



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

BİYOTEKNOLOJİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**ENTOMOPATOJEN NEMATODLARIN DOMATES RİZOSFERİNDEKİ
VARLIĞININ KÖK-UR NEMATODU *Meloidogyne incognita*'YA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RABİA NUR AKSU

DANIŞMAN

DOÇ. DR. TUFAN CAN ULU

BİLECİK, 2026

10837428

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

**ENTOMOPATOJEN NEMATODLARIN DOMATES RİZOSFERİNDEKİ
VARLIĞININ KÖK-UR NEMATODU *Meloidogyne incognita*'YA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RABİA NUR AKSU

DANIŞMAN

DOÇ. DR. TUFAN CAN ULU

BİLECİK, 2026

10837428

BEYAN

Entomopatojen Nematodların Domates Rizosferindeki Varlığının Kök-Ur Nematodu *Meloidogyne incognita*'ya 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.

Rabia Nur Aksu

.../.../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 3.6
Google NotebookLM
ChatGPT 5.6 Luna
Claude Sonnet 5

**Yapay zekâ araçlarını tezin/projenin 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.

Rabia Nur Aksu

../../2026

İmza:

ÖN SÖZ

Entomopatojen nematodlar, tarımsal üretimde önemli ekonomik kayıplara neden olan zararlı böceklerle mücadelede çevre dostu ve sürdürülebilir biyolojik mücadele etmenleri arasında önemli bir yere sahiptir. Kimyasal pestisit kullanımının çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması amacıyla entomopatojen nematodların üretimi, uygulanabilirliği ve etkinliğinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar her geçen gün önem kazanmaktadır. Bu tez çalışması, entomopatojen nematodların biyolojik mücadelede kullanım potansiyeline katkı sağlamak ve konuya ilişkin bilimsel bilgi birikimini desteklemek amacıyla hazırlanmıştır.

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.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak her zaman yanımda olan değerli arkadaşım Aydan TERZİOĞLU'na içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatımın ilk gününden itibaren maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan, beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan kıymetli annem Emine AKSU ve babam Yüksel AKSU'ya; varlığıyla bana her daim güç veren sevgili kardeşim Muhammed AKSU'ya sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2210-A Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı ve TOVAG 2230257 numaralı proje ile desteklenmiştir. Çalışmaya verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanaklarının kullanılması noktasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Prof. Dr. Alev AKPINAR BORAZAN'a teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Domates (*Solanum lycopersicum* L.), dünyada ve Türkiye’de ekonomik değeri en yüksek sebze türlerinden biri olup, taze tüketim ve sanayi üretiminde yaygın olarak yetiştirilmektedir. Domates üretiminde verim ve kaliteyi düşüren en önemli biyotik stres faktörlerinin başında kök-ur nematodları (*Meloidogyne* spp.) gelmektedir. Kök-ur nematodları, bitki kök dokusuna girerek beslenmekte ve oluşturdukları urlar nedeniyle su ile besin elementi iletimini aksatarak verim kayıplarına yol açmaktadır. Bu zararlılarla mücadelede kimyasal nematisitlere başvurulsa da, olumsuz çevresel etkileri ve direnç gelişimleri alternatif mücadele yöntemlerine olan gereksinimi artırmaktadır. Biyolojik mücadelede yaygın olarak yararlanılan entomopatojen nematodlar (EPN), konukçularını enfekte ederek öldüren organizmalardır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, EPN’lerin yalnızca hedef böceklerle karşı değil, kök-ur nematodları üzerinde de doğrudan veya dolaylı etkiler oluşturabildiğini göstermektedir. Bu tez çalışmasında farklı EPN tür ve uygulama formlarının kök-ur nematodunun üreme biyolojisi ile domatesin bazı gelişim parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu doğrultuda gal sayısı, gal indeksi ve yumurta paketi oluşumu ile bitki boyu, sürgün ve kök yaş/kuru ağırlıkları incelenmiştir. Araştırma bulguları, EPN’lerin etkinliğinin tercih edilen türe ve uygulama formülasyonuna bağlı olarak belirgin düzeyde değiştiğini ortaya koymuştur. *Steinernema carpocapsae* infektif juvenil (IJ) uygulamaları, kök-ur nematodunun üreme parametrelerini baskılamada sınırlı bir etkinlik sergilemesine rağmen, bazı bitki büyüme parametreleri üzerinde destekleyici katkılar sağlamıştır. Buna karşın, canlı *Heterorhabditis bacteriophora* ve enfekteli kadavra uygulamaları, kök-ur nematodunun üreme kapasitesinin sınırlandırılması ve bitki gelişiminin korunması bakımından belirgin şekilde daha başarılı bulunmuştur. Özellikle canlı *H. bacteriophora* uygulaması kök yaş ve kuru ağırlığını artırmasının yanı sıra kök-ur nematodunun üreme parametrelerini en yüksek oranda baskılayan uygulama olarak öne çıkmıştır. Uygulamaların sürgün gelişimi parametrelerinde istatistiksel olarak belirgin bir farklılık oluşturmadığı, biyolojik etkinin ağırlıklı olarak kök sisteminde yoğunlaştığı saptanmıştır. Sonuç olarak, EPN’lerin kök-ur nematodlarının mücadelesinde biyolojik mücadele etmenleri olarak yüksek bir potansiyel taşıdığı ancak arazi koşullarında optimum etkinliğin sağlanabilmesi adına farklı doz, uygulama zamanı ve rizosfer dinamiklerini konu alan ileri araştırmalara ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyolojik mücadele, *Heterorhabditis bacteriophora*, *Meloidogyne incognita*, *Steinernema carpocapsae*.

ABSTRACT

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most economically important vegetable crops both globally and in Türkiye, widely cultivated for both fresh consumption and agro-industrial processing. Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) represent one of the most detrimental biotic stress factors reducing yield and quality in tomato production. Root-knot nematodes penetrate root tissues to feed and form galls, thereby impairing water and nutrient transport and causing significant yield losses. Although chemical nematicides are frequently employed to control these pests, their adverse environmental impacts and the development of resistance increasingly necessitate alternative management strategies. Entomopathogenic nematodes (EPNs), widely utilized in biological control, are beneficial organisms that infect and kill their insect hosts. Recent studies have demonstrated that EPNs can exert direct or indirect suppressive effects not only on insect pests but also on root-knot nematodes. In this thesis study, the effects of different EPN species and application formulations on the reproductive biology of root-knot nematodes and certain growth parameters of tomato were investigated. Accordingly, the number of galls, gall index, and egg mass formation, as well as plant height, shoot and root fresh/dry weights were evaluated. The research findings revealed that the efficacy of EPNs varied considerably depending on the selected species and application formulation. Although *Steinernema carpocapsae* infective juvenile (IJ) applications exhibited limited efficacy in suppressing the reproductive parameters of root-knot nematodes, they provided supportive contributions to certain plant growth parameters. In contrast, live *Heterorhabditis bacteriophora* and infected cadaver applications were found to be markedly more successful in terms of reducing the reproductive capacity of root-knot nematodes and preserving plant growth. In particular, the live *H. bacteriophora* application stood out as the most effective treatment, significantly enhancing root fresh and dry weights while exhibiting the highest suppression rate on the reproductive parameters of the root-knot nematode. It was determined that the treatments did not cause statistically significant differences in shoot growth parameters, with the biological effects predominantly concentrated within the root system. In conclusion, EPNs hold high potential as biological control agents in root-knot nematode management; however, further investigations addressing different doses, application timings, and rhizosphere dynamics are required to achieve optimum efficacy under field conditions.

Keywords: Biological control, *Heterorhabditis bacteriophora*, *Meloidogyne incognita*, *Steinernema carpocapsae*.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	10
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	20
3.1. Materyal	20
3.1.1. Domates bitkisi	20
3.1.2. Kök-ur nematodu	20
3.1.3. Petek güvesi.....	21
3.1.4. Entomopatojen nematodlar (EPN).....	22
3.1.5. Nematisit	23
3.2. Yöntem	24
3.2.1. Domates bitkilerinin üretimi.....	24
3.2.2. Petek güvesi larvalarının üretimi.....	25
3.2.3. Entomopatojen nematodların <i>in vivo</i> üretimi.....	26
3.2.4. Entomopatojen nematodların <i>in vitro</i> üretimi.....	28
3.2.5. Kök-ur nematodlarının üretimi	32
3.2.6. Deneme deseni ve uygulama grupları.....	35
3.2.7. Değerlendirme parametreleri.....	38
3.2.8. İstatistiksel analizler	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKÇA	59

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Uygulamaların <i>M. incognita</i> gal sayısına etkisi.	42
Tablo 4.2. Uygulamaların <i>M. incognita</i> yumurta paketi üzerine etkisi.	44
Tablo 4.3. Uygulamaların bitki boyu üzerine etkisi.	46
Tablo 4.4. Uygulamaların bitki yaş ağırlığı üzerine etkisi.	48
Tablo 4.5. Uygulamaların bitki kuru ağırlığı üzerine etkisi.	49
Tablo 4.6. Uygulamaların kök uzunluğu üzerine etkisi.....	51
Tablo 4.7. Uygulamaların kök ağırlığı üzerine etkisi.....	53
Tablo 4.8. Uygulamaların kök kuru ağırlığı üzerine etkisi.....	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Denemelerde kullanılan domates tohumu.....	20
Şekil 3.2. Domates bitkisinin köklerindeki urlaşma (A) ve kök-ur nematodu yumurta paketi görüntüsü (B).....	21
Şekil 3.3. Son dönem <i>G. mellenolla</i> larvaları.	21
Şekil 3.4. +4 °C de muhafaza edilen <i>Heterorhabditis bacteriophora</i> HBH kültürleri.	22
Şekil 3.5. Buzdolabında muhafaza edilen <i>S. carpocapsae</i> kültürleri.....	23
Şekil 3.6. İlaçlı deneme grubu için temin edilen nematisit.	23
Şekil 3.7. Domates tohumlarının petride çimlendirilme aşamaları.....	24
Şekil 3.8. Viyole şaşırtılmış domates fideleri.	24
Şekil 3.9. İklim kabininde büyütülen domates fideleri.	25
Şekil 3.10. <i>Galleria mellonella</i> için hazırlanan besin.	26
Şekil 3.11. <i>Galleria mellonella</i> 'nın yumurta, larva ve ergin dönemleri.	26
Şekil 3.12. Enfeksiyon için hazırlanan <i>G. mellonella</i> larvaları.	27
Şekil 3.13. <i>Steinernema</i> (A) ve <i>Heterorhabditis</i> (B) türleri ile enfekte edilmiş larvalarının görüntüleri.	27
Şekil 3.14. White trap düzeneğinde EPN'ler ile enfekteli kadavraların görüntüsü.	28
Şekil 3.15. Enfekte kadavranın steril kabin içerisinde delinmesi.	28
Şekil 3.16. <i>Xenorhabdus</i> ve <i>Photorhabdus</i> kolonilerinin NBTA agardaki görüntüleri.....	29
Şekil 3.17. Biyoluminesans özellik gösteren <i>Photorhabdus</i> kolonileri (sol) ve katalaz testi uygulaması (sağ).	29
Şekil 3.18. Orbital çalkalayıcıda inkübe edilen erlen şişeleri.	30
Şekil 3.19. Sıvı YS besiyerinde gelişen <i>X. nematophila</i> (sol) ve <i>P. thracensis</i> (sağ) bakterileri.	30
Şekil 3.20. Sıvı besiyerinde üretilen <i>Photorhabdus</i> sp. bakterisi için uygulanan pigment testi.	31
Şekil 3.21. Wouts agar üzerinde üreyen bakterilerin görüntüsü.	31
Şekil 3.22. Wouts agar üzerinde üretilen nematodların görüntüsü.	32
Şekil 3.23. Musluk altında yıkanan <i>M. incognita</i> enfekteli kökler.	33
Şekil 3.24. Eleklerde yıkanan domates kökleri.....	33
Şekil 3.25. Baermann hunilerinde inkübe edilen domates kökleri.	34

Şekil 3.26. Denemelerde kullanılacak yumurta paketleri, enfekteli domates köklerinden toplanmıştır.....	35
Şekil 3.27. Domates köklerine <i>M. incognita</i> uygulaması (sol) ve deneme grupları (sağ).	36
Şekil 3.28. Entomopatojen nematodlu kontrol gruplarında uygulamaları yapılışı.	36
Şekil 3.29. Dikim yapılacak karışımın ilaçla karıştırılması.	37
Şekil 3.30. -20 °C’de dondurulmuş larvalar.	37
Şekil 3.31. Entomopatojen nematod uygulanacak gruplarda doz hesaplama işlemi.	38
Şekil 3.32. Enfekteli larvaları bitki dikimi öncesi kök bölgesine yerleştirilmesi.	38
Şekil 3.33. Kök uzunluğu ve kök ağırlığının ölçümleri.	39
Şekil 3.34. Kurutulmuş bitki kök ve gövdesi.	39
Şekil 3.35. Deneme sonunda köklerdeki gallerin sayımı.	40

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

ABA: Absisik Asit (Absciscic Acid)

AChE: Asetilkolinesteraz Enzimi (Acetylcholinesterase)

BPN: Bitki Paraziti Nematod

°C: Santigrat Derece

cc: Santimetreküp

CFF: Hüresiz Kültür Filtratı (Cell Free Filtrate)

cm: Santimetre

EC: Emülsiyon Konsantre

EPN: Entomopatojen Nematodlar

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

g: Gram

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

IJ: İnfektif Jüvenil (Infective Juvenile)

IPM: Entegre Zararlı Yönetimi (Integrated Pest Management)

IRAC: Insecticide Resistance Action Committee

ISR: Uyarılmış Sistemik Direnç (Induced Systemic Resistance)

J1, J2, J3, J4: Jüvenil dönemleri

JA: Jasmonik Asit (Jasmonic Acid)

L: Litre

µL: Mikrolitre

mL: Mililitre

mm: Milimetre

NBTA: Nutrient Bromothymol Blue Agar

SA: Salisilik Asit (Salicylic Acid)

SAR: Kazanılmış Sistemik Direnç (Systemic Acquired Resistance)

TÜİK: Türkiye İstatistik Kurumu

USDA: Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (United States Department of Agriculture)

VOCs: Uçucu Organik Bileşikler (Volatile Organic Compounds)

1. GİRİŞ

Tarım sektörü; artan dünya nüfusunun gıda güvencesinin sağlanması, milli gelir ve istihdama olan katkısı, sanayiye hammadde tedariki, ihracat potansiyeli ve ekolojik dengenin korunmasındaki rolüyle küresel ölçekte stratejik ve vazgeçilmez bir nitelik taşımaktadır. Ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarıyla toplumun tüm kesimlerini doğrudan etkileyen bu sektör, ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin temel taşıını oluşturmaktadır. Türkiye; sahip olduğu zengin biyoçeşitlilik, elverişli iklimsel özellikleri ve stratejik coğrafi konumu sayesinde küresel tarım ekonomisinde önemli bir rekabet avantajına sahiptir. Türkiye'nin yaklaşık 55 tarımsal ürünün üretiminde dünya sıralamasında ilk 10 içerisinde yer aldığı bildirilmektedir (FAO, 2022; TÜİK, 2023).

Sebze üretim deseni içerisinde Solanaceae (Patlıcangiller) familyasına ait olan domates (*Solanum lycopersicum* L.), dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen, yüksek ekonomik değere sahip ve insan beslenmesinde önemli bir yere sahip sebze türlerinden biridir. Toplam sebze üretiminin önemli bir bölümünü teşkil eden domates; üretim hacmi, tüketim yaygınlığı ve yarattığı ekonomik katma değer bakımından ilk sırada yer almaktadır (TÜİK, 2023). Türkiye, yıllık yaklaşık 12,75 milyon tonluk üretim miktarıyla dünya domates üretiminde dördüncü sırada yer almakta ve küresel arzın yaklaşık %7,2'sini karşılamaktadır (Güvenç, 2019). Yüksek verim potansiyeli, geniş genetik çeşitliliği ve farklı agro-ekolojik koşullara uyum yeteneği sayesinde domates, hem gıda güvenliği hem de tarımsal sürdürülebilirlik açısından stratejik bir ürün konumunda olup küresel tarım ticaretindeki önemini korumaktadır.

Anavatanı Orta ve Güney Amerika olan ve ismi yerel dildeki “xitomate” sözcüğünden türetilen domatesin, Osmanlı döneminde Halep üzerinden Anadolu'ya girdiği bilinmektedir (A. F. Smith, 2001). Günümüzde insan beslenmesinin ve tarımsal ekonominin vazgeçilmez unsurlarından biri haline gelen domates; taze tüketimin yanı sıra salça, ketçap, turşu, dondurulmuş ve kurutulmuş ürünler şeklinde gıda sanayisinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Türkiye’de tarımsal verimlilik ve girdi kullanımındaki iyileşmelere bağlı olarak domates üretimi 1960–1999 döneminde önemli bir artış göstermiştir (TÜİK, 2024). Özellikle örtü altı (sera) yetiştiriciliğinin yaygınlaşması, birim alandan elde edilen verimi artırmasının yanı sıra üretim sezonunun yıl geneline yayılmasını sağlayarak ürünü önemli bir konuma taşımıştır (Kaymak vd., 2011).

Besin değeri oldukça yüksek olan domates, düşük enerji içeriğine karşın vitamin, mineral ve biyoaktif bileşenler bakımından zengin bir sebzedir. Özellikle askorbik asit (C vitamini), provitamin A (karotenoidler), potasyum ve folat içeriğiyle beslenmede önemli bir

yer tutmakta; bu bileşenler bağışıklık sistemi fonksiyonları ve hücresel metabolizmanın düzenlenmesinde rol oynamaktadır (Ali vd., 2020). Domates aynı zamanda likopen başta olmak üzere çeşitli antioksidan bileşikler içerir. Düzenli likopen tüketiminin, oksidatif stresi azaltarak başta kardiyovasküler hastalıklar olmak üzere belirli kanser türlerine karşı koruyucu etkiler sergilediğine dair güçlü bilimsel bulgular mevcuttur (Rao ve Agarwal, 2000). Bu özellikleriyle domates, modern diyetlerin ve koruyucu sağlık yaklaşımlarının temel bileşenlerinden biri konumundadır.

Araştırmalara göre bitki patojenleri ve zararlıları dünya genelinde tarımsal ürünlerde %40'a varan verim kayıplarına neden olmakta (Savary vd., 2019), Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) verilerine göre bu durum küresel ekonomide yıllık yaklaşık 220 milyar dolarlık mali kayba yol açarak gıda güvenliğini doğrudan tehdit etmektedir (FAO, 2026). Domates, üretim periyodu boyunca yoğun biyotik stres faktörlerinin baskısı altındadır. Domates yetiştiriciliğinde ekonomik düzeyde verim kaybına yol açan bu faktörlerin başında fungal ve bakteriyel hastalıklar gelmektedir (Agrios, 2005). Benzer derecede öneme sahip olan zararlılar grubunda ise birçok farklı türde böcek, kırmızı örümcek ve bitki paraziti nematodlar en kritik etmenler arasında yer almaktadır (Kılıç, 2010; Moodley vd., 2019; Phani vd., 2021).

Nematoda şubesi içerisinde yer alan nematodlar; mikroskobik, segmentsiz ve silindirik morfolojiye sahip omurgasız canlılardır (Caccia vd., 2018). Türler ve gelişim dönemlerine bağlı olarak vücut uzunlukları 0.2 ile 10 mm arasında değişkenlik göstermektedir (Decraemer ve Hunt, 2006). Dolaşım ve solunum sistemlerinden yoksun olan nematodlarda solunum vücut yüzeyinden difüzyon yoluyla gerçekleşmektedir. Çoğu türde eşeyler ayrı olmakla birlikte, özellikle bitki paraziti formlarda dişinin beslenme döneminde şişkinleşerek armut veya küre formunu almasıyla karakterize edilen belirgin bir eşeysel dimorfizm gözlenmektedir.

Biyolojileri bakımından nematodlar; bitki paraziti, entomopatojen ve serbest yaşayan (bakterivor/fungivor) formlar olmak üzere üç temel kategoride değerlendirilmektedir. Bu gruplar içerisinde tarımsal ekosistemlere doğrudan etki eden bitki paraziti nematodlar (BPN), çoğunlukla bitkinin rizosfer bölgesinde yaşayan, stylet adı verilen özelleşmiş ağız yapılarıyla bitki hücrelerinden beslenen ve beslenme faaliyetleri sonucunda bitkilerin çeşitli organlarında zarara yol açarak bitki gelişimini doğrudan zayıflatan organizmalardır. Bunun yanı sıra, toprakta bulunan *Fusarium* veya *Pythium* gibi bitki patojenleri ile hastalık kompleksleri oluşturarak, ikincil enfeksiyonlar için giriş kapısı teşkil eder ve bitki sağlığını olumsuz etkiler (G. Li vd., 2023). Bitki paraziti nematodlar küresel ölçekte yıllık 150 milyar ABD Doları'ndan fazla ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Phani vd., 2021). Özellikle tropikal bölgelerde

ürün kayıpları, gelişmiş ülkelerdeki oranlardan çok daha yüksektir (Caccia vd., 2018). Patates, soya ve pamuk gibi önemli bazı ürünlerde tarım alanlarının yarısından fazlasının bitki paraziti nematodlarla bulaşık olduğu bildirilmiştir (Bridge ve Starr, 2007). Bu bilgiler, BPN'lerle mücadelenin küresel gıda güvenliği açısından önemini ortaya koymaktadır.

Bitki paraziti nematodların yaşam döngüsü genel olarak; yumurta evresi, dört juvenil evresi ve ergin dönemden meydana gelmektedir. Birçok türde ilk juvenil (J1) dönem yumurta içerisinde tamamlanmakta ve yumurtadan çıkan ikinci dönem juveniller (J2) toprakta serbestçe hareket edebilen ve enfeksiyonu başlatan temel evreyi temsil etmektedir. Topraktaki kimyasal sinyalleri takip ederek konukçu bitkileri bulan BPN'ler, beslenme stratejilerine göre de farklılık gösterirler. Bitkide beslenme şekline göre BPN'ler; bitki dokusuna dışarıdan (ektoparazit), kısmen içeriden (yarı-endoparazit) veya tamamen kök dokusuna yerleşerek (endoparazit) beslenen formlar olarak sınıflandırılmaktadır (Decraemer ve Hunt, 2006).

Bitki paraziti nematodlar içerisinde ekonomik açıdan en yıkıcı ve dünya genelinde en yaygın grubu kök-ur nematodları oluşturmaktadır. Rhabditida takımı içerisinde yer alan *Meloidogyne* türleri, 3000'den fazla bitki türünü enfekte edebilme kapasitesine sahiptir. Yüzden fazla tanımlanmış tür içeren bu cins içerisinde özellikle *Meloidogyne incognita*, *M. javanica*, *M. arenaria* ve *M. hapla*, tarımsal alanlardaki nematod kaynaklı zararların en az %90'ından sorumlu olan polifag türlerdir (Karssen ve Moens, 2006). Bu türler, özellikle sulamanın yapıldığı sıcak bölgelerde, sebze ve meyve üretim alanlarında şiddetli zararlara yol açmaktadır. Son yıllarda dayanıklı çeşitleri dahi enfekte edebilen *M. enterolobii*'nin yayılımını artırması küresel bir tehdit oluştururken, yalancı kök-ur nematodu *Nacobbus aberrans* gibi türler de özellikle Amerika kıtasında ciddi kayıplara neden olmaktadır. Bununla birlikte, turuncgillerde *Tylenchulus semipenetrans*, çeltikte *Aphelenchoides besseyi*, ormanlık alanlarda *Bursaphelenchus xylophilus* ve patatesten karantina etmeni olarak önem taşıyan *Globodera* türleri de önemli ekonomik kayıplara yol açan başlıca BPN'ler arasında yer almaktadır (Jones vd., 2013). Bu genel çerçeve içerisinde, geniş yayılımı ve yüksek konukçu adaptasyonu nedeniyle *M. incognita* ayrı bir öneme sahip olup, bu çalışmanın temel materyalini oluşturmaktadır.

Kök-ur nematodlarının morfolojisinde eşeysel dimorfizm görülmektedir. Gelişimini tamamlayan ergin dişiler armut veya küre şeklini alarak hayatları boyunca kök içinde sabit (sedanter) kalırken, erkekler ipliksi (vermiform) bir yapı kazanarak kökü terk ederler (Kusakabe vd., 2022). Üreme aşamasına gelen bir dişi, yaşam süresi boyunca yüzlerce ila binlerce yumurta üretebilme kapasitesine sahiptir (Lewis vd., 2001). Dişiler yumurtalarını, olumsuz çevre

koşullarına karşı koruma sağlayan jelatinimsi bir matriksin (yumurta paketi) içine bırakırlar. Bu paketler çoğunlukla kök yüzeyine tutunmuş halde veya kök dokusunun hemen içinde yer alır ve yumurtadan çıkan yeni J2'lerin enfeksiyonuyla döngü yeniden başlar (Decraemer ve Hunt, 2006).

