipozisyon ve doğurganlığın belirgin şekilde azalması, uygulamanın *M. persicae*'nin üreme performansını artıran bir yanıt oluşturmadığını göstermektedir. Kimyasal uygulamalarla elde edilen benzer sonuçlar ise farklı etki mekanizmalarına rağmen stres faktörlerinin üreme performansı üzerinde ortak bir baskı oluşturabileceğini göstermektedir.

Toplam üreme öncesi süre (*TPRP*) bakımından ise uygulamalar arasında anlamlı bir farklılık belirlenmemiştir. *FRE* grubunda sayısal olarak daha yüksek bir değer gözlenmesine rağmen bu farkın istatistiksel olarak desteklenmemesi, EPN uygulamalarının *M. persicae*'nin ilk üremeye başlama zamanını belirgin şekilde değiştirmedeğini göstermektedir. Benzer şekilde Sial vd. (2018) ve Wang vd. (2017), farklı stres uygulamalarının *TPRP* üzerinde anlamlı bir değişiklik oluşturmayaabildiğini bildirmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, EPN uygulamalarının etkisi *M. persicae*'nin üremeye başlama zamanından çok, üreme faaliyetinin sürdürülmesi ve yaşam boyunca üretilen toplam nimf sayısı üzerinde ortaya çıkmıştır. Özellikle HBE uygulamasında ovipozisyon süresinin ve doğurganlığın belirgin şekilde azalması, bu uygulamanın popülasyonun yenilenme kapasitesini sınırlandırabileceğini düşündürmektedir. Bu sonuçlar, EPN uygulamalarının doğrudan zararlı mortalitesinin yanı sıra bitki aracılı etkiler yoluyla zararlıların uzun dönemli üreme ve popülasyon gelişimini de etkileyebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, çalışmada bitki savunma yanıtları veya savunma metabolitleri doğrudan ölçülmediğinden,

gözlenen üreme baskılanmasının belirli bir ISR mekanizmasına bağlanması yerine, bitki aracılı biyolojik etkinin olası bir sonucu olarak değerlendirilmesi daha uygun olacaktır.

4.4. Uygulamaların popülasyon parametreleri üzerine etkisi

Kalıtsal üreme yeteneği (r), popülasyonun çoğalma kapasitesini ve büyüme potansiyelini ifade eden önemli bir yaşam tablosu parametresidir. Bu değerin yüksek olması, popülasyonun daha hızlı çoğaldığını ve bireylerin daha kısa sürede daha fazla döl vererek popülasyon artışını hızlandırdığını gösterirken, bu değerin düşük olması ise popülasyonun büyüme hızının azaldığını ve uygulamanın yaprak biti popülasyonunun gelişimi ile üreme başarısını olumsuz etkilediğini ifade etmektedir. Farklı uygulamaların şeftali yaprak biti *M. persicae*'nin r değeri üzerindeki etkileri incelendiğinde, deneme grupları arasında istatistiksel açıdan anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir ($p < 0,05$). En yüksek kalıtsal üreme yeteneği kapasitesi KON (0,307) ile SCE (0,288) uygulamalarında kaydedilirken, en düşük değer 0,165 ile HBE uygulamasında saptanmıştır. HBE uygulamasının, diğer tüm deneme gruplarına kıyasla yaprak bitinin kalıtsal üreme yeteneği üzerinde belirgin düzeyde olumsuz (baskılayıcı) bir etki meydana getirdiği belirlenmiştir (Tablo 4.4.). Analiz sonuçlarına göre KON ile SCE uygulaması arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,232$). Bu bulgu, *S. carpocapsae*'nin enfekteli larva uygulamasının *M. persicae*'nin kalıtsal üreme yeteneği üzerinde belirgin bir baskılayıcı etki oluşturmadığına işaret etmektedir.

Artış oranı sınırı (λ), popülasyonun birim zamanda kaç kat arttığını gösteren yaşam tablosu parametrelerinden biridir. Bu değerin artması, yaprak biti popülasyonunun daha hızlı büyüdüğünü ve birey sayısının her zaman biriminde daha yüksek oranda arttığını gösterirken, değerin azalması ise popülasyon artış hızının yavaşladığını ve uygulamanın yaprak biti popülasyonunun gelişimini ve çoğalmasını baskıladığını ifade eder. Uygulamaların yaprak bitinin artış oranı sınırı üzerindeki etkileri incelendiğinde, deneme grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar belirlenmiştir ($p < 0,05$). Bir önceki parametreye benzer şekilde en yüksek artış oranı sınırı KON (1,360) ve SCE (1,334) uygulamalarında kaydedilmiş, bu iki uygulama istatistiksel olarak aynı grupta yer almıştır. Buna karşın, en düşük değer 1,179 ile HBE uygulamasında saptanmış ve bu grup tek başına diğer uygulamalardan anlamlı oranda ayrılmıştır (Tablo 4.4.).

Net üreme gücü (R_0), bir bireyin yaşamı boyunca meydana getirdiği ortalama yavru sayısını ifade eden önemli bir yaşam tablosu parametresidir. Bu değerin artması, yaprak biti popülasyonunun nesilden nesile daha hızlı çoğaldığını ve popülasyon büyüme potansiyelinin yükseldiğini gösterirken, değerin azalması ise birey başına düşen yavru sayısının azaldığını ve

uygulamanın yaprak biti popülasyonunun çoğalma kapasitesini olumsuz etkilediğini ifade eder. Uygulamaların net üreme gücü üzerindeki etkileri incelendiğinde, önceki parametrelere benzer şekilde deneme grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar belirlenmiştir ($p < 0,05$). En yüksek net üreme oranı beklediği üzere 37,950 değeri ile KON grubunda kaydedilmiş olup, bu uygulama diğer tüm deneme gruplarından anlamlı düzeyde farklı bulunmuştur. Buna karşın, en düşük değer 6,578 ile HBE uygulamasında saptanmış ve bu grup da diğer uygulamalardan anlamlı oranda ayrılmıştır. HBE uygulamasının, diğer tüm deneme gruplarına kıyasla yaprak bitinin net üreme oranı üzerinde belirgin düzeyde olumsuz bir etki meydana getirdiği belirlenmiştir (Tablo 4.4.).

Brüt üreme oranı (*GRR*), bir bireyin yaşamı boyunca ölüm faktörü dikkate alınmaksızın meydana getirebileceği toplam yavru sayısını ifade eden yaşam tablosu parametrelerinden biridir. *GRR* değerinin artması, yaprak biti popülasyonunun üreme kapasitesinin yükseldiğini ve daha fazla yavru oluşturma potansiyeline sahip olduğunu gösterirken, bu değerinin azalması ise üreme kapasitesinin düştüğünü ve uygulamanın yaprak biti popülasyonunun çoğalma potansiyelini olumsuz etkilediğini ifade etmektedir. Farklı uygulamaların *GRR* üzerindeki etkileri incelendiğinde, deneme grupları arasında istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı farklılıklar belirlenmiştir ($p < 0,05$). En yüksek brüt üreme oranı 46,378 değeri ile KON grubunda kaydedilmiş olup, bu uygulama diğer tüm deneme gruplarından anlamlı düzeyde farklı bulunmuştur. Buna karşın, en düşük değer 21,968 ile HBE uygulamasında saptanmış ve bu grup da diğer uygulamalardan anlamlı oranda ayrılmıştır. HBE uygulamasının, önceki parametrelere benzer şekilde diğer tüm deneme gruplarına kıyasla yaprak bitinin brüt üreme oranı üzerinde belirgin düzeyde olumsuz bir etki meydana getirdiği belirlenmiştir (Tablo 4.4.).

