

## بررسی تغییرات سیستم آنتی‌اکسیدان گیاه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon solanum* L.) تیمار شده با نانو سیلیس و ۲۴-اپی‌براسینولید تحت تنش کادمیوم

حدیث رضایی<sup>۱</sup>، سید محمدجواد آروین<sup>۲</sup>، حکیمه علمی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

<sup>۲</sup> گروه تولیدات گیاهی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

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

### چکیده

در این بررسی آزمایشی به صورت 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 به طور معنی‌داری باعث کاهش پارامترهای رشدی، محتوای کلروفیل و همچنین افزایش محتوای ترکیبات فنولی، مالون دالدئید، 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 دالدئید و هیدروژن پراکسید، به دنبال کاهش تجمع کادمیوم در این تیمار مشاهده شد. پیش‌تیمار ۲۴-اپی‌براسینولید نیز منجر به کاهش محتوای ترکیبات فنولی، مالون دالدئید، 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 دالدئید و هیدروژن پراکسید و نیز وزن خشک ریشه، فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز و کاهش تجمع کادمیوم در برگ معنی‌دار بود. به نظر 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

(*al.*, 2012). در بین فلزات سنگین با پتانسیل ایجاد تنش، کادمیوم بیش از بقیه آنها مورد توجه جوامع علمی قرار گرفته است. کادمیوم به عنوان عامل مهم آلوده‌کننده محیط، برای گیاهان سمیت بالایی دارد (شیرخانی و همکاران، ۱۳۹۸). مقدار این فلز به دلیل استفاده از فاضلاب کارخانه‌های صنعتی و شهری و همچنین مصرف زیاد حشره‌کش‌ها (شکاری و

آلودگی‌های زمین‌های کشاورزی به علت 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 و سبب کاهش رشد گیاه، کاهش بازده و کیفیت محصولات کشاورزی می‌شوند (Ali *et*

\* نویسنده مسؤول، نشانی پست الکترونیکی: oloumi.ha@gmail.com

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 ۲۴-پی‌براسینولید 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

اسفندیاری، ۱۳۸۹) و مقادیر بالای کودهای شیمیایی به‌ویژه فسفات (بغوری و رحمانی، ۱۳۸۶) در زمین‌های کشاورزی زیاد است. کادمیوم به‌طور عمده در خاک آهکی لایه‌های سطحی تجمع پیدا می‌کند و همچنین در اثر هوازدهی 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 دسترس بودن 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 در نتیجه 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 ۴۵ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک خاک باعث اختلال فتوسنتز و تنفس و در نتیجه 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 در نتیجه 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 متابولیسم 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 عدم تعادل بین هیدروژن پراکسید تولیدی و تجزیه‌شده، تجمع می‌یابد. از

در این پژوهش اثر همزمان نانو ذره سیلیس و ۲۴-اپی‌براسینولید به صورت 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 به عنوان کود به دلیل 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 (تپیک) 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 به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. بذرهاى ضدعفونی‌شده گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) 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 به صورت هیدروپونیک و در شرایط

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.

**سنجش ترکیبات فنولی:** محتوای ترکیبات فنولی به روش Ronald و Laima (۱۹۹۹) محاسبه شد. ۰/۱ گرم از اندام هوایی گیاه در ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد ساییده و به مدت ۷۲-۲۴ ساعت در تاریکی نگهداری شد. به ۱ میلی‌لیتر محلول رویی ۱ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد اضافه گردید و با آب مقطر 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 به مدت یک ساعت در تاریکی نگهداری شد و جذب هر نمونه در طول موج 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 (۱۹۶۸) سنجش شد. ۰/۲ گرم از بافت تازه گیاهی در ۵ میلی‌لیتر تری‌کلرو استیک اسید ۰/۱ درصد ساییده شد. عصاره حاصل به مدت پنج دقیقه با دور  $1000 \times g$  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 به مدت 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  $5000 \times g$  به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. شدت جذب محلول رویی در طول موج ۵۲۳ نانومتر خوانده شد. جذب بقیه رنگیزه‌های غیراختصاصی در ۶۰۰ نانومتر تعیین و از این مقدار کسر شد. برای محاسبه غلظت MDA از ضریب خاموشی  $1 \text{ cm}^{-1} \text{ mM}^{-1}$  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  $10000 \times g$  برای ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس ۰/۵

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.

