Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)

49(2), Summer, 2026

10.22055/ppr.2026.52397.1894

Effects of Two *Trichoderma* Species on Biochemical Responses and Photosynthetic Pigments in Tomato Plants Infected with Root-Knot Nematodes

A. Naghavi[1*]

1. ***Corresponding Author**: Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran (naghavi.a@lu.ac.ir)

Received: 16 June 2026 Revised: 9 September 2026 Accepted: 16 September2026

Abstract

Background and Objectives

Meloidogyne spp. are among the most destructive plant-parasitic nematodes and cause substantial reductions in crop quality and productivity. Commonly known as root-knot nematodes (RKNs), *Meloidogyne* species are obligate endoparasites that infect a wide range of economically important crops. Among them, Meloidogyne incognita is one of the most damaging species and has been reported to cause yield losses of up to 27% in tomato (Lycopersicon esculentum) and up to 50% in vegetable crops worldwide. Root-knot nematode infection induces oxidative stress in host plants, activating defense mechanisms that limit cellular damage and help restore physiological balance. In response to nematode infection, plants undergo several biochemical and physiological changes, including alterations in photosynthetic pigments, phenolic compounds, osmoprotectants, and organic acids. Trichoderma species are well known for their antagonistic activity against plant-parasitic nematodes through mechanisms such as parasitism, competition, and the production of bioactive metabolites. In addition to their biocontrol activity, Trichoderma spp. can increase plant tolerance to biotic and abiotic stresses by stimulating the production of defense-related metabolites and activating plant defense pathways. These beneficial fungi may improve plant performance under nematode stress by increasing photosynthetic pigment levels and modifying the accumulation of phenolic compounds, osmoprotectants, and organic acids. Furthermore, Trichoderma spp. can induce systemic resistance, thereby strengthening plant defenses against a broad range of pathogens. The present study evaluated the effects of root-knot nematode infection on selected biochemical and physiological parameters in tomato plants and investigated the potential of Trichoderma atrobrunneum and Trichoderma brevicompactum to alleviate nematode-induced stress.

Materials and Methods

The experiment was conducted under greenhouse conditions at 24 ± 2 °C. Thirty-day-old tomato seedlings were transplanted into 1-kg pots containing a substrate of sand, sandy loam, and peat moss at a 2:1:1 ratio. Before use, the substrate was steam-sterilized in an autoclave at 121 °C and 15 psi for 30 min. At transplanting, each pot was inoculated with 20 mL of a fungal spore suspension containing 1×10^8 conidia mL^{-1} in sterile water. One week after inoculation with the biocontrol agents, each pot was inoculated with 2,000 nematode eggs and second-stage juveniles (J2s). Sixty days after nematode inoculation, plant samples were collected to determine several biochemical and physiological parameters, including chlorophyll, carotenoid,

flavonoid, and phenolic contents; hydrogen peroxide (H_2O_2) content; and peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities. Data were analyzed using SPSS software. Means were compared using Duncan's multiple range test, with statistical significance set at $P < 0.05$.

Results

The physiological and biochemical responses of tomato plants pretreated with two Trichoderma isolates were evaluated. Chlorophyll and carotenoid contents, hydrogen peroxide (H_2O_2) levels, enzymatic antioxidant activities (catalase and peroxidase), and non-enzymatic antioxidant contents (phenolics and flavonoids) were assessed as indicators of plant responses to nematode-induced stress. Both Trichoderma isolates significantly improved the physiological and biochemical responses of nematode-infected plants. Compared with untreated infected plants, T. brevicompactum (LT134I) increased chlorophyll, carotenoid, phenolic, and flavonoid contents by 158%, 144.8%, 121.8%, and 200%, respectively, and increased catalase and peroxidase activities by 86% and 89%, respectively. H_2O_2 levels decreased by 38.5%. Similarly, T. atrobrunneum (LT6I) increased chlorophyll, carotenoid, phenolic, and flavonoid contents by 118%, 62%, 50.2%, and 91%, respectively, while catalase and peroxidase activities increased by 48% and 53.5%. H_2O_2 levels decreased by 20.7%. Across all evaluated parameters, T. brevicompactum showed greater effects than T. atrobrunneum. In contrast, nematode infection alone reduced chlorophyll and carotenoid contents by 58.7% and 42%, respectively, and decreased catalase and peroxidase activities by 19% and 17.8%. At the same time, H_2O_2, phenolic, and flavonoid levels increased by 51%, 29.5%, and 32%, respectively.

Discussion

These findings indicate that applying Trichoderma isolates can mitigate the physiological and biochemical stress associated with root-knot nematode infection in tomato plants. Both isolates strengthened antioxidant responses and increased protective metabolite accumulation, which may contribute to greater plant tolerance to nematode-induced stress. Among the tested isolates, T. brevicompactum was more effective in improving defense-related parameters and reducing oxidative damage, as reflected by lower H_2O_2 levels and higher antioxidant enzyme activities. These results suggest that T. brevicompactum may have particular potential as a biological control agent against root-knot nematodes in tomato. More broadly, using Trichoderma isolates may provide a cost-effective and environmentally sustainable approach to supporting plant health under nematode stress. However, further studies are needed to clarify the mechanisms underlying the interactions among Trichoderma, the host plant, and root-knot nematodes.

Keywords: Antioxidant, Meloidogyne, T. atrobrunneum, T. brevicompactum

Associate editor: S. Azimi (Ph.D.)

Citation: Naghavi, A. (2026). Effects of Two *Trichoderma* Species on Biochemical Responses and Photosynthetic Pigments in Tomato Plants Infected with Root-Knot Nematodes. *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture), 49*(2), 117-135. https://doi.org/10.22055/ppr.2026.52397.1894

گیاه‌پزشکی (مجله علمی کشاورزی)
جلد ٤٩، شماره ٢، تابستان ١٤٠٥

10.22055/ppr.2026.52397.1894

تأثیر دو گونه *Trichoderma* بر برخی فعالیت‌های بیوشیمیایی و رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه گوجه‌فرنگی آلوده به نماتد ریشه گرهی

آرزو نقوی*[1]

۱- * **نویسنده مسوول**: گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

چکیده

نماتدهای ریشه‌گرهی (*Meloidogyne* spp.) از مهم‌ترین عوامل بیمارگر گیاهی هستند که با ایجاد تنش اکسیداتیو، موجب اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان می‌شوند. در این پژوهش، تأثیر دو جدایه از گونه‌های *Trichoderma atrobrunneum* و *T. brevicompactum* بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گوجه‌فرنگی آلوده به نماتد ریشه‌گرهی (*Meloidogyne javanica*) بررسی شد. به‌منظور ارزیابی پاسخ گیاه، محتوای کلروفیل کل، کاروتنوئید، پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، فنل کل، فلاونوئید کل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد آلودگی به نماتد موجب تغییر معنی‌دار در شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه و افزایش تجمع H_2O_2 شد ($P<0.05$). تیمار گیاهان آلوده با *T. brevicompactum* سبب افزایش ۱۵۸درصدی کلروفیل کل، ١٤٤/٨ درصدی کاروتنوئید، ۲۰۰ درصدی فلاونوئید کل، ٩٨/٦ درصدی فنل کل، ٨٦ درصدی فعالیت کاتالاز، ۸۹ درصدی پراکسیداز و کاهش H_2O_2 به میزان ۳۸/۵ درصد نسبت به شاهد آلوده گردید. همچنین تیمار با *T. atrobrunneum* نیز موجب بهبود معنی‌دار شاخص‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی و کاهش تجمع H_2O_2 در مقایسه با شاهد آلوده شد. در مجموع، هر دو گونه *Trichoderma* موجب بهبود وضعیت فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان آلوده شدند، اما *T. brevicompactum* در بیشتر شاخص‌های ارزیابی‌شده، کارایی بیشتری نشان داد.

کلیدواژه‌ها: آنتی اکسیدان، T. atrobrunneum، T. brevicompactum، Meloidogyne

دبیر تخصصی: دکتر صدیقه عظیمی

مقدمه

نماتدهای ریشه‌گرهی (*Meloidogyne* spp.) از مهم‌ترین نماتدهای انگل گیاهی محسوب می‌شوند که به دلیل دامنه میزبانی گسترده و پراکنش جهانی، خسارت قابل توجهی به محصولات کشاورزی وارد می‌کنند (Pradhan et al. 2023). این نماتدها سالانه موجب میلیاردها دلار خسارت اقتصادی شده و پایداری تولیدات کشاورزی را با چالش جدی مواجه می‌سازند (Gamalero & Glick, 2020). کنترل این بیمارگر عمدتاً بر پایه استفاده از نماتدکش‌های شیمیایی است، اما کاربرد مداوم این ترکیبات می‌تواند پیامدهای نامطلوبی برای سلامت انسان، تنوع زیستی و حاصلخیزی خاک به همراه داشته باشد (Mohamed & Abd–El Hameed, 2014). از این‌رو توسعه راهکارهای کنترل زیستی پایدار و سازگار با محیط زیست ضروری است.