Ortalama döl süresi (*T*), bir popülasyonda bir neslin oluşması için geçen ortalama süreyi ifade eden yaşam tablosu parametrelerinden biridir. Bu değerinin artması, bireylerin gelişme ve üreme süresinin uzadığını, dolayısıyla popülasyonun daha yavaş çoğaldığını gösterirken, değerinin azalması ise nesil süresinin kısaldığını ve popülasyonun daha kısa sürede yeni nesiller oluşturarak daha hızlı çoğaldığını ifade etmektedir. Uygulamaların yaprak bitinin *T* değeri üzerine etkileri incelendiğinde, uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu belirlenmiştir ($p < 0,05$). Ortalama döl süresi bakımından en yüksek değer FRE uygulamasında (13,356 gün), en düşük değer ise SCE uygulamasında (11,100 gün) belirlenmesi, uygulamaların *M. persicae*'nin nesil yenilenme süresi üzerinde farklı düzeylerde etkili olduğunu göstermektedir. Ortalama döl süresi, bireyin doğumundan itibaren kendi yavrularını meydana getirmesine kadar geçen ortalama süreyi ifade etmekte olup, bu

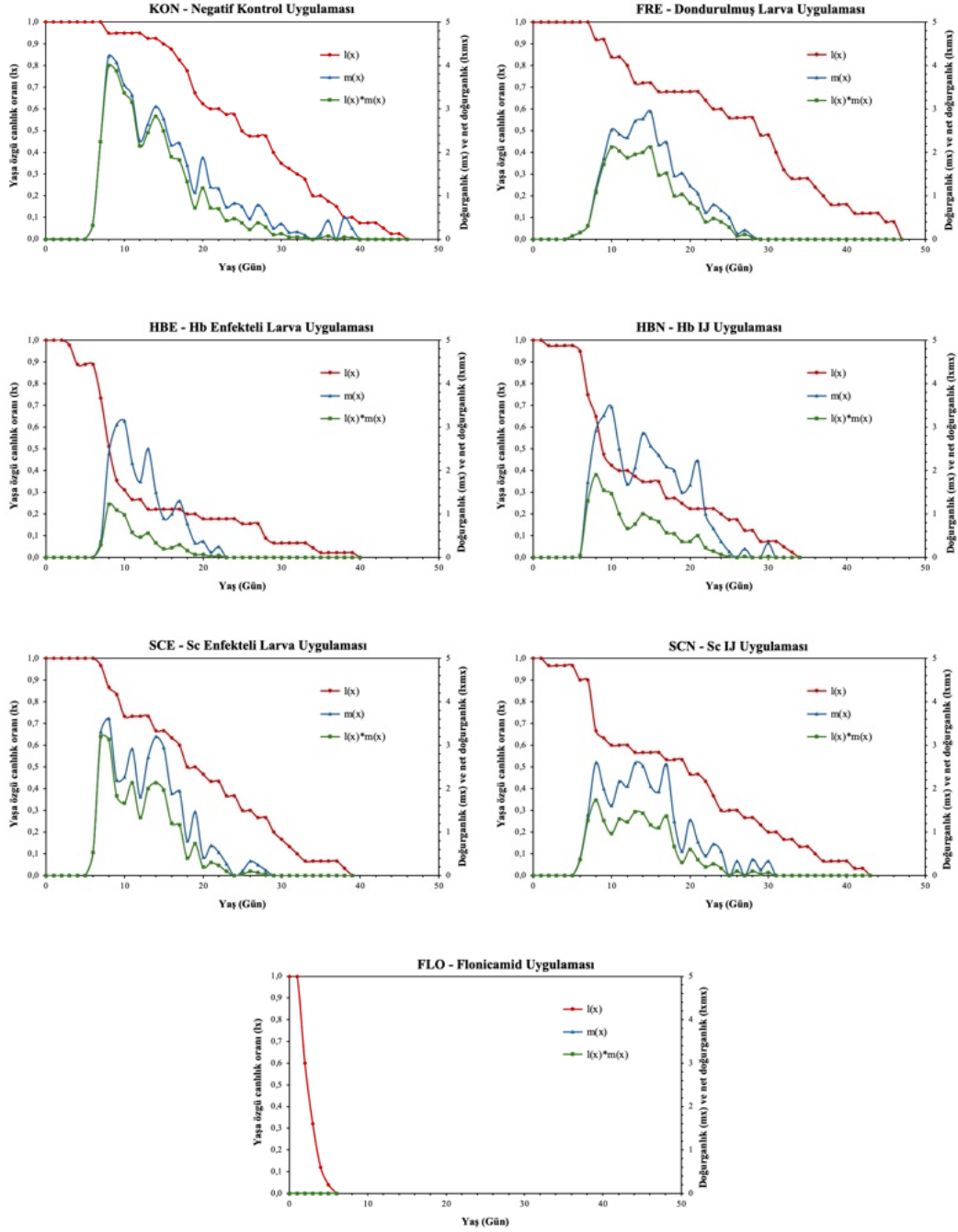
parametrede meydana gelen artış popülasyonun nesil yenilenme hızının yavaşladığını göstermektedir (Birch, 1948). Bu nedenle FRE uygulamasında belirlenen yüksek T değeri, bireylerin gelişim sürecinin uzadığını ve yeni nesillerin oluşumunun kontrol grubuna göre geciktiğini ortaya koymaktadır (Tablo 4.4.).

Tablo 4.4. Uygulamaların *Myzus persicae*'nin popülasyon parametreleri üzerine etkisi.

Uygulama	n	Kalıtıl üreme yeteneği, r (Gün ⁻¹)	Artış oranı sınırı, λ (Gün ⁻¹)	Net üreme oranı, (R_0) (Nimf)	Brüt Üreme Oranı, (GRR)	Ortalama döl süresi, T (Gün)
KON	40	0,307±0,008 a	1,360±0,011 a	37,950±3,473 a	46,378±3,887 a	11,828±0,171 b
HBN	40	0,226±0,020 bc	1,253±0,025 b	14,350±3,165 c	37,680±4,631 ab	11,799±0,276 bc
HBE	45	0,165±0,025 c	1,179±0,029 c	6,578±1,735 d	21,968±3,181 c	11,446±0,365 bc
SCN	30	0,234±0,019 b	1,263±0,023 b	17,533±3,536 bc	30,741±4,339 bc	12,256±0,319 ab
SCE	30	0,288±0,015 a	1,334±0,020 a	24,500±3,533 b	34,394±3,575 b	11,100±0,240 c
FRE	25	0,238±0,016 b	1,268±0,020 b	23,880±3,889 bc	32,076±3,772 b	13,356±0,495 a

Aynı sütunda yer alan farklı harfler, uygulamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılığın olduğunu göstermektedir (Eşleştirilmiş bootstrap testi, $p < 0,05$). Standart hatalar (SH), bootstrap tekniği ile oluşturulan 100.000 yeniden örnekleme ile hesaplanmıştır.

$l_x m_x$ eğrisi, yaşa özgü hayatta kalma oranı (l_x) ile yaşa özgü doğurganlığın (m_x) çarpımından elde edilmekte olup yeni doğan bir bireyin x yaşında bırakacağı beklenen ortalama yavru sayısını, dolayısıyla popülasyonun etkin üreme kapasitesini yansıtmaktadır; bu eğrinin altında kalan alan ise doğrudan net üreme oranına (R_0) karşılık gelmektedir. Kontrol (KON) uygulamasında $l_x m_x$ eğrisi 8. günde 4,000 değeriyle en yüksek zirveye ulaşmış; bu günde bireylerin %95'inin ($l_x = 0,95$) hâlâ hayatta olması, yüksek hayatta kalma başarısının üreme çıktısına doğrudan yansıdığını göstermiştir (Şekil 4.4.). EPN uygulamalarında ise l_x değerlerinin daha erken ve daha hızlı düşmesi, aynı günlerdeki $l_x m_x$ zirvelerini belirgin biçimde baskılamıştır. En düşük $l_x m_x$ tepe değeri HBE uygulamasında 8. günde 1,22 olarak kaydedilmiş; bu grupta hayatta kalma oranının düşüklüğü ($l_x = 0,511$) etkin döl verimini en aza indirmiştir. Dondurulmuş larva (FRE) uygulamasında ise zirve daha geç bir zamanda (10. gün) ve görece düşük bir seviyede (2,120) gerçekleşerek üreme döneminin ötelendiğine işaret etmiştir. İnsektisit kontrol (FLO) uygulamasında bireyler üreme çağına ulaşamadığından $l_x m_x$ tüm yaşlarda sıfır olarak kalmış ve grafik taban çizgisinde seyretmiştir. Genel olarak EPN uygulamaları, $l_x m_x$ eğrisinin tepe noktasını hem büyüklük hem de zamanlama açısından olumsuz yönde etkileyerek *M. persicae*'nin net üreme potansiyelini önemli ölçüde sınırlandırmıştır.



