

پاسخ آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (CAT و SOD) و ظرفیت اکسیداتیو کل (TOS) گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum L.*) به تیمار نانوذرات اکسید روی

منا رئیسی^{۱*}، علی اکبر قطبی راوندی^۲

۱- عنوان و رایانامه نویسنده اول (پاسخ آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (CAT و SOD) و ظرفیت اکسیداتیو کل (TOS)

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum L.*) به تیمار نانوذرات اکسید روی) (raeisimona1@gmail.com)

۲- عنوان و رایانامه نویسنده دوم (پاسخ آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (CAT و SOD) و ظرفیت اکسیداتیو کل (TOS)

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum L.*) به تیمار نانوذرات اکسید روی) (a_ghotbi@sbu.ac.ir)

خلاصه

کاربرد فناوری نانو در کشاورزی به‌عنوان رویکردی نوین برای ارتقای بهره‌وری و مقاومت گیاهان در برابر تنش‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این مطالعه اثر نانوذرات اکسید روی (ZnO-NPs) بر شاخص‌های بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum L.*) بررسی شد. نانوذرات با روش سنتز شیمیایی تهیه و پس از تأیید ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌صورت محلول‌پاشی برگ‌ی بر گیاهان چهاربرگی اعمال گردید. نمونه‌برداری از برگ‌ها در بازه‌های زمانی ۲۴ و ۹۶ ساعت انجام و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز (CAT) و همچنین ظرفیت اکسیداتیو کل (TOS) سنجیده شد. نتایج آنالیز واریانس نشان داد تیمار ZnO-NPs تأثیر معنی‌داری بر افزایش فعالیت CAT و SOD و همچنین بر سطح TOS داشت ($p < 0.01$). در تیمار High ZnO بیشترین افزایش فعالیت آنزیم‌ها مشاهده گردید که بیانگر تحریک سیستم دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از نانوذرات بود. در مقابل، مقایسه زمان‌ها نشان داد که پاسخ گیاه به‌ویژه در فعالیت CAT وابسته به بازه زمانی است. یافته‌های این پژوهش بیانگر نقش دوگانه ZnO-NPs در تحریک سیستم دفاعی و القای استرس اکسیداتیو بوده و می‌تواند در توسعه راهبردهای ایمن و مؤثر برای استفاده از نانومواد در کشاورزی پایدار کاربرد داشته باشد.

کلمات کلیدی: نانوذرات اکسید روی، گوجه‌فرنگی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، استرس اکسیداتیو، کشاورزی پایدار

۱. مقدمه

امروزه کشاورزی به عنوان یکی از ارکان اصلی تأمین امنیت غذایی بشر، با چالش‌های متعددی مواجه است. رشد سریع جمعیت جهانی، تغییرات اقلیمی، محدودیت منابع آب و خاک، کاهش کارایی کودهای شیمیایی و افزایش مقاومت آفات نسبت به آفت‌کش‌های رایج، سبب شده است که استفاده از رویکردهای نوین و پایدار در مدیریت تولیدات زراعی به یک ضرورت تبدیل شود. در چنین شرایطی، توجه به فناوری‌های نوظهور نظیر نانوفناوری می‌تواند بستر مناسبی برای ارتقای کارایی سیستم‌های زراعی فراهم آورد.[1]

نانوفناوری علمی میان‌رشته‌ای است که به مطالعه و کاربرد مواد در ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌پردازد. در این مقیاس، مواد دارای خواص جدیدی از جمله نسبت سطح به حجم بالا، واکنش‌پذیری بیشتر، و توانایی تعامل ویژه با سامانه‌های زیستی هستند. این ویژگی‌ها فرصت‌های نوینی را برای بهبود رشد گیاهان، افزایش بهره‌وری نهاده‌ها، و ارتقای مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی فراهم می‌سازند. نانومواد می‌توانند به عنوان حامل‌های هوشمند کودها، آفت‌کش‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد عمل کنند و با رهايش کنترل‌شده ترکیبات فعال، ضمن کاهش مصرف نهاده‌ها، آسیب‌های زیست‌محیطی را نیز کاهش دهند.[2]