Kök-ur nematodlarının yaşam döngüsü son derece özelleşmiş bir parazitlik mekanizmasına dayanır. Toprakta bitki kök salgılarının oluşturduğu kimyasal kokuları takip ederek konukçu bitkiyi bulan J2'ler, genellikle kök ucundan (kaliptra) giriş yaparlar. Kök korteksi boyunca vasküler dokuya doğru göç eden J2'ler, burada bitki hücrelerini dev hücre adı verilen hipertrofik beslenme bölgelerine dönüştürürler (Goode ve Mitchum, 2022). Beslenme süreciyle birlikte J2'ler gelişimlerine devam eder ve hayatlarının geri kalanını hareketsiz olarak geçirirler (Kusakabe vd., 2022). Bu süreçte bitki köklerinde meydana gelen aşırı hücre büyümesi (hipertrofi), ur veya gal adı verilen karakteristik şişkinliklerin oluşmasına yol açar. Köklerdeki bu urlar, bitkinin su ve mineral madde alımını kısıtlayarak toprak üstü aksamda kloroz, gelişme geriliği, bodurlaşma ve ileri düzey enfeksiyonlarda kuruma gibi belirtilere neden olmaktadır (Jones vd., 2013; Karssen ve Moens, 2006). Domates, patlıcan, hıyar gibi sebzelerin yanı sıra meyve ağaçlarını da kapsayan geniş bir konukçu yelpazesine sahip olan bu zararlılar, kompleks bir agroekosistem içerisinde varlıklarını sürdürmektedir (Jones vd., 2013; Trudgill ve Blok, 2001).

Kök-ur nematodlarına karşı uygulanan kültürel ve fiziksel mücadele stratejileri, dayanıklı çeşit kullanımı, toprak solarizasyonu, ekim nöbeti (münavebe) ve organik toprak düzenleyicilerinin kullanımını kapsamaktadır (Sikora ve Fernández, 2005; Viaene vd., 2006). Dayanıklı genotipler, nematodların kök dokularındaki üremesini sınırlandırabilmekte, solarizasyon ise yüksek toprak sıcaklıkları oluşturarak başlangıç popülasyon yoğunluğunu düşürebilmektedir (Cook ve Starr, 2006). Ayrıca organik materyal ilavesi, toprak biyolojik aktivitesini artırarak bitki gelişimini dolaylı olarak desteklemektedir (Chitwood, 2003). Ancak bu yöntemlerin uygulanabilirliği çeşitli kısıtlamalara tabidir. Örneğin, solarizasyonun etkinliği için yaz aylarında uzun süreli yüksek sıcaklık ve yoğun radyasyon gereksinimi, üretim alanlarının haftalarca boş kalmasına ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Çeşitli organik gübreler toprak yapısını iyileştirse de derin toprak katmanlarındaki nematod popülasyonlarına ulaşmada ve tutarlı bir nematodidal etki göstermede yetersiz kalmaktadır. Özellikle tropikal ve subtropikal bölgelerdeki uygun iklim koşulları münavebenin etkinliğini azaltırken, *M. enterolobii* gibi direnç kırıcı agresif türlerin varlığı, bu yöntemlerin tek başına sürdürülebilir bir kontrol sağlamadığını göstermektedir (Forghani ve Hajihassani, 2020). Kök-ur nematodlarının

mücadelesinde en yaygın tercih edilen yöntem; metil bromür, oksamil ve fosthiazate gibi sentetik fumigant veya fumigant olmayan kimyasal nematosisitlerin kullanımı olmuştur (Dai vd., 2022). Bu kimyasallar, nematod popülasyonlarını belli oranda baskılayarak enfeksiyonu geciktirebilse de yüksek uygulama maliyetleri, insan sağlığına yönelik riskler ve yeraltı sularının kirlenmesi gibi ciddi dezavantajlara sahiptir (Aatif vd., 2012; Dai vd., 2022). Ayrıca, bu bileşiklerin hedef dışı organizmalar ve toprak mikroflorası üzerindeki toksik etkileri ekosistem dengesini bozabilmektedir. Sürekli ve kontrolsüz kullanım, zararlılarda direnç gelişimini tetikleyerek birçok etkili kimyasalın yasaklanmasına veya kullanımının kısıtlanmasına yol açmıştır (Chitwood, 2003; Desaeger vd., 2020).

Kimyasal mücadeleye en güçlü alternatiflerden biri olan biyolojik mücadele, ilk kez 1919 yılında (H. S. Smith, 1919) tarafından zararlı popülasyonlarını baskı altına alma ve düzenleme yöntemi olarak tanımlanmıştır. Daha sonra (DeBach, 1964) tarafından, tarımsal zararlılarla mücadelede canlı organizmaların insan müdahalesiyle bilinçli bir biçimde kullanılarak zararlı yoğunluğunun ekonomik zarar eşiğinin altında tutulması şeklinde ifade edilmiştir. Günümüzde ise biyolojik mücadele; ekosistemde mevcut olan biyotik etmenlerin, insan müdahalesiyle hastalık, zararlı ve yabancı otlar üzerindeki etkinliklerinin artırılarak kullanılması olarak tanımlanmaktadır (Kılınçer vd., 2010). Biyolojik mücadele stratejileri uygulama yöntemine göre iki temel kategoride değerlendirilmektedir: Doğal biyolojik mücadele, ekosistem içerisindeki doğal düşmanların herhangi bir dış müdahale olmaksızın zararlı popülasyonlarını dengelemesi esasına dayanırken; uygulamalı biyolojik mücadele, bu doğal düşmanların insan eliyle laboratuvar koşullarında çoğaltılarak veya ortama salınarak zararlılar üzerinde baskı oluşturmalarını kapsamaktadır (DeBach ve Rosen, 1991; Öncüler, 1991). Bu stratejiler kapsamında zararlı popülasyonlarının baskılanmasında predatörler, parazitoitler, mikrobiyal patojenler ve entomopatojenler (nematodlar, funguslar ve virüsler) gibi çok çeşitli biyolojik ajanlardan yararlanılmaktadır.

Biyolojik mücadelenin en temel avantajı, yoğun kimyasal pestisit kullanımının yol açtığı kalıntı sorunları, direnç gelişimi, çevre kirliliği ve insan sağlığı üzerindeki kronik olumsuz etkilerinin düşük olmasıdır (van Lenteren vd., 2018). Hedef dışı organizmalar üzerindeki olumsuz etkilerinin düşük olması, doğal dengeyi koruması ve sürdürülebilir tarım sistemleriyle uyumlu bir mücadele yaklaşımı sunması nedeniyle biyolojik mücadele, günümüzde modern bitki koruma programlarının temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Eilenberg vd., 2001; van Lenteren vd., 2018). Ancak, biyolojik mücadelenin etkinliği genellikle kimyasal yöntemlere oranla daha yavaş gelişmekte ve başarı düzeyi çevresel

koşullardan doğrudan etkilenmektedir. Ek olarak, özellikle canlı organizmaların kitle üretimi, formülasyonu, depolanması ve sahaya aktarılması süreçleri; yüksek maliyet ve uzmanlık gerektiren teknik zorluklar barındırmaktadır (Grewal vd., 2002; Kaya ve Gaugler, 1993; Shapiro-Ilan vd., 2012). Bu olumsuz özelliklere rağmen biyolojik mücadele her geçen gün daha yaygın hale gelmektedir.

Tarımsal zararlılara karşı biyolojik mücadelede kullanılan önemli gruplardan biri, böceklerde obligat endoparazit olarak yaşayan ve konukçularını enfekte ederek ölümlerine neden olan entomopatojen nematodlar (EPN)'dır. Taksonomik olarak Nematoda şubesi, Rhabditida takımı içerisinde yer alan bu organizmaların en yaygın iki familyası *Steinernematidae* ve *Heterorhabditidae* familyalarıdır (Gaugler, 2002; Grewal vd., 2005). Entomopatojen nematodların yaşam döngüleri diğer nematodlarda olduğu gibi yumurta, dört juvenil evre ve ergin dönemden meydana gelmektedir. Yaşam döngüsü içerisinde konukçu dışında yaşayabilen tek evre olan infektif juvenil (IJ) aşaması, toprakta aktif olarak konukçu arayan ve olumsuz çevre koşullarına karşı en dayanıklı formu temsil etmektedir. Entomopatojen nematodların familyaları arasında üreme stratejileri ve morfolojik özellikler bakımından belirgin farklılıklar bulunmaktadır. *Steinernema* türleri amfimiktik (eşeyli) bir yapı sergileyerek üreme için böcek vücuduna hem erkek hem dişi bireyin girmesine ihtiyaç duyarken; *Heterorhabditis* türleri ilk nesilde hermafrodit bireyler oluşturmakta, sonraki nesillerde ise ayrı eşeyli bireyler gelişmektedir. Ayrıca konukçu arama stratejilerinde; *Heterorhabditis* IJ'leri genellikle toprakta aktif hareket eden avcı (cruiser) stratejisi izlerken, *Steinernema* türleri çoğunlukla pusuya yatarak bekleyen (ambusher) bir davranış sergilemektedir (Campbell ve Kaya, 2000; Elbrense vd., 2021; Lewis vd., 2006).

Entomopatojen nematodlar *Enterobacteriaceae* familyasına ait bakteriler ile simbiyotik ilişki içerisinde. *Steinernema* cinsi *Xenorhabdus*, *Heterorhabditis* cinsi ise *Photorhabdus* bakterilerini taşımaktadırlar. Bu bakteriler gram-negatif, obligat karakterde ve doğal yaşam döngülerini yalnızca nematod konukçuları ile birlikte sürdürebilmektedirler (Goodrich-Blair ve Clarke, 2007; Stock, 2019). EPN'lerin enfeksiyon süreci, IJ'lerin doğal açıklıklardan (ağız, anüs, stigma) konukçuya giriş yapmasıyla başlamaktadır (Devi, 2018; Dunn ve Malan, 2023). Hemolenfe ulaşan bireyler vücutlarında taşıdığı simbiyotik bakterileri konukçu içine bırakırlar. Enfeksiyon sürecinde, hemolenfte çoğalmaya başlayan bakteriler, salgıladıkları spesifik toksinler ve antimikrobiyal bileşikler aracılığıyla konukçu böceği hızla öldürmektedir. Aynı zamanda böcek kadavrasını diğer fırsatçı ve rekabetçi mikroorganizmalardan koruyarak, nematodlar için güvenli bir ortam tesis etmektedirler. Bu korunaklı kadavra içinde bir ila birkaç

nesil boyunca çoğalan EPN'ler, besin kaynaklarının tükenmesini takiben yeniden IJ formuna dönüşerek yeni konukçular enfekte etmek üzere toprağa dağılmaktadır (Lewis vd., 2001).

Entomopatojen nematodların kitlesel üretimi *in vivo* ve *in vitro* yöntemlerle gerçekleştirilmektedir (Ehlers, 2001; Friedman, 2018). *In vivo* üretimde genellikle *Galleria mellonella* son dönem larvaları kullanılırken; *in vitro* yöntemlerde katı ve sıvı besiyerleri kullanılmaktadır (Shapiro-Ilan vd., 2012; Ulu ve Susurluk, 2024). *In vivo* yöntemler daha çok küçük çaplı araştırmalara uygunken, ticari amaçla üretimde *in vitro* yöntemler tercih edilmektedir. EPN uygulamalarının uzmanlık gerektirmesi, arazi koşullarındaki sıcaklık, nem ve toprak yapısı gibi çevresel değişkenlerden etkilenmesi, nematodların hedef böcekler üzerindeki başarısını etkileyen faktörler olarak öne çıkmaktadır (Erdoğan vd., 2020; Erdoğan ve Ulu, 2024; Lacey ve Georgis, 2012). Daha önceleri yalnızca sulama suyu ile uygulanan EPN'lerin raf ömrünü ve arazideki etkinliğini artırmak amacıyla son yıllarda hidrojel, aljinat kapsül veya kil bazlı taşıyıcılar gibi çeşitli formülasyonlar geliştirilmiştir (Georgis, 2018; Grewal vd., 2002; Shapiro-Ilan vd., 2012). Formülasyonlara ek olarak uygulama şeklinde de yenilikler bulunmaktadır. Uygulama aşamasında EPN'ler, doğrudan kök bölgesine sulu süspansiyon veya enfekte edilmiş böcek kadvraları (kontrollü salım) şeklinde verilebildiği gibi, damla sulama, mikrojet ve robotik sistemler aracılığıyla da sisteme dahil edilebilmektedir (Sharma vd., 2011; Şahin vd., 2018; Ulu ve Erdoğan, 2023).

Entomopatojen nematodlar, laboratuvar koşullarında 11 takıma ve 75 familyaya ait 250'den fazla böcek türünü enfekte edebilme yeteneğiyle oldukça geniş bir konukçu aralığına sahiptir (Dede vd., 2023; Dey Roy ve Kumar Mukhopadhyay, 2025; Peters, 1996; Susurluk ve Ehlers, 2008; Tshikala vd., 2019). EPN'lerin etkili olduğu temel böcek takımları arasında Coleoptera, Lepidoptera, Diptera, Hemiptera, Hymenoptera, Orthoptera, Blattodea, Thysanoptera ve Isoptera yer almaktadır (Abate vd., 2017; Ramatsitsi vd., 2025). Biyolojik mücadelede ticari ve pratik açıdan öne çıkan kilit zararlı türleri arasında bağ maymuncuğu (*Otiorynchus sulcatus*), elma içkurdu (*Cydia pomonella*), mısır kök kurdu (*Diabrotica virgifera virgifera*), domates güvesi (*Tuta absoluta*), palmye kırmızı böceği (*Rhynchophorus ferrugineus*) ve çayır tırtılları (*Spodoptera frugiperda*) bulunmaktadır (Koppenhöfer vd., 2020; Ramakuwela vd., 2025). Nematodların doğal yaşam alanı toprak olduğu için EPN uygulamaları geleneksel olarak ağırlıklı olarak toprak altında veya kök bölgesinde yaşayan zararlı evrelerini hedef almaktadır (Belien, 2018; Blanco-Pérez vd., 2025). Bununla birlikte; koruyucu jeller, polimerler, yüzey aktif maddeler ve özel biyolojik formülasyon teknolojilerindeki son gelişmeler sayesinde EPN'ler günümüzde yaprak yüzeyi (foliar) ve yarı kapalı (kriptik)

habitatlarda bulunan toprak üstü zararlılara karşı da başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir (Campos-Herrera vd., 2023; Shapiro-Ilan vd., 2025).

Entomopatojen nematodlar ve simbiyotik bakterilerinin, böceklerin yanı sıra BPN'ler üzerinde de güçlü bir baskılayıcı etki gösterebildiği ve BPN'lerle mücadelede kullanılabileceği değerlendirilmektedir (El Aïmani vd., 2022). Bu antagonistik etki hem doğrudan nematisidal/nematostatik (felç edici) eylemler hem de bitkide uyarılan dolaylı mekanizmalar aracılığıyla gerçekleşmektedir. Örneğin *S. feltiae*, *S. carpocapsae*, *S. riobrave* ve *H. bacteriophora* gibi EPN türleri ile simbiyont bakterileri, kök-ur nematodları (*M. incognita*, *M. javanica*, *M. hapla*), yalancı kök-ur nematodu ve çeltikte beyaz uç nematodu gibi BPN türlerine karşı doğrudan öldürme, hareketini kısıtlama ve yumurta açılımını engelleme gibi doğrudan sonuçlar doğurmaktadır (Caccia vd., 2018; Pérez ve Lewis, 2002; Sayedain vd., 2021; Tülek vd., 2018). Bu doğrudan nematisidal etkinin büyük oranda bakteriler tarafından üretilen sekonder metabolitler aracılığı ile olduğu düşünülse de, EPN'lerin kendileri tarafından üretilen çeşitli metabolitlerin de etkili olduğu ile ilgili araştırmalar mevcuttur (Dai vd., 2022; Grewal vd., 1999; Hu vd., 1999; Kusakabe vd., 2022; J. Li vd., 2023).

Doğrudan etkilerin ötesinde, EPN ve bakteri uygulamalarının bitkide fizyolojik değişimler yaratarak dolaylı yoldan da etkili olduğu, bitkide uyarılmış sistemik direnci (ISR) tetiklediği, hücresel düzeyde PR-1 gen ekspresyonunu artırdığı ve peroksidaz ile katalaz gibi savunma enzimlerinin aktivitelerini yükselterek bitki bağışıklığını güçlendirdiği belirlenmiştir (Helms vd., 2019; Jagodič vd., 2019; G. Li vd., 2023; Manosalva vd., 2015; Priya vd., 2026). EPN'lerin kök bölgesindeki varlığı bitkide savunma sistemini erkenden aktive ederek kök-ur nematodlarının köklere girişini ve beslenme alanı oluşturmalarını sınırlandırmakta, enfeksiyon oranlarında %50'ye varan azalmalar sağlayabilmektedir (Manosalva vd., 2015). Ek olarak, EPN'lerin bitki kök bölgesine uygulanmasının BPN juvenillerinin domates köklerine penetrasyonunu istatistiksel olarak anlamlı düzeyde azalttığı, bunun sonucunda zararlının üreme kapasitesinin zayıfladığı ve biyolojik mücadele başarısının arttığı bildirilmektedir (Pérez ve Lewis, 2002). Sonuç olarak bu çok yönlü etkileşim, bir yandan BPN'lerin köklerdeki ur ve yumurta oluşumunu azaltırken diğer yandan bitkinin boyu, kök uzunluğu ve biyokütlesi gibi gelişim parametrelerini olumlu yönde destekleyebilmektedir (El Aïmani vd., 2022). Bu bulgular, EPN'lerin yalnızca böcek patojeni organizmalar olmadığını; rizosferde bitki savunmasını düzenleyen, bitkinin hormonal yanıtlarını aktive eden ve özellikle kök-ur nematodları başta olmak üzere toprak kökenli zararlıların baskılanmasına katkı sağlayan çok yönlü biyolojik mücadele etmenleri olduğunu göstermektedir.

Türkiye, sahip olduğu geniş tarımsal üretim kapasitesi ve yüksek biyoçeşitlilik potansiyeli ile biyolojik mücadele teknolojilerinde gelişmekte olan ülkeler arasında önemli bir konuma sahiptir (Kaymak vd., 2011). Bu bağlamda, EPN gibi doğal düşmanlara yönelik artan bilimsel ve sektörel ilgi, yerli izolatların belirlenmesi ve geliştirilmesi, kitle üretim yöntemlerinin optimize edilmesi ve ekosistem odaklı tarım uygulamaları aracılığıyla sentetik pestisit kullanımının azaltılmasını hedefleyen sürdürülebilir tarım politikalarının temel bir bileşeni haline gelmiştir. Türkiye’de çeşitli ekolojik bölgelerden izole edilen *Steinernema* ve *Heterorhabditis* türleri, hem toprak altı hem de toprak üstü tarımsal zararlılara karşı biyolojik kontrol potansiyeli taşımakta olup, yerli EPN izolatlarının kullanımı, ekolojik dengeyi korurken tarımsal verim ve kaliteyi artırmayı mümkün kılmaktadır. Ayrıca, bu yerli EPN izolatlarının simbiyotik bakterileri aracılığıyla kök-ur nematodları ve diğer böcek zararlılar üzerinde dolaylı baskı oluşturabilmesi, Türkiye’de entegre zararlı yönetimi (IPM) stratejilerinin etkinliğini güçlendirmektedir.

Bu tez çalışmasında, domates bitkisinin en önemli zararlılarından biri olan kök-ur nematodu *M. incognita* ile biyolojik mücadelede, iki farklı EPN türünün potansiyeli araştırılmıştır. Bu amaçla, kontrollü iklim odası koşullarında saksı denemeleri kurulmuş, bitki kök bölgesindeki EPN-BPN etkileşimleri ve bu etkileşimin domatesin vejetatif büyüme parametreleri üzerindeki yansımaları incelenmiştir. Denemeler kapsamında, EPN uygulamalarının *M. incognita*’nın gal sayısı, gal indeksi ve yumurta paketi sayısı gibi üreme ve zarar parametreleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulguların, toprak altı ekosistemindeki farklı trofik düzeylerdeki organizmaların doğrudan ve dolaylı etkileşimlerinin anlaşılmasına katkı sağlaması; ayrıca kök-ur nematodlarına karşı sürdürülebilir, çevre dostu alternatif mücadele stratejilerinin geliştirilmesine bilimsel bir temel oluşturması hedeflenmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Sürdürülebilir tarımsal üretimde, toprak altı zararlıları arasında yer alan BPN'ler, özellikle kök-ur nematodları, ürün verimi ve kalitesini ciddi oranda tehdit eden biyotik stres faktörlerinin başında gelmektedir. Bu zararlılarla mücadelede çevresel kaygılar ve kimyasal nematisitlerin kullanım kısıtlamaları, biyolojik mücadele elemanlarının ve özellikle rizosferde doğal olarak bulunan EPN'lerin kullanımını ön plana çıkarmıştır. EPN'lerin doğrudan böcek patojeni olma özelliklerinin yanı sıra, toprak altında BPN'ler ile girdikleri trofik etkileşimler, konukçu arama davranışları ve bitki köklerinde indükledikleri sistemik direnç mekanizmaları son yıllarda yoğun araştırmalara konu olmaktadır. Bu bölümde; EPN-BPN doğrudan ve dolaylı etkileşimlerinin biyolojik temelleri, EPN'lerin ve simbiyotik bakterilerinin nematisidal etkileri ile bu mekanizmaların kök-ur nematodlarının üreme ve gal oluşturma parametreleri üzerindeki baskılayıcı rolünü inceleyen literatür çalışmaları özetlenmiştir. Yürütülen bu tez çalışması; söz konusu etkileşimlerin sadece popülasyon düzeyinde değil, bitkisel yanıtlar bağlamında da değerlendirilmesi ve EPN'lerin BPN'lere karşı entegre mücadeledeki potansiyelinin ortaya konulması açısından literatürdeki mevcut çalışmalardan ayrılmakta ve özgün bir değer taşımaktadır.

İmren ve Yüksel çalışmalarında, sera koşullarında domates ve biber bitkilerinde Tripp 900 EC (900 g L⁻¹ fosthiazate) adlı nematisitin *Meloidogyne incognita*'ya karşı etkinliğini araştırmıştır. Çalışmada bitkiler kök-ur nematodu ile inokule edilmiş, ardından fosthiazate uygulanarak nematod popülasyonu ve köklerde oluşan gal sayısı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre fosthiazate uygulaması, domates ve biberde *M. incognita* popülasyonunu sırasıyla %91.2 ve %94.6 oranında azaltmıştır. Ayrıca köklerde oluşan gal sayısında domatesten %88.5, biberde ise %86.2 oranında azalma sağlanmıştır. Araştırmacılar, fosthiazate'in sera koşullarında domates ve biberde kök-ur nematodunun kontrolünde etkili bir nematisit olduğunu ve entegre mücadele programlarında kullanılabilecek önemli bir seçenek olduğunu bildirmiştir (İmren ve Yüksel, 2024).

Pacule ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada 31 farklı uçucu organik bileşiğin kök-ur nematodu *M. incognita* üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada özellikle (R)-karvon bileşiğinin, J2'ler üzerinde ticari nematisitlere benzer düzeyde öldürücü etki gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca (R)-karvonun yumurta açılımını engellediği ve domates bitkisinde enfeksiyon oranını azalttığı saptanmıştır. Etki mekanizmasının, hedef nematodda asetilkolinesteraz (AChE) enziminin inhibisyonuna dayandığı ortaya konmuştur. Bu bulgular,

bazı bitki kökenli uçucu bileşiklerin kök-ur nematodlarına karşı güçlü ve hedefe yönelik alternatif nematisit adayları olabileceğini göstermektedir (Pacule vd., 2022).

Martínez-Medina ve arkadaşları, *Trichoderma* uygulamasının domates bitkisinde *M. incognita* enfeksiyonuna karşı oluşturduğu savunma mekanizmalarını araştırmıştır. Çalışmada, bölünmüş kök (split-root) sistemi kullanılarak *Trichoderma* ile kolonize edilen bitkilerde hem lokal hem de sistemik direnç tepkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, *Trichoderma* uygulamasının nematodun köke girişini, ur oluşumunu ve üreme başarısını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Araştırmada ayrıca, bitkinin savunma yanıtının enfeksiyonun farklı evrelerinde değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Enfeksiyonun erken döneminde salisilik asit (SA) sinyal yolunun ön plana çıkarak nematodun köke girişini sınırlandırdığı, ilerleyen dönemlerde ise jasmonik asit (JA) sinyal yolunun aktive olduğu ve nematodun gelişimi ile üremesini baskıladığı ortaya konmuştur. Araştırmacılar, *Trichoderma*'nın bitkide SA ve JA'ya bağlı savunma mekanizmalarını priming yoluyla güçlendirdiğini ve bu sayede bitkinin patojen saldırısına daha hızlı ve etkili tepki verdiğini bildirmiştir. Çalışma, yararlı mikroorganizmaların bitkilerde hormon aracılı savunma ağlarını düzenleyerek indüklenmiş sistemik direncin oluşumunda önemli rol oynadığını ve sürdürülebilir bitki koruma stratejilerinde değerlendirilebileceğini göstermektedir (Martínez-Medina vd., 2017).

