Journal of Animal Biology, Autumn 2025; 18(1):15-28

ISSN: 1735-9724

Research Article

Increased Susceptibility of the Tomato Leaf Miner *Tuta absoluta* to Tomato Plants Strengthened with Silver Nanoparticles

Zahra Riaz Abdullah al-Tarsha, Shima Rahmani*

Department of Plant Protection, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Corresponding author: shrahmani@iau.ac.ir

Received: 22 May 2025 Accepted: 3 August 2025

DOI: 10.60833/ascij.2025.1207649

Abstract

The tomato leaf miner, *Tuta absoluta*, is a significant pest of plants in the Solanaceae family, particularly tomatoes, and can destroy the entire crop if not managed properly. Because the frequent use of chemical insecticides is sometimes ineffective due to the concealed life of the insect during the larval stage, the potential for resistance, and undesirable environmental effects, it is advised to explore suitable and biocompatible alternative methods to combat this pest. One strategy to address this issue involves enhancing the host plant's resistance using silver nanoparticles. In this study, concentrations of 200, 400, 600, and 800 ppm of silver particles (39. 50 nm) were employed to develop and bolster the resistance of tomato plants against this moth pest. For this purpose, several physiological indicators of tomato plants were assessed. Additionally, several biological characteristics of the pest were examined, including the number of eggs laid and the mortality rates of eggs and larvae. The results indicated that as the concentration of nanoparticles increased, the antioxidant enzymes peroxidase and superoxide dismutase exhibited an upward trend. However, no significant changes were observed in the enzymes polyphenol oxidase and catalase. Furthermore, with increasing concentrations of silver nanoparticles, the total phenol content increased while the anthocyanin content decreased significantly ($p < 0.05$); however, no changes were noted in the total carbohydrate content. Moreover, significantly fewer eggs were laid in the group treated with silver nanoparticles, and the mean percentage of embryonic and larval mortality was lower ($p < 0.05$). This effect was particularly pronounced at the higher concentrations of 600 and 800 ppm. Hence, the application of silver nanoparticles can contribute to making tomato plants resistant to *T. absoluta*, and it could likely be used in the future as a safe alternative to conventional insecticides.

Keywords: Leaf-miner, Silver nanoparticles, Tomatoes, Insecticide.

زیست‌شناسی جانوری، سال هجدهم، شماره اول، پاییز ۱٤۰٤، صفحات ۲۸-۱۵

شاپا: ۹۷۲٤-۱۷۳۵

مقاله پژوهشی

افزایش حساسیت شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی (*Tuta absoluta*) به گیاه گوجه‌فرنگی تقویت‌شده با نانوذرات نقره

زهرا ریاض عبدالله الطرشه، شیما رحمانی*

گروه گیاهپزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات: shrahmani@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰۳/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۵/۱۲

DOI: 10.60833/ascij.2025.1207649

چکیده

شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی، *Tuta absoluta* یکی از آفات مهم گیاهان خانواده Solanaceae به ویژه گوجه‌فرنگی است که در صورت عدم کنترل می‌تواند کل محصول را از بین ببرد. از آن‌جایی که کاربرد مکرر حشره‌کش‌های شیمیایی به دلیل رفتار مینوزی این حشره در دوران لاروی، بروز مقاومت و همچنین اثرات ناخواسته زیست‌محیطی بعضا فاقد کارایی لازم هستند، توصیه می‌شود روش‌های جایگزین مناسب و زیست‌سازگاری برای مبارزه با این آفت ارایه شود. یکی از راهکارهای مبارزه با این آفت، مقاوم‌سازی گیاه میزبان با استفاده از ترکیبات نانوذرات نقره است. در این پژوهش، از غلظت‌های ۲۰۰، ٤۰۰، ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm ذرات نقره (۳۹/۵۰ نانومتر) استفاده شد تا ایجاد و افزایش مقاومت گیاه گوجه‌فرنگی به این شب‌پره آفت مورد آزمایش قرار گیرد. به این منظور، برخی از شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه گوجه‌فرنگی اندازه گیری شد. از سوی دیگر، تعدادی از ویژگی‌های بیولوژیکی آفت نیز از جمله تعداد تخم گذاشته شده و میزان مرگ و میر تخم و لارو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با بالا رفتن غلظت نانوذرات، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز روندی افزایشی نشان دادند. اگرچه تغییر معنی‌داری در دو آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز و کاتالاز دیده نشد. همچنین، با افزایش غلظت نانوذرات نقره میزان فنل کل افزایش و میزان آنتوسیانین کاهش معنی‌داری پیدا کرد ($p < ۰/۰۵$) اما در میزان کربوهیدرات کل تغییری ایجاد نشد. بعلاوه، در گروه تیمار شده با نانوذرات نقره، به طور معنی‌داری تعداد تخم‌های کمتری گذاشته شد، و درصد میانگین مرگ جنین و لاروها کمتر بود ($p < ۰/۰۵$). بعلاوه، این اثرگذاری از سوی دو غلظت بالاتر (٦۰۰ و ۸۰۰ ppm) بیشتر برآورد شد. بدین ترتیب، استفاده از نانوذرات نقره می‌تواند در مقاوم‌سازی گیاه گوجه‌فرنگی به *T. absoluta* نقش داشته باشد و امکان دارد در آینده بتوان از آن به عنوان روشی ایمن و جایگزینی برای حشره‌کش‌های رایج استفاده کرد.

کلمات کلیدی: شب‌پره مینوز، نانوذرات نقره، گوجه‌فرنگی، حشره‌کش.

مقدمه

گوجه‌فرنگی با نام علمی *Solanum lycopersicum* L. یکی از محصولات مهم در رژیم غذایی خانوارها است که علاوه بر مصرف تازه‌خوری در تولید محصولات فرآوری شده نظیر رب و سس گوجه‌فرنگی نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد. بعد از ذرت علوفه‌ای و گندم آبی، رتبه سوم میزان تولید در کشور به گوجه‌فرنگی با

