DOI: 10.22034/ijon.2026.710680 مقاله پژوهشی

اثر ترکیب تجاری فرمایسین گولد بر بیماری‌زایی *Meloidogyne javanica* در گوجه‌فرنگی

حبیب‌اله چادگانی[۱]✉ و ساسان سرتیپی[۲]

۱. گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲. مدیرعامل شرکت پاک‌گستر پرند، تهران، ایران

✉پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: h.charehgani@yu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲

چکیده

نماتدهای ریشه‌گرهی (*Meloidogyne* spp.) از مهم‌ترین نماتدهای انگل گیاهی بوده و به‌طور گسترده در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری حضور دارند. اسیدهای آلی و معدنی با تأثیر بر برخی ویژگی‌های خاک مانند pH می‌توانند روی تولیدمثل و رشد موجودات زنده خاک تأثیرگذار باشند. در این تحقیق اثر غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد بر میزان تفریخ تخم و مرگ لارو سن دوم نماتد *M. javanica* در شرایط آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین‌منظور، ابتدا اثر غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد بر میزان تفریخ تخم و مرگ لاروهای سن دوم نماتد به‌طور جداگانه در شرایط آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت، سپس دوز کشنده ۵۰ درصد (LC_{50}) لاروهای سن دوم تعیین شد. در مطالعه‌های گلخانه‌ای به گیاه‌چه‌های گوجه‌فرنگی کشت‌شده در گلدان‌های پلاستیکی حاوی ۱۰ کیلوگرم بستر کشت در مرحله چهاربرگی، ۱۰۰۰۰ تخم و لارو سن دوم نماتد مایه‌زنی و هم‌زمان با ۲۰ میلی‌لیتر فرمایسین گولد در غلظت‌های ۱۹۵۰ (معادل LC_{50})، ۳۹۰۰ (معادل دو برابر LC_{50}) و ۵۸۵۰ (معادل سه برابر LC_{50}) میکرولیتر در لیتر به روش خیساندن خاک تیمار شد. این ترکیب در غلظت ۵۸۵۰ میکرولیتر در لیتر به ترتیب باعث کاهش ۲۶/۷، ۲۷/۹ و ۳۷/۷ درصد و در غلظت ۳۹۰۰ میکرولیتر در لیتر به ترتیب موجب کاهش ۲۲/۳، ۲۱/۹ و ۳۰/۲ درصد تعداد گال، توده تخم و شاخص تولیدمثل نماتد در مقایسه با گیاهان شاهد آلوده شد. با توجه به عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین این دو تیمار، غلظت ۳۹۰۰ میکرولیتر در لیتر از فرمایسین گولد، به عنوان بهترین تیمار آزمایش برای مدیریت *M. javanica* به‌منظور استفاده در شرایط گلخانه پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های جمعیتی نماتد، شاخص‌های رویشی گیاه ، مدیریت، نماتد ریشه‌گرهی

Effect of Formycine® gold on tomato plants infected with *Meloidogyne javanica*

Habiballah Chadegani[1]✉ and Sasan Sartipi[2]

1. Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran

2. CEO of Pak Gostar Parand Company, Tehran, Iran

✉Corresponding Author. E-mail: h.charehgani@yu.ac.ir

Received: 2025/11/26 Revised: 2025/12/28 Accepted: 2026/01/02

Abstract

Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) are among the most important plant-parasitic nematodes and widely distributed in tropical and subtropical regions. Organic and inorganic acids influence certain soil properties, such as pH, can therefore affect the reproduction and growth of soil organisms. In this study, the effects of different concentrations of Formycine® gold on the ovicidal and larvicidal rates of *M. javanica* were evaluated under laboratory conditions. Initially, the effects of various concentrations of Formycine® gold on egg hatching and J2 mortality were separately assessed in the laboratory, and then the lethal dose for 50% mortality (LC_{50}) of J2s was determined. In greenhouse experiments, tomato seedlings grown in plastic pots containing 10 kg of growing medium were inoculated with 10,000 nematode eggs and J2s at the four-leaf stage and simultaneously soil-drenched with 20 µl of Formycine® gold at concentrations of 1950 µl/L (equivalent to LC_{50}), 3900 µl/L (twice LC_{50}), and 5850 µl/L (three times LC_{50}). At a concentration of 5850 µl/L, the compound caused reductions of 26.7%, 27.9%, and 37.7%, respectively, and at 3900 µl/L, reductions of 22.3%, 21.9%, and 30.2%, respectively, in the number of galls, egg masses, and the nematode reproduction factor, compared to the inoculated control plants. Given the lack of significant differences between the results of the two treatments, a concentration of 3900 µl/L of Formycine® gold was selected as the optimal experimental treatment for managing *M. javanica* and is recommended for use under greenhouse conditions.

Key words: Management, Nematode population indices, Plant growth indices, Root-knot nematode

How to site: Chadegani, H. & Sartipi, S. 2026. Effect of Formycine® gold on tomato plants infected with *Meloidogyne javanica*. Iranian J. of Nematology 1(2), 281-291.

مقدمه

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) پرمصرف‌ترین سبزی در جهان است و برای مصارف محلی یا به‌عنوان یک محصول صادراتی کشت می‌شود (Jones *et al*. 2013). نماتدهای انگل گیاهی یکی از محدودیت‌های اصلی در تولید کشاورزی هستند (Singh *et al*. 2015). در این بین نماتدهای ریشه‌گرهی (*Meloidogyne*) به عنوان خطرناک‌ترین گروه از نماتدهای انگل گیاهی، موجب کاهش ۲۴ تا ۳۸ درصد عملکرد در گوجه‌فرنگی می‌شوند (Sikora & Fernandez 2005). استفاده از نماتدکش‌های شیمیایی برای کنترل نماتدهای انگل گیاهی موجب افزایش تولید محصول می‌شود اما از سوی دیگر، استفاده از این سموم منجر به آسیب‌های زیست‌محیطی و سلامتی جدی برای انسان می گردد (Akhtar & Siddiqui 2009). روش‌های کنترل فیزیکی و زراعی مختلف با درجات متفاوتی از موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند اما اغلب این روش‌ها فقط در شرایط خاصی مؤثر هستند.

