بررسی تغییرات سیستم آنتی‌اکسیدان گیاه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicum solanum* L.) تیمارشده با نانو سیلیس و ۲۴- اپی‌براسینولید تحت تنش کادمیوم

حدیث رضایی[۱]، سید محمدجواد آروین[۱و۲]، حکیمه علومی[*۱]

[۱] گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

[۲] گروه تولیدات گیاهی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵)

چکیده

در این بررسی آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با فلز سنگین کادمیوم در دو سطح (صفر و ۱۰۰ میکرومولار)، دو سطح ۲۴-اپی‌براسینولید (صفر و ۰/۷۵ میکرومولار) و دو سطح نانو ذره سیلیس (صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) روی گیاه گوجه‌فرنگی انجام شد. تنش کادمیوم به‌طور معنی‌داری باعث کاهش پارامترهای رشدی، محتوای کلروفیل و همچنین افزایش محتوای ترکیبات فنولی، مالون دآلدئید، هیدروژن پراکسید و افزایش تجمع کادمیوم در برگ گیاه گوجه‌فرنگی شد. نتایج نشان داد که پیش‌تیمار نانو ذره سیلیس منجر به بهبود ویژگی‌های رشدی و افزایش فعالیت پلی‌فنول اکسیداز در برگ گیاه تحت تنش گردید. کاهش محتوای ترکیبات فنولی، مالون دآلدئید و هیدروژن پراکسید، به‌دنبال کاهش تجمع کادمیوم در این تیمار مشاهده شد. پیش‌تیمار ۲۴-اپی‌براسینولید نیز منجر به کاهش محتوای ترکیبات فنولی، مالون دآلدئید، هیدروژن پراکسید و همچنین افزایش وزن تر اندام هوایی، نسبت طول ریشه به طول ساقه، فعالیت پلی‌فنول اکسیداز و کاتالاز و کاهش تجمع کادمیوم در برگ گیاه تحت تنش شد. براساس نتایج اثر متقابل پیش‌تیمار نانو ذره سیلیس و ۲۴-اپی‌براسینولید بر محتوای مالون دآلدئید و هیدروژن پراکسید و نیز وزن خشک ریشه، فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز و کاهش تجمع کادمیوم در برگ معنی‌دار بود. به‌نظر می‌رسد تیمارهای نانو ذره سیلیس و ۲۴-اپی‌براسینولید با بهبود ویژگی‌های بیوشیمیایی و مقاومت آنتی‌اکسیدانی گوجه‌فرنگی منجر به افزایش رشد و تخفیف تنش کادمیوم می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پلی‌فنول اکسیداز،هیدروژن پراکسید، ترکیبات فنولی، کاتالاز، گوجه‌فرنگی

مقدمه

آلودگی‌های زمین‌های کشاورزی به‌علت تجمع فلزات سنگین اثرات زیان‌بار بر فعالیت زیستی خاک، متابولیسم گیاه، تنوع زیستی و سلامت انسان و جانوران دارد (Ali *et al.*, 2011). فلزات سنگین ممانعت‌کننده رشد بوده وسبب کاهش رشد گیاه، کاهش بازده و کیفیت محصولات کشاورزی می‌شوند (Ali *et al.*, 2012). در بین فلزات سنگین با پتانسیل ایجاد تنش، کادمیوم بیش از بقیه آنها مورد توجه جوامع علمی قرار گرفته است. کادمیوم به‌عنوان عامل مهم آلوده‌کننده محیط، برای گیاهان سمیت بالایی دارد (شیرخانی و همکاران، ۱۳۹۸). مقدار این فلز به‌دلیل استفاده از فاضلاب کارخانه‌های صنعتی و شهری و همچنین مصرف زیاد حشره‌کش‌ها (شکاری و

[*] نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: oloumi.ha@gmail.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

اسفندیاری، ۱۳۸۹) و مقادیر بالای کودهای شیمیایی به‌ویژه فسفاته (بغوری و رحمانی، ۱۳۸٦) در زمین‌های کشاورزی زیاد است. کادمیوم به‌طور عمده در خاک آهکی لایه‌های سطحی تجمع پیدا می‌کند و همچنین در اثر هوازدگی سنگ ایجاد می‌شود. کادمیوم در خاک‌های مختلف تقریباً ۱/۱ کیلوگرم است (ملکوتی و همایی، ۱۳۸۳). کادمیوم عنصری غیرضروری برای انجام فرآیندهای متابولیسم و رشد و نمو گیاه است (Balsberg Pahlsson, 1989). عوامل جذب کادمیوم در گیاهان شامل غلظت کادمیوم در خاک، میزان در دسترس‌بودن آن، تغییر شکل در حضور مواد آلی دیگر، pH خاک، پتانسیل احیاکنندگی، دما و غلظت فلزات دیگر هستند (Gardea-Torresdey *et al*., 2005). آلودگی کادمیوم فرآیندهای فتوسنتزی را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده و درنتیجه باعث کاهش رشد (Islam *et al*., 2009)، کاهش وزن خشک (Aziz-Khan *et al*., 2012)، کاهش طول ساقه (Zhang *et al*., 2010) و طول ریشه (Dinakar *et al*., 2009) می‌شود. نتایج نشان داده که سولفات کادمیوم در غلظت ٤٥ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک خاک باعث اختلال فتوسنتز و تنفس و درنتیجه کاهش رشد و تولید ماده خشک در بوته‌های جو می‌شود (Vassilev, 2003). تحقیقات نشان داد که کادمیوم در سوخت‌وساز سلولی بخش هوایی اختلال ایجاد می‌کند و درنتیجه باعث کاهش ارتفاع گیاهانی مانند گوجه‌فرنگی می‌شود (Hassan *et al*., 2006). همچنین در پژوهشی دیگر بر روی گیاه گوجه‌فرنگی کادمیوم با غلظت ۱ و ۱۰ میکرومول در لیتر باعث کاهش طول و حجم ریشه، ارتفاع گیاه و کاهش فتوسنتز شد (Jing *et al*., 2005). سمیت این عنصر همچنین منجر به ایجاد تنش اکسیداتیو و تولید انواع اکسیژن فعال (ROS) در گیاهان می‌شود (Islam *et al*., 2009). از پاسخ‌های گیاهان در برابر فلزات سنگین می‌توان تغییر فرآیندهای متابولیکی گیاه، افزایش تنظیم‌کننده‌های اسمزی، آنتی‌اکسیدان‌ها و مواد محافظت‌کننده را نام برد (Seregin and Ivanov, 2001). هیدروژن پراکسید از انواع اکسیژن فعال است که در تنش کادمیوم به‌دلیل عدم‌تعادل بین هیدروژن پراکسید تولیدی و تجزیه‌شده، تجمع می‌یابد. از عوامل مهارکننده میزان هیدروژن پراکسید فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز و پراکسیداز است که به‌عنوان سیستم دفاعی قوی قادر است سازگاری گیاه را در مقابل تنش کادمیوم افزایش دهد (Zhang *et al*., 2009).

یکی از راه‌کارهای کاهش اثرهای زیان‌بار تنش فلزات سنگین استفاده از روش‌های صحیح تغذیه معدنی و استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است که نقش قابل ملاحظه‌ای در افزایش عملکرد دارند. در این پژوهش از نانو ذره سیلس و ٢٤-اپی‌براسینولید در شرایط تنش کادمیوم بر روی گیاه گوجه‌فرنگی استفاده شد. سیلیکون دومین عنصر فراوان در خاک است. اما در بسیاری از گیاهان عنصر ضروری محسوب نمی‌شود (Adrees *et al*., 2015). اثرات مفید سیلیکون برای گیاهان به هر دو نوع سیلیکون محلول و ذخیره‌شده در بافت‌های گیاهی مربوط است. سیلیکون محلول نقش فعالی در تحریک برخی مکانیسم‌های دفاعی و افزایش مقاومت گیاه دارد (Farooq *et al*., 2013). مطالعات زیادی نشان داده که تیمارکردن گیاهان با سیلیکون می‌تواند به‌طور چشمگیری تنش‌های زیستی و غیرزیستی مانند فلزات سنگین (Mohsenzadeh *et al*., 2012)، نمک (Liang *et al*., 2007)، خشکی، سرما و یخزدگی (Shahrtash and Mohsenzadeh, 2011) را کم کند. سیلیکون از طریق ایجاد کمپلکس و مهار انتقال فلزات سنگین از ریشه به بخش‌های هوایی، بخش‌بندی یون‌های فلزی و تحریک سیستم آنتی‌اکسیدان در گیاهان، سبب تخفیف سمیت برخی از فلزات سنگین می‌شود (Gong *et al*., 2005). بسیاری از گیاهان قادر به جذب سیلیسیم هستند و مقدار جذب براساس نوع گونه گیاهی بین ۱۰-۰/۱ درصد وزن زیست توده گیاهی متغیر است (Cherif and Belanger, 1992). همچنین پژوهش‌ها نشان داده است که کاربرد کود سیلیسیم در خاک‌هایی که کمبود سیلیسیم دارند، می‌تواند رشد گیاه را تحریک کند (Jiang *et al*., 2002). سیلیکون توسط ریشه جذب می‌شود و به بخش‌های هوایی گیاه منتقل می‌شود و روی دیواره سلول‌ها به‌صورت پلیمر هیدراته، سیلیکای بی‌شکل، لایه دوتایی سیلیکا کوتیکول و لایه دوتایی سیلیکا

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

سلولز در سطح برگ و ساقه ته‌نشین می‌شود و شدت تعرق را کاهش می‌دهد (Ma and Yamaji, 2006). به‌علاوه، وجود سیلیکون در آندودرم ریشه سبب کاهش جذب آپوپلاستی آب و برخی یون‌ها می‌شود (Kidd *et al.*, 2001). نتایج پژوهش‌ها نشان داد تیمار سیلیس باعث تخفیف تنش فلزات سنگین و بهبود شاخص‌های رشد در گیاه می‌شود (اسماعیل‌پور و همکاران، ۱۳۹۸). طبق پژوهشی که بر گیاه گوجه‌فرنگی و خیار انجام شد کادمیوم سبب کاهش رشد شده اما تیمار سیلیس اثرات مضر تنش کادمیوم بر رشد هر دو گیاه را خنثی کرد و سبب بهبود رشد گیاهان شد (Wu *et al.*, 2015).

