The University of Tehran Press

Iranian Journal of Plant Protection Science

Online ISNN: 2008-4781

Homepage: http://ijpps.ut.ac.ir/

Interaction between the native entomopathogenic nematode isolate Steinernema carpocapsae IRMoghan1 and the insecticide metaflumizone in the control of the tomato leafminer, Phthorimaea (=Tuta) absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae) larvae

Laleh Ebrahimi[1]✉, Aziz Sheikhigarjan[2]

1. Corresponding Author, Iranian Research Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: ebrahimi.laleh@gmail.com
2. Iranian Research Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: asheikhi48@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 11 December 2025

Revised: 29 December 2025

Accepted: 30 December 2025

Published online: Atumn and Winter 2025

Keywords:

antagonistic, compatibility, foraging strategy, native isolate.

ABSTRACT

Chemical control is generally the primary strategy to reduce damage caused by the tomato leaf miner, *Phthorimaea absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). However, the implementation of alternative control approaches is essential. In the present study, the efficacy of the native entomopathogenic nematode isolate *Steinernema carpocapsae* IRMoghan1, metaflumizone, and their combined application was evaluated against larvae of *P. absoluta* within leaf mines. In a separate experiment, the effect of the insecticide on nematode survival was also assessed. According to the results, application of metaflumizone at 1000 ppm (98.3%) and the nematode alone (95%) resulted in the highest larval mortality, whereas the lowest mortality (52.5%) was observed at 250 ppm of metaflumizone. The combined application resulted in 86.7% pest mortality. Interaction analyses indicated an antagonistic interaction between the nematode and metaflumizone. Based on the compatibility assay, 24.28% mortality of infective juveniles was recorded after 72 h of exposure to the insecticide. According to IOBC/WPRS classification criteria, metaflumizone was categorized as harmless (Class 1) and compatible with *S. carpocapsae* IRMoghan1. The high mortality observed in the nematode treatment demonstrates its capacity to function effectively as a cruiser-type forager and to infect host larvae within leaf mines. One possible explanation for the observed antagonistic interaction, despite the classification of metaflumizone as harmless and compatible, is the already high level of mortality caused by the nematode alone, which may have limited the additive or synergistic effects in the combined treatment. Nevertheless, the underlying causes of the reduced efficacy of the nematode in combination treatments warrant further investigation.

Cite this article: Ebrahimi, L. & Sheikhigarjan, A. (2025). Interaction between the native entomopathogenic nematode isolate Steinernema carpocapsae IRMoghan1 and the insecticide metaflumizone in the control of the tomato leafminer, Phthorimaea (=Tuta) absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae) larvae. *Iranian Journal of Plant Protection Science*, 56 (2), 251-265. DOI: https://doi.org/10.22059/ijpps.2026.411628.1007116

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijpps.2026.411628.1007116

Extended Abstract

Introduction

The tomato leafminer, *Phthorimaea absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae), is one of the most economically important pests of tomato crops in both open-field and greenhouse production systems. The entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae* is among the most commercially utilized entomopathogenic nematode (EPN) species due to its favorable ecological and physiological characteristics. Traditionally, this species has been classified as an ambusher based on its host-seeking behavior. However, recent evidence indicates that it is capable of moving considerable distances toward hosts and may exhibit both ambushing and cruising foraging strategies, representing a significant advantage in managing pests inhabiting concealed or cryptic environments.The compatibility of entomopathogenic nematodes with insecticides is of considerable importance for tank-mix or simultaneous applications within integrated pest management (IPM) programs. Metaflumizone is a relatively new insecticide that has been increasingly used worldwide for the management

of *P. absoluta*. The objective of this study was to evaluate the efficacy of the native isolate *S. carpocapsae* IRMoghan1 against larvae of *P. absoluta* and to determine its compatibility with metaflumizone. It was hypothesized that *S. carpocapsae* IRMoghan1 would exhibit cruising-like behavior, enabling it to infect larvae within leaf mines.

Method

Larvae and pupae of *P. absoluta* were collected from an infested tomato field in Karaj and subsequently reared under greenhouse conditions. Tomato plants were used for insect rearing and bioassays.

First, the compatibility of *S. carpocapsae* IRMoghan1 with metaflumizone was assessed. A suspension containing 500 infective juveniles (IJs) per milliliter of distilled water was prepared and mixed with 150 mL of metaflumizone solution at the recommended field dose (1000 ppm). A similar IJ suspension in distilled water served as the control. Nematode mortality was recorded at 24, 48, and 72 hours after treatment. The experiment was replicated three times.

To evaluate the effects of the nematode and metaflumizone on *P. absoluta* larvae, potted tomato plants were placed inside an oviposition cage, and adult moths were released for 24 hours to allow egg laying. The plants were then transferred outside the cage to prevent further infestation. After 72 hours, when egg hatch and larval mine formation were confirmed, mined leaves were used for bioassays.Leaves were sprayed on both surfaces with a nematode suspension at a concentration of 30 IJs per cm^2, supplemented with Triton X-100 as a surfactant. Control leaves received the same volume of distilled water plus Triton X-100. Treated leaves were detached, and their petioles were placed in narrow 50 mL bottles filled with distilled water to maintain leaf freshness. To evaluate the insecticide effect, tomato plants were sprayed with metaflumizone at concentrations of 1000, 500, and 250 ppm using the same method as for nematode application. All bottles were maintained in a growth chamber at 25°C and approximately 90% relative humidity for 72 hours. Each treatment (including at least 60 larvae) was replicated three times on different days. After 72 hours, leaves were examined under a stereomicroscope, and the numbers of live and dead larvae were recorded. In nematode treatments, dead larvae were dissected to confirm nematode infection. The type of interaction between the nematode and metaflumizone was determined by comparing expected and observed mortality using the method of McVay et al. (1977) and Koppenhöfer and Kaya (1997).

Results

Analysis of variance revealed a significant effect of exposure time on the mortality of infective juveniles treated with metaflumizone ($df = 2, 8$; $F = 4.47$; $p < 0.05$). The lowest nematode mortality (20.53%) was observed 24 hours after treatment, whereas the highest mortality (24.28%) occurred at 72 hours post-treatment. According to IOBC/WPRS classification criteria, metaflumizone was categorized as harmless (Class 1) and compatible with this nematode isolate. Significant differences were observed among treatments regarding larval mortality of *P. absoluta* ($df = 2, 8$; $F = 11.51$; $p < 0.001$). Based on mean comparisons, metaflumizone at 1000 ppm and *S. carpocapsae* IRMoghan1 applied alone resulted in the highest larval mortality, whereas metaflumizone at 250 ppm produced the lowest mortality. The calculated interaction parameters indicated an antagonistic interaction between the nematode and metaflumizone.

Conclusion

The compatibility of entomopathogenic nematodes with insecticides for tank-mixing or simultaneous application can reduce application costs and provide economic and environmental benefits. However, compatibility is species- and isolate-specific and must be evaluated prior to combining EPNs with any chemical insecticide. According to IOBC/WPRS classification, metaflumizone was harmless (Class 1) and compatible with *S. carpocapsae* IRMoghan1. Nevertheless, the observed antagonistic interaction—particularly at lower insecticide concentrations—necessitates further investigation into optimal nematode and insecticide concentrations and appropriate timing for combined application. Overall, the results demonstrated the high virulence of the native isolate *S. carpocapsae* IRMoghan1 against *P. absolut*alarvae. According to the host-seeking behavior framework proposed by Lewis et al. (2006), *S. carpocapsae* is traditionally classified as an ambusher. However, in this study involving *P. absoluta* larvae, the IRMoghan1 isolate exhibited cruising-like foraging behavior. Since the nematodes were applied to the leaf surface while larvae were feeding within leaf tissues, infective juveniles appeared to follow host-associated cues and penetrate leaf mines to infect the larvae. These findings suggest that host-seeking strategies in entomopathogenic nematodes may be flexible and adaptable to microhabitat conditions and host location, a characteristic that enhances their applicability against diverse pest species.