اسیدهای آلی و معدنی با تأثیر بر برخی ویژگی‌های خاک مانند pH و هدایت الکتریکی و یا با تغییر انحلال‌پذیری برخی ترکیبات جامد خاک، می‌توانند روی تولیدمثل و رشد موجودات زنده خاک تأثیرگذار باشند. کاربرد این اسیدها در خاک‌های آهکی ایران به عنوان اصلاح‌کننده رایج است (Hasani *et al*. 2018). مشخص شده است که میزان اسیدیته در اغلب خاک‌های ایران بالا بوده و این امر باعث کاهش قابلیت دسترسی برخی عناصر غذایی موردنیاز گیاهان مانند آهن، روی، مس و منگنز می‌شود. از این‌رو، کاربرد طولانی‌مدت اسیدهای آلی و معدنی در خاک‌های آهکی ایران که منجر به کاهش اسیدیته خاک می‌شوند، امری رایج است. علاوه بر این، کاهش اسیدیته ناشی از کاربرد اسیدهای آلی در خاک‌ها باعث افزایش غلظت عناصر غذایی ضروری مانند فسفر، آهن، روی، مس و منگنز می‌شود. مشخص شده است که اسیدهای آلی توانایی کلات‌کردن عناصر فلزی را داشته و از این طریق باعث افزایش قابلیت جذب آن‌ها و تقویت گیاه می‌گردند (Jones *et al*. 2003). در مطالعه‌ای مشخص شد که کاربرد اسیدهای آلی و معدنی موجب کاهش تولیدمثل نماتدها، آمیب‌ها، تاژکداران و مژکداران خاک گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که اسیدهای آلی و معدنی با کاهش pH خاک و افزایش انحلال کانی‌ها و یا عمل به‌عنوان یک ماده غذایی و یا مهارکننده رشد بر جمعیت کرم‌های خاکی، ریزجانوران و جامعه میکروبی خاک تأثیرگذار هستند که این تأثیر بسته به نوع اسیدها و غلظت آن‌ها متفاوت بود (Hasani *et al*. 2018).

فرمایسین گولد به‌عنوان یک محصول گندزدا و بدون ایجاد مقاومت میکروبی شناخته شده است. این محصول حاوی ترکیب اسیدهای آلی بر پایه اتان کربوکسئیک اسید با نام رایج پراستیک اسید (Peracetic acid) (PAA) با فرمول شیمیایی CH_3CO_3H می‌باشد (Kermanshahi *et al*. 2015). اثر ضدمیکروبی PAA ناشی از قدرت اکسیداسیون بالا و غیرانتخابی آن است که منجر به آسیب‌های غیرقابل بازگشت به اجزای حیاتی سلول می‌شود. مطالعه‌های متعدد اثربخشی PAA را علیه طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها از جمله باکتری‌ها، ویروس‌ها و پروتوزوئرها نشان داده است. بر خلاف بسیاری از ضدعفونی‌کننده‌ها که در حضور مواد آلی در خاک به شدت اثر کاهشی نشان می‌دهند، PAA تا حد زیادی تحت تأثیر این مواد قرار نمی‌گیرد که آن را برای استفاده در کشاورزی بسیار مناسب می‌سازد (Koivunen & Heinonen-Tanski 2005). محصولات نهایی تجزیه PAA، اسید استیک، آب و اکسیژن هستند که ترکیباتی بی‌خطر و غیرسمی محسوب می‌شوند. این ویژگی، نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با ضدعفونی‌کننده‌هایی را که ترکیبات آلی هالوژنه سرطان‌زا تولید می‌کنند، مرتفع می‌سازد (Kitis 2004). با توجه به سازوکار عمل غیراختصاصی و اکسیدکنندگی قوی، احتمال ایجاد مقاومت میکروبی در برابر PAA بسیار پایین است.

در این تحقیق اثر غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد بر میزان تفریخ تخم و مرگ لارو سن دوم *M. javanica* در شرایط آزمایشگاه و هم‌چنین اثر غلظت‌های مختلف بر روی گوجه‌فرنگی آلوده به این نماتد در شرایط گلخانه مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که استفاده از نام این محصول تجاری در این پژوهش، فاقد هرگونه جنبهٔ تبلیغاتی و تجاری بوده و صرفاً برای گزارش دقیق روش‌کار انجام شده است.

مواد و روش‌ها

تهیه و تکثیر *Meloidogyne javanica*

ریشه‌های گوجه‌فرنگی آلوده به نماتد ریشه‌گرهی *M. javanica* از گلخانه دانشگاه یاسوج تهیه گردید. خاک روی ریشه‌های آلوده با جریان ملایم آب شست‌وشو داده شد و پس از حذف رطوبت آن‌ها با استفاده از دستمال کاغذی، ریشه‌های آلوده برای استخراج تخم‌های نماتد، به دستگاه مخلوط‌کن برقی

(Blender) منتقل گردیدند. برای پاره کردن و هم‌چنین ضدعفونی کیسه‌های تخم، محلول هیپوکلریت‌سدیم ۰/۵ درصد به ریشه‌ها اضافه شد. عمل خردکردن ریشه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت متوسط انجام و محتویات درون دستگاه از یک الک آزمایشگاهی ۱۰۰ مش که زیر آن یک الک ۵۰۰ مش قرار داشت، عبور داده شد. بقایای ریشه روی الک ۱۰۰ مش باقی مانده و سوسپانسیون تخم نماتد روی سطح الک ۵۰۰ مش قرار گرفت. محتویات الک‌ها با جریان ملایم آب شست‌وشو داده شد تا بقایای هیپوکلریت‌سدیم حذف گردد. سپس محتویات باقی‌مانده روی سطح الک ۵۰۰ مش به یک بشر انتقال یافت و با استفاده از دستگاه استرئومیکروسکوپ شمارش شدند (Hussey & Barker 1973). برای تهیه لارو سن دوم نماتد، به منظور انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، ابتدا یک کاغذ صافی واتمن شماره یک سترون درون یک تشتک پتری سترون گذاشته شد، سپس سوسپانسیون تخم نماتد روی کاغذ صافی در درون تشتک پتری حاوی آب مقطر سترون ریخته شد. تشتک پتری به مدت حداقل چهار روز در انکوباتور در دمای ۱± ۲۷ درجه سلسیوس و در شرایط تاریکی نگه‌داری گردید. لاروهای سن دوم بعد از تفریخ از کاغذ صافی عبور کرده و در کف تشتک پتری قرار گرفتند (Vrain 1977).

برای تکثیر نماتد، از گیاهان گوجه‌فرنگی رقم Early-Urbana® استفاده شد. کشت بذر گوجه‌فرنگی در گلدان‌های یک کیلوگرمی حاوی بستر کشت تشکیل‌شده از خاک مزرعه، کود دامی و ماسه با نسبت ۱:۱:۲ انجام گردید. پس از رسیدن گیاه‌چه‌ها به مرحله رشد چهاربرگی، نماتد به آن‌ها مایه‌زنی شد. بدین‌منظور سه حفره به عمق یک سانتی‌متر در نزدیکی ریشه گیاه ایجاد و مقداری از سوسپانسیون حاوی۵۰۰۰ تخم و لارو سن دوم درون آن‌ها ریخته و سپس حفره‌های ایجادشده با خاک پر شدند. گیاه‌چه‌های مایه‌زنی شده به مدت ۶۰ روز در گلخانه با میانگین دمای ۲±۲۷ درجه سلسیوس و ۱۶ ساعت روشنایی و هشت ساعت تاریکی نگه‌داری گردیدند.

