



<https://ijpb.ui.ac.ir/?lang=en>
Journal of Plant Biological Sciences
E-ISSN: 3041-9603
Vol. 16, Issue 1, No. 59, spring 2024
Document Type: Research Paper
Received: 13/09/2024 Accepted: 18/01/2025

Effect of silicon nanoparticles on growth parameters, ascorbate and glutathione contents, and antioxidant enzyme activity in tomato under cadmium stress

Razieh Rahmatizadeh¹, Rashid Jamei¹^{*}, Mohammad Javad Arvin²

¹Biology Department, Faculty of Science, Urmia University, Urmia, Iran.

²Horticulture Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Abstract

Silica nanoparticles can reduce the adverse effects of abiotic stresses by modulating several physiological processes. However, there is little information about how these effects are mediated under heavy metal stress. This study investigated the role of silicon nanoparticles in mitigating the toxicity of cadmium chloride in tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) was investigated. Silicon nanoparticles were used at levels 0, 25, 50, and 100 mg/l, and cadmium chloride at three levels of 0, 100, and 200 μ M. The results showed that 200 μ M cadmium treatment resulted in a decrease in plant fresh weight and length, ascorbate and glutathione levels in shoots and roots, but increased cadmium, malondialdehyde, H₂O₂, and protein content compared to the level 0 cadmium treatment. 50 mg/l nanosilica treatment resulted in an increase in plant fresh weight and length, an increase in ascorbate and glutathione levels, and a decrease in cadmium, malondialdehyde, H₂O₂, and protein content compared to the level 0 nanosilica treatment. Cadmium stress increased the activity of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, catalase, glutathione reductase, and glutathione-S-transferase, and the treatment of 50 mg/l silicon nanoparticles under cadmium stress enhanced the activity of these enzymes. The maximum increase in the activity of enzymes by silicon nanoparticles showed that these nanoparticles play a significant role in detoxifying reactive oxygen species and reducing oxidative stress induced by cadmium.

Keywords: Ascorbate, Antioxidant enzymes, Cadmium, Glutathione, Tomatoes, Silicon nanoparticles

*Corresponding author: r.jamei@urmia.ac.ir



Introduction

Environmental pollution by heavy metals has become a serious concern. Plants more readily take up Cadmium (Cd) than other heavy metals due to their high mobility and good water solubility. The high toxicity of Cd in plants may threaten crop quality and yield. Cd induces the production of reactive oxygen species (ROS). The tripeptide glutathione (Glu-Cys-Gly), widely synthesized in plants, contains a sulfhydryl group and can quench ROS. The reduced glutathione (GSH) pool is maintained by glutathione reductase (GR), which catalyzes the NADPH-dependent reduction of the disulfide bond in the glutathione molecule. Silica (Si) is the most abundant non-metallic element in the Earth's crust after oxygen. Most plants absorb soil-soluble Si from mineral sources such as silicic or monosilicic acid. Tomatoes, one of the most popular and widely consumed crops worldwide, are significant for employing strategies to mitigate the effects of toxic substances such as Cd, thereby enhancing product quality. In this context, Alves et al. (2020) used selenium, and Naciri et al. (2021) used potassium to alleviate Cd stress in tomatoes. However, available information on the effects of Nano-SiO₂ under stress conditions is limited. Therefore, this study aims to investigate how Nano-SiO₂ relieves Cd stress at the morphological, biochemical, and enzymatic levels.

Materials and Methods

This research was conducted as a factorial experiment in triplicate, based on a completely randomized design at Urmia University. Tomato seeds purchased from Glass Garden Company were surface sterilized using 0.1% sodium hypochlorite for 15 min, rinsed, and cultured in Petri dishes. Three days after germination, the seedlings were transferred to pots containing perlite, and a half-strength micronutrient solution of Hoagland was used for irrigation and nutrition. The plants were maintained in a greenhouse with 16 hr of light and 8 hr of darkness at a temperature of 25°C during the day and 20°C at night, with a relative humidity of 70%. Nano-SiO₂ was prepared at 0, 25, 50, and 100 mg/l concentrations and sonicated for 45 min. Immediately after sonication, the plants were sprayed with Nano-SiO₂ once a day during the four-leaf stage for four days. Following the Nano-SiO₂ treatment, the seedlings were irrigated with Hoagland solution containing CdCl₂ at concentrations of 0, 100, and 200 µM for seven days. Finally, the shoots and roots were separated, frozen in liquid nitrogen, and stored at -80 °C for subsequent experiments. Malondialdehyde (MDA), hydrogen peroxide (H₂O₂), ascorbic acid (ASA), and dehydroascorbate (DHA) reduced glutathione (GSH) and oxidized glutathione (GSSG) levels were determined. The activities of superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX), GR, and glutathione-S-transferase (GST) enzymes were also measured. All treatments were performed in triplicate, and the results were presented as mean ± SD (standard deviation). Statistical differences were evaluated using Microsoft Excel and Two Way ANOVA, followed by Duncan's multiple range test. $P < 0.05$ was considered to indicate a significant difference.

Results and discussion

The results showed that 200 µM CdCl₂ decreased plant fresh weight and length, reduced ascorbate and glutathione content, and increased levels of Cd, MDA, and H₂O₂ compared to the 0 CdCl₂ treatment. In contrast, the 50 mg/l Nano-SiO₂ treatment increased plant fresh weight and length, elevated ascorbate and glutathione content, and decreased Cd, MDA, and H₂O₂ levels compared to the 0 Nano-SiO₂ treatment. Furthermore, 200 µM CdCl₂ increased protein content and antioxidant enzyme activity compared to the 0 CdCl₂ treatment. The increase in antioxidant enzyme activity observed in this study under Cd stress suggests that this activity may not effectively neutralize ROS in tomatoes, as indicated by the elevated levels of MDA and H₂O₂. The content of MDA and H₂O₂ remained high despite the increase in antioxidant enzyme activity, suggesting that H₂O₂ accumulation exceeded the ROS scavenging capacity of the plants under Cd stress, resulting in oxidative stress due to an imbalance between ROS production and removal. However, the treatment with 50 mg/l Nano-SiO₂ under 200 µM CdCl₂ further increased antioxidant enzyme activity. This suggests that by enhancing antioxidant enzyme activity, Nano-SiO₂ significantly reduces MDA and H₂O₂ levels, contributing to the stability of cell membranes and creating an environment with lower oxidative stress, as reflected in the reduction of lipid peroxidation. Consequently, these factors improve growth and increase tomato biomass under Cd stress.

Conclusion

The findings of this study indicate that spraying 50 mg/l of Nano-SiO₂ is an effective method for enhancing tomato growth under Cd stress, as it stimulates antioxidant enzyme activity and reduces oxidative stress. Additionally, Nano-SiO₂ can serve as a viable source for producing safe food products in response to food security challenges, particularly in lands contaminated with the heavy metal Cd. This method presents a suitable alternative to traditional approaches. However, field-scale studies are needed to understand these results better and confirm them.

تأثیر نانو ذرات اکسید سیلیس بر شاخص‌های رشد، محتوای آسکوربات، گلوکاتایون و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گوجه‌فرنگی تحت تنش کادمیوم

راضیه رحمتی‌زاده^۱، رشید جامعی*^۱ ID، محمدجواد آروین^۲

^۱گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

^۲گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

نانو ذرات اکسید سیلیس دارای توانایی تخفیف تأثیر نامطلوب تنش‌های غیرزیستی با تعدیل تعدادی از فرایندهای فیزیولوژیکی هستند. با این حال، اطلاعات در مورد این که چگونه این اثرات تحت تنش فلزات سنگین میانجی‌گری می‌شوند، اندک است. در این پژوهش، نقش نانو ذرات اکسید سیلیس در تخفیف سمیت کلرید کادمیوم در گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) بررسی شد. از نانو ذرات اکسید سیلیس در چهار سطح ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کلرید کادمیوم در سه سطح ۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار استفاده شد. نتایج نشان دادند تیمار ۲۰۰ میکرومولار کادمیوم منجر به کاهش وزن تر و طول و میزان آسکوربات و گلوکاتایون اندام هوایی و ریشه شد، اما محتوای کادمیوم، مالون دی‌آلدئید، H_2O_2 و پروتئین را در مقایسه با تیمار صفر کادمیوم افزایش داد. تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیس سبب افزایش وزن تر و طول گیاه، افزایش میزان آسکوربات و گلوکاتایون و کاهش محتوای کادمیوم، مالون دی‌آلدئید، H_2O_2 و پروتئین در مقایسه با تیمار صفر نانو سیلیس شد. تنش کادمیوم فعالیت آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوکاتایون ردوکتاز و گلوکاتایون-S-ترانسفراز را افزایش داد، اما تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات اکسید سیلیس در شرایط تنش کادمیوم فعالیت این آنزیم‌ها را بیشتر تقویت کرد. افزایش حداکثری فعالیت آنزیم‌ها توسط نانو ذرات اکسید سیلیس به وضوح نشان دادند این نانو ذرات نقش قابل توجهی در سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن و تخفیف تنش اکسیداتیو القا شده توسط کادمیوم دارند.