۱۴ روز پس از کاشت گیاه در مرحله ۴-۳ برگی، ۲۴-اپی‌براسینولید با غلظت‌های صفر و ۰/۷۵ میکرومولار به مدت شش روز به صورت یک روز در میان و نانو ذره سیلیس (از شرکت کیمیا گستر،  $\text{Nano SiO}_2\text{-Density } 2.2 \text{ g/cm}^3$ ) با غلظت‌های صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به مدت شش روز به صورت یک روز در میان و عدم‌تداخل زمانی با ۲۴-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 ۵-۶ 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 سانتریفیوژ با دور  $5500 \times g$  جذب نمونه‌ها در طول‌موج‌های ۶۴۷، ۶۶۴ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد. محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی با استفاده از روابط زیر و بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه گردید.

$$\text{Chl a (mg/g fw)} = (12.25 \text{ A664}) - (2.79 \text{ A647}) \times (V / W \times 1000)$$

$$\text{Chl b (mg/g fw)} = (21.21 \text{ A647}) - (5.1 \text{ A664}) \times (V / W \times 1000)$$

$$\text{Chl T (mg/g fw)} = (\text{Chl a} + \text{Chl b}) \times (V / W \times 1000)$$

$$\text{Car (mg/g fw)} = (((1000 \text{ A470}) - (1.8 \text{ Chl a}) - (85.02 \text{ Chlb}))/198) \times (V / W \times 1000)$$

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.

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 ( $2/8 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) و رابطه  $A=bc$ ، 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 ۶۵ درصد در لوله آزمایش مخلوط شد. پس از سه ساعت، نمونه‌ها حرارت داده شد تا محلول اسیدی شفاف 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))

میلی‌لیتر از محلول رویی به ۰/۵ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۱۰ میلی‌مولار و یک میلی‌لیتر پتاسیم یدید ۱ مولار اضافه و جذب در طول موج ۳۹۰ نانومتر خوانده شد. مقدار هیدروژن پراکسید در هر نمونه با استفاده از ضریب خاموشی  $0/28 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  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 به مدت ۲۰ دقیقه در  $5000 \times \text{g}$  و در دمای ۴ 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 اضافه کردن آب‌اکسیژنه به مخلوط واکنش و کاهش شدت جذب آب‌اکسیژنه در طول موج ۲۴۰ 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 ( $\text{mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) (Velikova et al., 2000). فرمول  $A=bc$  محاسبه گردید (Velikova et al., 2000). در این رابطه، A شدت جذب نمونه،  $\epsilon$  ضریب خاموشی، b عرض کوط 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 ۴۲۰ 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  $6/2 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  و فرمول  $A=bc$ ، مقدار بر جای مانده

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  $۵۶/۴$  درصد وزن تر ساقه (جدول ۲) و وزن خشک ریشه و ساقه (شکل a ۱) در مقایسه با گیاه شاهد شد. ۲۴-پی‌براسینولید  $۰/۷۵$  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). ۲۴-پی‌براسینولید 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 ۲۴-پی‌براسینولید 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 ۲۴-پی‌براسینولید باعث افزایش  $۶۲$  درصد وزن تر ریشه و  $۶۰$  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  $۴۱/۲۲$  درصد محتوای کلروفیل a و  $۳۰/۷۸$  درصد کلروفیل b و  $۳۹/۰۶$  درصد کلروفیل کل (شکل a ۳) و افزایش محتوای ترکیبات فنولی (جدول ۴) در مقایسه با شاهد شد. ۲۴-پی‌براسینولید  $۰/۷۵$  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 ۴) و افزایش فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز (شکل ۴) در مقایسه با شاهد شد. کاربرد همزمان نانو ذره سیلیس و ۲۴-پی‌براسینولید اثر معنی‌داری بر محتوای ترکیبات فنولی و فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز در سطح یک درصد موجب شد (جدول ۳). کاربرد همزمان نانو ذره سیلیس و ۲۴-پی‌براسینولید سبب افزایش  $۷۰/۴۶$  درصد فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز و کاهش محتوای ترکیبات فنولی در مقایسه با گیاه شاهد شد (شکل ۴).