از میان نانومواد، نانوذرات فلزی به‌ویژه نانوذرات اکسیدروی (ZnO NPs) جایگاه ویژه‌ای در تحقیقات کشاورزی یافته‌اند. عنصر روی یکی از ریزمغذی‌های حیاتی برای گیاه است که در بیش از ۳۰۰ آنزیم نقش کوفاکتوری دارد. روی در فرآیندهایی مانند سنتز پروتئین، تثبیت غشاها، تنظیم رشد و توسعه ریشه، فتوسنتز، و تعدیل پاسخ گیاه به تنش نقش کلیدی ایفا می‌کند. کمبود روی در خاک‌ها، که در بسیاری از مناطق کشاورزی جهان به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه شایع است، سبب کاهش عملکرد و کیفیت محصولات می‌شود. کاربرد ZnO NPs می‌تواند با افزایش قابلیت جذب و فراهمی زیستی روی، این مشکل را برطرف سازد.[3]

گیاهان در طول چرخه زندگی خود همواره در معرض تنش‌های غیرزیستی از جمله خشکی، شوری، گرما و سرما قرار دارند. این تنش‌ها با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) همراه هستند که اگر کنترل نشوند، منجر به تخریب پروتئین‌ها، لیپیدها، اسیدهای نوکلئیک و غشاهای سلولی می‌شوند. گیاهان برای مقابله با این وضعیت، سامانه‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی شامل آنزیم‌هایی مانند کاتالاز (CAT)، سوپراکسیددیسموتاز (SOD) و آسکوربات پراکسیداز (APX) را به کار می‌گیرند. نانوذرات ZnO در غلظت‌های پایین می‌توانند این سامانه را تحریک کنند و به عنوان عاملی محافظتی عمل نمایند، در حالی که غلظت‌های بالا ممکن است منجر به تشدید استرس اکسیداتیو و بروز سمیت شوند.[4]

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) یکی از محصولات زراعی مهم در جهان و ایران است که علاوه بر اهمیت غذایی و اقتصادی، به دلیل داشتن ژنوم توالی‌یابی‌شده و حساسیت بالا به تنش‌های محیطی، به عنوان یک گیاه مدل در تحقیقات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی شناخته می‌شود. بررسی اثرات ZnO NPs بر گوجه‌فرنگی می‌تواند درک ما را از تعامل نانومواد با سیستم‌های زیستی گیاه افزایش دهد و راهکارهای کاربردی برای بهبود مدیریت تغذیه و مقاومت گیاهان فراهم آورد.[5]

با وجود مطالعات متعدد در زمینه کاربرد نانوذرات در کشاورزی، هنوز ابهامات زیادی در خصوص ایمنی، دوز مناسب، و مکانیسم‌های مولکولی دخیل در اثرگذاری آن‌ها وجود دارد. پژوهش حاضر با تمرکز بر شاخص‌های بیوشیمیایی (SOD، CAT، MDA، TOS)، تلاش دارد تصویری جامع از اثرات ZnO NPs بر گیاه گوجه‌فرنگی ارائه دهد. نتایج این تحقیق می‌تواند در تعیین راهبردهای کاربردی برای استفاده ایمن و مؤثر از نانومواد در کشاورزی پایدار مؤثر باشد.