واژه‌های کلیدی: آسکوربات، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، کادمیوم، گلوکاتایون، گوجه‌فرنگی، نانو ذرات سیلیس

*Corresponding author: r.jamei@urmia.ac.ir



مقدمه

آلودگی محیط زیست توسط فلزات سنگین تبدیل به یک نگرانی جدی شده است (Zulfiqar et al., 2022). کادمیوم (Cd) در مقایسه با سایر فلزات سنگین، احتمال بیشتری دارد به علت تحرک بالا و حلالیت مناسب در آب، توسط گیاهان جذب شود (Riaz et al., 2021). سمیت بالای Cd در گیاه ممکن است یک تهدید برای کیفیت و عملکرد محصول باشد (Zhao et al., 2021). این فلز سنگین تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را القا می‌کند (Sardar et al., 2022). گیاهان دارای سامانه قوی آنتی‌اکسیدانی شامل آنزیم‌های کاتالاز (CAT)، آسکوربات پراکسیداز (APX)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، گایاکول پراکسیداز (GPX)، گلوتاتیون ردوکتاز (GR)، گلوتاتیون اس ترانسفراز (GST) و مولکول‌های آنتی-اکسیدانی نظیر گلوتاتیون (GSH)، اسید آسکوربیک (ASA)، پلی فنول‌ها و فلاونوئیدها هستند (Sarker & Oba, 2018). سم‌زدایی آب اکسیژنه که توسط APX و با اکسیداسیون آسکوربات (ASA) به مونو دهیدروآسکوربات (MDHA) صورت می‌گیرد، اولین مرحله از سیکل گلوتاتیون-آسکوربات (ASC-GSH) است (Jiang et al., 2022). وجود میزان کافی از ASA منجر به مقاومت بیشتر و تجزیه کارا تر آب اکسیژنه (H_2O_2) می‌شود (Prajapati et al., 2022). تولید مجدد ASA به اکسیداسیون مولکول‌های گلوتاتیون احیاء (GSH) به گلوتاتیون اکسید شده (GSSG) دارد و یکی از تبدیل‌های مهم در چرخه ASC-GSH است (Kaya & Ashraf, 2022). تری پپتید گلوتاتیون (Glu-Cys-Gly) که به طور گسترده‌ای در گیاهان سنتز می‌شود، دارای گروه سولفیدریل است و می‌تواند ROS را خاموش کند (Dorion et al., 2021). مخزن GSH توسط GR نگهداری می‌شود و GR سبب احیای واکنش وابسته به NADPH باند دی سولفیدی در GSH می‌شود

(Zechmann, 2020). GSTs توسط فلزات سمی و نیز تنش اکسیداتیو القا می‌شوند و نقش عملکردی خود را توسط تری پپتید GSH انجام می‌دهند (Hussain et al., 2022). این آنزیم در شکل‌گیری هم‌تافته گلوتاتیون-فلزات سنگین و تخفیف تنش نیز دخالت دارند (Li et al., 2022). GR و GST نقش مهمی در تعیین تحمل گیاهان در مقابل تنش‌های محیطی مختلف مانند فلزات سنگین ایفا می‌کنند (Dorion et al., 2021). سیلیس (Si) به عنوان فراوان‌ترین عنصر غیر فلزی پوخته زمین بعد از اکسیژن در نظر گرفته می‌شود (Bhardwaj et al., 2023). اکثر گیاهان Si محلول در خاک را به شکل اسید سیلیسیک یا مونوسیلیسیک اسید از منابع معدنی جذب می‌کنند (Sharma et al., 2023). پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهد Si می‌تواند تنش Cd را از روش‌های مختلف مانند تشکیل کمپلکس‌های سیلیکون-کادمیوم، تحریک دیواره سلولی برای باند شدن به کاتیون‌ها و تغییر در موقعیت و انتقال درون سلولی کادمیوم کاهش دهد (Boorboori, 2023). علاوه بر این، Si نقش حیاتی در کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش Cd با تحریک تولید آنتی-اکسیدان‌ها و کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی در گیاهان مختلف به ویژه گوجه‌فرنگی ایفا می‌کند (Altaf et al., 2022). گوجه‌فرنگی که یکی از محبوب‌ترین و پر مصرف‌ترین محصولات در سطح جهانی است، سرشار از ترکیبات عملکردی نظیر پروتئین، هیدروکربن، لیکوپن، بتاکاروتن و ویتامین‌های A، B₁، B₂، C، E و K و نیز مواد معدنی مانند آهن، فسفر، کلسیم، سدیم و پتاسیم است (Zhang et al., 2020). در مقیاس صنعتی این محصول به عنوان ماده خام برای تولید انواع مختلفی از محصولات مانند کنسرو، کنسانتره سس، کچاب و رب استفاده می‌شود (Geetha & Rani, 2020). بنابراین استفاده از راهکارهایی

برای کاهش آثار مواد سمی و مضر مانند Cd و در نتیجه تولید محصولات با کیفیت بهتر در گوجه‌فرنگی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا Alves و همکاران (۲۰۲۰) از سلنیوم (Alves et al., 2020) و Naciri و همکاران (۲۰۲۱) از پتاسیم برای کاهش تنش Cd در گوجه‌فرنگی استفاده کردند (Naciri et al., 2021). Zhang و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند استفاده از Si به صورت تیمار برگی می‌تواند آثار زیان‌بار تنش Cd را در گوجه‌فرنگی کاهش دهد (Zhang et al., 2020). یکی از راهکارهای عملکردی که ثابت شده است تأثیر مطلوبی در کشاورزی فعلی دارد، استفاده از نانو ذره اکسید سیلیس (Nano-SiO₂) است (Wang et al., 2022). با این حال هنوز درک کاملی از نحوه تأثیر این نانو ذره بر رشد گیاهان و کاهش تنش‌های محیطی وجود ندارد. در حالی که تأثیر سیلیس بر کاهش تنش‌های محیطی به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است (Bhardwaj et al., 2023)، اطلاعات موجود درباره اثر Nano-SiO₂ در شرایط تنش محدود است. بنابراین بر اساس شکاف‌های موجود، پژوهش حاضر به بررسی سازوکارهای تأثیر Nano-SiO₂ بر تخفیف تنش کادمیوم در سطح ریخت‌شناسی، بیوشیمیایی و آنزیمی می‌پردازد.

تعیین فاکتورهای بیوشیمیایی

سنجش میزان مالون دی‌آلدئید (MDA) به روش Heath & Packer (1969) انجام شد. بر اساس این روش ۰/۲ گرم از بافت منجمد شده گیاه با ۵ میلی‌لیتر تری کلرواستیک اسید (TCA) ۰/۱ درصد سائیده شده و عصاره به‌دست آمده به مدت ۵ دقیقه در سرعت ۱۰۰۰۰ g سانتریفیوژ شد. سپس به یک میلی‌لیتر از محلول رویی ۴ میلی‌لیتر TCA ۲۰ درصد که حاوی ۰/۵ درصد تیو باربیوتیک اسید (TBA) بود اضافه شد و مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد در حمام آب گرم حرارت داده شد و بلافاصله پس از آن سرد و دوباره به مدت ۱۰ دقیقه در سرعت ۱۰۰۰۰ g سانتریفیوژ شد. شدت جذب با

مواد و روش‌ها

شرایط رشد گیاه و اعمال تیمارها

بذرهای گوجه‌فرنگی تهیه شده از شرکت گل‌س گاردن، با هیپوکلریت سدیم ۰/۱ درصد به مدت ۱۵ دقیقه استریل سطحی شد و پس از آبکشی با آب مقطر دوبار تقطیر، درون پتری‌دیش کشت داده شد. سه روز پس از جوانه‌زنی به گلدان‌های حاوی پرلیت منتقل شدند و محلول غذایی هوگلند (Hoagland & Arnon, 1950) با نصف غلظت

پیریدیل ۴ درصد و ۱۰ میکرولیتر FeCl_3 ۰/۳ درصد اضافه شد و مخلوط حاصل بلافاصله در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت و جذب آن در ۵۲۵ نانومتر خوانده شد. برای محاسبه مقدار ASA از منحنی استاندارد ASA استفاده و نتایج بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر گزارش شد. برای سنجش محتوای GSH و GSSG به ۱ میلی‌لیتر از مایع رویی ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۰/۵ مولار و ۵۰ میکرولیتر H_2O اضافه شد. این نمونه برای سنجش گلوکوتایون کل استفاده شد. ۱ میلی‌لیتر دیگر از محلول رویی به ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۰/۵ میلی‌مولار و ۵۰ میکرولیتر از ۲-وینیل پیریدین اضافه شد و پس از ۶۰ دقیقه در دمای اتاق برای سنجش GSSG مورد استفاده قرار گرفت. مقدار GSH از تفاوت بین گلوکوتایون کل و GSSG محاسبه شد. محتوای گلوکوتایون در یک مخلوط واکنش ۳ میلی‌لیتری شامل NADPH ۰/۲ میلی‌مولار، بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار، EDTA ۵ میلی‌مولار و Dithiobis DTNB (2-nitrobenzoic acid) ۰/۶ میلی‌مولار اندازه‌گیری شد و جذب نمونه‌ها در ۴۱۲ نانومتر ثبت شد (Zhang & Kirkham, 1996).