آزمون تأثیر فرمایسین گولد در میزان تفریخ تخم نماتد *M. javanica*

بدین‌منظور، ابتدا غلظت‌های صفر (شاهد)، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ میکرولیتر در لیتر (پی‌پی‌ام) از فرمایسین گولد تهیه شد. سوسپانسیون حاوی ۱۰±۱۰۰ تخم *M. javanica* به طور جداگانه به درون هر چاهک موجود در پلیت ۹۶ چاهکی پلی‌استری کف گرد با حجم نهایی ۲۵۰ میکرولیتر ریخته و سپس فرمایسین گولد به هر چاهک طبق غلظت‌های گفته‌شده اضافه گردید. درب پلیت برای جلوگیری از تبخیر آب با پارافیلم پوشانده شد و به مدت پنج روز در دستگاه ژرمیناتور با دمای ۲±۲۷ درجه سلسیوس و در شرایط تاریکی قرار گرفته و سپس تخم‌های تفریخ‌شده در هر چاهک شمارش شدند (Moazezikho *et al.* 2020). آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی و در چهار تکرار انجام گردید.

آزمون تأثیر فرمایسین گولد در میزان مرگ لاروهای سن دوم *M. javanica*

ابتدا غلظت‌های صفر (شاهد)، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ میکرولیتر در لیتر از فرمایسین گولد تهیه شد. سوسپانسیون حاوی ۱۰±۱۰۰ لاروهای سن دوم *M. javanica* به‌طور جداگانه به درون هر چاهک موجود در پلیت ۹۶ چاهکی پلی‌استری کف گرد با حجم نهایی ۲۵۰ میکرولیتر ریخته و سپس به هر چاهک طبق غلظت‌های گفته‌شده، فرمایسین گولد اضافه گردید. درب پلیت برای جلوگیری از تبخیر آب با پارافیلم پوشانده شد و به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه ژرمیناتور با دمای ۲±۲۷ درجه سلسیوس در شرایط تاریکی قرار داده شد. پس از این مدت برای اطمینان از مرگ لاروها، تمامی لاروهای سن دوم به تشتک پتری حاوی آب مقطر استریل منتقل و پس از ۲۴ ساعت تعداد لاروهای سن دوم غیرمتحرک به‌عنوان نماتد مرده در هر چاهک شمارش شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی و در چهار تکرار انجام گرفت. برای محاسبه دوز کشنده ۵۰ درصد (LC_{50}) لاروهای سن دوم نماتد از روش پروبیت در محیط نرم افزار SPSS استفاده شد. بدین منظور غلظت‌هایی از فرمایسین گولد که موجب کشندگی لاروهای سن دوم به میزان کمتر از ۸۰ درصد شدند مورد بررسی قرار گرفتند (Moazezikho *et al.* 2020).

آزمون گلخانه‌ای

تهیه بستر کشت و کشت بذر گوجه‌فرنگی

برای تهیه بستر کشت از خاک مزرعه، کود حیوانی و ماسه با نسبت ۱:۱:۲ و سترون‌شده با بخار آب گرم استفاده شد. گلدان‌های ۱۰ کیلوگرمی با ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و قطر دهانه ۳۲ سانتی‌متر به اندازه مساوی با این بستر کشت، پر شدند. در گلدان‌ها بذر گوجه‌فرنگی رقم Early-Urbana® کشت و گلدان‌ها در شرایط گلخانه با دمای ۴±۲۷ درجه سلسیوس و ۱۶ ساعت روشنایی و هشت ساعت تاریکی قرار داده شدند.

مایه‌زنی گیاهان گوجه‌فرنگی با *M. javanica* و تیمار با فرمایسین گولد

گلدان‌ها به دو گروه و هر گروه به چهار زیرگروه تقسیم شدند. پس از رسیدن گیاه‌چه‌ها به مرحله چهاربرگی، به گلدان‌های گروه اول تعداد ۱۰۰۰۰ تخم و لارو سن دوم نماتد مایه‌زنی شد و به گلدان‌های گروه دوم نماتد مایه‌زنی نگردید. در همان زمان، ۲۰ میلی‌لیتر از غلظت‌های صفر (شاهد)، ۱۹۵۰ (معادل LC_{50})، ۳۹۰۰ (معادل دو برابر LC_{50}) و ۵۸۵۰ (معادل سه برابر LC_{50}) میکرولیتر در لیتر فرمایسین گولد به زیرگروه‌ها تیمار گردید. آزمایش به صورت فاکتوریل با دو فاکتور نماتد (با نماتد و بدون نماتد) و غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد در قالب طرح کاملاً تصادفی و با چهار تکرار انجام شد. بعد از گذشت ۶۰ روز، گیاهان برداشت و شاخص‌های رویشی گیاه شامل طول و وزن تر و خشک شاخساره و وزن تر ریشه و هم‌چنین شاخص‌های جمعیتی نماتد شامل تعداد تخم در سیستم ریشه بر اساس روش (Hussey & Barker 1973)، تعداد گال و کیسه تخم در سیستم ریشه بر اساس روش (Hussey & Janssen 2002) و تعداد لارو سن دوم درکیلوگرم خاک با استفاده از روش الک و سینی پیشنهادشده توسط (Whitehead & Hemming 1965) مورد بررسی قرار گرفت. پس از محاسبه جمعیت نهایی نماتد (تعداد تخم و کیسه تخم در سیستم ریشه و تعداد لارو سن دوم در گلدان)، شاخص تولیدمثل نماتد محاسبه شد. این شاخص از تقسیم جمعیت نهایی نماتد بر جمعیت اولیه نماتد یعنی تعداد تخم مایه‌زنی‌شده به گیاه محاسبه شد (Taylor & Sasser 1978).

تجزیه‌وتحلیل آماری

داده‌ها با استفاده از رویه ANOVA و با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ مورد تجزیه‌وتحلیل آماری قرار گرفتند. اثر فرمایسین گولد بر میزان تفریخ تخم نماتد و مرگ لارو سن دوم در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. در موارد لازم برای نرمال‌سازی، داده‌ها به صورت مقادیر ($\arcsin \sqrt{X}$) تغییر یافتند. داده‌ها به صورت تجزیه واریانس یک طرفه (One-way ANOVA) مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مطالعه‌های گلخانه‌ای، داده‌های مربوط به شاخص‌های جمعیتی نماتد به صورت تجزیه واریانس یک‌طرفه و داده‌های مربوط به شاخص‌های رویشی گیاه به صورت فاکتوریل دوطرفه ۴×۲ (غلظت فرمایسین گولد X نماتد) (Two-Way ANOVA) و در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از روش دانکن در سطح احتمال یک درصد انجام شد.