Labaude ve Griffin tarafından yayımlanan derleme çalışmada, EPN'lerin yalnızca böceklerle karşı etki göstermediğini, aynı zamanda bitki-toprak ekosistemiyle etkileşerek bitki bağışıklığını modüle edebildiği açıklanmıştır. Derlemede, EPN'lerin kök bölgesinde birikerek rizosferde kimyasal sinyaller aracılığıyla bitki ile etkileşime girebildiği ve bu etkileşimin ISR gibi savunma mekanizmalarını tetikleyebileceği vurgulanmaktadır. Ayrıca makale, EPN'lerin hayatta kalma, davranış ve bitki kökleriyle temas süreçlerini ekolojik bağlamda değerlendirerek, bu organizmaların böcekler, bitkiler ve toprak biyotası arasında çok yönlü etkileşimler kurduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, EPN'lerin biyolojik mücadeledeki başarısının yalnızca doğrudan öldürücü etkisiyle değil, aynı zamanda bitki bağışıklığını düzenleme kapasitesiyle de değerlendirilebileceği vurgulanmaktadır (Labaude ve Griffin, 2018).

Mbaluto ve arkadaşları, *M. incognita* enfeksiyonunun bitki savunma sistemini nasıl sistemik olarak etkilediğini moleküler ve kimyasal düzeyde incelemiştir. Bulgular, kök enfeksiyonunun yalnızca lokal değil, toprak üstü dokularında da savunma yanıtlarını modüle ettiğini göstermiştir. Enfekte bitkilerde SA, JA ve absisik asit (ABA) ile ilişkili sinyal yollarının aktive olduğu ve metabolomda geniş kapsamlı değişiklikler meydana geldiği belirlenmiştir.

Özellikle gal oluşumu evresinde üst toprak savunma tepkilerinin belirgin biçimde değiştiği ve bu sistemik yanıtların yaprak herbivorlarının performansını etkileyebildiği saptanmıştır. Çalışma, kök-ur nematodu enfeksiyonunun bitkide zamana bağımlı hormonal ve metabolik değişimlere yol açtığını, bunun da hem kök hem de sürgün düzeyinde farklı zararlılarla olan etkileşimleri şekillendirdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, bitki-patojen-herbivor etkileşimlerinin dinamik ve sistemik bir ağ içinde gerçekleştiğini göstermektedir (Mbaluto vd., 2021).

Stokwe ve Malan, elma ağaçlarının kök bölgesinde koloniler oluşturarak önemli ekonomik kayıplara neden olan elma pamuklu biti (*Eriosoma lanigerum*) üzerinde EPN'lerin biyolojik mücadeledeki potansiyelini ayrıntılı olarak incelemiştir. Araştırmada özellikle *S. carpocapsae* türünün kök bölgesine uygulanmasının, zararlının popülasyon yoğunluğunu ve koloni büyüklüğünü anlamlı düzeyde azalttığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, bu nematod türünün kök ortamında aktif olarak hareket ederek zararlıyla temas kurabildiğini ve uygun koşullarda enfeksiyon oluşturabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte araştırmacılar, elde edilen başarının tüm uygulamalarda aynı düzeyde gerçekleşmediğini ve biyolojik kontrol etkinliğinin çevresel koşullar ile konukçu özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebildiğini de vurgulamıştır. Bazı denemelerde nematodların zararlının vücuduna başarılı bir şekilde giriş yaptığı, ancak enfeksiyonun ilerleyen aşamalarında konukçunun fizyolojik ve immün savunma mekanizmalarının nematod gelişimini baskıladığı belirlenmiştir. Bu savunma tepkileri sonucunda nematodların simbiyotik bakterilerini etkili biçimde çoğaltamadığı, gelişimlerini tamamlayamadığı ve yeni II bireyler oluşturamadığı gözlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, EPN'lerin toprak altında yaşayan zararlılara karşı çevre dostu ve umut vadeden biyolojik mücadele etmenleri olduğunu ortaya koymakla birlikte, konukçunun sahip olduğu savunma mekanizmalarının bu etmenlerin enfeksiyon başarısını ve çoğalma kapasitesini önemli ölçüde sınırlandırabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, EPN uygulamalarının etkinliğini artırmak amacıyla uygun nematod türü seçiminin, çevresel koşulların optimize edilmesinin ve konukçu-patojen etkileşimlerinin daha ayrıntılı araştırılmasının biyolojik mücadele programlarının başarısı açısından büyük önem taşıdığı ifade edilmiştir (Stokwe ve Malan, 2016).

Kamali ve arkadaşları EPN'lerin (*S. carpocapsae*, *S. feltiae* ve *H.bacteriophora*) domates bitkisinde oluşturduğu sistemik savunma yanıtlarını ve bu yanıtların bitki paraziti kök-ur nematodu (*M. javanica*) ile domates yaprak galeri güvesi (*Tuta absoluta*) üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar, EPN uygulamalarının *M. javanica*'nın köke penetrasyonunu, gal oluşumunu ve yumurta üretimini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ayrıca EPN

uygulamasý bitkide savunma enzimlerini aktive etmiş, fenilpropanoid ve terpenoid metabolizması ile ilişkili savunma genlerinin ekspresyonunu artırmıştır. Bu sistemik savunma yanıtı sonucunda *T. absoluta* dişileri EPN uygulanmış bitkilere daha az yumurta bırakmış, bu bitkilerde gelişen bireylerde ise pupa gelişim süresi uzamış ve ölüm oranı artmıştır. Araştırma, entomopatojen nematodların yalnızca zararlıları doğrudan enfekte etmekle kalmayıp, bitkide sistemik savunma mekanizmalarını uyararak hem toprak altı hem de toprak üřtü zararlılar üzerinde dolaylı biyolojik mücadele etkisi oluşturabildiğini ortaya koymuştur (Kamali vd., 2022).

Kusakabe ve arkadaşları, *Photorabdus luminescens sonorensis* bakterisinden izole edilen sekonder metabolitlerin *M. incognita* ve *Tylenchulus semipenetrans* üzerindeki seçici toksisite potansiyelini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, metabolitlerin türüne göre nematisidal etki gösterdiğini; karışım halinde uygulamanın ise sinerjistik etki yarattığını ortaya koymuştur. Metabolitlerin hedef bitki paraziti nematodlara karşı yüksek derecede seçici olduğu ve faydalı nematodlar veya insan hücreleri üzerinde olumsuz etkilerinin gözlenmediği ifade edilmiştir. Araştırmacılar, söz konusu bileşiklerin tek başına veya kombinasyon hâlinde çevreye duyarlı, seçici ve yeni biyo-nematisitlerin geliştirilmesinde öncü potansiyele sahip olabileceğini vurgulamıştır (Kusakabe vd., 2022).

Kusakabe ve arkadaşları, *P. luminescens* kökenli iki sekonder metabolit kombinasyonunun *M. incognita* üzerindeki etkilerini bitki koşullarında değerlendirmiştir. Daha önce *in vitro* olarak sinerjik nematisidal etkisi gösterilen bu metabolit karışımı, farklı konsantrasyonlarda kök uygulamaları şeklinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tek uygulamanın dahi J2'lerin kök penetrasyonunu anlamlı oranda azalttığını göstermiştir. Bulgular, metabolit kombinasyonunun hedefe özđu nematod baskılayıcı etki gösterdiğini ve bitki fizyolojisini etkilemeden *M. incognita* enfeksiyon kapasitesini sınırlayabileceğini ortaya koymaktadır. Araştırma, *Photorhabdus* kaynaklı sekonder metabolitlerin çevre dostu ve doğal nematisitler olarak biyolojik kontrol stratejilerinde kullanılabileceğini desteklemektedir (Kusakabe vd., 2023).

Li ve arkadaşları, *H. bacteriophora* ve *S. carpocapsae*'nin, kök-ur nematodu *M. arenaria* ile yaprak biti *M. persicae* arasındaki etkileşimi tütün bitkisi üzerinde incelemiştir. Sonuçlar, EPN'lerin rizosfere uygulanmasının bitkide metabolik değişimleri tetiklediğini ve bunun hem kök hem de yaprakta beslenen herbivorların performansını etkilediğini göstermiştir. EPN varlığında, *M. arenaria*'nın yaprak bitleri üzerindeki olumsuz etkisi artmış; buna karşılık yaprak bitlerinin bitki paraziti nematod popölasyonunu artırıcı etkisi ortadan kalkmıştır. Bu

süreçte bitkilerin metabolit profilleri değişmiş ve bu değişimler herbivor davranış ve gelişimini baskılayan bir etki zinciri oluşturmuştur. Çalışma, EPN'lerin yalnızca doğrudan baskılayıcı değil, aynı zamanda bitki metabolizması üzerinden toprak ve yaprak herbivorları arasındaki etkileşimleri dolaylı olarak şekillendiren önemli biyotik faktörler olduğunu ortaya koymaktadır (Y. Li vd., 2020).

Sayedain ve arkadaşları, üç farklı EPN türünün simbiyotik bakterilerine ait hücresiz kültür filtratlarının (CFF) *M. javanica* üzerindeki nematisidal etkilerini incelemiştir. Farklı konsantrasyonlardaki filtratlar J2'ler ve yumurtalara uygulanmış; J2 ölüm oranı ve yumurta açılımı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tüm filtratların yumurta açılımını engellediğini ve J2'lerde yüksek ölüm oranları oluşturduğunu göstermiştir. *Xenorhabdus nematophila* ve *P. luminescens* 24 saat içinde daha toksik bulunurken, *X. bovienii* etkinliğini 48 saat sonra artırmıştır. Bu çalışma, bakteriyel metabolitlerin toksisite profillerinin zamana bağlı olarak değiştiğini ve EPN simbiyontlarının doğal ürünlerinin potansiyel biyolojik kontrol ajanları olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır (Sayedain vd., 2019).

Hu ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, EPN'lerin simbiyotik bakterisi olan *P. luminescens* tarafından sentezlenen sekonder metabolitlerin nematisidal özellikleri ve bu bileşiklerin farklı nematod türleri üzerindeki biyolojik etkileri ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, *P. luminescens* kültürlerinden elde edilen hücre dışı metabolitler izole edilerek saflaştırılmış, daha sonra bu bileşiklerin bitki paraziti ve serbest yaşayan nematodlar üzerindeki toksik ve davranışsal etkileri biyolojik aktivite testleri ile değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda, bakteri kaynaklı metabolitlerin nematod türüne ve gelişim dönemine bağlı olarak farklı düzeylerde etki gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle bazı sekonder metabolitlerin hedef nematodlarda hareket kabiliyetini önemli ölçüde azalttığı, geçici veya kalıcı felç oluşturduğu, beslenme davranışını baskıladığı ve yüksek konsantrasyonlarda doğrudan ölüm meydana getirdiği tespit edilmiştir. Bunun yanında, bazı metabolitlerin düşük konsantrasyonlarda nematodların gelişimini ve fizyolojik aktivitelerini baskılayarak etki gösterdiği, bu etkinin ise nematodların konukçu bulma ve enfeksiyon yeteneklerini olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca, *P. luminescens* tarafından sentezlenen bu biyolojik olarak aktif bileşiklerin seçici toksisite göstermesi nedeniyle biyolojik mücadelede önemli bir potansiyele sahip olduğu ve EPN-simbiyotik bakteri kompleksinin başarısının yalnızca nematodun enfeksiyon yeteneğinden değil, bakterilerin ürettiği sekonder metabolitlerin biyolojik aktivitesinden de büyük ölçüde kaynaklandığı vurgulanmıştır. Bu bulgular, simbiyotik bakterilerin salgıladığı

metabolitlerin bitki paraziti nematodların baskılanmasında rol oynayabilecek önemli biyokimyasal ajanlar olduğunu ortaya koymuştur (Hu vd., 1999).

Dai ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, EPN'ler, simbiyotik bakteriler ve askariositlerin *M. incognita*'nın dağılım etkisinin incelenmesini amaçlamıştır. Denemeler, agar plakaları üzerinde *M. incognita* juvenillerinin hareketlerinin izlenmesi ve dağılım davranışlarının kaydedilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, *M. incognita*'nın juvenillerinin kontrol gruplarına kıyasla anlamlı şekilde uzaklaştırıldığını göstermiştir. Kaçırıcı etkinin büyük oranda askariositler sayesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, kök-ur nematodlarının mücadelesi için askariositler gibi bileşiklerin kullanımına dayalı alternatif stratejilerin geliştirilmesine olanak sağlayabilecek önemli bulgular sunmaktadır (Dai vd., 2022).

Aatif ve arkadaşları, laboratuvar koşullarında *Xenorhabdus* ve *Photorhabdus* türleri ile bu bakterilerin ürettiği toksinlerin, *M. incognita* ikinci dönem juvenilleri (J2) üzerindeki nematisidal etkilerini incelemiştir. Çalışmada, EPN'lerden izole edilen bakteriyel hücre süspansiyonları ve hücresiz kültür filtratları farklı konsantrasyonlarda *M. incognita* J2'lerine uygulanmış ve 48 saatlik inkübasyon sonunda nematodların hareket kabiliyeti değerlendirilmiştir. Sonuçlar, hem *Xenorhabdus* hem de *Photorhabdus* kaynaklı hücre süspansiyonları ve toksinlerin, konsantrasyona bağlı olarak *M. incognita* J2'lerinde güçlü bir immobilizasyon etkisi oluşturduğunu göstermiştir. Özellikle yüksek konsantrasyonlarda hareketsiz nematodlar gözlenmiş ve etkinin çoğunlukla geri dönüşümsüz olduğu saptanmıştır. Düşük konsantrasyonlarda ise felç etkisi geçici olup sınırlı hareket kabiliyeti belirli süre sonra kısmen geri kazanılmıştır. Hücresel süspansiyonlar ile filtratlar arasındaki benzer etki düzeyi, nematodlar üzerindeki baskının esas olarak bakteriler tarafından salgılanan toksinler ve sekonder metabolitlerden kaynaklandığını düşündürmektedir. Çalışma ile EPN-bakteri kompleksinin BPN'lere karşı dolaylı fakat etkili bir antagonistik potansiyele sahip olduğu ortaya konmuş ve *Xenorhabdus* ile *Photorhabdus* kaynaklı toksinlerin, kimyasal nematisitlere alternatif çevre dostu biyolojik kontrol ajanları olarak potansiyel taşıdığı belirtilmiştir (Aatif vd., 2012).

Li ve arkadaşları, EPN'ler ve simbiyotik bakterilerinin, *M. incognita* J2'lerinin domates köklerine yönelim davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada *Steinernema* ve *Heterorhabditis* türlerine ait IJ'ler ile bu nematodların simbiyotik bakterilerinden elde edilen metabolitlerin, nematodların köke yönelim kapasitesini nasıl etkilediği değerlendirilmiştir. Sonuçlar, EPN'lerin varlığında *M. incognita*'nın köklere yöneliminin azaldığını, özellikle

bakteriyel süpernatantlara maruziyetin bu etkiyi belirgin biçimde artırdığını göstermiştir. Bulgular, bakteriyel metabolitlerin yalnızca nematod ölüm oranlarını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda kimyasal sinyaller yoluyla konukçu arama ve kök penetrasyonu için gerekli davranışsal süreçleri bozduğunu ortaya koymuştur. EPN–bakteri kompleksinin biyolojik kontrol etkinliğinin sadece öldürücü etkiye dayanmadığını, aynı zamanda nematodların enfeksiyon öncesi davranışlarını değiştirerek çok boyutlu bir baskılama mekanizması oluşturduğu ifade edilmiştir (J. Li vd., 2023).

Pérez ve Lewis, *Steinernema* ve *Heterorhabditis* türlerinin *M. incognita* ve *M. hapla* üzerindeki baskılayıcı potansiyelini sera ve iklim odası koşullarında değerlendirmiştir. Büyüme odasında fıstık fidelerine *M. hapla* yumurtası ile inokülasyon yapılmış ve 25 IJ/cm² dozunda *S. feltiae*, *S. riobrave* veya *H. bacteriophora* uygulanmıştır. Sonuçlar, *S. feltiae* ve *S. riobrave* uygulamalarının kök içi nematod yoğunluğunu ve yumurta geri kazanımını anlamlı derecede azalttığını; *H. bacteriophora*'nın etkisinin ise daha sınırlı kaldığını göstermiştir (Pérez ve Lewis, 2004).

Fallon ve arkadaşları, *S. feltiae* ve *H. indica* türlerinin, domates ve soya bitkilerinde kök-ur nematodu *M. javanica* üzerindeki baskılayıcı etkilerini laboratuvar ve sera koşullarında değerlendirmiştir. Denemelerde EPN'ler, *M. javanica* inokülasyonundan önce, eş zamanlı veya sonra uygulanarak kök penetrasyonu, dişi nematod sayısı, yumurta paketi ve bitki biyokütlesi üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Sonuçlar, EPN uygulamasının kısa vadede kök penetrasyonunu sınırlı şekilde azalttığını; ancak uzun dönemde dişi nematod sayısı ve yumurta paketi üretimi üzerinde kalıcı bir etki oluşturmadığını göstermiştir. Ayrıca EPN'ler, enfekte olmayan bitkilerde biyokütleyi artırırken, enfekte bitkilerde bu etki gözlenmemiştir. Çalışma, EPN'lerin *M. javanica* üzerinde tek başına sınırlı ve kısa süreli bir baskı oluşturduğunu ortaya koymakta; doz, uygulama zamanlaması ve çevresel koşulların etkinlik açısından kritik olduğunu vurgulayarak, biyolojik kontrol stratejilerinde kombine yaklaşımların gerekliliğini işaret etmektedir (Fallon vd., 2002).

Grewal ve arkadaşları, EPN'lerin *M. incognita* üzerindeki etkilerin ortaya koymayı amaçlamıştır. Domates bitkileri üzerinde yürütülen çalışmada canlı EPN'ler, ısıyla öldürülmüş EPN'ler, enfekte kadavralar ve *Xenorhabdus* spp. hücresiz filtratları ayrı ayrı uygulanmış ve *M. incognita*'nın kök penetrasyonu, hayatta kalması ve davranışları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, canlı EPN uygulamalarının kök penetrasyonu üzerinde sınırlı etkisi olduğunu; buna karşın enfekte kadavralar ve özellikle bakteriyel filtratların *M. incognita*'yı güçlü biçimde baskıladığını göstermiştir. Araştırmada baskılayıcı etkinin temel bileşenlerinden biri olarak

amonyum tespit edilmiş ve bakteriyel metabolitlerin doğrudan nematodlar üzerinde itici ve toksik etkiler oluşturduğu vurgulanmıştır. Bu bulgular, EPN'lerin klasik "biyolojik düşman" tanımının ötesinde, kimyasal ekoloji temelli bir etkileşim aracılığıyla kök-ur nematodlarını kontrol edebildiğini göstermekte; kadavra ve filtrat uygulamalarının canlı EPN'ye kıyasla neden daha etkili olduğunu konusunda açıklayıcı bilgiler vermektedir (Grewal vd., 1999).

Caccia ve arkadaşları, sera koşullarında EPN–bakteri kompleksinin, bitki paraziti nematodlar *M. hapla* ve *Nacobbus aberrans* üzerindeki biyolojik kontrol potansiyelini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada Arjantin kökenli üç farklı EPN izolatı, bunların simbiyotik bakterileri ve bakterilere ait hücresiz kültür süpernatantları kullanılmıştır. Domates bitkilerine canlı EPN IJ'leri, bakteriyel hücre süspansiyonları ve hücresiz süpernatantlar uygulanmış, bitkiler 60 gün yetiştirilmiş ve gal sayısı, yumurta paketi sayısı, bitki biyokütlesi ve nematod üreme faktörü gibi parametreler ölçülmüştür. Sonuçlar, canlı EPN uygulamalarının *M. hapla* ve *N. aberrans* popülasyonları üzerinde sınırlı veya istatistiksel olarak anlamlı olmayan etkiler gösterdiğini, buna karşın simbiyotik bakterilere ait hücresiz süpernatantların özellikle *M. hapla* üzerinde güçlü baskılayıcı etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. *Xenorhabdus* süpernatantları, gal sayısı, yumurta kütlesi ve üreme faktörünü azaltmış, *N. aberrans* üzerindeki etki daha sınırlı bulunmuştur. Bu durumun nematod türüne bağlı duyarlılık farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bakteriyel süpernatantların bitki biyokütlesine olumsuz etkisinin olmaması nedeniyle denemelerde tespit edilen baskılayıcı etkinin fitotoksik etkiden değil, bakteriyel metabolit kaynaklı olduğu ifade edilmiştir. Araştırmacılar, bu metabolitlerin doğrudan etkili olması sayesinde yüksek baskılama oranlarının sağlandığını vurgulamıştır. Elde edilen bulgular, EPN'lerin dolaylı olarak bakteriyel metabolitler aracılığıyla nematod popülasyonlarını baskılayabileceğini ortaya koymaktadır (Caccia vd., 2018).

El Aïmani ve arkadaşları, Fas'ın farklı bölgelerinden izole edilen yerel EPN türlerinin kök-ur nematodları üzerindeki antagonistik etkilerini laboratuvar ve sera koşullarında değerlendirmiştir. Araştırmada *Steinernema* ve *Heterorhabditis* izolatları ile bunların simbiyotik bakterilerine ait hücresiz süpernatantlar kullanılmış, nematodların hareketliliği, ölüm oranları, kök penetrasyonu ve gal oluşumu ölçülmüştür. Bulgular, özellikle *Heterorhabditis* izolatlarının J2 hareketini yüksek oranda azalttığını, hücresiz süpernatantların ise canlı IJ uygulamalarına kıyasla eşit veya daha güçlü nematosisidal etki gösterdiğini ortaya koymuştur. Sera denemelerinde gal sayısı, yumurta paketi ve üreme faktörü anlamlı şekilde azalmış, bitki gelişimi olumsuz etkilenmemiştir. Araştırmacılar, antagonistik etkinin yalnızca

EPN'lerden değil, simbiyotik bakteri tarafından üretilen metabolitlerden kaynaklandığını vurgulamıştır (El Aïmani vd., 2022).

Sayedain ve arkadaşları, sera koşullarında hıyar üretiminde *M. javanica*'nın baskılanmasında EPN uygulamasının etkisini değerlendirmiştir. Çalışmada *S. carpocapsae*, *S. feltiae* ve *H. bacteriophora* türleri, kök-ur nematodu inokülasyonundan önce, eş zamanlı veya sonrasında farklı zamanlarda uygulanmış; gal sayısı, yumurta sayısı ve yumurta paketi gibi parametreleri ölçülmüştür. Sonuçlar, özellikle *S. carpocapsae* ve *H. bacteriophora*'nın tüm enfeksiyon parametrelerini anlamlı biçimde azalttığını ve en yüksek etkinliğin nematod inokülasyonundan bir hafta sonra yapılan uygulamalarda elde edildiğini göstermiştir. 25 IJ/cm² dozunda dahi baskılama sağlanırken, 125 IJ/cm² dozunda etki daha belirgin olmuştur. EPN ile enfekte böcek kadvralarının kullanımı ise daha güçlü bir azalma sağlamış ve bitki kök ile gövde ağırlıkları kontrol grubuna göre artmıştır. Bu bulgular, EPN türü, doz ve uygulama zamanlamasının kök-ur nematodlarının baskılanmasında kritik olduğunu ve EPN uygulamalarının hem nematod popülasyonunu azaltabildiğini hem de bitki gelişimini olumlu etkileyebildiğini ortaya koymaktadır (Sayedain vd., 2021).

Lewis ve arkadaşları, *S. feltiae* – *X. bovienii* kompleksinin *M. incognita* üzerindeki etkilerini Rutgers cinsi domates köklerinde sistematik olarak incelemiştir. Laboratuvar ve sera koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, gal oluşumu, yumurta üretimi ve yumurta açılım oranları gibi nematod biyolojik parametreleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, EPN–bakteri kompleksinin *M. incognita* gal sayısını, bitki başına yumurta üretimini ve yumurta açılım oranını anlamlı şekilde azalttığını göstermiştir. Ancak kök penetrasyon hızı ve dişi başına yumurta sayısı üzerinde belirgin bir etki gözlenmemiştir. Bu durum, EPN uygulamalarının kök-ur nematodunun doğrudan enfeksiyonunu sınırlamaktan çok, popülasyon dinamiklerini ve üreme potansiyelini baskıladığını düşündürmektedir. Bulgular, EPN'lerin kontrollü koşullarda *M. incognita* baskılamasında potansiyel etkilerini ortaya koymuş ve EPN–bakteri komplekslerinin bitki paraziti nematod popülasyonlarını dolaylı yollarla kontrol edebileceğini göstermektedir (Lewis vd., 2001).

