

مقاله پژوهشی

تأثیر نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم بر برخی پارامترهای رشدی و آنزیم‌های آنتی اکسیدانی انگور رقم سلطانی سفید تحت سمیت کادمیوم

صالح شهابی‌وند^۱، حسین شعبانی^۱، غلامرضا گوهری^۲، احمد آقایی^{۱*}

^۱گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

^۲گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴)

چکیده

کادمیوم از جمله فلزات سنگین سمی است که به عنوان خطر بالقوه برای انسان و دیگر جانداران به شمار می‌آید و نیازمند توجه بیشتر جهت جلوگیری از ورود این فلز به زنجیره غذایی است. در سال‌های اخیر همراه با توسعه فناوری نانو، از این فناوری در جهت پیش‌برد اهداف زیست محیطی استفاده شده است. به منظور مطالعه اثرات نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم بر نهال‌های انگور رقم سلطانی سفید تحت تنش کادمیوم، آزمایشی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. فاکتور اول کاربرد کادمیوم در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) و فاکتور دوم شامل محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) بود. نتایج حاصل نشان داد که تنش کادمیوم باعث کاهش در شاخص‌های رشدی و رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش در میزان پراکسید هیدروژن، مالون دی‌آلدهید و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی (سوپراکسید دیسموتاز و گایاکول پراکسیداز) شد. محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم سبب بهبود پارامترهای رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و از طرف دیگر کاهش مالون دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن تحت تنش کادمیوم در نهال‌های انگور شد. براساس نتایج این پژوهش به نظر می‌رسد محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم (به‌خصوص در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) می‌تواند سبب افزایش پارامترهای رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی نهال‌های انگور سلطانی سفید تحت سمیت کادمیوم شده و باعث افزایش تحمل گیاه به اثرات مضر این فلز سمی شود.

واژه‌های کلیدی: انگور سلطانی، تحمل، کادمیوم، نانوذره، تیتانیوم، روی

مقدمه

شمالی یافت می‌شوند. انگور یکی از محصولات مهم باغی است که در حال حاضر کشت آن در سراسر جهان گسترش یافته و میوه‌های انگور به‌صورت تازه‌خوری و فرآوری شده (نوشیدنی، مربا، آب میوه، ژله، عصاره دانه انگور، کشمش، سرکه و روغن هسته انگور) مصرف می‌شود. ایران دارای مقام

گیاه انگور (*Vitis vinifera* L.) از خانواده انگورسانان (Vitaceae) است که شامل ۱۴ جنس و حدود ۹۰۰ گونه است (Soejima and Wen, 2006). جنس ویتیس (*Vitis*) از خانواده ویتاسه شامل حدود ۷۰ گونه است که در مناطق معتدل نیم‌کره

*نویسنده مسئول، نشانی پست الکترونیکی: aghaee2001@yahoo.com

نهم در تولید انگور و مقام چهارم در تولید کشمش در سطح جهانی است (FAO, 2016). ایران با بیش از ۳۰۰ هزار هکتار سطح زیرکشت انگور و با تولید بیش از ۳ میلیون تن انگور یکی از کشورهای مطرح تولیدکننده انگور می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶). رقم سلطانی (Sultana) یک نوع انگور سفید (سبز کم رنگ) بیضی شکل است که برای تازه‌خوری و شیره استفاده می‌شود کشمش این نوع انگور کوچک و شیرین است و رنگ طلایی دارد. رنگ و طعم مناسب، اتصال محکم حبه به خوشه، دیر خشک شدن دم خوشه و حبه، تراکم مناسب خوشه، یکنواختی رسیدن حبه‌ها، مقاومت در برابر بیماری‌ها، مقاومت در حمل‌ونقل و قابلیت انبارداری و نگهداری به دلیل ضخامت پوست انگور سلطانی از جمله ویژگی‌هایی است که باعث شده طرفداران زیادی در دنیا داشته باشد (دولتی بانه، ۱۳۹۵).

انسان در اثر فعالیت‌های روزمره خود مقادیر قابل توجهی از آلاینده‌های مختلف را به آب، خاک و هوا وارد می‌کند. از بین آلاینده‌های موجود، تجمع عناصر سنگین به یک مشکل زیست‌محیطی جهانی تبدیل شده است به‌طوری‌که دوام بلندمدت زیست‌شناختی و باقی ماندن در خاک، سبب انباشته شدن این فلزات در خاک و زنجیره غذایی انسان می‌گردد. در بین عناصر سنگین، کادمیوم یک عنصر غیرضروری برای گیاه است که هیچ نقش بیولوژیکی ندارد و حتی در غلظت‌های کم (بیشتر از ۵ تا ۱۰ میکروگرم بر میلی‌گرم وزن خشک برگ) نیز برای اکثر گیاهان سمی است (White and Brown, 2010). از منابع عمده کادمیوم می‌توان فاضلاب کارخانه‌های صنعتی و شهری، مصرف بی‌رویه حشره‌کش‌ها و کودهای شیمیایی به ویژه انواع فسفات را نام برد (Zulfiqar et al., 2022). سمیت کادمیوم از نظر ریخت‌شناسی، فیزیولوژیکی و بیولوژیکی گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کادمیوم منجر به اختلالات فیزیولوژیکی در گیاه، به ویژه تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن، به علت افزایش تنش اکسیداتیو می‌شود (Moradi et al., 2019).

نانوذرات علاوه بر تأثیر بر رشد و نمو گیاهان، نقش مهمی در حفاظت از گیاهان در برابر تنش‌های غیرزیستی مختلف

دارند. این ذرات فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را شبیه‌سازی می‌کنند و از این‌رو در سمیت‌زدایی در طی تنش اکسیداتیو نقش دارند (Shah et al., 2019). اندازه کوچک و مساحت سطح بزرگ نانوذرات، دسترسی به فلزات سمی برای اتصال و در نتیجه کاهش در دسترس بودن و سمیت فلزات را فراهم می‌کند (Worms et al., 2012). نشان داده شده است که نانوذرات از سیستم فتوسنتزی در مقابل تنش‌های غیرزنده محافظت می‌کنند و با سرکوب تنش اکسیداتیو، فتوسنتز را بهبود می‌بخشند. با این حال پاسخ گیاهان به تیمارهای نانوذرات با توجه به‌گونه گیاهی و نانوذره مورد استفاده، متفاوت است (Siddiqui et al., 2014). در مطالعات قبلی تأثیر مثبت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (به عنوان عنصر غیرضروری ولی مفید در مقادیر کم برای گیاه) و اکسید روی بر ویژگی‌های رشدی، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان تحت تنش‌های غیرزیستی گزارش شده است (Emamveridian et al., 2021; Singh and Lee, 2016; Venkatachalam et al., 2017).