نتایج

تأثیر فرمایسین گولد بر میزان تفریخ تخم نماتد و مرگ لارو سن دوم *M. javanica*

نتایج بررسی اثر غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد بر تفریخ تخم و مرگ لارو سن دوم نماتد نشان داد که با افزایش غلظت فرمایسین گولد، میزان تفریخ تخم نماتد کاهش و میزان مرگ لارو سن دوم افزایش یافت به‌طوری‌که کمترین میزان تفریخ تخم و هم‌چنین بیشترین میزان مرگ لارو سن دوم در غلظت ۱۵۰۰۰ میکرولیتر در لیتر مشاهده شد که با سایر تیمارها به جز تیمار ۱۰۰۰۰ میکرولیتر در لیتر اختلاف معنی‌داری داشت ($P\leq 0.01$) (شکل‌های ۱ و ۲). بر اساس رابطه بین میزان مرگ لارو سن دوم نماتد و غلظت فرمایسین گولد، مقدار LC_{50} برابر با ۱۹۵۰ میکرولیتر در لیتر محاسبه گردید (جدول ۱).

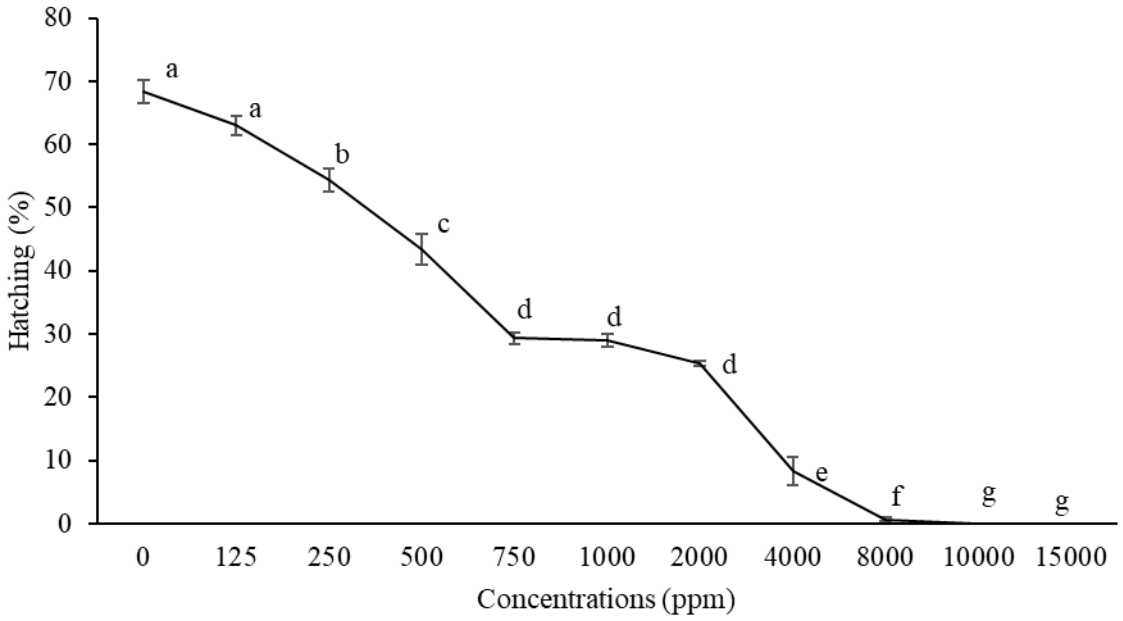
با ۵۸۵۰ میکرولیتر در لیتر فرمایسین گولد به‌دست آمد ($P\leq 0.01$). بیشترین میانگین وزن خشک شاخساره و وزن تر ریشه در گیاهان شاهد سالم مشاهده شد که در ارتباط با وزن خشک شاخساره تنها با گیاهان سالم تیمارشده با فرمایسین گولد در غلظت ۱۹۵۰ میکرولیتر در لیتر و در ارتباط با وزن تر ریشه تنها با گیاهان سالم تیمارشده با فرمایسین گولد در غلظت‌های ۱۹۵۰ و ۳۹۰۰ میکرولیتر در لیتر اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. کمترین میانگین وزن خشک شاخساره و وزن تر ریشه در گیاهان شاهد آلوده مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری از سایر تیمارها کمتر بود. میانگین وزن خشک شاخساره و وزن تر ریشه در گیاهان شاهد سالم به طور معنی‌داری از گیاهان شاهد آلوده به نماتد بیشتر بود. روند مشابهی در گیاهان تیمارشده با هر کدام از غلظت‌های فرمایسین گولد مشاهده گردید ($P\leq 0.01$) (شکل ۴).

با توجه به مقدار R^2 محاسبه‌شده در مطالعه‌های زیست‌سنجی مشخص شد که ۹۹ درصد تلفات لارو سن دوم نماتد مربوط به فرمایسین گولد و بقیه مربوط به سایر عوامل بوده است. $Y= bx+a$ معادله رابطه لگاریتم غلظت و پروبیت درصد تلفات است که a عرض از مبدأ، x لگاریتم غلظت، b شیب خط و y پروبیت درصد تلفات می‌باشد (شکل ۳).

جدول ۱. نتایج پروبیت اثر غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد روی مرگ لارو سن دوم *Meloidogyne javanica*

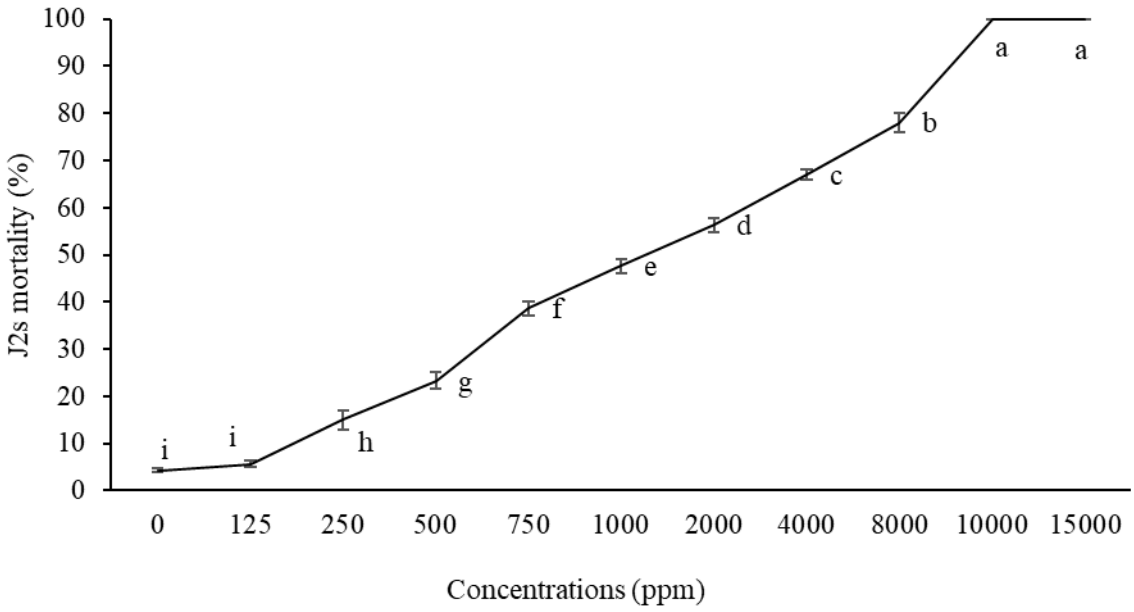
Table 1. Probit results of the effects of different concentrations of Formycine® gold on second-stage juveniles mortality of *Meloidogyne javanica*.