Author Contributions

Conceptualization, Methodology, Data curation, Formal analysis, Writing, review & editing, **Laleh Ebrahimi**; Conceptualization and methodological design of the insecticide-related component of the study, **Aziz Sheikhi**. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data availability statement

Data will be available upon request.

Acknowledgements

This study presents partial results of a project conducted at the Iranian Research Institute of Plant Protection. The authors gratefully acknowledge the support provided by the Iranian Research Institute of Plant Protection and the Karaj Research Station of the Institute.

Ethical considerations

Not applicable.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

نشریه دانش گیاهپزشکی ایران، دوره ۵۶، شماره ۲

انتشارات دانشگاه تهران

شاپا الکترونیکی: ۷۸۶۸-۲۴۲۳

Homepage: http://ijpps.ut.ac.ir/

برهم¬کنش بین جدایه بومی نماتد بیماری¬زای حشرات، *Steinernema carpocapsae IRMoghan 1* و حشره¬کش متافلومیزون در کنترل لاروهای مینوز برگ گوجه فرنگی *Phthorimaea (=Tuta) absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae)*

لاله ابراهیمی[1]✉| عزیز شیخی گرجان[2]

۱. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات کنترل بیولوژیک موسسه گیاهپزشکی کشور، تهران، ایران. رایانامه: ebrahimi.laleh@gmail.com

۲ . بخش تحقیقات حشره شناسی موسسه گیاهپزشکی کشور، تهران، ایران. رایانامه: asheikhi48@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

تاریخ انتشار: پاییز و زمستان ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:

آنتاگونیستی، استراتژی جستجوگری، جدایه بومی، سازگاری.

چکیده

کنترل شیمیایی معمولا روش اصلی برای کاهش خسارت مینوز برگ گوجه فرنگی *Phthorimaea absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) است. با این حال، استفاده از روش‌های کنترل جایگزین ضروری می‌باشد. در این مطالعه، تاثیر جدایه بومی نماتد بیماری‌زای حشرات، *Steinernema carpocapsae* IRMoghan1، متافلومیزون و استفاده همزمان آنها علیه لاروهای *P. absoluta* داخل دالان لاروی برگ مورد ارزیابی قرار گرفت. در آزمایشی جداگانه تاثیر حشره‌کش روی زنده‌مانی نماتد بررسی شد. براساس نتایج، غلظت ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام حشره‌کش به تنهایی (۹۸/۳ درصد) و نماتد به تنهایی (۹۵ درصد) بیشترین و غلظت ۲۵۰ پی‌پی‌ام حشره‌کش (۵۲/۵ درصد)کمترین مرگ‌ومیر را ایجاد نمود. ترکیب نماتد و متافلومیزون ۸۵ درصد مرگ‌ومیر آفت را در پی داشت که پارامترهای مورد ارزیابی نشان دهنده برهم‌کنش آنتاگونیستی بین نماتد و متافلومیزون بود. نتایج آزمایش سازگاری، مرگ‌ومیر ۲۴/۲۸ درصد لاروهای آلوده‌کننده نماتد با ۷۲ ساعت قرار گرفتن در معرض حشره‌کش را نشان داد. براساس گروه‌بندی IOBC/WPRS، متافلومیزون نسبت به این جدایه نماتد بی‌ضرر و سازگار بوده و در گروه یک قرار گرفت. درصد بالای مرگ‌ومیر در تیمار *S. carpocapsae* IRMoghan1 نشان دهنده توانایی این نماتد در عمل کردن به عنوان یک جستجوگر cruiser و آلوده کردن لاروهای حشره در داخل دالان لاروی است. یکی از دلایل احتمالی برهم‌کنش آنتاگونیستی نماتد و متافلومیزون علیرغم قرار گرفتن این حشره‌کش در گروه بی‌ضرر و سازگار نسبت به این جدایه نماتد، درصد بالای مرگ و میر لاروهای آفت ناشی از نماتد به تنهایی است که پتانسیل مشاهده اثرات افزایشی و هم‌افزایی در تیمار ترکیبی را محدود کرده است. با این حال، دلایل کاهش کارایی نماتد نیازمند بررسی‌های بیشتر می‌باشد.

استناد: ابراهیمی، لاله و شیخی گرجان، عزیز (۱۴۰۴). برهم¬کنش بین جدایه بومی نماتد بیماری¬زای حشرات، Steinernema carpocapsae IRMoghan 1 و حشره¬کش متافلومیزون در کنترل لاروهای مینوز برگ گوجه فرنگی Phthorimaea (=Tuta) absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae). *نشریه دانش گیاهپزشکی ایران*، ۵۶ (۲)، ۲۶۵-۲۵۱. DOI: https://doi.org/10.22059/ijpps.2026.411628.1007116

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijpps.2026.411628.1007116

مقدمه

مینوز برگ گوجه فرنگی (*Phthorimaea absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae)، که تا این اواخر به عنوان *Tuta absoluta* (Chang & Metz 2021) شناخته می‌شد، یکی از آفات مهم و اقتصادی گوجه‌فرنگی در مزرعه و گلخانه است و یک تهدید جدی برای تولید گوجه‌فرنگی در سطح جهانی محسوب می‌شود (Ndereyimana *et al.*, 2020; Desneux *et al.*, 2022). کنترل شیمیایی همواره روش اصلی اتخاذ شده برای کاهش خسارت این آفت است. به دلیل مقاومت این آفت به حشره‌کش‌ها و نیز اثرات منفی زیست‌محیطی حشره‌کش‌های شیمیایی، استفاده از روش‌های کنترل جایگزین ضروری است (Silva *et al.*, 2016; Moisan *et al.*, 2024). نماتدهای بیماری‌زای حشرات که به عنوان حشره-کش‌های زیستی به تولید تجاری رسیده‌اند، به صورت گسترده در تمام نقاط غیر از قطب جنوب و در دامنه‌ی وسیعی از زیستگاه‌ها و انواع خاک‌ها پراکنده‌اند و طیف وسیعی از حشرات را آلوده می‌کنند (Stuart *et al.*, 2006; Koppenhöfer *et al.*, 2020). تنها مرحله آزادزی این نماتدها، لارو سن سوم مقاوم یا لارو آلوده‌کننده است که به دنبال میزبانی برای آلوده کردن و تکمیل چرخه زندگی خود هستند (Lewis *et al.*, 2006; Koppenhöfer *et al.*, 2020). به عنوان انگل‌های اجباری، یافتن میزبان برای تولیدمثل نماتدهای بیماری‌زای حشرات یک ویژگی کلیدی محسوب می‌شود. راه‌بردهای جستجوگری این نماتدها شامل یک طیف است که بین حدود بالای طیف شامل کمین‌کننده‌ها[1] و گشت‌زن یا خزنده‌ها[2] تغییر می‌کند (Lewis *et al.*, 2006). بنابراین، نماتدهای بیماری‌زای حشرات استراتژی‌های متنوعی برای جستجوی غذا در طیفی از کمین کردن تا گشت‌زنی نشان می‌دهند. معمولاً، جستجوگران گشت‌زن به دنبال میزبان‌هایی هستند که داخل خاک ساکن هستند، در حالی که جستجوگران کمین‌کننده تمایل دارند حشرات واقع در نزدیکی سطح را آلوده کنند (Campbell *et al.*, 2003).کمین‌کننده‌ها به صورت نسبی ساکن بوده و در سطح یا نزدیک سطح خاک باقی مانده و به حشرات در حال حرکت حمله می‌نمایند، در حالی که خزنده‌ها فعالانه میزبان‌های ساکن را در عمق پروفیل خاک جست‌وجو می‌کنند. براساس مطالعات اولیه *Steinernema carpocapsae* یک کمین‌کننده، *Heterorhabditis bacteriophora* یک گشت‌زن و *Steinernema riobrave* حد واسط هر دو است. گونه *S. carpocapsae* به دلیل ویژگی‌های اکولوژیکی و فیزیولوژیکی مطلوب، یکی از تجاری‌ترین گونه‌های نماتد بیماری‌زای حشرات است. این نماتد طیف وسیعی از میزبان‌ها شامل بیش از ۲۰۰ گونه حشره در ۱۱ راسته را آلوده می‌کند (Peters, 1996; Koppenhöfer *et al.*, 2020).