Şekil 4.4. *Myzus persicae*'nin yaşa özgü canlılık (l_x), doğurganlık (m_x), ve maternite ($l_x m_x$) eğrileri

Biber bitkisinin kök bölgesine uygulanan EPN'lerin yaprak bitinin kalıtsal üreme yeteneğini düşürmesi, literatürdeki sistemik direnç (ISR/SAR) çalışmalarının bulgularıyla güçlü bir şekilde örtüşmektedir (Wondafrash vd., 2013). Benzer bir mekanizmayı araştıran başka bir çalışmada, *Heterorhabdus bacteriophora* ve *Steinernema carpocapsae* türlerinin tütün bitkisinin rizosferine uygulanmasının, toprak üstü aksamda beslenen *M. persicae* popülasyonlarının gelişimini ve üremesini önemli ölçüde baskıladığını tespit etmişlerdir (Li vd., 2020). Yazarlar bu durumu, EPN'lerin köklerdeki varlığının bitki bağışıklık sistemini tetikleyerek yapraklardaki glikoz seviyesini %67 oranında ve savunma alkaloidi olan nikotin

miktarını artırmasıyla, yani zararlının besin kalitesini düşürerek üremesini kısıtlamasıyla açıklamışlardır (Li vd., 2020). Biber bitkisi üzerinde *M. persicae*'nin yaşam parametrelerini inceleyen farklı bir çalışmada ise, bitki köklerine sıvı solucan gübresi (vermisüspansiyon) uygulanmasının bitkide direnci artırarak zararlının kalıtsal üreme yeteneği değerini kontrol grubuna kıyasla geriletmediği rapor edilmiştir (Akköprü, 2021). Ayrıca, biber çeşitlerinin fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerine bağlı olarak *M. persicae*'nin kalıtsal üreme yeteneği değerinin değişebildiği (La Rossa vd., 2013), farklı Charleston biber çeşitlerinde de bu değer 0,193 ile 0,248 bandında seyrettiği saptanmıştır (Özgökçe vd., 2023). HBE uygulamasında elde edilen düşük *r* değeri, EPN varlığının biber bitkisinde muhtemelen bir biyokimyasal savunma yarattığını ve bitkiyi dirençli biber çeşitlerinden bile daha uygunsuz bir konukçu haline getirdiğini göstermektedir.

Uygulamalar arasındaki karşılaştırmalar incelendiğinde, *S. carpocapsae* türüne ait iki uygulama formunun farklı sonuçlar verdiği dikkat çekmektedir. SCN uygulamasında kalıtsal üreme yeteneği kontrol grubundan anlamlı ölçüde düşük bulunurken, SCE uygulamasında bu fark istatistiksel anlam taşımamıştır. Bu bulgu, *S. carpocapsae* varlığının *M. persicae* üzerindeki dolaylı etkisinin canlı IJ'lere özgü olabileceğini ve aktif nematod enfeksiyonunun bitki savunma yanıtını tetiklemedeki rolünü düşündürmektedir. Nitekim *H. bacteriophora*'da hem enfekteli larva hem de IJ formunun anlamlı etki göstermesi, iki EPN türünün bitki-aracılı savunma mekanizmalarını farklı biçimlerde aktive ettiğine ya da bu mekanizmalara farklı düzeylerde katkıda bulunduğuna işaret etmektedir. Bu sonuç, uygulamanın biyolojik formunun etkinin büyüklüğünü belirleyen önemli bir değişken olduğunu ortaya koymakta; bu nedenle FRE (dondurulmuş larva) uygulamasının bulgularla birlikte değerlendirilmesi, gözlenen etkilerin hangi bileşenden kaynaklandığına dair daha bütüncül bir yorum yapılmasına olanak tanımaktadır.

Tez çalışmasında HBE uygulamasında net üreme oranının kontrol grubuna kıyasla belirgin şekilde gerilemesi, EPN'lerin *M. persicae*'nin popülasyon artış potansiyelini güçlü bir biçimde baskıladığını göstermektedir. Biyolojik etmenlerin rizosfer bölgesine uygulanarak bitki aracılığıyla toprak üstü zararlılarına olumsuz yansıma oluşturmaları prensibi, literatürdeki benzer kök uygulaması bulgularıyla tam bir paralellik sergilemektedir. Nitekim Berber Tortop vd., (2026), biber bitkisinde kök bölgesine uygulanan arbusküler mikorizal fungusların (AMF) *M. persicae*'nin yaşam tablosu parametrelerini anlamlı düzeyde düşürdüğünü saptamıştır. Benzer şekilde Akköprü (2021), kök bölgesine yapılan organik kökenli uygulamaların bitki fizyolojisini modüle ederek yaprak bitinin üreme kapasitesini dolaylı yoldan sınırlandırdığını

rapor etmiştir. Uygulanan biyolojik materyaller farklılık gösterse de, rizosferdeki faydalı mikroorganizmaların ve biyolojik ajanların bitki savunma yanıtlarını tetikleyerek toprak üstü emici zararlıların üreme potansiyelini kırma eğilimi çalışmamızın sonuçlarını destekler niteliktedir. Öte yandan, kontrol grubumuzda gözlenen popülasyon gelişim dinamikleri, konukçu bitkilerin genetik arka planı ve beslenme kalitesi bağlamında değerlendirildiğinde literatürdeki doğal gelişim seyirleriyle örtüşmektedir. Örneğin La Rossa vd. (2013), *M. persicae*'nin net üreme oranının kullanılan bitki çeşidinin antibiyotik özelliklerine ve genetik yapısına bağlı olarak değiştiğini; dirençli çeşitlerde üreme başarısının sınırlandığını bildirmiştir. Bu durum, tez çalışmamızdaki kontrol grubunun doğal popülasyon gelişimini doğru bir şekilde yansıttığını, HBE uygulamasında gözlenen belirgin azalmanın ise doğrudan uygulamaya bağlı biyolojik ve bitki aracılı bir etkinin sonucu olduğunu doğrulamaktadır. EPN'lerin bu dolaylı etkiyi hangi mekanizmayla sağladığı hususu, Li vd. (2020) tarafından yürütülen araştırmayla doğrudan açıklık kazanmaktadır. Araştırmacılar, *H. bacteriophora* ve *S. carpocapsae*'nin kök bölgesine uygulanmasıyla bitkisel savunma metabolitlerinin düzeyinin yükseldiğini ve bu durumun yaprak bitlerinin üreme performansını belirgin şekilde baskıladığını göstermişlerdir. Doğrudan temas olmaksızın gerçekleşen bu uyarılma, çalışmamızda HBE grubunda tespit edilen düşük R_0 eğilimiyle bir uyum içerisindedir ve kökten uygulanan EPN'lerin indüklenmiş sistemik direnç (ISR) yollarını harekete geçirdiği hipotezini güçlendirmektedir. Kimyasal kontrol ekseninde yapılan araştırmalar da zararlı popülasyon dinamiklerinin kırılabilceğini ortaya koymaktadır. Kayahan ve Kayahan (2026), farklı sentetik insektisitlerin subletal dozlarının *M. persicae*'nin net üreme oranını doğrudan toksisite yoluyla düşürdüğünü kaydetmiştir. Doğrudan kimyasal maruziyet ile bitki aracılı biyolojik uyarımın etki modları tamamen farklı olsa da, her iki yaklaşım da yaprak bitinin üreme potansiyelinin başarıyla sınırlandırılabilceğini göstermektedir.