در میان عوامل کنترل زیستی، گونه‌های جنس *Trichoderma* به دلیل توانایی استقرار در ریزوسفر، تحریک رشد گیاه و کاهش جمعیت عوامل بیمارگر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این قارچ‌ها از طریق مکانیسم‌هایی نظیر رقابت برای فضا و مواد غذایی، تولید متابولیت‌های بازدارنده، مایکوپارازیتیسم و القای مقاومت سیستمیک، در کنترل عوامل بیماری‌زای گیاهی نقش دارند (Tyskiewicz et al. 2022). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که گونه‌هایی نظیر *T. harzianum*، *T. viride*، *T. citrinoviride* و *T. longibrachiatum* قادر به کاهش تولیدمثل نماتدهای ریشه‌گرهی هستند (Al-Hazmi & TariqJaveed, 2016; Fan et al., 2020; Al-Shammari et al., 2013; Izuogu et al., 2019).

یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های حفاظتی گیاه در برابر تنش‌های زنده، فعال شدن سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی است. آلودگی به نماتدهای ریشه‌گرهی موجب افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و برهم خوردن تعادل اکسیداتیو در سلول‌های گیاهی می‌شود. در این شرایط، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و متابولیت‌های ثانویه نظیر فنل‌ها و فلاونوئیدها نقش مهمی در کاهش آسیب اکسیداتیو ایفا می‌کنند (Li & Ahammed, 2023; Zheng et al., 2024). گزارش شده است که تلقیح گیاهان با گونه‌های *Trichoderma* موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی و تجمع ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شده و در نتیجه شدت خسارت ناشی از نماتدهای ریشه‌گرهی را کاهش می‌دهد (Sharon et al., 2001; Nishat et al., 2022).

با وجود مطالعات متعدد درباره نقش گونه‌های مختلف *Trichoderma* در کنترل نماتدهای ریشه‌گرهی، بر اساس منابع موجود، اطلاعات چندانی درباره تأثیر گونه‌های *T. atrobrunneum* و *T. brevicompactum* بر پاسخ‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاهان آلوده به این نماتدها در دسترس نیست. همچنین پژوهش‌های انجام‌شده در ایران در این زمینه عمدتاً بر گونهٔ *T. harzianum* متمرکز بوده‌اند (Maleki Ziarati et al., 2009, Mokhtari et al., 2009, Pourkhajeh et al., 2019). علاوه‌بر این، محققین دیگری اثر *T. harzianum*، *T. guizhouense* و *T. aureoviride* را بر برخی فعالیت‌های بیوشیمیایی مرتبط با مقاومت القایی سیستمیک در مقابله با نماتد گره ریشه بررسی نموده‌اند (Faryabi et al., 2024).

هدف از این پژوهش بررسی اثر دو گونه *T. atrobrunneum* و *T.brevicompactum* بر برخی شاخص‌های بیوشیمیایی و رنگدانه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل، کاروتنوئید، پراکسید هیدروژن، ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در گیاهان گوجه‌فرنگی آلوده به نماتد ریشه‌گرهی و ارزیابی توانایی این قارچ‌ها در کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از آلودگی نماتدی است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی گیاه میزبان

به‌منظور انجام آزمایش، نشاهای ۳۰ روزه گوجه‌فرنگی رقم موناکو به گلدان‌های پلاستیکی حاوی یک کیلوگرم بستر کشت منتقل شدند. بستر کشت از مخلوط ماسه، خاک لومی و پیت‌ماس به نسبت حجمی ۱:۱:۲ تهیه و به‌منظور حذف آلودگی‌های احتمالی، در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه و در دو روز متوالی اتوکلاو شد

Alesaadi et al., 2017, Al-Hazmi & TariqJaveed, 2016). تمامی گلدان‌ها در شرایط گلخانه‌ای با دمای ۲±۲۴ درجهٔ سلسیوس نگهداری شدند.

آماده‌سازی عوامل کنترل زیستی

در این پژوهش از دو گونه *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) و *T. brevicompactum* (LT134) به‌عنوان عوامل کنترل زیستی استفاده شد. این جدایه‌ها از کلکسیون قارچ‌های گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان تهیه شدند. جدایه‌های مذکور در مطالعات پیشین از ریزوسفر درختان بلوط در شهرستان خرم‌آباد جداسازی و بر اساس ویژگی‌های ریخت‌شناختی و داده‌های مولکولی شناسایی شده بودند (Mirzaeipour et al., 2023, Mirzaeipour et al., 2024). جدایه‌ها بر روی محیط کشت PDA کشت داده شده و به مدت ۷ روز در دمای ۲۵ درجهٔ سلسیوس و شرایط تاریکی نگهداری شدند. پس از رشد کامل پرگنه‌ها، سوسپانسیون اسپور با غلظت ۱×۱۰^{۸} اسپور در میلی‌لیتر آب مقطر سترون تهیه گردید. هنگام انتقال نشاها به گلدان، ۲۰ میلی‌لیتر از سوسپانسیون اسپور هر گونه به بستر کشت اضافه شد (Zheng et al., 2024).

تهیه جمعیت و تکثیر نماتد

گیاهان گوجه فرنگی آلوده به نماتد *Meloidogyne* sp. از مزارع شهرستان دورود جمع‌آوری شدند. خالص‌سازی جمعیت نماتد با استفاده از روش تک‌کیسه تخم[۱] انجام شد و جمعیت خالص روی گیاه گوجه‌فرنگی تکثیر گردید. تخم‌ها و لاروهای سن دوم (J2) نماتد با استفاده از روش هوسی و بارکر استخراج شدند (Hussay & Barker, 1973). یک هفته پس از تلقیح قارچ‌های *Trichoderma*، تعداد ۲۰۰۰ تخم و لارو سن دو نماتد به هر گلدان اضافه شد (Siddiqui & Shaukat, 2004). ارزیابی تیمارها ۶۰ روز پس از مایه‌زنی نماتد انجام گرفت.

شناسایی نماتد

گونه نماتد بر اساس مشخصات ریخت‌شناختی و داده‌های ریخت‌سنجی مربوط به لاروهای سن دو، نماتدهای نر و ماده و طرح‌واره‌های انتهای بدن نماتد ماده و با استفاده از کلیدهای مربوط (Perry et al., 2009 و Jepson, 1987) تشخیص داده شد.

طراحی آزمایش

این آزمایش در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار (در هر گلدان چهار گیاه) و هشت تیمار بود، طراحی و اجرای طرح مطابق روش Yan et al. 2021 انجام گرفت. تیمارها شامل شاهد منفی (خاک سترون حاوی نشاهای گوجه‌فرنگی/ Control)، شاهد مثبت (گیاهان مایه زنی شده با نماتد/ RKN)، گیاهان مایه‌زنی شده با *T. atrobrunneum* (LT6)، گیاهان مایه‌زنی شده با *T. brevicompactum* (LT134)، گیاهان مایه‌زنی شده با *T. atrobrunneum* و *T. brevicompactum* (LT6+LT134)، گیاهان مایه‌زنی شده با *T. atrobrunneum* و نماتد (LT6I) ، گیاهان مایه‌زنی شده با *T. brevicompactum* و نماتد (LT134I) و گیاهان مایه‌زنی شده با *T. atrobrunneum* و *T. brevicompactum* و نماتد (LT6I+LT134I) است. ۶۰ روز پس از مایه‌زنی نماتد، برگ‌های کاملاً توسعه‌یافته از بخش میانی بوته‌ها برداشت شدند (Faryabi et al., 2024). نمونه‌ها بلافاصله در نیتروژن مایع منجمد شده و تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۸۰- درجه سلسیوس نگهداری شدند.

اندازه‌گیری رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل و کاروتنوئید)

برای این منظور ۱۰ میلی‌لیتر استون خالص با ۰/۱ گرم از بافت برگ گوجه‌فرنگی پودر شده مخلوط شد. سپس سوسپانسیون در دور ۴۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد و با استفاده از اسپکتروفتومتر، جذب نور محلول رویی به ترتیب در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۲ و ۴۷۰ برای کلروفیل a (Ca)، کلروفیل b (Cb) و کاروتنوئید c (x+c) ثبت شد. مقادیر کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید

[۱] Single egg mass culture

براساس روابط ارائه‌شده توسط Lichtenthaler and Wellburn (1983) محاسبه شدند.

اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن

مقدار پراکسید هیدروژن بر اساس واکنش H_2O_2 با یدید پتاسیم انجام شد. در این روش ۰/۵ گرم از بافت گیاه در تری کلرواستیک اسید ۰/۱ درصد سائیده و عصاره حاصل به مدت ۱۵ دقیقه در ۵۰۰۰ دور (در دقیقه) سانتریفیوژ گردید. سپس به ۵۰۰ میکرولیتر از محلول رویی ۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=7) و دو میلی‌لیتر یدید پتاسیم یک مولار اضافه شد. مخلوط به مدت یک ساعت در تاریکی و دمای اتاق قرار داده شد سپس جذب نمونه‌ها در طول موج ۳۹۰ نانومتر اندازه‌گیری و محاسبه غلظت با استفاده از منحنی استاندارد صورت گرفت (Alexieva et al., 2001).