متافلومیزون یکی از حشره‌کش‌های رایج علیه *P. absoluta* است که یک حشره‌کش نیمه کاربازون بوده و طبق طبقه بندی IRAC در گروه MoA group 22B قرار دارد. این ترکیب از نظر نحوه اثر، به عنوان یک مسدود کننده کانال سدیم عمل می‌کند و در اصل، آغاز پتانسیل عمل را در کانال‌های سدیم دارای ولتاژ عصبی مسدود می‌نماید (Roditakis *et al.*, 2013). بنابراین، به دلیل نحوه اثر منحصر به فرد خود می‌تواند مکانیسم‌های مقاومت موجود قبلی در جمعیت‌های مزرعه‌ای را از بین ببرد (Roditakis *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2016). استفاده از نماتدها در مدیریت تلفیقی آفات می‌تواند منجر به کنترل پایدار این آفت در سامانه‌های تولید گوجه‌فرنگی گردد.

پیشینه پژوهش

حساسیت بالای لاروهای آفت مینوز گوجه‌فرنگی به گونه‌های مختلف نماتدهای بیمارگر حشرات در مطالعه‌های متعددی گزارش شده است (Batalla-Carrera *et al.*, 2010; Garcia –del- Pino *et al.*, 2013; Van Damme *et al.*, 2016; Amizadeh *et al.*, 2019; Ndereyimana *et al.*, 2020). برای مثال، Batalla-Carrera *et al.* (2010) کارایی سه گونه *Steinernema feltiae*، *S. carpocapsae* و *H. bacteriophora* را در زیست‌سنجی روی برگ گوجه‌فرنگی در شرایط آزمایشگاهی و تیمار بوته در شرایط گلخانه‌ای علیه مینوز گوجه‌فرنگی بررسی نمودند. در شرایط آزمایشگاهی مرگ‌ومیر

1ambushers
2. cruisers

لاروی ۷۸/۶–۱۰۰ درصد و مرگ‌ومیر شفیرگی کمتر از ۱۰ درصد مشاهده گردید. در بررسی گلخانه‌ای نیز کاربرد نماتدهای بیمارگر حشرات منجر به کاهش آلودگی گیاهان گوجه‌فرنگی به این آفت به میزان ۹۵–۸۷ درصد گردید. در مطالعه Van Damme *et al.* (2016) نیز کارایی سه گونه *S. feltiae*، *S. carpocapsae* و *H. bacteriophora* علیه لاروهای مینوز گوجه‌فرنگی در داخل دالان برگی با استفاده از روش سم‌پاشی دیسک برگی در دو دمای ۱۸ و ۲۵ درجه سلسیوس بررسی شد. براساس نتایج این مطالعه، کارایی *S. feltiae* در هر دو دما بیشتر از دو گونه دیگر بود و منجر به مرگ‌ومیر ۱۰۰ درصد لاروهای آفت شد. در حالی که *S. carpocapsae* و *H. bacteriophora* در ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب منجر به مرگ‌ومیر ۹۷/۴ و ۵۵/۳ درصد لاروها و در دمای ۱۸ درجه سلسیوس منجر به مرگ‌ومیر ۳۴/۲ و ۱۲/۵ درصد لاروها شدند. براساس نتایج Garcia –del- Pino *et al.* (2013) کاربرد سه گونه *S. carpocapsae*، *S. feltiae* و *H. bacteriophora* در خاک علیه مینوز گوجه فرنگی به ترتیب منجر به ۱۰۰، ۵۲/۳ و ۹۶/۴ درصد مرگ‌و میر لاروی گردید.

یکی از حشره‌کش‌هایی که در سال‌های اخیر در ایران و سایر کشورهای جهان برای مدیریت *P. absoluta* مورد استفاده قرار گرفته، متافلومیزون است (Roditakis *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2016; Amizadeh *et al.*, 2019; Nozad *et al.*, 2021). در مطالعه Roditakis *et al.* (2013) مقدار LC_{50} متافلومیزون علیه جمعیت یونانی *P. absoluta* به روش زیست‌سنجی فروبردن برگ در محلول حشره‌کش، در دامنه ۳۱/۸ تا ۱۵۹/۵ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه گردید. در حالی که مقدار LC_{50} متافلومیزون علیه جمعیت ایرانی این آفت به روش سم‌پاشی برگ، در دامنه ۱۵/۱۶ الی ۲۴/۸۶ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه گردید (Amizadeh *et al.*, 2019). در مطالعه Nozad *et al.* (2021) دوز توصیه شده مزرعه‌ای (۱۰۰۰ پی‌پی‌ام)، یک دوم و یک چهارم دوز توصیه شده متافلومیزون به روش سم‌پاشی علیه این آفت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل، نشان‌دهنده کارایی قابل قبول این حشره‌کش بود و یک چهارم غلظت توصیه شده منجر به ۵۴ درصد مرگ‌ومیر آفت گردید (Nozad *et al.*, 2021).

سازگاری نماتدهای بیماری‌زای حشرات با حشره‌کش‌ها برای کاربردهای مخلوط در مخزن یا همزمان با حشره‌کش‌ها در سیستم‌های مدیریت تلفیقی آفات دارای اهمیت بالایی است. این سازگاری ویژگی اختصاصی گونه و سویه است (Laznik and Trdan, 2014). بررسی‌های متعددی پیرامون سازگاری حشره‌کش‌های شیمیایی و نماتدهای بیمارگر حشرات انجام شده است و طیفی از برهم‌کنش‌ها شامل اثرات افزایشی، سینرژیستی و آنتاگونیستی گزارش شده است (Koppenhöfer *et al.*, 2002; Amizadeh *et al.*, 2019; Kary *et al.*, 2021). در مطالعه Amizadeh *et al.*(2019) سازگاری دو جدایه *S. feltiae* با حشره‌کش‌های آبامکتین، دی‌کلروس، متافلومیزون، آزادیراکتین و کلرانترانیلیپرول در زمان‌ها و غلظت‌های مختلف بررسی گردید و از مجموع ۹۶ ترکیب مورد مقایسه، برهم‌کنش ۱۲ ترکیب سینرژیستی، ۵۷ ترکیب افزایشی و ۲۷ ترکیب آنتاگونیستی گزارش شد. در بررسی سازگاری دو گونه *S. feltiae* و *H. bacteriophora* با آبامکتین، نتایج نشان‌دهنده برهم‌کنش آنتاگونیستی و سینرژیستی برای *S. feltiae* و برهم‌کنش افزایشی و سینرژیستی برای *H. bacteriophora* در غلظت‌های مختلف بود (Kary *et al.*, 2021).

هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی کارایی جدایه بومی *S. carpocapsae* IRMoghan1 علیه لاروهای *P. absoluta* و سازگاری آن با متافلومیزون بود. در این مطالعه فرض شده است که *S. carpocapsae* IRMoghan1 مانند یک گشت‌زن عمل می‌کند تا لاروهای آفت را داخل دالان های لاروی آلوده کند، و این نماتد با متافلومیزون سازگار است.

روش‌شناسی پژوهش

ایجاد جمعیت یکنواخت *Phthorimaea absoluta*

لارو و شفیره *P. absoluta* از مزرعه آلوده به گوجه‌فرنگی در کرج جمع‌آوری شد و به روش Roditakis *et al.* (2013) در گلخانه در دمای ۲±۲۶ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۵±۷۰ درصد و دوره نوری ۸ ساعت روشنایی و ۱۶ ساعت تاریکی

پرورش داده شد. حشرات در قفس‌های چوبی پوشیده شده با پارچه توری ۸۰ مش روی بوته‌های گوجه‌فرنگی پرورش داده شدند. در قفس تخم‌گذاری از محلول قند ۱۰ درصد برای تغذیه افراد بالغ استفاده شد. از گیاهان گوجه فرنگی، *Solanum lycopersicum* رقم کارون (شرکت فلات ایرانیان زمین، کرج، ایران) برای پرورش حشرات و آزمایش‌های زیست‌سنجی استفاده شد.