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 ۶)، افزایش  $۱۱/۹۵$  درصد هیدروژن پراکسید (شکل a ۵) و افزایش تجمع کادمیوم در برگ (شکل b ۵) نسبت به گیاه شاهد شد. ۲۴-پی‌براسینولید  $۰/۷۵$  میکرومولار هم اثر معنی‌داری بر محتوای مالون دآلدئید، هیدروژن پراکسید و فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح یک درصد داشت (جدول ۵). ۲۴-پی‌براسینولید  $۰/۷۵$  میکرومولار باعث کاهش  $۳۳/۳$  درصد مالون دآلدئید (جدول ۴)، کاهش  $۴۳/۷۳$  درصد هیدروژن پراکسید (شکل a ۵)، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز (شکل ۴) و کاهش  $۲۵/۸۶$  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 ۶)،  $۴۱/۹$  درصد هیدروژن پراکسید (شکل a ۵) و کاهش  $۳۱/۴۶$  درصد تجمع فلز کادمیوم

جدول ۱- جدول آنالیز واریانس صفات رشدی گیاه گوجه‌فرنگی

میانگین مربعات					درجه آزادی	منابع تغییرات
نسبت طول ریشه به ساقه (cm)	وزن تر ریشه	وزن تر ساقه (gr)	وزن خشک ریشه	وزن خشک ساقه		
۰/۳۲۰**	۵۳/۰**	۸۹۸/۷**	۰/۶۴۰**	۱۵/۲۰**	۱	کادمیوم
۰/۴۲۰**	۵۷/۴**	۴۱۹/۰**	۰/۰۲۵ <sup>ns</sup>	۱/۵۰ <sup>ns</sup>	۱	۲۴-اپی‌براسینولید
۰/۲۱۰ <sup>ns</sup>	۲/۸ <sup>ns</sup>	۲۶/۶ <sup>ns</sup>	۰/۴۲۰**	۰/۹۸ <sup>ns</sup>	۱	نانو سیلیس
۰/۰۱۲ <sup>ns</sup>	۱۰/۱ <sup>ns</sup>	۸۵/۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۷ <sup>ns</sup>	۰/۴۱ <sup>ns</sup>	۱	کادمیوم × ۲۴-اپی‌براسینولید
۰/۱۰۵ <sup>ns</sup>	۰/۵۶ <sup>ns</sup>	۳/۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۵ <sup>ns</sup>	۰/۰۷ <sup>ns</sup>	۱	کادمیوم × نانو سیلیس
۰/۰۵۳ <sup>ns</sup>	۴/۶ <sup>ns</sup>	۱۸۵/۶ <sup>ns</sup>	۰/۰۲۵ <sup>ns</sup>	۰/۶۷ <sup>ns</sup>	۱	نانو سیلیس × ۲۴-اپی‌براسینولید
۰/۰۰۶ <sup>ns</sup>	۱۳/۵*	۲۸۵/۱**	۰/۰۲۰ <sup>ns</sup>	۰/۶۷ <sup>ns</sup>	۱	کادمیوم × ۲۴-اپی‌براسینولید × نانو سیلیس
۰/۰۳۰	۵/۰	۵۲/۷	۰/۰۲۶	۰/۶۵	۱	خطای کل
۰/۲۷۱	۰/۴	۰/۳	۰/۲۸۰	۰/۴۰		ضریب تغییرات

\*\* تفاوت معنی‌دار در سطح  $P \leq 0/01$ ، \* تفاوت معنی‌دار در سطح  $P \leq 0/05$  و ns عدم معنی‌دار

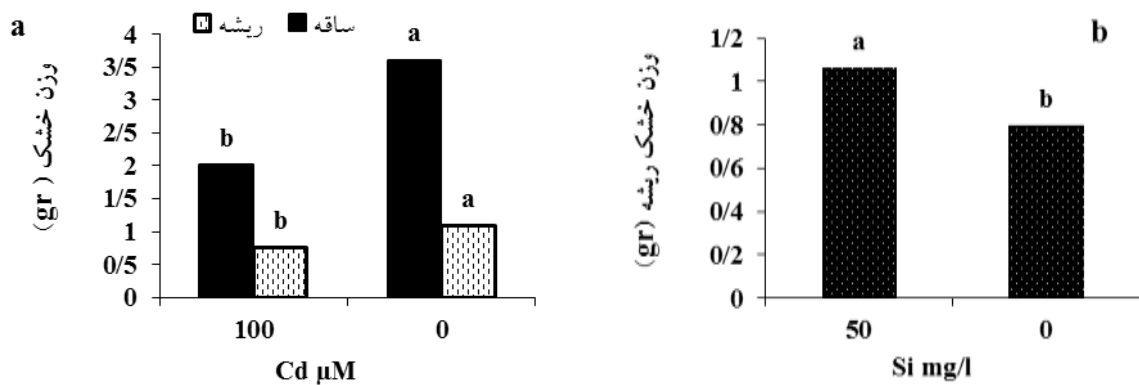
جدول ۲- تأثیر نانو ذره سیلیس، ۲۴-اپی‌براسینولید بر وزن تر ریشه و ساقه گیاه گوجه‌فرنگی تحت تیمار کادمیوم