Concentrations (ppm)	Number of J2s	Number of dead J2s	Probability	95 percent confidence limits for concentrations			χ^2	R^2	Regression equations
				Estimate	Lower bound	Upper bound			
250	377	56							
500	381	89	0.1	36.58	23.17	53.31			
2000	390	204	0.5	1950	1752	2239	0.631	0.999	y=1.2294x+0.989
4000	358	240	0.9	19274	15220	25562			
8000	372	290							



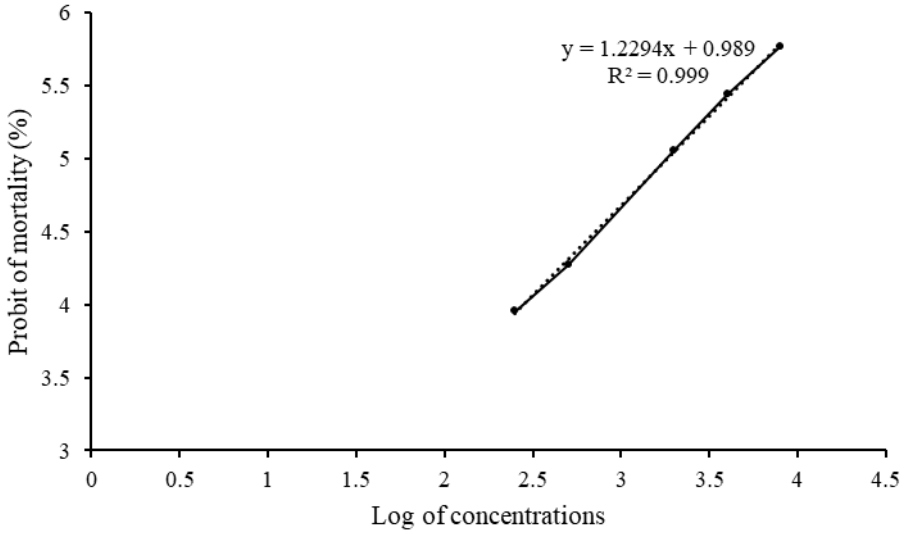
شکل ۱. میانگین تفریخ تخم *Meloidogyne javanica*، ۱۲۰ ساعت بعد از تیمار غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد. میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک بر اساس مقایسه میانگین به روش چنددامنه‌ای دانکن هستند، تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند. نوار خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد می‌باشد.

Fig. 1. Mean hatch of *Meloidogyne javanica*, 120 h after exposure to different concentrations of Formycine® gold. Treatment means with similar letters are not significantly different according to the Duncan's multiple-range test at $P \leq 0.01$. Error bars indicate standard error of the mean.



شکل ۲. میانگین مرگ لارو سن دوم نماتد ریشه‌گرهی *Meloidogyne javanica*، ۴۸ ساعت بعد از تیمار غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد. میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک بر اساس مقایسه میانگین به روش چنددامنه‌ای دانکن هستند، تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند. نوار خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد می‌باشد.

Fig. 2. Mean mortality (%) of *Meloidogyne javanica* juveniles, 48 h after exposure to different concentrations of Formycine® gold. Treatment means with similar letters are not significantly different according to the Duncan's multiple-range test at $P \leq 0.01$. Error bars indicate standard error of the mean.



شکل ۳. معادله رابطه لگاریتم غلظت و پروبیت درصد مرگ لارو سن دوم نماتد ریشه‌گرهی *Meloidogyne javanica*، تحت تأثیر غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد

Fig. 3. Equation of the relationship between the logarithm of concentration and the probit of the mortality (%) of *Meloidogyne javanica* juveniles after exposure to different concentrations of Formycine® gold