تولید ٦/۹ میلیون تن و سهم ۹/۲ درصد از کل میزان تولید محصولات زراعی اختصاص دارد (۱). آمار نرخ بازدهی گوجه‌فرنگی در ایران روندی رو به رشد را نشان می‌دهد. در سال ۱۹٦۱ نرخ بازدهی گوجه‌فرنگی به ازای هر هکتار زمین زیر کشت در کشور ۷/۳۳ تن ارزیابی شد. درحالی‌که بیشترین نرخ بازدهی تولید گوجه‌فرنگی در مربوط به آخرین سال ثبت این آمار در سال ۲۰۲۳ با ٤۵/۷۸ تن گوجه‌فرنگی در هر هکتار زمین زیرکشت بوده است. بررسی کالایی صادرات بخش کشاورزی ایران در طی دوره ۱۳۹٤ تا ۱٤۰۱ نشان می‌دهد محصول گوجه‌فرنگی با میانگین ۷۵۸ هزار تن به ارزش ٤۰۳ میلیون دلار، به طور میانگین حدود ۲۰ درصد از میزان صادرات کالاهای عمده صادراتی بخش کشاورزی را شامل می‌شود (۲). گیاه گوجه‌فرنگی ممکن است میزبان آفات متعددی باشد (۳). شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی *Tuta absoluta* (Meyrick) از جمله آفات مهم گیاه گوجه‌فرنگی است که به عنوان یکی از عوامل محدود کننده کشت و پرورش این گیاه گلخانه‌ای و زراعی در تعداد زیادی از کشورهای دنیا معرفی شده است (٤، ۵). این حشره بومی آمریکای جنوبی است و برای اولین بار در سال ۱۹۱۷ از کشور پرو گزارش شد. این آفت قدرت تهاجمی بالایی دارد و تمامی گیاهان خانواده Solanaceae از جمله سیب‌زمینی، بادمجان و به نسبت کمتر فلفل را مورد هجوم قرار داده اما گوجه‌فرنگی را ترجیح می‌دهد (٦) و از سال ۲۰۰٦ به بعد از چندین کشور دنیا در اروپا، خاورمیانه، بعضی از قسمت‌های دیگر آسیا و آفریقا گزارش شده است (٤، ۷). این آفت در ایران برای اولین بار در تیر ماه سال ۱۳۸۹ از یکی از مزارع گوجه‌فرنگی اطراف شهرستان ارومیه استان آذربایجان غربی گزارش شد و طی ۱۳ ماه پس از آن توانست مزارع گوجه‌فرنگی در ۲٤ استان کشور را آلوده کند (۸). مینوز گوجه‌فرنگی جزو گونه‌های چندنسلی است که توانایی تولیدمثل بالا داشته و در سال چندین نسل ایجاد می‌کند. تعداد تخم‌ها به طور متوسط ۲٦۰ تا ۳۰۰ عدد است که در محدوده دمایی ۲٦ تا ۳۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ٦۵ تا ۷۰ درصد پس از ۵ تا ۷ روز تفریخ می‌شوند. طی دوره لاروی که در حدود ۲۰ روز طول می‌کشد با ایجاد کانال و تونل در برگ‌ها، گل‌ها، ساقه‌ها و میوه‌های گوجه‌فرنگی خسارت کمی و کیفی بالایی وارد می‌کند. دالان‌های ایجاد شده در میوه ممکن است مورد حمله میکروارگانیسم‌های ثانویه قرار گرفته و منجر به پوسیدگی و فساد آن شوند. خسارتی که توسط این آفت در مزرعه و گلخانه ایجاد می‌شود در صورت تراکم بالا می‌تواند ۵۰ تا ۱۰۰ درصد محصول را از بین می‌برد (٤). استراتژی‌های کنترل این آفت به طور عمده شامل استفاده از حشره‌کش‌ها، تشخیص زودهنگام آفت و استفاده از تله‌ها، به خصوص تله‌های حاوی فرمون جنسی می‌باشد (۹). از مهم‌ترین آفت کش‌های پرکاربرد در گلخانه که علیه این آفت به کار می‌روند می‌توان به امامکتین بنزوآت، اسپینوزاد، ایندوکساکارب و فلوبندیامید اشاره کرد. کنترل شیمیایی این آفت به دلیل تغذیه لاروها بین دو لایه رویی و زیرین اپیدرم برگ گوجه‌فرنگی و سایر میزبان‌ها و عدم تماس مستقیم با آفت‌کش‌های شیمیایی و از طرفی پتانسیل بالای آن جهت مقاومت به حشره-کش‌ها بسیار مشکل بوده و با توجه به این که در طول فصل چندین بار سم پاشی برای کنترل آن لازم است نتیجه رضایت بخشی را در پی نداشته است (۱۰). نانوتکنولوژی در سال‌های اخیر راهکار امیدوارکننده‌ای در امر حفظ و نگهداری گیاهان پیش رو قرار داده است. روش‌هایی که در این علم جهت حفظ سلامت گیاهان مورد توجه قرار می‌گیرند به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصربه‌فرد ذرات در مقیاس نانو نسبت داده می‌شود. در این زمینه، نانوذرات نقره در کاربردهای مختلف اعم از پزشکی، صنعتی و زراعی مؤثر بوده و در چند سال

اخیر در کنترل حشرات آفت مورد توجه زیادی قرار گرفته است (۱۱). نانوذرات نقره سیستم های کلوئیدی با اندازه ذرات بین یک تا ۱۰۰ نانومتر هستند (۱۲). تاکنون سمیت این ترکیبات روی حشرات راسته Lepidoptera، Diptera، Coleoptera و Hemiptera مورد مطالعه قرار گرفته و اثراتی از قبیل استرس اکسیدی، مرگ سلولی و کشندگی حاد در رابطه با استفاده از آنها گزارش شده است. اثرات نانوذرات نقره علیه حشرات عمدتا به ویژگی‌هایی مانند اندازه، ساختار سطحی، تبلور، بارالکتریکی، فعالیت کاتالیزوری و غلظت مورد استفاده نسبت داده می‌شود (۱۱). این عوامل توانایی نانوذرات برای عبور از موانع بیولوژیکی را افزایش می‌دهند و در نتیجه موجب اثرات فیزیولوژیکی نامطلوبی می‌شوند (۱۳). در این مطالعه علاوه بر بررسی اثر غلظت‌های متنوع نانوذرات نقره بر زنده‌مانی تخم و لارو شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی، تعداد تخم گذاشته شده روی گیاهان تیمار شده با این ترکیبات هم مورد بررسی قرار گرفت. بعلاوه، برخی از خصوصیات بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی تحت تأثیر نیز اندازه‌گیری و با گیاه تیمار شده با حشره‌کش فلوبندیامید مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

پرورش گیاه گوجه‌فرنگی: برای پرورش گیاه گوجه-فرنگی، *Solanum lycopersicum* L. ابتدا بذرهای گیاه در سینی‌های مخصوص نشا حاوی کوکوپیت و پرلیت کاشته و دو هفته بعد در مرحله دو تا سه برگی به گلدان‌هایی با قطر ۱۵ سانتی‌متر دارای بستری متشکل از ترکیب ماسه و خاک با نسبت مساوی منتقل شدند. با اضافه کردن شن درشت به کف گلدان، تخلخل لازم جهت ایجاد زهکش در گلدان‌ها ایجاد شد. برای جلوگیری از آلوده شدن بوته‌ها به آفات دیگر درون یک قفس توری قرار داده شدند. آبیاری گلدان‌ها هر دو روز یک بار انجام می‌شد. در نهایت، پس از رشد کافی گیاه در اختیار حشرات کامل مینوز گوجه‌فرنگی قرار می-گرفتند تا تخمریزی انجام گیرد.

پرورش شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی، *T. absoluta*: جهت پرورش شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی ابتدا جمعیت‌هایی به صورت لارو، شفیره و حشره کامل از گلخانه‌های کرج جمع‌آوری و به قفس‌های پرورش بزرگی به طول ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در دمای ۱±۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۵±٦۵ درصد و دوره روشنایی ۱٦ ساعت منتقل شد. به منظور افزایش پتانسیل زادآوری افراد بالغ، در داخل قفس های پرورش میکروویال‌های حاوی آب عسل ۲۰ درصد پوشیده شده با پنبه قرار داده شد. همچنین گلدان‌های تازه گوجه‌فرنگی برای تخم‌گذاری این حشرات در قفس قرار داده شد.