وزن تر ساقه (gr)	وزن تر ریشه (gr)	نانو سیلیس (mg/l)	۲۴-اپی‌براسینولید (μM)	کادمیوم (μM)
۲۸/۶۷±۰/۷ <sup>abc</sup>	۶/۳۷±۰/۲ <sup>bc</sup>	۰	۰	۰
۲۸/۷۳±۰/۶ <sup>abc</sup>	۶/۷۴±۰/۴ <sup>bc</sup>	۵۰	۰	۰
۳۹/۴۶±۷/۷ <sup>ab</sup>	۱۰/۱۴±۲/۴ <sup>ab</sup>	۰	۰/۷۵	۰
۴۲/۱۸±۷/۹ <sup>a</sup>	۱۱/۷۶±۲/۲ <sup>a</sup>	۵۰	۰	۰
۱۲/۵۰±۰/۴ <sup>d</sup>	۳/۵±۰/۲ <sup>c</sup>	۰	۰	۱۰۰
۲۷/۸۷±۰/۴ <sup>bc</sup>	۶/۲۷±۰/۷ <sup>bc</sup>	۵۰	۰	۱۰۰
۲۹/۶۴±۳ <sup>abc</sup>	۷/۶۸±۰/۹ <sup>abc</sup>	۰	۰/۷۵	۱۰۰
۲۰±۲/۴ <sup>d</sup>	۵/۶۷±۰/۸ <sup>c</sup>	۵۰	۰	۱۰۰

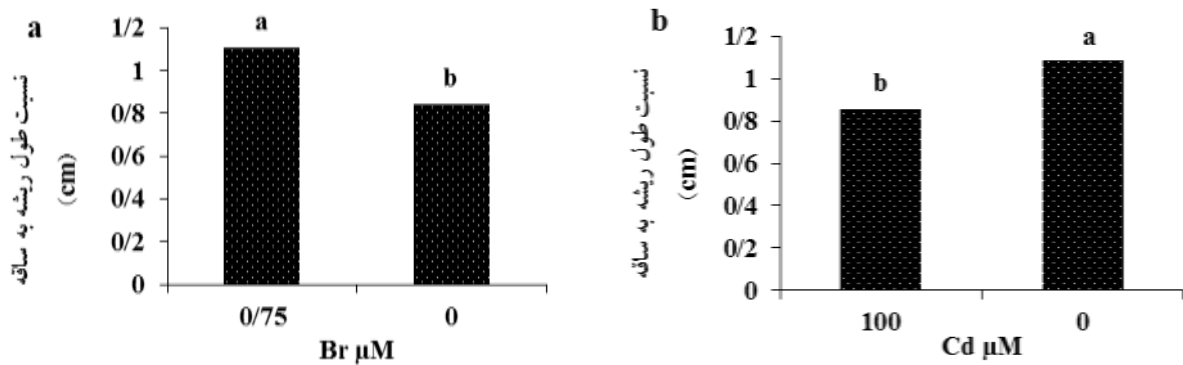
اعداد داخل جدول شامل میانگین ± خطای استاندارد و حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

شد (جدول ۵). کاربرد همزمان نانو ذره سیلیس و ۲۴-اپی‌براسینولید منجر به کاهش ۳۰/۵۵ درصد محتوای مالون دآلدئید (جدول ۴)، کاهش ۲۲/۵۷ درصد هیدروژن پراکسید (شکل a) و کاهش ۲۵/۴۳ درصد تجمع فلز کادمیوم در برگ