۲. مواد و روش

۲-۱. آماده سازی نانوذرات اکسیدروی

برای تهیه نانوذرات اکسید روی، ۱ گرم دی هیدروکسید روی در ۳۰۰ میلی لیتر آب مقطر حل می شود. سپس ۵۰ میلی لیتر محلول NaOH با غلظت ۸ درصد به آرامی زیر جو نیتروژن و در حمام روغن با دمای ۲۷۰ درجه سانتی گراد به صورت تیتراسیون با سرعت ۵ میلی لیتر در دقیقه به آن اضافه شد. در حین افزوده شدن محلول قلیایی، نمونه هم زده می شود. بعد از گذشت ۸ ساعت، یک رسوب سفید رنگ به دست می آید. این رسوب سه بار با آب مقطر شسته می شود و دوباره در آب حل می شود. این محلول در مرحله بعد در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۸ ساعت نگهداری می شود. محلول نهایی سه بار با متانول و سه بار با آب مقطر شسته شده و در هر مرحله با سانتریفیوژ ۲۰۰۰۰ دور به مدت ۱۵ دقیقه جداسازی می شود. سپس پودرهای نانوذره اکسید روی بدست آمده با استفاده از فریز درای خشک و ذخیره می شوند. کیفیت و خلوص نانوذرات با آزمون های متنوعی تایید شد. نتایج این آزمون ها نشان داد که نانوذرات دارای اندازه متوسط کمتر از ۵۰ نانومتر، توزیع یکنواخت و ساختار بلوری پایدار بودند. همچنین پتانسیل زتای منفی آن ها بیانگر پایداری کلوئیدی در محیط آبی بود. [6]

۲-۲. تهیه سوسپانسیون نانوذرات

برای اعمال تیمار به گیاهان، ابتدا سوسپانسیون های آبی ZnO NPs با غلظت های ۵۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر تهیه شد. به منظور جلوگیری از تجمع ذرات و حفظ یکنواختی محلول، سوسپانسیون ها با استفاده از دستگاه فراصوت (Ultrasonicator) به مدت ۳۰ دقیقه پراکنده گردیدند. محلول های تازه تهیه شده بلافاصله برای تیمار گیاهان به کار رفتند تا احتمال تغییر در ویژگی های فیزیکی و شیمیایی نانوذرات به حداقل برسد.

۲-۳. آماده سازی و کشت گیاهان

بذرهای گوجه فرنگی رقم حساس، ابتدا با محلول هیپوکلریت سدیم ۵٪ به مدت ۱۰ دقیقه ضد عفونی و سپس چندین بار با آب مقطر شسته شدند. بذر ها در ظروف حاوی محیط کشت استریل و خاک مناسب (ترکیبی از پرلایت و کوکوپیت) قرار داده شدند. شرایط رشد شامل دمای 25 ± 2 درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی ۶۰٪ و چرخه نوری ۱۶ ساعت روشنائی/۸ ساعت تاریکی بود. آبیاری گیاهان با آب مقطر استریل انجام شد تا اثر سایر املاح معدنی بر نتایج حذف گردد.

۲-۴. اعمال تیمار نانوذرات

گیاهان در مرحله چهار برگی به دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر ZnO NPs تیمار شدند. تیمارها به صورت محلول پاشی برگی انجام گرفت و پس از ۲۴ و ۹۶ ساعت نمونه برداری از برگ ها صورت گرفت. گروه شاهد نیز تنها با آب مقطر استریل تیمار شد.

۲-۵. نمونه برداری و آماده سازی

نمونه های برگ از قسمت های میانی گیاه برداشت و بلافاصله در نیتروژن مایع منجمد شدند. نمونه ها برای سنجش های بیوشیمیایی در دمای -80°C نگهداری شدند.

۲-۶. سنجش های بیوشیمیایی

آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، با استفاده از روش رنگ سنجی نیترو بلو تترازولیوم (NBT) اندازه گیری شد. اساس این روش، مهار واکنش احیای NBT توسط سوپراکسید رادیکال ($\text{O}_2^{\cdot-}$) است. در این واکنش، ریبوفلاوین تحت نور، سوپراکسید رادیکال تولید می کند که NBT را به فرمازان آبی تبدیل می کند. لازم به ذکر است فعالیت SOD بر اساس میزان مهار تشکیل فرمازان آبی (محصول احیای NBT) محاسبه شد [7].

$$\text{فعالیت SOD} = \frac{A_{\text{نمونه}} - A_{\text{کنترل}}}{A_{\text{کنترل}}} \times \frac{100}{\text{حجم عصاره (mL)}} \times \text{وقت} \quad (1)$$

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) با استفاده از روش اسپکتروفتومتری ارزیابی کاهش جذب پراکسید هیدروژن (H_2O_2) در طول موج ۲۴۰ نانومتر، به صورت کینتیک (Aebi, 1984)، اندازه گیری شد. و با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود [8].