اثر نانوذرات نقره روی ویژگی‌های زیستی شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی: برای بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره بر شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی، در هر قفس به طول ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی-متر سه گلدان هر یک حاوی یک گیاه گوجه‌فرنگی تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره قرار داده شد. برای اطمینان از ابعاد نانوذرات نقره، از سطح نمونه‌ها با کمک میکروسکوپ اسکن الکترونی (SEM) تصویربرداری انجام گرفت. آزمایش‌ها با شش تیمار و سه تکرار در دمای ۱±۲۵ درجه‌ی سلسیوس و رطوبت نسبی ۵±٦۵ درصد و دوره روشنایی ۱٦ ساعت در قالب طرح کاملا تصادفی انجام گرفت. تیمارها حاوی دوزهای مختلف نانوذرات نقره شامل ۲۰۰، ٤۰۰، ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm بود. از آب مقطر به عنوان شاهد مثبت و از حشره‌کش فلوبندیامید به عنوان شاهد منفی آزمایش استفاده شد. برای هر تیمار تعداد ۳۰ حشره کامل با نسبت جنسی دو ماده به ازای یک نر در نظر گرفته شد. پس از ۲٤ ساعت حشرات کامل از تمامی تیمارها

حذف شدند و تعداد تخم‌ها شمارش شد. بعلاوه، اجازه داده شد تا تخم‌ها رشد و نمو پیدا کنند تا زنده‌مانی تخم و لارو شب‌پره مینوز نیز برآورد شود.

سنجش میزان کربوهیدرات: برای اندازه‌گیری میزان کربوهیدرات برگ ابتدا ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره اتانولی ۸۳ درصد نگهداری شده در یخچال برداشته شده و در لوله آزمایش ریخته شد. سپس سه میلی‌لیتر محلول آنترون تازه تهیه شده (۱۵۰ میلی‌گرم آنترون + ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۷۲ درصد) به آن اضافه گردید. لوله‌های آزمایش به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده شد تا ماده رنگی حاصل شود. بعد از خنک شدن لوله‌های نمونه میزان جذب آن‌ها در طول موج ٦۲۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتوفوتومتر اندازه-گیری شد. این آزمون برای تیمارهای مختلف در سه تکرار بررسی شد.

سنجش فعالیت پراکسیداز (POD): برای سنجش فعالیت پراکسیداز ابتدا ٤۹۰ میکرولیتر محلول آب اکسیژنه (۲۲۵ میلی‌مولار) با ٤۹۰ میکرولیتر محلول گوایکول (٤۵ میلی‌مولار) با هم مخلوط و به آنها ۲۰ میکرولیتر عصاره نمونه گیاهی اضافه شد. تغییرات جذب در طول موج ٤۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (بایوتک-آلمان) خوانده شد. محلول بلانک به جای عصاره، حاوی بافر فسفات ۵۰ میلی-مولار بود.

سنجش فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO): سنجش میزان آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز در محیط واکنش حاوی ۵۰ میکرولیتر از پیروگالول ۳۰۰۰، ۰/۰۲ میکرولیتر از بافر فسفات با اسیدیته هفت و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی انجام گرفت. میزان فعالیت آنزیم بر حسب مقادیر اکسید شدن پیروگالول در طول موج ٤۲۰ نانومتر محاسبه گردید. در نهایت فعالیت آنزیم بر حسب تغییرات جذب نمونه‌ها در ٤۲۰ نانومتر گزارش شد.

سنجش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD): برای اندازه‌گیری میزان فعالیت کمی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) بر اساس توانایی آنزیم SOD در متوقف کردن احیا فتوشیمیایی نیتروبلوتترازولیوم (NBT) توسط رادیکال‌های سوپر اکسید در حضور ریبوفلاوین در نور صورت گرفت. سپس محلول حاصل از واکنش NBT و بافت مورد مطالعه را در دستگاه اسپکتروفتومتر (بایوتک-آلمان) قرار داده و میزان جذب نوری آن در طول موج ٥٦۰ nm تعیین شد.

سنجش آنزیم کاتالاز (CAT): برای اندازه گیری میزان آنزیم کاتالاز ۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج را با یک میلی‌لیتر محلول اندازه‌گیری کاتالاز که شامل ۵۰ میلی-مول بافر فسفات‌پتاسیم و ۱۵ میلی‌مول پراکسید هیدروژن (H_2O_2) است مخلوط شد، سپس جذب آن را در طول موج ۲٤۰ nm بعد از یک دقیقه با دستگاه اسپکتوفتومتر (بایوتک-آلمان) خوانده شد.

اندازه گیری فنل کل: به منظور اندازه‌گیری محتوای فنل کل از معرف فولین- سیوکالتو انجام شد. بدین منظور، ۲۰ میکرولیتر عصاره به ۱۱۰ میکرولیتر معرف فولین- سیوکالتو تازه اضافه شد. سپس ۷۰ میکرولیتر محلول سدیم‌کربنات به آنها اضافه شد. پس از نگهداری محلول به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق، جذب نمونه در طول موج ۷٦۵ نانومتر ثبت شد.

اندازه گیری آنتوسیانین: برای استخراج آنتوسیانین‌ها ابتدا ۰/۰۵ گرم برگ گیاه با ترازو توزین و سپس با ۲/۵ میلی‌لیتر اتانول یک درصد اسیدی با نسبت حجمی ۹۹/۱ به ترتیب از اتانول اسیدکلریدریک کاملاً هموژنایز شد. عصاره حاصل به لوله آزمایش منتقل و به مدت ۲٤ ساعت در تاریکی در دمای آزمایشگاه قرار داده شد. سپس عصاره به مدت ۱۰ دقیقه در g ٤۰۰۰ سانتریفوژ گردید و سه میلی‌لیتر از محلول رویی برای خواندن شدت جذب آن در طول موج ۵۵۰ نانومتر

توسط اسپکتروفتومتر (بایوتک-آلمان) استفاده شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر ارایه گردید.

آنالیز آماری: طرح استفاده شده در این مطالعه کاملا تصادفی و با سه تکرار برای هر تیمار انجام شد. آنالیز داده‌های آزمایشگاهی با نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین با استفاده از رویه توکی در سطح‌معنی‌دار ۰/۰۵ انجام شد.

نتایج

ارزیابی قطر نانوذرات نقره: به منظور بررسی ساختار نانوذرات نقره، تصاویر به روش روبشی SEM ثبت شد. قطر نانوذرات با اندازه ۳۹/۵۰ نانومتر ثبت شد و توزیع ذرات با تراکم متوسط نشان داده شد (شکل ۱).

اثر نانوذرات نقره برمیزان تخمگذاری و زنده‌مانی شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی: نانوذرات نقره در تمامی غلظت‌های مورد استفاده منجر به کاهش تخم‌ریزی شد. این کاهش در تخمریزی در سه تیمار ۲۰۰ و ٤۰۰ ppm نانوذره و تیمار سم پاشی شده با فلوبندیامید بدون اختلاف معنی‌دار برآورد شد؛ اما میزان تخمریزی در تیمارهای تحت غلظت‌های ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm با اختلاف معنی‌داری کمتر از سایرین برآورد شد. اگرچه، اختلاف بین دو تیمار ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۲). درصد مرگ و میر تخم‌ها و لاروهای شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی در تمامی غلظت‌های مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری با گروه شاهد مثبت داشت. بیشترین میزان مرگ و میر جنینی در غلظت‌های ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm (به ترتیب ۵۸/٦۰ و ۵۹/٦۸ درصد) و بیشترین مرگ و میر لاروها در همین دو تیمار (به ترتیب ٦۷/٤۸ و ٦۳/۲٦ درصد) اتفاق افتاد. از سوی دیگر، مرگ و میر جنینی در تیمار تحت تاثیر فلوبندیامید (۵۹/۵۸ درصد) تفاوت معنی‌داری با دو غلظت ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm نداشت. اگرچه درصد مرگ و میر لاروی تحت تأثیر این حشره‌کش (٤۳/٦٤ درصد) به طور معنی‌داری کمتر از دو غلظت نانوذرات نقره بود، اما با مقادیر به دست آمده از تیمارهای ۲۰۰ و ٤۰۰ ppm نانوذرات نقره (به ترتیب ٤٤/۸۲ و ٤۱/۰۰ درصد) در یک گروه قرار می‌گرفت (جدول ۱).