Kontrol grubunda herhangi bir biyotik veya abiyotik stres faktörü bulunmadığından elde edilen *GRR* değeri, *M. persicae*'nin biber bitkisi üzerindeki doğal üreme kapasitesini yansıtmaktadır. Buna karşın, kök bölgesine uygulanan HBE uygulamasının brüt üreme oranını yaklaşık yarı yarıya azaltması, EPN'lerin bitki aracılığıyla yaprak bitinin üreme potansiyelini önemli ölçüde sınırlandırabildiğini göstermektedir. Bu baskılama mekanizmasının niteliği, Li vd. (2020) tarafından yürütülen araştırmayla paralellik göstermektedir. Araştırmacılar, *H. bacteriophora* ve *S. carpocapsae*'nin kök bölgesine uygulanmasıyla bitkide nikotin gibi sekonder savunma metabolitlerinin düzeyinin arttığını ve buna bağlı olarak *M. persicae*'nin üreme performansının anlamlı düzeyde gerilediğini tespit etmişlerdir. Doğrudan temas

olmaksızın sadece kök bölgesindeki EPN varlığıyla tetiklenen bu sistemik yanıt, çalışmamızda HBE grubunda elde edilen düşük *GRR* eğilimiyle bir uyum içerisindedir.

Ortalama döl süresi, bir popülasyonun neslini yenileme hızını gösteren önemli yaşam tablosu parametrelerinden biridir ve bu nedenle tek başına değil, diğer popülasyon parametreleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Bu çalışmada, kök bölgesine uygulanan farklı EPN uygulamalarının *M. persicae*'nin ortalama döl süresini farklı düzeylerde etkilediği, özellikle dondurulmuş larva (FRE) uygulamasında bu sürenin uzadığı belirlenmiştir. Bu durum, uygulama sonrasında bitkide meydana gelen fizyolojik değişimlerin yaprak bitinin gelişim ve üreme sürecini dolaylı olarak yavaşlatmış olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, ortalama döl süresindeki uzamanın tek başına popülasyon performansındaki artış veya azalışı açıklamadığı görülmektedir. Nitekim FRE uygulamasında döl süresinin uzamasına karşın net ve brüt üreme oranlarının kontrol grubuna göre daha düşük olması, bireylerin nesil yenileme süresinin uzamasının popülasyon artışını desteklemediğini göstermektedir. Benzer şekilde, daha kısa döl süresi de tek başına daha yüksek popülasyon artışı anlamına gelmemektedir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, *M. persicae*'nin gelişim süresinin EPN uygulamalarından etkilenebildiğini, ancak bu etkinin popülasyon dinamiği açısından değerlendirilmesinde diğer yaşam tablosu parametrelerinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Uygulamalarının rizosferde oluşturduğu biyolojik etkileşimlerin bitki fizyolojisini değiştirerek bitki üstü zararlıların gelişim ve üreme özelliklerini etkileyebildiği daha önce bildirilmiştir (Koppenhöfer vd., 2020; Lacey ve Georgis, 2012). Bu bağlamda, özellikle FRE uygulamasında gözlenen döl süresindeki uzama, uygulamanın bitki-zararlı etkileşimi üzerinden dolaylı bir etki oluşturmuş olabileceğini düşündürmektedir. Ancak bu etkinin doğrudan EPN enfeksiyonu veya simbiyotik bakterilerin aktivitesiyle ilişkili olduğunu kesin olarak ortaya koymak mümkün değildir. Dolayısıyla ortalama döl süresindeki değişim, çalışmada EPN uygulamalarının *M. persicae*'nin nesil yenileme hızını değiştirebildiğine işaret eden bir yaşam tablosu göstergesi olarak değerlendirilebilir.

4.5. Genel değerlendirme

Genel olarak değerlendirildiğinde, yaşam tablosu parametreleri EPN uygulamalarının *M. persicae*'nin gelişim, yaşam süresi ve üreme performansı üzerinde farklı düzeylerde etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Özellikle *H. bacteriophora* kaynaklı uygulamalarda yaşam ve üreme ile ilişkili parametrelerde daha belirgin değişimler gözlenmiştir. HBN ve HBE uygulamalarında yaşam uzunluğu ve ergin süresindeki azalmaya ovipozisyon süresi, ovipozisyon günleri ve doğurganlıktaki azalmaların eşlik etmesi, bu uygulamaların *M.*

persicae'nin bireysel performansının yanı sıra popülasyonun yenilenme kapasitesini de sınırlandırabileceğini göstermektedir.

Heterorhabditis bacteriophora ile ilişkili HBN ve HBE uygulamalarında yaşam süresinin kısılması, bireylerin üreme faaliyetini sürdürebilecekleri zamanın azalmasıyla birlikte değerlendirilmelidir. Nitekim özellikle HBE uygulamasında ovipozisyon süresi ve doğurganlığın belirgin şekilde azalması, yaşam süresindeki kısılmanın üreme performansına da yansıdığını göstermektedir. Bu sonuçlar, kök bölgesine uygulanan EPN'lerin yaprak bitlerinin biyolojik performansını değiştirebildiğini bildiren çalışmalarla genel olarak uyumlu görünmektedir. Bununla birlikte, detaylı kimyasal analizler yapılamadığından, gözlenen değişimlerin belirli bir mekanizmaya bağlanması yerine bitki aracılı biyolojik etkinin olası bir sonucu olarak değerlendirilmesi daha uygundur.

Dondurulmuş larva (FRE) uygulaması ise HBN ve HBE uygulamalarından farklı bir yaşam tablosu profili ortaya koymuştur. Bu uygulamada özellikle son nimf döneminde ve toplam ergin öncesi gelişim süresinde uzama görülürken, yaşam uzunluğu kontrol grubuna benzer ve yüksek düzeyde bulunmuştur. Buna karşılık ovipozisyon süresi ve doğurganlığın kontrol grubuna göre daha düşük olması, daha uzun yaşam süresinin daha yüksek üreme başarısı anlamına gelmediğini göstermektedir. Dolayısıyla FRE uygulamasında ortaya çıkan temel etkinin bireylerin doğrudan yaşamını kısaltmaktan çok gelişim ve üreme özelliklerinde değişime yol açtığı değerlendirilebilir.