اندازه‌گیری آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی

محتوای فنل کل

جهت اندازه‌گیری محتوای فنل کل، از معرف فولین- سیوکالتو[1] استفاده شد. ابتدا یک میکرولیتر عصاره برگ گیاه به ۰/۵ میلی‌لیتر معرف فولین- سیوکالتو (رقیق شده با آب مقطر به نسبت حجمی ۱:۱۰) اضافه و به مدت ۵ دقیقه در دمای اتاق قرار داده شد. پس از ۵ دقیقه ، ۰/۴ میلی‌لیتر محلول سدیم کربنات (۷/۵ درصد) به نمونه اضافه گردید و با استفاده از آب مقطر حجم محلول به ۱۰ میلی‌لیتر رسانیده شده و به مدت دو ساعت در دمای اتاق و تاریکی نگهداری شد. بعد از گذشت این زمان جذب آن در طول موج ۷۶۵ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر[2] قرائت شد (Singleton & Rossi, 1965 و Dragusha et al., 2023).

محتوای فلاونوئید کل

برای تعیین مقدار فلاونوئید کل، ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره برگ گیاه با چهار میلی لیتر آب مقطر و ۰/۳ میلی‌لیتر محلول نیتریت سدیم (۵ درصد) مخلوط گردید. سپس محلول به مدت ۵ دقیقه هم‌زده شد. در مرحله بعد، ۰/۳ میلی‌لیتر آلومینیوم تری‌کلراید ۱۰ درصد به آن اضافه و به مدت ۶ دقیقه در دمای اتاق نگهداری شد. سپس دو میلی‌لیتر سود یک مولار به نمونه اضافه گردید و حجم آن با آب مقطر به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. برای اندازه‌گیری جذب نمونه‌ها از دستگاه اسپکتروفتومتر و طول موج ۵۱۰ نانومتر استفاده شد (Dragusha et al., 2023; Singleton & Rossi, 1965).

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)

به‌منظور ارزیابی فعالیت آنزیمی کاتالاز (EC1.11.1.6) یک گرم برگ در بافر فسفات ۵۰ میلی مولار (pH7.0) درون هاون چینی با اضافه کردن مقداری ازت مایع آسیاب شد و با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجهٔ سلسیوس سانتریفیوژ شد، سپس مایع رویی به‌عنوان نمونه عصاره آنزیمی جمع‌آوری شد. مخلوط واکنش، حاوی ۱۰ میلی‌مولار H_2O_2 و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی در بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH 7.0) مخلوط شد، سنجش آنزیم نیز در طول موج ۲۴۰ نانومتر (تغییرات جذب نوری به فواصل ۱۰ ثانیه در مدت زمان ۲ دقیقه) قرائت و اندازه‌گیری شد و میزان فعالیت آنزیم بر حسب میزان آب اکسیژنه غیر فعال شده ($40\ mM^{-1}\ cm^{-1}$) محاسبه گردید (Chance & Maehly, 1955).

فعالیت آنزیم پراکسیداز

در بررسی فعالیت آنزیم پراکسیداز (EC 1.11.1.7) یک گرم برگ در بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH = 6.8) درون هاون چینی با اضافه کردن مقداری ازت مایع آسیاب شد و سپس سوسپانسیون در ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجهٔ سلسیوس سانتریفیوژ شد. مایع رویی برای تعیین فعالیت آنزیم استفاده شد. جهت سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز تغییرات جذب نور از مخلوط واکنش حاوی ۲۵ میلی‌مولار بافر فسفات (pH 6.8)، ۲۰ میلی‌مولار گایاکول، ۵۰ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی خام و ۴۰ میلی‌مولار H_2O_2 در طول موج ۵۳۰ نانومتر، به فواصل ۱۰ ثانیه، به مدت زمان دو دقیقه قرائت و در نهایت مقدار فعالیت آنزیم برحسب میزان آب اکسیژنه غیرفعال شده در یک

[1] Folin-Ciocalteu

[2] UV-3200, MAPADA, Shanghai

دقیقه در هر گرم وزن تازه بافت محاسبه شد (Mac-Adam et al., 1992).

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ تجزیه و تحلیل شدند.آنالیز واریانس یکطرفه انجام شد و مقایسه میانگین تیمارها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ($P<0.05$) صورت گرفت.

نتایج

شناسایی نماتد

شناسایی برمبنای ویژگی های ریخت شناختی و ریخت سنجی و با تطبیق ویژگی های ارائه شده در منابع صورت گرفت و جمعیت مورد بررسی به عنوان گونه *M. javanica* شناسایی گردید. (جدول ۱، شکل ۱)

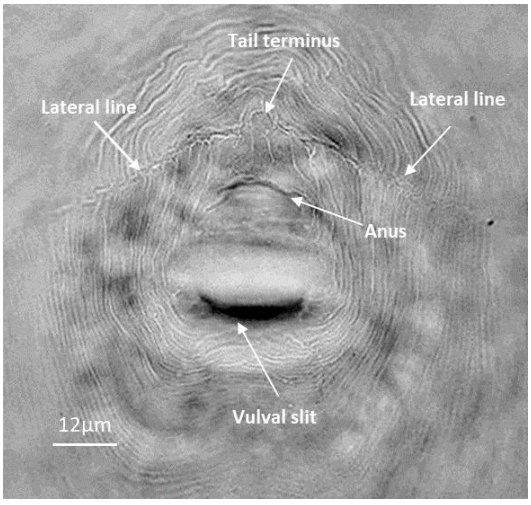
تأثیر گونه‌های *Trichoderma* بر رنگدانه‌های فتوسنتزی

کلروفیل a

نتایج نشان داد که در گیاهان بدون آلودگی به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum* و *T. brevicompactum + T. atrobrunneum* به‌ترتیب موجب افزایش ۳۹ و ۳۵ درصدی محتوای کلروفیل a نسبت به شاهد سالم شدند و اختلاف معنی‌داری بین این دو تیمار مشاهده نشد ($P>0.05$). تیمار *T. atrobrunneum* نیز محتوای کلروفیل a را ۲۱/۸ درصد نسبت به شاهد سالم افزایش داد. در مقابل، آلودگی به نماتد ریشه‌گرهی موجب کاهش معنی‌دار کلروفیل a به میزان ۵۱/۵ درصد نسبت به شاهد سالم شد. در گیاهان آلوده به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum + T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب موجب افزایش ۱۶۸، ۱۴۰/۳ و ۱۱۶ درصدی محتوای کلروفیل a نسبت به شاهد آلوده به نماتد شدند. بیشترین میزان کلروفیل a در تیمار *T. brevicompactum* مشاهده شد، هرچند اختلاف معنی‌داری بین این تیمار و تیمار *T. brevicompactum + T. atrobrunneum* وجود نداشت (شکل ۲).

کلروفیل b

محتوای کلروفیل b در تیمارهای *T. brevicompactum* و *T. brevicompactum + T. atrobrunneum* به‌ترتیب ۴۶/۸ و ۴۴/۲ درصد بیشتر از شاهد سالم بود و اختلاف معنی‌داری بین این دو تیمار مشاهده نشد. تیمار LT6 تنها ۱۰/۲ درصد افزایش در محتوای کلروفیل b ایجاد کرد که با شاهد سالم اختلاف معنی‌داری نداشت. آلودگی به نماتد موجب کاهش ۵۳/۲ درصدی کلروفیل b نسبت به شاهد سالم شد. در گیاهان آلوده، تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum + T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب سبب افزایش ۱۱۸/۸، ۱۵۷/۷ و ۱۰/۶ درصدی کلروفیل b نسبت به شاهد آلوده شدند. با وجود تفاوت‌های عددی میان تیمارها، اختلاف معنی‌داری بین آنها مشاهده نشد (شکل ۲).