با توجه به اینکه منطقه آذربایجان یکی از قطب‌های اصلی تولید انگور در کشور محسوب می‌شود و نیز مشکلات زیست‌محیطی ناشی افزایش غلظت فلزات سنگین در آب آبیاری و خاک‌های زراعی، در این پژوهش اثرات محلول‌پاشی نانوذرات روی و تیتانیوم بر میزان شاخص‌های رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و مارکرهای اکسیداتیو انگور رقم سلطانی سفید تحت تنش کادمیوم مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌منظور بررسی کاربرد نانوذرات اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم در کاهش سمیت فلز سنگین کادمیوم (Cd) در گیاه انگور رقم سلطانی سفید به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده کشاورزی مراغه با سه تکرار انجام شد. قلمه‌های ریشه‌دار سه ساله رقم سلطانی سفید از مرکز

تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی واقع در شهرستان اشنویه تهیه شد. تیمارهای آزمایشی شامل کاربرد فلز سمی کادمیوم (به صورت نمک کلرید کادمیوم) در سطوح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک و کاربرد نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم در سه سطح (برای هر کدام از نانوذرات روی و تیتانیوم شامل صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) بودند. نحوه تهیه نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (با اندازه ۳۰-۲۰ نانومتر) و نانوذرات اکسید روی (با اندازه ۱۰۰-۸۰ نانومتر) در مطالعات قبلی ما توضیح داده شده است (ثریا و همکاران، ۱۳۹۹؛ Gohari et al., 2020). گیاهان بعد از انتقال به گلخانه در گلدانهای هفت لیتری به صورت کشت خاکی در بستر خاک و کوکوپیت کاشته شد. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک به صورت: شن ۷۵٪، سیلت ۱۵٪، رس ۱۰٪، ماده آلی ۱/۲۸٪، کادمیوم ۱/۸ میلی گرم بر کیلوگرم، نیتروژن کل ۰/۱۳٪، فسفر ۳۱/۸ میلی گرم بر کیلوگرم، پتاسیم ۲۹۷ میلی گرم بر کیلوگرم، pH ۷/۲ و EC ۱/۹ dS/m بود. گیاهان تا زمان ظهور ۱۰ برگ حقیقی با محلول یک چهارم هوگلند تغذیه شد. پس از مرحله ۱۰ برگی گیاهچه‌ها، به منظور اعمال تنش فلز سنگین کادمیم، غلظت‌های مورد نظر کادمیم به آب آبیاری (در سه مرحله) اضافه شد. گیاهان شاهد فقط با آب آبیاری (بدون استفاده از کادمیم)، گروه دیگر با غلظت ۵۰ میلی گرم و بقیه با غلظت ۱۰۰ میلی گرم آبیاری شدند. ۲۰ روز بعد از اعمال تنش و به منظور بررسی اثرات نانوذرات، گیاهان چهار مرتبه و با فاصله زمانی چهار روز با غلظت‌های صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر از نانوذره اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم محلول‌پاشی شدند. به منظور افزایش سطح تماس و جذب، مقدار پنج قطره محلول توئین ۲۰ به تمام محلول‌ها اضافه شد و تمام گیاهان با آب معمولی و محلول توئین ۲۰ محلول‌پاشی شدند. نمونه‌برداری از گیاهان دو ماه پس از اعمال تیمار با نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم (در مرحله رشد رویشی)، به منظور اندازه‌گیری میزان شاخص‌های رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی، مالون دی‌آلدئید، پراکسید هیدروژن و میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل گایاکول پراکسیداز

(GPX) و سوپراکسید دیسموتاز (SOD) انجام گرفت. سپس نمونه‌های برگ‌ی برداشت‌شده در داخل تانک ازت قرار داده شد. بعد نمونه‌های فریز شده تا زمان اندازه‌گیری شاخص‌ها در فریزر (۸۰- درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه و برگ گیاهان، نمونه‌ها را در داخل آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده سپس وزن خشک نمونه‌ها با ترازوی ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد.

سنجش رنگیزه‌های فتوسنتزی: از نمونه برگ به مقدار ۰/۲ گرم وزن کرده و در هاون چینی با استفاده از نیتروژن مایع پودر گردید. سپس ۲۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد به نمونه اضافه شده و بعد از هضم در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد، سپس عصاره به دست آمده به داخل میکروتیوب ریخته شد. میزان جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل *a* و ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل *b* خوانده شد. در نهایت با استفاده از فرمول‌های آرنون میزان رنگیزه‌ها بر حسب میلی گرم بر گرم وزن تر نمونه به دست آمد (Arnon, 1967).

تهیه عصاره آنزیمی: جهت تهیه عصاره آنزیمی برای تعیین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ابتدا حدود ۰/۵ گرم از هر نمونه گیاهی در هاون و به کمک نیتروژن مایع به خوبی پودر گردید. پودر حاصله به تیوب‌های ۲ میلی‌لیتری منتقل و به آن ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم اضافه شد. در ادامه نمونه‌ها به مدت ۳۵ دقیقه با ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. پس از سانتریفیوژ نمودن نمونه‌ها، مایع رویی آن‌ها به تیوب‌های جدید منتقل و بلافاصله به یخچال ۸۰- درجه سانتی‌گراد منتقل شده و از آن برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز استفاده گردید.

اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD): اندازه‌گیری آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) طبق روش Giannopolitis و همکاران (۱۹۹۷) انجام شد. مخلوط

واکنش شامل ۰/۲ میلی‌لیتر بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار، ۰/۲ میلی‌لیتر متیونین ۰/۲ مولار، ۰/۱ میلی‌لیتر EDTA ۳ میلی‌مولار و ۱ میلی‌لیتر آب مقطر و ۰/۱ میلی‌لیتر سدیم کربنات (Na_2CO_3) ۱/۵ مولار و در آخر ۰/۱ میلی‌لیتر ریپولواوین می‌باشد. درون هر لوله ۵۰ میکرولیتر نمونه آنزیمی اضافه شد. لوله‌های آزمایش به مدت ۱۶ دقیقه در فاصله ۳۰ سانتی‌متری در منبع نور قرار گرفته بعد به مدت ۱۵ دقیقه در تاریکی کامل نگهداری شد تغییرات جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۶۰ نانومتر خوانده شد. یک واحد آنزیمی بر اساس حجم عصاره آنزیمی مرتبط با ۵۰ درصد ممانعت از انجام واکنش بیان می‌شود.

اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز:

کمپلکس واکنش حاوی ۱ میلی‌لیتر بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار، ۲۵۰ میکرولیتر EDTA ۰/۱ میلی‌مولار، ۱ میلی‌لیتر گایاکول ۵ میلی‌مولار، ۱ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۱۵ میلی‌مولار و ۵۰ میکرولیتر از محلول آنزیمی استخراج شده بود. تغییرات جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۷۰ نانومتر در مدت یک دقیقه ثبت و میزان فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی $\text{mmol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ۲۶/۶ محاسبه شد (Chance and Maehly, 1955).

اندازه‌گیری میزان پراکسید هیدروژن (H_2O_2): برای

اندازه‌گیری میزان پراکسید هیدروژن ۰/۲ گرم نمونه برگ در ۲ میلی‌لیتر از محلول ۰/۱ درصد تری‌کلرو استیک اسید (وزنی-حجمی) همگن شده و در دور ۱۲۰۰۰ به مدت ۱۵ دقیقه سانتی‌فیوژ قرار داده شد. سپس کمپلکس واکنش با ترکیب ۰/۵ میلی‌لیتر سوپرناتانت، ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات ۱۰ میلی‌مولار با pH برابر ۷ و یک میلی‌لیتر پتاسیم یدید یک مولار به‌دست آمد. میزان جذب نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتری در طول موج ۳۹۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. در نهایت میزان H_2O_2 با استفاده از ضریب خاموشی $\text{mmol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ۲۸ محاسبه و به صورت میکرومول بر گرم وزن تر بیان گردید (Sergiev et al., 1997).

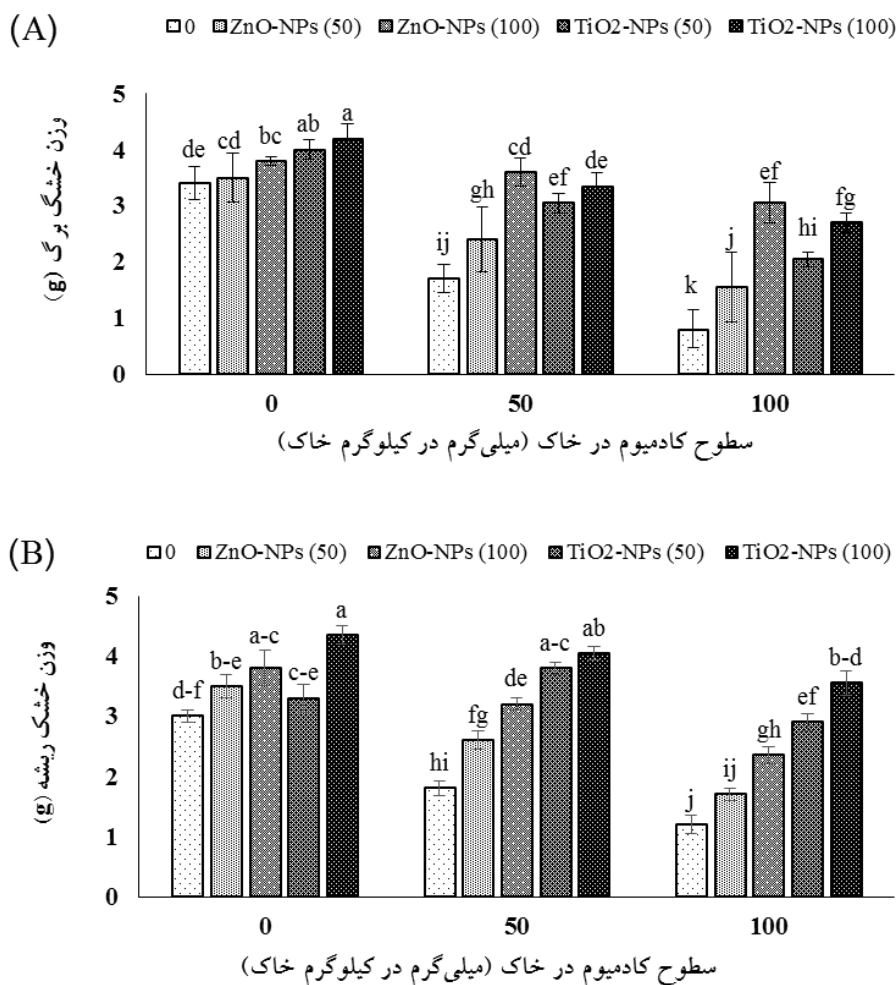
سنجش میزان مالون دی‌آلدهید: ۰/۲ گرم از نمونه برگ

با ۲ میلی‌لیتر از محلول ۰/۱ درصد تری‌کلرو استیک اسید همگن و به‌مدت ۱۰ دقیقه در دور ۱۵۰۰۰ سانتی‌فیوژ گردید. ۲ میلی‌لیتر از سوپرناتانت نمونه با ۴ میلی‌لیتر از محلول ۲۰٪ تری‌کلرو استیک اسید محتوی ۰/۵ درصد اسید تیوباربیتریک مخلوط شد. کمپلکس حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و سپس به حمام آب سرد منتقل گردید. نمونه‌ها مجدداً به مدت ۱۰ دقیقه در دور ۱۰۰۰۰ سانتی‌فیوژ شدند. جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری و ثبت گردید. میزان پراکسید شدن لیپیدها با استفاده از اختلاف بین طول‌موج‌های جذبی و ضریب خاموشی $\text{mmol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ۱۵۵ به‌دست آمد (Health and Packer, 1968).

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد که در آن اثر نانوذرات اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم (سه سطح) و تنش کادمیوم (سه سطح) مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C ver 2.1 انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد آنالیز و نمودارها با نرم‌افزار Excel 2016 رسم شدند.