Yaşam tablosu parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi, tek bir parametredeki değişimin popülasyon başarısını açıklamak için yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Gelişim süresindeki uzama yeni neslin oluşumunu geciktirirken, yaşam süresindeki kısalma bireylerin üreme için sahip olduğu zaman aralığını daraltmakta ve ovipozisyon ile doğurganlıktaki azalmalar popülasyona yapılan katkıyı sınırlandırmaktadır. Bu değişimlerin birlikte gerçekleşmesi, temel popülasyon parametrelerine yansıyabilecek bütüncül bir etkiyi ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Çalışmada özellikle *H. bacteriophora* kaynaklı uygulamalarda yaşam süresi, gelişim ve üreme parametrelerinin birlikte değişmesi, bu uygulamaların zararlının popülasyon gelişimini birden fazla biyolojik süreç üzerinden sınırlandırabileceğini göstermektedir. Bu nedenle EPN uygulamalarının biyolojik mücadele potansiyelinin değerlendirilmesinde doğrudan etkinin yanı sıra dolaylı etkilerinin de dikkate alınması önem taşımaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, *H. bacteriophora* ve *S. carpocapsae*'nin biber bitkisinde yeşil şeftali yaprak biti *M. persicae*'nin yaşam tablosu parametrelerine bitki üzerinden dolaylı etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, EPN uygulamalarının yaprak bitinin gelişim ve üreme biyolojisini etkileyebildiğini ve bu etkinin uygulama şekline bağlı olarak değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Araştırma sonuçlarına göre özellikle doğrudan *H. bacteriophora* IJ ve enfekteli larva uygulamalarında *M. persicae*'nin yaşam süresi, ergin yaşam süresi, ovipozisyon süresi ve toplam doğurganlığında belirgin azalmalar meydana gelmiştir. Buna karşılık bazı uygulamalarda ergin öncesi gelişim süresinin uzadığı, ancak yaşam süresi ve üreme parametreleri üzerindeki etkinin canlı uygulamalara kıyasla daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Yaşam tablosu parametreleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde, doğrudan EPN uygulamalarının yaprak biti popülasyonunun gelişme ve çoğalma potansiyelini baskıladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Uygulamalarda gözlenen etkinin, nematodların bitki kök bölgesinde aktif olarak bulunmaları ve enfekteli larvalarda simbiyotik bakterileri ile birlikte bitkide sistemik savunma mekanizmalarını uyarmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bitkide meydana gelen bu savunma yanıtının yaprak bitlerinin beslenme başarısını azaltarak yaşam süresi ve doğurganlık gibi temel biyolojik özellikleri olumsuz etkilediği değerlendirilmektedir. Bu durum, EPN'lerin yalnızca doğrudan böcek patojeni olarak değil, bitki savunmasını aktive eden biyolojik etmenler olarak da önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışma sonunda sürdürülebilir biyolojik mücadele uygulamalarına katkı sağlayabilecek önemli verilere ulaşıldığı düşünülmektedir. Elde edilen bulgular, kimyasal insektisit kullanımının azaltılmasına yönelik geliştirilecek entegre zararlı yönetimi programlarında EPN'lerden mevcut yöntemlerin dışında farklı bir bakış açısıyla da yararlanılabileceğini göstermektedir. Ancak çalışmanın kontrollü iklim kabini koşullarında yürütülmüş olması nedeniyle, sonuçların sera ve açık alan koşullarında doğrulanması gerekmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı *Heterorhabditis* ve *Steinernema* türlerinin, farklı uygulama dozları ve uygulama zamanlarının bitki aracılı etkilerinin karşılaştırılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca farklı biber çeşitleri ve farklı yaprak biti türleri üzerinde benzer çalışmalar yürütülerek elde edilen sonuçların genellenebilirliği değerlendirilmelidir. EPN'lerin

bitkide oluşturduğu savunma mekanizmalarının jasmonik asit, salisilik asit ve etilen gibi sinyal yolları açısından moleküler ve biyokimyasal düzeyde incelenmesi, bu etkileşimlerin mekanizmasının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra EPN'lerin predatör ve parazitoitler gibi diğer biyolojik mücadele etmenleriyle birlikte kullanılabileceği entegre mücadele programlarının geliştirilmesi ve bu uygulamaların bitki gelişimi, verim ve kalite üzerine etkilerinin araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abate, B. A., Wingfield, M. J., Slippers, B., & Hurley, B. P. (2017). Commercialisation of entomopathogenic nematodes: Should import regulations be revised? *Biocontrol Science and Technology*, 27(2), 149-168. <https://doi.org/10.1080/09583157.2016.1278200>
- Abd-Elgawad, M. M. M. (2022). *Xenorhabdus* spp.: An Overview of the Useful Facets of Mutualistic Bacteria of Entomopathogenic Nematodes. *Life*, 12(9), 1360. <https://doi.org/10.3390/life12091360>
- Akköprü, E. P. (2021). Vermisüs pansiyon uygulamalarının biber (*Capsicum annum* L. *Solanaceae*) üzerinde beslenen yeşil şeftali yaprakbiti [*Myzus* (N.) *persicae* Sulzer] (Hemiptera: Aphididae)]'nin popülasyon gelişimi üzerine etkileri. *Plant Protection Bulletin*, 61(1), Makale 1. <https://doi.org/10.16955/bitkorb.753214>
- Ali, J., Bayram, A., Mukarram, M., Zhou, F., Karim, M. F., Hafez, M. M. A., Mahamood, M., Yusuf, A. A., King, P. J. H., Adil, M. F., Ma, Z., & Shamsi, I. H. (2023). Peach–Potato Aphid *Myzus persicae*: Current Management Strategies, Challenges, and Proposed Solutions. *Sustainability*, 15(14), 11150. <https://doi.org/10.3390/su151411150>
- Ali, M. Y., Naseem, T., Arshad, M., Ashraf, I., Rizwan, M., Tahir, M., Rizwan, M., Sayed, S., Ullah, M. I., Khan, R. R., Amir, M. B., Pan, M., & Liu, T.-X. (2021). Host-Plant Variations Affect the Biotic Potential, Survival, and Population Projection of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *Insects*, 12(375), 1-13. <https://doi.org/10.3390/insects12050375>
- Baral, S., Thapa, R. B., Jha, R. K., Joshi, S. L., & Aryal, S. (2023). Sublethal Effects of Flonicamid on Life Table of *Myzus persicae* (Sulzer). *Journal of the Plant Protection Society*, 8, 1-13. <https://doi.org/10.3126/jpps.v8i1.56443>
- Bass, C., Puinean, A. M., Zimmer, C. T., Denholm, I., Field, L. M., Foster, S. P., Gutbrod, O., Nauen, R., Slater, R., & Williamson, M. S. (2014). The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 51, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2014.05.003>
- Bedding, R. A., & Akhurst, R. J. (1975). A simple technique for the detection of insect parasitic rhabditid nematodes in soil. *Nematologica*, 21(1), 109-110. <https://doi.org/10.1163/187529275X00419>
- Belien, T. (2018). Entomopathogenic nematodes as biocontrol agents of insect pests in orchards. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 13(58), 1-11. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201813058>
- Berber Tortop, G., Özgönen Özkaya, H., & Birgücü, A. K. (2026). Effects of an arbuscular mycorrhizal fungi on some biological characteristics of *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae). *BioControl*, 71(1), 105-112. <https://doi.org/10.1007/s10526-025-10357-7>
- Berkvens, N., Van Vaerenbergh, J., Maes, M., Beliën, T., & Viaene, N. (2014). Entomopathogenic nematodes fail to parasitize the woolly apple aphid *Eriosoma lanigerum* as their symbiotic bacteria are suppressed. *Journal of Applied Entomology*, 138(9), 644-655. <https://doi.org/10.1111/jen.12117>
- Birch, L. C. (1948). The Intrinsic Rate of Natural Increase of an Insect Population. *Journal of Animal Ecology*, 17(1), 15-26. <https://doi.org/10.2307/1605>
- Blackman, R. L., & Eastop, V. F. (2006). *Aphids on the world's herbaceous plants and shrubs*. J. Wiley and sons.
- Bravo, A., Likitvivatanavong, S., Gill, S. S., & Soberón, M. (2011). *Bacillus thuringiensis*: A story of a successful bioinsecticide. *Insect Biochemistry and Molecular Biology, Special*