براسینواستروئیدها از فیتوهورمون استروئیدی پلی‌هیدروکسیل در گیاهان هستند که ساختاری مشابه هورمون‌های استروئیدی حیوانات دارند و طیف وسیعی از فرایندهای فیزیولوژیکی شامل رشد گیاه را تنظیم می‌کنند. در گیاه تحت تنش، میزان آب برگ، روابط آبی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، قندهای محلول، پروتئین‌های محلول و پرولین آزاد را افزایش می‌دهد (Tang *et al.*, 2016). طبق مطالعات انجام‌شده براسینواستروئیدها در کاهش و تخفیف صدمات حاصل از تنش‌های محیطی شامل تنش فلزات سنگین در گیاهان نقش مهمی دارند (Gur and Topdemir, 2008). در مطالعات انجام‌شده بر روی گوجه‌فرنگی نشان می‌دهد تیمار براسینواستروئید سبب تخفیف تنش کادمیوم می‌شود و اثرات منفی آن را تا حدودی خنثی می‌کند به‌طوری که اسپری براسینواستروئید بر شاخ و برگ گوجه‌فرنگی به‌طور قابل توجهی باعث رشد می‌شود و اثرات سمی کادمیوم را کاهش می‌دهد (Hayat *et al.*, 2012). نتایج نشان داده است که تیمار همزمان نانو ذره سیلیس و ۲۴-اپی‌براسینولید در تنش فلز سنگین کادمیوم باعث افزایش گلی‌اکسالاز، کاهش تجمع کادمیوم و افزایش جذب عناصر مغذی در گیاه نخود شده است (Jan *et al.*, 2018).

تاکنون پژوهشی در زمینه مکانیسم اثر تیمار همزمان نانو ذره سیلیس و ۲۴-اپی‌براسینولید بر روی ویژگی‌های بیوشیمیایی و پاسخ‌های آنتی‌اکسیدان گیاهان انجام نشده است. در این پژوهش اثر همزمان نانو ذره سیلیس و ۲۴-اپی‌براسینولید به‌صورت پیش‌تیمار در کاهش اثرات تنش کادمیوم در گیاه گوجه‌فرنگی بررسی شد و ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی و نیز تغییرات فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گیاه مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از نانو ذره سیلیس استفاده شده است. امروزه افزودن نانو ذرات به محلول غذایی گیاهان به‌عنوان کود به‌دلیل داشتن اثرهای بی‌نظیر آنها مانند نفوذ سریع‌تر و راحت‌تر به درون غشای سلولی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Khodakovskaya *et al.*, 2012).

گیاه مورد بررسی در این پژوهش گیاه شاخص (تیپیک) گوجه‌فرنگی بود. گوجه‌فرنگی یکی از محصولات ارزشمند تیره سیب‌زمینی در خاورمیانه به‌شمار می‌آید که بعد از سیب‌زمینی از نظر اقتصادی در مقام دوم جهان قرار دارد (Peng *et al.*, 2010). این گیاه بومی آمریکای جنوبی و مرکزی است. انواع مختلف این گیاه امروزه در سراسر جهان پرورش داده می‌شود. کشت و پرورش این گیاه به‌طور کلی مساحتی حدود سه میلیون هکتار را به خود اختصاص داده است، که نزدیک یک سوم کل مساحت مختص به کشت تره‌بار در جهان است (Phene *et al.*, 2008).

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. بذرهای ضدعفونی‌شده گوجه‌فرنگی (*Lycopersicum solanum*) رقم peto early CH در سینی‌های نشا کشت شد. در این پژوهش از سطوح تیماری شامل نانو ذره سیلیس با غلظت‌های صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر و ۲۴-اپی‌براسینولید با غلظت‌های صفر و ۰/۷۵ میکرومولار و کادمیوم با غلظت‌های صفر و ۱۰۰ میکرومولار استفاده شد. هر سینی نشا دارای ۱۵ عدد سلول با طول ۲۰۰ میلی‌متر، عرض ۶۸ میلی‌متر ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر بود. سلول‌ها با پرلیت‌های شسته و ضدعفونی‌شده پر شدند و بذرها در عمق یک سانتی‌متری کاشته شدند. این کشت به‌صورت هیدروپونیک و در شرایط

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

استاندارد (شدت نور ۱۵۰۰۰ لوکس و با تناوب دمایی میانگین ۲۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد روز/ شب) انجام شد. به‌منظور تغذیه گیاه، محلول کود هیدروپونیک از شرکت برافزا کشاورز پارس تهیه شد.

۱٤ روز پس از کاشت گیاه در مرحله ٤-۳ برگی، ۲٤-اپی‌براسینولید با غلظت‌های صفر و ۰/۷۵ میکرومولار به‌مدت شش روز به‌صورت یک روز در میان و نانو ذره سیلیس (از شرکت کیمیا گستر، (Nano SiO_2-Density 2.2 g/cm^3) با غلظت‌های صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به‌مدت شش روز به‌صورت یک روز در میان و عدم‌تداخل زمانی با ۲٤-اپی‌براسینولید بر سطح برگ گیاه اسپری شد. سپس ۲۱ روز پس از کاشت گیاه به مدت ۱۲ روز تحت تیمار نمک کادمیوم کلراید (صفر و ۱۰۰ میکرومولار) در محلول غذایی قرار گرفت. بعد از اتمام تیماردهی برای انجام آزمایشات بعدی اندام هوایی و ریشه گیاه پس از ۳۲ روز بعد از کاشت در مرحله ٥-٦ برگی جمع‌آوری شد. شاخص‌های مورفولوژیکی شامل وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، نسبت طول ریشه به ساقه بررسی و یادداشت شد.

سنجش‌های بیوشیمیایی، سنجش کلروفیل: این سنجش به روش (Lichtenthaler, 1987) انجام شد. ۰/۱ گرم بافت تازه برگ سوم در ۱۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد ساییده شد و پس از ۱۵ دقیقه سانتریفوژ با دور g× ۵۵۰۰ جذب نمونه‌ها در طول‌موج‌های ٦٤۷، ٦٦٤ و ٤۷۰ نانومتر خوانده شد. محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی با استفاده از روابط زیر و بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه گردید.

Chl a (mg/g fw) = (12.25 A664) - (2.79 A647) × (V / W × 1000)

Chl b (mg/g fw) = (21.21 A647) - (5.1 A664) × (V / W × 1000)

Chl T (mg/g fw) = (Chl a + Chl b) × (V / W × 1000)

Car (mg/g fw) = (((1000 A470) - (1.8 Chl a) - (85.02 Chlb))/198) × (V / W × 1000)

که در این روابط Chla شامل کلروفیل a، Chlb کلروفیل b، ChlT کلروفیل کل، Car کاروتنوئیدها، V حجم نهایی عصاره در استون ۸۰ درصد، W وزن تازه بافت گیاهی برای عصاره‌گیری بر حسب گرم است.

سنجش ترکیبات فنولی: محتوای ترکیبات فنولی به‌روش Ronald و Laima (۱۹۹۹) محاسبه شد. ۰/۱گرم از اندام هوایی گیاه در ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد ساییده و به‌مدت ۷۲-۲٤ ساعت در تاریکی نگهداری شد. به ۱ میلی‌لیتر محلول رویی ۱ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد اضافه گردید و با آب‌مقطر دو بار تقطیر حجم محلول به ۵ میلی‌لیتر رسانده شد. ۰/۵ میلی‌لیتر معرف فولین مرک (Folin-Ciocalteus phenol reagent) ۵۰ درصد و ۱ میلی‌لیتر سدیم کربنات ۵ درصد به آن اضافه گردید. مخلوط حاصل به‌مدت یک ساعت در تاریکی نگهداری شد و جذب هر نمونه در طول‌موج ۷۲۵ نانومتر خوانده شد. محتوای ترکیبات فنولی کل بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر و با استفاده از منحنی استاندارد گالیک اسید محاسبه گردید.

سنجش محتوای مالون دآلدئید (MDA): مقدار مالون دآلدئید با روش Heath و Packer (۱۹٦۸) سنجش شد. ۰/۲ گرم از بافت تازه گیاهی در ۵ میلی‌لیتر تری‌کلرو استیک اسید ۰/۱ درصد ساییده شد. عصاره حاصل به‌مدت پنج دقیقه با دور g×۱۰۰۰ سانتریفیوژ گردید. به ۱ میلی‌لیتر از محلول رویی چهار میلی‌لیتر محلول تری‌کلرو استیک اسید ۲۰ درصد که حاوی ۰/۵ درصد تیوباربیتوریک اسید بود اضافه گردید. مخلوط حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد در حمام آب گرم قرار گرفت. سپس نمونه‌ها بلافاصله در حمام یخ سرد شد. مخلوط دوباره در دور g×۵۰۰۰ به‌مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. شدت جذب محلول رویی در طول‌موج ۵۲۳ نانومتر خوانده شد. جذب بقیه رنگیزه‌های غیراختصاصی در ٦۰۰ نانومتر تعیین و از این مقدار کسر شد. برای محاسبه غلظت MDA از ضریب خاموشی $mM^{-1}\ cm^{-1}$ ۱۵۵ استفاده و نتایج حاصل از اندازه‌گیری برحسب نانومولار بر وزن تر محاسبه شد.