تهیه عصاره برای سنجش فعالیت آنزیمی

برای استخراج پروتئین‌ها، نمونه‌های گیاهی در بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار (pH=7) حاوی phenylmethane sulfonyl fluoride (PMSF) ۱ میلی‌مولار، Sodium ethylene diaminetetraacetic acid (Na_2EDTA) یک میلی‌مولار و polyvinylpyrrolidone (PVP) ۱٪ جرمی/حجمی سائیده شد و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. از مایع رویی برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیمی استفاده شد (Bradford, 1976). تمامی آنالیزهای اسپکتروفوتومتری در حجم نهایی ۳ میلی‌لیتر توسط اسپکتروفوتومتر انجام شد. فعالیت SOD (EC 1.15.1.1) بر اساس درصد ممانعت از احیای

اسپکتروفوتومتر (Varian Cary 50 UV-vis, Australia) در طول موج‌های ۴۵۵، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برای محاسبه غلظت MDA از ضریب خاموشی معادل $155 \text{ Mm}^{-1}\text{cm}^{-1}$ استفاده شد و نتایج حاصل بر حسب نانومول بر گرم وزن تر محاسبه شدند. برای سنجش مقدار H_2O_2 به ۵۰۰ میلی‌گرم از بافت گیاهی تری کلرواستیک اسید ۰/۱ درصد اضافه و سائیده شد. عصاره توسط سانتریفیوژ یخچال‌دار (Eppendorf Centrifuge 5804 R, Germany) در ۱۰۰۰۰ g به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول رویی به ۰/۵ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۱۰ میلی‌مولار و ۱ میلی‌لیتر یدید پتاسیم ۱ مولار اضافه شد و جذب محلول‌ها در طول موج ۳۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. مقدار پر اکسید هیدروژن در هر نمونه با ضریب خاموشی $0.28 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ محاسبه شد و بر حسب میکرومول بر وزن تر گزارش شد (Velikova et al., 2000). برای سنجش ASA، DHA، GSH و GSSG یک گرم از بافت گیاهی با ۱۰ میلی‌لیتر متا فسفریک اسید ۵ درصد سائیده شد و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۲۲۰۰۰ g سانتریفیوژ شد. مایع رویی برای سنجش ASA و گلوکوتایون جمع‌آوری شد. ASA کل پس از احیای DHA به ASA با دی تیوتریتول (DTT) اندازه‌گیری شد و غلظت DHA از تفاوت بین ASA کل و ASA محاسبه شد. مخلوط واکنش برای اندازه‌گیری ASA کل شامل ۰/۳ میلی‌لیتر از مایع رویی، ۰/۷۵ میلی‌لیتر بافر فسفات ۱۵۰ میلی‌مولار حاوی ۵ میلی‌مولار EDTA، ۰/۱۵ میلی‌لیتر DTT ۱۰ میلی‌مولار بود. پس از ۱۰ دقیقه در دمای اتاق، ۰/۱۵ میلی‌لیتر N-اتیل مالامید اضافه شد تا DTT اضافه حذف شود، ASA نیز در یک مخلوط واکنش مشابه اندازه‌گیری شد. با این تفاوت که به جای DTT ۰/۳ میلی‌لیتر آب و N-اتیل مالامید اضافه شد. سپس به ترتیب ۰/۶ میلی‌لیتر TCA ۱۰ درصد، ۰/۶ میلی‌لیتر اورتوفسفریک اسید ۴۴ درصد، ۰/۶ میلی‌لیتر آلفا، آلفا دی

میکرومول ۱- کلو و ۲ و ۴- دی نیترو بنزن ۳۰ میلی مولار و ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره آنزیمی استخراج شده بود. تغییرات جذب نمونه در ۳۴۰ nm در مدت یک دقیقه ثبت شد (Carmagnol et al., 1981).

تجزیه و تحلیل آماری

تمامی تیمارها در سه تکرار انجام شد و نتایج به صورت میانگین \pm SD (Standard Deviation) ارائه شد. تفاوت های آماری توسط نرم افزار Excel و Two Way ANOVA و به دنبال آن، آزمون چند دامنه ای دانکن ارزیابی شد. $P \leq 0.05$ برای نشان دادن تفاوت معنی داری در نظر گرفته شد.

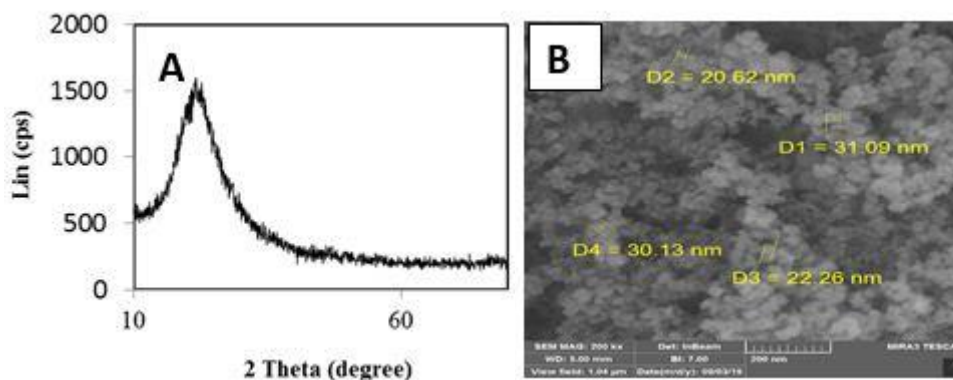
نتایج

تأثیر Nano-SiO₂ و CdCl₂ بر وزن تر و طول اندام

هوایی

نتایج پژوهش حاضر نشان دادند با افزایش غلظت CdCl₂، وزن تر و طول اندام هوایی و ریشه به طور معنی داری کاهش یافت. به ویژه غلظت ۲۰۰ میکرومولار CdCl₂ بیشترین تأثیر را بر کاهش وزن تر و طول گیاه داشت و به ترتیب سبب کاهش ۳۰/۴ و ۴۷/۱ درصد در وزن تر اندام هوایی و ریشه و ۲۳/۹ و ۳۳/۲ درصد در طول اندام هوایی و ریشه نسبت به تیمار صفر CdCl₂ شد. همچنین تیمار Nano-SiO₂ وزن تر و طول اندام هوایی و ریشه را افزایش داد. به ویژه غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر بیشترین تأثیر مثبت را نشان داد و به ترتیب سبب افزایش ۱۸/۴ و ۳۳/۸ درصد در وزن تر اندام هوایی و ریشه و ۱۶/۶ و ۱۷/۴ درصد در طول اندام هوایی و ریشه نسبت به تیمار صفر Nano-SiO₂ شد (جدول A و B).

نیتروبلوترازولیوم (NBT) به دی فورمازان توسط آنزیم موجود در عصاره مورد اندازه گیری قرار گرفت. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۵۰ میلی مولار (pH=7.0)، NBT ۰/۰۷۵ میکرومولار، Na₂EDTA ۰/۱ میلی مولار، ریوفلاوین ۷۵ میکرومولار، متیونین ۱۳ میلی مولار و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. برای انجام واکنش، مخلوط حاصل به مدت ۸ دقیقه در معرض نور قرار گرفت و جذب نمونه ها در طول موج ۵۶۰ نانومتر با اسپکتروفوتومتر اندازه گیری شد. یک واحد آنزیمی SOD مقدار آنزیمی است که موجب ۵۰٪ ممانعت از احیای نوری NBT در مقایسه با نمونه های شاهد شود (Giannopolitis & Ries, 1977). فعالیت آنزیم APX (EC 1.11.1.1) نیز با اندازه گیری کاهش جذب در ۲۹۰ نانومتر به علت اکسیداسیون ASA تعیین شد. مخلوط واکنش شامل پتاسیم فسفات ۵۰ میلی مولار (pH=7.0)، EDTA ۰/۱ میلی مولار، H₂O₂ ۰/۱۵ میلی مولار، ASA ۰/۵ میلی مولار و ۱۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. یک واحد فعالیت APX به عنوان مقدار آنزیمی است که قادر است یک میلی مولار ASA را در مدت یک دقیقه تجزیه کند (Nakano & Asada, 1981). فعالیت آنزیم GR (EC 1.6.4.2) نیز با توجه به کاهش جذب در ۳۴۰ nm در ارتباط با اکسیداسیون NADPH اندازه گیری شد. مخلوط واکنش شامل Tris-HCl ۵۰ میلی مولار (pH=7.8)، NADPH ۱۵۰ میکرومولار، GSSG ۵۰۰ میکرومولار و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. یک واحد فعالیت GR به عنوان مقدار آنزیمی است که یک میکرومول NADPH را در یک دقیقه اکسید کند (Schaedle & Bassham, 1977). برای ارزیابی فعالیت آنزیم GST (EC 1.15.1.1)، مخلوط واکنش شامل ۹۰۰ میکرولیتر بافر فسفات ۱۰۰ میلی مولار (pH=7.4)، ۴۵۰ میکرولیتر GSH ۳/۵ میلی مولار، ۱۰۰۰



شکل ۱- ویژگی‌های نانو ذره اکسید سیلیس توسط تکنیک های XRD (A) و SEM (B).

Figure 1– Properties of nano-SiO₂ by techniques XRD pattern (A) and SEM micrograph (B).

جدول ۱A- تجزیه واریانس تأثیر CdCl₂ و Nano-SiO₂ برای صفات رشدی اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی.

Table 1A- ANOVA for the effects of CdCl₂ and Nano-SiO₂ for tomato shoot and root growth characteristics.

Root length	Shoot length	Root fresh weight	Shoot fresh Weight	میانگین مربعات df	منابع تغییرات
1573.694*	900.083*	1027.111*	639.480*	2	CdCl ₂
148.815*	154.324*	117.519*	76.215*	3	Nano-SiO ₂
8.954 ^{ns}	24.269 ^{ns}	8.741 ^{ns}	4.551 ^{ns}	6	CdCl ₂ × Nano-SiO ₂
28.000	16.083	4.694	9.912	24	Error
8.81	9.45	7.42	6.81		(%) CV

ns و * به ترتیب عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است.

ns and * show no significant and significant at $P \leq 0.05$, respectively.

جدول ۱B- مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف CdCl₂ و Nano-SiO₂ برای وزن تر و طول اندام هوایی و ریشه در گوجه‌فرنگی.

Table 1B- Mean comparison of the effects of different concentrations of CdCl₂ and Nano-SiO₂ for shoot and root fresh weight and length in tomato.