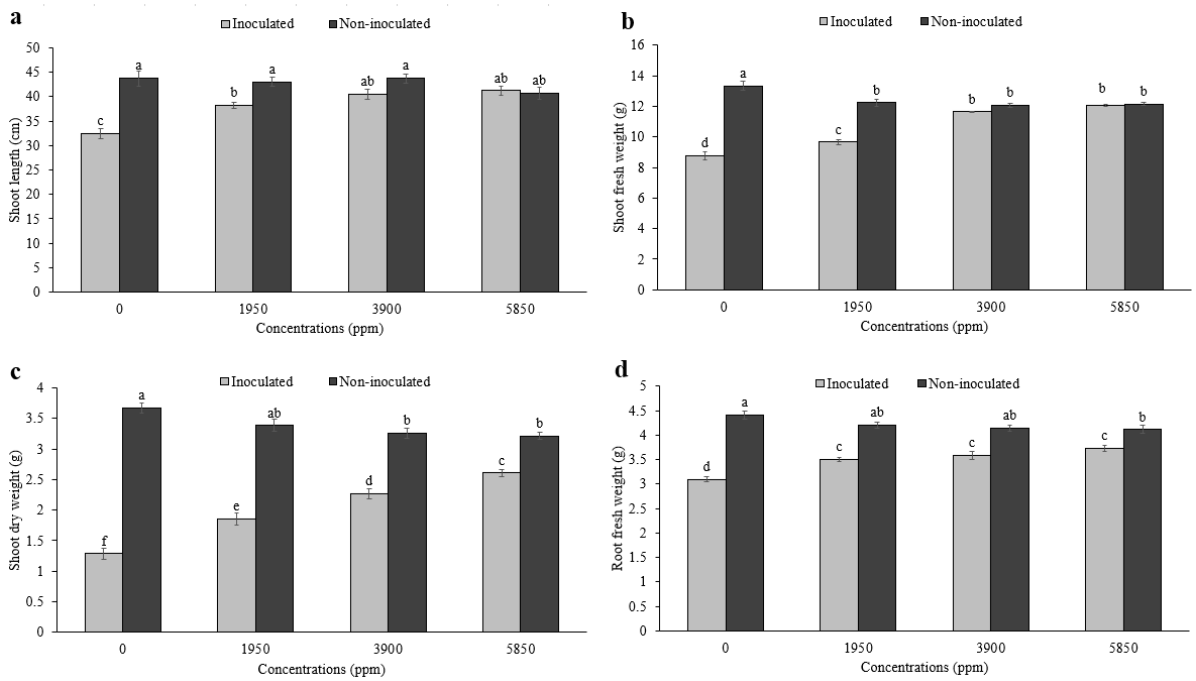
نتایج مطالعه‌های گلخانه‌ای

بر اساس نتایج، بیشترین میانگین طول شاخساره در گیاهان شاهد سالم مشاهده شد که تنها با گیاهان آلوده شاهد و گیاهان آلوده تیمارشده با فرمایسین گولد با غلظت ۱۹۵۰ میکرولیتر در لیتر اختلاف معنی‌دار نشان داد. میانگین طول شاخساره در گیاهان شاهد آلوده به طور معنی‌داری از سایر تیمارها کمتر بود ($P\leq 0.01$). بیشترین و کمترین میانگین وزن تر شاخساره به ترتیب در گیاهان شاهد سالم و شاهد آلوده مشاهده شد و این اختلاف نسبت به سایر تیمارها معنی‌دار بود. طول شاخساره و وزن تر شاخساره در گیاهان سالم و آلوده به نماتد و تیمارشده با غلظت ۳۹۰۰ میکرولیتر در لیتر فرمایسین گولد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. روند مشابهی در گیاهان تیمارشده

در ارتباط با شاخص‌های جمعیتی نماتد، نتایج نشان داد که بیشترین میانگین تعداد تخم در سیستم ریشه (شکل a-۴) و نیز فاکتور تولیدمثل نماتد (شکل d-۴)، در تیمار شاهد (فاقد فرمایسین گولد) بروز کرد که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری داشت. بیشترین میانگین تعداد گال (شکل b-۴) و توده تخم در سیستم ریشه (شکل c-۴)، در تیمار شاهد (فاقد فرمایسین گولد) مشاهده شد که تنها با گیاهان تیمارشده با فرمایسین گولد در غلظت ۱۹۵۰ میکرولیتر در لیتر اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. کمترین میانگین تمام شاخص‌های مربوط به نماتد، در گیاهان تیمارشده با فرمایسین گولد در غلظت ۵۸۵۰ میکرولیتر در لیتر مشاهده شد اما با گیاهان تیمارشده با فرمایسین گولد در غلظت ۳۹۰۰ میکرولیتر در لیتر تفاوت معنی‌داری نداشت ($P\leq 0.01$) (شکل ۵).

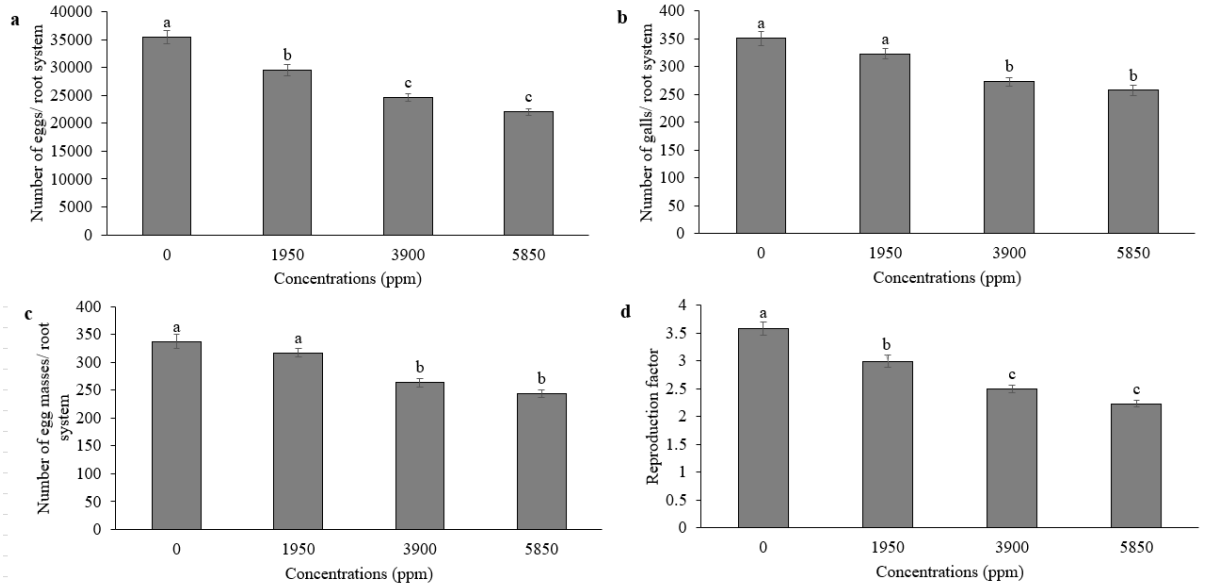
بحث

در این تحقیق اثر غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد بر میزان تفریخ تخم و مرگ لارو سن دوم *M. javanica* در شرایط آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از تعیین دوز کشنده ۵۰ درصد (LC_{50}) لاروهای سن دوم نماتد، اثر این غلظت و غلظت معادل دو برابر و سه برابر آن بر روی گوجه‌فرنگی آلوده به نماتد در شرایط گلخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش غلظت فرمایسین گولد، میزان مرگ لاروهای سن دوم افزایش و میزان تفریخ تخم نماتد کاهش یافت به‌صورتی‌که در غلظت‌های ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ میلی‌لیتر در میلی‌لیتر، تمامی لاروهای سن دوم کشته و هم‌چنین هیچ تخمی تفریخ نشد. این نتایج اثر مستقیم ترکیب اسیدی فرمایسین گولد روی تخم و لارو نماتد را نشان می‌دهد. این نتایج با مطالعه‌ای که حساسیت کرم‌های خاکی مانند گونه *Lumbricus terrestris* به تماس مستقیم با ترکیبات اسیدی را نشان می‌داد، همسو می‌باشد. ترکیبات اسیدی می‌تواند باعث کاهش رشد، تولیدمثل و حتی مرگ کرم‌های خاکی شود (Tóth *et al.* 2020). در مطالعه حاضر مشخص شد که تعداد تخم و کیسه تخم نماتد در بالاترین غلظت فرمایسین گولد (۵۸۵۰ میلی‌لیتر در میلی‌لیتر) به ترتیب ۳۸ و ۲۸ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. فرمایسین گولد با اثر بر کاهش تفریخ تخم و افزایش مرگ لاروهای سن دوم نماتد در خاک، موجب کاهش تعداد لاروهای نفوذ یافته به بافت ریشه شده و درنتیجه کاهش تعداد گال و تخم در سیستم ریشه را می‌توان به این نکته ارتباط داد. مطالعه‌های پیشین نیز نقش ترکیبات مختلف اسیدی در کاهش تعداد نماتد در خاک و درنتیجه کاهش تعداد گال در سیستم ریشه را نشان داد (Charehgani 2020). هم‌چنین مشخص شد که فاکتور تولیدمثل نماتد در غلظت ۵۸۵۰ میلی‌لیتر در میلی‌لیتر فرمایسین گولد ۳۸ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. این نتایج با نتایج مطالعه رفیعی و همکاران (۲۰۲۳) همسو می‌باشد. آنها نشان دادند که فرمایسین گولد باعث کاهش تعداد توده تخم، گال و فاکتور تولیدمثل *M. javanica* در گیاهان گوجه‌فرنگی می‌شود (Rafiei *et al.* 2023). اسیدهای آلی و معدنی با تأثیر بر برخی ویژگی‌های خاک مانند pH و هدایت الکتریکی و یا با تغییر انحلال‌پذیری برخی ترکیبات جامد خاک، می‌توانند روی تولیدمثل و رشد موجودات زنده خاک تأثیرگذار باشند (Hasani *et al*. 2018). تأثیر اسیدهای آلی و معدنی به طور مستقیم و غیرمستقیم، جمعیت‌های میکروبی، بی‌مهرگان و حتی ریشه گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش pH ناشی از اسیدهای قوی معدنی، باعث انحلال و آزادسازی یون‌های سمی آلومینیوم (Al^{3+})، منگنز (Mn^{2+}) و سایر فلزات سنگین از کانی‌های خاک می‌شود. این یون‌ها برای بسیاری از موجودات زنده خاک سمی هستند. برای مثال جمعیت‌های باکتریایی که معمولاً به pH خنثی تا قلیایی حساس‌تر هستند، کاهش می‌یابند (Kunito *et al.* 2016). این مشاهدات با نتایج مطالعه حاضر که فرمایسین گولد به طور مستقیم باعث کشته‌شدن لاروهای سن دوم *M. javanica* گردید، سازگار می‌باشد.