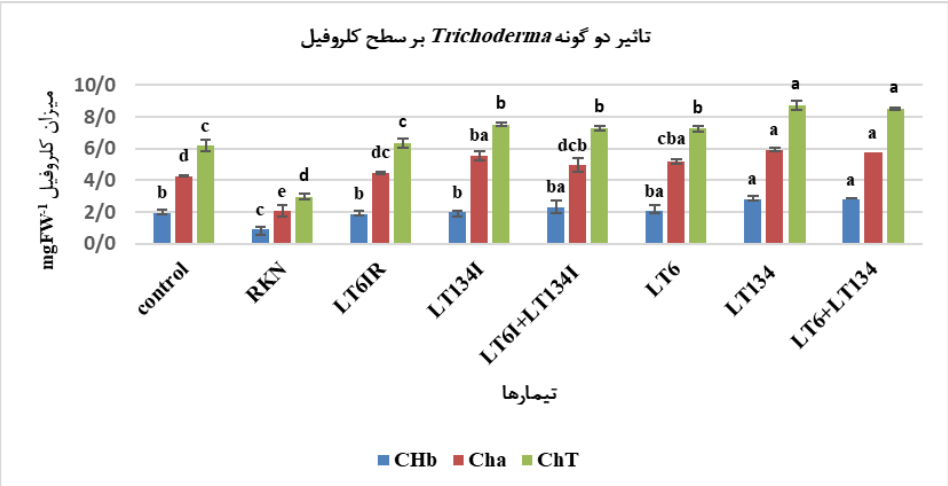
شکل ۱. ناحیه اثر انگشتی انتهای بدن نماتد مولد گره ریشه (*Meloidogyne javanica*)

Figure 1. Perineal pattern at the end of the body of the root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*)

جدول ۱. داده های ریخت‌سنجی نماتدهای ماده و لارهای سن دو گونه *Meloidogyne javanica* و مقایسه آن‌ها با یک جمعیت از ایران (اندازه ها بر حسب میکرومتر و میانگین (± SE)

Table 1. Morphometric data of females and second stage juveniles of *Meloidogyne javanica* and comparing them with a population from Iran (all measurements are in µm and Mean (± SE)

	Dorud population		Ghaderi et al., 2020	
Characters	**Females**	**J2**	**Females**	**J2**
N	8	8	15	50
L	460-600	350-400	506-1.01	429-497
	550±30	390±30	686±127	464±19
A	1.5-2.0	26-34	1.2-2.6	25-39
	1.7±0.1	28±2	1.7±0.4	31±3
B	-	7.5-8.5	-	4.3-12.4
		7.9±0.2		5.2±1.4
b'	-	3.2-4.5	-	2.0-5.2
		3.8±0.2		2.5±5.2
C		7.5-10.0	-	7.2-11.3
	-	8.7±1.0		8.5±0.8
c′		5.5-5.8	-	4.7-7.2
	-	5.6±0.1		0.5±5.7
Stylet	14.0-15.5	11-15	9-12	13-18
	14.3±1	13.2±1.8	10±0.5	15±2
DGO	2.5-4.0	2-4	2.0-3.9	1.5-3.7
	3.2±0.4	2.5±0.6	3.1±0.6	2.2±0.5
Neck length	160-300		153-540	-
	220±48	-	259±87	
Median bulb	50-52	49.5-51.5	-	-
	51.7±0.8	50.3±1.1		
Body width	218-400	13-16	274-568	12-18
	320 ± 55	14.3±1.0	420±99	15±1.5
Vulval slit	19-30	-	15-27	-
length	24±4.5		21±3	
Diatance vulval	14-30	-	12-28	-
slit to anus	19±1.2		16±4	
Tail length		36-50	-	40-66
	-	42±4		55±5
Hyaline length	-	7.6-10.0	-	7-20
		8.5±0.9		13±4



شکل ۲- تاثیر دو گونه *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) و *T. brevicompactum* (LT134) بر میزان کلروفیل در گیاهان گوجه‌فرنگی سالم و آلوده به نماتد ریشه گرهی (*Meloidogyne javanica*). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن ($P < 0.05$) است؛ ولی میانگین‌هایی با حروف یکسان، تفاوت معنی‌داری ندارند.

Figure 2. Effect of *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) and *T. brevicompactum* (LT134) on chlorophyll content in healthy and root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infected tomato plants. Different letters indicate significant differences among means according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$), whereas means sharing the same letter are not significantly different

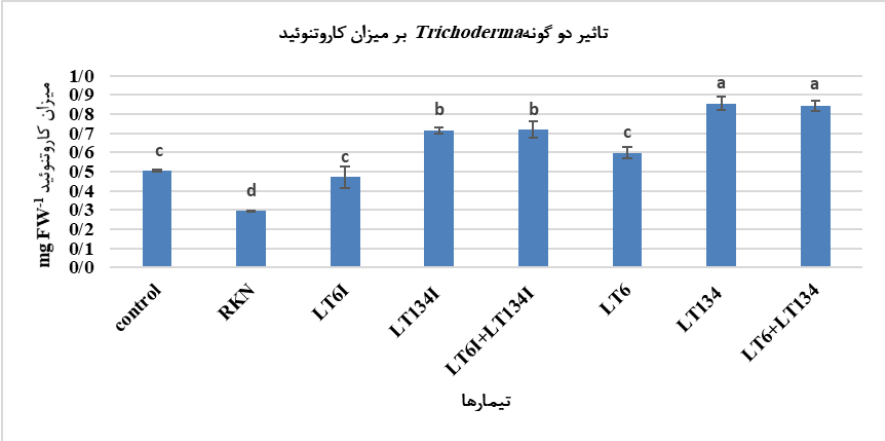
کلروفیل کل

مطابق شکل ۲، در گیاهان بدون آلودگی به نماتد، بیشترین محتوای کلروفیل کل در تیمارهای *T. brevicompactum* و *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* مشاهده شد که به‌ترتیب ۴۱ و ۳۷ درصد بیشتر از شاهد سالم بودند. تیمار LT6 نیز موجب افزایش ۱۷/۳ درصدی کلروفیل کل شد. در مقابل، آلودگی به نماتد ریشه‌گرهی باعث کاهش ۵۳/۲ درصدی کلروفیل کل نسبت به شاهد سالم گردید. در گیاهان آلوده به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب موجب افزایش ۱۵۸، ۱۵۰/۳ و ۱۱۸ درصدی کلروفیل کل نسبت به شاهد آلوده شدند. به‌طور کلی، کاربرد گونه‌های *Trichoderma* اثر منفی نماتد بر محتوای کلروفیل را کاهش داد و سبب بهبود وضعیت رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه گوجه‌فرنگی شد.

سطح کاروتنوئید

نتایج نشان داد آلودگی گیاهان گوجه‌فرنگی به نماتد ریشه‌گرهی موجب کاهش معنی‌دار محتوای کاروتنوئید نسبت به شاهد سالم شد ($P<0.05$). در گیاهان بدون آلودگی به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum* و *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* به‌ترتیب سبب افزایش ۷۰ و ۶۸ درصدی محتوای کاروتنوئید نسبت به شاهد سالم شدند و اختلاف معنی‌داری بین این دو تیمار مشاهده نشد. در مقابل، تیمار *T. atrobrunneum* اگرچه موجب افزایش ۲۴ درصدی کاروتنوئید گردید، اما این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود. آلودگی به نماتد موجب کاهش ۴۲ درصدی محتوای کاروتنوئید نسبت به شاهد سالم شد (شکل ۳).

در گیاهان آلوده به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب موجب افزایش ۱۴۴/۸، ۱۴۴/۸ و ۶۲ درصدی محتوای کاروتنوئید نسبت به شاهد آلوده شدند. بیشترین میزان کاروتنوئید در تیمارهای *T. brevicompactum* و *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* مشاهده شد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند، اما هر دو تیمار در مقایسه با *T. atrobrunneum* افزایش بیشتری در محتوای این رنگدانه نشان دادند. به‌طور کلی، کاربرد دو گونه *Trichoderma* توانست اثر منفی نماتد بر محتوای کاروتنوئید را تا حد زیادی کاهش دهد (شکل ۲). همچنین در کاربرد همزمان دو تیمار تفاوت معنی‌داری در محتوای کلروفیل و کاروتنوئید نسبت به کاربرد تیمار *T. brevicompactum* به تنهایی مشاهده نشد ($P>0.05$).



شکل ۳- تاثیر دو گونه *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) و *T. brevicompactum* (LT134) بر میزان کاروتنوئید در گیاهان گوجه‌فرنگی سالم و آلوده به نماتد ریشه گرهی (*Meloidogyne javanica*). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن ($P < 0.05$) است؛ ولی میانگین‌هایی با حروف یکسان، تفاوت معنی‌داری ندارند.

Figure 3. Effect of *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) and *T. brevicompactum* (LT134) on carotenoid content in healthy and root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infected tomato plants. Different letters indicate significant differences among means according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$), whereas means sharing the same letter are not significantly different.