Treatment	Shoot fresh Weight (g/plant)	Root fresh weight (g/plant)	Shoot length (cm/plant)	Root length (cm/plant)
CdCl ₂ (μM)				
0	47.90±1.04 ^a	38.83±0.90 ^a	71.83±1.20 ^a	68.25±1.67 ^a
100	41.05±0.90 ^b	27.50±1.04 ^b	65.25±1.63 ^b	54.58±1.56 ^b
200	33.31±1.35 ^c	20.50±1.42 ^c	54.66±1.84 ^c	45.50±1.90 ^c
Nano-SiO ₂ (mg/l)				
0	36.84 ±2.55 ^a	25.11±2.80 ^a	59.66±3.34 ^b	52.22±3.72 ^a
25	40.55±2.25 ^a	27.55±2.92 ^a	62.66±3.12 ^{ab}	53.66±3.84 ^a
50	43.69±2.28 ^a	33.66±2.28 ^a	69.55±1.91 ^a	61.33±3.31 ^a
100	41.93±2.15 ^a	29.44±2.99 ^a	63.77±2.78 ^{ab}	57.22±3.75 ^a

مقادیر، میانگین ۳ تکرار ± SD است. حروف یکسان، بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح $P < 0.05$ با استفاده از آزمون دانکن است.

Values are mean ± SD of 3 replicates. Mean values followed by similar letters did not differ significantly ($P < 0.05$) when determined by the Duncan test.

بر اساس نتایج جدول ۲A و ۲B، با افزایش غلظت CdCl₂ از صفر تا ۲۰۰ میکرومولار، محتوای Cd در اندام هوایی و

تأثیر Nano-SiO₂ و CdCl₂ بر محتوای Cd، MDA و H₂O₂

MDA اندام هوایی و ریشه نسبت به گروه شاهد در همان سطح $CdCl_2$ شد. در بین تیمارهای Nano-SiO₂ تأثیر کاهش دهنده ۵۰ میلی گرم در لیتر بیشتر بود. همچنین تنش Cd در هر دو غلظت ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار سبب افزایش معنی‌دار محتوای H₂O₂ شد، به طوری که غلظت ۲۰۰ میکرومولار $CdCl_2$ ، محتوای H₂O₂ را به میزان ۱۱۶/۴ و ۱۱۸/۶ درصد در اندام هوایی و ریشه نسبت به غلظت صفر $CdCl_2$ افزایش داد. تیمار Nano-SiO₂ در تمامی سطوح، میزان H₂O₂ را در اندام هوایی و ریشه نسبت شاهد در همان سطح $CdCl_2$ کاهش داد و اثر کاهش دهنده غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر Nano-SiO₂ در بین تیمارها بیشتر بود.

ریشه افزایش یافت و این افزایش در غلظت ۲۰۰ میکرومولار بیشتر مشاهده شد. همچنین میزان Cd در ریشه بیشتر از اندام هوایی بود. در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار Nano-SiO₂، $CdCl_2$ در تمامی غلظت‌ها منجر به کاهش محتوای Cd در اندام هوایی و ریشه نسبت به گروه شاهد در همان سطح $CdCl_2$ شد و این کاهش در غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر Nano-SiO₂ بیشتر قابل مشاهده بود. همچنین نتایج نشان دادند تنش Cd در هر دو غلظت ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار سبب افزایش معنی‌دار محتوای MDA اندام هوایی و ریشه نسبت به غلظت صفر $CdCl_2$ شد. در غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار $CdCl_2$ ، Nano-SiO₂ در تمامی غلظت‌ها منجر به کاهش محتوای

جدول ۲A- تجزیه واریانس تأثیر $CdCl_2$ و Nano-SiO₂ برای صفات بیوشیمیایی اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی.

Table 2A- ANOVA for the effects of $CdCl_2$ and Nano-SiO₂ for shoot and root biochemical characteristics of tomato.

Root H ₂ O ₂	Shoot H ₂ O ₂	Root MDA	Shoot MDA	Root Cd	Shoot Cd	df	میانگین مربعات	منابع تغییرات
721.690*	1068.490*	1.937*	0.534*	56710.43*	11.86.511*	2		$CdCl_2$
93.352*	88.689*	0.144*	0.028*	1973.674*	18.688*	3		Nano-SiO ₂
252.650*	16.769*	0.050*	0.005*	976.729*	10.424*	6		$CdCl_2 \times$ Nano-SiO ₂
8.427	6.129	0.006	0.000	21.146	0.744	24		Error
1.88	7.60	3.20	6.54	8.33	4.55			(%) CV

ns و * به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

ns and * show no significant and significant at $P \leq 0.05$, respectively.

جدول ۲B- مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف $CdCl_2$ و Nano-SiO₂ برای محتوای Cd، MDA، H₂O₂ اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی.

Table 2B- Mean comparison of the effects of different concentrations of $CdCl_2$ and Nano-SiO₂ for shoot and root Cd, MDA and H₂O₂ content in tomato.

$CdCl_2$ (μ M)	Nano-SiO ₂ (mg/l)	Shoot Cd (% DW)	Root Cd (% DW)	Shoot MDA (nM/g FW)	Root MDA (nM/g FW)	Shoot H ₂ O ₂ (μ M/g Fw)	Root H ₂ O ₂ (μ M/g Fw)
0	0	0.10±0.00 ^f	0.18±0.00 ^g	0.11±0.03 ⁱ	0.38±0.02 ^{sh}	20.35±0.82 ^e	34.84±0.30 ^e
	25	0.10±0.00 ^f	0.18±0.00 ^g	0.10±0.00 ⁱ	0.31±0.02 ^h	19.88±1.03 ^e	33.39±0.36 ^e
	50	0.10±0.00 ^f	0.18±0.00 ^g	0.09±0.00 ⁱ	0.28±0.01 ^h	18.94±0.75 ^e	32.69±0.98 ^e
100	100	0.10±0.00 ^f	0.18±0.00 ^g	0.15±0.00 ^h	0.47±0.01 ^g	20.25±0.42 ^e	34.10±0.99 ^e
	0	4.83±0.33 ^d	38.75±0.72 ^d	0.35±0.00 ^e	0.62±0.02 ^e	29.55±1.00 ^{cd}	58.90±2.37 ^c
	25	4.03±0.03 ^e	32.00±1.44 ^e	0.20±0.00 ^g	0.57±0.04 ^{ef}	26.78±2.06 ^d	44.40±2.80 ^d
	50	3.83±0.16 ^e	26.83±0.92 ^f	0.16±0.00 ^h	0.41±0.03 ^{sh}	20.96±1.06 ^e	38.30±4.50 ^d
200	100	4.41±0.22 ^d	33.75±2.16 ^e	0.30±0.00 ^f	0.60±0.03 ^{ef}	28.21±2.06 ^c	55.97±2.39 ^c
	0	11.66±0.44 ^a	87.50±2.88 ^a	0.61±0.00 ^a	1.43±0.06 ^a	44.04±1.20 ^a	76.09±3.45 ^a
	25	10.16±0.44 ^b	72.16±1.16 ^b	0.50±0.01 ^c	1.23±0.06 ^b	39.28±1.96 ^b	74.61±2.13 ^a
	50	7.50±0.28 ^c	45.41±1.10 ^c	0.45±0.00 ^d	0.83±0.06 ^d	31.67±1.96 ^c	57.52±3.44 ^c
	100	10.50±0.28 ^b	70.00±1.44 ^b	0.55±0.00 ^b	1.04±0.05 ^c	38.80±1.42 ^b	66.30±1.71 ^b

مقادیر، میانگین ۳ تکرار \pm SD است. حروف یکسان، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح $P < 0.05$ با استفاده از آزمون دانکن است.

Values are mean \pm SD of 3 replicates. Mean values followed by similar letters did not differ significantly ($P < 0.05$) when determined by the Duncan test.

شد. تیمار Nano-SiO₂ در تمامی غلظت‌ها سبب کاهش محتوای DHA ریشه و GSSG اندام هوایی نسبت به سطح صفر Nano-SiO₂ شد. به ویژه غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بیشترین تأثیر را داشت و به ترتیب سبب کاهش ۳۱/۵ و ۲۹/۷ درصدی در میزان DHA ریشه و GSSG اندام هوایی نسبت به سطح صفر Nano-SiO₂ شد (جدول ۳A و ۳C). طبق نتایج جدول ۳A و ۳B غلظت ۲۰۰ میکرومولار CdCl₂ بر میزان DHA اندام هوایی و GSSG ریشه نیز اثر گذاشت و سبب افزایش ۱۸۸/۸ درصدی در میزان DHA اندام هوایی و ۱۷۲/۷ درصدی در محتوای GSSG ریشه نسبت به سطح صفر CdCl₂ شد. اما تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر Nano-SiO₂ در هر سه سطح CdCl₂ سبب کاهش میزان DHA اندام هوایی و GSSG ریشه در مقایسه با شاهد در همان سطح CdCl₂ شد. همچنین تنش Cd منجر به افزایش محتوای پروتئین شدند این افزایش به‌ویژه در غلظت ۲۰۰ میکرومولار CdCl₂ شدیدتر بود و سبب افزایش ۲۰۰ و ۲۳۶ درصدی در میزان پروتئین اندام هوایی و ریشه نسبت به سطح صفر CdCl₂ شد، اما تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر Nano-SiO₂ سبب کاهش محتوای پروتئین اندام هوایی و ریشه در هر سه غلظت CdCl₂ در مقایسه با شاهد در همان سطح CdCl₂ شد (جدول‌های ۳A و ۳B).