$$\text{فعالیت کاتالاز (واحد/میلی گرم پروتئین)} = \frac{1}{\text{غلظت پروتئین (mg/mL)}} \times \frac{V_{\text{نمونه}}}{V_{\text{کنترل}}} \times \frac{\Delta A_{240}/\text{min}}{\epsilon \times l} \quad (2)$$

ظرفیت اکسیداتیو کل (TOS) در عصاره های گیاهی با استفاده از روش فروس اکسیداسیون-زایلنول اورنج (FOX) اندازه گیری شد. اساس این روش، اکسیداسیون یون فروس (Fe^{2+}) به فریک (Fe^{3+}) توسط پراکسیدها و تشکیل کمپلکس رنگی با زایلنول اورنج است. این کمپلکس ارغوانی رنگ، جذب نوری در طول موج 580 nm دارد که میزان آن با غلظت اکسیدان های موجود در نمونه نسبت مستقیم دارد. نتایج با استفاده از پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به عنوان استاندارد، کالیبره شده و به صورت $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ Eq/gr}$ بافت بیان گردید [9].

۳. نتایج و بحث

نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) نشان دهنده معنی داری تأثیر تیمار با نانوذرات اکسید روی بر پاسخ های بیوشیمیایی گیاه است. تأثیر تیمار بر فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز (CAT)، و همچنین ظرفیت اکسیداتیو کل (TOS) از نظر آماری در سطح $p < 0.01$ بسیار معنی دار بوده است. در مورد تأثیر زمان، نتایج نشان می دهد که این عامل فقط بر فعالیت کاتالاز در سطح $p < 0.05$ معنی دار بوده است. در مقابل، تأثیر زمان بر TOS و فعالیت SOD از نظر آماری معنی دار نیست. همچنین، نتایج مربوط به اثر متقابل زمان و تیمار نیز نشان می دهد که این اثر فقط بر متغیر CAT از نظر آماری در سطح $p < 0.05$ معنی دار بوده است.



www.bc.bcnf.ir

9th National Conference on
Innovation and Technology
in Biology and Chemistry
of I R A N

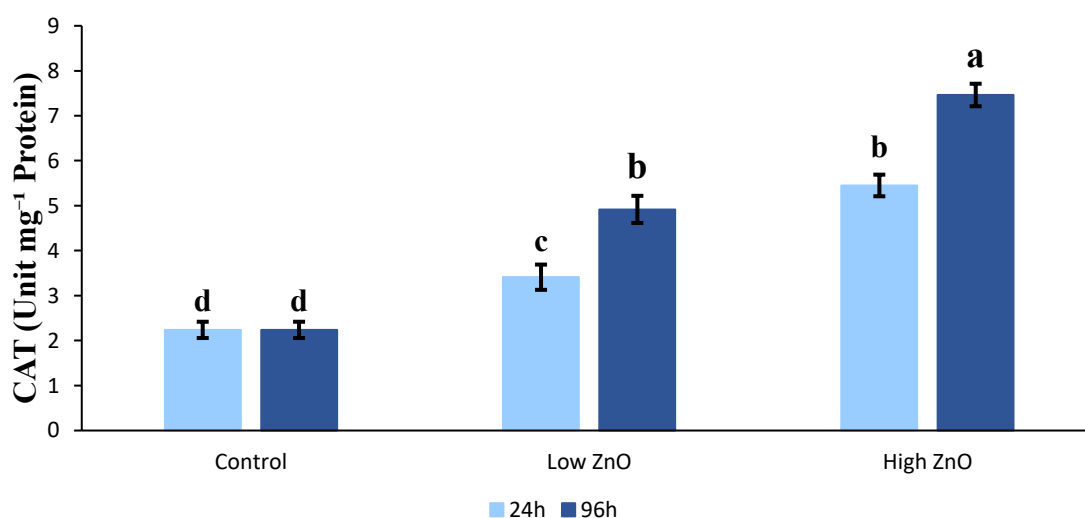
نهمین کنفرانس ملی
نوآوری و فناوری
علوم زیستی و
شیمی ایران