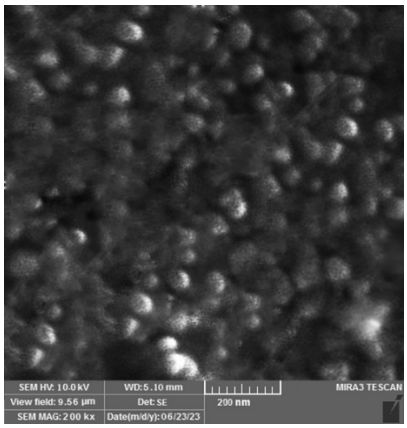
تأثیر نانوذرات نقره بر صفات آنتی‌اکسیدانی: هیچ یک از غلظت‌های نانوذرات نقره و همین طور حشره‌کش فلوبندیامید تأثیری بر آنزیم‌های پلی‌فنل‌اکسیداز و کاتالاز نداشتند (جدول ۲). از سوی دیگر، تمامی تیمارها از جمله تیمار فلوبندیامید موجب افزایش عملکرد آنزیم‌های پراکسیداز و سوپراکید دیسموتاز شدند. میزان آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز تحت تأثیر غلظت‌های ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm بدون اختلاف معنی‌داری با یکدیگر، بیشترین میزان افزایش را نشان داد. از سوی دیگر، الگوی تغییرات این آنزیم تحت تأثیر فلوبندیامید و دو تیمار ۲۰۰ و ٤۰۰ ppm با یکدیگر اختلاف معنی داری نداشتند. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در بالاترین غلظت نانوذرات نقره (۸۰۰ ppm) بیشترین افزایش را داشت. پس از آن، غلظت ٦۰۰ ppm با اختلاف معنی-دار، موجب افزایش میزان این آنزیم شد و تأثیر فزاینده فلوبندیامید در رتبه سوم قرار داشت. سپس، غلظت‌های ۲۰۰ و ٤۰۰ ppm قرار داشتند که بدون آن که تفاوت معنی داری با یکدیگر نشان دهند آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را افزایش دادند (جدول ۲).

تأثیر نانوذرات نقره بر میزان فنل کل: میزان فنل کل در تیمارهای نانوذرات نقره تفاوت معنی داری با گروه شاهد داشت؛ به‌طوری‌که تیمارهای تحت تأثیر نانوذرات نقره میزان فنل بیشتری تولید کردند. بر اساس نتایج، غلظت ۸۰۰ ppm بیشترین اثر را روی افزایش فنل کل نشان داد به‌طوری‌که این میزان ۰/۳۸ میلی‌گرم در صد گرم وزن تر گیاه برآورد شد (جدول ۳). از سوی دیگر، تفاوت معنی داری از این نظر بین گیاه گوجه‌فرنگی تحت تأثیر غلظت ٦۰۰ ppm نانوذرات

نقره و حشره‌کش فلوبندیامید دیده نشد. مقدار فنل کل در تیمارهای ۲۰۰ و ٤۰۰ ppm کمتر از سایر تیمارها برآورد شد. این دو تیمار نیز در یک گروه آماری قرار گرفتند و تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند.

تاثیر نانوذرات نقره بر کربوهیدرات کل: ارزیابی اثر نانوذرات نقره در غلظت‌های مختلف بر کربوهیدرات کل گیاه گوجه‌فرنگی، هیچ گونه تفاوت معنی داری با دو شاهد مثبت (آب) و منفی (فلوبندیامید) نشان نداد (جدول ٤).

تأثیر نانوذرات نقره بر آنتوسیانین کل: با افزایش غلظت نانوذرات نقره از میزان آنتوسیانین کل به طور معنی‌داری به ویژه در سطح ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm کاسته شد. کاهش میزان آنتوسیانین در دو تیمار ۸۰۰ و ٦۰۰ ppm نسبت به یکدیگر از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۳).



شکل ۱- ارزیابی نانوذرات نقره با استفاده از SEM در بزرگنمایی ۲۰۰ نانومتر

Fig. 1. Evaluation of silver nanoparticles using SEM at 200 nm magnification

جدول ۱- میانگین درصد مرگ و میر تخم و لاروهای *T. absoluta* تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره.

Table 1. Mortality rate of *T. absoluta* eggs and larvae treated with different concentrations of silver nanoparticles.

Silver nanoparticles (ppm)	Lavae mortality (%) ± SE	Egg mortality (%) ± SE
200	$44.82^{b} \pm 4.96$	$42.40^{b} \pm 5.93$
400	$41.00^{b} \pm 3.88$	$42.60^{b} \pm 6.20$
600	$67.48^{a} \pm 5.54$	$58.60^{a} \pm 5.86$
800	$63.26^{a} \pm 1.85$	$59.68^{a} \pm 6.30$
flubendiamide (negative control)	$43.64^{b} \pm 1.40$	$59.58^{a} \pm 6.41$
distilled water (positive control)	$21.50^{c} \pm 1.17$	$13.80^{c} \pm 3.66$
P-value	>0001	>0001

Different letters in the columns indicate a significant difference at the 5% level.

جدول ۲- تغییر صفات آنتی‌اکسیدانی گوجه‌فرنگی تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره تحت تنش ناشی از خسارت *T. absoluta*

Table 2. Antioxidant changes in the tomato plants treated with different concentrations of silver nanoparticles under stress caused by *T. absoluta.*

Silver nanoparticles (ppm)	CAT (U g^{-1} FW)	SOD(U g^{-1} FW)	PPO(U g^{-1} FW)	POD(U g^{-1} FW)
200	152.44 ± 8.40	$947.87^{c} \pm 5.63$	87.83 ± 2.52	$119.29^{b} \pm 9.78$
400	154.32 ± 8.42	$944.41^{c} \pm 3.98$	88.34 ± 4.97	$114.45^{b} \pm 12.17$
600	158.30 ± 5.22	$1005.32^{ab} \pm 16.46$	86.06 ± 2.83	$154.08^{a} \pm 1.67$
800	159.44 ± 8.59	$1019.78^{a} \pm 10.40$	84.88 ± 4.19	$153.70^{a} \pm 1.64$
flubendiamide (negative control)	157.59 ± 8.23	$990.46^{b} \pm 7.13$	88.40 ± 4.44	$115.55^{b} \pm 11.48$
distilled water (positive control)	150.29 ± 7.20	$922.64^{d} \pm 5.54$	87.56 ± 4.90	$59.46^{c} \pm 10.58$
P-value	0.51	>0001	0.78	>0001

POD: peroxidase; PPO: polyphenol oxidase; SOD: superoxide dismutase; CAT: catalase. Different letters in columns indicate significant differences at the 5% level.