اثر Nano-SiO₂ و CdCl₂ بر محتوای ASA، DHA، GSH، GSSG و پروتئین

نتایج به‌دست آمده از جدول ۳A و ۳C نشان‌دهنده کاهش در محتوای ASA و GSH اندام هوایی و ریشه گوجه فرنگی رشد یافته تحت تنش Cd است. این کاهش در غلظت ۲۰۰ میکرومولار CdCl₂ شدیدتر بود. به‌طوری‌که در این غلظت، کاهش ۶۰/۴ و ۶۷ درصدی در محتوای ASA، و ۴۵/۸ و ۴۳/۴ درصدی در محتوای گلوکاتیون به ترتیب در اندام هوایی و ریشه نسبت به تیمار صفر CdCl₂ مشاهده شد. همچنین تیمار Nano-SiO₂ منجر به افزایش محتوای ASA و GSH اندام هوایی و ریشه نسبت به سطح صفر Nano-SiO₂ شد. به‌ویژه غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بیشترین تأثیر را بر افزایش محتوای ASA و GSH داشت و به ترتیب سبب افزایش ۳۶/۹ و ۳۴/۲ در محتوای ASA و ۲۶/۲ و ۲۱/۹ درصدی در محتوای GSH اندام هوایی و ریشه نسبت به تیمار صفر Nano-SiO₂ شد. تنش Cd همچنین موجب افزایش محتوای DHA ریشه و GSSG اندام هوایی نسبت به تیمار صفر CdCl₂ شد. به‌طوری‌که این افزایش در غلظت ۲۰۰ میکرومولار CdCl₂ بیشتر مشاهده شد. غلظت ۲۰۰ میکرومولار CdCl₂ سبب افزایش ۱۸۲/۸ درصدی در میزان DHA ریشه و ۱۶۶/۶ درصدی در محتوای GSSG اندام هوایی نسبت به سطح صفر CdCl₂

جدول ۳A- تجزیه واریانس تأثیر CdCl₂ و Nano-SiO₂ برای صفات فیزیولوژیکی اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی.

Table 3A- ANOVA for the effects of CdCl₂ and Nano-SiO₂ for shoot and root physiological characteristics of tomato.

Root protein	Shoot protein	Root GSSG	Shoot GSSG	Root GSH	Shoot GSH	Root DHA	Shoot DHA	Root ASA	Shoot ASA	میانگین مربعات f	منابع تغییرات
95.925*	98.695*	1.161*	0.527*	1049.645*	2104.792*	0.139*	0.424*	405.056*	342.389*	2	CdCl ₂
32.360*	11.347*	0.072*	0.030*	36.245*	156.416*	0.036*	0.055*	21.661*	32.574*	3	Nano-SiO ₂
6.476*	4.300*	0.020*	0.003 ^{ns}	9.819 ^{ns}	2.898 ^{ns}	0.008 ^{ns}	0.013*	1.604 ^{ns}	1.570 ^{ns}	6	CdCl ₂ × Nano-SiO ₂
0.275	0.720	0.005	0.003	5.976	8.667	0.005	0.002	1.653	2.608	24	Error
9.32	8.05	7.01	7.99	7.58	7.36	9.21	6.98	8.74	9.22		(%) CV

ns و * به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

ns and * show no significant and significant at P≤0.05, respectively.

جدول ۳B- مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف CdCl₂ و Nano-SiO₂ برای محتوای دهیدروآسکوربات، گلوکاتیون اکسید و پروتئین اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی.

Table 3B- Mean comparison of the effects of different concentrations of CdCl₂ and Nano-SiO₂ for shoot DHA, root GSSG and shoot and root protein content in tomato.

CdCl ₂ (μM)	Nano-SiO ₂ (mg/l)	Shoot DHA (μg/g Fw)	Root GSSG (μM/g Fw)	Shoot protein (mg/g Fw)	Root protein (mg/g Fw)
0	0	0.27±0.02 ^f	0.44±0.03 ^{gh}	4.16±0.23 ^{gh}	3.16±0.16 ^h
	25	0.25±0.02 ^f	0.40±0.05 ^{gh}	5.10±0.63 ^{fg}	2.59±0.21 ^{hi}
	50	0.23±0.03 ^f	0.35±0.02 ^h	3.52±0.25 ^h	2.13±0.23 ⁱ
	100	0.27±0.02 ^f	0.38±0.04 ^h	6.35±0.67 ^{ef}	6.13±0.31 ^f
100	0	0.59±0.01 ^c	0.58±0.05 ^e	7.06±0.25 ^{de}	7.10±0.19 ^e
	25	0.38±0.01 ^e	0.52±0.01 ^{efg}	6.26±0.44 ^{ef}	8.35±0.26 ^{cd}
	50	0.37±0.02 ^e	0.45±0.02 ^{gh}	6.02±0.54 ^{ef}	6.76±0.42 ^{ef}
	100	0.40±0.02 ^e	0.53±0.03 ^{ef}	9.41±0.36 ^{bc}	9.16±0.34 ^c
200	0	0.78±0.01 ^a	1.20±0.05 ^a	12.48±0.71 ^a	10.62±0.34 ^b
	25	0.67±0.04 ^b	0.91±0.04 ^c	10.80±0.62 ^b	8.20±0.26 ^d
	50	0.48±0.01 ^d	0.77±0.01 ^d	8.46±0.34 ^{cd}	4.51±0.27 ^e
	100	0.59±0.01 ^c	1.05±0.04 ^b	10.24±0.44 ^b	11.92±0.44 ^a

مقادیر، میانگین ۳ تکرار ± SD است. حروف یکسان، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح P < 0.05 توسط آزمون دانکن است.

Values are mean ± SD of 3 replicates. Mean values followed by similar letters did not differ significantly (P < 0.05) when determined by the Duncan test.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف CdCl_2 و Nano-SiO_2 برای محتوای آسکوربات، دهیدروآسکوربات، گلو تاتیون احیا، گلو تاتیون اکسید و آسکوربات پراکسیداز.

Table 3C- Mean comparison of the effects of different concentrations of CdCl_2 and Nano-SiO_2 for shoot DHA, root GSSG and shoot and root protein content in tomato.

Treatment	Shoot ASA	Root ASA	Root DHA	Shoot GSH	Root GSH	Shoot GSSG	Shoot APX
CdCl_2 (μM)							
0	1.72±0.06 ^a	1.73±0.04 ^a	0.35±0.02 ^c	4.41±0.14 ^b	2.53±0.07 ^b	0.24±0.01 ^c	0.96±0.05 ^c
100	1.44±0.07 ^b	1.27±0.06 ^b	0.57±0.02 ^b	4.48±0.11 ^a	3.29±0.08 ^a	0.32±0.01 ^b	1.24±0.02 ^b
200	0.68±0.05 ^c	0.57±0.05 ^c	0.99±0.05 ^a	2.39±0.13 ^c	1.43±0.10 ^c	0.64±0.02 ^a	1.47±0.06 ^a
Nano-SiO_2 (mg/l)							
0	1.11±0.14 ^a	1.05±0.17 ^a	0.76±0.14 ^a	3.54±0.38 ^a	2.19±0.30 ^a	0.47±0.07 ^a	1.22±0.08 ^a
25	1.35±0.18 ^a	1.16±0.17 ^a	0.63±0.08 ^a	3.90±0.40 ^a	2.45±0.26 ^a	0.41±0.06 ^a	1.13±0.06 ^a
50	1.52±0.15 ^a	1.41±0.16 ^a	0.52±0.07 ^a	4.47±0.37 ^a	2.67±0.22 ^a	0.33±0.05 ^a	1.37±0.11 ^a
100	1.14±0.15 ^a	1.15±0.17 ^a	0.62±0.08 ^a	3.65±0.40 ^a	2.36±0.31 ^a	0.39±0.06 ^a	1.17±0.09 ^a

مقادیر، میانگین ۳ تکرار \pm SD است. حروف یکسان، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح $P < 0.05$ با استفاده از آزمون دانکن است.

Values are mean \pm SD of 3 replicates. Mean values followed by similar letters did not differ significantly ($P < 0.05$) when determined by the Duncan test.

۱۴۳/۷ درصد، APX به میزان ۶۱/۲ و ۵۸ درصد، GR به میزان ۴۱/۶ و ۷۰/۸ درصد و GST به میزان ۱۳۰ و ۱۶۰/۵ درصد در اندام هوایی و ریشه نسبت به سطح صفر CdCl_2 افزایش یافت. همچنین فعالیت آنزیم‌های فوق در هر سه سطح CdCl_2 ، با کاربرد Nano-SiO_2 در مقایسه با شاهد در همان سطح CdCl_2 افزایش یافت. به طوری که بیشترین افزایش فعالیت در تیمار ۵۰ میلی گرم لیتر Nano-SiO_2 مشاهده شد (جدول‌های ۴A و ۴B).

اثر CdCl_2 و Nano-SiO_2 بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنزیم‌های SOD، APX، GR و GST تحت تیمار CdCl_2 و Nano-SiO_2 در جدول ۴A و ۴B ارائه شده است. غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار CdCl_2 منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های مذکور در اندام هوایی و ریشه نسبت به تیمار صفر CdCl_2 شد، به طوری که این افزایش در غلظت ۲۰۰ میکرومولار بیشتر بود. در غلظت ۲۰۰ میکرومولار CdCl_2 فعالیت SOD به میزان ۲۰۰ و

جدول ۴A- تجزیه واریانس تأثیر CdCl_2 و Nano-SiO_2 برای فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی.

Table 4A- Anova for the effects of CdCl_2 and Nano-SiO_2 for shoot and root antioxidant enzyme activity of tomato.

Root GST	Shoot GST	Root GR	Shoot GR	Root APX	Root SOD	Shoot SOD	df	منابع تغییرات
23.814*	10.242*	10.794*	6.056*	1.305*	18.452*	21.756*	2	(CdCl_2)
0.240*	0.709*	0.635*	0.854*	0.244*	0.809*	0.810*	3	Nano-SiO_2
0.076*	0.191*	0.064*	0.153*	0.118*	0.105*	0.078*	6	$\text{CdCl}_2 \times \text{Nano-SiO}_2$
0.018	0.013	0.022	0.032	0.015	0.032	0.025	24	Error
5.91	7.11	4.35	4.89	7.84	3.5	5.25		(%) CV

ns و * به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

ns and * show no significant and significant at $P \leq 0.05$, respectively.