پرورش شب‌پره موم‌خوار بزرگ *Galleria mellonella*

کلنی حشره شب‌پره موم‌خوار بزرگ برای جداسازی جدایه‌های نماتد از نمونه‌های خاک، کشت و تکثیر نماتد برای انجام آزمایش‌های بعدی مورد نیاز بود. ترکیب غذای مصنوعی مورد استفاده برای پرورش شب‌پره موم‌خوار شامل ۱۲۰۰ گرم آرد، ۳۰۰ گرم مخمر، ۱۲۰ گرم موم خالص ریز شده، ۶۰۰ گرم عسل و ۵۰۰ میلی‌لیتر گلیسیرین بود. پرورش حشره در ظروف پلاستیکی مستطیلی به ابعاد ۳/۶×۱۴/۳×۱۹/۳ سانتی‌متر که درپوش آن با تور سیمی پوشانده شده بود، انجام گرفت.

کشت و نگهداری نماتدهای بیمارگر حشرات

برای کشت و تکثیر نماتد بیماری‌زای حشرات، لاروهای *G. mellonella* در داخل ظروف پتری مفروش با کاغذ صافی با لارو آلوده‌کننده نماتد تلقیح گردید. بعد از ۴۸ ساعت با مشاهده مرگ لاروهای حشره، لاروهای نماتد از تله وایت (White, 1927) جمع‌آوری شده و در یک فلاسک کشت سلولی۶۰ میلی‌لیتری در آب مقطر در دمای شش درجه سلسیوس نگهداری شدند و طی یک هفته پس از برداشت در آزمایش‌ها استفاده شدند. قبل از شروع آزمایش‌ها، نماتدها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای اتاق سازگار شدند.

نماتد بیماری‌زای حشرات و حشره‌کش مورد استفاده

جدایه مورد استفاده در این مطالعه، شامل گونه *S. carpocapsae* IRMoghan1 بود که از منطقه مغان جداسازی و شناسایی و در پایگاه داده NCBI (مرکز بین‌المللی اطلاعات بیوتکنولوژی) با رس‌شمار MF187616 ثبت شده است (Ebrahimi *et al.*, 2019). براساس نتایج مطالعه‌های قبلی این جدایه دارای پایداری و قدرت بیماری‌زایی بالایی است (Ebrahimi, 2023).

محلول های حشره‌کش از فرمولاسیون(24SC; BASF, Germany) متافلومیزون (Metaflumizone) در آب مقطر حاوی تریتون (Triton X-100) به غلظت یک دهم درصد (حجم/ حجم) به عنوان یک عامل مرطوب کننده غیر یونی، تهیه شد

ارزیابی اثر حشره‌کش متافلومیزون بر زنده‌مانی نماتد بیماری‌زای حشرات

در این آزمایش، زنده‌مانی لاروهای آلوده‌کننده *S. carpocapsae* IRMoghan1 که در معرض حشره‌کش قرار گرفته بودند، مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این کار، سوسپانسیون حاوی ۵۰۰ لارو آلوده‌کننده نماتد به ازای هر میلی‌لیتر آب مقطر در ۱۵۰ میلی لیتر دوز توصیه‌شده متافلومیزون (۱۰۰۰ پی‌پی‌ام) تهیه شد (Amizadeh *et al.*, 2019). سپس پنج میلی‌لیتر از سوسپانسیون به داخل ظروف پتری (قطر ۵/۵ سانتی متر، در ۱۵ عدد ظرف پتری) ریخته شد. غلظت مشابهی از لاروهای آلوده‌کننده نماتد در آب مقطر تهیه شد و به عنوان شاهد به داخل ظروف پتری منتقل شد. ظروف پتری با پارافیلم بسته شدند و در دمای ۱ ± ۲۴ درجه سلسیوس در تاریکی به مدت ۲۴ ساعت، ۴۸ ساعت و ۷۲ ساعت انکوبه شدند. در هر بازه زمانی، پنج ظرف پتری از نماتدهای تیمار و شاهد مورد بررسی قرار گرفت. در ارزیابی زنده‌مانی در هر بازه زمانی، ۵۰۰ میکرولیتر سوسپانسیون از ظروف پتری در سه تکرار گرفته شد و لاروهای آلوده‌کننده زنده و مرده در زیر استریومیکروسکوپ شمارش شدند. لاروهای نماتد غیرفعال اگر پس از تحریک با یک سوزن، بی‌حرکت بودند مرده در نظر گرفته می‌شدند. آزمایش سه بار در سه روز مختلف تکرار شد. برای اصلاح مرگ‌ومیر براساس شاهد از فرمول ابوت (Abbott, 1925) استفاده شد.

ارزیابی اثر نماتد بیماری‌زا و حشره‌کش متافلومیزون روی لاروهای *Phthorimaea absoluta*

گلدان‌های گوجه‌فرنگی در یک قفس تخم‌گذاری قرار داده شدند و افراد بالغ *P. absoluta* در قفس رهاسازی شدند تا به مدت ۲۴ ساعت تخم‌ریزی صورت گیرد. سپس گلدان‌ها به بیرون منتقل شدند و تخم‌ها با استفاده از یک قلم‌موی ظریف از

برگ‌ها جدا شدند و روی برگ‌های گیاه گوجه‌فرنگی عاری از حشره قرار گرفتند. گیاهان به مدت ۷۲ ساعت نگهداری شدند تا از تفریخ تخم اطمینان حاصل شود که با مشاهده دالان‌های ریز تغذیه لارو (مرحله اول لاروی) قابل مشاهده بود. برای آزمایش زیست‌سنجی، به طور خلاصه، برگ‌ها از دو طرف با نماتد (به غلظت ۳۰ لارو آلوده‌کننده نماتد به ازای هر سانتی‌متر مربع، به همراه تریتون (Triton X-100) به غلظت یک دهم درصد (حجم/ حجم) به عنوان سورفکتانت، اسپری شدند(Husin and Port 2021). شاهد به همان حجم آب مقطر و تریتون دریافت کرد. سپس برگ‌ها را از بوته جدا کرده و دمبرگ‌ها در یک بطری باریک (۵۰ میلی لیتر) پر از آب مقطر قرار داده شد تا برگ‌ها تازه بماند. هر تیمار شامل ۶۰ لارو مینوز گوجه‌فرنگی بود. به همان ترتیب، برای بررسی اثر حشره‌کش متافلومیزون، با سه غلظت ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۲۵۰ پی‌پی‌ام (دوز توصیه شده، یک دوم و یک چهارم دوز توصیه شده) با روش مشابه مورد استفاده برای نماتدهای بیماری‌زای حشرات روی بوته‌های گوجه‌فرنگی با استفاده از یک آب‌پاش دستی پلاستیکی با قطر نازل ۰/۷ میلی‌متر پاشیده شد. برای تیمار مخلوط نماتد و حشره‌کش، سوسپانسیون نماتد با غلظت ۳۰ لارو آلوده‌کننده نماتد به ازای هر سانتی‌متر مربع در ۱۵۰ میلی‌لیتر سوسپانسیون ۲۵۰ پی‌پی‌ام متافلومیزون تهیه شد. دلیل انتخاب غلظت ۲۵۰ پی‌پی‌ام متافلومیزون، مرگ‌ومیر بالای آفت در دو غلظت بیشتر در پیش‌آزمایش بود. سوسپانسیون ترکیب نماتد و متافلومیزون به همراه تریتون (یک دهم درصد) به همان روش توصیف شده روی برگ‌ها پاشیده شد و برگ‌ها جدا شده و در بطری‌ها قرار داده شدند. بطری‌ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی حدود ۹۰ درصد به مدت ۷۲ ساعت در اتاقک رشد (STC Mod۱۳۰۰، شرکت نور صنعت فردوس، کرج، ایران) نگهداری شدند. در نهایت برگ‌های تیمار شده زیر استریومیکروسکوپ بررسی و تعداد لاروهای مرده و زنده ثبت شد. در مورد تیمارهای نماتدهای بیماری‌زای حشرات، لاروهای مرده جداسازی و تشریح شدند تا از حضور نماتدها در داخل لاشه‌ها اطمینان حاصل شود. زیست‌سنجی برای تمام تیمارها (هر تیمار شامل حداقل ۶۰ لارو حشره) سه بار در روزهای مختلف تکرار شد.