نتایج و بحث

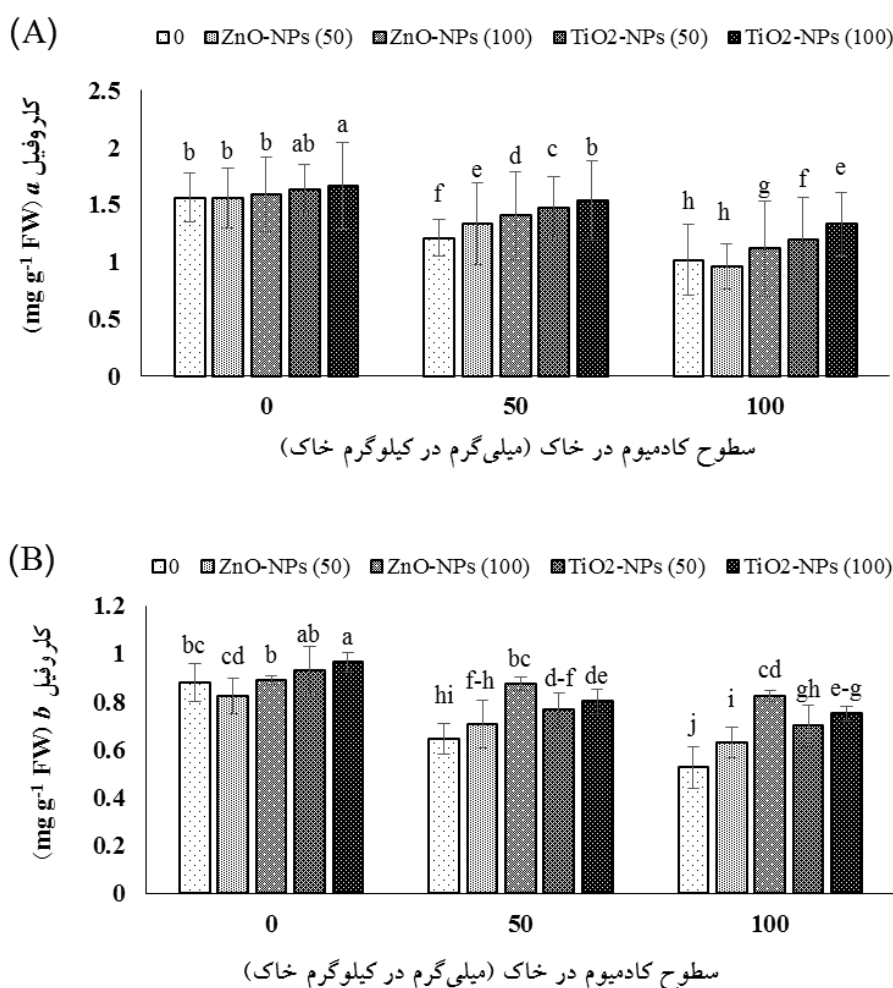
وزن خشک برگ و ریشه: نتایج نشان داد که افزایش غلظت کادمیوم در خاک باعث کاهش وزن خشک برگ و ریشه شد بطوریکه کم‌ترین میزان وزن خشک برگ (۰/۸ گرم) و ریشه (۱/۲ گرم) در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بدون تیمار نانوذره بدست آمد (شکل A و B-۱). کادمیوم یک عنصر غیرضروری در گیاه است که هیچ نقش بیولوژیکی ندارد و حتی در غلظت‌های کم نیز برای گیاهان سمی است. نشان داده شده است که سمیت کادمیوم با ایجاد علائم مورفولوژیکی متعدد مانند کلروز، نکروز و پیدایش برگ گیاه، عملکرد گیاه جوانه‌زنی و رشد و همچنین کاهش زیست‌توده، عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Abbas et al., 2017). از طرف دیگر کاربرد نانوذرات روی و تیتانیوم در همه سطوح کادمیوم در خاک، اثر



شکل ۱- اثر سطوح مختلف نانوذرات اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم بر وزن خشک برگ (A) و ریشه (B) انگور سلطانی تحت سطوح مختلف کادمیوم در خاک. حروف غیر مشابه در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) است.

باشد (Bajguz et al., 2010). همچنین اثر نانوذرات روی (۱۰۰ میلی‌گرم) در بهبود شاخص وزن خشک برگ در سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم اندکی بیشتر از نانوذره تیتانیوم بود (شکل ۱-A). برخی از مطالعات گزارش کرده‌اند که اکسید روی رشد گیاه را تحت تنش فلزات سنگین افزایش می‌دهد (Rasool et al., 2018). با توجه به تحقیق Venkatachalam و همکاران (۲۰۱۷)، مولکول‌های پوشش داده‌شده نانوذرات اکسید روی، رشد نهال‌های سوبابل (*Leucaena leucocephala*) تحت تنش کادمیوم و سرب را نسبت به شاهد افزایش دادند. روی در مقیاس نانو باعث افزایش وزن خشک برگ، ساقه و ریشه گیاه رامی (*Boehmeria nivea*) تحت تنش

مثبت افزایشی بر شاخص‌های رشدی داشت بطوریکه بیش‌ترین میزان وزن خشک برگ (۴/۲ گرم) و ریشه (۴/۳۵ گرم) در تیمار نانوذره تیتانیوم در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم و بدون اعمال تنش مشاهده شد (شکل ۱-A و B). نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم رشد و زیست‌توده گیاهان سویا تحت تنش کادمیوم را افزایش دادند (Singh and Lee, 2016). قرار گرفتن در معرض محلول‌پاشی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم رشد ذرت را بهبود بخشید، اما پاسخ آن به دوزهای اعمال‌شده بستگی دارد (Lian et al., 2020). گزارش شده که دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند میزان جذب ریزمغذی‌ها و عناصر پرمصرف را افزایش دهد که این امر می‌تواند عامل اصلی در رشد گیاه و افزایش زیست‌توده



شکل ۲- اثر سطوح مختلف نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم بر میزان کلروفیل *a* (A) و کلروفیل *b* (B) انگور سلطانی تحت سطوح مختلف کادمیوم در خاک. حروف غیر مشابه در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) است.

کادمیوم شد (Gong et al., 2017). نتایج شکل ۲ نشان داد که کاربرد نانوذرات روی و تیتانیوم تا حد زیادی از کاهش غلظت کلروفیل *a* و *b* در سطوح مختلف کادمیوم جلوگیری کرد. بیش‌ترین میزان کلروفیل *a* (۱/۶۶۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل *b* (۰/۹۶۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) در تیمار نانوذره تیتانیوم در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بدون اعمال تنش کادمیوم مشاهده گردید (شکل B و A-۲). اثر مثبت دی اکسید تیتانیوم بر میزان فتوسنتز و محتوای کلروفیل در برنج در معرض همزمان با دی اکسید تیتانیوم-کادمیوم (Ji et al., 2017) و سویا در معرض نانوذرات دی اکسید تیتانیوم تحت تنش کادمیوم (Singh and Lee, 2016) گزارش شده است. دی اکسید تیتانیوم تخریب کلروفیل را