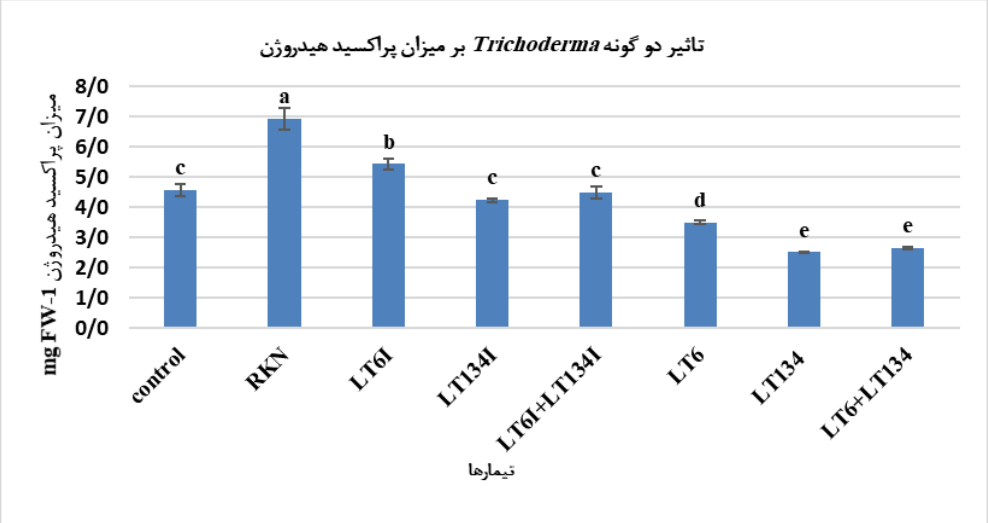
تأثیر گونه‌های *Trichoderma* بر میزان پراکسید هیدروژن (H_2O_2)

نتایج حاصل از اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن نشان داد که آلودگی گیاهان گوجه‌فرنگی به نماتد ریشه‌گرهی موجب افزایش معنی‌دار محتوای H_2O_2 نسبت به شاهد سالم شد ($P<0.05$). به‌طوری‌که میزان پراکسید هیدروژن در گیاهان آلوده ۵۱ درصد بیشتر از شاهد سالم بود (شکل ۴). در گیاهان بدون آلودگی به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب موجب کاهش ۴۵/۳، ۴۳ و ۲۳/۵ درصدی محتوای پراکسید هیدروژن نسبت به شاهد سالم شدند. همچنین در گیاهان آلوده به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب سبب کاهش ۳۸/۵، ۳۵ و ۲۰/۷ درصدی محتوای H_2O_2 نسبت به شاهد آلوده شدند. کمترین میزان پراکسید هیدروژن در تیمار *T. brevicompactum* مشاهده شد، اگرچه اختلاف معنی‌داری بین این تیمار و تیمار *T. Brevicompactum* + *T. atrobrunneum* وجود نداشت ($P>0.05$). در مقابل، تیمار *T. atrobrunneum* کاهش کمتری در محتوای H_2O_2 نسبت به دو تیمار دیگر نشان داد (شکل ۴). به‌طور کلی، کاربرد گونه‌های *Trichoderma* موجب کاهش تجمع پراکسید هیدروژن در گیاهان آلوده و غیرآلوده شد.

آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی

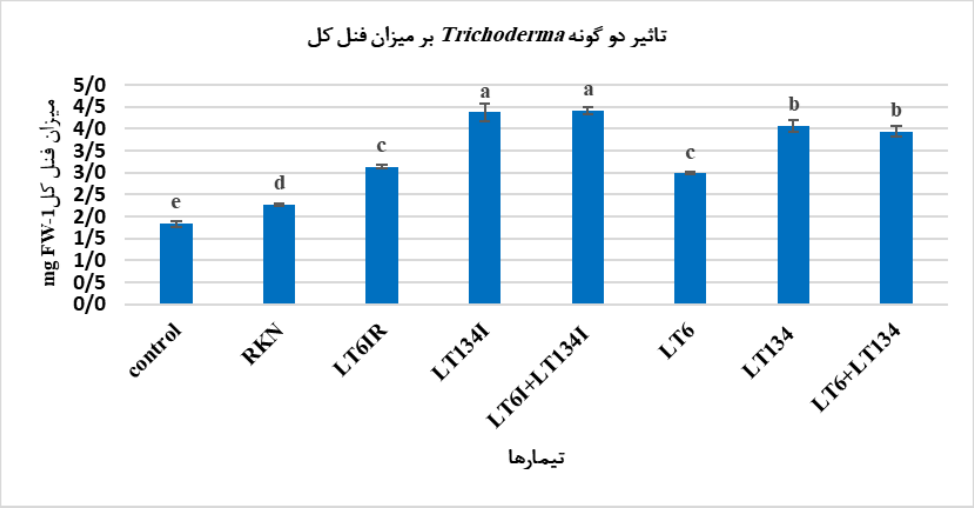
محتوای فنل کل

نتایج نشان داد آلودگی گیاهان گوجه‌فرنگی به نماتد ریشه‌گرهی موجب افزایش ۲۹/۵ درصدی محتوای فنل کل نسبت به گیاهان سالم شد (شکل ۵). در گیاهان بدون آلودگی به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب موجب افزایش ۱۲۱/۸، ۱۱۴/۷ و ۵۰/۲ درصدی محتوای فنل کل نسبت به شاهد سالم شدند. در گیاهان آلوده به نماتد، این تیمارها به‌ترتیب افزایش ۹۸/۶، ۱۰۰/۳ و ۴۲/۵ درصدی فنل کل را نسبت به شاهد آلوده نشان دادند. بیشترین میزان فنل کل در تیمار *T. brevicompactum* مشاهده شد، اگرچه بین تیمار *T. brevicompactum* و *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۵).



شکل ٤- تاثیر دو گونه *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) و *T. brevicompactum* (LT134) بر میزان پراکسید هیدروژن در گیاهان گوجه‌فرنگی سالم و آلوده به نماتد ریشه گرهی (*Meloidogyne javanica*). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن ($P < 0.05$) است؛ ولی میانگین‌هایی با حروف یکسان، تفاوت معنی‌داری ندارند.

Figure 4. Effect of *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) and *T. brevicompactum* (LT134) on hydrogen peroxide content in healthy and root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infected tomato plants. Different letters indicate significant differences among means according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$), whereas means sharing the same letter are not significantly different.



شکل ۵. تاثیر دو گونه *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) و *T. brevicompactum* (LT134) بر میزان فنل کل در گیاهان گوجه‌فرنگی سالم و آلوده به نماتد ریشه گرهی (*Meloidogyne javanica*). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن ($P < 0.05$) است؛ ولی میانگین‌هایی با حروف یکسان، تفاوت معنی‌داری ندارند.

Figure 5. Effect of *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) and *T. brevicompactum* (LT134) on total phenol content in healthy and root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infected tomato plants. Different letters indicate significant differences among means according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$), whereas means sharing the same letter are not significantly different.

محتوای فلاونوئید کل

نتایج نشان داد آلودگی به نماتد موجب تغییر در محتوای فلاونوئید نسبت به گیاهان سالم (افزایش ۳۰ درصدی) شد. در گیاهان بدون آلودگی به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب موجب افزایش ۲۲۵، ۲۲۰ و ۹۸ درصدی محتوای فلاونوئید کل نسبت به شاهد سالم شدند. در گیاهان آلوده به نماتد نیز تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب افزایش ۲۰۰، ۱۹۵ و ۹۱ درصدی فلاونوئید کل را نسبت به شاهد آلوده نشان دادند (شکل ۶). در هر دو شرایط، بیشترین مقدار فلاونوئید در تیمار *T. brevicompactum* مشاهده شد.

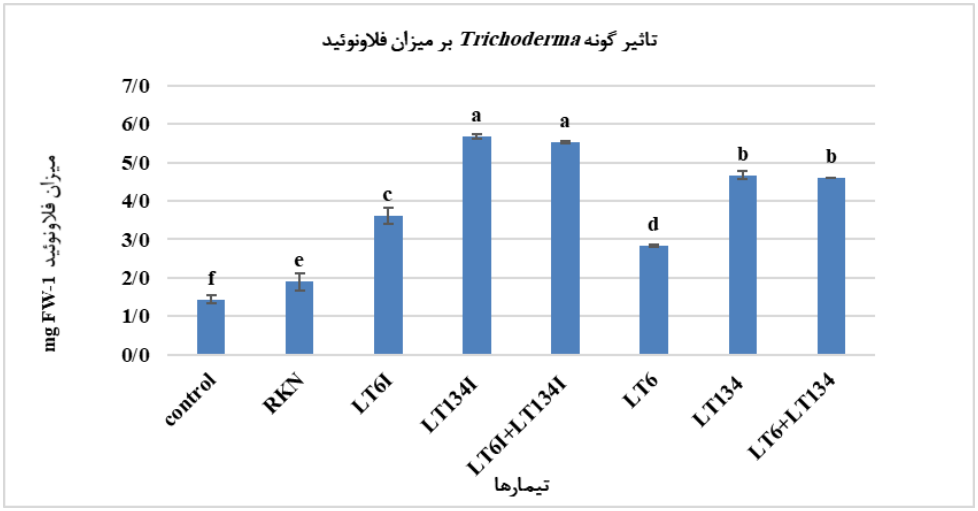
تاثیر دو گونه *Trichoderma* بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD)

نتایج نشان داد آلودگی گیاهان گوجه‌فرنگی به نماتد ریشه‌گرهی موجب کاهش ۱۹ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به گیاهان سالم شد. در گیاهان بدون آلودگی نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب موجب افزایش ۱۱۶، ۹۵ و ۵۲ درصدی فعالیت کاتالاز نسبت به شاهد سالم شدند. در گیاهان آلوده به نماتد، تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* بدون اختلاف معنی‌دار، به‌ترتیب موجب افزایش ۸۶ و ۷۴ درصدی فعالیت CAT نسبت به شاهد آلوده شدند. تیمار *T. atrobrunneum* نیز موجب افزایش ۴۸ درصدی این آنزیم شد که کمتر از دو تیمار دیگر بود (شکل ۷).