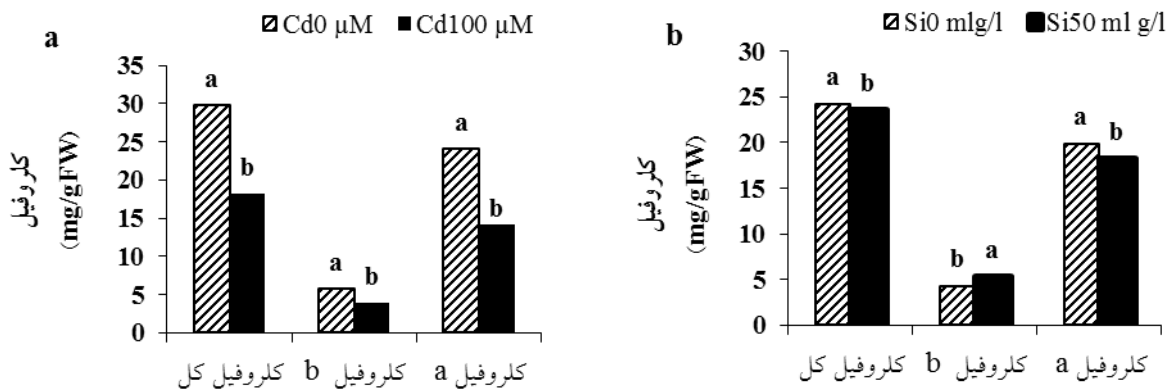
در برگ (شکل b) گوجه‌فرنگی در مقایسه با شاهد شد. اثر متقابل نانو ذره سیلیس و ۲۴-اپی‌براسینولید و کادمیوم باعث اثر معنی‌دار بر محتوای هیدروژن پراکسید در سطح یک درصد، محتوای مالون دآلدئید و تجمع کادمیوم در سطح پنج درصد



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



شکل ۲- تأثیر تیمار صفر و ۰/۷۵ میکرومولار ۲۴-پی‌براسینولید (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 عدم معنی‌دار 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 تیمار صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیس بر محتوای کلروفیل a و کلروفیل b و کل گیاه گوجه‌فرنگی (b). حروف متفاوت نشان‌دهنده عدم معنی‌دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.



جدول ۳- جدول آنالیز واریانس کلروفیل a، b و کل، ترکیبات فنولی و فعالیت پلی فنول اکسیداز گیاه گوجه فرنگی

میانگین مربعات				پلی فنول اکسیداز (U/mg protein)	درجه آزادی	منابع تغییرات
کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	ترکیبات فنولی			
(mg/gr FW)						
۵۹۱/۹**	۱۸/۲۹**	۸۱۸/۳**	۶۹/۱**	۱/۶۴ <sup>ns</sup>	۱	کادمیوم
۱۴۲/۹**	۰/۱۹ <sup>ns</sup>	۱۵۳/۸**	۱۰/۳ <sup>ns</sup>	۰/۵۴ <sup>ns</sup>	۱	۲۴-اپی براسینولید
۱۵/۸ <sup>ns</sup>	۶/۳۰**	۲/۱ <sup>ns</sup>	۷۰/۸**	۱۹/۴۴**	۱	نانو سیلیس
۵۵/۷ <sup>ns</sup>	۰/۴۲ <sup>ns</sup>	۴۶/۴ <sup>ns</sup>	۰/۸۲ <sup>ns</sup>	۰/۸۱ <sup>ns</sup>	۱	کادمیوم × ۲۴-اپی براسینولید
۶۹/۳ <sup>ns</sup>	۱/۶۰ <sup>ns</sup>	۴۹/۷ <sup>ns</sup>	۰/۷۴ <sup>ns</sup>	۰/۱۴ <sup>ns</sup>	۱	کادمیوم × نانو سیلیس
۵۰/۴ <sup>ns</sup>	۱/۳۰ <sup>ns</sup>	۳۵/۵ <sup>ns</sup>	۴۰۶/۲**	۸/۶۶**	۱	نانو سیلیس × ۲۴-اپی براسینولید
۱۳/۷ <sup>ns</sup>	۰/۲۸ <sup>ns</sup>	۱۰/۱ <sup>ns</sup>	۳۵/۳ <sup>ns</sup>	۱/۸۶ <sup>ns</sup>	۱	کادمیوم × ۲۴-اپی براسینولید × نانو سیلیس
۱۸/۶	۰/۵۸	۱۵/۲	۲/۹	۰/۶۲	۱	خطای کل
۰/۴	۰/۲۶	۰/۳	۰/۲	۰/۲۹		ضریب تغییرات