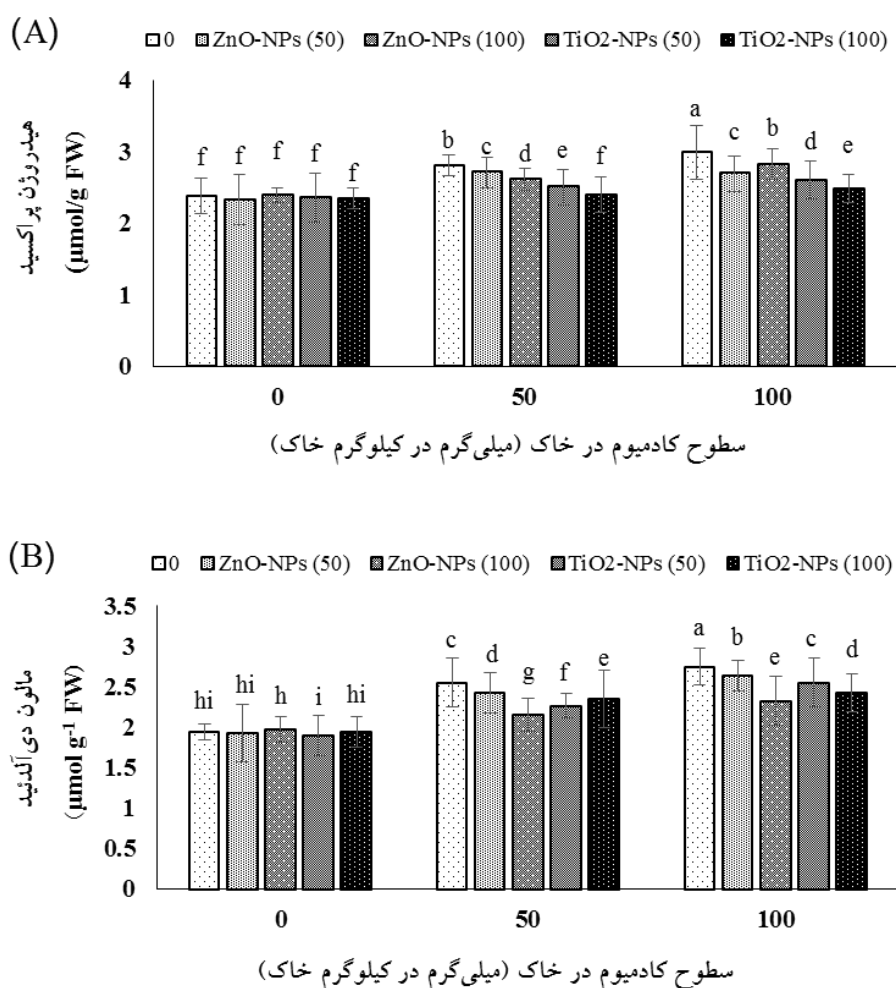
کادمیوم شد (Gong et al., 2017). نتایج شکل ۲ نشان داد که کاربرد نانوذرات روی و تیتانیوم تا حد زیادی از کاهش غلظت کلروفیل *a* و *b* در سطوح مختلف کادمیوم جلوگیری کرد. بیش‌ترین میزان کلروفیل *a* (۱/۶۶۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل *b* (۰/۹۶۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) در تیمار نانوذره تیتانیوم در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بدون اعمال تنش کادمیوم مشاهده گردید (شکل B و A-۲). اثر مثبت دی اکسید تیتانیوم بر میزان فتوسنتز و محتوای کلروفیل در برنج در معرض همزمان با دی اکسید تیتانیوم-کادمیوم (Ji et al., 2017) و سویا در معرض نانوذرات دی اکسید تیتانیوم تحت تنش کادمیوم (Singh and Lee, 2016) گزارش شده است. دی اکسید تیتانیوم تخریب کلروفیل را

کاهش می‌دهد و بیوستز آن را تحریک می‌کند و می‌تواند فتوستز را با تثبیت کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها تقویت کند (Mohammadi *et al.*, 2014). در این مطالعه، تأثیر نانوذره روی (در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم) بر میزان کلروفیل *b* در گیاهان انگور سلطانی بیشتر از اثر نانوذره تیتانیوم تحت تنش ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بود (شکل ۲-B). مولکول‌های نانوذرات اکسید روی رنگدانه‌های فتوستزی را در نهال‌های سوبابل (*Leucaena leucocephala*) نسبت به شاهد افزایش دادند (Venkatachalam *et al.*, 2017). محلول‌پاشی برگی نانوذرات روی باعث افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوستزی و فعالیت PSII در گیاه *Cucumis sativus* شد و حداکثر این پارامترها در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذره روی مشاهده شد (Ghani *et al.*, 2022). محمودسلطانی و همکاران (۱۳۹۹) گزارش کردند که فلز روی با دخالت در تنظیم غلظت‌های سیتوپلاسمی آهن و منیزیم، در بیوستز کلروفیل و کاروتنوئیدها نقش مهمی را ایفا می‌کند.

غلظت پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید و میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان: نتایج شکل B و A-۳ نشان داد که افزایش غلظت کادمیوم در خاک (با کاربرد نانوذره و بدون نانوذره) باعث افزایش میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید در انگور سلطانی شد بطوریکه بیشترین مقدار هر دو پارامتر در گیاهان با سطح کادمیوم ۱۰۰ میلی‌گرم و فاقد تیمار نانوذره ثبت شد. تنش اکسیداتیو در گیاهان را می‌توان با اندازه‌گیری محتوای H_2O_2 (به عنوان یکی از گونه‌های فعال اکسیژن) و مالون دی‌آلدهید (بیانگر سطح پراکسیداسیون اسیدهای چرب غشای سلول) در بافت‌های گیاهی ارزیابی کرد. به عبارتی افزایش مقادیر این شاخص‌ها بیانگر افزایش سطح تنش ناشی از سمیت فلز سنگین کادمیوم در گیاه انگور رقم سلطانی است. سمیت اصلی کادمیوم برای نهال‌های انگور تولید گونه‌های آزاد اکسیژن است که می‌تواند منجر به از بین رفتن یکپارچگی غشا و همچنین آسیب به پروتئین‌ها، لیپیدها و سایر مولکول‌های حیاتی شود (Rizwan *et al.*, 2016). در کنار این یافته‌ها، نتایج مربوط به شکل B و A-۴ نشان داد که با

افزایش سطح کادمیوم در خاک میزان فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز نیز افزایش معنی‌دار حاصل کرد. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز باعث تبدیل رادیکال سمی سوپراکسید به پراکسید هیدروژن شده و آنزیم گایاکول پراکسیداز، پراکسید هیدروژن را به آب و اکسیژن تجزیه می‌کند. مشخص شده که آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و گایاکول پراکسیداز (GPX) با مهار و تنظیم سطح گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) به گیاهان در معرض تنش کمک می‌کنند (Mushtaq *et al.*, 2020). مطالعات نشان داده‌اند که افزایش فعالیت GPX و SOD در گیاهان نشان‌دهنده افزایش تحمل در برابر سمیت تنش غیرزیستی است (Zhang *et al.*, 2017) و آسیب اکسیداتیو ناشی از افزایش سطح پراکسید هیدروژن و رادیکال سوپراکسید (که این رادیکال‌ها می‌توانند منجر به افزایش سطح مالون دی‌آلدهید شوند) را کاهش می‌دهد (Jahan *et al.*, 2018). در این تحقیق، افزایش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید در گیاهان انگور سلطانی با وجود افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نشان‌دهنده این موضوع است که افزایش سطح این آنزیم‌ها کافی برای غلبه بر میزان بالای این دو شاخص تنش اکسیداتیو (یعنی پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید) نبوده است.