جدول ۱. تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی اندازه گیری شده در برگ گیاه گوجه فرنگی

منابع تغییرات	درجه آزادی	TOS	فعالیت کاتالاز	فعالیت سوپراکسید دیسموتاز
تیمار	5	**2343.961	**0.529	**296.068
زمان	1	15.18	*0.074	12.845
زمان*تیمار	2	0.512	*0.019	0.973
خطا	24	35.558	0.004	8.344

براساس نتایج فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)، به طور معنی داری تحت تأثیر تیمار با نانوذرات اکسید روی قرار گرفته است. در زمان ۲۴ ساعت پس از تیمار، فعالیت CAT در تیمار Low ZnO با نمونه کنترل تفاوت معنی داری داشت. این میزان در تیمار High ZnO حدود به طور معنی داری بالاتر از هر دو تیمار Low ZnO و نمونه کنترل بود. در زمان ۹۶ ساعت نیز، فعالیت CAT در تیمار High ZnO به بالاترین میزان خود رسید و با تمام تیمارهای دیگر اختلاف معنی داری داشت.

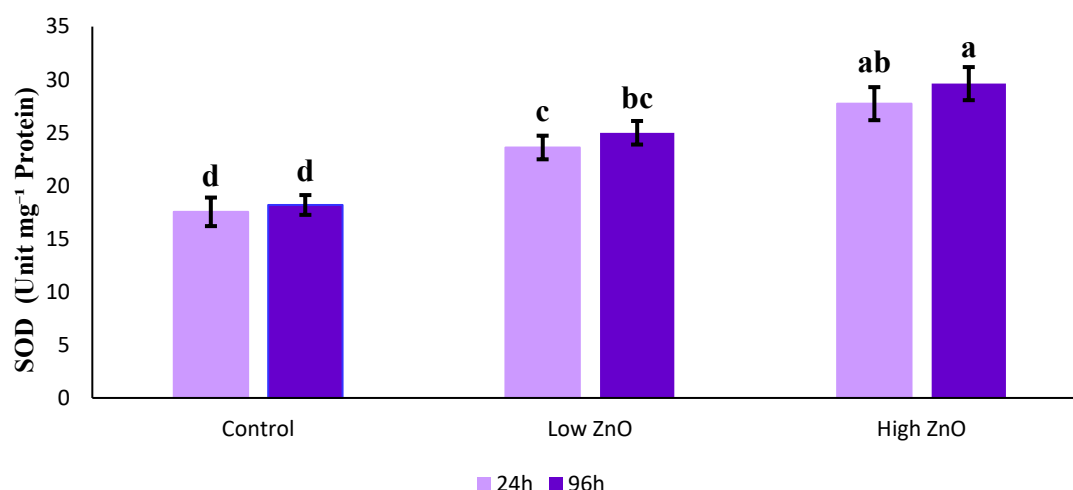
کاتالاز یکی از آنزیم های کلیدی سیستم دفاع آنتی اکسیدانی در گیاهان است که با تجزیه هیدروژن پراکسید به آب و اکسیژن، از آسیب سلولی جلوگیری می کند. افزایش H_2O_2 در اثر تیمار با نانوذرات اکسیدروی می تواند سبب تحریک تولید این آنزیم شود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تغییرات فعالیت CAT وابسته به غلظت و زمان بوده و با افزایش دوز و طول مدت تماس، سطح فعالیت آنزیم به طور معنی داری افزایش یافت. در تیمار دوز پایین، افزایش ملایم تر اما در زمان ۹۶ ساعت معنی دار مشاهده شد که بیانگر اثر تجمعی تماس طولانی مدت با نانوذرات است. در مقابل، در نمونه شاهد فعالیت آنزیم تقریباً ثابت ماند. یافته های ما با گزارش احمد و همکاران (۲۰۲۵) همسو است که افزایش فعالیت و بیان ژنی کاتالاز در پاسخ به محلول پاشی ZnO-NPs در گوجه فرنگی را به عنوان سازوکار حفاظتی گیاه معرفی کرده اند [10].