\*\* تفاوت معنی دار در سطح  $P \leq 0/01$ ، \* تفاوت معنی دار در سطح  $P \leq 0/05$  و ns عدم معنی دار

جدول ۴- تأثیر نانو ذره سیلیس، ۲۴-اپی براسینولید بر محتوای مالون دالدئید و ترکیبات فنول گیاه گوجه فرنگی

مالون دالدئید (nM/g FW)	ترکیبات فنولی (mg/g FW)	نانو سیلیس (mg/L)	۲۴-اپی براسینولید ( $\mu$ M)
۰/۳۶±۰/۰۳ <sup>a</sup>	۳۵/۵±۱/۸ <sup>a</sup>	۰	۰
۰/۲۶±۰/۰۱ <sup>b</sup>	۲۳/۸±۰/۲ <sup>c</sup>	۵۰	۰
۰/۲۴±۰/۰۲ <sup>b</sup>	۲۸/۵±۱/۷ <sup>b</sup>	۰	۰/۷۵
۰/۲۵±۰/۰۱ <sup>b</sup>	۳۳/۳±۱/۲ <sup>a</sup>	۵۰	۰/۷۵

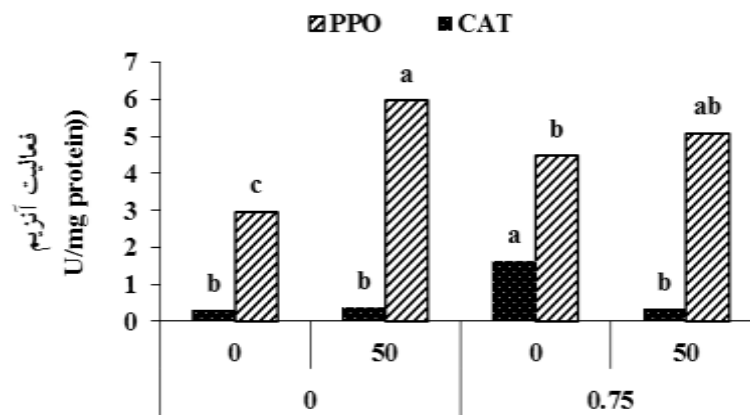
اعداد داخل جدول شامل میانگین  $\pm$  خطای استاندارد و حروف متفاوت نشان دهنده عدم معنی دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

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

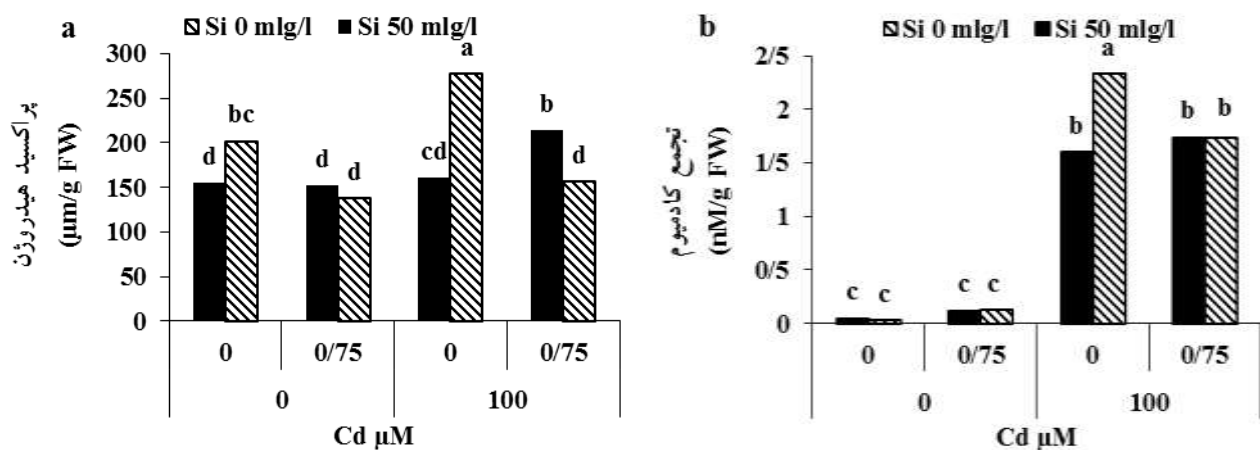
مقایسه با گیاه شاهد گردید. ۲۴-اپی براسینولید ۰/۷۵ میکرومولار نیز منجر بهبود وزن تر اندام هوایی، نسبت طول ریشه به طول ساقه گیاه تحت تنش در مقایسه با شاهد شد. اثر متقابل پیش تیمارهای نانو ذره سیلیس (۵۰ میلی گرم در لیتر) و ۲۴-اپی براسینولید (۰/۷۵ میکرومولار) منجر بهبود وزن خشک ریشه در گیاه تحت تنش در مقایسه 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 در نتیجه باعث کاهش رشد در گیاه گوجه شده است. کادمیوم می تواند با مهار