از طرفی تیمار نانوذرات روی و تیتانیوم باعث کاهش معنی‌دار در غلظت پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید در سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در خاک شد، هر چند که نانوذرات اثر معنی‌داری بر این دو پارامتر در سطح صفر کادمیوم نداشتند (شکل B و A-۳). در کنار این یافته‌ها، نتایج مربوط به شکل B و A-۴ نشان داد که کاربرد برگی نانوذرات روی و تیتانیوم در خاک فاقد تیمار کادمیوم اثر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نداشت ولی در تیمار ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بالارفتن فعالیت آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز به طور معنی‌دار در مقایسه با گیاهان فاقد نانوذرات شد. نانوذرات اکسید روی به شدت باعث افزایش رشد، پارامترهای فیزیولوژیکی و فعالیت آنزیم‌های

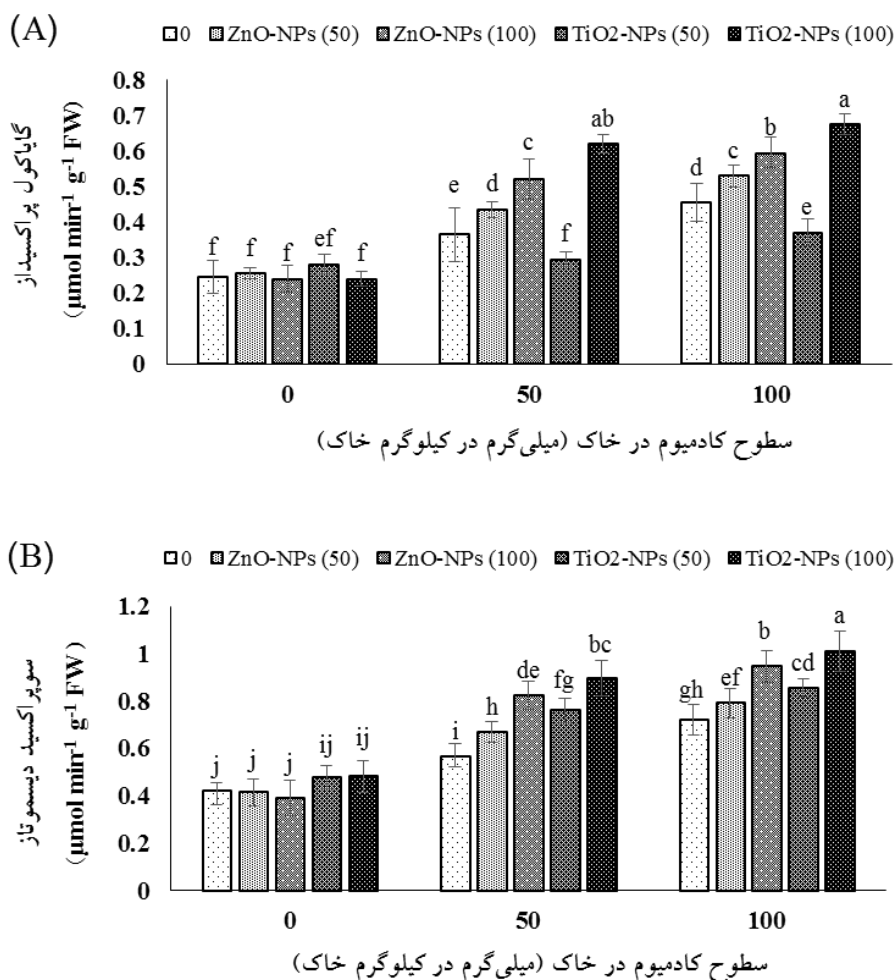


شکل ۳- اثر سطوح مختلف نانوذرات اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم بر میزان پراکسید هیدروژن (A) و مالون دی آلدئید (B) انگور سلطانی تحت سطوح مختلف کادمیوم در خاک. حروف غیر مشابه در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی دار (LSD) است.

(Emamverdian *et al.*, 2021).

به نظر می‌رسد نانوذرات با تحریک بیان ژن‌های مسئول SOD و GPX در گیاهانی که در معرض تنش فلزات سنگین قرار دارند، نقش اصلی را در فعال‌سازی ژن‌های مسئول آنتی‌اکسیدانی ایفا می‌کنند (Kohli *et al.*, 2018). گزارش شده است که نانوذرات باعث تحریک ایجاد موانع آپوپلاستی شده و غلظت فلز سنگین را در سیستم ریشه کاهش می‌دهند. علاوه بر این، نانوذرات می‌توانند بر دینامیک تنظیمی ژن‌های ناقل فلز در سلول‌های گیاهی تأثیر بگذارند، در نتیجه کمپلکس‌های پایدار را با فلز سنگین رهگیری کرده و تشکیل می‌دهند و بدین ترتیب جابه‌جایی آن‌ها را در گیاه مختل می‌کنند

آنتی‌اکسیدان پنبه (*Gossypium hirsutum*) شد و در عین حال محتوای MDA را در گیاهان کاهش داد (Priyanka and Venkatachalam, 2016). عنصر روی به کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن کمک می‌کند و منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند GPX و SOD می‌شود (Praveen *et al.*, 2018). تأثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و رشد گیاه در چندین مطالعه گزارش شده است (Emamverdian *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2012). این افزایش را می‌توان به نقش القایی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در افزایش سیگنال‌دهی مرتبط با فعال‌شدن فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نسبت داد



شکل ۴- اثر سطوح مختلف نانوذرات اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم بر میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (A) و سوپراکسید دیسموتاز (B) انگور سلطانی تحت سطوح مختلف کادمیوم در خاک. حروف غیرمشابه در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) است.

نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد تنش کادمیوم موجب کاهش صفات رشدی شامل وزن خشک برگ و ریشه و رنگیزه‌های فتوسنتزی شده و در مقابل باعث افزایش میزان شاخص‌های تنش یعنی پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید و نیز فعالیت آنزیم‌های GPX و SOD در انگور سلطانی سفید شد. در این پژوهش کاربرد نانوذرات اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم سبب بهبود پارامترهای رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شده و از طریق کاهش میزان پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید اثرات ناشی از تنش کادمیوم را تعدیل کرد. می‌توان نتیجه گرفت که محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت‌های اعمال

(Manzoor *et al.*, 2023). با توجه به نتایج این تحقیق و گزارشاتی که از تحقیقات قبلی انجام گرفته می‌توان گفت که نانوذرات تیتانیوم و روی احتمالاً با تأثیر بر بیان ژن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (از طریق مکانیسم‌هایی که نیاز به تحقیقات بیشتر دارد) و نیز افزایش فعالیت این آنزیم‌ها و در پی آن کم شدن تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن (مانند پراکسید هیدروژن) و کاهش تولید مالون دی‌آلدهید، باعث افزایش تولید زیست‌توده در گیاه انگور سلطانی تحت سمیت کادمیوم در خاک شده است.

نتیجه‌گیری

شده تا حدودی باعث افزایش مقاومت به تنش کادمیوم در گیاه انگور رقم سلطانی سفید می‌شود.

منابع

- احمدی، کریم، عبادزاده، حمیدرضا، عبدشاه، هلداد، حاتمی، فرشاد، و حسین‌پور، ربابه (۱۳۹۶). آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۶: محصولات باغبانی. مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات وزارت جهاد کشاورزی.
- ثریا، احسان، گوهری، غلامرضا، مطلبی‌آذر، علیرضا، و علیزاده، سعیده، (۱۳۹۹). تأثیر نانواکسید روی بر مراحل ضدعفونی، استقرار و پرآوری درون شیشه‌ای گیاه بادرنجبویه. فیزیولوژی محیطی گیاهی، ۶۰، ۴۸-۶۰.
- دولتی بانه، حامد (۱۳۹۵). انگور (مدیریت جامع کشت، پرورش، تولید و فراوری). انتشارات دانشگاه کردستان، سنندج.
- محمودسلطانی، شهرام، اله‌قلی‌پور، مهرزاد، شکوری کتیگری، مریم، پیکان، مریم، شعبانزاده، حمید، عطار، افشین، طبالوندی علی، و کشتکار، فاطمه، (۱۳۹۹). بررسی تأثیر کاربرد همزمان مصرف خاکی و محلولپاشی کود سولفات روی بر عملکرد، مقدار پروتئین دانه و محتوای روی در اندام‌های گیاه برنج در مراحل مختلف رشد. نشریه پژوهش‌های خاک، ۳۴(۳)، ۳۲۸-۳۰۹.
- dor:20.1001.1.22287124.1399.34.3.2.9
- Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Abbas, F., ... & Ok, Y. S. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 140, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.028>
- Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, 112-121.
- Bajguz, A. (2010). An enhancing effect of exogenous brassinolide on the growth and antioxidant activity in *Chlorella vulgaris* cultures under heavy metals stress. *Environmental and Experimental Botany*, 68(2), 175-179. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.11.003>
- Chance, A., & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalases and peroxidase. *Methods in Enzymology*, 2, 764-775. doi:10.1002/9780470110171.ch14
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., Ahmad, Z., & Xie, Y. (2021). The investigation of TiO₂ NPs effect as a wastewater treatment to mitigate Cd negative impact on bamboo growth. *Sustainability*, 13(6), 1-17. <https://doi.org/10.3390/su13063200>
- FAO, (2016). Food and Agricultural Organization and International Organization of Vine and Wine (FAO-OIV), 2016. FAO-OIV Focus, Table and Dried Grapes. Available online at: <http://www.fao.org/3/a-i7042e.pdf>
- Ghani, M. I., Saleem, S., Rather, S. A., Rehmani, M. S., Alamri, S., Rajput, V. D., Liu, M. (2022). Foliar application of zinc oxide nanoparticles: An effective strategy to mitigate drought stress in cucumber seedling by modulating antioxidant defense system and osmolytes accumulation. *Chemosphere*, 289, 133202. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133202>
- Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59(2), 309-14. doi: 10.1104/pp.59.2.309
- Gohari, G., Mohammadi, A., Akbari, A., Panahirad, S., Dadpour, M. R., Fotopoulos, V., & Kimura, S. (2020). Titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of *Dracocephalum moldavica*. *Scientific Reports*, 10(1), 912. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57794-1>
- Gong, X., Huang, D., Liu, Y., Zeng, G., Wang, R., Wan, J., ... & Xue, W. (2017). Stabilized nanoscale zerovalent iron mediated cadmium accumulation and oxidative damage of *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich cultivated in cadmium contaminated sediments. *Environmental Science and Technology*, 51(19), 11308-11316. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03164>
- Heath, R. L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125, 189-198. doi: 10.1016/0003-9861(68)90654-1
- Jahan, S., Alias, Y. B., Bakar, A. F. B. A., & Yusoff, I. B. (2018). Toxicity evaluation of ZnO and TiO₂ nanomaterials in hydroponic red bean (*Vigna angularis*) plant: Physiology, biochemistry and kinetic transport. *Journal of Environmental Sciences*, 72, 140-152. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.12.022>
- Ji, Y., Zhou, Y., Ma, C., Feng, Y., Hao, Y., Rui, Y., ... & Cao, W. (2017). Jointed toxicity of TiO₂ NPs and Cd to rice seedlings: NPs alleviated Cd toxicity and Cd promoted NPs uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 82-93. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.010>