تجزیه آماری

هر دو آزمایش تاثیر متافلومیزون روی زنده‌مانی نماتد و زیست‌سنجی نماتد، حشره‌کش و ترکیب نماتد و حشره‌کش روی *P. absoluta* در قالب طرح کاملا تصادفی انجام شدند. تاثیر متافلومیزون روی زنده‌مانی نماتد در سه زمان (۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت) در سه تکرار بررسی گردید. برای اصلاح مرگ‌ومیر براساس شاهد از فرمول ابوت (Abbott 1925) استفاده شد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها به روش توکی، با کمک نرم افزار SAS انجام گرفت (SAS Institute 2012).

برای تعیین نوع برهمکنش بین نماتد و متافلومیزون، مقایسه مرگ‌ومیر مورد انتظار و مشاهده شده روش McVay *et al.* (1977) و Koppenhöfer and Kaya (1997) مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب که مرگ و میر مورد انتظار (M_E) برای ترکیبات نماتد– متافلومیزون با استفاده از فرمول $M_E = M_I + M_N(1-M_N)$ محاسبه شد، که در آن M_I و M_N به ترتیب مرگ‌ومیر مشاهده شده ناشی از متافلومیزون و نماتد به تنهایی است. همچنین، مقدار X^2 به صورت زیر محاسبه شد: $X^2= (M_{IN} - M_E)^2/M_E$)، که در آن M_{IN} مرگ‌ومیر مشاهده شده برای ترکیب نماتد–متافلومیزون بود که با مقدار جدول X^2 با df=1و P<0.05 مقایسه شد. اگر X^2 محاسبه شده از مقدار جدول بیشتر باشد، اثر غیرافزایشی عوامل کنترل نشان داده شده است. اگر M_{IN}-M_E> 0 باشد، برهم‌کنش سینرژیستی یا هم‌افزایی و اگر M_{IN}-M_E< 0 باشد، برهم‌کنش آنتاگونیستی است.

یافته‌های پژوهش

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار درصد مرگ‌ومیر لاروهای آلوده‌کننده نماتد تیمار شده با حشره‌کش متافلومیزون در زمان‌های مختلف بود (df = ۲, ۶; F value =۵/۸۲; p<۰/۰۵)؛ به طوری که ۲۴ ساعت پس از تیمار با حشره‌کش، کمترین درصد مرگ‌ومیر (۲۰/۵۳) و ۷۲ ساعت پس از تیمار، بیشترین میزان مرگ‌ومیر نماتد (۲۴/۲۸ درصد) مشاهده گردید. با این حال، تفاوت میزان مرگ‌ومیر در ۴۸ ساعت و ۷۲ ساعت معنی‌دار نبود. براساس گروه‌بندی IOBC/WPRS حشره‌کش‌ها از نظر ایجاد مرگ‌ومیر روی نماتدهای بیماری‌زای حشرات در ۲۴ الی ۴۸ ساعت پس از تیمار،

به چهار گروه تقسیم می‌شوند: گروه (۱) بی‌زیان : مرگ‌ومیر کمتر از ۳۰ درصد؛ گروه (۲) کمی زیان‌بخش : مرگ‌و میر بین ۳۰ تا ۷۹ درصد؛ گروه (۳) نسبتا زیان‌بخش : مرگ و میر بین ۸۰ تا ۹۹ درصّد؛ گروه (۴) زیان‌بخش : مرگ‌ومیر بیش از ۹۹ درصد (Vainio 1992; Peters 2003). با توجه به مرگ‌ومیر ۲۴/۲۸ درصد نماتد تا ۷۲ ساعت پس از تیمار، براساس گروه‌بندی IOBC/WPRS، متافلومیزون نسبت به این جدایه نماتد بی‌زیان و سازگار بوده و در گروه یک قرار گرفت.

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین اثر تیمارهای مختلف (غلظت‌های مختلف حشره‌کش، نماتد و ترکیب نماتد و حشره‌کش) روی مرگ‌ومیر لاروهای *P. absoluta* بود (df = ۴, ۸; F value =۱۱/۵۱; p<۰/۰۰۱). هر چند براساس مقایسه میانگین تیمارها، غلظت ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام متافلومیزون و *S. carpocapsae* IRMoghan1 به تنهایی بیشترین و غلظت ۲۵۰ پی‌پی‌ام متافلومیزون کمترین مرگ‌ومیر را ایجاد کرد (جدول ۱).

جدول ۱. میانگین مرگ‌ومیر لاروهای شب‌پره مینوز گوجه فرنگی تیمارشده با *Steinernema carpocapsae* IRMoghan1 و متافلومیزون و ترکیب آنها

تیمار	مرگ‌ومیر آفت (میانگین±خطای استاندارد)	تعداد حشره تیمار شده
S. carpocapse IRMoghan1 (۳۰ لارو آلوده‌کننده نماتد بر سانتی‌متر مربع)	۹۵ ^{a}۴±/۹	۱۸۰
متافلومیزون ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام	۹۸/ ۳۳ ^{a}۲±/۸۹	۱۸۰
متافلومیزون ۵۰۰ پی‌پی‌ام	۶۸/۳۳ ^{bc}±۱۰/۴۱	۱۸۰
متافلومیزون ۲۵۰ پی‌پی‌ام	۵۲/ ۵۴ ^{c}±۶/۵۷	۱۸۰
ترکیب *S. carpocapse IRMoghan1* (۳۰ لارو آلوده-کننده نماتد بر سانتی‌متر مربع) و متافلومیزون ۲۵۰ پی‌پی‌ام	۸۵^{b}±۵/۰	۱۸۰

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

مقادیر پارامترهای به دست آمده برای تعیین نوع برهم‌کنش بین نماتد و حشره‌کش متافلومیزون در جدول (۲) خلاصه شده است که نشان‌دهنده برهم‌کنش آنتاگونیستی بین نماتد و متافلومیزون می‌باشد. آماره X^2 نیز برای درجه آزادی ۱ و p<۰/۰۵ معادل ۰/۰۱۶ محاسبه شد که در مقایسه با مقدار X^2 جدول (۳/۸۴۱)، کمتر بود.

بحث

سازگاری نماتدهای بیماری‌زای حشرات با حشره‌کش‌ها برای مخلوط شدن در مخزن سم‌پاش‌ها یا استفاده همزمان از آن‌ها با حشره‌کش‌ها در سیستم‌های مدیریت تلفیقی آفات از اهمیت بالایی برخوردار است. چنین سازگاری منجر به صرفه‌جویی اقتصادی در هزینه‌های کاربرد عوامل کنترل می‌شود و از سوی دیگر، در صورتیکه ترکیب نماتد و حشره‌کش بدون افزایش غلظت آن‌دو باعث افزایش میزان کنترل آفات شود ، اثرات منفی کمتری بر محیط زیست دارد (Georgis and Gaugler, 1991; Laznik and Trdan, 2014; Abd-Elgawad, 2023). با این حال، سازگاری نماتدها با حشره‌کش‌های شیمیایی

3. harmless
2slightly harmful
3moderately harmful
4harmful

یک ویژگی اختصاصی گونه و جدایه است و قبل از مخلوط کردن نماتد با هر حشره‌کشی باید این سازگاری مورد ارزیابی قرار گیرد (Laznik and Trdan, 2014).

سازگاری نماتدهای بیماری‌زای حشرات با متافلومیزون قبلاً بررسی شده است (Amizadeh *et al.*, 2019; Garcia-del-Pino *et al.*, 2013). بر اساس نتایج Garcia-del-Pino *et al.* (2013) که زنده‌مانی جدایه‌های اسپانیایی سه گونه نماتد را با چند حشره‌کش شیمیایی از جمله متافلومیزون به مدت ۷۲ ساعت مورد ارزیابی قرار داده بودند، زنده‌مانی لاروهای *S. carpocapsae* تا ۴۸ ساعت پس از تیمار با متافلومیزون تفاوت معنی‌داری با شاهد نشان نداد. این نتیجه نشان‌دهنده سازگاری نماتدهای بیماری‌زای حشرات مورد ارزیابی با متافلومیزون بود که هم‌راستا با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر می‌باشد.