سنجش هیدروژن پراکسید: سنجش هیدروژن پراکسید با استفاده از روش Velikova و همکاران (۲۰۰۰) انجام شد. ۰/۳ گرم از بافت تازه گیاه در حمام یخ حاوی تری‌کلرو استیک اسید ۰/۱ درصد ساییده شد. عصاره در سانتریفیوژ یخچال‌دار در دور g ×۱۰۰۰۰ برای ۱۵ دقیقه سانتریفوژ شد. سپس ۰/۵

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

میلی‌لیتر از محلول رویی به ۰/۵ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۱۰ میلی‌مولارو یک میلی‌لیتر پتاسیم یدید ۱ مولار اضافه و جذب در طول‌موج ۳۹۰ نانومتر خوانده شد. مقدار هیدروژن پراکسید در هر نمونه با استفاده از ضریب خاموشی ۰/۲۸ $M^{-1}cm^{-1}$ محاسبه شد و بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر گزارش گردید.

عصاره‌گیری آنزیم: نیم گرم از بافت تازه برگ گیاه گوجه‌فرنگی در ۵ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی‌مولار که حاوی پلی‌وینیل پیرولیدین یک درصد و EDTA ۱ میلی‌مولار بود ساییده شد. تمام مراحل استخراج در یخ انجام گرفت. عصاره‌ها به‌مدت ۲۰ دقیقه در g×۵۰۰۰ و در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد سانتریفوژ شدند. از محلول شفاف رویی برای سنجش فعالیت آنزیم استفاده شد (Bradford, 1976).

سنجش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، فعالیت آنزیم کاتالاز: مخلوط واکنش (۳ میلی‌لیتر) شامل بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی‌مولار، آب‌اکسیژنه ۱۵ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. با اضافه‌کردن آب‌اکسیژنه به مخلوط واکنش و کاهش شدت جذب آب‌اکسیژنه در طول‌موج ۲٤۰ نانومتر با دستگاه اسپکتوفتومتری اندازه‌گیری شد. یک واحد فعالیت آنزیمی مقدار آنزیمی است که یک میلی‌مول آب‌اکسیژنه را در مدت یک دقیقه تجزیه کند. میزان فعالیت آنزیم براساس غلظت آب‌اکسیژنه تجزیه‌شده محاسبه شد، غلظت آب‌اکسیژنه مصرف‌شده با استفاده از ضریب خاموشی معادل ($mM^{-1}\ cm^{-1}$ ٤۰) فرمول $A=\varepsilon bc$ محاسبه گردید (Velikova *et al*., 2000). در این رابطه، A شدت جذب نمونه، ε ضریب خاموشی، b عرض کوت معادل یک سانتی‌متر و c غلظت است.

فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز: مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۲۰۰ میلی‌مولار و پیروگالول ۰/۰۲ مولار بود. واکنش با افزودن ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی شروع شد. کاهش شدت جذب پیروگالول در ٤۲۰ نانومتر، پس از ۵ دقیقه نسبت به زمان شروع واکنش، محاسبه گردید و تغییرات جذب در دقیقه محاسبه شد. سپس با استفاده از ضریب خاموشی پیروگالول $٦/٢mM^{-1}\ cm^{-1}$ و فرمول $A=b\varepsilon c$، مقدار بر جای مانده پیروگالول در مخلوط واکنش به‌دست آمد. یک واحد آنزیمی پلی‌فنل اکسیداز شامل مقدار پیروگالولی است که در مدت یک دقیقه به پورپوروگالین تبدیل می‌شود (Kar and Mishra, 1976). فعالیت آنزیمی بر حسب واحد آنزیم در مقدار پروتئین کل (میلی‌گرم) موجود در ۱۰۰ میکرولیتر عصاره (به‌دست آمده از روش Bradford, 1976) محاسبه شد.

فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز: مخلوط واکنش با حجم کل سه میلی‌لیتر شامل بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی‌مولار، آسکوربات ۰/۵ میلی‌مولار، آب‌اکسیژنه ۱۵ میلی‌مولار، EDTA ۱۰ میلی‌مولار و عصاره آنزیمی بود. با شروع واکنش آنزیمی و به‌دنبال اکسیدشدن آسکوربات، کاهش شدت جذب در ۲۹۰ نانومتر، دو دقیقه پس از شروع واکنش نسبت به زمان شروع واکنش در بازه‌های زمانی یک دقیقه محاسبه شد. با استفاده از تغییرات جذب در دقیقه، ضریب خاموشی آسکوربات ($٢/٨\ mM^{-1}\ cm^{-1}$) و رابطه $A=b\varepsilon c$، میزان آسکوربات بر جا مانده پس از دو دقیقه انجام واکنش آنزیمی محاسبه شد. یک واحد آنزیمی آسکوربات پراکسیداز مقدار آنزیمی است که یک میلی‌مولار آسکوربات را در یک دقیقه اکسید می‌کند (Nakano and Asada, 1981). فعالیت آنزیم بر حسب واحد آنزیم در مقدار پروتئین کل (میلی‌گرم) موجود در ۱۵۰ میکرولیتر عصاره حاصل از سنجش پروتئین کل گزارش شد.

سنجش تجمع کادمیوم: ۰/۲۵ گرم بافت خشک برگ با ۵ میلی‌لیتر نیتریک اسید ٦۵ درصد در لوله آزمایش مخلوط شد. پس از سه ساعت، نمونه‌ها حرارت داده شد تا محلول اسیدی شفافی به‌دست آمد. به هر لوله ۱۵ میلی‌لیتر آب دیونایز اضافه شد. محتوای هر لوله با استفاده از کاغذ صافی صاف شد. حجم نهایی محلول به‌دست آمده حاوی عناصر بافت گیاهی با آب دیونایز به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده و به دستگاه تزریق شدند (Sagner *et al*., 1998). سنجش کادمیوم محلول حاصل توسط دستگاه جذب اتمی Graphite tube Atomizer GTA-110 مدل Spectra AA 220 Varian ساخت کشور استرالیا انجام گرفت.

داده‌های حاصل از آزمایش با نرم‌افزار آماری SPSS مورد تجزیه و تحلیل (تجزیه واریانس یک طرفه (ANOVA))

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج

نتایج حاصل از آنالیز واریانس و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کادمیوم ۱۰۰ میکرومولار اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر نسبت طول ریشه به ساقه، میزان وزن تر ریشه، وزن تر ساقه، وزن خشک ریشه، وزن خشک ساقه داشت (جدول ۱). کادمیوم باعث کاهش وزن تر ریشه و ٥٦/٤ درصد وزن تر ساقه (جدول ۲) و وزن خشک ریشه و ساقه (شکل **a** ۱) در مقایسه با گیاه شاهد شد. ۲٤-اپی‌براسینولید ۰/۷۵ میکرومولار نیز اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر نسبت طول ریشه به ساقه، میزان وزن تر ریشه و وزن تر ساقه داشت (جدول ۱). ۲٤-اپی‌براسینولید باعث افزایش ۱۳۷ درصد میزان وزن تر ساقه، وزن تر ریشه (جدول ۲) و نسبت طول ریشه به ساقه (شکل **a** ۲) در مقایسه با شاهد شد. همچنین نانو ذره سیلیس ۵۰ میلی‌گرم در لیتر اثر معنی‌داری بر میزان وزن خشک ریشه در سطح یک درصد نشان داد (جدول ۱). تیمار نانو ذره سیلیس باعث افزایش وزن خشک ریشه در مقایسه با شاهد شد (شکل **b** ۱). کاربرد همزمان نانو ذره سیلیس و ۲٤-اپی‌براسینولید در تنش کادمیوم اثر معنی‌داری بر میزان وزن تر ساقه در سطح یک درصد و وزن تر ریشه در سطح پنج درصد داشت (جدول ۱). تیمار همزمان نانو ذره سیلیس و ۲٤-اپی‌براسینولید باعث افزایش ٦۲ درصد وزن تر ریشه و ٦۰ درصد ساقه در مقایسه با شاهد شد (جدول ۲).

نتایج حاصل از آنالیز واریانس و مقایسه میانگین نشان داد که کادمیوم ۱۰۰ میکرومولار اثر معنی‌داری بر محتوای کلروفیل **a**، b و کل و ترکیبات فنولی در سطح یک درصد داشت (جدول ۳). کادمیوم باعث کاهش ٤۱/۲۲ درصد محتوای کلروفیل a و ۳۰/۷۸ درصد کلروفیل **b** و ۳۹/۰٦ درصد کلروفیل کل (شکل a ۳) و افزایش محتوای ترکیبات فنولی (جدول ٤) در مقایسه با شاهد شد. ۲٤-اپی‌براسینولید ۰/۷۵ میکرومولار هم اثر معنی‌داری بر محتوای کلروفیل a و کل در سطح یک درصد داشت (جدول ۳). نانو ذره سیلیس اثر معنی‌داری بر محتوای کلروفیل b، محتوای ترکیبات فنولی و فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز در سطح یک درصد داشت (جدول ۳). نانو ذره سیلیس ۵۰ میلی‌گرم در لیتر باعث کاهش محتوای ترکیبات فنولی (جدول ٤) و افزایش فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز (شکل ٤) در مقایسه با شاهد شد. کاربرد همزمان نانو ذره سیلیس و ۲٤-اپی‌براسینولید اثر معنی‌داری بر محتوای ترکیبات فنولی و فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز در سطح یک درصد موجب شد (جدول ۳). کاربرد همزمان نانو ذره سیلس و ۲٤-اپی‌براسینولید سبب افزایش ۷۰/٤٦ درصد فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز و کاهش محتوای ترکیبات فنولی در مقایسه با گیاه شاهد شد (شکل ٤).