- Issue: *Toxicology and Resistance*, 41(7), 423-431.
<https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2011.02.006>
- Chi, H. (1988). Life-Table Analysis Incorporating Both Sexes and Variable Development Rates Among Individuals. *Environmental Entomology*, 17(1), 26-34.
<https://doi.org/10.1093/ee/17.1.26>
- Chi, H. (2026). TWOSEX-MSChart: A computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18363750>
- Chi, H., & Liu, H. (1985). Two new methods for study of insect population ecology. *Bulletin of the Institute of Zoology, Academia Sinica*, 24.
- Chi, H., & Su, H.-Y. (2006). Age-Stage, Two-Sex Life Tables of *Aphidius gifuensis* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) and Its Host *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae) with Mathematical Proof of the Relationship Between Female Fecundity and the Net Reproductive Rate. *Environmental Entomology*, 35(1), 10-21.
<https://doi.org/10.1603/0046-225X-35.1.10>
- Chi, H., Güncan, A., Kavousi, A., Gharakhani, G., Atlihan, R., Salih Özgökçe, M., Shirazi, J., Amir-Maafi, M., Maroufpoor, M., & Roya, T. (2022). TWOSEX-MSChart: The key tool for life table research and education. *Entomologia Generalis*, 42(6), 845-849.
<https://doi.org/10.1127/entomologia/2022/1851>
- Chi, H., Kavousi, A., Gharekhani, G., Atlihan, R., Salih Özgökçe, M., Güncan, A., Gökçe, A., Smith, C. L., Benelli, G., Guedes, R. N. C., Amir-Maafi, M., Shirazi, J., Taghizadeh, R., Maroufpoor, M., Xu, Y.-Y., Zheng, F.-Q., Ye, B.-H., Chen, Z.-Z., You, M.-S., ... Desneux, N. (2023). Advances in theory, data analysis, and application of the age-stage, two-sex life table for demographic research, biological control, and pest management. *Entomologia Generalis*, 43(4), 705-732.
<https://doi.org/10.1127/entomologia/2023/2048>
- Dede, E., Bütüner, A. K., & Susurluk, I. A. (2023). Biocontrol potential of *Heterorhabditis bacteriophora* Poinar, 1976 (Rhabditida: Heterorhabditidae) HBH hybrid strain against the beet webworm, *Loxostege sticticalis* L., 1761 (Lepidoptera: Pyralidae). *Turkish Journal of Entomology*, 46(4), Makale 4. <https://doi.org/10.16970/entoted.1162125>
- Del Valle, E. E., Lax, P., Rondán Dueñas, J., & Doucet, M. E. (2013). Effects of insect cadavers infected by *Heterorhabditis bacteriophora* and *Steinernema diaprepesi* on *Meloidogyne incognita* parasitism in pepper and summer squash plants. *Ciencia e Investigación Agraria*, 40(1), 109-118. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202013000100009>
- Dey Roy, S., & Kumar Mukhopadhyay, A. (2025). Entomopathogenic nematodes in pest management: Mechanisms, efficacy, and future prospects. *CABI Reviews*, 0042. <https://doi.org/10.1079/cabireviews.2025.0042>
- Dicke, M., & Baldwin, I. T. (2010). The evolutionary context for herbivore-induced plant volatiles: Beyond the 'cry for help'. *Trends in Plant Science*, 15(3), 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.12.002>
- Divya, K., & Sankar, M. (2009). Entomopathogenic nematodes in pest management. *Indian Journal of Science and Technology*, 2(7), 53-60. <https://doi.org/10.17485/ijst/2009/v2i7/29499>
- Douglas, A. E. (2003). The Nutritional Physiology of Aphids. İçinde *Advances in Insect Physiology* (C. 31, ss. 73-140). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2806\(03\)31002-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2806(03)31002-1)
- Dunn, M. D., Belur, P. D., & Malan, A. P. (2021). A review of the in vitro liquid mass culture of entomopathogenic nematodes. *Biocontrol Science and Technology*, 31(1), 1-21. <https://doi.org/10.1080/09583157.2020.1837072>
- Elbrense, H., Elmasry, A. M. A., Seleiman, M. F., AL-Harbi, M. S., & Abd El-Raheem, A. M. (2021). Can symbiotic bacteria (*Xenorhabdus* and *Photorhabdus*) be more efficient than

- their entomopathogenic nematodes against *Pieris rapae* and *Pentodon algerinus* larvae? *Biology*, 10(10), 999. <https://doi.org/10.3390/biology10100999>
- Food and Health Organization (FAO) (2022). Crops and Livestock Products. [Erişim: 26.05.2026 <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>].
- Food and Health Organization (FAO) (2024). Crops and Livestock Products. [Erişim: 26.05.2026 <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>].
- Göze Özdemir, F. G., Çevik, H., Ndayiragije, J. C., Özek, T., & Karaca, İ. (2022). Nematicidal effect of chitosan on *Meloidogyne incognita* in vitro and on tomato in a pot experiment. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 6(3), 410-416. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2022.3.10>
- Gözel, Ç., Kasap, İ., & Gözel, U. (2020). Efficacy of native entomopathogenic nematodes on the larvae of tomato leafminer *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of Agricultural Sciences*, 26(2), Makale 2. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.519686>
- Grewal, P. S., Lewis, E. E., & Venkatachari, S. (1999). Allelopathy: A possible mechanism of suppression of plant-parasitic nematodes by entomopathogenic nematodes. *Nematology*, 1(7), 735-743. <https://doi.org/10.1163/156854199508766>
- Grunseich, J. M., Thompson, M. N., Hay, A. A., Gorman, Z., Kolomiets, M. V., Eubanks, M. D., & Helms, A. M. (2020). Risky roots and careful herbivores: Sustained herbivory by a root-feeding herbivore attenuates indirect plant defences. *Functional Ecology*, 34(9), 1779-1789. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13627>
- Guo, H., & Ge, F. (2017). Root nematode infection enhances leaf defense against whitefly in tomato. *Arthropod-Plant Interactions*, 11(1), 23-33. <https://doi.org/10.1007/s11829-016-9462-8>
- Güvenç, İ. (2020). Türkiye’de Biber Üretimi, Dış Ticareti ve Rekabet Gücü. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 23(2), 441-445. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.595512>
- Helms, A. M., Ray, S., Matulis, N. L., Kuzemchak, M. C., Grisales, W., Tooker, J. F., & Ali, J. G. (2019). Chemical cues linked to risk: Cues from below-ground natural enemies enhance plant defences and influence herbivore behaviour and performance. *Functional Ecology*, 33(5), 798-808. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13297>
- Huang, Y., & Xuan, J. (2024). Aphids as Vectors of Plant Viruses: Mechanisms of Transmission and Host Interaction. *Molecular Entomology*. <https://doi.org/10.5376/me.2024.15.0021>
- Jagodič, A., Trdan, S., & Laznik, Ž. (2019). Entomopathogenic nematodes: Can we use the current knowledge on belowground multitrophic interactions in future plant protection programmes? - Review. *Plant Protection Science*, 55(4), 243-254. <https://doi.org/10.17221/24/2019-PPS>
- Jouzani, G. S., Valijanani, E., & Sharafi, R. (2017). *Bacillus thuringiensis*: A successful insecticide with new environmental features and tidings. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(7), 2691-2711. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8175-y>
- Kamali, S., Javadmanesh, A., Stelinski, L. L., Kyndt, T., Seifi, A., Cheniany, M., Zaki-Aghl, M., Hosseini, M., Heydarpour, M., Asili, J., & Karimi, J. (2022). Beneficial worm allies warn plants of parasite attack below-ground and reduce above-ground herbivore preference and performance. *Molecular Ecology*, 31(2), 691-712. <https://doi.org/10.1111/mec.16254>
- Kansman, J. T., Hermann, S. L., Ali, J. G., & Helms, A. M. (2025). Flipping indirect defense: Chemical cues from natural enemies mediate multitrophic interactions. *Current Opinion in Insect Science*, 68, 101330. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2024.101330>
- Kaur, A., Sirengo, D. K., Karki, P., Powers, T. O. O., & Brown, A. M. V. M. V. (2026). Harnessing entomopathogenic nematodes for sustainable pest management:

- Mechanisms, challenges, and innovations. *Frontiers in Plant Science*, 17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1755114>
- Kaya, H. K., & Stock, S. P. (1997). Techniques in insect nematology. İçinde *Manual of Techniques in Insect Pathology* (ss. 281-324). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012432555-5/50016-6>
- Kayahan, A., & Kayahan, B. (2026). Impact of deltamethrin, cypermethrin, and chlorantraniliprole on the life table traits and demographic parameters of *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae). *Crop Protection*, 202, 107533. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2025.107533>
- Kılınçer, N., Yiğit, A., Kazak, C., Kubilay Er, M., Kurtuluş, A., & Uygun, N. (2010). Teoriden pratiğe zararlılarla biyolojik mücadele. *Turkish Journal of Biological Control*, 1(1), 15-60.
- Koo, H., Lee, S., Yun, S., Kim, H. K., & Kim, G. (2015). Feeding response of the cotton aphid, *Aphis gossypii*, to sublethal rates of flonicamid and imidacloprid. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 154(2), 110-119. <https://doi.org/10.1111/eea.12260>
- Koppenhöfer, A. M., Shapiro-Ilan, D. I., & Hiltbold, I. (2020). Entomopathogenic nematodes in sustainable food production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(125), 1-14. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00125>
- Kraft, K. H., Brown, C. H., Nabhan, G. P., Luedeling, E., Luna Ruiz, J. de J., Coppens d'Eeckenbrugge, G., Hijmans, R. J., & Gepts, P. (2014). Multiple lines of evidence for the origin of domesticated chili pepper, *Capsicum annuum*, in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(17), 6165-6170. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308933111>
- La Rossa, F. R., Vasicek, A., & López, M. C. (2013). Effects of Pepper (*Capsicum annuum*) Cultivars on the Biology and Life Table Parameters of *Myzus persicae* (Sulz.) (Hemiptera: Aphididae). *Neotropical Entomology*, 42(6), 634-641. <https://doi.org/10.1007/s13744-013-0166-9>
- Labaude, S., & Griffin, C. T. (2018). Transmission Success of Entomopathogenic Nematodes Used in Pest Control. *Insects*, 9(2), 72. <https://doi.org/10.3390/insects9020072>
- Lacey, L. A., & Georgis, R. (2012). Entomopathogenic nematodes for control of insect pests above and below ground with comments on commercial production. *Journal of Nematology*, 44(2), 218-225.
- Li, G., Liu, T., Whalen, J. K., & Wei, Z. (2023). Nematodes: An overlooked tiny engineer of plant health. *Trends in Plant Science*, S1360138523002261. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.06.022>
- Li, Y., Zhen, S., Shan, S., Sun, B., Li, J., Hu, F., Cui, Q., Zhang, L., Gu, X., Cheng, W., Wang, M., Ruan, W., & Rasmann, S. (2020). Modulation of above-belowground plant-herbivore interactions by entomopathogenic nematodes. *Applied Soil Ecology*, 148, 103479. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103479>
- Manosalva, P., Manohar, M., von Reuss, S. H., Chen, S., Koch, A., Kaplan, F., Choe, A., Micikas, R. J., Wang, X., Kogel, K.-H., Sternberg, P. W., Williamson, V. M., Schroeder, F. C., & Klessig, D. F. (2015). Conserved nematode signalling molecules elicit plant defenses and pathogen resistance. *Nature Communications*, 6(1), Makale 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms8795>
- Martín-Cacheda, L., Moreira, X., Rodríguez, V. M., Quiroga, G., Röder, G., & Blanco-Pérez, R. (2026). Belowground mutualists modulate growth and aboveground defense in potato: Insights from mycorrhizal and entomopathogenic nematode interactions. *Planta*, 263(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s00425-025-04877-w>
- Martínez-Medina, A., Appels, F. V. W., & Van Wees, S. C. M. (2017). Impact of salicylic acid- and jasmonic acid-regulated defences on root colonization by *Trichoderma harzianum*

- T-78. *Plant Signaling & Behavior*, 12(8), e1345404. <https://doi.org/10.1080/15592324.2017.1345404>
- Molinari, S., Fanelli, E., & Leonetti, P. (2014). Expression of tomato salicylic acid (SA)-responsive pathogenesis-related genes in Mi-1-mediated and SA-induced resistance to root-knot nematodes. *Molecular Plant Pathology*, 15(3), 255-264. <https://doi.org/10.1111/mpp.12085>
- Nermut, J., Hristov, Y., Podrábská, V., Kraml, A., Skoková Habušťová, O., Konopická, J., Doležal, P., & Půža, V. (2025). Potential of cell-free supernatants of *Xenorhabdus* and *Photorhabdus* bacteria for the control of virus-transmitting aphids (*Myzus persicae*). *Journal of Applied Microbiology*, 136(6), 1xaf150. <https://doi.org/10.1093/jambio/1xaf150>
- Noureldeen, A., Kumar, U., Asad, M., Darwish, H., Alharthi, S., Fawzy, M. A., Al-Barty, A. M., Alotaibi, S. S., Fallatah, A., Alghamdi, A., Albogami, B., & Alkashgry, N. (2022). Aphicidal activity of five plant extracts applied singly or in combination with entomopathogenic bacteria, *Xenorhabdus budapestensis* against rose aphid, *Macrosiphum rosae* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of King Saud University – Science*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102306>
- Özdemir, I., & Özdem, A. (2026). Classical morphological identification keys for Aphididae (Hemiptera) species in fruit orchards. *Bitki Koruma Bülteni*, 66(2), 115-127. <https://doi.org/10.16955/bitkorb.1811702>
- Özgökçe, M. S., Kuşoğlu, D., Konuş, M., Kara, H., Rişvanlı, M. R., & Çetin, D. (2023). The effects of different Charleston pepper cultivars on the demographic parameters and the antioxidant levels of *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae). *Turkish Journal of Entomology*, 47(2), 133-147. <https://doi.org/10.16970/entoted.1174064>
- Peters, A. (1996). The natural host range of *Steinernema* and *Heterorhabditis* spp. And their impact on insect populations. *Biocontrol Science and Technology*, 6(3), 389-402. <https://doi.org/10.1080/09583159631361>
- Ramatsitsi, N., Manyevere, A., & Khosa, M. C. (2025). A systematic review on research trends and commercialised entomopathogenic nematodes: A global perspective. *Agricultural and Forest Entomology*, afe.70018. <https://doi.org/10.1111/afe.70018>
- Reyes-Escogido, M. D. L., Gonzalez-Mondragon, E. G., & Vazquez-Tzompantzi, E. (2011). Chemical and Pharmacological Aspects of Capsaicin. *Molecules*, 16(2), 1253-1270. <https://doi.org/10.3390/molecules16021253>
- Şahin, Y. S., & Susurluk, I. A. (2020). The control of Turkestan cockroach *Blatta lateralis* (Dictyoptera: Blattidae) by the Entomopathogenic nematode *Heterorhabditis bacteriophora* HBH (Rhabditida: Heterorhabditidae) using hydrophilic fabric trap. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 7(2), Makale 2. <https://doi.org/10.1687365917>
- Şahin, Y. S., Bouhari, A., Ulu, T. C., Sadıç, B., & Susurluk, I. A. (2018). New application method for entomopathogenic nematode *Heterorhabditis bacteriophora* (Poinar, 1976) (Rhabditida: Heterorhabditidae) HBH strain against *Locusta migratoria* (Linnaeus, 1758) (Orthoptera: Acrididae). *Turkish Journal of Entomology*, 42(4), 305-312. <https://doi.org/10.16970/ENTOTED.471095>
- Shapiro-Ilan, D. I., & Gaugler, R. (2002). Production technology for entomopathogenic nematodes and their bacterial symbionts. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 28(3), 137-146. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.7000230>
- Shapiro-Ilan, D. I., Gaugler, R., Tedders, W. L., Brown, I., & Lewis, E. E. (2002). Optimization of inoculation for in vivo production of entomopathogenic nematodes. *Journal of Nematology*, 34(4), 343-350.
- Shapiro-Ilan, D. I., Han, R., & Dolinski, C. (2012). Entomopathogenic nematode production and application technology. *Journal of Nematology*, 44(2), 206-217.