پراکسیداز (POD)

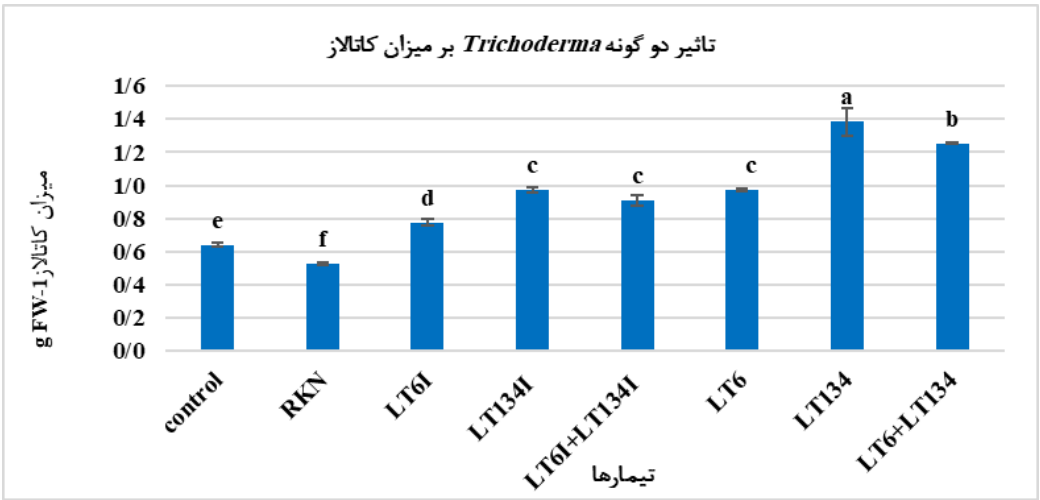
فعالیت آنزیم پراکسیداز در گیاهان بدون آلودگی به نماتد، در تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و *T. atrobrunneum* به‌ترتیب ۷۱/۳، ۷۳,۵ و ۴۵/۸ درصد نسبت به شاهد سالم افزایش یافت. در گیاهان آلوده به نماتد نیز تیمارهای *T. brevicompactum*، *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum* و

atrobrunneum به‌ترتیب موجب افزایش ۸۹، ۹۰ و ۵۳/۵ درصدی فعالیت POD نسبت به شاهد آلوده شدند. در مقابل، شاهد آلوده (شاهد مثبت) کاهش ۱۷/۸ درصدی فعالیت این آنزیم نسبت به شاهد سالم را نشان داد (شکل ۸). بیشترین میزان فعالیت پراکسیداز در تیمارهای *T. Brevicompactum* و *T. brevicompactum* + *T. atrobrunneum*، بدون اختلاف معنی‌داری مشاهده شد.



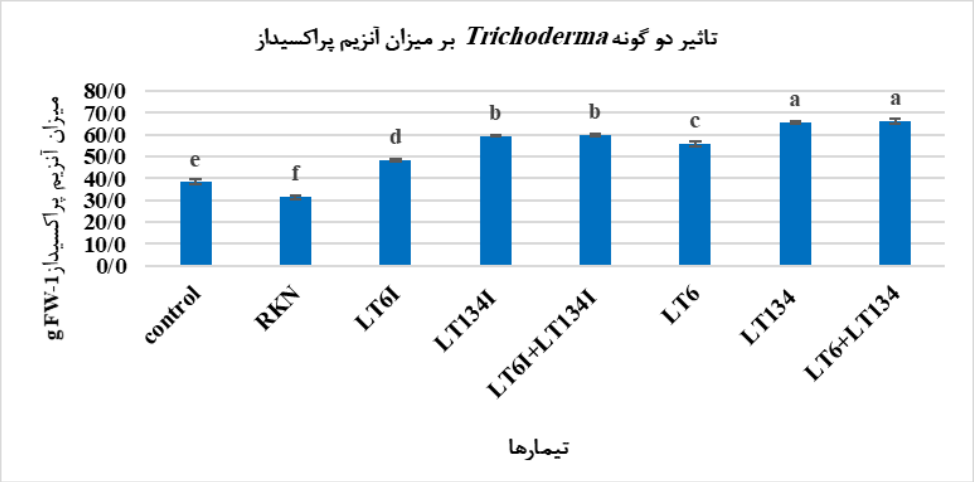
شکل ٦- تاثیر دو گونه *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) و *T. brevicompactum* (LT134) بر میزان فلاونوئید کل در گیاهان گوجه‌فرنگی سالم و آلوده به نماتد ریشه گرهی (*Meloidogyne javanica*). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن ($P < 0.05$) است؛ ولی میانگین‌هایی با حروف یکسان، تفاوت معنی‌داری ندارند.

Figure 6. Effect of *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) and *T. brevicompactum* (LT134) on total flavonoid content in healthy and root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infected tomato plants. Different letters indicate significant differences among means according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$), whereas means sharing the same letter are not significantly different.



شکل ۷- تاثیر دو گونه *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) و *T. brevicompactum* (LT134) بر میزان آنزیم کاتالاز در گیاهان گوجه‌فرنگی آلوده سالم و آلوده به نماتد ریشه گرهی (*Meloidogyne javanica*). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن ($P < 0.05$) است؛ ولی میانگین‌هایی با حروف یکسان، تفاوت معنی‌داری ندارند.

Figure 7. The effect of *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) and *T. brevicompactum* (LT134) on catalase content in healthy and root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infected tomato plants. Different letters indicate significant differences among means according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$), whereas means sharing the same letter are not significantly different.



شکل ۸- تاثیر دو گونه *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) و *T. brevicompactum* (LT134) بر میزان آنزیم پراکسیداز در گیاهان گوجه‌فرنگی سالم و آلوده به نماتد ریشه گرهی (*Meloidogyne javanica*). حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن ($P < 0.05$) است؛ ولی میانگین‌هایی با حروف یکسان، تفاوت معنی‌داری ندارند.

Figure 8. The effect of *Trichoderma atrobrunneum* (LT6) and *T. brevicompactum* (LT134) on peroxidase content in healthy and root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infected tomato plants. Different letters indicate significant differences among means according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$), whereas means sharing the same letter are not significantly different.

بحث

نماتدهای ریشه‌گرهی از مهم‌ترین عوامل محدودکنندهٔ تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شوند و با ایجاد اختلال در جذب آب و عناصر غذایی، رشد و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهند. در سال‌های اخیر، استفاده از میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه و عوامل کنترل زیستی به‌عنوان جایگزینی پایدار برای نماتدکش‌های شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است (Lahlali et al., 2022). در پژوهش حاضر، تأثیر دو گونه *Trichoderma atrobrunneum* و *T. brevicompactum* بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی آلوده به نماتد ریشه‌گرهی بررسی شد.

نتایج نشان داد آلودگی به نماتد موجب کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل و کاروتنوئید شد، در حالی که کاربرد هر دو گونه تریکودرما سبب افزایش این رنگدانه‌ها در گیاهان سالم و آلوده گردید. کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاهان آلوده احتمالاً ناشی از اختلال در جذب عناصر غذایی، آسیب به کلروپلاست‌ها و افزایش تنش اکسیداتیو است. در مقابل، افزایش کلروفیل و کاروتنوئید در گیاهان تیمارشده با تریکودرما نشان می‌دهد که این قارچ‌ها توانسته‌اند کارایی سیستم فتوسنتزی را حفظ کنند. این یافته با گزارش‌های Nishat et al. (2022)، Harman et al. (2021) و Khanna et al. 2019 مطابقت دارد. افزایش کاروتنوئیدها می‌تواند نقش مهمی در حفاظت از سیستم فتوسنتزی در برابر آسیب اکسیداتیو داشته باشد، زیرا این ترکیبات از طریق خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن و جلوگیری از اکسیداسیون رنگدانه‌های فتوسنتزی عمل می‌کنند (Das & Roychoudhury, 2014).