Pérez ve Lewis, *S. feltiae*, *S. riobrave* ve *H. bacteriophora* türlerinin sera koşullarında *M. incognita* üzerindeki baskılayıcı etkilerini değerlendirmiştir. Domates fideleri, *M. incognita* yumurtası ile inoküle edilmiş ve sonrasında 25 IJ/cm² dozunda EPN türleri uygulanmıştır. Sonuçlar, *H. bacteriophora* hariç diğer EPN uygulamalarında köklerde daha az J2 ve düşük yumurta üretimi olduğunu göstermiştir. Sera denemelerinde, enfeksiyon öncesi ve sonrası farklı zamanlarda ve farklı dozlarda yapılan uygulamalarda, *S. feltiae* ve *S. riobrave* nematod

baskılamasında etkili bulunurken, *H. bacteriophora* sınırlı etki göstermiştir. Ayrıca EPN dozunun artırılması *S. feltiae* ve *H. bacteriophora* uygulamalarında nematod baskılamasını artırmıştır. Bu çalışma, EPN türü, uygulama dozu ve zamanlamasının kök-ur nematod baskılanmasında kritik rol oynadığını ve bazı EPN türlerinin sera koşullarında *M. incognita* popülasyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğini ortaya koymaktadır (P rez ve Lewis, 2002).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Domates bitkisi

Bu çalışmada, kök-ur nematodlarına duyarlılığı bilinen, Arzuman markasına ait Falcon çeşidi domates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) kullanılmıştır. Tohumlar, bitki materyalinin homojenliği ve güvenilirliği sağlanmak amacıyla aynı firmadan temin edilmiştir (Aydınlı ve Civelek, 2018) (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Denemelerde kullanılan domates tohumu.

3.1.2. Kök-ur nematodu

Bitki paraziti nematodlar arasında geniş konukçu yelpazesi ve yüksek ekonomik zarar potansiyeli nedeniyle en önemli grubu kök-ur nematodları oluşturmaktadır. Bu grup içerisinde ise en yaygın ve ekonomik açıdan kritik tür olarak *Meloidogyne incognita* (Kofoid ve White, 1919) Chitwood, 1949 (Rhabditida: Meloidogynidae) ön plana çıkmaktadır (Jones vd., 2013). Bu nedenle tez çalışmasında zararlı etmen olarak, *M. incognita* seçilmiştir. Denemelerde, daha önce Bilecik İlinden toplanan domates köklerinden elde edilen uzun süredir laboratuvar koşullarında çoğaltılmaya devam eden kök-ur nematodu popülasyonu kullanılmıştır (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Domates bitkisinin köklerindeki urlaşma (A) ve kök-ur nematodu yumurta paketi görüntüsü (B).

3.1.3. Petek güvesi

Laboratuvar ortamında yapılan *in vivo* EPN üretimlerinde, çoğunlukla *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). Ayrıca, yapay diyetlerle laboratuvar ortamında kolaylıkla yetiştirilebilmesi, yüksek üreme potansiyeli ve EPN'lere karşı duyarlılığı, *G. mellonella* larvalarını *in vivo* üretimde en yaygın konukçu olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Kaya ve Stock, 1997; Shapiro-Ilan vd., 2002). Bu çalışmada da EPN'lerin *in vivo* üretiminde petek güvesi larvaları kullanılmıştır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Son dönem *G. mellonella* larvaları.

3.1.4. Entomopatojen nematodlar (EPN)

Araştırmada kullanılan birinci EPN, *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 geliştirilmiştir. 2018 yılında Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından patentlenmiş olan (Patent No: TR 2013 06141 B) HBH hibrit ırkı, Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinden izole edilen çeşitli *Heterorhabditis bacteriophora* popülasyonlarının hibritlenmesi ile elde edilmiştir (Susurluk vd., 2013).

HBH hibrit ırkı, yüksek çoğalma kapasitesi, değişken sıcaklık koşullarına tolerans ve hedef zararlılara karşı güçlü etkisi ile ön plana çıkmaktadır. Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan bir EPN türüne ait olması ve Türkiye ekolojik koşullarına adapte edilmiş yerel izolatlardan geliştirilmiş olması, HBH hibrit ırkın hem araştırma hem de ticari biyolojik mücadele uygulamalarında kullanım potansiyelini artırmaktadır. Bu nedenle söz konusu hibrit ırk, çalışmada uygulanabilir ve etkin bir biyolojik kontrol ajanı olarak tercih edilmiştir (Ulu ve Susurluk, 2021) (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. +4 °C de muhafaza edilen *Heterorhabditis bacteriophora* HBH kültürleri.

İkinci EPN türü olarak *Steinernema carpocapsae* (Weiser, 1955) Wouts, Mráček, Gerdin ve Bedding, 1982 (Rhabditida: Steinernematidae) kullanılmıştır. Bu tür için, e-Nema GmbH (Schwentinental, Almanya) firmasına ait olan ve ülkemizde Ekobioset adı altında Bioglobal A.Ş. tarafından satılan ticari ürün temin edilmiştir. *Steinernema carpocapsae*, farklı simbiyotik bakteri türüne sahip olması, konukçu arama yeteneğinin farklılığı ve laboratuvar ortamında kolay üretilmesi gibi nedenlerle çalışmada tercih edilmiştir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Buzdolabında muhafaza edilen *S. carpocapsae* kültürleri.

3.1.5. Nematosisit

Denemelerde ilaçlı kontrol grubu için nematosisit olarak, ülkemizde domatestte kök-ur nematodlarına karşı ruhsatlı olan fosthiazate aktif maddesi kullanılmıştır. Bu amaçla, Agroplanet firmasına ait ve 900 g/L fosthiazate içeren Toztate 900 EC ticari preparatı tercih edilmiştir (Şekil 3.6.).



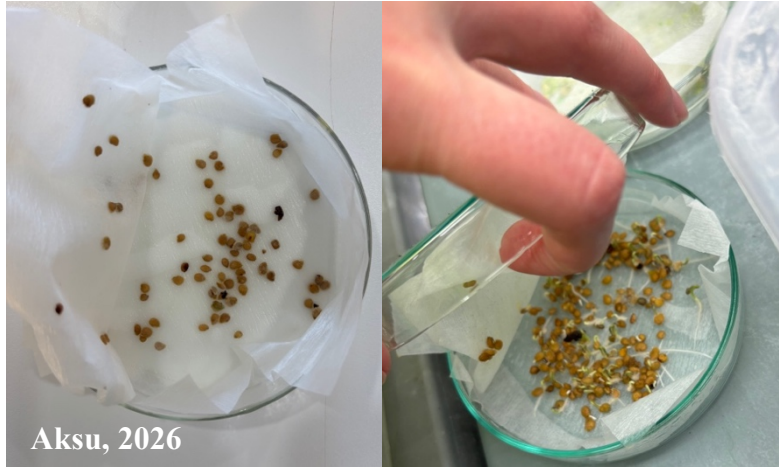
Şekil 3.6. İlaçlı deneme grubu için temin edilen nematosisit.

IRAC (Insecticide Resistance Action Committee) sınıflandırmasına göre fosthiazate, Grup 1B (Organofosfatlar) içerisinde yer almakta olup, hedef organizmalarda asetilkolinesteraz (AChE) enzimini inhibe ederek sinir iletimini bozmakta ve nematodların ölümüne yol açmaktadır. Uygulama, tavsiye edilen şekliyle toprak ilaçlaması şeklinde bitki kök bölgesine nüfuz edecek biçimde gerçekleştirilmiştir (Yadav vd., 2024).

3.2. Yöntem

3.2.1. Domates bitkilerinin üretimi

Domates tohumları, ekim öncesinde yüzey sterilizasyonu amacıyla %1'lik sodyum hipoklorit çözeltisinde 2–3 dakika bekletilmiş, ardından steril saf su ile üç kez durulanmıştır. Sterilizasyon işleminin ardından tohumlar, 9 cm çapındaki cam petri kapları içerisinde, çift kat steril kurutma kâğıdı arasına yerleştirilmiş ve steril saf su ile nemlendirilmiştir (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Domates tohumlarının petride çimlendirilme aşamaları.

Çimlenme sonrası kotiledon yaprakları tamamen gelişen fideler arasından homojen büyüme gösteren sağlıklı bireyler seçilmiş ve steril koşullarda hazırlanmış yetiştirme ortamına şaşırtılmıştır. Yetiştirme ortamı; torf, perlit, bahçe toprağı ve yıkanmış dere kumunun sırasıyla 700, 200, 700 ve 700 cc oranlarında karıştırılmasıyla hazırlanmış olup, optimum kök gelişimi için yeterli drenaj ve havalanmayı sağlayacak şekilde düzenlenmiştir (Göze Özdemir vd., 2022) (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Viyole şaşırtılmış domates fideleri.

Şaşırtılan fideler, kontrollü çevre koşullarının sağlandığı bir iklim kabininde yetiştirilmiştir. Yetiştirme süresince 16:8 saat (aydınlık:karanlık) fotoperiyot uygulanmış, sıcaklık 25 ± 2 °C'de sabit tutulmuş ve bağıl nem % 60-70 aralığında kontrol edilmiştir.

Aydınlatma, bitki gelişimi için floresan/laboratuvar tipi büyüme lambaları ile gerçekleştirilmiştir. Sulama işlemleri, bitkilerin ihtiyacına göre düzenli aralıklarla yapılmış ve su stresine maruz kalmaları engellenmiştir (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. İklim kabinde büyütülen domates fideleri.

3.2.2. Petek güvesi larvalarının üretimi

Larva üretimi için 1500 mL hacimli (yaklaşık 11 cm çap ve 15 cm yükseklik) cam kavanozlar kullanılmıştır. Kavanozların üst kısmı, yaklaşık 2 mm gözenek çapına sahip sık dokulu metal tel ile kapatılarak hem havalandırma sağlanmış hem de kaçışlar önlenmiştir. Kültürler inkübatör içerisinde karanlık koşullarda 30–32 °C sıcaklıkta tutulmuştur. Bu koşullarda larvaların yaklaşık 4 hafta içerisinde altıncı dönem larva evresine ulaştığı gözlenmiştir. Alternatif üretim koşullarında kültürlerin 25 °C civarında tutulmasının da uygun olduğu bildirilmekle birlikte, bu çalışmada optimum gelişim süresi dikkate alınarak 30–32 °C tercih edilmiştir.

Larvaların beslenmesi amacıyla bal, gliserin ve tahıl esaslı bileşenlerden oluşan yapay besin hazırlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan besin, 200 g bal, 200 g gliserin, 200 g kepek, 150 g mısır unu, 100 g soya unu, 100 g süt tozu ve 50 g mayadan oluşturulmuştur (Kaya ve Stock, 1997). Besin hazırlanırken kuru malzemeler homojen şekilde karıştırıldıktan sonra bal ve gliserin ilave edilmiş ve 200 °C ısıda bir miktar kavrularak yarı katı kıvamda bir besin ortamı elde edilmiştir (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. *Galleria mellonella* için hazırlanan besin.

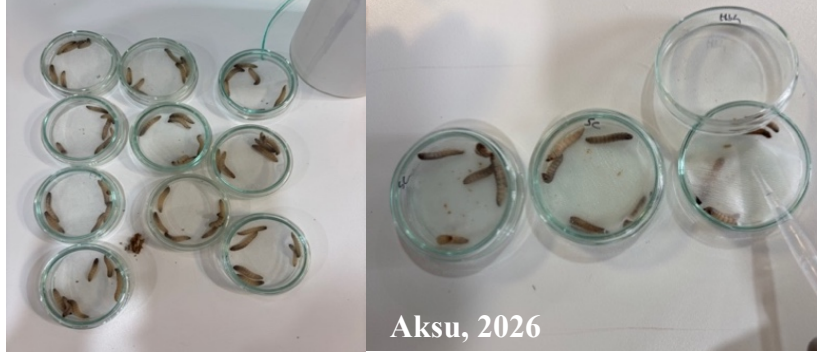
Hazırlanan besin cam kavanozlara konmuş ve üzerine bırakılan yumurtalardan çıkan larvaların gelişimi bu ortamda sağlanmıştır. Üretimin sürekliliğini sağlamak amacıyla bazı larvalar besin ortamında bırakılarak pupaya dönüşmeleri sağlanmış, ergin bireylerin oluşumunun ardından çiftleşme ve yumurta bırakma süreciyle kültür devam ettirilmiştir (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. *Galleria mellonella*'nın yumurta, larva ve ergin dönemleri.

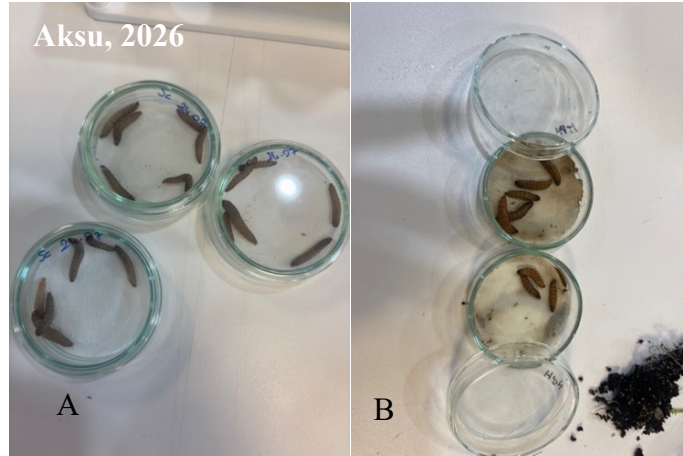
3.2.3. Entomopatojen nematodların *in vivo* üretimi

Enfeksiyon işlemleri için tabanına steril filtre kâğıdı yerleştirilmiş 6 veya 9 cm çapında cam ya da plastik petri kapları kullanılmıştır. Her bir petri kabına 5 adet son dönem petek güvesi larvası yerleştirilmiştir. Larvaların uygulama öncesinde aktif ve sağlıklı olmalarına dikkat edilmiştir. Enfeksiyon, IJ dönemindeki nematodların musluk suyu ile hazırlanan süspansiyon hâlinde uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Uygulama dozu larva başına yaklaşık 100 IJ olacak şekilde ayarlanmıştır. Nematod süspansiyonu mikropipet yardımıyla doğrudan larva üzerine veya filtre kâğıdı yüzeyine damlatılmıştır (pipetleme yöntemi). Uygulama sonrası petri kapları kapatılmış ve 25 °C sıcaklıkta, karanlık koşullarda inkübasyona bırakılmıştır (Şekil 3.12.).



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

Başarılı enfeksiyonun göstergesi olarak kadavralarda karakteristik renk değişimleri gözlenmiştir. *Steinernema* türleri ile enfekte olan larvalarda açık sarı-kahverengi tonlar; *Heterorhabditis* türlerinde ise kırmızımsı tonda renk değişimleri meydana gelmektedir. Siyahlaşma ve kötü koku oluşumu bulaşma göstergesi olarak değerlendirilmiş ve bu kadavralar ortamdan uzaklaştırılmıştır (Şekil 3.13.).



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

Yeni nesil IJ'ler hasadı için modifiye edilmiş White trap yöntemi kullanılmıştır. Enfekte böcek kadavraları, ortasında yükseltilmiş bir platform bulunan ve çevresi steril su ile doldurulmuş petri kaplarına (White trap) yerleştirilmiştir. Kadavra içerisindeki besin kaynaklarının tükenmesini takiben, genellikle enfeksiyondan yaklaşık iki hafta sonra, IJ'ler kadavrayı terk ederek tuzak çevresindeki steril suya geçmiştir (Caccia vd., 2018) (Şekil 3.14.).

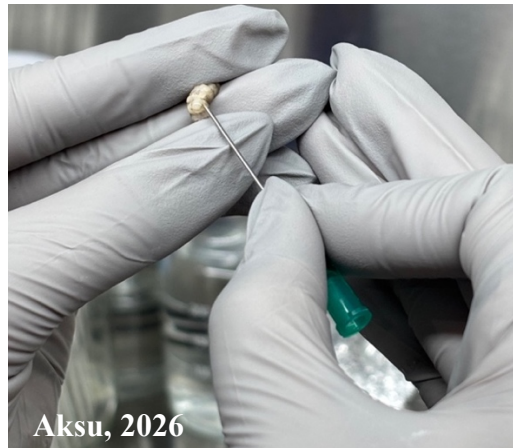


Şekil 3.14. White trap düzeneğinde EPN'ler ile enfekteli kadvraların görüntüsü.

Petrilerden toplanan nematod süspansiyonları kalıntılardan arındırılmak amacıyla distile su ile birkaç kez yıkanmış ve Ringer çözeltisi içerisinde geçirgen kapaklı kültür kaplarına alınmıştır. Tüm kültürler denemelerde kullanılıncaya kadar karanlık koşullarda 8 °C'de depolanmıştır.

3.2.4. Entomopatojen nematodların *in vitro* üretimi

In vitro üretimin ilk aşamasında simbiyotik bakteri izolasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, son dönem *G. mellonella* larvaları petri kapları içerisinde EPN'ler ile enfekte edilmiştir. Enfeksiyondan yaklaşık 24-36 saat sonra hareketleri yavaşlayan larvalar seçilerek % 70 etanol içerisinde 4 dakika bekletilmiş ve larvaların yüzey sterilizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yüzey sterilizasyonu yapılan larvalar sonrasında steril saf su ile durulanmış ve steril kabin içerisinde kurutulmuştur. Steril enjektör iğnesi yardımıyla abdomen segmentleri arasındaki intersegmental membran delinerek hemolenf dışarı çıkarılmış 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.



Şekil 3.15. Enfekte kadvranın steril kabin içerisinde delinmesi.

Ekim yapılan petriler 28 °C'de 48 saat inkübe edilmiş ve bu süre sonunda bakteri kolonilerinin gelişmesi beklenmiştir. Gelişim gösteren kolonilerden simbiyotik bakterilerin karakteristik özelliklerini taşıyan koloniler seçilmiş ve saflaştırma yapılmıştır. Tüm üretim aşamalarında Faz I koloni morfolojisi, pigment üretimi, biyolüminesans (özellikle *Photorhabdus* için), katalaz ve oksidaz reaksiyonları ile faz doğrulaması yapılmıştır (Şekil 3.16. ve 3.17.).



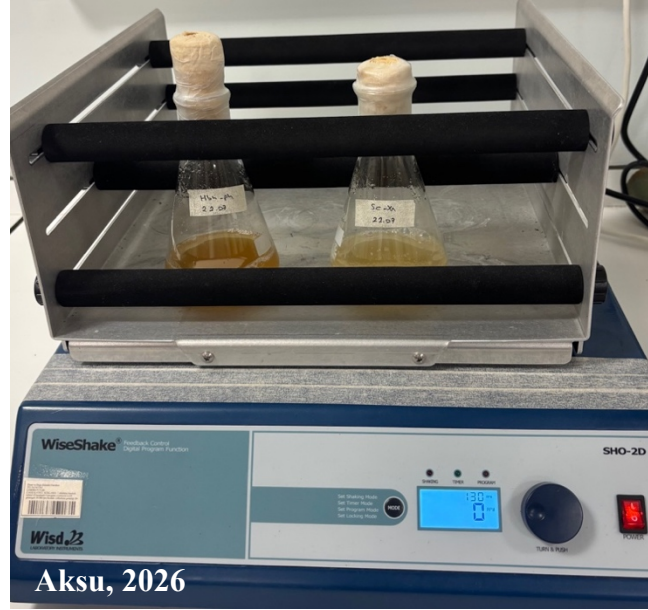
Şekil 3.16. *Xenorhabdus* ve *Photorhabdus* kolonilerinin NBTA agardaki görüntüleri.



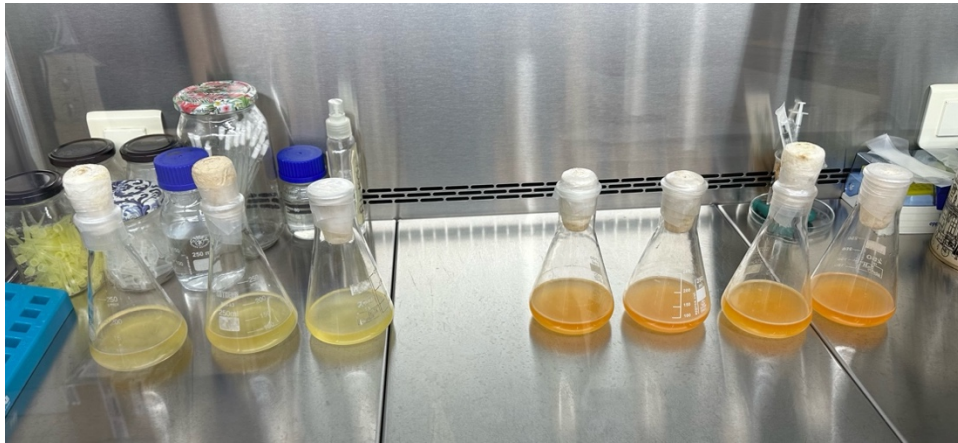
Şekil 3.17. Biyolüminesans özellik gösteren *Photorhabdus* kolonileri (sol) ve katalaz testi uygulaması (sağ).

Bakteri izolasyonu tamamlandıktan sonraki aşamada bakterilerin sıvı kültürde üretimine geçilmiştir (Ulu ve Susurluk, 2024). Üretim için maya ve tuz içeren sıvı YS (yeast salt) besi yeri 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. Bakteri inokülasyonu öncesinde besi yerinin pH değeri 1N NaOH kullanılarak yaklaşık 7 olarak

ayarlanmıştır. Sıvı besiyeri 28 °C'de 150 rpm'de orbital çalkalayıcıda 48–72 saat inkübe edilmiş ve bu sürede bakteri gelişimi takip edilmiştir (Şekil 3.18. ve 3.19.).



Şekil 3.18. Orbital çalkalayıcıda inkübe edilen erlen şişeleri.



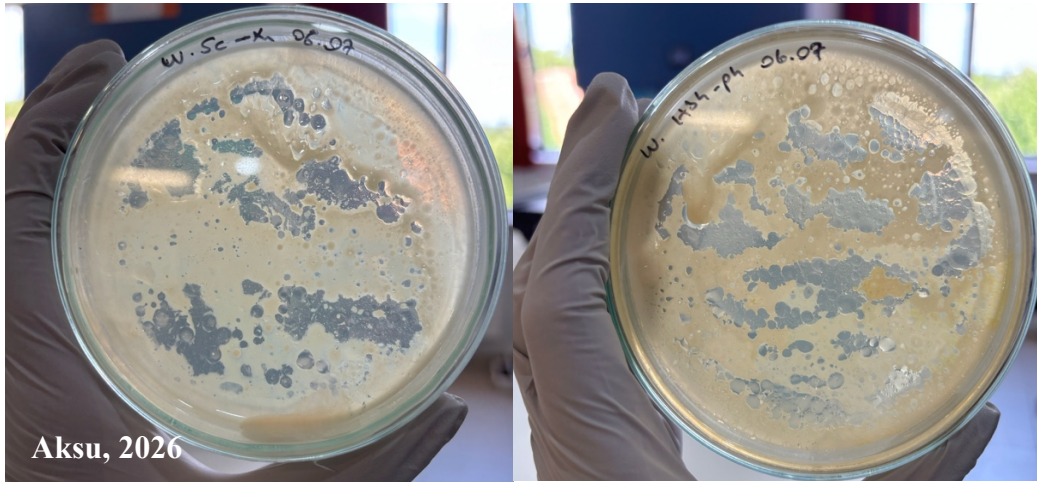
Şekil 3.19. Sıvı YS besiyerinde gelişen *X. nematophila* (sol) ve *P. thracensis* (sağ) bakterileri.

İnkübasyon süresi sonunda başarıyla üretilen bakteriler katı kültür üretimi için kullanılmıştır. Bu aşamada da bakterilere bazı biyokimyasal testler yapılmıştır. Örneğin, *Photorabdus* cinsinde pigment oluşumunu gözlemlemek için YS ortamına 4M NaOH eklenmiş ve ortamın sarı-turuncu renkten vişne rengine dönmesiyle bakteri testi başarıyla geçmiştir (Ulu ve Susurluk, 2018) (Şekil 3.20.)



Şekil 3.20. Sıvı besiyerinde üretilen *Photorhabdus* sp. bakterisi için uygulanan pigment testi.