جدول ۲. برهم‌کنش بین متافلومیزون و نماتد *Steinernema carpocapsae* IRMoghan1 علیه لاروهای *Phthorimaea absoluta*

(۳۰ لارو آلوده‌کننده نماتد بر سانتی‌متر مربع) *Steinernema carpocapsae* IRMoghan1 +متافلومیزون ۲۵۰ پی‌پی‌ام	
خطای استاندارد±درصد مرگ‌ومیر مشاهده شده	۸۵±۵/۰
خطای استاندارد±درصد مرگ‌ومیر مورد انتظار	۹۷/۶±۵/۷۸
X^{2*} (P value)	۰/۰۱۶ (۰/۰۵)
برهم‌کنش**	(-)

*مقدار X^2 برای درجه آزادی ۱ و $p<۰/۰۵$ مشخص شده است. مقدار X^2 جدول برای درجه آزادی ۱ در سطح احتمال $p<۰/۰۵$ معادل ۳/۸۴۱ است.
** برهم‌کنش (−) نشان‌دهنده رابطه آنتاگونیستی، (+) نشان‌دهنده افزایشی و (×) نشان‌دهنده سینرژیسم است.

در این مطالعه زنده‌مانی *S. carpocapsae* نسبت به دو جدایه مورد بررسی دیگر، *S. feltiae* و *H. bacteriophora* بالاتر بود. در مطالعه Amizadeh *et al.* (2019) نیز زنده‌مانی جدایه ایرانی و فراورده تجاری *S. feltiae* پس از قرار گرفتن در معرض متافلومیزون مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان‌دهنده ۲۱ درصد و ۲۵ درصد مرگ و میر به ترتیب برای جدایه تجاری و بومی در ۲۴ ساعت پس از تیمار بود که میزان مرگ‌ومیر مشابه مطالعه حاضر است. در مطالعه حاضر، درصد مرگ‌ومیر جدایه بومی مورد ارزیابی ۲۴ ساعت پس از تیمار با متافلومیزون ۲۰/۵۳ درصد و ۷۲ ساعت پس از تیمار ۲۴/۲۸ درصد بود. درصد مرگ‌ومیر پایین جدایه بومی نماتد تا ۷۲ ساعت تیمار با حشره‌کش متافلومیزون، تا حدی نشان‌دهنده سازگاری این نماتد با حشره‌کش مورد استفاده می‌باشد و بنابراین امکان مخلوط کردن آن در مخزن سم‌پاشی با متافلومیزون وجود دارد، زیرا که مدت زمان مورد نیاز در مخلوط کردن نماتدها با آفت‌کش شیمیایی برای پاشش همزمان روی گیاه هدف از چند ساعت تجاوز نمی‌کند.

درصد بالای مرگ‌ومیر لاروهای آفت در اثر استفاده از نماتد بیماری‌زای حشرات، نشان‌دهنده کارایی بالای جدایه بومی این نماتد علیه مینوز گوجه‌فرنگی می‌باشد. نتایج محققان دیگر نیز تاییدکننده این دستاورد است Batalla-Carrera *et al*,. (2010 ؛ Garcia –del- Pino *et al.*, 2013؛ Kaşkavalcı & Türköz, 2016 ؛ Van Damme *et al*. 2016؛ Ndereyimana *et al*. 2020؛ Amizadeh *et al.*, 2019؛ Husin and Port 2021). در همین راستا، نتایج مطالعه Kaşkavalcı & Türköz(2016) که کارایی سه گونه *S. carpocapsae*، *S. feltiae* و *H. bacteriophora* را علیه این آفت بررسی نمودند، نشان‌دهنده کارایی بیشتر *S. feltiae* و *S. carpocapsae* (به ترتیب ۹۵/۲ و ۹۹/۴ درصد مرگ‌ومیر در بیشترین غلظت مورد بررسی) در مقایسه با *H. bacteriophora* (۷۴/۲ درصد) بود که کارایی بالاتر *S. carpocapsae* تاییدکننده نتایج مطالعه حاضر است. علاوه‌براین، براساس نتایج مطالعه Van Damme *et al.* (2016) روی مقایسه کارایی سه گونه *S. feltiae*، *S. carpocapsae* و *H. bacteriophora*، گونه *S. carpocapsae* منجر به مرگ‌ومیر ۹۷/۴ درصد لاروهای مینوز گوجه‌فرنگی داخل دالان برگی شدند که کارایی بالای *S. carpocapsae* با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد.

طبق الگوی مطرح شده برای رفتار میزبان‌یابی نماتدهای بیماری‌زای حشرات (Lewis *et al.*, 2006)، *S. carpocapsae* به عنوان یک کمین‌کننده طبقه‌بندی می‌شود. با این حال، در مطالعه اخیر مربوط به لاروهای *P. absoluta*، جدایه *S. carpocapsae* IRMoghan1 رفتار جستجوی غذایی را نشان دادند که شبیه گشت‌زنی بود. در این مطالعه، نماتد به سطح برگ‌هایی که لاروهای *P. absoluta* داخل بافت آن‌ها مشغول تغذیه بودند، پاشیده شد. بنابراین، لاروهای آلوده‌کننده نماتد نشانه‌های میزبان حشره را دنبال کردند و به دالان‌های برگ نفوذ کردند تا لاروهای آفت را آلوده کنند که مطابق با استراتژی جستجوی غذا به روش گشت‌زنی بود. جالب توجه است که مطالعات قبلی نیز تغییر رفتار جستجوی غذا در *S. carpocapsae* را تحت شرایط خاص گزارش کرده‌اند (Kruitbos *et al.*, 2010; Wilson *et al.*, 2012; Ebrahimi *et al.*, 2024). اخیرا این دیدگاه مطرح شده است که *S. carpocapsae* به دلیل سازگاری با زیستگاه‌هایی غیر از خاک، مانند مواد پوسیده گیاهی و بستر چوب و برگ، این گونه قادر است مسافت طولانی را به سمت میزبان طی کند (Kruitbos *et al.*, 2010; Wilson *et al.*, 2012). براساس یافته‌های Wilson *et al.* (2012) استراتژی‌های جستجوی غذا در نماتدهای بیماری‌زای حشرات ثابت نیست، بلکه این رفتار می‌تواند در پاسخ به نشانه‌های محیطی تغییر کنند. این انعطاف‌پذیری به توضیح این موضوع کمک می‌کند که چرا گونه‌های کمین‌کننده مانند *S. carpocapsae* می‌توانند رفتار جستجوی غذا را در بسترهای اکولوژیکی خاص، مانند زمانی که نیاز به یافتن میزبان در داخل بافت‌های برگ به جای سطح آن است، نشان دهند. به طور خلاصه، در حالی که طبقه‌بندی‌های کلاسیک رفتار جستجوی غذا در نماتدهای بیماری‌زای حشرات چارچوب مفیدی را ارائه می‌دهند، مشاهدات تجربی نشان می‌دهند که این استراتژی‌ها می‌توانند انعطاف‌پذیر باشند و با نشانه‌های ریززیستگاه و مکان قرار گیری میزبان در بسترهای مختلف، سازگار شوند. این امر اهمیت در نظر گرفتن زمینه‌های محیطی و رفتاری را هنگام ارزیابی استراتژی‌های یافتن میزبان در این نماتدها، برجسته می‌کند و در کاربرد آنها علیه آفات مختلف اهمیت بسزایی دارد. موفقیت *S. carpocapsae* در کنترل آفات در زیستگاه‌های مخفی مانند دالان‌های گیاهی این نظریه را تایید می‌کند (Wilson *et al.*, 2012; Ebrahimi *et al.*, 2024; Wakil *et al.*, 2023)، که این خود یک مزیت قابل توجه برای مدیریت آفات ساکن در اعماق زمین، زیستگاه‌های مخفی یا میزبان‌های بی‌حرکت مانند شفیره‌ها است (Martinez de Altube *et al.*, 2008).