شکل ۱. تأثیر نانوذرات اکسید روی در غلظت های پایین (Low ZnO) و بالا (High ZnO) بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) در برگ های گوجه فرنگی در مقایسه با نمونه کنترل، در زمان های ۲۴ و ۹۶ ساعت پس از تیمار. ستون های با حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف آماری معنی دار در سطح $p < 0.05$ هستند.

به طور معنی داری تحت تأثیر تیمار با نانوذرات اکسید روی قرار گرفته است. در زمان ۲۴ ساعت پس از تیمار، فعالیت SOD در تیمار Low Zn با نمونه کنترل تفاوت معنی داری داشت. این میزان در تیمار High ZnO نیز به طور معنی داری از هر دو تیمار Low ZnO و نمونه کنترل بالاتر بود. در زمان ۹۶ ساعت نیز، فعالیت SOD در تیمار High ZnO به بالاترین میزان خود رسید و با تمام تیمارهای دیگر اختلاف معنی داری داشت. همچنین، در هر دو تیمار Low ZnO و High ZnO، فعالیت SOD در زمان ۹۶ ساعت نسبت به ۲۴ ساعت، افزایش معنی داری را نشان می دهد. این در حالی است که در نمونه کنترل، فعالیت این آنزیم در زمان ۹۶ ساعت نسبت به ۲۴ ساعت تغییر معنی داری نداشته است.

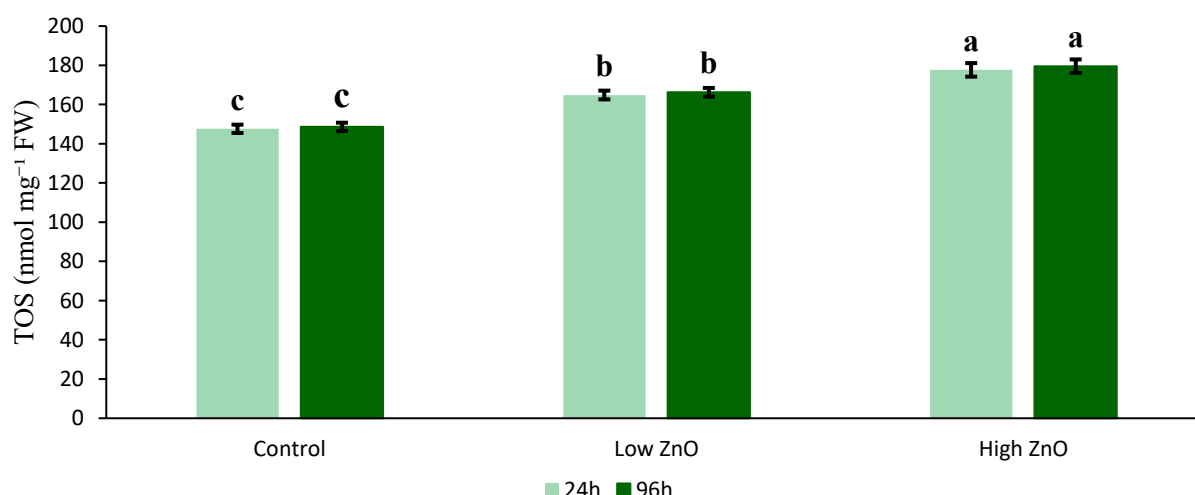
افزایش فعالیت آنزیم SOD به عنوان نخستین خط دفاعی سیستم آنتی اکسیدانی گیاهان نشان دهنده پاسخ سازشی در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از تیمار با ZnO-NPs است. این آنزیم با تبدیل رادیکال های سوپراکسید به H_2O_2 زمینه بی خطر سازی آن را توسط آنزیم هایی مانند CAT و APX فراهم می کند. در پژوهش حاضر، افزایش معنی دار فعالیت SOD در تیمارهای ZnO-NPs نسبت به شاهد، بیانگر تولید بیشتر ROS و تحریک سازوکارهای دفاعی بود، در حالی که در نمونه کنترل سطح فعالیت آنزیم ثابت ماند. این نتایج با گزارش احمد و همکاران (۲۰۲۵) و قوش و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد که نقش Zn^{2+} را به عنوان کوفاکتور SOD و اثر ZnO-NPs در افزایش فعالیت این آنزیم و مقاومت گیاه تأیید کرده اند [11].