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. پیش تیمار ۵۰ میلی گرم در لیتر نانو ذره سیلیس منجر به بهبود وزن خشک ریشه و وزن تر اندام هوایی گیاه تحت تنش در

#### بحث



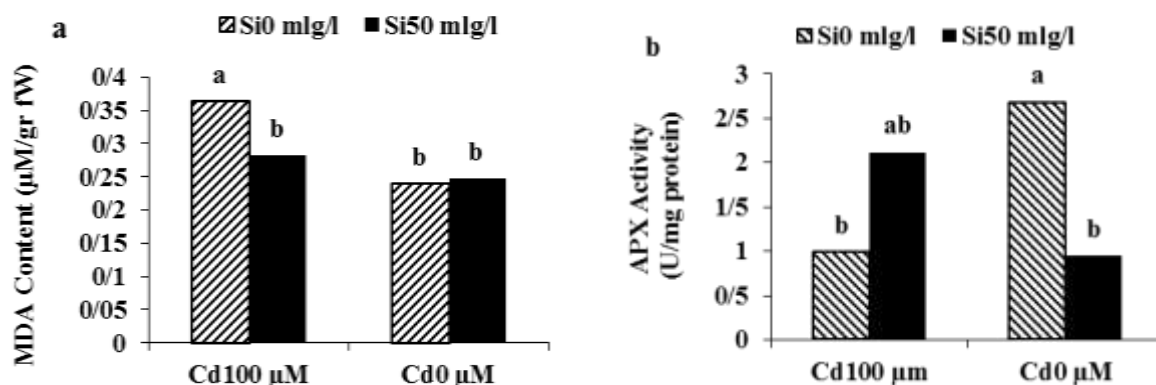
شکل ۴- تأثیر پیش تیمار صفر و ۰/۷۵ میکرومولار ۲۴-اپی براسینولید (Br) و صفر و ۵۰ میلی گرم در لیتر نانو سیلیس (Si) بر فعالیت آنزیم های پلی فنول اکسیداز (PPO) و کاتالاز (CAT) گیاه گوجه فرنگی. حروف متفاوت نشان دهنده عدم معنی دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.



شکل ۵- تأثیر پیش تیمار صفر و ۰/۷۵ میکرومولار ۲۴-اپی براسینولید (Br) و پیش تیمار صفر و ۵۰ میلی گرم در لیتر نانو ذره سیلیس (Si) بر محتوای پراکسید هیدروژن (a) و تجمع کادمیوم (b) در برگ گیاه گوجه فرنگی تحت تیمار کادمیوم صفر و ۱۰۰ میکرومولار (Cd). حروف متفاوت نشان دهنده عدم معنی دار در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن است.

خشک ریشه و نسبت طول ریشه به ساقه گیاه تحت تنش شد در نتیجه سبب بهبود رشد گیاه شد. کاهش مقدار رنگیزه های فتوسنتزی تحت تنش کادمیوم از نشانه های تنش اکسیداتیو در نظر گرفته می شود که ممکن است به علت تخریب ساختار کلروپلاست، دستگاه فتوسنتزی و فوتواکسیداسیون رنگدانه ها 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 کلروزه شدن مشاهده