نتایج حاصل از آنالیز واریانس و مقایسه میانگین نشان داد که کادمیوم ۱۰۰ میکرومولار اثر معنی‌داری بر محتوای مالون دآلدئید، هیدروژن پراکسید، تجمع کادمیوم در برگ در سطح یک درصد و فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح پنج درصد داشت (جدول ۵). کادمیوم باعث افزایش ۵۰/۸ درصد محتوای مالون دآلدئید (شکل a ٦)، افزایش ۱۱/۹۵ درصد هیدروژن پراکسید (شکل a ۵) و افزایش تجمع کادمیوم در برگ (شکل b ۵) نسبت به گیاه شاهد شد. ۲٤-اپی‌براسینولید ۰/۷۵ میکرومولار هم اثر معنی‌داری بر محتوای مالون دآلدئید، هیدروژن پراکسید و فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح یک درصد داشت (جدول ۵). ۲٤-اپی‌براسینولید ۰/۷۵ میکرومولار باعث کاهش ۳۳/۳ درصد مالون دآلدئید (جدول ٤)، کاهش ٤۳/۷۳ درصد هیدروژن پراکسید (شکل **a** ۵)، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز (شکل ٤) و کاهش ۲۵/۸٦ درصد تجمع کادمیوم در برگ (شکل b ۵) گیاه گوجه‌فرنگی در مقایسه با گیاه شاهد شد. نانو ذره سیلیس اثر معنی‌داری بر محتوای مالون دآلدئید در سطح یک درصد، هیدروژن پراکسید در سطح پنج درصد، فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح یک درصد و تجمع کادمیوم در سطح پنج درصد داشت (جدول ۵). نانو ذره سیلیس باعث کاهش ۲۲/۰۸ درصد محتوای مالون دآلدئید (شکل a ٦)، ٤۱/۹ درصد هیدروژن پراکسید (شکل a ۵) و کاهش ۳۱/٤٦ درصد تجمع فلز کادمیوم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

جدول ۱- جدول آنالیز واریانس صفات رشدی گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		وزن خشک ساقه	وزن خشک ریشه	وزن تر ساقه	وزن تر ریشه	نسبت طول ریشه به ساقه
		(gr)				(cm)
کادمیوم	۱	۱۵/۲۰**	۰/٦٤۰**	۸۹۸/۷**	۵۳/۰**	۰/۳۲۰**
۲٤-اپی‌براسینولید	۱	۱/۵۰ ns	۰/۰۲۵ ns	٤۱۹/۰**	۵۷/٤**	۰/٤۲۰**
نانو سیلیس	۱	۰/۹۸ ns	۰/٤۲۰**	۲٦/٦ ns	۲/۸ ns	۰/۲۱۰ ns
کادمیوم × ۲٤-اپی‌براسینولید	۱	۰/٤۱ ns	۰/۰۰۷ ns	۸۵/۰ ns	۱۰/۱ ns	۰/۰۱۲ ns
کادمیوم × نانو سیلیس	۱	۰/۰۷ ns	۰/۰۰۵ ns	۳/۰ ns	۰/۵٦ ns	۰/۱۰۵ ns
نانو سیلیس × ۲٤-اپی‌براسینولید	۱	۰/٦۷ ns	۰/۰۲۵ ns	۱۸۵/٦ ns	٤/٦ ns	۰/۰۵۳ ns
کادمیوم × ۲٤-اپی‌براسینولید× نانو سیلیس	۱	۰/٦۷ ns	۰/۰۲۰ ns	۲۸۵/۱**	۱۳/۵*	۰/۰۰٦ ns
خطای کل	۱	۰/٦۵	۰/۰۲٦	۵۲/۷	۵/۰	۰/۰۳۰
ضریب تغییرات		۰/٤۰	۰/۲۸۰	۰/۳	۰/٤	۰/۲۷۱

**** تفاوت معنی‌دار در سطح $P \leq ۰/۰۱$، * تفاوت معنی‌دار در سطح $P \leq ۰/۰۵$ و ns عدم‌معنی دار**

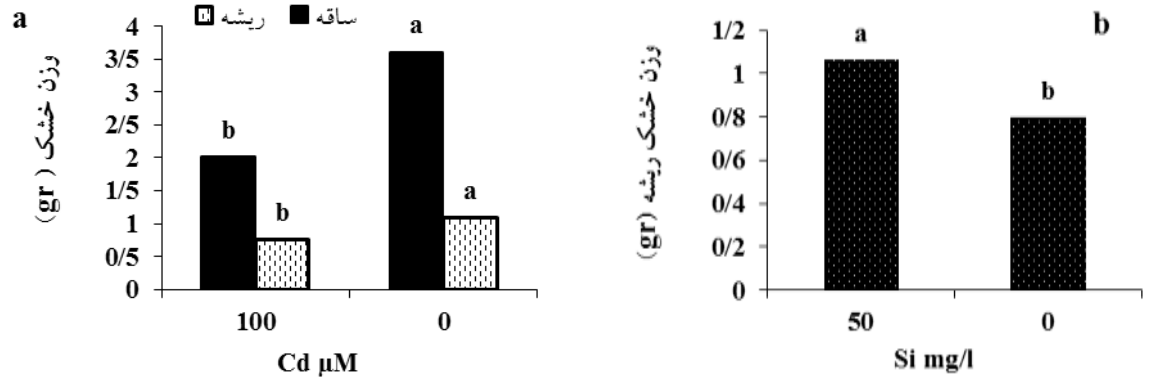
جدول ۲- تأثیر نانو ذره سیلیس، ۲٤-اپی‌براسینولید بر وزن تر ریشه و ساقه گیاه گوجه‌فرنگی تحت تیمار کادمیوم

کادمیوم (µM)	۲٤-اپی‌براسینولید (µM)	نانوسیلیس (mg/l)	وزن تر ریشه (gr)	وزن تر ساقه (gr)
۰	۰	۰	٦/۳۷±۰/۲ bc	۲۸/٦۷±۰/۷ abc
		۵۰	٦/۷٤±۰/٤ bc	۲۸/۷۳±۰/٦ abc
	۰/۷۵	۰	۱۰/۱٤±۲/٤ ab	۳۹/٤٦±۷/۷ ab
		۵۰	۱۱/۷٦±۲/۲ a	٤۲/۱۸±۷/۹ a
۱۰۰	۰	۰	۳/۵±۰/۲ c	۱۲/۵۰±۰/٤ d
		۵۰	٦/۲۷±۰/۷ bc	۲۷/۸۷±۰/٤ bc
	۰/۷۵	۰	۷/٦۸±۰/۹ abc	۲۹/٦٤±۳ abc
		۵۰	۵/٦۷±۰/۸ c	۲۰±۲/٤ d

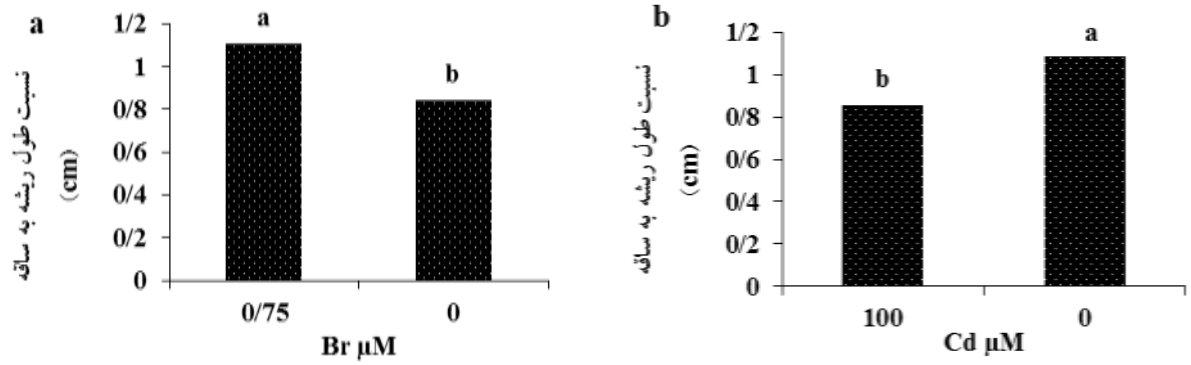
اعداد داخل جدول شامل میانگین ± خطای استاندارد و حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم‌معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

در برگ (شکل b ۵) گوجه‌فرنگی در مقایسه با شاهد شد. اثر متقابل نانو ذره سیلیس و ۲٤-اپی‌براسینولید و کادمیوم باعث اثر معنی‌دار بر محتوای هیدروژن پراکسید در سطح یک درصد، محتوای مالون دآلدئید و تجمع کادمیوم در سطح پنج درصد شد (جدول ۵). کاربرد همزمان نانو ذره سیلیس و ۲٤-اپی‌براسینولید منجر به کاهش ۳۰/۵۵ درصد محتوای مالون دآلدئید (جدول ٤)، کاهش ۲۲/۵۷ درصد هیدروژن پراکسید (شکل a ۵) و کاهش ۲۵/٤۳ درصد تجمع فلز کادمیوم در برگ