جدول ۳- تغییرات میزان فنل کل (میلی‌گرم/صد گرم وزن تر گیاه) گوجه‌فرنگی تیمارشده با غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره تحت تنش ناشی از *T. absoluta*

Table 3. Changes in total phenol content (mg/100g wet plant weight) of the tomato treated with different concentrations of silver nanoparticles under stress caused by *T. absoluta.*

Silver nanoparticles (ppm)	Total phenol (mg/100g of wet weight)
200	$0.25^{bc} \pm 0.03$
400	$0.26^{bc} \pm 0.04$
600	$0.36^{ab} \pm 0.05$
800	$0.38^{a} \pm 0.08$
flubendiamide (negative control)	$0.29^{ab} \pm 0.06$
distilled water (positive control)	$0.17^{c} \pm 0.01$
P-value	>0001

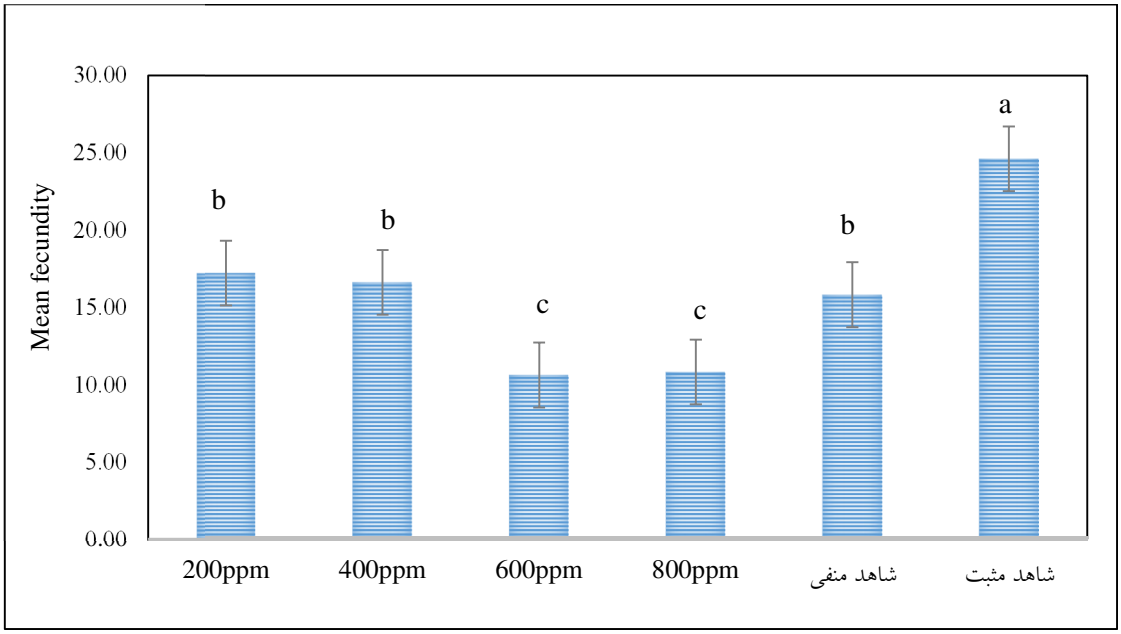
Different letters in columns indicate significant differences at the 5% level.

جدول ٤- تغییرات میزان کربوهیدرات کل (میلی‌گرم/صد گرم وزن تر گیاه) گوجه‌فرنگی تیمارشده با غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره تحت تنش ناشی از *T. absoluta*

Table 4. Changes in total carbohydrate content (mg/100 g wet plant weight) of the tomato treated with different concentrations of silver nanoparticles under stress caused by *T. absoluta.*

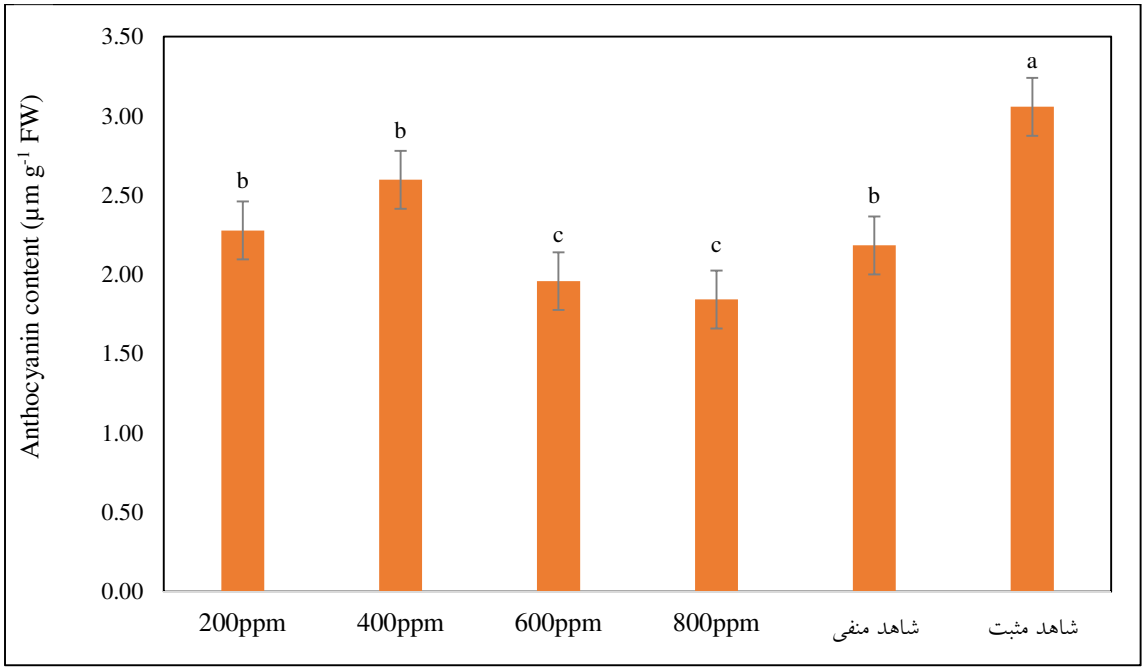
Silver nanoparticles (ppm)	Carbohydrate content (mg/100g of wet weight)
200	0.592 ± 0.08
400	0.562 ± 0.11
600	0.552 ± 0.11
800	0.524 ± 0.05
flubendiamide (negative control)	0.524 ± 0.02
distilled water (positive control)	0.592 ± 0.05
P-value	0.82

Different letters in columns indicate significant differences at the 5% level.



شکل ۲- میانگین تخمریزی *T. absoluta* روی گیاه گوجه‌فرنگی تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره (۲۰۰، ٤۰۰، ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm)، آب مقطر (شاهد مثبت) و فلوبندیامید (شاهد منفی). حروف غیرمشترک، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد.

Fig. 2. Mean fecundity of *T. absoluta* on tomato plants treated with different concentrations of silver nanoparticles (200, 400, 600 and 800 ppm), distilled water (positive control) and flubendiamide (negative control). Different letters above the columns indicate significant differences at the 5% level.



شکل ۳- میزان آنتوسیانین گیاه گوجه‌فرنگی تیمار شده با غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره (۲۰۰، ٤۰۰، ٦۰۰ و ۸۰۰ ppm)، آب مقطر (شاهد مثبت) و فلوبندیامید (شاهد منفی) تحت تنش ناشی از *T. absoluta*. حروف غیرمشترک، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد.