شکل ۴. تأثیر غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد بر میزان رشد گیاهان گوجه‌فرنگی سالم و آلوده به *Meloidogyne javanica*. a: طول شاخساره، b: وزن تر شاخساره، c: وزن خشک شاخساره و d: وزن تر ریشه. میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک بر اساس مقایسه میانگین به روش چنددامنه‌ای دانکن هستند، تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند. نوار خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد می‌باشد.

Fig. 4. Effect of different concentrations of Formycine® gold on growth of non-inoculated and inoculated tomato plants with *Meloidogyne javanica*. Treatment means with similar letters are not significantly different according to the Duncan's multiple-range test at $P \leq 0.01$. Error bars indicate standard error of the mean.



شکل ۵. تأثیر غلظت‌های مختلف فرمایسین گولد بر شاخص‌های جمعیتی *Meloidogyne javanica* درگیاه گوجه‌فرنگی. a: تعداد تخم در سیستم ریشه، b: تعداد گال در سیستم ریشه، c: تعداد توده تخم در سیستم ریشه و d: فاکتور تولیدمثل. میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک بر اساس مقایسه میانگین به روش چنددامنه‌ای دانکن هستند، تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند. نوار خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد می‌باشد.

Fig. 5. Effect of different concentrations of Formycine® Gold on population indices of *Meloidogyne javanica* infecting tomato plants. Treatment means with similar letters are not significantly different according to the Duncan's multiple-range test at $P \leq 0.01$. Error bars indicate standard error of the mean.

در مطالعه حاضر در بالاترین غلظت مورد استفاده از فرمایسین گولد در گیاهان سالم، کاهش جزئی و گاهی معنی‌دار در شاخص‌های رویشی گیاه در مقایسه با گیاهان تیمارنشده مشاهده شد. سازوکار این امر می‌تواند به این دلیل باشد که یون H^+با کاتیون‌های نگه‌دارنده ذرات خاک مانند Ca^{2+} رقابت کرده و آن‌ها را از جایگاه‌های تبادلی خارج می‌کند. این فرآیند منجر به پراکندگی ذرات رس، کاهش پایداری خاکدانه‌ها، و در نهایت فشردگی خاک و کاهش تهویه می‌شود که محیطی نامساعد برای رشد ریشه گیاهان و فعالیت موجودات زنده ایجاد می‌کند (Brady & Weil 2016). البته همین اثر منفی بر میکروارگانیسم‌های موجود در خاک خود دلیلی بر افزایش معنی‌دار میانگین شاخص‌های رویشی گیاه در حضور نماتد می‌باشد. به عبارت دیگر در حضور نماتد، اثر بازدارنده فرمایسین گولد بر نماتد مؤثرتر از اثر مضر آن بر گیاه می‌باشد. از طرف دیگر مشخص شده است که میزان pH در اغلب خاک‌های ایران بالا بوده و این امر باعث کاهش قابلیت دسترسی برخی عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان مانند آهن، روی، مس و منگنز می‌شود. ازاین‌رو کاربرد طولانی مدت اسیدهای آلی و معدنی در خاک‌های آهکی ایران که منجر به کاهش pH خاک می‌شوند، امری رایج می‌باشد. مطالعه‌های پیشین نشان داده که تقویت گیاه با کودهای کلات به ویژه روی و آهن موجب بهبود شاخص‌های رویشی گیاه و کاهش خسارت نماتدهای ریشه‌گرهی می‌شود (Charehgani *et al.* 2021; Rostami *et al.* 2021). در مطالعه حسنی و همکاران (۲۰۱۸) مشخص شد که کاربرد اسیدهای آلی و معدنی موجب کاهش تولیدمثل نماتدها، آمیب‌ها، تاژکداران و مژکداران خاک می شود. نتایج این تحقیق نشان داد که اسیدهای آلی و معدنی با کاهش pH خاک و افزایش انحلال کانی‌ها و یا به‌عنوان یک ماده غذایی و یا مهارکننده رشد بر جمعیت کرم‌های خاکی، ریزجانوران و جامعه میکروبی خاک تأثیرگذار هستند که این تأثیر بسته به نوع اسیدها و غلظت آن‌ها متفاوت بود (Hasani *et al.* 2018). این شواهد نقش مؤثر فرمایسین گولد در تقویت گیاه و تأمین مواد غذایی برای گیاه را نشان می‌دهد که موجب کاهش خسارت ناشی از *M. javanica* می‌گردد.