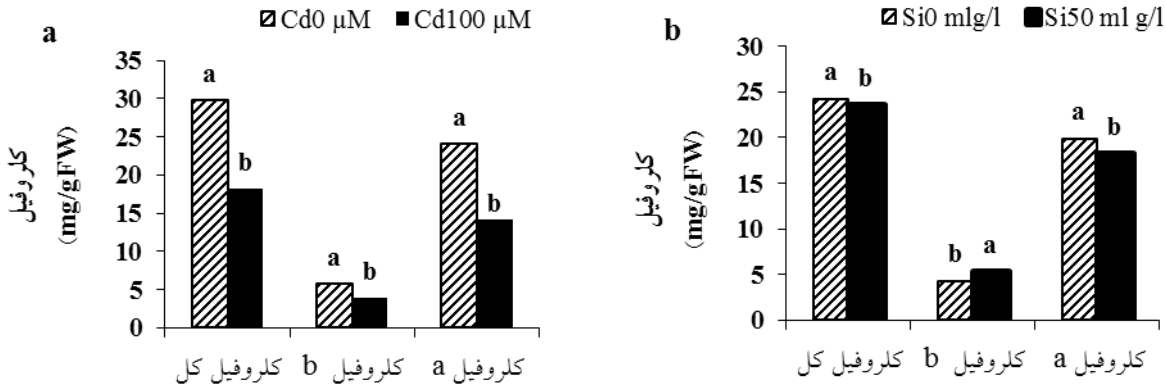
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]



شکل ۱- a: تأثیر تیمار صفر و ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم (Cd) بر وزن خشک ریشه و ساقه گیاه گوجه‌فرنگی. b: تأثیر پیش‌تیمار صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیس (Si) بر وزن خشک ریشه گیاه گوجه‌فرنگی. حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم‌معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.



شکل ۲- تأثیر پیش‌تیمار صفر و ۰/۷۵ میکرومولار ۲۴-اپی‌براسینولید (Br) بر نسبت طول ریشه به ساقه گیاه گوجه‌فرنگی (a). تأثیر تیمار صفر و ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم (Cd) بر نسبت طول ریشه به ساقه گیاه گوجه‌فرنگی (b). حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم‌معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.



شکل ۳- تأثیر تیمار صفر و ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم (Cd) بر محتوای کلروفیل a و کلروفیل b و کل گیاه گوجه‌فرنگی (a). تأثیر پیش‌تیمار صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیس بر محتوای کلروفیل a و کلروفیل b و کل گیاه گوجه‌فرنگی (b). حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم‌معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

جدول ۳- جدول آنالیز واریانس کلروفیل a، b و کل، ترکیبات فنولی و فعالیت پلی‌فنول اکسیداز گیاه گوجه‌فرنگی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		پلی‌فنول اکسیداز (U/mg protein)	ترکیبات فنولی	کلروفیل کل (mg/gr FW)	کلروفیل b	کلروفیل a
کادمیوم	۱	۱/٦٤ ns	٦۹/۱**	۸۱۸/۳**	۱۸/۲۹**	۵۹۱/۹**
۲٤-اپی‌براسینولید	۱	۰/۵٤ ns	۱۰/۳ ns	۱۵۳/۸**	۰/۱۹ ns	۱٤۲/۹**
نانو سیلیس	۱	۱۹/٤٤**	۷۰/۸**	۲/۱ ns	٦/۳۰**	۱۵/۸ ns
کادمیوم × ۲٤ -اپی‌براسینولید	۱	۰/۸۱ ns	۰/۸۲ ns	٤٦/٤ ns	۰/٤۲ ns	۵۵/۷ ns
کادمیوم × نانو سیلیس	۱	۰/۱٤ ns	۰/۷٤ ns	٤۹/۷ ns	۱/٦۰ ns	٦۹/۳ ns
نانو سیلیس × ۲٤ -اپی‌براسینولید	۱	۸/٦٦**	٤۰٦/۲**	۳۵/۵ ns	۱/۳۰ ns	۵۰/٤ ns
کادمیوم ×۲٤ -اپی‌براسینولید × نانوسیلیس	۱	۱/۸٦ ns	۳۵/۳ ns	۱۰/۱ ns	۰/۲۸ ns	۱۳/۷ ns
خطای کل	۱	۰/٦۲	۲/۹	۱۵/۲	۰/۵۸	۱۸/٦
ضریب تغییرات		۰/۲۹	۰/۲	۰/۳	۰/۲٦	۰/٤

**** تفاوت معنی‌دار در سطح $P \leq ۰/۰۱$، * تفاوت معنی‌دار در سطح $P \leq ۰/۰۵$ و ns عدم‌معنی‌دار**

جدول ٤- تأثیر نانو ذره سیلیس،۲٤-اپی‌براسینولید بر محتوای مالون دآلدئید و ترکیبات فنول گیاه گوجه‌فرنگی

۲٤-اپی‌براسینولید (µM)	نانو سیلیس (mg/L)	ترکیبات فنولی (mg/g FW)	مالون دآلدئید (nM/g FW)
۰	۰	۳۵/۵±۱/۸ a	۰/۳٦±۰/۰۳ a
	۵۰	۲۳/۸±۰/۲ c	۰/۲٦±۰/۰۱ b
۰/۷۵	۰	۲۸/۵±۱/۷ b	۰/۲٤±۰/۰۲ b
	۵۰	۳۳/۳±۱/۲ a	۰/۲۵±۰/۰۱ b

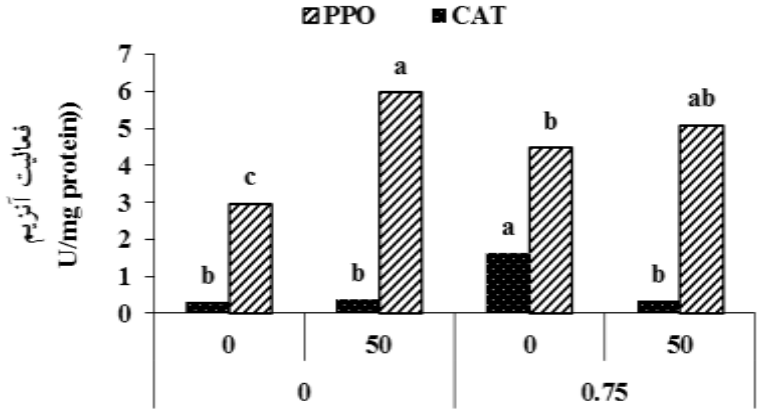
اعداد داخل جدول شامل میانگین ± خطای استاندارد و حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم‌معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

(شکل b ۵) در مقایسه با گیاه شاهد شد (جدول ۵).

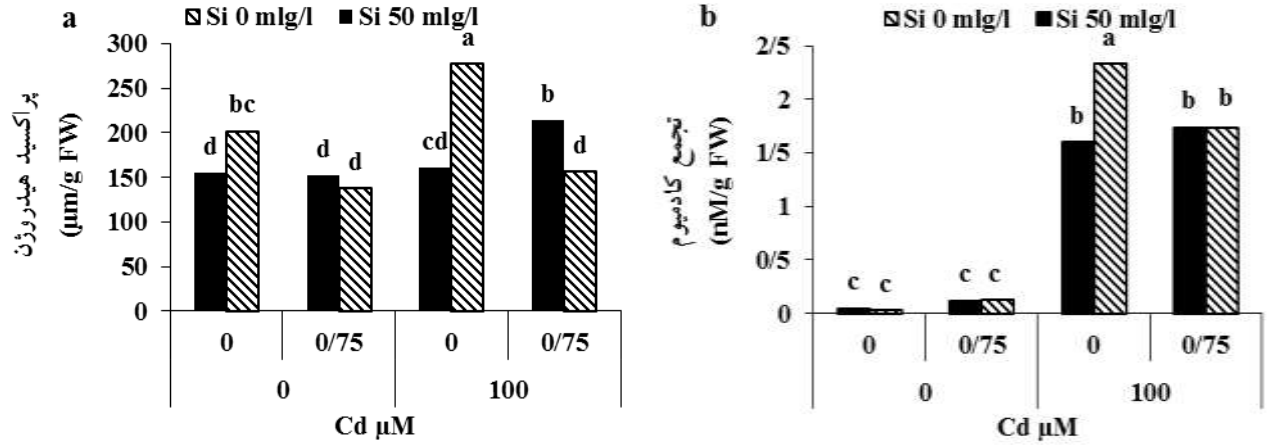
بحث

در پژوهش حاضر تنش کادمیوم ۱۰۰ میکرومولار باعث کاهش وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی و نسبت طول ریشه به ساقه گیاه گوجه شد. همچنین تنش کادمیوم ۱۰۰ میکرومولار باعث کاهش محتوای کلروفیل a و b، کلروفیل کل شد. پیش‌تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذره سیلیس منجر به بهبود وزن خشک ریشه و وزن تر اندام هوایی گیاه تحت تنش در مقایسه با گیاه شاهد گردید. ۲٤-اپی‌براسینولید ۰/۷۵ میکرومولار نیز منجر بهبود وزن تر اندام هوایی، نسبت طول ریشه به طول ساقه گیاه تحت تنش در مقایسه با شاهد شد. اثر متقابل پیش‌تیمارهای نانو ذره سیلیس (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و ۲٤-اپی‌براسینولید (۰/۷۵ میکرومولار) منجر بهبود وزن خشک ریشه در گیاه تحت تنش در مقایسه با شاهد شد. طبق نتایج این پژوهش تنش کادمیوم سبب کاهش نسبت طول ریشه به ساقه و وزن تر و خشک ریشه و ساقه شده درنتیجه باعث کاهش رشد در گیاه گوجه شده است. کادمیوم می‌تواند با مهار