Fig. 3. Anthocyanin content of the tomato plant treated with different concentrations of silver nanoparticles (200, 400, 600 and 800 ppm), distilled water (positive control) and flubendiamide (negative control) under stress caused by *T. absoluta*. Different letters above the columns indicate significant differences at the 5% level.

بحث

نانوذرات نقره (AgNPs) مقاومت گیاه گوجه‌فرنگی به آسیب ناشی از شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی را افزایش داد. این افزایش مقاومت در غلظت‌های بالاتر نانوذره بیشتر برآورد شد. استفاده از نانوذرات روشی سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه است و می‌تواند به بهبود ویژگی‌های زیستی گیاه کمک کند (١٤). مطالعات متعددی که روی AgNPs انجام شده است طیف وسیعی از اثرات ضدباکتریایی، ضدقارچی و همچنین اثرات آفت‌کشی را نشان می‌دهند (١٥). اثرات آفت کشی AgNPs تحت تأثیر چندین متغیر از جمله اندازه ذرات، شکل، بار سطحی و غلظت می‌باشد (١٦). اندازه نانوذرات نقره مورد استفاده در این بررسی حدودا ٤٠ نانومتر برآورد شد. به‌طور کلی، نانوذرات با اندازه کوچک‌تر فعالیت حشره‌کشی بهتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر دارند؛ چرا که به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم، ظرفیت آن‌ها برای ورود به سلول‌های میزبان و تعامل با اجزای سلولی بهبود می‌یابد (١٧). نانوذرات نقره به عنوان کود-حشره‌کش‌هایی در نظر گرفته می‌شوند که به دلیل سیستم انتقال هوشمند جایگزینی امیدوارکننده برای کودها و حشره‌کش‌های شیمیایی خواهند بود. این ترکیبات به دلیل عدم تخریب در اثر تجزیه نوری، هیدرولیز و شستشو می‌توانند استفاده از کودهای شیمیایی را به حداقل برسانند و رشد و عملکرد محصول را افزایش دهند (١٨). در بررسی حاضر، استفاده از نانوذرات نقره به کاهش میزان تخم-ریزی *T. absoluta* انجامید و مرگ‌ومیر تخم‌ها و لاروها

را تا بیش از ٤۰ درصد افزایش داد. این اثرات با افزایش غلظت نانوذرات افزایش پیدا کرد و به بیش از ٦۰ درصد رسید. همراستا با مطالعه حاضر، اثر نانوذرات مختلف مانند نانوذرات سیلیس بر روی *T. absoluta*، بررسی و کاهش تخم‌ریزی این شب‌پره در گوجه‌فرنگی گزارش شده بود (۱۹). Ahmed و همکاران همچنین، کاهش ۸۸ تا بیش از ۹٦ درصدی جمعیت لاروهای تیمار شده *Spodoptera littoralis* با نانوذرات MgAg طی ۱۰ تا ۱۵ روز پس از تیمار را نشان دادند (۱۵). مطالعات میکروسکوپی الکترونی نشان داده است که نانوذرات نقره به راحتی به گیاه، سلول حشرات، هسته یا میتوکندری نفوذ می‌کنند (۲۰). بنابراین، ترکیبات نانوذرات نقره می‌توانند به اسکلت بیرونی آفت جوان نفوذ کنند و سپس به آنزیم‌های سلولی و DNA در فضای داخل سلولی متصل شوند و در نهایت باعث از دست رفتن کارایی و مرگ سلولی شود (۲۱). نانوذرات نقره تجمع برخی مواد شیمیایی گیاهی مانند فنل‌ها و فلاونوئیدها که خواص حشره‌کشی دارند را افزایش می‌دهند؛ با کنترل سنتز هورمون‌های مرتبط با استرس، تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاه و تأثیرگذاری بر بیان ژن‌های پاسخ‌دهنده به استرس در برابر حضور آفات، توانایی گیاهان را برای مقاومت در برابر استرس افزایش می‌دهند (۲۲)؛ و با داشتن نسبت سطح به حجم بالا، واکنش‌پذیری بالا و توانایی برهم‌کنش با اجزای سلولی، آسیب‌های ناشی از استرس اکسیداتیو را کاهش می‌دهند (۲۳). در مطالعه حاضر نانوذرات نقره استفاده شده بر روی گیاه گوجه‌فرنگی در تمامی غلظت‌های مورد مطالعه منجر به افزایش فنل شد. برخلاف نتایج پیش رو، در مطالعه‌ای که توسط Tymoszuk انجام شد، گوجه‌فرنگی‌های تیمار شده با ۱۰۰ میلی‌گرم/لیتر نانوذرات نقره، پلی‌فنل کمتری تولید کردند (۲٤). ممکن است این موضوع به دلیل تفاوت در غلظت مورد استفاده باشد. بعلاوه، ژنوتیپ گیاه، سن گیاه، فاصله زمانی بین تیمار با نانوذرات و عملکرد بیوشیمیایی گیاه و روش تیمار با نانوذرات نقره می‌تواند در نتایج تأثیر داشته باشد. از سوی دیگر، در این مطالعه، بین تمامی غلظت‌های مختلف AgNPs استفاده شده بر روی گیاه گوجه‌فرنگی با گروه شاهد از نظر میزان کربوهیدرات اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. کربوهیدرات‌ها از انواع ترکیباتی هستند که از نظر شیمیایی پلی‌فنل‌آلدئید یا پلی‌هیدروکسی‌کتون نامیده می‌شوند و برخلاف فنل-ها ممکن است باعث افزایش حساسیت گیاه به آفات شوند (۲۵). در واقع، وجود ترکیبات قندی می‌تواند به عنوان یک محرک تغذیه‌ای برای انواعی از آفات روی برگ، میوه و شاخه عمل کند (۲٦). در این بررسی، تحت تأثیر نانوذرات نقره، میزان فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز گیاه گوجه‌فرنگی افزایش پیدا کرد. اگرچه تغییر معنی‌داری در دو آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز و کاتالاز مشاهده نشد. نانوذرات نقره منجر به فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شود و بدین ترتیب می‌توانند منجر به کاهش آسیب اکسیداتیو و بهبود تحمل گیاه به تنش شوند (۲۷). پراکسیدازها مجموعه‌ای بزرگ از آنزیم‌هایی هستند که با مصرف پراکسیدهیدروژن، اکسیداسیون سوبستراهای مختلف را به‌عنوان یک عامل اکسید کننده کاتالیز می‌کنند. واکنش کاتالیز شده به وسیله پراکسیدازها به طور عمده دهیدروژناسیون اکسیداتیو است. اما علاوه بر انتقال اکسیژن، تخریب پراکسید هیدروژن نیز انجام می‌شود (۲۸). پراکسیدازها در پاسخ به تنش‌های محیطی که منجر به افزایش رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود وارد عمل می‌شوند و با حذف این رادیکال‌های آزاد، مانع از ورود سلول به مسیر مرگ سلولی (آپوپتوز) می‌شوند. پراکسیدازها همچنین با تولید سدهای فیزیکی محکمی مانند لیگنین و سوبرین و گلیکوپروتئین‌های غنی از هیدروکسی‌پرولین از نفوذ رادیکال‌های آزاد جلوگیری می‌کنند (۲۹). بر اساس بررسی Ashraf و همکاران