یکی از شاخص‌های مهم تنش اکسیداتیو در گیاهان، تجمع پراکسید هیدروژن (H_2O_2) است. در این مطالعه، آلودگی به نماتد با افزایش معنی‌دار H_2O_2 همراه بود که نشان‌دهندهٔ القای تنش اکسیداتیو در گیاه میزبان است. افزایش تجمع H_2O_2 در پاسخ به آلودگی نماتد پیش‌تر نیز گزارش شده است و به فعال شدن پاسخ‌های دفاعی گیاه مرتبط دانسته می‌شود (Torres et al., 2006; Suzuki et al., 2014). با این حال، تداوم تجمع این مولکول می‌تواند موجب آسیب اکسیداتیو به غشاها، پروتئین‌ها و سایر اجزای سلولی شود (Hasanuzzaman et al., 2020). کاهش میزان H_2O_2 در گیاهان تیمارشده با تریکودرما نشان می‌دهد که احتمالا این

قارچ‌می‌تواند در حفظ تعادل اکسیداسیون–احیا و محدود کردن تنش اکسیداتیو نقش مؤثری داشته باشد.

کاهش تجمع H_2O_2 در گیاهان تیمارشده احتمالاً با افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی مرتبط است. نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو گونه تریکودرما موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز شدند. این آنزیم‌ها از مهم‌ترین اجزای سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه به شمار می‌روند و در حذف پراکسید هیدروژن و سایر گونه‌های فعال اکسیژن نقش کلیدی دارند. افزایش فعالیت این آنزیم‌ها در حضور گونه‌های *Trichoderma* پیش‌تر نیز گزارش شده و به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های مقاومت القایی در گیاهان شناخته می‌شود (Zheng et al., 2024). بنابراین، افزایش فعالیت CAT و POD در گیاهان تیمارشده احتمالاً در کاهش سطح H_2O_2 مشاهده شده در این مطالعه نقش داشته است.

علاوه بر سیستم‌های آنزیمی، متابولیت‌های ثانویه دفاعی نیز نقش مهمی در تحمل تنش‌های زیستی دارند. نتایج حاضر نشان داد که تیمار با هر دو گونه تریکودرما موجب افزایش محتوای فنل و فلاونوئید در گیاهان گوجه‌فرنگی شد. این ترکیبات علاوه بر خاصیت آنتی‌اکسیدانی، در تقویت دیواره سلولی، تنظیم پاسخ‌های دفاعی و محدود کردن توسعه عوامل بیمارگر نقش دارند (Chen et al., 2013; Pascale et al., 2017). افزایش تجمع این متابولیت‌ها در گیاهان تیمارشده با تریکودرما نشان می‌دهد که این قارچ‌ها احتمالاً از طریق فعال‌سازی مسیرهای دفاعی میزبان، ظرفیت مقابله گیاه با تنش ناشی از نماتد را افزایش داده‌اند.

در اغلب شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده، گونه *T. brevicompactum* عملکرد بهتری نسبت به *T. atrobrunneum* نشان داد. این تفاوت می‌تواند ناشی از توانایی بیشتر این جدایه در استقرار در ناحیهٔ ریزوسفر، تولید متابولیت‌های زیست‌فعال یا تحریک قوی‌تر سیستم‌های دفاعی گیاه باشد. با این حال، برای روشن شدن مکانیسم‌های دقیق مسئول این تفاوت، انجام مطالعات تکمیلی در سطح فیزیولوژیک و مولکولی ضروری است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد تیمار گیاهان با دو گونه *Trichoderma* از طریق تقویت سیستم‌های دفاعی و آنتی‌اکسیدانی، افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، افزایش تجمع ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی و حفظ سطوح بالاتر رنگدانه‌های فتوسنتزی، توانست آثار منفی ناشی از آلودگی گیاه گوجه‌فرنگی به نماتد ریشه‌گرهی را کاهش دهد. این نتایج نشان می‌دهد که بهبود تعادل اکسیداسیون–احیا و تحریک پاسخ‌های دفاعی گیاه از مهم‌ترین سازوکارهای دخیل در افزایش تحمل گیاهان تیمارشده با *Trichoderma* در برابر تنش ناشی از آلودگی با نماتد است. همچنین برتری گونه *T. brevicompactum* نسبت‌به *T. atrobrunneum* در اغلب شاخص‌های ارزیابی‌شده بیانگر تفاوت کارایی جدایه‌های مختلف *Trichoderma*در القای پاسخ‌های دفاعی گیاه است. در مجموع، یافته‌های این پژوهش ظرفیت بالقوه این گونه‌ها، به‌ویژه *T. brevicompactum* ، را برای استفاده در برنامه‌های مدیریت زیستی نماتدهای ریشه‌گرهی نشان می‌دهد. با این حال، برای ارزیابی کارایی آن‌ها در شرایط مزرعه و تبیین دقیق‌تر سازوکارهای فیزیولوژیک و مولکولی دخیل در این فرایند، انجام مطالعات تکمیلی ضروری است.

سپاس‌گزاری

بدینوسیله از حمایت گروه گیاه‌پزشکی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان در فراهم نمودن امکانات لازم در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

Alesaadi, Gh. A., Moosavi, S. M. R., & Basirnia T. (2017). Effect of nano-K, potassium sulphate and salicylic acid on tomato growth and control of root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*). *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)*, *40*(3), 71-82. doi: 10.22055/ppr.2017.18661.1268

Alexandru, M., Lazăr, D. A., Ene, M., & Sesan, T. E. (2013). Influence of some *Trichoderma* species on photosynthesis intensity and pigments in tomatoes. *Romanian Biotechnological Letter*, *18*(4), 8499–8510.

Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., & Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell and Environment*, *24*(12), 1337-1344. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x

Al-Hazmi, A. S., & TariqJaveed, M. (2016). Effects of different inoculum densities of *Trichoderma harzianum* and *Trichoderma viride* against *Meloidogyne javanica* on tomato. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *23*(2), 288-292. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.04.007

Al-Shammari, T. A., Bahkali, A. H., Elgorban, A. M., Kahky, M. T., & Al-Sum, B. A. (2013). The use of *Trichoderma longibrachiatum* and Mortierella alpina against root-knot nematode, *Meloidogyne javanica* on tomato. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, *7*,199–207.

Bernat, P., Nykiel-Szymańska, J., Gajewska, E., Różalska, S., Stolarek, P., Dackowa, J., & Słaba, M. (2018). *Trichoderma harzianum* diminished oxidative stress caused by 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) in wheat, with insights from lipidomics. *Journal of Plant Physiology*, *229*, 158–163. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.07.010.

Brotman, Y., Landau, U., Cuadros-Inostroza, A., Takayuki, T., Fernie, A. R., Chet, I., & Willmitzer, L. (2013). *Trichoderma*-plant root colonization: escaping early plant defense responses and activation of the antioxidant machinery for saline stress tolerance. *Plos Pathogens*, *9*(3), e1003221. https://doi.org/10.1371/annotation/8b818c15-3fe0-4e56-9be2-e44fd1ed3fae.

Chance, B. & Maehly, A. (1955). Assay of catalase and peroxidase. *Methods in Enzymology*, *2*, 764-817. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8

Chen, S., Jin, W., Liu, A., Zhang, S., Liu, D., Wang, F., Lin, X., & He, C. (2013). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) increase growth and secondary metabolism in cucumber subjected to low temperature stress. *Scientia Horticulturae*, *160*, 222-229. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.05.039

Coll, N. S., Epple, P., & Dangl, J. L. (2011). Programmed cell death in the plant immune system. *Cell Death and Differentiation*, *18*(8), 1247–1256. https://doi.org/10.1038/cdd.2011.37.

Czarnocka, W., & Karpinski, S. (2018). Friend or foe? Reactive oxygen species production, scavenging and signaling in plant response to environmental stresses. *Free Radical Biology and Medicine*, *122*, 4-20. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.01.011.

Das, K., & Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in Environmental Science*, *2*, 53. https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053.

Dragusha, S., Qazimi, B., & Ejupi, V. (2023). Assessment of total phenolic and flavonoid content of medicinal plant extracts from Kosovo. *Journal of Medicinal plants and By-products*, *12*(2), 175-180. https://doi.org/10.22034/jmpb.2023.361637.1538

Fan, H., Yao, M., Wang, H., Zhao, D., Zhu, X., Wang, Y., Liu, X., Duan, Y., & Chen, L. (2020). Isolation and effect of *Trichoderma citrinoviride* Snef1910 for the biological control of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*. *BMC microbiology*, *20*(1), 299. https://doi.org/10.1186/s12866-020-01984-4

Faryabi, Z., Alaei, H., Zeynaddini rise, A., & Hatami, N. (2024). Efficacy of *Trichoderma* as stimulator of plant defense in pistachio seedlings against root-knot nematode *Meloidogyne javanica*. *Applied Entomology and Phytopathology*, *91*(2), 157-171. https://doi: 10.22092/JAEP.2023.362756.1483

Gamalero, E., & Glick, B. R. J. B. (2020). The use of plant growth-promoting bacteria to prevent nematode damage to plants. *Biology*, *9* (11), 381. https://doi.org/10.3390/ biology9110381

Ghaderi, R., Dehghan, A. A., Hesar, A. M., & Karegar, A. (2020). Genetic intraspecific diversity of *Meloidogyne javanica* parasitizing vegetables in southern Iran. *Journal of nematology*, *52*, 1-13. https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-035

Harman, G. E., Doni, F., Khadka, R. B., & Uphoff, N. (2021). Endophytic strains of *Trichoderma* increase plants' photosynthetic capability. *Journal of Applied Microbiology*, *130*(2), 529-546. https://doi.org/10.1111/jam.14368.

Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S.M., Mahmud, J.A., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, *9*, 681. https://doi.org/10.3390/antiox9080681

Hussay. R. S., & Barker, K. R. (1973). Comparison of methods of collecting inoculate of *Meloidogyne* spp. including a new technique. *Plant Disease Reporter*, *57*, 1025-1028.

Izuogu, N. B., Baba, H. S., & Winjobi, E. O. (2019). Assessment of bio-agent (*Trichoderma harzianum*) in the management of two pepper varieties infected with root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*). Acta Universitatis Sapientiae: *Agriculture and Environment*, *11*(1),16-22 https://doi: 10.2478/ausae-2019-0002

Jepson, S. B. (1987). Identification of Root knot Nematodes (*Meloidogyne* species). Wallingford,UK: CAB International Publishing.

Khoja, S., Eltayef, K. M., Baxter, I., Myrta, A., Bull, J. C., & Butt, T. (2021). Volatiles of the entomopathogenic fungus, *Metarhizium brunneum*, attract and kill plant parasitic nematodes. *Biological Control*, *152*, 104472. https://doi 10.1016/j.biocontrol.2020.

Khanna, K., Jamwal, V. L., Sharma, A., Gandhi, S. G., Ohri, P., Bhardwaj, R., & Ahmad, P. (2019). Evaluation of the role of rhizobacteria in controlling root-knot nematode infection in *Lycopersicon esculentum* plants by modulation in the secondary metabolite profiles. *AoB Plants*, *11*(6), plz069. https://doi: https://doi.org/10.1093/aobpla/plz069

Lahlali, R., Ezrari, S., Radouane, N., Kenfaoui, J., Esmaeel, Q., El Hamss, H., & Barka, E. A. (2022). Biological control of plant pathogens: A global perspective. *Microorganisms*, *10*(3), 596. https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596

Li, Z., & Ahammed, G. J. (2023). Plant stress response and adaptation via anthocyanins: a review. *Plant Stress*, 10, 100230. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100230.

Lichtenthaler, H. K., & Wellburn, A. R. (1983). Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transaction*, *11*, 591-592. https://doi:10.1042/BST0110591

Mac-Adam, J. W., Nelson, C. J., & Sharp, R. E. (1992). Peroxidase Activity in the leaf elongation zone of tall fescue. *Plant Physiology*, *99*, 872-878. https://doi.org/10.1104/pp.99.3.872

Maleki Ziarati, H., Roustaee, A., Sahebani, N., Etebarian, H. R., & Aminian, H. (2009). Study of biological control of root-knot nematode, *Meloidogyne javanica* (Trube) chitwood, in tomato by *Trichoderma harzianum* Rifai in greenhouse and quantitative changes of phenolic compounds in plant. *Seed and Plant Production Journal*, *25*: 259-272. (In Persian). https://doi: 10.22092/sppj.2017.110376

Mirzaeipour, Z., Bazgir, E., Zafari, D., & Darvishnia, M. (2023). Isolation and identification of Harzianum clade species of *Trichoderma* from Khorramabad County. *Mycologia Iranica*, *10*(2), 67-78. https://doi: 10.22092/MI.2023.362910.1264

Mirzaeipour, Z., Bazgir, E., Zafari, D., & Darvishnia, M. (2024). Identification of *Trichoderma* species from forest regions of Khorramabad County using morphological and molecular characteristics. *Journal of Applied Research in Plant Protection*, *13*(4), 433-450. https://doi: 10.22034/arpp.2025.19379

Mohamed, H. I., & Abd–El Hameed, A. G. (2014). Molecular and biochemical markers of some Vicia faba L. genotype in response to storage insect pests infestation. *Journal of Plant Interactions*, *9*(1), 618–626. https://10.1080/17429145.2013.879678.

Mokhtari, S., Sahebani, N., & Etebarian, H. R. (2009). Study on biological control and systemic induction of peroxidase enzyme activity in tomato plant infected with root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) by *Pseudomonas fluorescens* CHA0 antagonist. *Agriculture*, *11*(1), 151-161 (In Farsi).

Nishat, Y., Danish, M., Mohamed, H. I., Shaikh, H., & Elhakem, A. (2022). Biological control of root-knot nematode *Meloidogyne incognita* in Psoralea corylifolia plant by enhancing the biocontrol efficacy of *Trichoderma harzianum* using press mud. *Phyton*, *91*(8), 1754-1777. https://doi: 10.32604/phyton.2022.021267

Pascale, A., Vinale, F., Manganiello, G., Nigro, M., Lanzuise, S., Ruocco, M., Marra, R., Lombardi, N., Woo, S. L., & Lorito, M. (2017). *Trichoderma* and its secondary metabolites improve yield and quality of grapes. *Crop Protection*, *92*, 176-181. http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.010

Perry, R. N., Moens, M., & Starr J. L. (2009). Root-knot Nematodes, CAB International, Wallingford,UK. https://doi.org/10.1079/9781845934927.0000

Pourkhajeh, F., Charehgani, H., Abdollahi, M., & Sadravi, M. (2019). Biocontrol effect of *Trichoderma harzianum* isolates on root knot nematode *Meloidogyne javanica* on greenhouse

cucumber. Iranian Journal of *Plant pathology*, *55*(1), 77-82. https://doi.org/10.22034/ijpp.2019.36798

Pradhan, P., Naresh, P., Barik, S., Acharya, G. C., Bastia, R., Adamala, A. K., & Das, M. P. (2023). Breeding for root-knot nematode resistance in fruiting Solanaceous vegetable crops: a review. Euphytica, 219. https://doi.org/10.1007/s10681-023-03204-2.

Sharon, E., Bar-Eyal, M., Chet, I., Herrera-Estrella, A., Keleifed, O., & Spiegel, Y. (2001). Biological control of the root–knot nematode *Meloidogyne javanica* by *Trichoderma harzianum*. *Phytopathology*, *91*, 687-693. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2001.91.7.687

Siddiqui, I. A., & Shaukat, S. S. (2004). *Trichoderma harzianum* enhances the production of nematicidal compounds in vitro and improves biocontrol of *Meloidogyne javanica* by *Pseudomonas fluorescens* in tomato. *Letters in Applied Microbiology*, *38*, 169-175. https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2003.01481.x

Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic–phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology Viticulture*, *16*(3): 144-158.

Strange, R. N., & Scott, P. R. (2005). Plant disease: a threat to global food security. Annual Review Of *Phytopathology*, *43*, 83–116. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.43.113004.133839.

Suzuki, N., Rivero, R. M., Shulaev, V., Blumwald, E., & Mittler, R. (2014). Abiotic and biotic stress combinations. *New Phytologist*, *203*(1), 32-43. https://doi.org/10.1111/nph.12797

Torres, M. A., Dangl, J. L., & Jones, J. D. (2006). Arabidopsis gp91phox homologues AtrbohD and AtrbohF are required for accumulation of reactive oxygen intermediates in the plant defense response. *Pnas*, *103*(9), 3525–3530. https://doi.org/10.1073/pnas.012452499.

Tyskiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E., & Jaroszuk-Scisel, J. (2022). *Trichoderma*: the current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. *International Journal of Molecular Science*, *23* (4), 2329. https://doi.org/10.3390/ijms23042329.

Wonglom, P., Daengsuwan, W., Ito, S.i., & Sunpapao, A. (2019). Biological control of Sclerotium fruit rot of snake fruit and stem rot of lettuce by *Trichoderma* sp. T76-12/2 and the mechanisms involved. *Physiology Molecular Plant Pathology*. *107*, 1–7. https://doi: 10.1111/j.1365-3059.1993.tb01532.x

Yan, Y. R., Mao, Q., Wang, Y. Q., Zhao, J. J., Fu, Y. L., Yang, Z. K., Peng, X. H., Zhang, M. K., Bai, B., Liu, A. R., Chen, S. C., & Ahammed, G. J. (2021). *Trichoderma harzianum* induces resistance to root-knot nematodes by increasing secondary metabolite synthesis and defense-related enzyme activity in *Solanum lycopersicum* L. *Biological Control*, *158*, 2-11. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104609.

Yang, Y., & Zhang, T. (2019). Antimicrobial activities of tea polyphenol on phytopathogens: a review. Molecules 24. https://doi.org/10.3390/molecules24040816

Zheng, F., Fu, Y., Yu, P., Qin, C., Guo, T., Xu, H., Chen, J., Ahammed, G.J., Liu, A., & Chen, S. (2024). Flavonoid synthesis is crucial for *Trichoderma asperellum*-induced systemic

resistance to root-knot nematodes in tomato plants. *Plant Physiology and Biochemistry, 212*, 108706. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108706

© 2026 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/.