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]



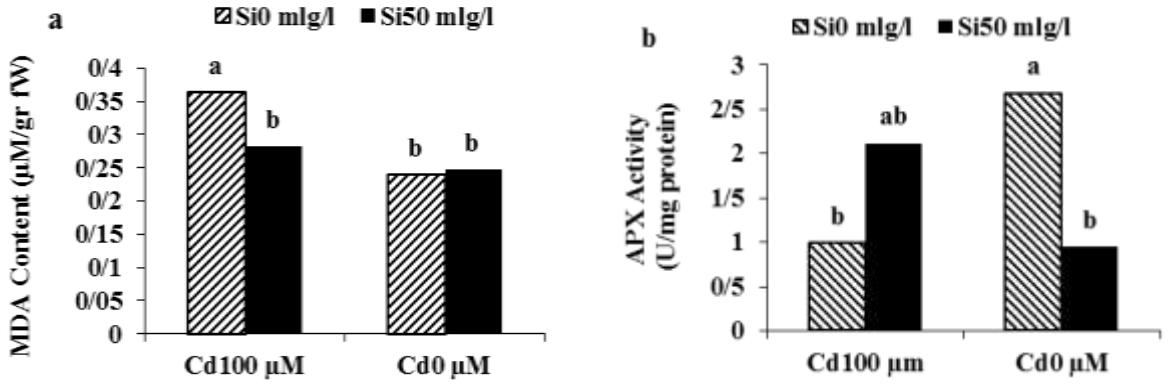
شکل ٤- تأثیر پیش‌تیمار صفر و ۰/۷۵ میکرومولار ٢٤-اپی‌براسینولید (Br) و صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیس (Si) بر فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنول اکسیداز (PPO) و کاتالاز (CAT) گیاه گوجه‌فرنگی. حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم‌معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.



شکل ۵- تأثیر پیش‌تیمار صفر و ۰/۷۵ میکرومولار ٢٤-اپی‌براسینولید (Br) و پیش‌تیمار صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذره سیلیس (Si) بر محتوای پراکسید هیدروژن (a) و تجمع کادمیوم (b) در برگ گیاه گوجه‌فرنگی تحت تیمار کادمیوم صفر و ۱۰۰ میکرومولار (Cd). حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم‌معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

غیرقابل برگشت تقسیم سلولی و سرعت طویل‌شدن سلول‌ها رشد گیاه را کاهش دهد (Liu *et al.*, 2003). همچنین کادمیوم می‌تواند موجب افزایش فعالیت پراکسیداز آپوپلاستی شده و اتصال گلیکوپروتئین‌های غنی از هیدروکسی پرولین را با اسیدهای فنولی زیاد کند. درنتیجه باعث افزایش ضخامت دیواره ثانویه سلول شده و بر رشد سلول و طویل‌شدن ریشه اثر منفی می‌گذارد (Wang *et al.*, 2004). در این پژوهش پیش‌تیمار نانو ذره سیلیس باعث افزایش وزن تر ساقه و وزن خشک ریشه و نسبت طول ریشه به ساقه گیاه تحت تنش شد درنتیجه سبب بهبود رشد گیاه شد. کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت تنش کادمیوم از نشانه‌های تنش اکسیداتیو در نظر گرفته می‌شود که ممکن است به‌علت تخریب ساختار کلروپلاست، دستگاه فتوسنتزی و فوتواکسیداسیون رنگدانه‌ها باشد. گزارشات متعددی مبنی بر اثر فلزات سنگین بر محتوی کلروفیل گیاهان وجود دارد. در گیاه آفتابگردان که در معرض کادمیوم قرار گرفته بود علائم نکروزگی و کلروزه‌شدن مشاهده

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]



شکل ٦- تأثیر پیش‌تیمار صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذره سیلیس (Si) و تیمار صفر و ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم (Cd). بر محتوای مالون دآلدئید (MDA) (a) و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX) (b) در گیاه گوجه‌فرنگی. حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم‌معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

شده است. محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل آن نیز کاهش نشان داده است (Di cagno *et al*., 2001). در گیاهچه لوبیا نیز کادمیوم باعث کاهش محتوای کلروفیل گردیده است. این کاهش ممکن است درنتیجه بازدارندگی آنزیم‌های مسئول بیوسنتز کلروفیل ایجاد شده باشد (Kirbag and Munzuroglu, 2005).

سیلیسیم یکی از عناصر غذایی مفید است که بر رشد و سلامت گیاه تأثیر دارد (Cherif and Belanger, 1992). به‌طور کلی مکانیسم اصلی اصلاح تنش فلزات سنگین توسط سیلیسیم در گیاهان شامل: (۱) کمپلکس فلزات با سیلیسیم، (۲) ممانعت از انتقال فلزات از ریشه به سمت جوانه‌ها می‌شود، (۳) توزیع و تقسیم یون‌های فلزات در داخل گیاهان و (٤) تحریک‌کردن سیستم آنتی‌اکسیدان‌ها در گیاهان (Gong *et al*., 2005). نانو ذره سیلیس فتوسنتز را افزایش می‌دهد و سبب بهبود رشد در شرایط تنش کادمیوم می‌شود. براساس نتایج این تحقیق پیش‌تیمار ٢٤-اپی‌براسینولید سبب بهبود نسبت طول ریشه به ساقه و وزن تر ساقه گیاه گوجه تحت تنش شد. به‌نظر می‌رسد افزایش فعالیت آنزیم‌ها و نیز کاهش و جلوگیری از تخریب آنها به‌وسیله کادمیوم یکی از دلایل کاهش و تخفیف صدمات حاصل از تنش فلز سنگین کادمیوم بر سلول‌ها است که در حضور براسینواستروئید توسط گروهی از پروتئین‌های محافظ ساخته می‌شود، صورت می‌گیرد (Tsukamoto and Matasubara, 1968). ٢٤-اپی‌براسینولید در تنش فلزات سنگین، میزان کلروفیل، ظرفیت فتوسنتزی و متابولیسم کربوهیدرات‌ها را جهت افزایش رشد گیاه تحت شرایط تنش تنظیم می‌کند (Anwar *et al*., 2018). همچنین گزارش شده است که ٢٤- اپی‌براسینواسترولید باعث افزایش توان تحملی گیاهان در تنش‌های غیرزیستی و بهبود کارآیی فتوسنتز، افزایش محتوای کلروفیل وتنظیم هدایت روزنه‌ای می‌شود (Sasse, 2003). پیش‌تیمار همزمان نانو ذره سیلیس و ٢٤-اپی‌براسینولید نیز سبب افزایش وزن تر ساقه گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش شد. طبق مطالعات صورت‌گرفته تیمار همزمان نانو ذره سیلیس و ٢٤-اپی‌براسینولید باعث افزایش رشد گیاه نخود شده است (Jan *et al*., 2018).

همچنین در پژوهش حاضر تنش کادمیوم ۱۰۰ میکرومولار باعث افزایش محتوای ترکیبات فنولی، کاهش فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز، فعالیت آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز، افزایش محتوای مالون دآلدئید، هیدروژن پراکسید و افزایش تجمع فلز کادمیوم در برگ گیاه گوجه‌فرنگی شد. اثر متقابل پیش‌تیمارهای نانو ذره سیلیس (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و ٢٤-اپی‌براسینولید (۰/۷۵ میکرومولار) اثر معنی‌داری در کاهش محتوای مالون دآلدئید و هیدروژن پراکسید داشت و نیز افزایش فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز و کاهش تجمع فلز کادمیوم در برگ در گیاه تحت تنش در مقایسه با شاهد باعث شد. نتایج