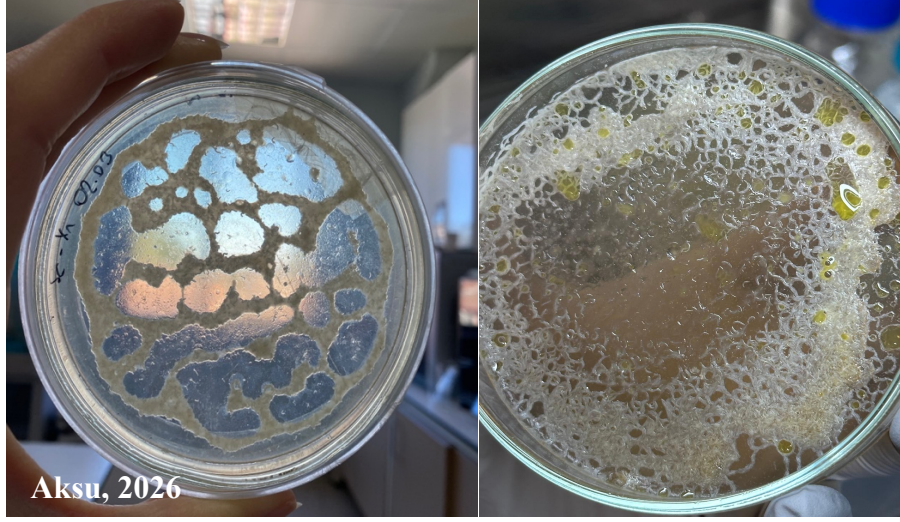
Katı ortam üretiminde Wouts agar kullanılmıştır (Ulu ve Susurluk, 2021; Wouts, 1981). Ortam, Bacto Nutrient Broth (16 g/L), Bacto Agar (12 g/L) ve lipit kaynağı olarak ayçiçek yağı (5 g/L) içerecek şekilde hazırlanmış, 121 °C’de 15 dakika otoklavlanmıştır. Steril kabinde petrilere dökülen agar yüzeyi kurutulduktan sonra, bakteri üretilen YS ortamından alınan süspansiyon cam pipet yardımıyla agar yüzeyine damlatılmış ve 28 °C’de 48 saat inkübe edilerek bakteriyel kolonizasyon sağlanmıştır (Şekil 3.21.).



Şekil 3.21. Wouts agar üzerinde üreyen bakterilerin görüntüsü.

Wouts agar üzerinde bakterilerin sağlıklı gelişmesinden sonra White trap sisteminden elde edilen IJ’ler, Ringer çözeltisi içerisinde alınarak steril saf su ile yıkanmış ve sayımları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yaklaşık 1000 IJ içerecek şekilde steril tüplere aktarılmıştır. Nematodların dibe çökmesinin ardından süpernatant uzaklaştırılmış ve kalan pellet (IJ’ler) %0,5 sodyum hipoklorit çözeltisinde 8 dakika süreyle bekletilerek yüzey sterilizasyonu uygulanmıştır. Sterilizasyon işlemi takiben nematodlar steril saf su ile üç kez yıkanmış, her yıkama sonrasında süpernatant uzaklaştırılmıştır. Son yıkamanın ardından elde edilen IJ’ler, simbiyotik bakteri gelişimi tamamlanmış ve kontaminasyon içermediği doğrulanmış Wouts

agarlara inokule edilmiştir. İnokulasyon işlemi sonrasında petri kapları parafilm ile kapatılmış ve petriler 25 °C’de inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon süresince nematodların gelişimleri takip edilmiş ve yaklaşık bir hafta sonunda yeni nesil IJ’ler elde edilmiştir (Şekil 3.22.).



Şekil 3.22. Wouts agar üzerinde üretilen nematodların 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. Elde edilen IJ’ler, denemelerde kullanıncaya kadar 8 °C’de muhafaza edilmiştir. Denemeler öncesinde nematod popülasyonlarının canlılık oranları kontrol edilmiş ve ölüm oranı %1’in altında olan kültürler deneylerde kullanılmıştır.

3.2.5. Kök-ur nematodlarının üretimi

Kök-ur nematodları (*Meloidogyne* spp.) obligat bitki paraziti olmaları nedeniyle laboratuvar ve sera koşullarında genellikle canlı ve hassas konukçu bitkiler üzerinde çoğaltılmaktadır. Bu amaçla en yaygın kullanılan konukçu bitkiler, nematod enfeksiyonuna yüksek derecede duyarlı olan kültür domatesi çeşitleridir. Özellikle “Falcon” ve “SC2121” ticari çeşitleri, homojen gal oluşumu ve yüksek yumurta verimi sağlamaları nedeniyle tercih edilmektedir (Aydınlı ve Civelek, 2018; Bozbuğa, 2021). Tez çalışmasında kullanılacak *M. incognita* popülasyonunun sürekliliğini sağlamak amacıyla, iklim kabini koşullarında yetiştirilen sağlıklı ve 3–4 gerçek yapraklı domates fidelerinin kök bölgesine, laboratuvar da daha önce enfekte edilmiş domateslerin köklerinden elde edilen ikinci dönem juveniller (J2) verilmiştir. Domates bitkilerine verilecek J2’leri elde etmek amacıyla daha önceden enfekte

olan domates bitkileri dikkatlice sökülüş, kökler akan musluk suyu altında toprak kalıntılarından arındırılmıştır (Şekil 3.23.).



Şekil 3.23. Musluk altında yıkanan *M. incognita* enfekteli kökler.

Yumurtaların kök dokusundan ve onları çevreleyen jelatinimsi matriksten ayrılması için en yaygın ve standart yöntem olan sodyum hipoklorit (NaOCl) ekstraksiyon yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde kökler 1–2 cm uzunluğunda parçalar hâlinde kesilmiş ve %0.5–1 oranında hazırlanmış sodyum hipoklorit çözeltisi içerisinde 2–4 dakika süreyle çalkalanmıştır. (Dai vd., 2022) Çalkalama işlemi yumurta paketlerinin parçalanmasını ve yumurtaların serbest kalmasını sağlamaktadır (Caccia vd., 2018). Elde edilen süspansiyon önce geniş gözenekli (75 μ m) eleklerden geçirilerek kök parçalarından ayrılmış, ardından yumurtaların tutulması amacıyla daha ince gözenekli (25 μ m) eleklerden süzölmüştür (Şekil 3.24.).



Şekil 3.24. Eleklerde yıkanan domates kökleri.

Temizlenen köklerde kalan yumurtaların toplanabilmesi için kökler Baermann hunilerinde oda sıcaklığında inkübasyona bırakılmıştır. Birkaç gün boyunca hunilerden hasat yapılmış ve aktif hareketli bireyler pipet yardımıyla toplanmıştır (Şekil 3.25.).



Şekil 3.25. Baermann hunilerinde inkübe edilen domates kökleri.

Elde edilen taze J2'lerin 24 saat içerisinde kullanılması tercih edilmiş, canlılık oranı mikroskopik gözlemle kontrol edilmiştir. Kök-ur nematodlarının bitkilere uygulanması, saksı hacmine bağlı olarak farklı yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. En sık kullanılan yöntem olan çukurlara pipetleme tekniğinde, bitki kök boğazı çevresine yaklaşık 2 cm derinliğinde birkaç küçük çukur açılmış J2 süspansiyonu bu çukurlara pipetle verilerek üzeri toprakla kapatılmıştır. Dikim sırasında doğrudan kök inokülasyon yönteminde ise fideler şaşırtma esnasında kök sistemi açıkken belirlenen miktarda J2 süspansiyonu doğrudan köklerin üzerine uygulanmış ve ardından üretim ortamı ile örtülmüştür. Daha büyük saksı hacimlerinde ise yüzeye dökme (flooding) yöntemi uygulanmış; belirli hacimde hazırlanmış nematod süspansiyonu saksı yüzeyine eşit şekilde dağıtılmıştır. Uygulama dozları saksı büyüklüğüne göre değişmiş; küçük hacimli saksılarda bitki başına 100–300 J2 kullanılırken, daha büyük sera saksılarında 3000–5000 J2'ye kadar inokülasyon yapılmıştır. İhtiyaca göre bu süreç tekrarlanmış bu enfeksiyonlardan tezde kullanmak için yumurta paketi temin edilmiştir.

Bitkilere J2 inokulasyonundan yaklaşık 7-8 hafta sonra, kök-ur nematodu ile enfekte olduğu ve yeterli düzeyde yumurta paketi oluşturduğu düşünülen domates bitkileri sökülmüş, kökler musluk suyu altında yıkanarak topraktan arındırılmıştır. Daha sonra kökler stereomikroskop altında incelenmiş ve bal köpüğü renginde görülen, çoğunlukla kılcal kökler üzerinde bulunan yumurta paketleri nematod iğnesi yardımıyla kök dokusundan dikkatlice ayrılmıştır. Elde edilen yumurta paketleri steril saf su içeren Eppendorf tüplerine her tüpte

yaklaşık 10–15 adet olacak şekilde aktarılmış ve denemelerde inokulum kaynağı olarak aynı gün kullanılmıştır. İnokulasyonu takiben bitkiler 25 °C sıcaklıkta ve uygun toprak nemi koşullarında yetiştirilmiş, 4–8 hafta içerisinde köklerde karakteristik ur (gal) oluşumları ve yeni yumurta paketleri meydana gelmiştir (Aydinli ve Mennan, 2016) (Şekil 3.26.).



Şekil 3.26. Denemelerde kullanılacak yumurta paketleri, enfekteli domates köklerinden toplanmıştır.

3.2.6. Deneme deseni ve uygulama grupları

Çalışma, laboratuvar koşullarında iklim kontrollü bir kabin içerisinde, tesadüf parselleri deneme desenine göre yürütülmüştür. Denemede, homojen gelişim gösteren ve 4–6 gerçek yaprağa sahip fideler kullanılmıştır. Fideler, 15 cm çapındaki saksılara torf, kum, bahçe toprağı ve perlit karışımından oluşan standart yetiştirme ortamına dikilmiştir.

Bitkiler, aynı iklim kabininde 25 °C sıcaklık, 60 ± 5 oransal nem ve 16:8 fotoperiyot koşullarında yetiştirilmiştir. Deneme süresince tüm bitkilere eşit miktarda sulama yapılmış ve on günde bir yapraktan Gübretaş 10.10.10 + ME gübresi uygulanmıştır.

Her uygulama için beş bitki kullanılmış ve denemeler farklı zamanlarda iki kez tekrarlanmıştır. Toplamda her bir uygulama için 10 adet domates bitkisi kullanılmıştır. Ancak çeşitli nedenlerle sağlıklı ölçüm yapılamayan bazı bitkiler denemelerden çıkarıldığı için her uygulama grubunda 10 bitki yer alamamıştır. Deneme süresi 45 gün olarak planlanmış olup, bu sürenin sonunda uygulama gruplarındaki bitkiler ve kökler incelenmiştir.

Uygulama grupları aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir:

Negatif kontrol (su): Bu grupta, domates bitkileri saksılara şaşırtılmış ve deneme boyunca haftada üç kez sulanarak yetiştirilmiştir. Herhangi bir uygulama yapılmamıştır.

Mi kontrol: Bu grupta, saksıya dikimden beş gün sonra her bitkinin kök bölgesine yaklaşık 15 adet *M. incognita* yumurta paketi inoküle edilmiştir. (Şekil 3.27.).



Şekil 3.27. Domates köklerine *M. incognita* uygulaması (sol) ve deneme grupları (sağ).

EPN kontrol: Bu grupta yalnızca canlı EPN uygulamaları gerçekleştirilmiştir. İnokulasyonda kullanılacak IJ yoğunluğu, stereomikroskop altında sayım lamı kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, her bir kültür kabındaki nematod süspansiyonundan 20–30 μ L hacminde beş ayrı örnek alınmış ve her örnekteki IJ sayısı belirlenmiştir. Elde edilen sayımların ortalaması alınarak birim hacimdeki nematod yoğunluğu hesaplanmış, daha sonra bu değer kültür kabındaki toplam süspansiyon hacmine oranlanarak toplam IJ sayısı tahmin edilmiştir. Hesaplanan yoğunluk değerleri esas alınarak süspansiyonlar seyreltilmiş veya yoğunlaştırılmış ve tüm uygulamalarda *H. bacteriophora* ve *S. carpocapsae* türlerinin her biri için 60.000 IJ yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir (Kaya ve Gaugler, 1993; Shapiro-Ilan vd., 2012). Bu grup sadece EPN’lerin bitkideki potansiyel etkilerini gözlemlemek amacıyla kurulmuştur (Şekil 3.28.). Bu gruplar HBN kontrol ve SCN kontrol olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.28. Entomopatojen nematodlu kontrol gruplarında uygulamaları yapılışı.

Pozitif kontrol (Nematisit): Bu grupta, torf, perlit, bahçe toprağı ve kum karışımı önerilen dozda hazırlanan nematisit (fosthiazate) çözeltisi ile spreyleme yöntemi kullanılarak ilaçlanmıştır. İlaçlanan yetiştirme ortamı homojen şekilde karıştırıldıktan sonra uygun

miktarlarda saksılara doldurulmuş ve domates fideleri dikilmiştir. Dikimden beş gün sonra her saksıya *M. incognita* yumurta paketleri inokule edilmiştir (Şekil 3.29.). Bu grup Fost + Mi olarak isimlendirilmiştir.



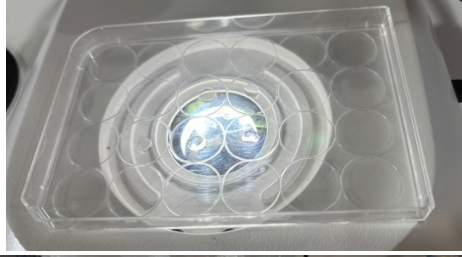
Şekil 3.29. Dikim yapılacak karışımın ilaçla karıştırılması.

Dondurulmuş larva + Mi: Bu grupta, dondurulmuş larva uygulamasında kullanılacak larvalar, boyut bakımından birbirine benzer bireyler arasından seçilmiştir. Larvalar 24 saat süreyle -20°C 'de bekletilmiş ve dondurularak öldürülmüştür. Dondurulmuş larvalar denemede kullanılacak bitkiler saksılara dikilirken kök bölgesine gömülmüştür. Bitki başına beş adet donmuş larva kullanılmıştır. Dikimden beş gün sonra her saksıya *M. incognita* yumurta paketleri inokule edilmiştir (Şekil 3.30.). Bu grup FRE + Mi olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.30. -20°C 'de dondurulmuş larvalar.

EPN + Mi: Bu grupta bitki köklerine canlı EPN ve *M. incognita* uygulaması yapılmıştır. Denemede kullanılan her iki EPN türü de bitki başına 60.000 IJ dozunda uygulanmıştır (Kaya ve Gaugler, 1993; Shapiro-Ilan vd., 2012). Dikimden beş gün sonra her saksıya *M. incognita* yumurta paketleri inokule edilmiştir. Deneme gruplarından *H. bacteriophora* uygulanan grup HBN + Mi, *S. carpocapsae* uygulanan grup ise SCN + Mi olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.31.).



Şekil 3.31. Entomopatojen nematod uygulanacak gruplarda doz hesaplama işlemi.

Enfekteli larva + Mi: Bu grupta, enfekteli larva uygulamalarında her saksıya iri ve yaklaşık aynı görünümüne sahip beş adet enfekte larva yerleştirilmiştir (Wang vd., 2023). Enfeksiyondan 24–48 saat sonra larvalar değerlendirilmiş; *H. bacteriophora* ile enfekte olup karakteristik kırmızı renklenme gösteren larvalar ile *S. carpocapsae* enfeksiyonuna bağlı tipik kahverengi renklenme sergileyen larvalar denemelerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Bitkinin kök gölgesine bitkiyi dikerken larvalar eklenmiştir. Dikimden beş gün sonra her saksıya *M. incognita* yumurta paketleri inokule edilmiştir. Deneme gruplarından *H. bacteriophora* enfekteli larva uygulanan grup HBE + Mi, *S. carpocapsae* enfekteli larva uygulanan grup ise SCE + Mi olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.32.).



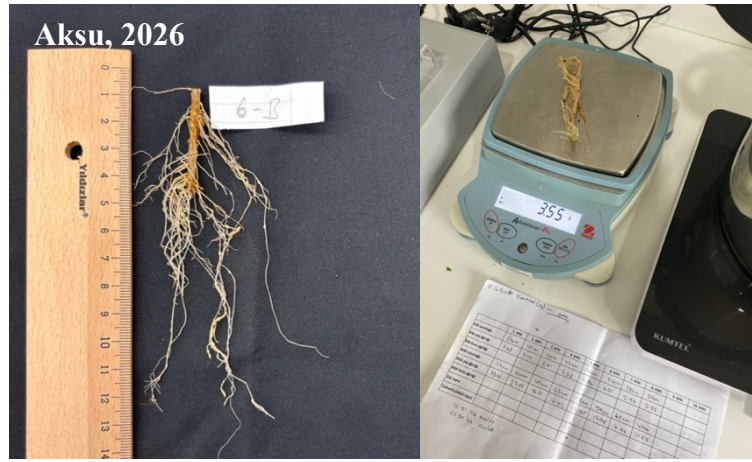
Şekil 3.32. Enfekteli larvaları bitki dikimi öncesi kök bölgesine yerleştirilmesi.

3.2.7. Değerlendirme parametreleri

Deneme sonunda bitki gelişimi, kök gelişimi ve nematod enfeksiyon düzeyine ilişkin çeşitli parametreler değerlendirilmiştir. İncelenen parametreler; kök uzunluğu (cm), kök yaş

ağırlığı (g), kök kuru ağırlığı (g), bitki uzunluğu (cm), bitki yaş ağırlığı (g), bitki kuru ağırlığı (g), gal sayısı ve köklerdeki yumurta paketi sayısı belirlenmiştir (Hajihassani vd., 2019).

Hasat döneminde bitkiler saksılardan dikkatlice çıkarılmış ve kökler topraktan arındırılmıştır. Kök uzunluğu, kök sisteminin ana eksenini boyunca cetvel yardımıyla ölçülerek santimetre (cm) cinsinden kaydedilmiştir. Kök yaş ağırlığı, temizlenen köklerin hassas terazide tartılmasıyla belirlenmiştir. Bitki uzunluğu ise köklerden ayrılan bitki aksamının cetvel yardımıyla ölçülmesiyle tespit edilmiştir. Bitki yaş ağırlığı ve kök yaş ağırlığı değerleri, topraktan tamamen arındırılmış bitki ve kök örneklerinin hassas terazide tartılmasıyla elde edilmiştir (Şekil 3.33.).



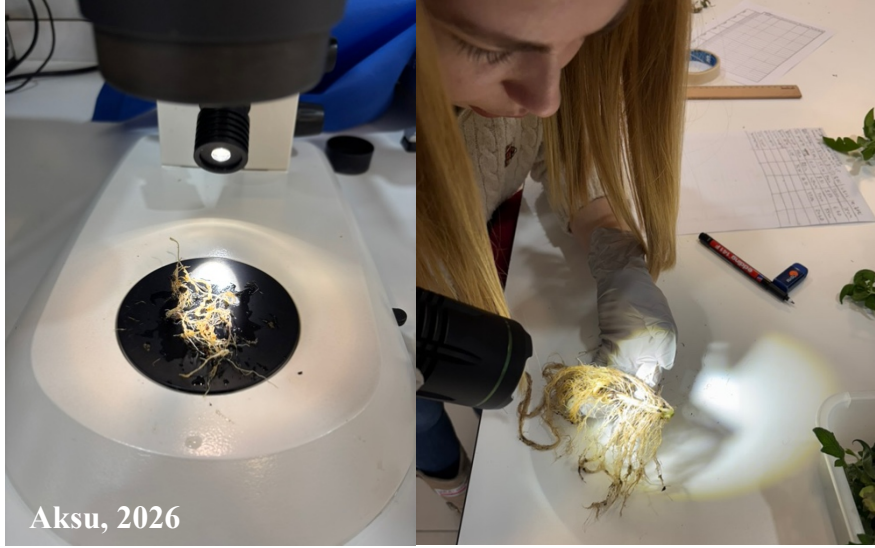
Şekil 3.33. Kök uzunluğu ve kök ağırlığının ölçümleri.

Kök ve bitki kuru ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla örnekler ayrı ayrı etiketlenmiş, ağırlık kaybı durana kadar etüvde kurutulmuş ve ardından hassas terazide tartılarak kuru ağırlıkları kaydedilmiştir (Şekil 3.34.).



Şekil 3.34. Kurutulmuş bitki kök ve gövdesi.

Nematod enfeksiyonunun değerlendirilmesinde köklerde oluşan gal sayıları mikroskop yardımıyla incelenmiş ve gal sayısı belirlenmiştir. Köklerde bulunan yumurta paketleri ise stereo mikroskop altında tek tek sayılarak kayıt altına alınmıştır (Şekil 3.35.).



Şekil 3.35. Deneme sonunda köklerdeki gallerin sayımı.

3.2.8. İstatistiksel analizler

Gal sayısı ve yumurta paketi sayısı verilerinin sayım verisi olması ve varyansının ortalamadan belirgin şekilde büyük olması nedeniyle (aşırı yayılım/overdispersion), veriler Poisson dağılımı varsayımını karşılamamıştır. Bu nedenle uygulamalar arasındaki farkların değerlendirilmesinde her iki değişken için de Negatif Binomial Genelleştirilmiş Doğrusal Model (Negative Binomial Generalized Linear Model) kullanılmıştır. Modeller, ilgili bağımlı değişkeni (gal sayısı veya yumurta paketi sayısı), uygulamayı (treatment) ise sabit etki (fixed effect) olarak içermektedir. Deneme tekrarının (blok) model üzerindeki katkısı Likelihood Ratio Testi ile sınanmış, anlamlı bir etki saptanmadığından ($p > 0.05$) nihai modele dahil edilmemiştir. Modellerin genel anlamlılığı Likelihood Ratio Testi ile değerlendirilmiştir. İkili karşılaştırmalar, model tahminli marjinal ortalamalar (estimated marginal means) üzerinden Tukey yöntemi ile çoklu karşılaştırma düzeltmesi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler R yazılımı (v4.5.3, R Core Team, 2026) kullanılarak, "MASS", "emmeans" ve "multcomp" paketleri aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel anlamlılık düzeyi $p < 0,05$ olarak kabul edilmiştir.

Bitki parametrelerine ait veriler, blok yapısı gözetilerek doğrusal karma model (Linear Mixed Model, LMM) ile analiz edilmiştir. Modelde uygulama grubu (treatment) sabit etki, deneme tekrarı (repetition) ise rastgele etki olarak tanımlanmıştır. Analizler R istatistik programı (R Core Team, 2026) kullanılarak gerçekleştirilmiş; LMM kurulumunda lme4 ve lmerTest paketlerinden yararlanılmıştır.

Model kurulmadan önce varsayım testleri uygulanmıştır. Normallik, Shapiro-Wilk testiyle; gruplar arası varyans homojenliği ise Levene testiyle değerlendirilmiştir (*car* paketi). Sabit etkinin anlamlılığı Satterthwaite yaklaşımıyla hesaplanan F-testi ile belirlenmiştir.

Bitki büyüme parametreleri için uygulama grupları arasındaki farklılıklar, çoklu karşılaştırma yöntemi olarak Dunnett testiyle değerlendirilmiştir. Bu testte negatif kontrol grubu referans olarak alınmış ve diğer tüm uygulama grupları yalnızca negatif kontrol ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar tahmini marjinal ortalamalar (emmeans) temel alınarak çok değişkenli t dağılımı düzeltmesi (mvt) uygulanmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Tablolarda her gruba ait tahmini ortalama ve standart hata (SH) sunulmuştur. İstatistiksel anlamlılık düzeyi $p < 0,05$ olarak kabul edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Farklı uygulamaların gal sayısı üzerindeki etkileri incelendiğinde, deneme grupları arasında istatistiksel olarak önemli farklılıklar belirlenmiştir ($\chi^2(5) = 24,53$; $p < 0,001$). En yüksek gal sayısı 104,00 değeri ile SCN + Mi grubunda kaydedilmiş, bunu istatistiksel olarak aynı grupta yer alan Mi kontrol uygulaması 98,11 değeri ile takip etmiştir. Buna karşın, en düşük değer 43,40 ile FRE + Mi uygulamasında saptanmış ve bunu 46,70 değeri ile HBE + Mi uygulaması takip etmiş olup bu iki uygulamanın aynı istatistiksel grup içerisinde yer aldığı belirlenmiştir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Uygulamaların *M. incognita* gal sayısına etkisi.