- Sial, M. U., Zhao, Z., Zhang, L., Zhang, Y., Mao, L., & Jiang, H. (2018). Evaluation of Insecticides induced hormesis on the demographic parameters of *Myzus persicae* and expression changes of metabolic resistance detoxification genes. *Scientific Reports*, 8(1), 16601. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35076-1>
- Sorensen, J. T. (2009). Chapter 8—Aphids. İçinde V. H. Resh & R. T. Cardé (Ed.), *Encyclopedia of Insects (Second Edition)* (ss. 27-31). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374144-8.00008-4>
- Steyn, V. M., Malan, A. P., & Addison, P. (2019). Control of false codling moth, *Thaumatotibia leucotreta* (Lepidoptera: Tortricidae), using in vitro-cultured *Steinernema jeffreyense* and *S. yirgalemense*. *Biological Control*, 138, 104052. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104052>
- Stock, S. P., & Hazir, S. (2025). The bacterial symbionts of Entomopathogenic nematodes and their role in symbiosis and pathogenesis. *Journal of Invertebrate Pathology*, 211, 108295. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2025.108295>
- Stokwe, N. F., & Malan, A. P. (2016). Woolly apple aphid, *Eriosoma lanigerum* (Hausmann), in South Africa: Biology and management practices, with focus on the potential use of entomopathogenic nematodes and fungi. *African Entomology*, 24(2), 267-278. <https://doi.org/10.4001/003.024.0267>
- Susurluk, I. A., Ulu, T. C., & Kongu, Y. (2013). Tolerances of hybridized entomopathogenic nematode *Heterorhabditis bacteriophora* (Rhabditida: Heterorhabditidae) strains to heat and desiccation. *Turkish Journal of Entomology*, 37(2), 221-228. <https://doi.org/10.16970/ted.96639>
- Toledo-Hernández, E., Torres-Quintero, M. C., Mancilla-Dorantes, I., Sotelo-Leyva, C., Delgado-Núñez, E. J., Hernández-Velázquez, V. M., Dunstand-Guzmán, E., Salinas-Sánchez, D. O., & Peña-Chora, G. (2025). Entomopathogenic Bacteria Species and Toxins Targeting Aphids (Hemiptera: Aphididae): A Review. *Plants*, 14(6), 943. <https://doi.org/10.3390/plants14060943>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) (2024). Bitkisel Üretim İstatistikleri. [Erişim: 25.05.2026 <https://veriportalı.tuik.gov.tr/tr>].
- Turlings, T. C. J., & Erb, M. (2018). Tritrophic Interactions Mediated by Herbivore-Induced Plant Volatiles: Mechanisms, Ecological Relevance, and Application Potential. *Annual Review of Entomology*, 63(Volume 63, 2018), 433-452. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043507>
- Ulu, T. C., & Susurluk, I. A. (2018). Effects of several ingredients on in vitro mass production of *Heterorhabditis bacteriophora* HBH strain. *Mediterranean Agricultural Sciences*, 31(3), 209-212. <https://doi.org/10.29136/mediterranean.437211>
- Ulu, T. C., & Susurluk, I. A. (2021). Optimization of in vitro solid culture of *Heterorhabditis bacteriophora* Poinar, 1976 (Rhabditida: Heterorhabditidae) HBH hybrid strain. *Turkish Journal of Entomology*, 45(4), 441-449. <https://doi.org/10.16970/entoted.1004749>
- Ulu, T. C., & Susurluk, I. A. (2024). In vitro liquid culture production and post-production pathogenicity of the hybrid *Heterorhabditis bacteriophora* HBH strain. *Crop Protection*, 175(106443), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106443>
- Ulu, T. C., Sadic, B., Susurluk, I. A., & Aksit, T. (2015). Virulence of four entomopathogenic nematode species for plum sawfly, *Hoplocampa flava* L. (Hymenoptera: Tenthredinidae). *Invertebrate Survival Journal*, 12(1), 274-277.
- Van Emden, H. F., & Harrington, R. (2007). *Aphids as Crop Pests*. CABI.
- Van Emden, H. F., & Harrington, R. (2017). *Aphids as crop pests* (2nd ed). CABI.
- van Niekerk, S., & Malan, A. P. (2015). Adjuvants to improve aerial control of the citrus mealybug *Planococcus citri* (Hemiptera: Pseudococcidae) using entomopathogenic

- nematodes. *Journal of Helminthology*, 89(2), 189-195. <https://doi.org/10.1017/S0022149X13000771>
- Walters, D. R., Ratsep, J., & Havis, N. D. (2013). Controlling crop diseases using induced resistance: Challenges for the future. *Journal of Experimental Botany*, 64(5), 1263-1280. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert026>
- Wang, A., Tang, H., Sun, J., Wang, L., Rasmann, S., Ruan, W., & Wei, X. (2025). Entomopathogenic Nematodes-Killed Insect Cadavers in the Rhizosphere Activate Plant Direct and Indirect Defences Aboveground. *Plant, Cell & Environment*, 48(1), 923-939. <https://doi.org/10.1111/pce.15193>
- Wang, M., Biere, A., van der Putten, W. H., Bezemer, T. M., & Brinkman, E. P. (2017). Timing of simulated aboveground herbivory influences population dynamics of root-feeding nematodes. *Plant and Soil*, 415(1), 215-228. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3149-x>
- White, G. F. (1927). A method for obtaining infective nematode larvae from cultures. *Science*, 66(1709), 302-303. <https://doi.org/10.1126/science.66.1709.302.b>
- Wondafraash, M., van Dam, N. M., & Tytgat, T. O. G. (2013). Plant systemic induced responses mediate interactions between root parasitic nematodes and aboveground herbivorous insects. *Frontiers in Plant Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00087>
- Wouts, W. M. (1981). Mass production of the entomogenous nematode *Heterorhabditis heliothidis* (Nematoda: Heterorhabditidae) on artificial media. *Journal of Nematology*, 13(4), 467-469.
- Wu, S., Toews, M. D., Cottrell, T. E., Schmidt, J. M., & Shapiro-Ilan, D. I. (2022). Toxicity of *Photorhabdus luminescens* and *Xenorhabdus bovienii* bacterial metabolites to pecan aphids (Hemiptera: Aphididae) and the lady beetle *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Invertebrate Pathology*, 194, 107806. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2022.107806>
- Zeng, X., He, Y., Wu, J., Tang, Y., Gu, J., Ding, W., & Zhang, Y. (2016). Sublethal Effects of Cyantraniliprole and Imidacloprid on Feeding Behavior and Life Table Parameters of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology*, 109(4), 1595-1602. <https://doi.org/10.1093/jee/tow104>
- Zhang, X., Machado, R. A. R., Van Doan, C., Arce, C. C. M., Hu, L., & Robert, C. A. M. (2019). Entomopathogenic nematodes increase predation success by inducing cadaver volatiles that attract healthy herbivores. *eLife*, 8(e46668), 1-21. <https://doi.org/10.7554/eLife.46668>
- Zhao, G., Tang, R., Guo, W., Zhou, X., Hu, F., Dassanayaka, D. M. S. M., Kandegama, W. M. W., & Jin, L. (2026). Entomopathogenic nematodes improve pest control efficiency through functional modulation of root-associated microbiomes in *Allium tuberosum*. *Entomologia Generalis*, 46(1), 99-108. <https://doi.org/10.1127/entomologia/3767>