کارایی بالای حشره‌کش متافلومیزون روی مینوز گوجه‌فرنگی در ایران قبلا گزارش شده است (Amizadeh *et al.*, 2019; Nozad *et al.*, 2021) و مرگ‌ومیر بالای آفت در مطالعه حاضر موافق با نتایج گزارش‌های قبلی می‌باشد. مطالعه Nozad *et al.* (2021) دوز توصیه شده مزرعه‌ای (۱۰۰۰ پی‌پی‌ام)، و نیز یک دوم و یک چهارم دوز توصیه شده متافلومیزون به روش سم‌پاشی علیه این آفت را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج حاصل، نشان‌دهنده ۸۵ درصد مرگ‌ومیر لاروی در غلظت ۵۰۰ پی‌پی‌ام ۵۴ درصد مرگ‌ومیر در غلظت ۲۵۰ پی‌پی‌ام بود (Nozad *et al.*, 2021). این نتایج به ویژه در غلظت ۲۵۰ پی‌پی‌ام مشابه نتایج مطالعه حاضر است.

در مطالعه‌های مختلف روابط آنتاگونیستی، افزایش و هم‌افزایی بین نماتدهای بیماری‌زای حشرات و حشره‌کش‌های شیمیایی گزارش شده است (Koppenhöfer *et al.*, 2002; Amizadeh *et al.*, 2019; Kary *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2024). یکی از دلایل احتمالی برهم‌کنش آنتاگونیستی *S. carpocapsae* IRMoghan1 و متافلومیزون علیرغم قرار گرفتن این حشره‌کش در گروه بی‌ضرر و سازگار نسبت به این جدایه نماتد براساس گروه‌بندی IOBC/WPRS، درصد بالای مرگ‌ومیر لاروهای آفت ناشی از *S. carpocapsae* IRMoghan1 به تنهایی (حدود ۹۵ درصد) است که احتمالاً پتانسیل مشاهده اثرات افزایشی و هم‌افزایی در تیمار ترکیبی را محدود کرده است. برهم‌کنش آنتاگونیستی بین نماتدهای بیماری‌زای حشرات و حشره‌کش‌های شیمیایی در مطالعه‌های مختلف گزارش شده است (Koppenhöfer *et al.*, 2002; Amizadeh *et al.*, 2019; Kary *et al.*, 2021). در مطالعه Koppenhöfer *et al.* (2002) نیز اثر آنتاگونیستی در ترکیب تیامتوکسام با غلظت بالای *H. bacteriophora* علیه لاروهای *Popillia japonica* و *Exomala orientalis* گزارش شده است. آن‌ها این اثر را به مرگ‌و میر بالای ناشی از *H. bacteriophora* به تنهایی نسبت دادند، توضیحی که با یافته‌های ما همسو است. هرچند

Amizadeh *et al.* (2019) نیز در استفاده از *S. feltiae* بلافاصله پس از تیمار با مقادیر LC_{10} حشره‌کش‌های آبامکتین، آزادیراکتین و دی‌کلرووس علیه *P. absoluta*، اثر آنتاگونیستی گزارش کردند. علاوه بر این، آنها مشاهده کردند که افزایش فاصله بین کاربرد حشره‌کش و نماتدهای بیماری‌زای حشرات، برهم‌کنش را از آنتاگونیسم به اثرات افزایشی و هم‌افزایی تغییر می‌دهد (Amizadeh *et al.*, 2019). بنابراین، علاوه بر غلظت حشره‌کش و نماتد، زمان تیمار نیز برهم‌کنش را تحت تاثیر قرار می‌دهد و برای تدوین دستورالعمل‌های دقیق ادغام نماتدهای بیماری‌زای حشرات با هر حشره‌کشی، بررسی دقیق غلظت و زمان کاربرد ضروری می‌باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به طور کلی نتایج این مطالعه نشان‌دهنده اثر کشندگی بالای جدایه بومی *S. carpocapsae* IRMoghan1 روی لاروهای شب‌پره مینوز گوجه فرنگی بود. همچنین، براساس گروه‌بندی IOBC/WPRS، متافلومیزون برای این جدایه نماتد بی‌ضرر و سازگار بوده و در گروه یک (بی ضرر) قرار گرفت. با این حال، برهم‌کنش آنتاگونیستی نماتد و غلظت پایین متافلومیزون بررسی‌های دقیق‌تر روی غلظت حشره‌کش و نماتد و نیز زمان مصرف، برای کاربرد همزمان این دو عامل را ضروری می‌سازد.

سپاس‌گزاری

این پژوهش بخشی از نتایج پروژه انجام یافته در موسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور است. نویسندگان کمال تشکر را از حمایت‌های موسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور و ایستگاه تحقیقات کرج موسسه دارند.

منابع

نوزاد، زهرا؛ خانی، سولماز؛ معروف‌پور، نریمان و ایرانی پور، شهزاد. (۱۴۰۰). تأثیر باقیمـاندۀ چند حشـره‌کـش روی لاروهای *Tuta absoluta* (Lepidoptear: Gelechiidae) در شرایط آزمایشگاهی. *نامه انجمن حشره شناسی ایران*. ۱۷۴-۱۶۳ ,(۲)۴۱ .
https://doi.org/10.22117/jesi.2022.356530.1433

REFERENCES

Abbott, W.A. (1925). A method for computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, *18*, 265-267.

Abd-Elgawad, M. M. (2023). Optimizing entomopathogenic nematode genetics and applications for the integrated management of horticultural pests. *Horticulturae*, *9*(8), 865. https://doi.org/10.3390/horticulturae9080865

Alumai, A., & Grewal, P. S. (2004). Tank-mix compatibility of the entomopathogenic nematodes, *Heterorhabditis bacteriophora* and *Steinernema carpocapsae*, with selected chemical pesticides used in turfgrass. *Biocontrol Science and Technology*, *14*(7), 725-730. https://doi.org/10.1080/09583150410001724334

Amizadeh, M., Hejazi, M. J., Niknam, G., & Askari-Saryazdi, G. (2019). Interaction between the entomopathogenic nematode, *Steinernema feltiae* and selected chemical insecticides for management of the tomato leafminer, *Tuta absoluta*. *Biocontrol*, *64*, 709-721. https://doi.org/10.1007/s10526-019-09973-x

Batalla-Carrera, L., Morton, A., & García-del-Pino, F. (2010). Efficacy of entomopathogenic nematodes against the tomato leafminer *Tuta absoluta* in laboratory and greenhouse conditions. *BioControl*, *55*, 523-530. https://doi.org/10.1007/s10526-010-9284-z

Campbell, J.F., Lewis, E.E., Stock, S.P., Nadler, S. & Kaya, H.K. (2003). Evolution of host search strategies in entomopathogenic nematodes. *Journal of Nematology*, *35*(2), 142.

Desneux, N., Han, P., Mansour, R., Arnó, J., Brévault, T., Campos, M. R., Chailleux, A., Guedes, R.N., Karimi, J., Konan, K.A.J., & Lavoir, A.V. (2022). Integrated pest management of *Tuta absoluta*: practical implementations across different world regions. *Journal of Pest Science*, 1-23. https://doi.org/10.1007/s10340-021-01442-8

Chang, P. E. C., & Metz, M. A. (2021). Classification of *Tuta absoluta* (Meyrick, 1917) (Lepidoptera: Gelechiidae: Gelechiinae: Gnorimoschemini) based on cladistic analysis of morphology. *Proceedings of the entomological Society of Washington*, *123*(1), 41-54.