Uygulama*	n	Ortalama Gal Sayısı ($\pm$ SH)**
SCN + Mi	9	104,00 $\pm$ 17,71 a
Mi kontrol	9	98,11 $\pm$ 16,72 a
SCE + Mi	8	80,88 $\pm$ 14,68 ab
HBN + Mi	10	76,00 $\pm$ 12,36 ab
HBE + Mi	10	46,70 $\pm$ 7,71 b
FRE + Mi	10	43,40 $\pm$ 7,19 b
Negatif kontrol	10	0 $\pm$ 0

*HBN: *H. bacteriophora* canlı IJ uygulaması, HBE: *H. bacteriophora* enfekteli larva uygulaması, SCN: *S. carpocapsae* canlı IJ uygulaması, SCE: *S. carpocapsae* enfekteli larva uygulaması, FRE: Dondurulmuş larva uygulaması, Mi: *M. incognita*

** Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Bu sonuçlar, canlı IJ uygulamalarının kök-ur nematodunu baskılamada her zaman yeterli olmadığını, buna karşın enfekte veya dondurulmuş böcek larvalarının daha etkili bir baskılama sağlayabildiğini göstermektedir. Deneme sonuçlarına göre canlı *S. carpocapsae* uygulamasının bitkilerde gal oluşumunu azaltamaması, EPN'lerin BPN'lerin köke penetrasyonunu her koşulda engelleyemediğini bildiren çalışmalarla uyumluluk göstermektedir (Grewal vd., 1999). Örneğin, Pérez ve Lewis (2002), domates fidelerinde uygulanan canlı *H. bacteriophora* IJ'lerinin *M. incognita*'nın köke girişini ve yumurta üretimini önemli düzeyde azaltmadığını bildirmiştir. Benzer şekilde Sayedain ve ark. (2021), hıyar bitkisinde canlı *S. carpocapsae* uygulamalarının *M. javanica*'nın neden olduğu gal oluşumunu azaltabildiğini, ancak etkinliğin bitki türü, nematod türü, uygulama zamanı ve IJ yoğunluğu gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde değişebildiğini bildirmiştir. Bu durum, mevcut çalışmada canlı *S. carpocapsae* uygulamasının etkisiz kalmasının kullanılan izolatın özellikleri, konukçu bitki-nematod etkileşimi ve denemenin yürütüldüğü iklim kabini koşullarında oluşan biyolojik farklılıklardan kaynaklanmış olabileceğini düşündürmektedir.

Buna karşılık, *H. bacteriophora* ile enfekte edilmiş larva uygulamasının gal sayısını önemli ölçüde azaltması, enfekte böcek kavrularının biyolojik mücadelede etkili olduğunu

gösteren çalışmalarla paralellik göstermektedir. Sayedain vd. (2021), *S. carpocapsae* ve *H. bacteriophora* ile enfekte edilmiş böcek kadvralarının, IJ'lerin doğrudan süspansiyon halinde uygulanmasına göre gal ve yumurta kütlesi oluşumunu daha yüksek oranda baskıladığını ve bu etkinin IJ kadvra içerisinde toprağa kademeli olarak salınmasına bağlanabileceğini ifade etmiştir. Bu durum, enfekteli larvaların kök çevresinde daha uzun süre aktif kalmasını sağlayarak *M. incognita*'nın köke girişini ve gal oluşumunu sınırlandırmış olabileceğini düşündürmektedir.

Tez çalışmasında EPN ve enfekteli larva uygulamalarının *M. incognita* inokülasyonundan beş gün önce gerçekleştirilmiş olması da elde edilen sonuçları açıklayabilecek önemli bir faktördür. Bu süre içerisinde EPN'lerin kök çevresinde yerleşerek simbiyotik bakterileri aracılığıyla çeşitli biyolojik aktif metabolitler salgıladığı, rizosfer koşullarını değiştirdiği ve bitkinin savunma mekanizmalarını uyarak kök-ur nematodunun köke girişini ve beslenme hücrelerinin oluşumunu olumsuz etkilemiş olabileceği düşünülmektedir. Nitekim Pérez ve Lewis (2002), *S. feltiae* ve *H. bacteriophora* uygulamalarının kök-ur nematodu inokülasyonundan bir veya iki hafta önce yapılmasının nematod penetrasyonunu ve yumurta üretimini önemli ölçüde azalttığını bildirmiştir. Mevcut çalışmanın iklim kabininde yürütülmüş olması ve sıcaklık ve nem gibi çevresel değişkenlerin kontrol altında tutulması sebebiyle, gözlenen etkinin büyük ölçüde uygulamalardan kaynaklanan biyolojik etkileşimlerle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

Çalışmanın dikkat çekici bulgularından biri de dondurulmuş larva uygulamasının HBE uygulamasına benzer şekilde en düşük gal sayısını oluşturmıştır. Grewal vd. (1999), dondurulmuş *G. mellonella* kadvralarının laboratuvar koşullarında *M. incognita* ikinci dönem larvaları üzerinde doğrudan toksik veya itici bir etki göstermediğini bildirmiştir. Buna karşın, bu çalışmada denemenin 45 gün süreyle saksı ve iklim kabini koşullarında yürütülmüş olması nedeniyle dondurulmuş larvaların zamanla ayrılarak toprağa organik madde sağlaması, mikrobiyal aktiviteyi artırması ve rizosfer koşullarını değiştirerek kök-ur nematodunun gelişimi için daha az elverişli bir ortam oluşturmuş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca enfekteli larva uygulamalarında gözlenen yüksek etkinliğin IJ'ler ya da larvadan değil, büyük oranda *Photorhabdus* ve *Xenorhabdus* bakterilerinin salgıladığı sekonder metabolitlerin oluşturduğu antagonistik etkiden de kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, dondurulmuş larvalarda da benzer düzeyde baskılamanın görülmesi, mevcut literatürle uyumlu olmaması sebebiyle dikkat çekici bir sonuç olarak yorumlanmıştır.

Farklı uygulamaların yumurta paketi sayısı üzerindeki etkileri incelendiğinde, deneme grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar belirlenmiştir ($\chi^2(5) = 118,11$; $p < 0,001$). En yüksek yumurta paketi sayısı 81,75 değeri ile SCE + Mi ve 65,33 değeri ile SCN + Mi grubunda kaydedilmiş, buna karşın en düşük değer 11,50 ile HBE + Mi uygulamasında saptanmıştır (Tablo 4.2.).

Tablo 4.2. Uygulamaların *M. incognita* yumurta paketi üzerine etkisi.

Uygulama	n	Ortalama Yumurta Paketi Sayısı ($\pm$ SH)*
SCE + Mi	8	81,75 $\pm$ 12,52 a
SCN + Mi	9	65,33 $\pm$ 9,51 a
Mi kontrol	9	30,11 $\pm$ 4,59 b
HBN + Mi	10	26,10 $\pm$ 3,82 b
FRE + Mi	10	19,80 $\pm$ 2,98 bc
HBE + Mi	10	11,50 $\pm$ 1,86 c
Negatif kontrol	10	0 $\pm$ 0

* Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

HBN: *H. bacteriophora* canlı IJ uygulaması, HBE: *H. bacteriophora* enfekteli larva uygulaması, SCN: *S. carpocapsae* canlı IJ uygulaması, SCE: *S. carpocapsae* enfekteli larva uygulaması, FRE: Dondurulmuş larva uygulaması, Mi: *M. incognita*

Bu sonuçlar, uygulamaların yalnızca kök-ur nematodunun köke girişini değil, kök içerisinde gelişimini tamamlayarak üreme yeteneğini de farklı düzeylerde etkileyebileceğini göstermektedir. Kök-ur nematodlarında gal oluşumu ile yumurta paketi oluşumu aynı biyolojik süreci ifade etmemektedir. Gal oluşumu, ikinci dönem juvenillerin (J2) köke girerek beslenme bölgesi oluşturduğunu gösterirken, yumurta paketi oluşumu köke giren bireylerin gelişimlerini tamamlayıp ergin dişiye dönüşmeleri ve yumurta üretmeleri sonucunda gerçekleşmektedir. Bu nedenle köke giren her J2 bireyinin gelişimini tamamlayarak yumurta bırakan ergin dişiye dönüşmesi beklenmemektedir. Kök dokusunda meydana gelen fizyolojik değişimlerin dişi gelişimini ve yumurta üretimini sınırlandırabileceği (Soriano vd., 2004; Veronico vd., 2018; Wuyts, 2006) ve yüksek enfeksiyon yoğunluklarında gal sayısı ile yumurta üretimi arasındaki ilişkinin zayıflayabileceğini çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir (Tzortzakakis, 2010). Bu nedenle biyolojik mücadele çalışmalarında gal sayısı ve yumurta paketi sayısının farklı gelişim basamaklarını yansıtan tamamlayıcı parametreler olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Çalışmamızda HBE + Mi uygulamasında en düşük yumurta paketi sayısının belirlenmesi, *H. bacteriophora* ile enfekte edilmiş böcek kadavralarının kök-ur nematodunun üreme başarısını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde Sayedain vd. (2021), *H. bacteriophora* ile enfekte edilmiş böcek kadavralarının *M. javanica*'da yumurta paketi sayısını canlı IJ uygulamalarına göre önemli düzeyde azalttığını bildirmiştir.

HBE + Mi uygulamasındaki düşük yumurta paketi sayısı yalnızca kök-ur nematodu popülasyonunun azalmasıyla açıklanması yeterli olmayacaktır. *Heterorhabditis bacteriophora*'nın simbiyotik bakterisi olan *P. luminescens* tarafından üretilen sekonder metabolitlerin *M. incognita* yumurtalarının açılımını baskıladığı ve geliştirmekte olan jüveniller üzerinde nematisidal etki gösterdiği bildirilmiştir (Hu vd., 1999; Sayedain vd., 2019). Bu metabolitlerin köke giren bireylerin gelişimini yavaşlatmış, dişi olgunlaşmasını geciktirmiş veya yumurta üretim kapasitesini azaltmış olabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca uygulamaların *M. incognita* inokülasyonundan beş gün önce yapılmış olması nedeniyle EPN'lerin ve simbiyotik bakterilerinin kök bölgesinde önceden yerleşerek rizosfer koşullarını değiştirmiş olabileceği de göz ardı edilmemelidir.

Buna karşılık, SCE + Mi uygulamasında en yüksek yumurta paketi sayısının belirlenmesi literatürde bildirilen birçok çalışmadan farklılık göstermektedir. Sayedain vd. (2021), *S. carpocapsae* ile enfekte edilmiş böcek kadvralarının *M. javanica*'nın üremesini önemli ölçüde baskıladığını bildirirken, Pérez ve Lewis (2002) bazı *Steinernema* türlerinin *M. incognita*'nın yumurta üretimini azaltabildiğini göstermiştir. Mevcut çalışmada farklı bir sonucun elde edilmesi, kullanılan *S. carpocapsae* izolatının biyolojik özellikleri, simbiyotik bakterisinin metabolit üretim kapasitesi, uygulama yoğunluğu, uygulama zamanı veya iklim kabini koşullarında oluşan rizosfer etkileşimlerinden kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmektedir. Bu durum, EPN'lerin kök-ur nematodları üzerindeki etkinliğinin yalnızca türe bağlı olmadığını, izolat ve çevresel koşullardan da önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada gal sayısı ile yumurta paketi sayısının tam olarak paralellik göstermemesi, EPN uygulamalarının *M. incognita*'nın yaşam döngüsünün farklı evrelerini farklı düzeylerde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. HBE + Mi uygulaması gal oluşumunu azaltmasının yanı sıra köke giren bireylerin gelişimini tamamlayarak üremesini de önemli ölçüde baskılamış görünmektedir. Buna karşılık SCE + Mi uygulamasında yüksek yumurta paketi sayısının belirlenmesi, bu uygulamanın nematodun üreme biyolojisi üzerinde de yeterli baskıyı oluşturamadığını düşündürmektedir. Bu farklılığın altında yatan mekanizmaların açıklanabilmesi için gelecekte yapılacak çalışmalarda nematod gelişim evreleri, bitki savunma yanıtları ve entomopatojen nematod simbiyotik bakterilerinin metabolit profillerinin birlikte değerlendirilmesi yararlı olacaktır.

Farklı uygulamaların bitki uzunluğu üzerindeki etkileri incelendiğinde, uygulama grupları arasında genel olarak anlamlı bir farklılık tespit edilmiş olmakla birlikte ($F = 3,49$; df

= 9, 85; $p = 0,001$), Dunnett çoklu karşılaştırma testine göre hiçbir uygulama grubu negatif kontrolden istatistiksel olarak anlamlı biçimde ayrılmamıştır ($p > 0,05$). Sayısal anlamda en yüksek bitki uzunluğu 53,50 değeri ile SCE + Mi grubunda kaydedilmiş olup en düşük değer 33,40 değeri ile Fost + Mi grubuna ait olmasına rağmen, uygulamalar arasında istatistiksel olarak önemli bir fark tespit edilmediğinden gruplar arasında belirgin bir ayrışma olmadığı belirlenmiştir (Tablo 4.3.).

Tablo 4.3. Uygulamaların bitki boyu üzerine etkisi.

Uygulama*	n	Ortalama Bitki Boyu ($\pm$ SH)	Anlam**
Negatif kontrol	10	42,70 $\pm$ 2,07	referans
SCN kontrol	10	43,00 $\pm$ 3,25	ns
HBN kontrol	10	42,00 $\pm$ 2,03	ns
Mi kontrol	9	47,89 $\pm$ 2,98	ns
Fost + Mi	10	33,40 $\pm$ 3,60	ns
FRE + Mi	10	53,40 $\pm$ 5,76	ns
SCN + Mi	9	47,33 $\pm$ 3,77	ns
HBN + Mi	10	51,20 $\pm$ 3,28	ns
SCE + Mi	8	53,50 $\pm$ 4,63	ns
HBE + Mi	10	51,85 $\pm$ 3,29	ns

*HBN: *H. bacteriophora* canlı IJ uygulaması, HBE: *H. bacteriophora* enfekteli larva uygulaması, SCN: *S. carpocapsae* canlı IJ uygulaması, SCE: *S. carpocapsae* enfekteli larva uygulaması, FRE: Dondurulmuş larva uygulaması, Mi: *M. incognita*

Her uygulama grubu Dunnett testiyle negatif kontrol grubuna karşı karşılaştırılmıştır. * $p < 0,001$ | ** $p < 0,01$ | * $p < 0,05$ | ns = anlamlı fark yok ($p \geq 0,05$).

Bu sonuçlar, EPN uygulamalarının ve *M. incognita* enfeksiyonunun deneme süresi boyunca sürgün gelişimi üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığını göstermektedir. Bitki paraziti nematodları kök sisteminde oluşturdukları beslenme bölgeleri nedeniyle su ve mineral madde alımını sınırlandırarak bitki gelişimini olumsuz etkileyebilmekte, ancak bu etkinin şiddeti bitki türü, nematod yoğunluğu, enfeksiyon süresi ve yetiştirme koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir (Moens ve Perry, 2009). Bu nedenle kök sisteminde meydana gelen fizyolojik bozulmaların her zaman sürgün uzunluğuna aynı düzeyde yansması beklenmemektedir. Özellikle kısa süreli saksı denemelerinde ve kontrollü çevre koşullarında bitki boyunun kök-ur nematodu enfeksiyonuna karşı diğer büyüme parametrelerine göre daha düşük duyarlılık gösterebildiği bildirilmektedir.

Literatürde EPN uygulamalarının bitki uzunluğunu artırdığını bildiren çalışmalar bulunmaktadır. Sayedain vd. (2021) hıyarda hem *S. carpocapsae* hem de *H. bacteriophora* uygulamalarının sürgün uzunluğunu artırdığını rapor etmiştir. Benzer şekilde El Aïmani vd. (2022), bazı *Steinernema* izolatlarının sera koşullarında domates gelişimini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Buna karşın Fallon vd. (2002), *S. riobrave* uygulamalarının domateste bitki boyu üzerinde anlamlı bir değişiklik oluşturmadığını, Caccia vd. (2018) ise EPN'lerin bitki biyokütlesi ve gelişim parametreleri üzerindeki etkilerinin çalışmalar arasında oldukça

değişken olduğunu belirtmiştir. Kusakabe vd. (2023) tarafından *Photorhabdus* kökenli metabolitlerle yapılan çalışmada da sürgün uzunluğu bakımından anlamlı bir farklılık belirlenmemiştir. Bu bulgular, EPN bitki gelişimine olan etkilerinin her zaman tutarlı olmadığını göstermektedir.

Mevcut çalışmada gal ve yumurta paketi sayılarında önemli farklılıklar belirlenmesine rağmen bitki uzunluğunda istatistiksel bir değişim gözlenmemesi, kök bölgesinde meydana gelen biyolojik değişimlerin sürgün gelişimine henüz yansımamış olabileceğini düşündürmektedir. Denemenin iklim kabininde kontrollü sıcaklık, nem ve sulama koşullarında yürütülmüş olması, bitkilerin kök sistemindeki zararı belirli ölçüde telafi etmesine olanak sağlamış olabileceği, ayrıca ölçümlerin inokülasyondan 45 gün sonra yapılmış olması, köklerde meydana gelen fizyolojik değişimlerin sürgün uzaması üzerinde belirgin bir farklılık oluşturması için yeterli süreyi sağlamamış olabileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, tez çalışmasında EPN uygulamalarının bitki uzunluğu üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi belirlenmemiştir. Buna rağmen kök-ur nematoduna ilişkin parametrelerde gözlenen önemli değişiklikler dikkate alındığında, EPN etkisinin öncelikle kök bölgesinde ortaya çıktığı, sürgün gelişimine ait parametrelerin ise bu etkiye daha geç yanıt verdiği değerlendirilmektedir. Bu nedenle bitki uzunluğu tek başına biyolojik mücadele etkinliğini değerlendiren hassas bir gösterge olarak değil, kök ve nematod parametreleriyle birlikte yorumlanmalıdır.

Farklı uygulamaların bitki yaş ağırlığı üzerindeki etkileri incelendiğinde, deneme grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır ($F = 1,972$; $df = 9, 85$; $p = 0,052$). Sayısal olarak en yüksek bitki yaş ağırlığı 31,14 değeri ile SCE + Mi grubunda kaydedilmiş olup en düşük 13,62 değeri ile Fost + Mi grubuna ait olmasına rağmen, uygulamalar arasında istatistiksel olarak önemli bir fark tespit edilmediğinden gruplar arasında belirgin bir ayrışma olmadığı belirlenmiştir (Tablo 4.4.).

Tablo 4.4. Uygulamaların bitki yaş ağırlığı üzerine etkisi.

Uygulama*	n	Ortalama Bitki Yaş Ağırlığı ($\pm$ SH)	Anlam**
Negatif kontrol	10	26,79 $\pm$ 4,94	referans
SCN kontrol	10	20,68 $\pm$ 3,53	ns
HBN kontrol	10	20,99 $\pm$ 2,42	ns
Mi kontrol	9	18,02 $\pm$ 3,19	ns
Fost + Mi	10	13,62 $\pm$ 3,48	ns
FRE + Mi	10	23,19 $\pm$ 5,66	ns
SCN + Mi	9	15,17 $\pm$ 2,79	ns
HBN + Mi	10	21,21 $\pm$ 3,56	ns
SCE + Mi	8	31,14 $\pm$ 3,19	ns
HBE + Mi	10	15,37 $\pm$ 3,23	ns

*HBN: *H. bacteriophora* canlı IJ uygulaması, HBE: *H. bacteriophora* enfekteli larva uygulaması, SCN: *S. carpocapsae* canlı IJ uygulaması, SCE: *S. carpocapsae* enfekteli larva uygulaması, FRE: Dondurulmuş larva uygulaması, Mi: *M. incognita*

Her uygulama grubu Dunnett testiyle negatif kontrol grubuna karşı karşılaştırılmıştır. * $p < 0,001$ | ** $p < 0,01$ | * $p < 0,05$ | ns = anlamlı fark yok ($p \geq 0,05$).

Bu durum, EPN uygulamalarının ve *M. incognita* enfeksiyonunun deneme süresi içerisinde bitkinin toplam yaş biyokütlesini önemli düzeyde etkilemediğini göstermektedir. Dolayısıyla gruplar arasında gözlenen sayısal farklılıklar biyolojik bir üstünlük olarak değil, doğal varyasyon kapsamında değerlendirilmelidir.

Bitki paraziti nematodlarının bitki gelişimi üzerindeki etkisi; enfeksiyon yoğunluğu, bitki türü ve çeşidi, yetiştirme koşulları ile deneme süresine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. Kök-ur nematodları kök sisteminde oluşturdukları beslenme bölgeleri nedeniyle su ve besin elementi alımını sınırlandırabilmekte, bunun sonucunda bitki biyokütlesinde azalma meydana gelebilmektedir. Bununla birlikte, bu etkinin her zaman sürgün gelişimine veya toplam bitki yaş ağırlığına yansımadağı, özellikle kontrollü koşullarda yürütülen kısa süreli denemelerde morfolojik büyüme parametrelerinde istatistiksel farklılık oluşmayabileceğı bildirilmektedir (Moens ve Perry, 2009).

Mevcut bulgular, EPN uygulamalarının bitki biyokütlesi üzerindeki etkilerinin değişken olduğunu bildiren çalışmalarla uyumludur. Fallon vd. (2002), *S. riobrave* uygulamalarının *M. javanica* ile enfekteli domates bitkilerinde bitki gelişimi ve biyokütlesi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir artış oluşturmadığını bildirmiştir. Benzer şekilde Caccia vd. (2018), farklı EPN türlerinin domates bitkilerinde biyokütle üzerine etkilerinin tutarlı olmadığını ve bitki gelişim parametreleri bakımından araştırmalar arasında önemli farklılıklar bulunduğunu belirtmiştir. Ayrıca Kusakabe vd. (2023), *Photorhabdus* kökenli sekonder metabolitlerin *M. incognita*'ya karşı uygulanmasına rağmen bitki yaş ağırlığı ve diğer büyüme parametrelerinde anlamlı değişiklik meydana gelmediğini rapor etmiştir. Bu çalışmalar, EPN uygulamalarının nematod popülasyonunu baskılamasının her zaman bitkinin yaş biyokütlesine doğrudan yansımayaabileceğini göstermektedir. Buna karşılık literatürde EPN uygulamalarının bitki yaş

ağırlığını artırdığını bildiren çalışmalar da bulunmaktadır. Sayedain vd. (2021), hıyar bitkisinde özellikle *S. carpocapsae* ve *H. bacteriophora* uygulamalarının bitki yaş ağırlığını kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde artırdığını rapor etmiştir. Bu çalışmalar mevcut araştırmanın bulgularıyla tam olarak örtüşmemektedir. Bu tez çalışmasında en yüksek bitki yaş ağırlığının SCE + Mi grubunda belirlenmiş olması, istatistiksel olarak desteklenmediğinden yalnızca sayısal bir eğilim olarak değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, bu eğilim enfekteli böcek larvalarının zamanla parçalanarak rizosferde organik madde sağlaması veya EPN simbiyotik bakterilerinin oluşturduğu biyolojik etkinin bitki gelişimine sınırlı düzeyde katkıda bulunmuş olabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada gal sayısı ve yumurta paketi sayısı gibi enfeksiyon parametrelerinde uygulamalara bağlı anlamlı farklılıklar belirlenmesine rağmen, aynı etkinin bitki yaş ağırlığına yansımadağı görülmüştür. Bu durum, kök-ur nematodunun baskılanmasının her zaman kısa dönemde bitkinin morfolojik gelişim parametrelerinde ölçülebilir değişiklikler oluşturmadığını ve domates bitkisinin belirli ölçüde enfeksiyonu telafi edebilme kapasitesine sahip olabileceğini düşündürmektedir. Bu etkinin daha net ortaya konulabilmesi için farklı inokulum yoğunlukları, daha uzun yetiştirme süreleri ve farklı domates genotipleriyle yapılacak çalışmaların yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

Farklı uygulamaların bitki kuru ağırlığı üzerindeki etkileri incelendiğinde, deneme grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunamamıştır ($F = 1,00$; $df = 9, 85$; $p = 0,443$). Sayısal olarak En yüksek bitki kuru ağırlığı 5,04 değeri ile FRE + Mi grubunda kaydedilmiş olup, en düşük değer 2,11 değeri ile negatif kontrol grubuna ait olmasına rağmen, uygulamalar arasında istatistiksel olarak önemli bir fark tespit edilmediğinden gruplar arasında belirgin bir ayrışma olmadığı belirlenmiştir (Tablo 4.5.).

Tablo 4.5. Uygulamaların bitki kuru ağırlığı üzerine etkisi.