جدول ۴B - مقایسه میانگین اثر غلظت‌های مختلف CdCl_2 و Nano-SiO_2 برای فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوکاتینون ردوکتاز و گلوکاتینون اس ترانسفراز اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی.

Table 4B- Mean comparison of the effects of different concentrations of CdCl_2 and Nano-SiO_2 for shoot and root SOD, APX, GR and GST activity in tomato.

CdCl_2 (μM)	Nano- SiO_2 (mg/l)	Shoot SOD (U/mg Protein)	Root SOD (U/mg Protein)	Root APX (U/mg Protein)	Shoot GR (U/mg Protein)	Root GR (U/mg Protein)	Shoot GST (U/mg Protein)	Root GST (U/mg Protein)
0	0	1.23±0.12 ^h	1.53±0.03 ^e	1.43±0.03 ⁱ	2.33±0.08 ^g	2.40±1.00 ^g	1.10±0.057 ^h	1.70±0.05 ^f
	25	1.50±0.05 ^g	1.60±0.05 ^e	1.70±0.05 ^{gh}	2.43±0.12 ^{fg}	2.60±0.05 ^f	1.23±0.03 ^h	1.80±0.17 ^f
	50	1.60±0.05 ^g	1.73±0.12 ^e	1.86±0.06 ^{def}	2.70±0.05 ^{ef}	2.80±0.05 ^f	1.26±0.06 ^h	1.90±0.05 ^f
	100	1.23±0.12 ^h	1.53±0.08 ^e	1.93±0.08 ^{de}	2.36±0.13 ^g	2.30±0.10 ^h	1.16±0.12 ^h	1.80±0.05 ^f
100	0	2.03±0.08 ^f	2.26±0.14 ^d	1.80±0.05 ^{efg}	2.70±0.05 ^{ef}	2.90±0.05 ^e	1.73±0.03 ^g	2.30±0.05 ^e
	25	2.40±0.05 ^e	2.43±0.12 ^d	1.50±0.05 ^{hi}	3.00±0.05 ^{de}	3.20±0.05 ^{cd}	1.93±0.03 ^f	2.40±0.05 ^{de}
	50	2.90±0.05 ^d	3.03±0.08 ^c	1.93±0.03 ^{de}	3.30±0.11 ^{cd}	3.40±0.15 ^c	2.30±0.05 ^e	2.60±0.05 ^d
	100	2.26±0.14 ^f	2.23±0.14 ^d	1.60±0.05 ^{ghi}	3.00±0.05 ^{de}	3.00±0.05 ^{de}	1.96±0.06 ^f	2.40±0.10 ^{de}
200	0	3.70±0.05 ^c	3.73±0.14 ^b	2.26±0.13 ^b	3.30±0.15 ^{cd}	4.10±0.05 ^b	2.53±0.03 ^d	4.43±0.06 ^b
	25	3.86±0.08 ^{bc}	3.90±0.05 ^b	2.20±0.05 ^{bc}	3.56±0.13 ^c	4.20±0.05 ^b	2.76±0.08 ^c	4.53±0.03 ^b
	50	4.60±0.05 ^a	4.70±0.05 ^a	2.66±0.06 ^a	4.53±0.13 ^a	4.96±0.08 ^a	3.80±0.05 ^a	4.90±0.05 ^a
	100	4.06±0.12 ^b	3.86±0.08 ^b	2.03±0.08 ^{cd}	4.06±0.06 ^b	4.26±0.12 ^b	3.03±0.08 ^b	4.10±0.05 ^c

مقادیر، میانگین ۳ تکرار \pm SD است. حروف یکسان، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح $P < 0.05$ توسط آزمون دانکن است.

Values are mean \pm SD of 3 replicates. Mean values followed by similar letters did not differ significantly ($P < 0.05$) when determined by the Duncan test.

بحث

هوایی، کاهش تنش اکسیداتیو و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی انجام می‌دهد (Boorboori, 2023). داده‌های قبلی ما نیز نشان می‌دهد Nano-SiO_2 نقش کلیدی در حفاظت از ساختار و عملکرد غشای سلولی و بهبود جذب سایر مواد غذایی معدنی در گیاهان تحت شرایط تنش Cd داشته است (Rahmatizadeh et al., 2021). در آزمایش حاضر نیز تیمار Nano-SiO_2 به‌ویژه در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر توانست تنش اکسیداتیو القا شده توسط Cd را با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گوجه‌فرنگی تخفیف بخشد (جدول های ۴A و ۴B). یکی از واکنش‌های رایج گیاه به شرایط تنش تولید بیش از حد ROS است (Sardar et al., 2022). برای مقابله با ROS، گیاهان مجهز به سامانه‌های مختلف آنتی‌اکسیدانی هستند که در بین آن‌ها چرخه ASA-GSH مهمترین مسیر حذف ROS در سلول تحت شرایط تنش و نرمال است (Ahmad et al., 2018). این

پژوهش حاضر نشان دادند Cd به عنوان یک عامل بسیار قدرتمند بطور قابل توجهی وزن و طول گیاه را کاهش می‌دهد و تأثیر بیشتری بر ریشه نسبت به اندام هوایی دارد (جدول های ۱A و ۱B). این امر به علت جداسازی واکوئلی و تجمع غلظت بالای Cd در دیواره سلول‌های ریشه است که منجر به باقی ماندن سطح بیشتری از Cd در ریشه و کاهش انتقال آن به اندام هوایی می‌شود (Pan et al., 2021). Ougua و همکاران نیز در گوجه‌فرنگی تحت تنش فلز سنگین حساسیت بیشتری را در صفات ریشه نسبت به اندام هوایی گزارش کرده اند (Ougua et al., 2022). در پژوهش حاضر Nano-SiO_2 آثار مضر تنش Cd را تخفیف می‌دهد که با بهبود رشد و زیست توده در اندام هوایی و ریشه گوجه‌فرنگی تحت تنش Cd منعکس می‌شود (جدول های ۱A و ۱B). Nano-SiO_2 احتمالاً این کار را با کاهش جذب و انتقال Cd به اندام

فعالیت GST گزارش داده‌اند (Kar & Öztürk, 2020). با توجه به اهمیت کلیدی GST در مقابله با تنش‌های اکسیداتیو و خنثی‌سازی مواد سمی، می‌توان افزایش فعالیت این آنزیم توسط Nano-SiO₂ در پژوهش حاضر را به عنوان یک عامل موثر در تخفیف تنش Cd در نظر گرفت (جدول های ۴A و ۴B). همچنین GR با احیای GSSG به GSH نقش مهمی در کاهش تنش اکسیداتیو ایفا می‌کند (Hasanuzzaman et al., 2017). برای بسیاری از عملکردهای سلول ضروری است و باید به‌طور مداوم تولید شود (Hasanuzzaman et al., 2017). به احتمال زیاد، آزادسازی یون‌های Si از SiNPs، الگوی بیان ژن‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی SOD، APX، GST، GR و تحت تنش Cd افزایش داده است (Ghouri et al., 2024). Ashraf و همکاران گزارش داده‌اند که در برنج تحت تنش Cd، تیمار SiNPs سبب افزایش فعالیت و بیان ژن GR و همچنین افزایش محتوای GSH شد (Ashraf et al., 2024). افزایش فعالیت GR، نسبت NADP⁺/NADPH را بهبود می‌بخشد و به همین علت مقدار NADP⁺ به عنوان گیرنده انتهایی الکترون در واکنش‌های نوری فتوسنتز افزایش می‌یابد که این امر احتمالاً انتقال الکترون به اکسیژن و تولید رادیکال سوپراکسید را کاهش می‌دهد (Kuo et al., 2020; Moreno-Galván et al., 2020; Ji et al., 2022). به عنوان یک آنتی‌اکسیدان می‌تواند به‌طور مستقیم با ROS واکنش دهد. همچنین این ترکیب قادر است بسیاری از اجزای سلولی از جمله گروه‌های تیول پروتئین‌ها را در برابر تنش اکسیداتیو محافظت کند و با پایدار کردن لیپیدها در غشای سلولی به قطع زنجیره پراکسیداسیون کمک کند. GSH همچنین در بازسازی ASA (آنتی‌اکسیدان غیر آنزیمی) در طی چرخه ASA-GSH نقش مهمی ایفا می‌کند. بنابراین علاوه بر وجود