شکل ۲. تأثیر نانوذرات اکسید روی در غلظت های پایین و بالا بر میزان فعالیت آنزیم کسوپراکسید دیسموتاز در برگ های گوجه فرنگی در مقایسه با نمونه کنترل، در زمان های ۲۴ و ۹۶ ساعت پس از تیمار. ستون های با حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف آماری معنی دار در سطح $p < 0.05$ هستند.

میزان ظرفیت اکسیداتیو کل (TOS) در برگ‌های گوجه‌فرنگی به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار با نانوذرات اکسید روی قرار گرفته است. در زمان ۲۴ ساعت پس از تیمار، میزان TOS در تیمار High ZnO (حدود ۱۷۸ نانومول بر میلی گرم وزن تر) حدود ۲۳.۶٪ بیشتر از نمونه کنترل (حدود ۱۴۴ نانومول بر میلی گرم وزن تر) بوده و این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار است. در همین زمان، میزان TOS در تیمار Low ZnO (حدود ۱۶۴ نانومول بر میلی گرم وزن تر) نیز به طور معنی‌داری از نمونه کنترل بالاتر بود، که نشان‌دهنده شروع استرس اکسیداتیو در این غلظت است. با این حال، تفاوت بین تیمار Low ZnO و High ZnO در هر دو زمان ۲۴ و ۹۶ ساعت معنی‌دار است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که در هیچ یک از تیمارها کنترل، Low ZnO و High ZnO، تفاوت معنی‌داری بین زمان ۲۴ و ۹۶ ساعت وجود ندارد.

افزایش TOS به عنوان شاخص مهم استرس اکسیداتیو در گیاهان ناشی از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) است که در صورت برهم خوردن تعادل با سیستم‌های دفاعی، به غشاهای پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک آسیب می‌زنند. در این پژوهش نیز افزایش معنی‌دار TOS در تیمارهای ZnO-NPs نسبت به شاهد مشاهده شد که بیانگر بروز استرس اکسیداتیو پایدار در گیاه بود. نتایج با مطالعات اوجوومی و همکاران (۲۰۲۵) و خان و همکاران (۲۰۲۵) همسو است که افزایش MDA، H_2O_2 و اختلال در هموستاز ROS را در اثر کاربرد ZnO-NPs در گوجه‌فرنگی گزارش کردند. همچنین، عدم تفاوت معنی‌دار بین دو زمان ۲۴ و ۹۶ ساعت نشان داد که آسیب اکسیداتیو ناشی از ZnO-NPs در این بازه زمانی پایدار بوده و سیستم دفاعی گیاه قادر به بازگرداندن تعادل اکسیداتیو نبوده است؛ یافته‌ای که با گزارش هارون و همکاران (۲۰۲۴) در گیاهان خانواده سولاناسه مطابقت دارد [12].



شکل ۳. تأثیر نانوذرات اکسید روی در غلظت‌های پایین (Low ZnO) و بالا (High ZnO) بر میزان ظرفیت اکسیداتیو کل (TOS) در برگ‌های گوجه‌فرنگی در مقایسه با نمونه کنترل (Control) در زمان‌های ۲۴ و ۹۶ ساعت پس از تیمار. حروف مشابه بر روی نمودار، بیانگر عدم وجود اختلاف آماری معنی‌دار در سطح $p < 0.05$ است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که تیمار با نانوذرات اکسید روی (ZnO-NPs) باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی CAT و SOD و همچنین سطح ظرفیت اکسیداتیو کل (TOS) در گوجه‌فرنگی شد. این افزایش بیانگر تحریک سامانه دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از حضور نانوذرات است. با این حال، وابستگی پاسخ‌ها به غلظت و زمان بیانگر اثر دوگانه ZnO-NPs در القای استرس و تقویت سازوکارهای حفاظتی بود. یافته‌ها تأکید می‌کنند که کاربرد ایمن و کنترل‌شده نانوذرات می‌تواند در کشاورزی پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