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

این بررسی نشان می‌دهد که تیمار کادمیوم منجر به خسارت به غشا گردیده و افزایش پراکسیداسیون لیپیدها شده است. محققین نشان داده‌اند که تنش کادمیوم باعث القا سمیت و افزایش پراکسیداسیون لیپیدها در برگ‌های گیاه برنج شده است (Chen *et al*., 2003). در پژوهش حاضر مشاهده شد که به‌طور عموم کاربرد نانو ذره سیلیس و ۲٤-اپی‌براسینولید درگیاه‌های تحت تنش باعث کاهش محتوای مالون دآلدئید و هیدروژن پراکسید شد و اثر متقابل آنها نیز باعث کاهش مالون دآلدئید و هیدروژن پراکسید می‌شود. نتایج در این پژوهش نشان داد که تنش کادمیوم باعث کاهش فعالیت کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز شده است. در حالی که پیش‌تیمار ۲٤-اپی‌براسینولید باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و تخفیف تنش شد. افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز منجر به مهار انواع اکسیژن فعال از جمله هیدروژن پراکسید می‌شود که در طی تنش کادمیوم تجمع می‌یابد (Zhang *et al*., 2009). همچنین بیان شده است که فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی مانند کاتالاز در حضور ۲٤-اپی‌براسینولید افزایش می‌یابد (Zhang *et al*., 2009). کاهش سمیت کادمیوم به‌وسیله نانو ذره سیلیس با افزایش معنی‌دار آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی و بنابراین کاهش تولید ROS، کاهش پراکسیداسیون لیپید و تشکیل مالون دآلدئید مرتبط است (Song *et al*., 2009). در این بررسی تنش کادمیوم سبب افزایش ترکیبات فنولی شده که مهم‌ترین آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی به‌شمار می‌آیند. نقش کلیدی ترکیب‌های فنلی به‌عنوان حذف‌کننده‌های رادیکال‌های آزاد در چندین مقاله گزارش شده است (Shi *et al*., 2010; Katalinic *et al*., 2006). ترکیبات فنولی در مهار و کاهش اکسیداسیون لیپیدها و به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان برای دفاع علیه ROS عمل می‌نمایند. تیمار همزمان ۲٤-اپی‌براسینولید و نانو ذره سیلیس سبب افزایش فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز در تنش کادمیوم شد. بنابراین به‌نظر می‌رسد که Si با افزایش بیشتر پتانسیل آنتی‌اکسیدانی سبب محافظت گیاه در برابر تنش اکسیداتیو شده است. اثرات تحریکی نانو ذره سیلیس بر آنتی‌اکسیدان‌ها تحت تنش کادمیوم در گیاهان ذرت (Lukacova *et al*., 2013)، گندم (Hussain *et al*., 2015)، پنبه (Farooq *et al*., 2013)، برنج (Tripathi *et al*., 2012) مشاهده شده است. افزایش سطح فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها می‌تواند ROS اضافه تولیدشده را به‌وسیله فلزات سنگین جاروب و سبب حفظ سلول از اثرات مخرب تنش اکسیداتیو شود. این امر تحمل گیاه به تنش فلزات سنگین را افزایش می‌دهد (Wang *et al*., 2008). همچنین گزارش شده است که نانو ذرات اکسید سیلیسیم توانایی بالایی در حذف فلزات سنگین از محیط دارند (Abbasi *et al*., 2016). پیش‌تیمار ۲٤-اپی‌براسینولید نیز در تنش کادمیوم سبب کاهش ترکیبات فنولی و افزایش فعالیت پلی‌فنول اکسیداز شد. ۲٤-اپی‌براسینولید از طریق جلوگیری ازتولید ترکیب‌های تنش‌زا موجب بهبود مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی می‌شود. در بسیاری از منابع بر تأثیر کاربرد بیرونی براسینواستروئیدها بر افزایش تولید ترکیب‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود شرایط گیاه در مقابله با تنش‌های محیطی، تأکید شده است (Bajguz and Hayat, 2009).

طبق نتایج این تحقیق با افزایش غلظت کادمیوم، تجمع کادمیوم در بخش هوایی افزایش یافت. علت تجمع بیشتر کادمیوم در بخش هوایی سهولت حرکت آن در گیاه است (Yadegari *et al*., 2013). اثر همزمان این دو پیش‌تیمار هم سبب کاهش تجمع کادمیوم در برگ گیاه گوجه تحت تنش کادمیوم شد. مطالعات نشان داد که سیلیکون با فلزات سنگین تشکیل کمپلکس داده و آن را به شکل غیرسمی تبدیل می‌کند که گیاه قادر به جذب آن نیست (Liang *et al*., 2005). پیش‌تیمار ۲٤-اپی‌براسینولید هم باعث کاهش تجمع فلز کادمیوم در برگ گیاه تحت تنش شد. در سمیت کادمیوم، براسینواستروئید با اثر بر غشای پلاسمایی موجب بهبود جذب عناصر تغذیه‌ای می‌گردد (Campbell, 1999). همچنین مطالعات نشان داد که تیمار همزمان نانو ذره سیلیس و ۲٤-اپی‌براسینولید باعث کاهش تجمع فلز کادمیوم در برگ گیاه نخود شده است (Jan *et al*., 2018).

نتیجه‌گیری

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

تنش کادمیوم منجر به کاهش شاخص‌های رشدی و سیستم دفاعی گیاه را تضعیف می‌کند. پیش‌تیمارهای نانو ذره سیلیس و ۲٤-اپی‌براسینولید با بهبود ویژگی‌های بیوشیمیایی و مقاومت آنتی‌اکسیدانی گوجه‌فرنگی منجر به افزایش رشد و تخفیف تنش کادمیوم می‌شود. طبق نتایج به‌نظر می‌رسد این پیش‌تیمارها تنش فلزات سنگین را عمدتاً از طریق فعال‌کردن سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی کاهش می‌دهد و با کاهش محتوای مالون دآلدئید، هیدروژن پراکسید و ترکیبات فنولی از اثرات مخرب کادمیوم می‌کاهند. استفاده از نانو ذره سیلیس و ۲٤-اپی‌براسینولید جهت بهبود رشد گیاه گوجه‌فرنگی و افزایش مقاومت به کادمیوم توصیه می‌گردد

قدردانی

نویسندگان از قطب آنتی‌اکسیدان‌های گیاهی دانشگاه اصفهان تشکر می‌نمایند.

منابع

اسماعیل‌پور، ب.، رهبری، ا. و فاطمی، ح. (۱۳۹۸) اثر سیلیسیم بر شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه شوید (*Anethum graveolens* L.) در شرایط تنش سرب. فرآیند و کارکرد گیاهی ۸: ۹٤-۸۱.

بغوری، ا. و رحمانی، ح. (۱۳۸٦) بررسی تأثیر دراز مدت کودهای فسفره بر میزان کادمیوم خاک و گیاه در منطقه بران اصفهان. دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج، ایران.

شکاری، ف. و اسفندیاری، ع. (۱۳۸۹) فیزیولوژی عملکرد گیاهان زراعی. انتشارات دانشگاه مراغه.

شیرخانی، ز.، چهره‌گانی‌راد، ع.، غلامی، م. و محسن‌زاده، ف. (۱۳۹۸) پاسخ‌های مرفولوژیکی و فیزیولوژیکی تاتوره (*Datura stramonium* L.) به سمیت کادمیوم. فرآیند و کارکرد گیاهی ۸: ۱۳٦-۱۲۱.

ملکوتی، م. ج. و همایی، م. (۱۳۸۳) حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

Anwar, A., Liu, Y., Dong, R., Bai, L., Yu, X. and Li, Y. (2018) The physiological and molecular mechanism of brassinosteroid in response to stress: A review. Biological Research 51: 46.

Aziz-Khan, H., Ziaf, Kh., Amjad, M. and Iqbal, Q. (2012) Exogenous application of polyamine improves germination and early seedling growth of hot pepper. Chilean Journal of Agricultural Research 72: 429-433.

Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Qayyum, M. F. and Irshad, M. K. (2015) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety 119: 186-197.

Ali, S., Bai, P., Zeng, F., Cai, S., Shamsi, I. H., Qiu, B., Wu, F. and Zhang, G. P. (2011) Ecotoxicological and interactive effects of chromium and aluminum on growth, oxidative damage and antioxidant enzymes of the two barley cultivars differing in Al tolerance. Environmental and Experimental Botany 70: 185-191.

Ali, S., Cai, S., Zeng, F., Qiu, B. and Zhang, G. P. (2012) The effect of salinity and chromium stresses on uptake and accumulation of mineral elements in barley genotypes differing in salt tolerance. Journal of Plant Nutrition 35: 827-839.

Abbasi Khalaki, M., Ghorbani, A. and Moameri, M. (2016) Effects of silica and silver nanoparticles on seed germination traits of *Thymus kotschyanus* in laboratory conditions. Journal of Rangeland Science 6: 221-231.

Bajguz, A. and Hayat, S. (2009) Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. Plant Physiology and Biochemistry 47: 1-8.

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: 248-254.

Balsberg pahlsson, M. (1989) Toxicity of heavy metal (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants. Water, Air, and Soil Pollution 47: 287-314.

Chen, Y. X., He, Y. F., Luo, Y. M., Yu,Y. L., Lin, Q. and Wongs, M. H. (2003) Physiological mechanism of plant root exposed to cadmium. Chemosphere 50: 789-793.

Cherif, M. and Belanger, R. R. (1992) Use of potassium silicate amendments in recirculating nutrient solutions to suppress Pythium ultimum on long English cucumber. Journal of Plant Disease 76: 1008-1011.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

Campbell, W. H. (1999) Nitrate reductase structure, function and regulation: bridging the gap between biochemistry and physiology. Annual Review of Plant Biology 50: 277-303.

Dinakar, N., Nagajyothi, P. C., Suresh, S., Damodharam, T. and Suresh, C. (2009) Cadmium induced changes on proline, antioxidant enzymes, nitrate and nitrite reductase in *Arachis hypogaea* L. Journal of Environmental Biology 30: 289-294.

Di Cagno, R., Guidini, L., De Gara, L. and Soldatini, G. F. (2001) Combined cadmium and ozone treatment affect photosynthesis and ascorbatedependent defence in sunflower. New Phytologist 151: 627-636.

Farooq, M. A., Ali, S., Hameed, A., Ishaque, W., Mahmood, K. and Iqbal, Z. (2013) Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. Ecotoxicology and Environmental Safety 96: 242-249.

Gur, N. and Topdemir, A. (2008) Effects of some heavy metals on in vitro pollen germination and tube growth of apricot (*Armenica vulgaris* L.) and cherry (*Cerasu savium* L.). World Applied Science Journal 4: 195-198.

Gardea-Torresdey, J. L., Peralta-Videa, J. R., De La Rosa, G. and Parsons, J. G. (2005) Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy.Coordination Chemistry Reviews 249: 1797-1810.

Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S. and Zhang, C. (2005) Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. Plant Science 169: 313-321.

Hussain, I., Ashraf, M. A., Rasheed, R., Asghar, A., Sajid, M. A. and Iqbal, M. (2015) Exogenous application of silicon at the boot stage decreases accumulation of cadmium in wheat (*Triticum aestivum* L.) grains. Brazilian Journal of Botany 38: 223-234.