چرخه از چهار آنزیم APX، دهیدروآسکوربات ردوکتاز (DHAR)، مونودیهیدروآسکوربات ردوکتاز (MDHAR) و GR، و دو متابولیت ASA و GSH تشکیل شده است که به طور هماهنگ عمل می‌کنند تا H₂O₂ را متابولیزه کند (Sarker & Oba, 2018). علاوه بر کنترل سطح H₂O₂، این چرخه با تنظیم سطح GSH و ASA و نسبت ردوکس آن‌ها، بافر اکسیداسیون احیای سلول را نیز حفظ می‌کند و به حس کردن و پیام‌دهی تنش از طریق تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با متابولیسم و تنش کمک می‌کند (Ahmad et al., 2018). بر اساس جدول های ۴A و ۴B در پژوهش حاضر، تنش Cd منجر به افزایش معنی‌دار SOD، APX، GR و GST در ریشه و اندام هوایی گوجه فرنگی شد. شرایط تنش سبب تولید رادیکال سوپر اکسید (O₂⁻) می‌شود و آنزیم SOD که در خط مقدم دفاع آنتی‌اکسیدانی قرار دارد، سوپراکسید را به H₂O₂ تبدیل می‌کند و H₂O₂ توسط پراکسیدازهای مختلفی مانند APX و گلوکاتایون پراکسیداز (GPX) (به ترتیب دارای کوفاکتور ASA و GSH) به H₂O و O₂ متابولیزه می‌شود (Ahmad et al., 2018; Khan et al., 2020). از سوی دیگر، تحت شرایط تنش محتوای H₂O₂ بالا می‌رود (Mir et al., 2018). H₂O₂ به عنوان یک فعال‌کننده قوی پروموتور ژن GST شناخته شده است (Gullner et al., 2018; Polidoros & Scandalios, 1999) و به همین علت این آنزیم در تنش‌های مختلف از جمله تنش ناشی از Cd به‌طور قابل توجهی فراتنظیم می‌شود (Li et al., 2022). افزایش فعالیت GST نه تنها به تجزیه ترکیبات سمی ناشی از پراکسیداسیون اسیدهای چرب کمک می‌کند (Gao et al., 2020)، بلکه همچنین در ترکیب GSH با دیگر مشتقات سمی ناشی از اکسیداسیون مولکول‌های زیستی نقش دارد (Cao et al., 2022). Kar و همکاران (۲۰۲۰) نیز کاهش پراکسیداسیون لیپیدی ناشی از ROS را همزمان با افزایش

همان صورت است و تجمع H_2O_2 از ظرفیت حذف ROS در گیاهان تحت تنش Cd فراتر رفته است و به علت ناتوانی در ایجاد تعادل بین تولید و حذف ROS تنش اکسیداتیو رخ داده است (جدول‌های ۲A و ۲B). در پژوهش حاضر به نظر می‌رسد که $Nano-SiO_2$ با القاء بیشتر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، به کاهش قابل توجه محتوای MDA و H_2O_2 در سلول‌ها کمک می‌کند و با ایجاد محیطی با تنش اکسیداتیو کمتر سبب پایداری غشای سلولی می‌شود که در کاهش پراکسیداسیون لیپیدی منعکس می‌شود و در نتیجه این عوامل منجر به بهبود رشد و افزایش زیست‌توده گوجه‌فرنگی تحت تنش Cd می‌شوند (جدول‌های ۱A و ۱B).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که استفاده از $Nano-SiO_2$ به عنوان یک رویکرد کارآمد در افزایش تحمل گوجه‌فرنگی در برابر تنش Cd عمل می‌کند و موجب تحریک فعالیت آنزیم‌ها و کاهش تنش اکسیداتیو می‌شود. همچنین $Nano-SiO_2$ می‌تواند به عنوان یک منبع موثر برای تولید محصولات غذایی ایمن، در مواجهه با چالش‌های امنیت غذایی به ویژه در زمین‌های آلوده به فلز سنگین Cd مورد استفاده قرار گیرد و به عنوان جایگزینی مناسب برای روش‌های سنتی در نظر گرفته شود. با این حال، برای دستیابی به درک عمیق‌تر و تایید این نتایج، پژوهش‌ها در مقیاس مزرعه‌ای ضروری به نظر می‌رسد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان از دانشگاه ارومیه به خاطر حمایت مالی برای انجام این کار پژوهشی، نهایت تشکر را دارند.

مقدار کافی ASA در گیاه، نیاز به ذخیره مناسبی GSH برای بهبود عملکرد این چرخه و تخفیف تنش اکسیداتیو است (Hasanuzzaman et al., 2017). در بین متابولیت‌های غیر آنزیمی حذف‌کننده ROS، ASA به عنوان خط مقدم دفاع، نقش کلیدی در تجزیه H_2O_2 ایفا می‌کند (Kuo et al., 2020). گزارش شده است که $Nano-SiO_2$ با افزایش فعالیت DHAR و MDHAR، موجب افزایش محتوای ASA در برنج تحت تنش اکسیداتیو شد که این امر نشان‌دهنده نقش $Nano-SiO_2$ به عنوان کوآنزیم برای فعال‌سازی این آنزیم‌ها است (Tripathi et al., 2020). ASA همچنین برای عملکرد آنزیم APX در چرخه ASA-GSH که در جمع‌آوری H_2O_2 نقش مهمی دارد، نیز ضروری است (Kuo et al., 2020). علاوه بر این، ASA به عنوان یک کوفاکتور کلیدی برای برخی آنزیم‌های مرتبط با بیوسنتز هورمون‌هایی مانند جبریلین شناخته شده است (Aguiar et al., 2023) که این موضوع می‌تواند توضیحی برای بهبود رشد و زیست‌توده در گیاهان تیمار شده با $Nano-SiO_2$ به‌ویژه در شرایط تنش در پژوهش حاضر باشد. پژوهشگران افزایش بیان ژن و فعالیت آنزیم‌های GR، SOD، GST و APX را در تنش‌های مختلف محیطی گزارش کرده‌اند (Gaafar et al., 2022; Moreno-Galván et al., 2020). در پژوهش حاضر نیز تنش Cd منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد (جدول‌های ۴A و ۴B). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی که در این پژوهش تحت تأثیر Cd القا شده است، نشان می‌دهد که این فعالیت ممکن است به اندازه کافی برای خنثی کردن ROS در گوجه‌فرنگی تحت تنش Cd موثر نباشد که جدول ۲A و ۲B این نکته را تأیید می‌کند. جدول‌های ۲A و ۲B نشان دادند محتوای H_2O_2 حتی با وجود افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به

References

- Aguiar, É. S. de, Dias, A. N., Sousa, R. M., Germano, T. A., de Sousa, R. O., Miranda, R. de S., Costa, J. H., & Dos Santos, C. P. (2023). Genome and transcriptome analyses of genes involved in ascorbate biosynthesis in pepper indicate key genes related to fruit development, stresses, and phytohormone exposures. *Plants*, *12*(19), 3367. <https://doi.org/10.3390/plants12193367>
- Ahmad, P., Abd-Allah, E. F., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., Alam, P., Bhardwaj, R., & Siddique, K. H. M. (2018). Exogenous application of calcium to 24-epibrassinosteroid pre-treated tomato seedlings mitigates NaCl toxicity by modifying ascorbate–glutathione cycle and secondary metabolites. *Scientific Reports*, *8*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31917-1>
- Altaf, M. M., Diao, X., Altaf, M. A., Ur Rehman, A., Shakoor, A., Khan, L. U., Jan, B. L., & Ahmad, P. (2022). Silicon-mediated metabolic upregulation of ascorbate glutathione (AsA-GSH) and glyoxalase reduces the toxic effects of vanadium in rice. *Journal of Hazardous Materials*, *436*, 129145. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129145>
- Alves, L. R., Prado, E. R., de Oliveira, R., Santos, E. F., de Souza, I. L., Dos Reis, A. R., Azevedo, R. A., & Gratão, P. L. (2020). Mechanisms of cadmium-stress avoidance by selenium in tomato plants. *Ecotoxicology*, *29*(5), 594–606. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02208-1>
- Ashraf, H., Ghouri, F., Liang, J., Xia, W., Zheng, Z., Shahid, M. Q., & Fu, X. (2024). Silicon dioxide nanoparticles-based amelioration of Cd toxicity by regulating antioxidant activity and photosynthetic parameters in a line developed from wild rice. *Plants*, *13*(12), 1715. <https://doi.org/10.3390/plants13121715>
- Bhardwaj, S., Sharma, D., Singh, S., Ramamurthy, P. C., Verma, T., Pujari, M., Singh, J., Kapoor, D., & Prasad, R. (2023). Physiological and molecular insights into the role of silicon in improving plant performance under abiotic stresses. *Plant and Soil*, *486*(1–2), 25–43. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05395-4>
- Boorboori, M. R. (2023). Investigating the role of silicon in reducing the risk of arsenic, cadmium, drought and salinity stresses in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12892-022-00191-z>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, *72*(1–2), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Cao, Q., Lv, W., Jiang, H., Chen, X., Wang, X., & Wang, Y. (2022). Genome-wide identification of glutathione S-transferase gene family members in tea plant (*Camellia sinensis*) and their response to environmental stress. *International Journal of Biological Macromolecules*, *205*, 749–760. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.109>
- Carmagnol, F. oise, Sinet, P.-M., Rapin, J., & Jerome, H. (1981). Glutathione-S-transferase of human red blood cells; assay, values in normal subjects and in two pathological circumstances: hyperbilirubinemia and impaired renal function. *Clinica Chimica Acta; International Journal of Clinical Chemistry*, *117*(2), 209–217. [https://doi.org/10.1016/0009-8981\(81\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0009-8981(81)90040-1)
- Dorion, S., Ouellet, J. C., & Rivoal, J. (2021). Glutathione metabolism in plants under stress: Beyond reactive oxygen species detoxification. *Metabolites*, *11*(9), 641. <https://doi.org/10.3390/metabo11090641>
- Gaafar, R. M., Osman, M. E.-A. H., Abo-Shady, A. M., Almohisen, I. A. A., Badawy, G. A., El-Nagar, M. M. F., & Ismail, G. A. (2022). Role of antioxidant enzymes and glutathione S-transferase in bromoxynil