تیمار گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از نانوذرات نقره موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز و فنیل آلانین آمونیالیاز شد که برای دفاع گیاه در پاسخ به حملات آفات بسیار مهم هستند (۳۰). همچنین، Ansari و همکاران نشان دادند که تیمار گیاه گوجه‌فرنگی با نانوذرات نقره باعث بهبود تحمل تنش در گیاهان شد که با فعالیت‌های بالاتر آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی مانند پراکسیداز (٦۰ درصد)، پلی‌فنل‌اکسیداز (٦۵ درصد)، فنیل‌آلانین آمونیالیاز (٦۵/۵ درصد)، سوپراکسیددیسموتاز (٦۵/۳ درصد)، کاتالاز (۵۳/۸ درصد) و آسکوربات پراکسیداز (۷۳ درصد) همراه بود (۳۱). آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز از دیگر آنزیم‌های سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی گیاهان هستند که در اثر استفاده از نانوذرات نقره فعالیت آنها در گیاهان افزایش می‌یابد تا ظرفیت گیاه را برای مقاومت در برابر استرس اکسیداتیو و حفظ هموستاز سلولی در شرایط استرس‌زا افزایش دهند. سوپراکسید دیسموتاز با تبدیل رادیکال‌های سوپراکسید به پراکسیدهیدروژن و اکسیژن مولکولی از گیاه در برابر استرس اکسیداتیو محافظت می‌کند (۳۲). بعلاوه، کاتالاز پراکسیدهیدروژن را به آب و اکسیژن تجزیه می-کند (۳۷). این آنزیم‌ها در مکانیسم دفاعی گیاه در برابر آفات و تنش‌های ناشی از پاتوژن‌ها بسیار مهم هستند. با حفظ تعادل گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش آسیب اکسیداتیو، سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز به گیاه کمک می‌کنند تا بر شرایط استرس غلبه کند و سلامت و بهره-وری کلی گیاه را بهبود بخشد. Tymoszuk نشان داد استفاده از نانوذرات نقره در گیاهان گوجه‌فرنگی منجر به تنظیم مثبت فعالیت‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز کاهش سطح آسیب اکسیداتیو و بهبود رشد گیاه در شرایط تنش بلایت زودرس (early blight) می‌شود (۲٤). بدین ترتیب، نانوذرات نقره می‌توانستند رشد، عملکرد و کیفیت محصول گوجه‌فرنگی را با افزایش سلامت کلی گیاه و محافظت از آن در برابر بیماری‌ها بهبود بخشند. آنتوسیانین‌ها به عنوان یک گروه از فلاونوئیدهای محلول در آب در یک نقطه پایانی در مسیر بیوسنتز فلاونوئیدها در سیتوپلاسم ساخته شده و به شکل فعال و جداگانه با پمپ گلوتاتیون به داخل واکوئل یاخته‌ها وارد می‌شوند (۳۵). در مطالعه حاضر کاهش آنتوسیانین در غلظت‌های ذکر شده می‌تواند به دلیل قرار گرفتن پیش ماده آنتوسیانین در مسیر دیگری از سنتز و یا کاهش میزان تنش اکسیداتیو توسط فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان باشد. Danaee و همکاران کاهش میزان آنتوسیانین در گل‌های ژربرا را با کاربرد پنج میلی‌گرم/لیتر نانو ذرات نقره به مدت ۲٤ ساعت گزارش کردند (۳٤). Tymoszuk نیز نشان داد نانوذرات نقره بر روی گوجه‌فرنگی به میزان ۱۰۰ میلی-گرم/لیتر، منجر به کاهش آنتوسیانین‌ها شدند (۲٤). برخلاف نتایج مطالعه حاضر، در تحقیق دیگری، کاربرد ۰/۵ و سه میلی‌گرم/لیتر نانوذرات نقره با ابعاد ۱۰ نانومتر روی گیاه *Arabidopsis thaliana* در محیط کشت موراشیگ و اسکوگ (MS)، پس از یک هفته ۲/۵۰ و پس از دو هفته ۲/۲۹ برابر نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد (۳٦). به عقیده این پژوهشگران، افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن در اثر تنش ناشی از نانوذرات نقره باعث افزایش آنتوسیانین شده بود. بدین ترتیب، گیاه گوجه‌فرنگی تحت تأثیر غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره به آسیب ناشی از شب‌پره مینوز گوجه‌فرنگی مقاومت پیدا کرد. این ویژگی تحمل آفت و افزایش مقاومت گیاه، در غلظت‌های بالاتر نانوذره بیشتر صورت گرفت. اگرچه به دلیل عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین دو غلظت بالای نانوذرات نقره، استفاده از غلظت ٦۰۰ ppm برای دست‌یابی به مقاوم‌سازی گیاه گوجه‌فرنگی کافی و به صرفه برآورد می‌شود. افزایش مقاومت گیاه تحت تأثیر نانوذرات نقره در نتیجه افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز و

همچنین افزایش میزان فنل و کاهش آنتوسیانین بود. در حالی‌که دو آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز و کاتالاز در القای مقاومت گیاه گوجه‌فرنگی نقشی نداشتند و مقدار کربوهیدرات کل نیز تغییر معنی‌داری در گیاهان تحت تیمار با نانوذرات نقره نشان نداد.

نتیجه‌گیری

بنابراین، استفاده از نانوذرات نقره علاوه بر این‌که می‌تواند روی مراحل نابالغ (تخم و لارو) این آفت اثر کشندگی داشته باشد، با بهبود سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه گوجه‌فرنگی می‌تواند مقاومت این گیاه را به آسیب ناشی از این آفت بهبود بخشد. از این رو کارایی مناسب نانوذرات نقره می‌تواند مقدمه‌ای برای بررسی‌های بیشتر این ترکیبات به عنوان یک کود-آفت‌کش هوشمند باشد تا در آینده به عنوان جایگزینی برای ترکیبات شیمیایی به کار رود یا میزان استفاده از چنین ترکیباتی در زراعت گوجه‌فرنگی را تا حد امکان کاهش دهد.

منابع

1. Ahmadi K, Ebadzadeh H, Hatami F, Ebadshah H, Kazemian A. Agricultural statistics, ministry of jihad agriculture, deputy of planning and economy. Bureau of Statistics and Information Technology. 2020; 97 p. [In Persian]

2. Toosi M. The relationship between production and export advantage in the global tomato market and Iran. Agric Econ. 2024;18(2):116-93. [In Persian]

3. Lange WH, Bronson L. Insect pests of tomatoes. Annu Rev Entomol. 1981;26:345-371.

4. Desneux N, Luna MG, Guillemaud T, Urbaneja A. The invasive South American tomato pinworm, *Tuta absoluta*, continues to spread in Afro-Eurasia and beyond: the new threat to tomato world production. J Pest Sci. 2011;84:403-408.

5. Krechemer FS, Foerster LA. Influence of biotic and abiotic factors on the population fluctuation of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) in an organic tomato farming. Int J Trop Insect Sci. 2019; 40(1):199-208.

6. Gabarra R, Arnó J, Lara L, Verdú MJ, Ribes A, Beitia F, et al. Native parasitoids associated with *Tuta absoluta* in the tomato production areas of the Spanish Mediterranean Coast. BioControl. 2014;59: 45-54.