Uygulama *	n	Ortalama Bitki Kuru Ağırlığı ($\pm$ SH)	Anlam **
Negatif kontrol	10	2,11 $\pm$ 0,25	referans
SCN kontrol	10	2,92 $\pm$ 0,74	ns
HBN kontrol	10	2,57 $\pm$ 0,34	ns
Mi kontrol	9	4,23 $\pm$ 0,65	ns
Fost + Mi	10	2,88 $\pm$ 0,91	ns
FRE + Mi	10	5,04 $\pm$ 1,98	ns
SCN + Mi	9	2,79 $\pm$ 0,71	ns
HBN + Mi	10	4,05 $\pm$ 0,85	ns
SCE + Mi	8	2,89 $\pm$ 0,49	ns
HBE + Mi	10	3,00 $\pm$ 0,64	ns

*HBN: *H. bacteriophora* canlı IJ uygulaması, HBE: *H. bacteriophora* enfekteli larva uygulaması, SCN: *S. carpocapsae* canlı IJ uygulaması, SCE: *S. carpocapsae* enfekteli larva uygulaması, FRE: Dondurulmuş larva uygulaması, Mi: *M. incognita*

Her uygulama grubu Dunnett testiyle negatif kontrol grubuna karşı karşılaştırılmıştır. * $p < 0,001$ | ** $p < 0,01$ | * $p < 0,05$ | ns = anlamlı fark yok ($p \geq 0,05$).

Deneme grupları arasında istatistiksel bir ayrışmanın bulunmaması, uygulamaların bitki kuru madde birikimi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını göstermektedir. *Meloidogyne* türleri köklerde oluşturdukları dev hücreler nedeniyle su ve mineral madde alımını sınırlandırarak fotosentez ürünlerinin taşınmasını ve kuru madde birikimini azaltabilmektedir (Moens ve Perry, 2009). Bununla birlikte, özellikle kontrollü çevre koşullarında yürütülen kısa süreli denemelerde, kök enfeksiyonunun sürgün biyokütlesine her zaman anlamlı düzeyde yansımadağı da bildirilmektedir. Bu durum, mevcut çalışmada bitki kuru ağırlığında istatistiksel farklılık bulunmamasıyla uyumludur.

Entomopatojen nematodların bitki gelişimine katkısı çoğunlukla doğrudan bir büyüme teşvikinden ziyade, zararlı baskısının azaltılması sonucu ortaya çıkan dolaylı etkiler şeklinde açıklanmaktadır. Ancak bu etkinin her çalışmada ortaya çıkmadağı bilinmemektedir. Fallon vd. (2002), *S. riobrave* uygulamalarının *M. javanica* ile enfekteli domateslerde bitki biyokütlesini anlamlı düzeyde değıştirmediağını bildirmiştir. Benzer şekilde Caccia vd. (2018), farklı EPN türlerinin domateste kuru ağırlık üzerine etkilerinin sınırlı olduunu ve literatürde bu konuda tutarsız sonuçlar bulunduğunu belirtmiştir. Ayrıca Kusakabe vd. (2023), *Photorhabdus* kökenli sekonder metabolitlerin *M. incognita*'ya karşı uygulanmasına rağmen bitkilerin kuru ağırlığında anlamlı bir değışiklik oluşmadiağını rapor etmiştir. Bu çalışmalar, mevcut bulgularla paralellik göstermektedir. Buna karşılık bazı araştırmalarda EPN uygulamalarının bitki biyokütlesini artırdiağı bildirilmektedir. Sayedain vd. (2021), hıyar bitkisinde *S. carpocapsae* ve *H. bacteriophora* uygulamalarının, özellikle enfekteli böcek kadavrası formunda uygulandıında bitki kuru ağırlığını kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde artırdiağını bildirmiştir. Mevcut çalışmada benzer bir etkinin gözlenmemesi; kullanılan EPN türü ve izolatu, denemenin iklim kabininde yürütölmesi, uygulama zamanı, inokulum yoğunluğu ve deneme süresi gibi faktörlerden kaynaklanmış olabileceğı düşünülmektedir.

Araştırmada en yüksek kuru ağırlık değerinin dondurulmuş larva (FRE + Mi) grubunda belirlenmiş olması dikkat çekici olmakla birlikte, bu fark istatistiksel olarak desteklenmediğinden biyolojik bir etki olarak yorumlanmamalıdır. Bununla birlikte, dondurulmuş böcek larvalarının deneme süresi boyunca ayrışarak toprağa organik madde kazandırması ve rizosfer mikrobiyal aktivitesini sınırlı düzeyde etkilemesi, sayısal farklılığın olası nedenlerinden biri olabilir. Ancak bu olasılığın doğrulanabilmesi için toprak mikrobiyal aktivitesi ve besin elementi dinamiklerini değerlendiren ek çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada gal sayısı ve yumurta paketi sayısı gibi nematod enfeksiyon parametrelerinde önemli değışiklikler belirlenmesine rağmen, bu etkinin bitki kuru ağırlığına

yansımadığı görülmüştür. Bu durum, kök düzeyinde meydana gelen biyolojik değişimlerin denemenin 45 günlük süresi içerisinde sürgün biyokütlesini etkileyecek düzeye ulaşmamış olabileceğini ve domates bitkisinin köklerde oluşan zararı belirli ölçüde telafi edebilme kapasitesine sahip olduğunu düşündürmektedir.

Farklı uygulamaların kök uzunluğu üzerindeki etkileri incelendiğinde, deneme grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunamamıştır ($F = 1,31$; $df = 9, 85$; $p = 0,242$). Sayısal olarak en yüksek kök uzunluğu 32,21 değeri ile HBE + Mi grubunda kaydedilmiş olmasına rağmen, uygulamalar arasında istatistiksel olarak önemli bir fark tespit edilmediğinden gruplar arasında belirgin bir ayrışma olmadığı belirlenmiştir (Tablo 4.6.)

Tablo 4.6. Uygulamaların kök uzunluğu üzerine etkisi.

Uygulama*	n	Ortalama Kök Uzunluğu ($\pm$ SH)	Anlam**
Negatif kontrol	10	29,40 $\pm$ 3,77	referans
SCN kontrol	10	27,40 $\pm$ 1,92	ns
HBN kontrol	10	31,60 $\pm$ 1,19	ns
Mi kontrol	9	24,56 $\pm$ 1,65	ns
Fost + Mi	10	25,20 $\pm$ 4,25	ns
FRE + Mi	10	25,30 $\pm$ 2,31	ns
SCN + Mi	9	22,44 $\pm$ 3,04	ns
HBN + Mi	10	29,90 $\pm$ 2,67	ns
SCE + Mi	8	29,87 $\pm$ 1,72	ns
HBE + Mi	10	32,21 $\pm$ 3,70	ns

*HBN: *H. bacteriophora* canlı IJ uygulaması, HBE: *H. bacteriophora* enfekteli larva uygulaması, SCN: *S. carpocapsae* canlı IJ uygulaması, SCE: *S. carpocapsae* enfekteli larva uygulaması, FRE: Dondurulmuş larva uygulaması, Mi: *M. incognita*

Her uygulama grubu Dunnett testiyle negatif kontrol grubuna karşı karşılaştırılmıştır. * $p < 0,001$ | ** $p < 0,01$ | * $p < 0,05$ | ns = anlamlı fark yok ($p \geq 0,05$).

Kök-ur nematodları, kök dokularında oluşturdukları dev hücreler ve beslenme bölgeleri aracılığıyla bitkinin su ve mineral madde alımını bozarak kök gelişimini ve bitki büyümesini olumsuz etkileyebilmektedir (Moens vd., 2009). Bununla birlikte, nematod zararının biyolojik mücadele uygulamaları ile sınırlandırılması durumunda, bitkinin kök sistemini daha etkin şekilde sürdürebildiği ve büyüme parametrelerinde olumlu eğilimler görülebileceği bildirilmektedir (Lewis vd., 2006).

Mevcut çalışmada HBE + Mi grubunda *M. incognita* inokulasyonuna rağmen en yüksek kök uzunluğu değerinin elde edilmesi, *H. bacteriophora* ve simbiyotik bakterisi *Photorhabdus* tarafından oluşturulan biyolojik etkinin kök gelişimi üzerinde olumlu bir ortam sağlamış olabileceğine işaret etmektedir. Nitekim *Photorhabdus* ve *Heterorhabditis* ilişkili metabolitlerin nematod gelişimini baskılayabildiği, ayrıca bitki-mikroorganizma etkileşimleri yoluyla bitki gelişimini dolaylı olarak etkileyebileceği bildirilmektedir (Sayedain vd., 2021). Bununla birlikte, bu etkinin kullanılan nematod türü, izolat özellikleri, uygulama şekli ve çevresel koşullara bağlı olarak değişebildiği belirtilmektedir.

Enfekte böcek kadvralarının kullanıldığı uygulamalarda, kadvra içerisinde bulunan EPN'ler ve simbiyotik bakterilerin yanı sıra, parçalanan böcek dokularının toprağa organik madde sağlaması da rizosfer koşullarını etkileyebilmektedir. Sayedain vd. (2021), *H. bacteriophora* ve *S. carpocapsae* ile kolonize edilmiş böcek kadvralarının kök-ur nematodu ile mücadelede etkili olduğunu ve bazı bitki gelişim parametrelerinde olumlu değişimler oluşturabildiğini bildirmiştir. Bu nedenle mevcut çalışmada HBE + Mi grubunda gözlenen yüksek kök uzunluğu değeri, kadvra uygulamasının hem biyolojik aktivitesi hem de toprak ortamına sağladığı organik katkının birlikte etkisiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Ancak istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunamaması nedeniyle net bir yorum yapılamamaktadır. Bununla birlikte, literatürde EPN uygulamalarının bitki gelişim parametreleri üzerindeki etkilerinin her zaman aynı yönde olmadığı görülmektedir. Fallon vd. (2002), *M. javanica* ile enfekte domates bitkilerinde *S. riobrave* uygulamalarının kök gelişimi ve bitki büyümesi üzerinde her zaman istatistiksel olarak anlamlı artış sağlamadığını bildirmiştir. Benzer şekilde, Caccia vd. (2018), farklı EPN türlerinin bitki biyokütlesi ve gelişim parametreleri üzerindeki etkilerinin değişken olduğunu ve bu etkilerin çevresel koşullar ile kullanılan biyolojik ajanın özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebildiğini belirtmiştir.

Sonuç olarak, çalışmamızda HBE + Mi grubunda gözlenen yüksek kök uzunluğu değeri, *H. bacteriophora* uygulamasının kök gelişimi üzerinde potansiyel olumlu bir etkisi olabileceğini düşündürmektedir. Ancak istatistiksel farklılığın bulunmaması nedeniyle bu etkinin kesin bir biyolojik üstünlük olarak değerlendirilmesi uygun değildir. Bu etkinin daha net ortaya konulabilmesi için farklı dozların, uygulama zamanlarının ve daha uzun yetiştirme sürelerinin değerlendirildiği çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Farklı uygulamaların kök yaş ağırlığı üzerindeki etkileri incelendiğinde, deneme grupları arasında istatistiksel olarak önemli farklılıklar belirlenmiştir ($F = 2.17$; $df = 9, 85$; $p = 0.031$). En yüksek kök yaş ağırlığı 7,38 değeri ile HBN + Mi uygulamasında kaydedilmiştir. En düşük sayısal değer 2,72 ile Fost + Mi grubuna ait olmasına rağmen, bu grup ile diğer uygulamalar arasında istatistiksel olarak önemli bir fark tespit edilmemiştir (Tablo 4.7.).

Tablo 4.7. Uygulamaların kök ağırlığı üzerine etkisi.

Uygulama*	n	Ortalama Kök Ağırlığı ($\pm$ SH)	Anlam**
Negatif kontrol	10	3,61 $\pm$ 0,58	referans
SCN kontrol	10	4,34 $\pm$ 1,08	ns
HBN kontrol	10	4,53 $\pm$ 0,44	ns
Mi kontrol	9	5,56 $\pm$ 0,77	ns
Fost + Mi	10	2,72 $\pm$ 0,70	ns
FRE + Mi	10	5,65 $\pm$ 1,14	ns
SCN + Mi	9	5,96 $\pm$ 1,60	ns
HBN + Mi	10	7,38 $\pm$ 1,24	*
SCE + Mi	8	6,87 $\pm$ 0,98	ns
HBE + Mi	10	5,58 $\pm$ 0,99	ns

*HBN: *H. bacteriophora* canlı IJ uygulaması, HBE: *H. bacteriophora* enfekteli larva uygulaması, SCN: *S. carpocapsae* canlı IJ uygulaması, SCE: *S. carpocapsae* enfekteli larva uygulaması, FRE: Dondurulmuş larva uygulaması, Mi: *M. incognita*

Her uygulama grubu Dunnett testiyle negatif kontrol grubuna karşı karşılaştırılmıştır. * $p < 0,001$ | ** $p < 0,01$ | * $p < 0,05$ | ns = anlamlı fark yok ($p \geq 0,05$).

En yüksek kök yaş ağırlığı canlı *H. bacteriophora* uygulanan HBN + Mi grubunda elde edilirken, en düşük değer Fost + Mi grubunda belirlenmiştir. Buna karşın, gal sayısı bakımından en yüksek değer SCN + Mi grubunda, yumurta paketi sayısı bakımından ise SCE + Mi grubunda saptanmıştır. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, kök yaş ağırlığındaki artışın yalnızca kök-ur nematodunun oluşturduğu gal dokularından kaynaklanmadığı anlaşılmaktadır. Eğer kök yaş ağırlığındaki artışın temel nedeni gal dokularının oluşturduğu hipertrofi olsaydı, en yüksek kök yaş ağırlığının gal sayısının en fazla olduğu SCN + Mi grubunda belirlenmesi beklenirdi. Benzer şekilde, yumurta paketi sayısının en yüksek olduğu SCE + Mi grubunda da en yüksek kök yaş ağırlığının elde edilmemesi, kök biyokütlesi ile nematodun üreme başarısı arasında doğrudan bir ilişki bulunmadığını göstermektedir.

Kök yaş ağırlığı yalnızca gal dokularının oluşturduğu patolojik büyümeyi değil, aynı zamanda bitkinin fonksiyonel kök sistemini de yansıtan bir parametredir. Bu nedenle HBN + Mi grubunda belirlenen yüksek kök yaş ağırlığı, *H. bacteriophora* uygulamasının kök sisteminin korunmasına veya yeni kök oluşumunun teşvik edilmesine katkı sağlamış olabileceğini düşündürmektedir. Entomopatojen nematodların ve simbiyotik bakterilerinin rizosfer mikrobiyotasını değiştirebildiği, bitkide indüklenmiş sistemik dayanıklılığı uyurabildiği ve bunun sonucunda kök gelişimini dolaylı olarak destekleyebildiği bildirilmektedir (Gondal vd., 2024; Sayedain vd., 2021). Bu mekanizma sayesinde, gal oluşumu tamamen engellenmemiş olsa bile bitki kök biyokütlesinin korunabilmesi mümkün olabilmektedir.

Literatürde de *H. bacteriophora*'nın kök gelişimini destekleyebildiğine ilişkin bulgular bulunmaktadır. El Aïmani vd. (2022), domates bitkisinde bazı *H. bacteriophora* izolatlarının kök yaş ağırlığını artırabildiğini ve bu etkinin kullanılan izolata bağlı olarak değiştiğini

bildirmiştir. Benzer şekilde Sayedain vd. (2021), hıyar bitkisinde *S. carpocapsae* ve *H. bacteriophora* uygulamalarının, özellikle enfekteli böcek kadavrası formunda uygulandığında kök yaş ağırlığını artırdığını rapor etmiştir. Buna karşın mevcut çalışmada en yüksek kök yaş ağırlığının yalnızca canlı *H. bacteriophora* uygulamasında belirlenmesi, EPN türlerinin bitki kök sistemi üzerindeki etkilerinin türe, kullanılan izolata, uygulama şekline ve deneme koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebileceğini düşündürmektedir.

Araştırmada en düşük kök yaş ağırlığının Fost + Mi grubunda belirlenmesi de dikkat çekicidir. Kimyasal nematisit uygulamaları nematod popülasyonunu baskılayabilmekle birlikte, rizosferde biyolojik aktiviteyi destekleyici veya kök gelişimini teşvik edici etkiler göstermeyebilir. Ayrıca, Fost + Mi grubunda gözlenen düşük kök yaş ağırlığı, fosthiazate uygulamasının bitkide oluşturabileceği olası fitotoksik etkilerle de ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Nitekim bu uygulamada kök gelişiminin yanı sıra bitki boyunda da diğer uygulamalara kıyasla daha düşük değerlerin elde edilmesi, kimyasal uygulamanın bitki gelişimini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.

Farklı uygulamalar arasında kök kuru ağırlığı bakımından anlamlı farklılıklar belirlenmiştir ($F = 4,98$; $df = 9, 85$; $p < 0,001$). En yüksek kök kuru ağırlığı 0,77 ile HBN + Mi uygulamasında, en düşük kök kuru ağırlığı ise 0,13 ile Fost + Mi uygulamasında saptanmıştır. Negatif kontrole göre SCN + Mi, HBN + Mi ve SCE + Mi uygulamalarında kök kuru ağırlığı anlamlı düzeyde artarken, diğer uygulamalar ile negatif kontrol arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık belirlenmemiştir (Tablo 4.8.).

Tablo 4.8. Uygulamaların kök kuru ağırlığı üzerine etkisi.

Uygulama*	n	Ortalama Kök kuru ağırlığı ($\pm$ SH)	Anlam**
Negatif kontrol	10	0,19 $\pm$ 0,03	referans
SCN kontrol	10	0,25 $\pm$ 0,05	ns
HBN kontrol	10	0,28 $\pm$ 0,03	ns
Mi kontrol	9	0,45 $\pm$ 0,05	ns
Fost + Mi	10	0,13 $\pm$ 0,04	ns
FRE + Mi	10	0,38 $\pm$ 0,09	ns
SCN + Mi	9	0,59 $\pm$ 0,17	*
HBN + Mi	10	0,77 $\pm$ 0,15	***
SCE + Mi	8	0,63 $\pm$ 0,13	*
HBE + Mi	10	0,50 $\pm$ 0,10	ns

*HBN: *H. bacteriophora* canlı IJ uygulaması, HBE: *H. bacteriophora* enfekteli larva uygulaması, SCN: *S. carpocapsae* canlı IJ uygulaması, SCE: *S. carpocapsae* enfekteli larva uygulaması, FRE: Dondurulmuş larva uygulaması, Mi: *M. incognita*

Her uygulama grubu Dunnett testiyle negatif kontrol grubuna karşı karşılaştırılmıştır. * $p < 0,001$ | ** $p < 0,01$ | * $p < 0,05$ | ns = anlamlı fark yok ($p \geq 0,05$).

Dikkat çekici olarak, HBN + Mi grubunda en yüksek kök kuru ağırlığının belirlenmesine rağmen bu uygulamada ne gal sayısı ne de yumurta paketi sayısı en yüksek düzeyde bulunmuştur. Eğer kök kuru ağırlığındaki artışın temel nedeni kök-ur nematodunun

oluşturduğu gal dokularının biyokütlesi olsaydı, en yüksek kök kuru ağırlığının gal sayısının en fazla olduğu SCN + Mi grubunda belirlenmesi beklenirdi. Benzer şekilde, yumurta paketi sayısının en yüksek olduğu SCE + Mi grubunda da kök kuru ağırlığının en yüksek değere ulaşmaması, kök kuru biyokütlesindeki artışın yalnızca nematod enfeksiyonuna bağlı patolojik dokulardan kaynaklanmadığını göstermektedir.

Bu sonuç, kök yaş ağırlığı bulgularıyla birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı hale gelmektedir. Aynı uygulamada hem kök yaş ağırlığının hem de kök kuru ağırlığının en yüksek değerleri vermesi, gözlenen artışın yalnızca köklerde su tutulmasından kaynaklanmadığını, gerçek bir kuru madde birikiminin de gerçekleştiğini düşündürmektedir. Kuru ağırlık su içeriğinden bağımsız olarak değerlendirildiğinden, her iki parametrede de benzer eğilimin görülmesi, *H. bacteriophora* uygulamasının kök sisteminin gelişimini desteklemiş veya kök-ur nematodunun neden olduğu zarara rağmen kök biyokütlesinin korunmasına katkı sağlamış olabileceğine işaret etmektedir.

Bitki paraziti nematodları köklerde oluşturdukları beslenme bölgeleri nedeniyle su ve mineral madde alımını olumsuz etkileyerek zamanla kök gelişimini ve kuru madde birikimini azaltabilmektedir (Moens vd., 2009). Buna karşılık, EPN'lerin rizosferde oluşturdukları biyolojik etkileşimler ve simbiyotik bakterileri aracılığıyla bitki savunma mekanizmalarını uyarabildikleri, bunun da kök gelişiminin korunmasına dolaylı katkı sağlayabileceği bildirilmektedir (Guyer vd., 2021). Bu mekanizmalar mevcut çalışmada HBN + Mi grubunda belirlenen yüksek kök biyokütlesini açıklayabilecek olası nedenler arasında değerlendirilebilir.

Literatürde de benzer bulgular yer almaktadır. Sayedain vd. (2021), *M. javanica* ile enfekteli hıyar bitkilerinde canlı *H. bacteriophora* uygulamalarının kök kuru ağırlığını enfekte kontrole göre anlamlı düzeyde artırdığını bildirmiştir. Benzer şekilde El Aïmani vd. (2022), domates bitkisinde bazı *H. bacteriophora* izolatlarının kök gelişimini desteklediğini ve kök biyokütlesini artırabildiğini rapor etmiştir. Mevcut çalışmada da en yüksek kök yaş ve kuru ağırlık değerlerinin aynı uygulamada belirlenmesi, *H. bacteriophora*'nın kök sistemi üzerinde olumlu bir etki oluşturabileceğini düşündürmekle birlikte, bu etkinin kullanılan izolatın özellikleri, uygulama zamanı ve denemenin iklim kabini koşulları gibi faktörlerden etkilenmiş olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Genel olarak sonuçlar incelendiğinde, farklı EPN türleri ve uygulama şekillerinin *M. incognita* ile enfekte domates bitkileri üzerindeki etkileri, nematod gelişimi ve bitki gelişim parametreleri birlikte değerlendirilerek ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, EPN'lerin etkinliğinin kullanılan türe ve uygulama şekline bağlı olarak değiştiğini göstermiştir.

Nematolojik parametreler değerlendirildiğinde, uygulamaların gal ve yumurta paketi oluşumu üzerinde farklı düzeylerde etkiler meydana getirdiği belirlenmiştir. Gal oluşumu ile yumurta paketi sayısının her zaman aynı yönde değişmemesi, bu iki parametrenin kök-ur nematodunun farklı biyolojik süreçlerini temsil ettiğini göstermiştir. Bu kapsamda özellikle *H. bacteriophora* uygulaması, nematodun üreme kapasitesinin sınırlandırılması açısından dikkat çekici sonuçlar ortaya koymuştur.

Bitki gelişim özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, uygulamaların sürgün gelişimi ile ilişkili parametrelerde (bitki uzunluğu, bitki yaş ve kuru ağırlığı) belirgin bir farklılık oluşturmadığı, buna karşılık kök gelişimi ile ilişkili özelliklerde daha belirgin etkiler meydana getirdiği görülmüştür. Özellikle canlı *H. bacteriophora* uygulamasında kök yaş ve kuru ağırlığının en yüksek değerlerde bulunması, bu uygulamanın kök sisteminin korunması ve gelişimi üzerinde olumlu bir etkisi olabileceğine işaret etmektedir.

Diğer taraftan, *S. carpocapsae* uygulamalarının bazı büyüme parametrelerinde yüksek değerler oluşturmalarına rağmen, nematodun üreme parametreleri açısından aynı düzeyde baskılayıcı etki göstermemesi, entomopatojen nematod türleri arasında biyolojik etkinlik bakımından farklılıklar bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, EPN uygulamalarının başarısının yalnızca tür düzeyinde değil, kullanılan izolat, uygulama formu ve çevresel koşulların birlikte etkisiyle şekillendiğini göstermektedir.

Genel değerlendirme sonucunda, bu çalışma koşullarında canlı *H. bacteriophora* uygulaması *M. incognita*'nın üreme potansiyelini sınırlandırması ve kök gelişimi ile ilişkili parametrelerde olumlu sonuçlar oluşturmaları nedeniyle en umut verici uygulama olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, EPN'lerin bitki ve nematod arasındaki etkileşimlerde hangi mekanizmalarla etkili olduğunun daha iyi anlaşılabilmesi için farklı doz, uygulama zamanları ve rizosfer mikrobiyolojisini kapsayan ileri çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı EPN türleri ve uygulama şekillerinin kök-ur nematodu *M. incognita* ile enfekteli domates bitkileri üzerindeki etkileri, nematod ve bitki gelişim parametreleri birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, EPN'lerin kök-ur nematodlarına karşı gösterdiği etkinliğin kullanılan türe ve uygulama şekline bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur.

Bitki paraziti nematodlar açısından yapılan değerlendirmelerde, uygulamaların gal oluşumu ve yumurta paketi sayısı üzerinde farklı düzeylerde etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Gal sayısı ile yumurta paketi sayısının her zaman paralel değişmemesi, bu iki parametrenin kök-ur nematodunun farklı biyolojik süreçlerini yansıttığını göstermektedir. Özellikle *H. bacteriophora* enfekteli kadavra uygulaması, gal sayısını azaltmasının yanı sıra yumurta paketi oluşumunu da azaltarak *M. incognita*'nın üreme potansiyelinin sınırlandırılmasında en başarılı uygulama olarak öne çıkmıştır.