- herbicide stress tolerance in wheat plants. *Plants*, 11(20), 2679. <https://doi.org/10.3390/plants11202679>
- Gao, J., Chen, B., Lin, H., Liu, Y., Wei, Y., Chen, F., & Li, W. (2020). Identification and characterization of the glutathione S-Transferase (GST) family in radish reveals a likely role in anthocyanin biosynthesis and heavy metal stress tolerance. *Gene*, 743, 144484. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2020.144484>
- Geetha, P., & Rani, I. (2020). Post harvest technology and value addition of tomatoes. *Food Science Research Journal*, 11(2), 217–229. <https://doi.org/10.15740/HAS/FSRJ/11.2/217-229>
- Ghouri, F., Sarwar, S., Sun, L., Riaz, M., Haider, F. U., Ashraf, H., Lai, M., Imran, M., Liu, J., & Ali, S. (2024). Silicon and iron nanoparticles protect rice against lead (Pb) stress by improving oxidative tolerance and minimizing Pb uptake. *Scientific Reports*, 14(1), 5986. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55810-2>
- Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59(2), 309–314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
- Gullner, G., Komives, T., Király, L., & Schröder, P. (2018). Glutathione S-transferase enzymes in plant-pathogen interactions. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1836. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01836>
- Guo, J., Ge, C., Wang, G. & Zhou, D. (2024). Mechanisms of chloride to promote the uptake and accumulation of cadmium in rice (*Oryza sativa* L.). *Science of the Total Environment*, 926, 172046. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172046>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I., & Fujita, M. (2017). Glutathione in plants: biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23, 249–268. <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0422-2>
- Heath, R. L., & Packer, L. (1969). Photoperoxidation in isolated chloroplast, kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry*, 125, 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). *The water-culture method for growing plants without soil*. California Agricultural Experiment Station.
- Hussain, B., Riaz, L., Javed, K., Umer, M. J., Abbas, A., Rao, U., Khan, S. W., Abbas, Q., Din, S. ud, & Batool, R. (2022). Plant glutathione transferases and their role in the mitigation of abiotic stresses. In T., Aftab & K. R. Hakeem (Eds.), *Antioxidant defense in plants: Molecular basis of regulation* (pp. 235–258). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7981-0-11>
- Ji, D., Li, Q., Guo, Y., An, W., Manavski, N., Meurer, J., & Chi, W. (2022). NADP⁺ supply adjusts the synthesis of photosystem I in Arabidopsis chloroplasts. *Plant Physiology*, 189(4), 2128–2143. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac161>
- Jiang, Z., Zhu, H., Zhu, H., Tao, Y., Liu, C., Liu, J., Yang, F., & Li, M. (2022). Exogenous ABA enhances the antioxidant defense system of maize by regulating the AsA-GSH cycle under drought stress. *Sustainability*, 14(5), 3071. <https://doi.org/10.3390/su14053071>
- Kar, M., & Öztürk, Ş. (2020). Analysis of Phaseolus vulgaris gene expression related to oxidative stress response under short-term cadmium stress and relationship to cellular H₂O₂. *Biologia*, 75(1), 1009–1016. <https://doi.org/10.2478/s11756-019-00394-w>
- Kaya, C., & Ashraf, M. (2022). Sodium hydrosulfite together with silicon detoxifies arsenic toxicity in tomato plants by modulating the AsA-GSH cycle. *Environmental Pollution*, 294, 118608. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118608>
- Khan, A., Numan, M., Khan, A. L., Lee, I.-J., Imran, M., Asaf, S., & Al-Harrasi, A. (2020). Melatonin: Awakening the defense mechanisms during plant oxidative stress. *Plants*, 9(4), 407.

<https://doi.org/10.3390/plants9040407>

- Kuo, E. Y., Cai, M. S., & Lee, T. M. (2020). Ascorbate peroxidase 4 plays a role in the tolerance of *Chlamydomonas reinhardtii* to photo-oxidative stress. *Scientific Reports*, 10(1), 13287. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70247-z>
- Li, J., Wang, C., Wu, X., Gong, B., Lü, G., & Gao, H. (2022). Molecular cloning of a TCHQD class glutathione S-transferase and GST function in response to GABA induction of melon seedlings under root hypoxic stress. *Horticulturae*, 8(5), 446. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050446>
- Mahmoudi, F., Shikhzadehmosadegh, P., Zare, N., & Esmailpour, B. (2024). Effect of seed pretreatment with salicylic acid on seed germination, growth and biochemical indices of quinoa seedlings (*Chenopodium quinoa* willd.) under cadmium stress. *Journal of Plant Biological Sciences*, 15(1), 1-25. <https://doi.org/10.22108/ijpb.2024.138548.1330> [In Persian].
- Mir, M. A., John, R., Alyemeni, M. N., Alam, P., & Ahmad, P. (2018). Jasmonic acid ameliorates alkaline stress by improving growth performance, ascorbate glutathione cycle and glyoxylase system in maize seedlings. *Scientific Reports*, 8(1), 2831. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21097-3>
- Moreno-Galván, A. E., Cortés-Patiño, S., Romero-Perdomo, F., Uribe-Vélez, D., Bashan, Y., & Bonilla, R. R. (2020). Proline accumulation and glutathione reductase activity induced by drought-tolerant rhizobacteria as potential mechanisms to alleviate drought stress in Guinea grass. *Applied Soil Ecology*, 147, 103367. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103367>
- Naciri, R., Lahrir, M., Benadis, C., Chtouki, M., & Oukarroum, A. (2021). Interactive effect of potassium and cadmium on growth, root morphology and chlorophyll a fluorescence in tomato plant. *Scientific Reports*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84990-4>
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5), 867–880. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>
- Ogugua, U. V., Kanu, S. A., & Ntushelo, K. (2022). Gibberellic acid improves growth and reduces heavy metal accumulation: A case study in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings exposed to acid mine water. *Heliyon*, 8(12), e12399. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12399>
- Pan, J., Guan, M., Xu, P., Chen, M., & Cao, Z. (2021). Salicylic acid reduces cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) by regulating root cell wall composition via nitric oxide signaling. *Science of the Total Environment*, 797, 149202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149202>
- Polidoros, A. N., & Scandalios, J. G. (1999). Role of hydrogen peroxide and different classes of antioxidants in the regulation of catalase and glutathione S-transferase gene expression in maize (*Zea mays* L.). *Physiologia Plantarum*, 106(1), 112–120. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106116.x>
- Prajapati, P., Gupta, P., Kharwar, R. N., & Seth, C. S. (2022). Nitric oxide mediated regulation of ascorbate-glutathione pathway alleviates mitotic aberrations and DNA damage in *Allium cepa* L. under salinity stress. *International Journal of Phytoremediation*, 25(4), 403-414. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2086215>
- Rahmatizadeh, R., Jamei, R., Arvin, M. J., & Rezanejad, F. (2021). Upregulation of *LeNRAMP3* and *LeFER* genes in *Solanum lycopersicum* confers its cadmium tolerance. *Russian Journal of Plant Physiology*, 68(S1), S92–S102. <https://doi.org/10.1134/S1021443721070104>
- Riaz, M., Kamran, M., Rizwan, M., Ali, S., Parveen, A., Malik, Z., & Wang, X. (2021). Cadmium uptake and translocation:

- synergetic roles of selenium and silicon in Cd detoxification for the production of low Cd crops: A critical review. *Chemosphere*, 129690. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129690>
- Sardar, R., Ahmed, S., Shah, A. A., & Yasin, N. A. (2022). Selenium nanoparticles reduced cadmium uptake, regulated nutritional homeostasis and antioxidative system in *Coriandrum sativum* grown in cadmium toxic conditions. *Chemosphere*, 287, 132332. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132332>
- Sarker, U., & Oba, S. (2018). Catalase, superoxide dismutase and ascorbate-glutathione cycle enzymes confer drought tolerance of *Amaranthus tricolor*. *Scientific Reports*, 8(1), 16496. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34944-0>
- Schaedle, M., & Bassham, J. A. (1977). Chloroplast glutathione reductase. *Plant Physiology*, 59(5), 1011–1012. <https://doi.org/10.1104/pp.59.5.1011>
- Sharma, B., Kumawat, K. C., Tiwari, S., Kumar, A., Dar, R. A., Singh, U., & Cardinale, M. (2023). Silicon and plant nutrition-dynamics, mechanisms of transport and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture: A review. *Pedosphere*, 33(4), 534–555. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.004>
- Tripathi, D. K., Varma, R. K., Singh, S., Sachan, M., Guerriero, G., Kushwaha, B. K., Bhardwaj, S., Ramawat, N., Sharma, S., & Singh, V. P. (2020). Silicon tackles butachlor toxicity in rice seedlings by regulating anatomical characteristics, ascorbate-glutathione cycle, proline metabolism and levels of nutrients. *Scientific Reports*, 10(1), 14078. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65124-8>
- Velikova, V., Yordanov, I., & Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, 151(1), 59–66. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1)
- Wang, L., Ning, C., Pan, T., & Cai, K. (2022). Role of silica nanoparticles in abiotic and biotic stress tolerance in plants: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 1947. <https://doi.org/10.3390/ijms23041947>
- Zechmann, B. (2020). Subcellular roles of glutathione in mediating plant defense during biotic stress. *Plants*, 9(9), 1067. <https://doi.org/10.3390/plants9091067>
- Zhang, F., & Kirkham, M. B. (1996). Antioxidant responses to drought in sunflower and *Sorghum* seedlings. *New Phytologist*, 132, 361–373. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb01856.x>
- Zhang, Z. J., Tang, L., & Li, Y. J. (2020). Effects of foliar silicon application on electron transport of PSII in tomato leaves under cadmium stress. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 33(12), 2897–2904. <https://doi.org/10.16213/j.cnki.scjas.2020.12.031>
- Zhao, H., Guan, J., Liang, Q., Zhang, X., Hu, H., & Zhang, J. (2021). Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of *sassafras* seedlings. *Scientific Reports*, 11(1), 9913. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89322-0>
- Zulfiqar, U., Ayub, A., Hussain, S., Waraich, E. A., El-Esawi, M. A., Ishfaq, M., Ahmad, M., Ali, N., & Maqsood, M. F. (2022). Cadmium toxicity in plants: recent progress on morpho-physiological effects and remediation strategies. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1–58. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00645-3>