نتیجه‌گیری

پراستیک اسید موجود در فرمایسین گولد، نه تنها یک ضدعفونی‌کننده قدرتمند با طیف اثر بسیار گسترده است، بلکه به دلیل مزایای عملیاتی مانند فعالیت در حضور مواد آلی و سازگاری با محیط‌زیست، گزینه‌ای برتر در راه‌بردهای کنترل *M. javanica* محسوب می‌شود. این ترکیب در غلظت ۵۸۵۰ میکرولیتر در لیتر (معادل ۱۴/۹ لیتر در هکتار) بدون ایجاد نشانه‌های گیاه‌سوزی یا ضعف در شاخص‌های رویشی گیاه، باعث کاهش ۲۷ درصد تعداد گال، ۲۸ درصد تعداد توده تخم و ۳۸ درصد در شاخص تولیدمثل نماتد در مقایسه با گیاهان شاهد گردید. این درصدهای کاهش در ارتباط با غلظت ۳۹۰۰ میلی‌لیتر در لیتر (معادل ۹/۷ لیتر در هر هکتار) از فرمایسین گولد به ترتیب معادل ۳۰/۳، ۲۲/۳، ۲۱/۹ و ۳۰/۲ درصد بود. با توجه به این که شاخص‌های جمعیتی نماتد پس از استفاده از این ترکیب در غلظت ۳۹۰۰ میکرولیتر در لیتر اختلاف معنی‌داری با غلظت ۵۸۵۰ میکرولیتر در لیتر نشان ندادند، در نتیجه غلظت ۳۹۰۰ میکرولیتر در لیتر از فرمایسین گولد به عنوان بهترین تیمار در این آزمایش برای مدیریت *M. javanica* جهت استفاده در شرایط گلخانه پیشنهاد می‌گردد. لازم به ذکر است که نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از فرمایسین گولد در کمترین غلظت (۱۹۵۰ میکرولیتر در لیتر) نیز باعث کاهش ۱۶/۵ درصد در میزان تولیدمثل نماتد شد که معادل ۴/۸۵ لیتر از فرمایسین گولد در هر هکتار می‌باشد. با درنظرگرفتن شرایط خاص محیطی، انتخاب غلظت و زمان تیمار فرمایسین گولد برای دست‌یابی به حداکثر کارایی ضروری است.

تعارض منافع

نویسندگان با یکدیگر، با تحقیق انجام شده و محل انجام پژوهش تضاد منافعی ندارند.

سپاس‌گزاری

نگارندگان از حمایت مادی شرکت پاک‌گستر پرند و حمایت معنوی دانشگاه یاسوج سپاس‌گزاری می‌نمایند.

References

Akhtar M.S. & Siddiqui Z.A. 2009. Use of plant growth-promoting rhizobacteria for the biocontrol of root-rot disease complex of chickpea. *Australasian Plant Pathology* 38, 44-50.

Brady N.C. & Weil R.R. 2016. *The nature and properties of soil, 15nd Edition.* London, United Kingdom, Pearson Education.

Charehgani H. 2020. Effect of wood vinegar, humic acid and effective microorganisms against *Meloidogyne javanica* on tomato. *Plant Pathology Science* 9 (2), 73-84.

Charehgani H. Fakharzadeh S. & Nazaran M.H. 2021. Evaluation of nano-chelated silicon fertilizer in the management of *Meloidogyne javanica* in tomato. *Indian Phytopathology*. doi.org/10.1007/s42360-021-00413-4

Hasani A., Etemadian M. & Khatibi H. 2018. The effect of organic and inorganic acids on the physiology of reproduction and growth of earthworms, soil fauna, and microbial communities in calcareous soils. *Journal of Animal Physiology and Development* 41(11), 1-16.

Hussey R.S. & Barker K.R. 1973. A comparison of methods of collecting inocula of *Meloidogyne* spp. including a new technique. *The Plant Disease Reporter* 57, 1025-1028.

Hussey R.S. & Janssen G.J.W. 2002. Root-knot nematodes: *Meloidogyne* species. In Starr J.L., Cook R. & Bridge J. (Eds.), *Plant resistance to parasitic nematodes* (pp. 43–70). Wallingford, CABI Publishing.

Jones J.T., Haegeman A., Danchin E.G., Gaur H.S., Helder J., Jones M.G., Kikuchi T., Manzanilla-López R., Palomares-Rius J.E., Wesemael W.M. & Perry R.N. 2013. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology* 14(9), 946-961.

Jones D., Dennis P., Owen A. & van Hees P.A.W. 2003. Organic acid behavior in soils – misconceptions and knowledge gaps. *Plant and Soil* 248, 31-41.

Kermanshahi H., Pilevar M. & Aami-Azghadi M. 2015. Interactive influence of Formycine® gold and pigment on egg quality and performance of laying hens. *Iranian Journal of Applied Animal Science* 5(3), 699-705.

Kitis M. 2004. Disinfection of wastewater with peracetic acid: A review. *Environment International* 30 (1), 47-55.

Koivunen J. & Heinonen-Tanski H. 2005. Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters. *Water Research* 39 (18), 4445-4453.

Kunito T., Saeki K., Oyaizu H. & Matsumoto S. 2016. Influences of soil acidification on microbial community structure. *Soil Science and Plant Nutrition* 62 (2), 193-201.

Moazezikho A., Charehgani H., Abdollahi M. & Rezaei R. 2020. The evidence for inhibitory effect of *Pseudomonas fluorescens* CHA0 and aqueous extracts of *Datura stramonium* and *Myrtus communis* on tomato plants infected with *Meloidogyne javanica* (Tylenchida: Heteroderidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 30, 15. doi.org/10.1186/s41938-020-00217-0

Rafiei M. Olia M. Nasr-Esfahani M. Mashayekhi P. & Nase-Esfahani A. 2023. Management of the root-knot nematode, *Meloidogyne javanica*, with non-chemical products on greenhouse-grown tomatoes. *Journal of Advances in Plant Protection* 2 (1), 11–28.

Rostami S., Charehgani H., Abdollahi M. & Rezaei R. 2021. Evaluation of nano iron and zinc chelated fertilizers on okra (*Abelmoschus esculentus*) infected with *Meloidogyne javanica*. *Journal of Crop Protection* 10 (3), 493-502.

Sikora R. & Fernandez E. 2005. Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical. In Sikora R., Coyne D., Hallmann J. & Timper P. (Eds.), *Nematode parasites of vegetables, 3rd edition* (pp. 319-392). Wallingford, CABI Publishing.

Singh S., Singh B. & Singh A.P. 2015. Nematodes: A threat to sustainability of agriculture. *Environmental Sciences Proceedings* 29, 215-216.

Taylor A.L. & Sasser J.N. 1978. *Biology, identification and control of root-knot nematodes*. North Carolina, North Carolina State University Graphics.

Tóth E., Gergely I. & Kuti K. 2020. The effects of soil acidity on earthworm communities. *Applied Soil Ecology* 155, 103662.

Vrain T.C. 1977. A technique for the collection of larvae of *Meloidogyne* spp. and a comparison of eggs and larvae as inocula. *Nematology* 9, 249-251.

Whitehead A.G. & Hemming J.R. 1965. A comparison of some quantitative methods extracting small vermiform nematodes from the soil. *Annals of Applied Biology* 55, 25-38.