Bitki gelişim parametreleri değerlendirildiğinde, uygulamaların bitki boyu ile sürgün yaş ve kuru ağırlıkları üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığı, buna karşın kök gelişimine ait özelliklerde daha belirgin farklılıklar meydana getirdiği belirlenmiştir. *Heterorhabditis bacteriophora* IJ uygulamasında kök yaş ve kuru ağırlıklarının en yüksek değerlerde bulunması, bu türün kök sisteminin korunması ve gelişiminin desteklenmesine katkı sağlayabileceğini düşündürmektedir. Buna karşılık *Steinernema carpocapsae* IJ uygulamaları bazı bitki gelişim parametrelerinde olumlu sonuçlar vermiş olsa da, kök-ur nematodunun üreme parametrelerini baskılamada aynı düzeyde etkinlik göstermemiştir.

Araştırma sonuçları, EPN'lerin bitki paraziti nematodların biyolojik mücadelesinde kullanılabilecek önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, elde edilen etkinliğin yalnızca türe bağlı olmadığı; uygulama şekli, uygulama zamanı ve çevresel koşullar gibi faktörlerden de etkilendiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışma kontrollü iklim kabini koşullarında yürütülmüş olup, elde edilen bulguların tarla ve sera koşullarında doğrulanması gerekmektedir. Ayrıca farklı EPN türleri ve izolatlarının farklı dozlar, uygulama zamanları ve uygulama yöntemleri ile değerlendirilmesi, biyolojik mücadelede optimum uygulama stratejilerinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır. Çalışmada her iki EPN türü aynı dozda uygulanmıştır. Ancak türler arasında etkinlik, konukçu arama davranışı ve biyolojik özellikler bakımından farklılıklar bulunması nedeniyle optimum uygulama dozlarının da farklı olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmalarda her tür için farklı uygulama dozlarının ayrı ayrı belirlenmesi, biyolojik

m¼cadele etkinliğinin daha doğru değerlendirilmesine ve optimum uygulama dozlarının ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca EPN'lerin bitki paraziti nematodlar ¼zerindeki etkilerinin altında yatan mekanizmaların; simbiyotik bakteriler, salgılanan biyolojik aktif bileşikler, rizosfer mikrobiyotası ve bitki savunma yanıtları açısından molek¼ler ve mikrobiyolojik yöntemlerle araştırılması, bu organizmaların biyolojik m¼cadeledeki rol¼n¼n daha iyi anlaşılmaya katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Aatif, H., Javed, N., Khan, S., & Ahmed, S. (2012). Virulence of *Xenorhabdus* and *Photorhabdus* bacteria and their toxins against juvenile's immobilization of *Meloidogyne incognita*. *Pakistan Journal of Phytopathology*, 24(2), 170-174.
- 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>
- Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology* (5th ed). Elsevier Academic Press.
- Ali, M. Y., Sina, A. A. I., Khandker, S. S., Neesa, L., Tanvir, E. M., Kabir, A., Khalil, M. I., & Gan, S. H. (2020). Nutritional Composition and Bioactive Compounds in Tomatoes and Their Impact on Human Health and Disease: A Review. *Foods*, 10(1), 45. <https://doi.org/10.3390/foods10010045>
- Aydınlı, G., & Civelek, C. (2018). Kök-Ur Nematodu *Meloidogyne luci* 'nin Farklı Populasyon Yoğunluklarının Domates Gelişimine ve Nematod Üremesine Etkileri. *Bitki Koruma Bülteni*, 58(2), 111-121. <https://doi.org/10.16955/bitkorb.415169>
- Aydınlı, G., & Mennan, S. (2016). Identification of root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) from greenhouses in the Middle Black Sea Region of Turkey. *Turkish Journal of Zoology*, 40, 675-685. <https://doi.org/10.3906/zoo-1508-19>
- Bedding, R. A., & Akhurst, R. J. (1975). A simple technique for the detection of insect paristic 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/PAVSNR201813058>
- Blanco-Pérez, R., San-Blas, E., Rivera, M. J., & Campos-Herrera, R. (2025). Population ecology of entomopathogenic nematodes: Bridging past insights and future applications for sustainable agriculture. *Journal of Invertebrate Pathology*, 211, 108313. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2025.108313>
- Bozbuğa, R. (2021). Commonalities of Molecular Response in Tomato Plants against Parasitic Nematodes. *Biology Bulletin*, 48(2), S12-S21. <https://doi.org/10.1134/S1062359021150036>
- Bridge, J., & Starr, J. L. (2007). Plant nematodes of agricultural importance: A colour handbook. Manson publ.
- Caccia, M., Marro, N., Dueñas, J. R., Doucet, M. E., & Lax, P. (2018). Effect of the entomopathogenic nematode-bacterial symbiont complex on *Meloidogyne hapla* and *Nacobbus aberrans* in short-term greenhouse trials. *Crop Protection*, 114, 162-166. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.07.016>
- Campbell, J. F., & Kaya, H. K. (2000). Influence of insect associated cues on the jumping behavior of entomopathogenic nematodes (*Steinernema* spp.). *Behaviour*, 137(5), 591-609. <https://doi.org/10.1163/156853900502231>
- Campos-Herrera, R., del Mar González-Trujillo, M., Vicente-Díez, I., Carpennero, E., Puelles, M., Vaquero, E., & Cepulyte, R. (2023). Exploring entomopathogenic nematodes for the management of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) in vineyards: Fine-tuning of application, target area, and timing. *Crop Protection*, 106392. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106392>
- Chitwood, D. J. (2003). Research on plant-parasitic nematode biology conducted by the United States Department of Agriculture–Agricultural Research Service. *Pest Management Science*, 59(6-7), 748-753. <https://doi.org/10.1002/ps.684>

- Cook, R., & Starr, J. L. (2006). Resistant cultivars. İçinde R. N. Perry & M. Moens (Ed.), *Plant nematology* (1. bs., ss. 370-391). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845930561.0370>
- Dai, K., Cao, L., Huang, Z., Gu, X., Cui, Y., Li, J., Li, Y., Xu, C., & Han, R. (2022). Influence of entomopathogenic nematodes, symbiotic bacteria and ascarosides on the dispersal behaviour of *Meloidogyne incognita*. *Nematology*, 24(9), 971-981. <https://doi.org/10.1163/15685411-bja10184>
- DeBach, P. (1964). *Biological Control of Insect Pests and Weeds*. Reinhold Publishing Corporation.
- DeBach, P., & Rosen, D. (1991). *Biological control by natural enemies* (2nd ed). Cambridge university press.
- Decraemer, W., & Hunt, D. J. (2006). Structure and classification. İçinde R. N. Perry & M. Moens (Ed.), *Plant nematology* (1. bs., ss. 3-32). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845930561.0003>
- 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>
- Desaeger, J., Wram, C., & Zasada, I. (2020). New reduced-risk agricultural nematicides—Rationale and review. *Journal of Nematology*, 52(1), 1-16. <https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-091>
- Devi, G. (2018). Mass production of entomopathogenic nematodes—A review. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 3(3), 1032-1043. <https://doi.org/10.22161/ijeab/3.3.41>
- 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>
- Dunn, M., & Malan, A. (2023). In vitro liquid mass production of a South African isolate of *Heterorhabditis zealandica*. *African Entomology*, 31. <https://doi.org/10.17159/2254-8854/2023/a16150>
- Ehlers, R.-U. (2001). Mass production of entomopathogenic nematodes for plant protection. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 56(5-6), 623-633. <https://doi.org/10.1007/s002530100711>
- Eilenberg, J., Hajek, A., & Lomer, C. (2001). Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*, 46(4), 387-400. <https://doi.org/10.1023/A:1014193329979>
- El Aïmani, A., Houari, A., Laasli, S.-E., Mentag, R., Iraqi, D., Diria, G., Khayi, S., Lahlali, R., Dababat, A. A., & Mokrini, F. (2022). Antagonistic potential of Moroccan entomopathogenic nematodes against root-knot nematodes, *Meloidogyne javanica* on tomato under greenhouse conditions. *Scientific Reports*, 12(1), Makale 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07039-0>
- 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>
- Erdoğan, H., & Ulu, T. C. (2024). Evaluating a portable method and two irrigation drippers for field application of entomopathogenic nematodes. *Yüzüncü Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 138-150. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1389512>

- Erdoğan, H., Ulu, T. C., & Kuşçu, H. (2020). The effect of different dripper properties on entomopathogenic nematode application in drip irrigation. *KSU Journal of Agriculture and Nature*, 23(1), 230-236. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdogavi.533723>
- Fallon, D. J., Kaya, H. K., Gaugler, R., & Sipes, B. S. (2002). Effects of entomopathogenic nematodes on *Meloidogyne javanica* on tomatoes and soybeans. *Journal of Nematology*, 34(3), 239-245.
- 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) (2026). Plant Production and Protection. [Erişim: 26.05.2026 <https://www.fao.org/plant-production-protection/about/en>].
- Forghani, F., & Hajihassani, A. (2020). Recent Advances in the Development of Environmentally Benign Treatments to Control Root-Knot Nematodes. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01125>
- Friedman, M. J. (2018). Commercial production and development. İçinde *Entomopathogenic Nematodes in Biological Control* (ss. 153-172). CRC Press Inc. <https://doi.org/10.1201/9781351071741>
- Gaugler, R. (2002). Entomopathogenic nematology. İçinde R. Gaugler (Ed.), *Entomopathogenic nematology*. CABI. <https://doi.org/10.1079/9780851995670.0000>
- Georgis, R. (2018). Formulation and application technology. İçinde *Entomopathogenic Nematodes in Biological Control* (ss. 173-192). CRC Press Inc. <https://doi.org/10.1201/9781351071741>
- Gondal, M. S., Mukhtar, T., Irshad, G., & Khanum, T. A. (2024). Efficacy of Entomopathogenic Nematode (*Steinernema pakistanense*) in Suppressing Root-Knot Nematode (*Meloidogyne incognita*) on Tomato. *International Journal of Phytopathology*, 13(3), 219-232. <https://doi.org/10.33687/phytopath.013.03.5382>
- Goode, K., & Mitchum, M. G. (2022). Pattern-triggered immunity against root-knot nematode infection: A minireview. *Physiologia Plantarum*, 174(2), e13680. <https://doi.org/10.1111/ppl.13680>
- Goodrich-Blair, H., & Clarke, D. J. (2007). Mutualism and pathogenesis in *Xenorhabdus* and *Photorhabdus*: Two roads to the same destination. *Molecular Microbiology*, 64(2), 260-268. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2007.05671.x>
- 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>
- Grewal, P. S., Ehlers, R. U., & Shapiro-Ilan, D. I. (2005). Nematodes as biocontrol agent. İçinde *Nematodes as Biocontrol Agent*. <https://doi.org/10.21273/hortsci.46.2.333a>
- 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>
- Grewal, P. S., Wang, X., & Taylor, R. A. J. (2002). Dauer juvenile longevity and stress tolerance in natural populations of entomopathogenic nematodes: Is there a relationship? *International Journal for Parasitology*, 32(6), 717-725. [https://doi.org/10.1016/S0020-7519\(02\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7519(02)00029-2)
- Güvenç, İ. (2019). Türkiye’de Domates Üretimi, Dış Ticareti ve Rekabet Gücü. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22(1), 57-61. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdogavi.432316>
- Guyer, A., van Doan, C., Maurer, C., Machado, R. A. R., Mateo, P., Steinauer, K., Kesner, L., Hoch, G., Kahmen, A., Erb, M., & Robert, C. A. M. (2021). Climate Change Modulates

- Multitrophic Interactions Between Maize, A Root Herbivore, and Its Enemies. *Journal of Chemical Ecology*, 47(10), 889-906. <https://doi.org/10.1007/s10886-021-01303-9>
- Hajihassani, A., Davis, R. F., & Timper, P. (2019). Evaluation of Selected Nonfumigant Nematicides on Increasing Inoculation Densities of *Meloidogyne incognita* on Cucumber. *Plant Disease*, 103(12), 3161-3165. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-19-0836-RE>
- 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>
- Hu, K., Li, J., & Webster, J. M. (1999). Nematicidal metabolites produced by *Photorhabdus luminescens* (Enterobacteriaceae), bacterial symbiont of entomopathogenic nematodes. *Nematology*, 1(5), 457-469. <https://doi.org/10.1163/156854199508469>
- İmren, M., & Yüksel, E. (2024). Activity of Fosthiazate Against Root-Knot Nematode, *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) Chitwood (Nemata: Heteroderidae) on Tomato and Pepper in Greenhouse Conditions. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 10(3), 358-363. <https://doi.org/10.24180/ijaws.1452905>
- 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>
- Jones, J. T., Haegeman, A., Danchin, E. G. J., Gaur, H. S., Helder, J., Jones, M. G. K., Kikuchi, T., Manzanilla-López, R., Palomares-Rius, J. E., Wesemael, W. M. L., & Perry, R. N. (2013). Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 14(9), 946-961. <https://doi.org/10.1111/mpp.12057>
- 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>
- Karssen, G., & Moens, M. (2006). Root-knot nematodes. İçinde R. N. Perry & M. Moens (Ed.), *Plant nematology* (1. bs., ss. 59-90). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845930561.0059>
- Kaya, H. K., & Gaugler, R. (1993). Entomopathogenic nematodes. *Annual Review of Entomology*, 38(1), 181-206. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.38.010193.001145>
- 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>
- Kaymak, H. Ç., Güvenç, İ., & Dursun, A. (2011). Türkiye’de Sebze Tarımının Mevcut Durumu, Önemli Bazı Gelişmeler ve Çözüm Önerileri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 36(2), 227-234.
- Kılıç, T. (2010). First record of *Tuta absoluta* in Turkey. *Phytoparasitica*, 38(3), 243-244. <https://doi.org/10.1007/s12600-010-0095-7>
- 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.
- 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>

- Kusakabe, A., Molnár, I., & Stock, S. P. (2023). *Photorhabdus* -derived secondary metabolites reduce root infection by *Meloidogyne incognita* in cowpea. *Plant Disease*, PDIS-11-22-2574-SC. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-22-2574-SC>
- Kusakabe, A., Wang, C., Xu, Y., Molnár, I., & Stock, S. P. (2022). Selective toxicity of secondary metabolites from the entomopathogenic bacterium *Photorhabdus luminescens* sonorensis against selected plant parasitic nematodes of the Tylenchina suborder. *Microbiology Spectrum*, 10(1), e02577-21. <https://doi.org/10.1128/spectrum.02577-21>
- 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.
- Lewis, E. E., Campbell, J., Griffin, C. T., Kaya, H., & Peters, A. (2006). Behavioral ecology of entomopathogenic nematodes. *Biological Control*, 38(1), 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.11.007>
- Lewis, E. E., Grewal, P. S., & Sardanelli, S. (2001). Interactions between the *Steinernema feltiae*-*Xenorhabdus bovienii* Insect Pathogen Complex and the Root-Knot Nematode *Meloidogyne incognita*. *Biological Control*, 21(1), 55-62. <https://doi.org/10.1006/bcon.2001.0918>
- 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, J., Li, Y., Wei, X., Cui, Y., Gu, X., Li, X., Yoshiga, T., Abd-Elgawad, M. M., Shapiro-Ilan, D. I., Ruan, W., & Rasmann, S. (2023). Direct antagonistic effect of entomopathogenic nematodes and their symbiotic bacteria on root-knot nematodes migration toward tomato roots. *Plant and Soil*, 484(1), 441-455. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05808-4>
- 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>
- 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>
- Mbaluto, C. M., Ahmad, E. M., Mädicke, A., Grosser, K., van Dam, N. M., & Martínez-Medina, A. (2021). Induced Local and Systemic Defense Responses in Tomato Underlying Interactions Between the Root-Knot Nematode *Meloidogyne incognita* and the Potato Aphid *Macrosiphum euphorbiae*. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.632212>
- Moen, M., & Perry, R. N. (2009). Migratory Plant Endoparasitic Nematodes: A Group Rich in Contrasts and Divergence. *Annual Review of Phytopathology*, 47(1), 313-332. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080508-081846>

- Moens, M., Perry, R. N., & Starr, J. L. (2009). Meloidogyne species—A diverse group of novel and important plant parasites. *İçinde Root-knot nematodes* (ss. 1-17). <https://doi.org/10.1079/9781845934927.0001>
- Moodley, V., Gubba, A., & Mafongoya, P. L. (2019). A survey of whitefly-transmitted viruses on tomato crops in South Africa. *Crop Protection*, 123, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.018>
- Öncüer, C. (1991). Türkiye bitki zararlısı böceklerinin parazit ve predatör kataloğu. İçinde C. Öncüer (Ed.), *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No* (1.bsm). Ege Üniversitesi Ziraat Fak. <https://10.6.60.10/pdfmarc?image=fb99ac32199720f35200b212d7e6f2f4>
- Pacule, H. B., Vanegas, J. A. G., Terra, W. C., Campos, V. P., & Oliveira, D. F. (2022). (R)-Carvone is a potential soil fumigant against *Meloidogyne incognita* whose likely enzymatic target in the nematode is acetylcholinesterase. *Experimental Parasitology*, 241, 108359. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2022.108359>
- Pérez, E. E., & Lewis, E. E. (2002). Use of entomopathogenic nematodes to suppress *Meloidogyne incognita* on greenhouse tomatoes. *Journal of Nematology*, 34(2), 171-174.
- Pérez, E. E., & Lewis, E. E. (2004). Suppression of *Meloidogyne incognita* and *Meloidogyne hapla* with entomopathogenic nematodes on greenhouse peanuts and tomatoes. *Biological Control*, 30(2), 336-341. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.01.001>
- 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>
- Phani, V., Khan, M. R., & Dutta, T. K. (2021). Plant-parasitic nematodes as a potential threat to protected agriculture: Current status and management options. *Crop Protection*, 144, 105573. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105573>
- Priya, M. S., Prabhu, S., Ahiladevi, P., Sharmila, R., & Mathirajan, V. (2026). Harnessing the biocontrol potential of entomopathogenic nematode, *Steinernema* species for the management of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* in tomato (*Solanum lycopersicum* L). *International Journal of Farm Sciences*, 16(1), 43-49. <https://doi.org/10.5958/2250-0499.2026.00006.2>
- Ramakuwela, T., Tarasco, E., Chavarria-Hernández, N., & Toepfer, S. (2025). Entomopathogenic nematodes: Commercial use and future perspectives. *Journal of Invertebrate Pathology*, 212, 108388. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2025.108388>
- 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>
- Rao, A. V., & Agarwal, S. (2000). Role of Antioxidant Lycopene in Cancer and Heart Disease. *Journal of the American College of Nutrition*, 19(5), 563-569. <https://doi.org/10.1080/07315724.2000.10718953>
- Şahin, Y. S., Bouhari, A., Ulu, T. C., Sadiç, 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>
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 430-439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
- Sayedain, F. S., Ahmadzadeh, M., Fattah-Hosseini, S., & Bode, H. B. (2021). Soil application of entomopathogenic nematodes suppresses the root-knot nematode *Meloidogyne*

- javanica* in cucumber. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 128(1), 215-223. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00367-1>
- Sayedain, F. S., Talaei-Hassanloui, R., Olia, M., & Bode, H. B. (2019). Nematicidal effect of cell-free culture filtrates of EPN- symbiotic bacteria on plant parasitic nematode *Meloidogyne javanica*. *Biological Control of Pests and Plant Diseases*, 8(1), 17-26. <https://doi.org/10.22059/jbioc.2018.244323.212>
- 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.
- Shapiro-Ilan, D. I., Ment, D., Ramakrishnan, J., Rodríguez Hernández, M. G., & Duncan, L. W. (2025). A century of advancement in entomopathogenic nematode formulation and application technology. *Journal of Invertebrate Pathology*, 212, 108389. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2025.108389>
- Sharma, M. P., Sharma, A. N., & Hussaini, S. S. (2011). Entomopathogenic nematodes, a potential microbial biopesticide: Mass production and commercialisation status—A mini review. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 44(9), 855-870. <https://doi.org/10.1080/03235400903345315>
- Sikora, R. A., & Fernández, E. (2005). Nematode parasites of vegetables. İçinde M. Luc, R. A. Sikora, & J. Bridge (Ed.), *Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture* (2. bs., ss. 319-392). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851997278.0319>
- Smith, A. F. (2001). *The tomato in America: Early history, culture, and cookery* (1. Illinois paperback). University of Illinois Press.
- Smith, H. S. (1919). On Some Phases of Insect Control by the Biological Method. *Journal of Economic Entomology*, 12(4), 288-292. <https://doi.org/10.1093/jee/12.4.288>
- Soriano, I. R., Riley, I. T., Potter, M. J., & Bowers, W. S. (2004). Phytoecdysteroids: A Novel Defense Against Plant-Parasitic Nematodes. *Journal of Chemical Ecology*, 30(10), 1885-1899. <https://doi.org/10.1023/B:JOEC.0000045584.56515.11>
- Stock, S. P. (2019). Partners in crime: Symbiont-assisted resource acquisition in *Steinernema* entomopathogenic nematodes. *Current Opinion in Insect Science*, 32, 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.10.006>
- 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., & Ehlers, R. U. (2008). Sustainable control of black vine weevil larvae, *Otiorhynchus sulcatus* (Coleoptera: Curculionidae) with *Heterorhabditis bacteriophora* in strawberry. *Biocontrol Science and Technology*, 18(6), 635-640. <https://doi.org/10.1080/09583150802090026>
- 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>
- Trudgill, D. L., & Blok, V. C. (2001). Apomictic, Polyphagous Root-knot Nematodes: Exceptionally successful and damaging biotrophic root pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 39, 53-77. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.39.1.53>

- Tshikala, E. L., Ezekiel, G., & Mahloro, H. S.-D. (2019). Entomopathogenic nematodes, potential industrial pest control agents: A South African perspective. *Journal of Entomology and Nematology*, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.5897/jen2018.0210>
- Tülek, A., Kepenekçi, İ. I., Oksal, E., & Hazır, S. (2018). Comparative effects of entomopathogenic fungi and nematodes and bacterial supernatants against rice white tip nematode. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 28(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s41938-017-0011-2>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) (2024). Bitkisel Üretim İstatistikleri. [Erişim: 25.05.2026 <https://data.tuik.gov.tr>].
- Tzortzakakis, E. A. (2010). The correlation of root galling with eggs in root and juveniles in soil of root knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) infecting greenhouse vegetables. *Nematologia Mediterranea*. <https://journals.flvc.org/nemamedia/article/view/87023>
- Ulu, T. C., & Erdoğan, H. (2023). Field application of encapsulated entomopathogenic nematodes using a precision planter. *Biological Control*, 182, 105240. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105240>
- 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>
- van Lenteren, J. C., Bolckmans, K., Köhl, J., Ravensberg, W. J., & Urbaneja, A. (2018). Biological control using invertebrates and microorganisms: Plenty of new opportunities. *BioControl*, 63(1), 39-59. <https://doi.org/10.1007/s10526-017-9801-4>
- Veronico, P., Paciolla, C., Pomar, F., De Leonardis, S., García-Ulloa, A., & Melillo, M. T. (2018). Changes in lignin biosynthesis and monomer composition in response to benzothiadiazole and root-knot nematode *Meloidogyne incognita* infection in tomato. *Journal of Plant Physiology*, 230, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.07.013>
- Viaene, N., Coyne, D. L., & Kerry, B. R. (2006). Biological and cultural management. İçinde *Plant nematology* (ss. 346-369). <https://doi.org/10.1079/9781845930561.0346>
- Wang, J., Cao, Y., Lai, B., Liu, Y., Li, C., & Bu, C. (2023). Discovery selective acetylcholinesterase inhibitors to control *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *Journal of Insect Science*, 23(4), 19. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iead073>
- Wouts, W. M. (1981). Mass production of the entomogenous nematode *Heterorhabditis heliothidis* (Nematoda: Heterorhabditidae) on artificial media. *Journal of Nematology*, 13(4), 467-469.
- Wuyts, N. (2006). Nematode infection and reproduction in transgenic and mutant Arabidopsis and tobacco with an altered phenylpropanoid metabolism. *Journal of Experimental Botany*, 57(11), 2825-2835. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl044>
- Yadav, N., Kumar, R., Sangwan, S., Dhanda, V., Rani, R., Devi, S., Duhan, A., Sindhu, J., Chauhan, S., Malik, V. K., Yadav, S., & Banakar, P. (2024). Design, Synthesis, Nematicidal Evaluation, and Molecular Docking Study of Pyrano[3,2-c]pyridones against *Meloidogyne incognita*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(28), 15512-15522. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c00103>