غیرقابل برگشت تقسیم سلولی و سرعت تولید شدن سلولها رشد گیاه را کاهش دهد (Liu et al., 2003). همچنین کادمیوم می تواند موجب افزایش فعالیت پراکسیداز آپوپلاستی شده و اتصال گلیکوپروتئین های غنی از هیدروکسی پرولین را با اسیدهای فنولی زیاد کند. در نتیجه باعث افزایش ضخامت دیواره ثانویه سلول شده و بر رشد سلول و تولید شدن ریشه اثر منفی می گذارد (Wang et al., 2004). در این پژوهش پیش تیمار نانو ذره سیلیس باعث افزایش وزن تر ساقه و وزن



شکل ۶- 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 عدم معنی‌دار 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 لویا نیز کادمیوم باعث کاهش محتوای کلروفیل گردیده است. این کاهش ممکن است در نتیجه 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 (۴) تحریک کردن 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 ۲۴-پی‌براسینولید 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). ۲۴-پی‌براسینولید 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 ۲۴-پی‌براسینواستروئید باعث افزایش توان تحملی گیاهان در تنش‌های غیرزیستی و بهبود کارایی فتوسنتز، افزایش محتوای کلروفیل و تنظیم هدایت روزنه‌ای می‌شود (Sasse, 2003). پیش‌تیمار همزمان نانو ذره سیلیس و ۲۴-پی‌براسینولید نیز سبب افزایش وزن تر ساقه گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش شد. طبق مطالعات صورت‌گرفته تیمار همزمان نانو ذره سیلیس و ۲۴-پی‌براسینولید 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 ۲۴-پی‌براسینولید (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

(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 ۲۴-اپی‌براسینولید نیز در تنش کادمیوم سبب کاهش ترکیبات فنولی و افزایش فعالیت پلی‌فنول اکسیداز شد. ۲۴-اپی‌براسینولید از طریق جلوگیری از تولید 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 ۲۴-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 ۲۴-اپی‌براسینولید باعث کاهش تجمع فلز کادمیوم در برگ گیاه نخود شده است (Jan *et al.*, 2018).

#### نتیجه‌گیری

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 ۲۴-اپی‌براسینولید در گیاه‌های تحت تنش باعث کاهش محتوای مالون دالدئید و هیدروژن پراکسید شد و اثر متقابل آنها نیز باعث کاهش مالون دالدئید 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 ۲۴-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 ۲۴-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 دالدئید 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 فنولی 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 ۲۴-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

کادمیوم می‌کاهد. استفاده از نانو ذره سیلیس و ۲۴-  
اپی‌براسینولید جهت بهبود رشد گیاه گوجه‌فرنگی و افزایش  
مقاومت به کادمیوم توصیه می‌گردد

#### قدردانی

نویسندگان از قطب آنتی‌اکسیدان‌های گیاهی دانشگاه اصفهان  
تشکر می‌نمایند.

تنش کادمیوم منجر به کاهش شاخص‌های رشدی و سیستم  
دفاعی گیاه را تضعیف می‌کند. پیش‌تیمارهای نانو ذره سیلیس و  
۲۴-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

#### منابع

- اسماعیل‌پور، ب.، رهبری، ا. و فاطمی، ح. (۱۳۹۸) اثر سیلیسیم بر شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه شوید  
(*Anethum graveolens* L.) در شرایط تنش سرب. فرآیند و کارکرد گیاهی ۸: ۸۱-۹۴.
- بغوری، ا. و رحمانی، ح. (۱۳۸۶) 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: ۱۳۶-۱۲۱.
- 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.

- 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 ascorbate-dependent 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., Alyemini, 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., Alyaemini, 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 Biomed 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, proline 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) Screening 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.

- Tsukamoto, Y. and Matsubara, M. (1968) Studies on germination of chrysanthemum pollen. Substance promoting germination. *Plant Cell Physiology* 9: 565-572.
- Mohsenzadeh, S., Shahrtaash, 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) Phenolics and cold tolerance of brassica napus. *Plant Agriculture* 1: 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.
- Shahrtaash, 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 acuminata*. *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 Si-enhanced 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 BioMed 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 Neotyphodium endophyte. *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.

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

Hadis Rezaei<sup>1</sup>, Seyyed Mohammad Javad Arvin<sup>2,1</sup>, Hakimeh Oloumi\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

<sup>2</sup> 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  $\mu\text{M}$ ), two levels of 24-epiBrassinolide (0 and 0.75  $\mu\text{M}$ ) 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