۵. مراجع

- Lowry, G. V., Giraldo, J. P., Steinmetz, N. F., Avellan, A., Demirer, G. S., Ristroph, K. D., Wang, G. J., Hendren, C. O., Alabi, C. A., Caparco, A., da Silva, W., González-Gamboa, I., Grieger, K. D., Jeon, S.-J., Khodakovskaya, M. V., Kohay, H., Kumar, V., Muthuramalingam, R., Poffenbarger, H., ... White, J. C. (2024). Towards realizing nano-enabled precision delivery in plants. *Nature Nanotechnology*, 19(9), 1255–1269. <https://doi.org/10.1038/s41565-024-01667-5>
- Rana, L., Kumar, M., Rajput, J., Kumar, N., Sow, S., Kumar, S., Kumar, A., Singh, S. N., Jha, C. K., Singh, A. K., Ranjan, S., Sahoo, R., Samanta, D., Nath, D., Panday, R., & Raigar, B. L. (2024). Nexus between nanotechnology and agricultural production systems: challenges and future prospects. *Discover Applied Sciences*, 6(11), 555. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06265-7>
- Tryfon, P., Sperdoui, I., Adamakis, I.-D. S., Mourdikoudis, S., Dendrinou-Samara, C., & Moustakas, M. (2023). Modification of Tomato Photosystem II Photochemistry with Engineered Zinc Oxide Nanorods. *Plants*, 12(19), 3502. <https://doi.org/10.3390/plants12193502>
- Ishfaq, A., Haidri, I., Shafqat, U., Khan, I., Rizwan, H. M., Hassan, M. U., Irfan, M., Adnan, M., & Mahmood, F. (2025). Microbial Synthesis of ZnO Nanoparticles: A Green Strategy for Mitigating Wastewater Stress in Wheat (*Triticum aestivum*). *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(8), 518. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08149-x>
- Sofy, A. R., Sofy, M. R., Hmed, A. A., Dawoud, R. A., Alnaggar, A. E.-A. M., Soliman, A. M., & El-Dougdoug, N. K. (2021). Ameliorating the Adverse Effects of Tomato mosaic tobamovirus Infecting Tomato Plants in Egypt by Boosting Immunity in Tomato Plants Using Zinc Oxide Nanoparticles. *Molecules*, 26(5), 1337. <https://doi.org/10.3390/molecules26051337>
- Sharma, R. K., & Ghose, R. (2015). Synthesis of zinc oxide nanoparticles by homogeneous precipitation method and its application in antifungal activity against *Candida albicans*. *Ceramics International*, 41(1), 967–975. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.09.016>



7. Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44(1), 276–287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
8. Aebi, H. (1984). [13] *Catalase in vitro* (pp. 121–126). [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)
9. Wolff, S. P. (1994). [18] *Ferrous ion oxidation in presence of ferric ion indicator xylenol orange for measurement of hydroperoxides* (pp. 182–189). [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(94\)33021-2](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(94)33021-2)
10. Ahmed, M., Tóth, Z., Rizk, R., Abdul-Hamid, D., & Decsi, K. (2025). Investigation of Antioxidative Enzymes and Transcriptomic Analysis in Response to Foliar Application of Zinc Oxide Nanoparticles and Salinity Stress in *Solanum lycopersicum*. *Agronomy*, 15(7), 1715. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071715>
11. Ghosh, T., Yadav, S. K., Yadav, S., Atta, K., Singh, A. P., Gaber, A., & Hossain, A. (2025). STANDARDIZING THE APPROPRIATE DOSES OF ZINC OXIDE NANOPARTICLES FOR ENHANCING THE QUALITY OF TOMATO (*SOLANUM LYCOPERSICUM* L.) SEEDS GROWN UNDER SALINE CONDITIONS. *Applied Ecology and Environmental Research*, 23(3), 5859–5881. https://doi.org/10.15666/aeer/2303_58595881
12. Haroon, M., Khan, S. T., & Malik, A. (2024). Microbes-Mediated Zinc Biofortification in Tomato Plants Under Ag and TiO₂-NP Stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(4), 7213–7227. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-02034-y>