7. Campos MR, Biondi A, Adiga A, Guedes RNC, Desneux N. From theWestern Palaeartic region to beyond: *Tuta absoluta* 10 years after invading Europe. Pest Manag Sci. 2017;90:787-796

8. Baniameri V, Cheraghian A. The first report and control strategies of *Tuta absoluta* in Iran. EPPO Bulletin, 2012;42:322-324.

9. Cocco A, Deliperi S, Delrio G. Control of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) in greenhouse tomato crops using the mating disruption technique. J Appl Entomol. 2013;137:16-28.

10. Zappala L, Biondi A, Alma A, ALJboory IJ, Arno J, Bayram A, et al. Natural enemies of the South American moth, *Tuta absoluta* in Europe, North Africa and Middle East and their potential use in pest control strategies. J Pest Sci. 2013;86: 635-647.

11. Martínez-Cisterna D, Rubilar O, Tortella G, Chen L, Chacón-Fuentes M, Lizama M, et al. Silver nanoparticles as a potent nanopesticide: toxic effects and action mechanisms on pest insects of agricultural importance- A review. Molecules. 2024;29(23):5520.

12. Sadigh-Eteghad S, Shahi S, Mahmoudi J, Farjami A, Bazmani A, Naghili B, et al. Application of nanobased drug loading systems in the treatment of neurological infections: An updated Review. Curr Pharm Des. 2022;28:2330-2342.

13. Achari G, Kowshik M. Recent developments on nanotechnology in agriculture: plant mineral nutrition, health, and interactions with soil microflora. J Agric Food Chem. 2018;66:8647-8661.

towards an integrative approach? Environ Sci Pollut Res Int. 2015;22:20067-20083.

22. Zhao L, Bai T, Wei H, Gardea-Torresdey JL, Keller A, White JC. Nanobiotechnology-based strategies for enhanced crop stress resilience. Nat Food. 2022;3(10):829-836.

23. Flores-López LZ, Espinoza-Gómez H, Somanathan R. Silver nanoparticles: Electron transfer, reactive oxygen species, oxidative stress, beneficial and toxicological effects. Mini review. J Appl Toxicol. 2019; 39(1):16-26.

24. Tymoszuk A. Silver nanoparticles effects on in vitro germination, growth, and biochemical activity of tomato, radish, and kale seedlings. Materials. 2021;14(18): 5340.

25. Sadasivam S, Manickam A. Biochemical methods. New Age International Private Limited, 2022; 254 pp.

26. Shi A, Tomczyk A. Impact of feeding of eriophyid mite *Epitrimerus gibbosus* (Nalepa)(Acari: Eriophyoidea) on some biochemical components of blackberry (*Rubus* spp.). Bull Acad Polon Sci Ser Sci Biol. 2001;49(1):41-47.

27. Moazzami Farida, SH, Karamian R, Albrectsen BR. Silver nanoparticle pollutants activate oxidative stress responses and rosmarinic acid accumulation in sage. Physiol Plant. 2020;170(3):415-432.

28. Valderrama B, Ayala M, Vasques-Duhalt R. Suicide inactivation of peroxidase and the challenge of engineering more robust enzymes. Chem Biol. 2002;9:555-565.

29. Bowles PJ. Defense – related proteins in higher plants. Annu Rev Biochem. 1990;59:873-907.

30. Ashraf H, Batool T, Anjum T, Illyas A, Li G, Naseem S, et al. Antifungal potential of green synthesized magnetite nanoparticles black coffee–magnetite nanoparticles against wilt infection by ameliorating enzymatic activity and gene expression in *Solanum lycopersicum* L. Front Microbiol. 2022;13:754292.

14. Naganthran A, Verasoundarapandian G, Khalid FE, Masarudin MJ, Zulkharnain A, Nawawi NM, et al. Synthesis, characterization and biomedical application of silver nanoparticles. Materials. 2022; 15(2):427.

15. Ahmed SS, Abd El-Rahman SF, Abdel Kader MH. Field evaluation of some photosensitizers and nanocomposites against cotton leaf worm, *Spodoptera littoralis* (Bois.) (Lepidoptera: Noctuidae). Middle East J Appl Sci. 2018;8(4):1471-1479.

16. Paul A, Roychoudhury A. Go green to protect plants: repurposing the antimicrobial activity of biosynthesized silver nanoparticles to combat phytopathogens. Nanotechnol Environ Eng. 2021;6(1):10.

17. Bruna T, Maldonado-Bravo F, Jara P, Caro N. Silver nanoparticles and their antibacterial applications. International Int. J Mol Sci. 2021; 22(13):7202.

18. Arnott A, Galagedara L, Thomas R, Cheema M, Sobze JM. The potential of rock dust nanoparticles to improve seed germination and seedling vigor of native species: A review. Sci Total Environ. 2021; 775:145139.

19. Abouelkassem S, El-Borady OM, Mohamed M.B. Towards using of new and safety nanomaterials against tomato leafminer, *Tuta absoluta* (Mayrick) in tomato under field conditions. J Nanomed Nanotechnol. 2017;8:13-14.

20. Nalini M, Lena M, Sumathi P, Sundaravadivelan C. Effect of phytosynthesized silver nanoparticles on developmental stages of malaria vector, Anopheles stephensi and dengue vector, Aedes aegypti. Egypt J Basic Appl Sci. 2017;4(3):212-218.

21. Subramaniam J, Murugan K, Panneerselvam C, Kovendan K, Madhiyazhagan P, Kumar PM, et al. Eco-friendly control of malaria and arbovirus vectors using the mosquitofish Gambusia affinis and ultra-low dosages of Mimusops elengi-synthesized silver nanoparticles:

31. Ansari M, Ahmed S, Abbasi A, Hamad N.A., Ali H.M., Khan M.T., et al. Green synthesized silver nanoparticles: a novel approach for the enhanced growth and yield of tomato against early blight disease. Microorganisms. 2023;11(4):886.

32. Azeez L, Adebisi SA, Adetoro RO, Oyedeji AO, Agbaje WB, Olabode OA. Foliar application of silver nanoparticles differentially intervenes remediation statuses and oxidative stress indicators in Abelmoschus esculentus planted on gold-mined soil. Int J Phytoremediation. 2022; 24(4):384-393.

33. Conesa A, Punt PJ, Van den Honder AMJJ. Fungal peoxidases: Molecular aspects and applications. J Biotechnol. 2002;93:143-158.

34. Danaee E, Naderi R, Kalatejari S. salicylic acid and benzyladenine on enzymic activities and longevity of gerbera cut Moghadam ARL. Evaluation the effect flowers. Int Res J Appl Basic Sci. 2013;7(5):304-308.

35. Marrs KA, Alfenito MR, Lloyd, AM, Walbot V. A glutathione S-transferase involved in vacuolar transfer encoded by the maize gene Bronze-2. Nature. 1995; 375(6530):397-400.

36. Qian H, Peng X, Han X, Ren J, Sun L, Fu Z. Comparison of the toxicity of silver nanoparticles and silver ions on the growth of terrestrial plant model Arabidopsis thaliana. J Environ Sci. 2013;25(9):1947-1956.

37. Smirnoff N, Arnaud D. Hydrogen peroxide metabolism and functions in plants. New Phytol. 2019;221(3):1197-1214.