- Kohli, S. K., Handa, N., Sharma, A., Gautam, V., Arora, S., Bhardwaj, R., ... & Ahmad, P. (2018). Combined effect of 24-epibrassinolide and salicylic acid mitigates lead (Pb) toxicity by modulating various metabolites in *Brassica juncea* L. seedlings. *Protoplasma*, 255(1), 11-24. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1124-x>
- Lian, J., Zhao, L., Wu, J., Xiong, H., Bao, Y., Zeb, A., ... & Liu, W. (2020). Foliar spray of TiO₂ nanoparticles prevails over root application in reducing Cd accumulation and mitigating Cd-induced phytotoxicity in maize (*Zea mays* L.). *Chemosphere*, 239, 124794. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124794>
- Manzoor, A. M., Xu, Y., Lv, Z., et al. (2023). Nanotechnology-based approaches for promoting horticulture crop growth, antioxidant response and abiotic stresses tolerance. *Plant Stress* 11, 100337. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100337>
- Mohammadi, R., Maali-Amiri, R., & Mantri, N. L. (2014). Effect of TiO₂ nanoparticles on oxidative damage and antioxidant defense systems in chickpea seedlings during cold stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 61(6), 768-775. <https://doi.org/10.1134/S1021443714050124>
- Moradi, R., Pourghasemian, N., & Naghizadeh, M. (2019). Effect of beeswax waste biochar on growth, physiology and cadmium uptake in saffron. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1251-1261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.047>
- Mushtaq, T., Shah, A. A., Akram, W., & Yasin, N. A. (2020). Synergistic ameliorative effect of iron oxide nanoparticles and *Bacillus subtilis* S4 against arsenic toxicity in *Cucurbita moschata*: Polyamines, antioxidants, and physiochemical studies. *International Journal of Phytoremediation*, 22(13), 1408-1419. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1781052>
- Praveen, A., Khan, E., Ngiime, D. S., Perwez, M., Sardar, M., & Gupta, M. (2018). Iron oxide nanoparticles as nano-adsorbents: A possible way to reduce arsenic phytotoxicity in Indian mustard plant (*Brassica juncea* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 37(2), 612-624. <https://doi.org/10.1007/s00344-017-9760-0>
- Priyanka, N., & Venkatachalam, P. (2016). Biofabricated zinc oxide nanoparticles coated with phycomolecules as novel micronutrient catalysts for stimulating plant growth of cotton. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 7(4), 5018. doi: 10.1088/2043-6262/7/4/045018
- Rasool, S., Urwat, U., Nazir, M., Zargar, S. M., & Zargar, M. Y. (2018). Cross talk between phytohormone signaling pathways under abiotic stress conditions and their metabolic engineering for conferring abiotic stress tolerance. *Abiotic Stress-Mediated Sensing and Signaling in Plants: An Omics Perspective*, 329-350. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7479-0_12
- Rizwan, M., Ali, S., Abbas, T., Zia-ur-Rehman, M., Hannan, F., Keller, C., ... & Ok, Y. S. (2016). Cadmium minimization in wheat: A critical review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 130, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.04.001>
- Sergiev, I., Alexieva, V., & Karanov, E. (1997). Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences* 51, 121-124. doi: 10.1046/j.1365-3040.2001.007
- Shah, J., Dave, S., Vyas, A., et al. (2019). Nanomaterials-based next generation synthetic enzymes: Current challenges and future opportunities in biological applications. *Nanotechnology in Modern Animal Biotechnology: Concepts and Applications*, 37-58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818823-1.00004-1>
- Shahabivand, S., Maivan, H. Z., Goltapeh, E. M., Sharifi, M., & Aliloo, A. A. (2012). The effects of root endophyte and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and cadmium accumulation in wheat under cadmium toxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 60, 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.07.018>
- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Faisal, M., & Al Sahli, A. A. (2014). Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(11), 2429-37. <https://doi.org/10.1002/etc.2697>
- Singh, D., Kumar, S., Singh, S. C., Lal, B., & Singh, N. B. (2012). Applications of liquid-assisted pulsed laser ablation synthesized TiO₂ nanoparticles on germination, growth and biochemical parameters of *Brassica oleracea* var. Capitata. *Science of Advanced Materials*, 4(3-4), 522-531. <https://doi.org/10.1166/sam.2012.1313>
- Singh, J., & Lee, B. K. (2016). Influence of nano-TiO₂ particles on the bioaccumulation of Cd in soybean plants (*Glycine max*): A possible mechanism for the removal of Cd from the contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 170, 88-96. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.01.015
- Soejima, A., & Wen, J. (2006). Phylogenetic analysis of the grape family (Vitaceae) based on three chloroplast markers. *American Journal of Botany*, 93(2), 278-287. doi: 10.3732/ajb.93.2.278
- Venkatachalam, P., Jayaraj, M., Manikandan, R., Geetha, N., Rene, E. R., Sharma, N. C., & Sahi, S. V. (2017). Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) alleviate heavy metal-induced toxicity in *Leucaena leucocephala* seedlings: A physiochemical analysis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 59-69. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.08.022
- White, P. J., & Brown, P. H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of botany*, 105, 1073-1080. doi: 10.1093/aob/mcq085
- Worms, I. A., Boltzman, J., Garcia, M., & Slaveykova, V. I. (2012). Cell-wall-dependent effect of carboxyl-CdSe/ZnS

- quantum dots on lead and copper availability to green microalgae. *Environmental Pollution*, 167, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.03.030>
- Zhang, P., Ma, Y., Liu, S., Wang, G., Zhang, J., He, X., ... & Zhang, Z. (2017). Phytotoxicity, uptake and transformation of nano-CeO₂ in sand cultured romaine lettuce. *Environmental Pollution*, 220, 1400-1408. doi: 10.1016/j.envpol.2016.10.094
- Zulfiqar, U., Jiang, W., Xiukang, W., et al. (2022). Cadmium phytotoxicity, tolerance, and advanced remediation approaches in agricultural soils; A comprehensive review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 773815. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.773815>

Effect of zinc oxide- and titanium dioxide-nanoparticles on some growth parameters and antioxidant enzymes of grape cv. Sultana under cadmium toxicity

Saleh Shahabivand¹, Hossein Shaeabani¹, Gholemreza Gohari², Ahmad Aghaee^{1*}

¹Department of Biology, Faculty of Basic Sciences, University of Maragheh, Maragheh, Iran

² Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

(Received: 2024/03/02, Accepted: 2024/06/24)

Abstract

Among the toxic heavy metals is cadmium, which is considered as a potential risk for humans and other organisms and requires more attention to prevent this metals to entering the food chain. In recent years, along with the development of nanotechnology, it has been used to advance environmental goals. In order to study the effect of zinc oxide- and titanium dioxide-nanoparticles on white grape (cv. Sultana) seedlings under Cd stress, a factorial experiment was conducted based a completely randomized design with three replicates. The first factor was cadmium stress at three levels (0, 50 and 100 mg/kg soil) and the second factor was the spraying of the nanoparticles of zinc oxide and titanium dioxide at 3 levels (0, 50 and 100 mg L⁻¹). The results showed that cadmium stress significantly reduced the growth parameters and photosynthesis pigments, and increased H₂O₂ and malondialdehyde (MDA) contents and antioxidant enzymes activity of guaiacol peroxidase (GPX) and super oxide dismutase (SOD). Foliar application of zinc oxide- and titanium dioxide-nanoparticles improved morphological characteristics, photosynthetic pigments and enzymatic antioxidants but reduced MDA and H₂O₂ contents under cadmium stress. Based on the results of this research, it seems that foliar spraying the nanoparticles of zinc oxide and titanium dioxide (especially at the concentration of 100 mg L⁻¹), can improves the growth, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes activity under cadmium stress, and increases plant tolerance to harmful effect of this toxic metal in grape cv. Sultana.

Keywords: Cadmium, Grape cv. Soltani, Nanoparticle, Zinc, Titanium, Tolerance

Corresponding author, Email: aghaee2001@yahoo.com