Ebrahimi, L., (2023). Efficacy of alginate-based formulation of *Steinernema carpocapsae* IRMoghan1 against *Mythimna loreyi* (Lepidoptera: Noctuidae). *Biocontrol Science and Technology*, *33*(1), 35-47. https://doi.org/10.1080/09583157.2022.2155294

Ebrahimi, L., Niknam, G., & Lewis, E. E. (2011). Lethal and sublethal effects of Iranian isolates of *Steinernema feltiae* and *Heterorhabditis bacteriophora* on the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *BioControl*, *56*, 781-788. https://doi.org/10.1007/s10526-011-9343-0

Ebrahimi, L., Sheikhigarjan, A., & Ghazavi, M. (2024). Entomopathogenic nematodes for control of potato tuber moth (*Phthorimaea operculella* [Zeller],(Lepidoptera: Gelechiidae) in infested tubers. *International Journal of Pest Management*, *70*(4), 1000-1007. https://doi.org/10.1080/09670874.2022.2058709

Ebrahimi, L., TanhaMaafi, Z., & Sharifi, P. (2019). First report of the entomopathogenic nematode, *Steinernema carpocapsae*, from Moghan region of Iran and its efficacy against the turnip moth, *Agrotis segetum* Denis and Schiffermuller (Lepidoptera: Noctuidae), larvae. Egyptian *Journal of Biological Pest Control 29*, 66. https://doi.org/10.1186/s41938-019-0168-y

Garcia-del-Pino, F., Alabern, X., & Morton, A. (2013). Efficacy of soil treatments of entomopathogenic nematodes against the larvae, pupae and adults of *Tuta absoluta* and their interaction with the insecticides used against this insect. *BioControl*, *58*, 723-731.

https://doi.org/10.1007/s10526-013-9525-z

Georgis, R., & Gaugler, R. (1991). Predictability in biological control using entomopathogenic nematodes. *Journal of Economic Entomology*, *84*(3), 713-720. https://doi.org/10.1093/jee/84.3.713

Husin, T. O. B., & Port, G. R. (2021). Efficacy of entomopathogenic nematodes against *Tuta absoluta*. *Biological Control*, *160*, 104699. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104699

Kary, N. E., Sanatipour, Z., Mohammadi, D., & Dillon, A. B. (2021). Combination effects of entomopathogenic nematodes, *Heterorhabditis bacteriophora* and *Steinernema feltiae*, with Abamectin on developmental stages of *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera, Gelechiidae). *Crop Protection*, *143*, 105543. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105543

Koppenhöfer, A. M., Cowles, R. S., Cowles, E. A., Fuzy, E. M., & Baumgartner, L. (2002). Comparison of neonicotinoid insecticides as synergists for entomopathogenic nematodes. *Biological Control*, *24*(1), 90-97. https://doi.org/10.1016/S1049-9644(02)00008-7

Koppenhöfer, A. M., & Kaya, H. K. (1997). Additive and synergistic interaction between entomopathogenic nematodes and *Bacillus thuringiensis* for scarab grub control. *Biological Control*, *8*(2), 131-137. https://doi.org/10.1006/bcon.1996.0498

Koppenhöfer, A. M., Shapiro-Ilan, D. I., & Hiltpold, I. (2020). Entomopathogenic nematodes in sustainable food production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*, 125. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00125

Kruitbos, L.M., Heritage, S., Hapca, S.M., Wilson, M.J. (2010) The influence of habitat quality on the foraging strategies of the entomopathogenic nematodes *Steinernema carpocapsae* and *Heterorhabditis megidis*. *Parasitology*, *137*(2), 303-309. https://10.1017/S0031182009991326

Laznik, Ž., & Trdan, S. (2014). The influence of insecticides on the viability of entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Steinernematidae and Heterorhabditidae) under laboratory conditions. *Pest Management Science*, *70*(5), 784-789. https://doi.org/10.1002/ps.3614

Lewis, E. E., Campbell, J., Griffin, C., 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

Martinez de Altube, M. D. M., Strauch, O., Fernandez De Castro, G., & Martinez Peña, A. (2008). Control of the flat-headed root borer *Capnodis tenebrionis* (Linné) (Coleoptera: Buprestidae) with the entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae* (Weiser) (Nematoda: Steinernematidae) in a chitosan formulation in apricot orchards. *BioControl*, *53*(3), 531-539. https://doi.org/10.1007/s10526-007-9094-0.

Moisan, K., Kostenko, O., Galeano, M., Soler, R., van der Ent, S., & Hiltpold, I. (2024). The sky is not the limit: Successful foliar application of *Steinernema* spp. entomopathogenic nematodes to control Lepidopteran caterpillars. *Journal of Invertebrate Pathology*, *206*, 108163. https://doi.org/10.1016/j.jip.2024.108163

Nalinci, E., Karagoz, M., Gulcu, B., Ulug, D., Gulsen, S. H., Cimen, H., Touray, M., David Shapiro-Ilan, D. & Hazir, S. (2021). The effect of chemical insecticides on the scavenging performance of *Steinernema carpocapsae*: Direct effects and exposure to insects killed by chemical insecticides. *Journal of Invertebrate Pathology*, *184*, 107641. https://doi.org/10.1016/j.jip.2021.107641

Ndereyimana, A., Nyalala, S., Murerwa, P., & Gaidashova, S. (2020). Field efficacy of entomopathogens and plant extracts on *Tuta absoluta* Meyrick (Lepidoptera: Gelechiidae) infesting tomato in Rwanda. *Crop Protection*, *134*, 105183. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105183

Nozad, B. Z., Khani, S., Maroofpour, N., & Iranipour, S. (2021). Residual toxicity of some insecticides on *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) larvae under laboratory conditions. *Journal of Entomological Society of Iran*, *41*(2), 163-174 (In Persian)

Peters, A. (2003). Pesticides and entomopathogenic nematodes-current status and future work. *IOBC WPRS Bulletin*, *26*(5), 107-110.

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

Roditakis, E., Skarmoutsou, C., & Staurakaki, M. (2013). Toxicity of insecticides to populations of tomato borer *Tuta absoluta* (Meyrick) from Greece. *Pest management science*, *69*(7), 834-840. https://doi.org/10.1002/ps.3442

SAS Institute (2012). SAS Enterprise Guide ver. 9.3.

Silva, T. B. M., Silva, W. M., Campos, M. R., Silva, J. E., Ribeiro, L. M. S., & Siqueira, H. A. A. (2016). Susceptibility levels of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) to minor classes of insecticides in Brazil. *Crop Protection*, *79*, 80-86. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.10.012

Stuart, R. J., Barbercheck, M. E., Grewal, P. S., Taylor, R. A., & Hoy, C. W. (2006). Population biology of entomopathogenic nematodes: concepts, issues, and models. *Biological Control*, *38*(1), 80-102. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.09.019

Kaşkavalcı, G., & Türköz, S. (2016). Determination of the efficacy of some entomopathogenic nematodes against *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) under laboratory conditions. *Turkish Journal of Entomology*, *40*(2). https://doi.org/10.16970/ted.92606

Vainio, A. (1992). Guideline for laboratory testing of the side-effects of pesticides on entomophagous nematodes *Steinernema* spp. *IOBC/WPRS Bulletin, 15*, 145–147.

Van Damme, V. M., Beck, B. K., Berckmoes, E., Moerkens, R., Wittemans, L., De Vis, R., Nuyttens D., Casteels, H.F., Maes, M., Tirry, L., & De Clercq, P. (2016). Efficacy of entomopathogenic nematodes against larvae of *Tuta absoluta* in the laboratory. *Pest Management Science*, *72*(9), 1702-1709. https://doi.org/10.1002/ps.4195

Wakil, W., Kavallieratos, N. G., Eleftheriadou, N., Yaseen, T., Rasool, K. G., Husain, M., & Aldawood, A. S., 2023. Natural Warriors against Stored-Grain Pests: The Joint Action of *Beauveria bassiana* and *Steinernema carpocapsae*. *Journal of Fungi*, *9*(8), 835. https://doi.org/10.3390/jof9080835

Wilson, M.J., Ehlers, R.U., & Glazer, I. (2012) Entomopathogenic nematode foraging strategies–is *Steinernema carpocapsae* really an ambush forager? *Nematology*, *14*(4),389-94. https://doi.org/10.1163/156854111X617428

White, G.F. (1927). A method for obtaining infective nematode larvae from cultures. *Science*, *66*, 302-303. https://doi.org/10.1126/science.66.1709.302.b

Wu, S. Y., Tang, H., Ban, S., Wen, R., Mao, X., Deng, H., ... & Hou, Y. (2024). Integrated approaches for *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) management: insights from laboratory studies with entomopathogenic nematodes and insecticides. *Pest Management Science*, *80*(9), 4410-4416. https://doi.org/10.1002/ps.8144