Heath, R. L. and Packer, L.(1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics 125: 189-198.

Hassan, M. J., Zhu, Z., Ahmad, B. and Mahmood, Q. (2006) Influence of cadmium toxicity on rice genotypes as affected by zinc, sulfur and nitrogen fertilizers. Caspian Journal of Environmental Science 4: 1-8.

Hayat, S., Alyemeni, M. N. and Hasan, S. A. (2012) Foliar spray of brassinosteroid enhances yield and quality of *Solanum lycopersicum* under cadmium stress. Saudi Journal of Biological Sciences 19: 325-335.

Islam, M. M., Hoque, M. A., Okuma, E., Banu, M. N. A., Shimoishi, Y., Nakamura, Y. and Murata, Y. (2009) Exogenous proline and glycinebetaine increase antioxidant enzyme activities and confer tolerance to cadmium stress in cultured tobacco cells. Journal Plant Physiology 166: 1587-1597.

Jiang, J., Li., M., Wang, L. J., Zhang, F. S. and Zhang, L. J. (2002) Physical and chemical properties and diagnosis of turf soils in golf courses. Journal of Acta Agrestia Sinica 10: 59-62.

Jing, D., Fe-bo, W. and Guo-ping, Z. (2005) Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. Journal of Zhejiang University Science B 6: 974-980.

Jan, S., Alyaemeni, M. N.,Wijaya, L., Alam, P., Siddique, K. H. and Ahmad, P. (2018) Interactive effect of 24-epibrassinolide and silicon alleviates cadmium stress via the modulation of antioxidant defense and glyoxalase systems and macronutrient content in *Pisum sativum* L. seedlings. Journal of BiuMed Central Plant Biology 18: 146.

Kidd, P. S., Llugany, M., Gunse, B. and Barcelo, J. (2001) The role of root exudates in aluminium resistance and silicon induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). Journal of Experimental Botany 52: 1339-1352.

Kar, M. and Mishra, D. (1976) Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. Plant Physiology 57: 315-319.

Kirbag, Z. F. and Munzuroglu, O. (2005) Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, prolin and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica 47: 157-164.

Katalinic, V., Milos, M., Kulisic, T. and Jukic, M. (2006) Sceerning of 70 medical plant extracts for antioxidant capacity and total phenols. Food Chem 94: 550-577.

Khodakovskaya, M. V., Kanishka, D. S., Alexandru, S. B., Dervishi, E. and Villagarcia, H. (2012) Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. American Chemical Society 6: 2128-2135.

Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G. and Christie, P. (2007) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. Environmental Pollution 147: 422-428.

Lichtenthaler, H. K. (1987) Methods in Enzymology. Elsevier.

Lukacova, Z., Svubova, R., Kohanova, J. and Lux, A. (2013) Silicon mitigates the Cd toxicity in maize in relation to cadmium translocation, cell distribution, antioxidant enzymes stimulation and enhanced endodermal apoplasmic barrier development. Plant Growth Regulation 70: 89-103.

Liang, Y., Wong, J. W. C. and Long, W. (2005) Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. Chemosphere 58: 475-483.

Liu, D., Jiang, W. and Gao, X. (2003) Effects of cadmium on root growth, cell division and nucleoli in root tip cells of garlic. Biologia Plantarum 47: 79-83.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

Tsukamoto, Y. and Matsubara, M. (1968) Studies on germination of chrysanthemum pollen. Substance promoting germination. Plant Cell Physiology 9: 565-572.

Mohsenzadeh, S., Shahrtash, M. and Teixeira de Silva, J. A. (2012) Silicon improves growth and alleviates toxicity of cadmium in maize seedling. Plant Stress 6: 39-43.

Ma, J. F. and Yamaji, N. (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. Plant Science 11: 392-397.

Nakano, Y. and Asada, K. (1981) Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant and Cell Physiology 22: 867-880.

Phene, C. J., Mc Cormick, R. L., Miyamoto, J. M., Meek, D. W. and Davis, K. R. (2008) Evapotranspiration and crop coefficient of trickle irrigated tomatoes. Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers 10: 823-831.

Peng, Q., Liu, Y., Zeng, G., Xu, W., Yang, C. and Zhang, J. (2010) Biosorption of copper (II) by immobilizing *Saccharomyces cerevisiae* on the surface of chitosancoated magnetic nanoparticles from aqueous solution. Journal of Hazardous Materials 177: 676-82.

Ronald, S. F. and Laima, S. K.(1999) Phenalics and cold tolerance of brassica napus. Plant Agriculture1: 1-5.

Seregin, I. V. and Ivanov, V. B. (2001) Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. Russian Journal of Plant Physiology 48: 523-544.

Shahrtash, M. and Mohsenzadeh, S. (2011) The effect of silicon on biochemical characteristics of maize seedling infected by *Pythium aphanidermatum* during periods of high temperature and humidity. Asian Journal Experimental Biology Science 2: 96-101.

Sagner, S., Kneer, R., Wanner, G., Cosson, J. P., Deus-Neumann, B. and Zenk, M. H. (1998) Hyperaccumulation, complexation and distribution of nickel in *Sebertia acuminate*. Phytochemistry 47: 339-347.

Song, A., Li, Z., Zhang, J., Xue, G., Fan, F. and Liang, Y. (2009) Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Sienhanced antioxidant defense capacity. Journal of Hazardous Materials 172: 74-83.

Shi, G., Cai, Q., Liu, C. and Wu, L. (2010) Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of anti-oxidative enzymes. Plant Growth Regulator 61: 45-52.

Sasse, J. M. (2003) Physiological actions of brassinosteroids: An update. Journal of Plant Growth Regulation 22: 276-288.

Tang, J., Han, Z. and Chai, J. (2016) What are brassinosteroids and how do they act in plants?. Journal of BiuMed Central Plant Biology 14: 113.

Tripathi, D. K., Singh, V. P., Kumar, D. and Chauhan, D. K. (2012) Rice seedlings under cadmium stress: Effect of silicon on growth, cadmium uptake, oxidative stress, antioxidant capacity and root and leaf structures. Chemistry and Ecology 28: 281-291.

Velikova, V., Yordanov, I. and Edreva, A. (2000) Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. Plant Science 151: 59-66.

Vassilev, A. (2003) Barley seedlings as bio-indicators for water contamination by cadmium. Journal of Environmental Protection and Ecology 4: 354-360.

Wang, Z., Zhang, Y., Huang, Z. and Huang, L. (2008) Antioxidative response of metal-accumulator and non-accumulator plants under cadmium stress. Plant and Soil 310: 137-149.

Wang, Y., Ying, Y., Chen, J. and Wang, X. (2004) Transgenic Arabidopsis overexpressing Mn-SOD enhanced salt tolerance. Plant Science 167: 671-677.

Wu, J., Guo, J., Hu, Y. and Gong, H. (2015) Distinct physiological responses of tomato and cucumber plants in silicon-mediated alleviation of cadmium stress. Frontiers in Plant Science 6: 453-467

Yadegari, M., Karimi, S. and Irani Pour, R. (2013) The effect of heavy metals (Cd and Ni) on growth, yield and other characters of *Portulaca oleracea* L. Journal of Applied Science and Agriculture 8: 1438-1445.

Zhang, X., Fan, X., Li, Ch. and Nan, Zh. (2010) Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth and antioxidative enzymes in *Achnatherum inebrians* plants infected with a Neotyphodiumendophyte. Plant Growth Regulation 60: 91-97.

Zhang, M., Zhai, Z., Tian, X., Duan, L. and Li, Z. (2009) Brassinolide alleviated the adverse effect of water deficits on photosynthesis and the antioxidant of soybean (*Glycine max* L.). Plant Growth Regulation 56: 257-264.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]

Changes in antioxidant system in cadmium-stressed tomato (*Lycopersicum solanum L.*) plants treated with nanosilica and 24-Epibrassinolide

Hadis Rezaei[1], Seyyed Mohammad Javad Arvin[2,1], Hakimeh Oloumi*[1]

[1] Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran
[2] Plant Products Division, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran
(Received: 03/09/2019, Accepted: 15/01/2020)

Abstract

In this experimental study, a completely randomized design was carried out on tomato plants with two levels of cadmium chloride, (0 and 100 µM), two levels of 24-epiBrassinolide (0 and 0.75 µM) and two levels of silica nanoparticles (0 and 50 mg/l). Cadmium stress significantly decreased growth parameters, chlorophyll content whereas increased content of phenolic compounds, malondialdehyde, hydrogen peroxide and increased cadmium accumulation in tomato leaves. Results showed that pretreatment of silica nanoparticles resulted in improved growth characteristics and increased polyphenol oxidase activity in the leaf under stress. Decrease in content of phenolic compounds, malondialdehyde and hydrogen peroxide was observed after cadmium accumulation in this treatment. Also, pretreatment of 24-epiBrassinolide decreased the content of phenolic compounds, malondialdehyde, hydrogen peroxide, whereas increased shoot fresh weight, root length to stem length ratio, polyphenol oxidase and catalase activity, and decreased cadmium accumulation in the leaf under stress. Interaction effects of pretreatment of silica and 24-epiBrassinolide nanoparticles had significant effect on malondialdehyde and hydrogen peroxide content as well as increase in root dry weight, polyphenol oxidase activity and decrease in cadmium accumulation in leaves. Silica nanoparticles and 24-epiBrassinolide nanoparticles were found to improve growth and attenuation of cadmium stress by improving the biochemical properties and antioxidant system of tomato plants.

Keywords: Polyphenol oxidase, Hydrogen peroxide, Phenolic compounds, Catalase, Tomato

Corresponding author, Email: oloumi.ha@gmail.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.25.8]