تاثیر متقابل سیلیکون و کادمیوم بر رشد و پارامترهای فیزیولوژیکی گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی *(Solanum lycopersicum)*

پریچهره رحیمی، زهره قنبرزاده،آسیه بهداد و ساسان محسن‌زاده*

گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۵، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۱۱/۱۹)

چکیده:

سیلیکون دومین عنصر فراوان در خاک بوده و به‌عنوان یک عنصر مفید جهت کمک به رشد گیاهان عالی بخصوص در شرایط تنش‌های محیط‌های مطرح است. کادمیوم عنصری غیرضروری و سمی برای رشد و نمو گیاهان می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی اثر سیلیکون به‌عنوان بهبود دهنده تنش کادمیوم در گیاهچه گوجه‌فرنگی *(Solanum Lycopersicum)* بود. بدین منظور برهم کنش اثر غلظت های مختلف کادمیوم (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) و سیلیکون (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار) در یک طرح آماری کاملا تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشکده علوم دانشگاه شیراز سال ۱۳۹۲ بررسی گردید. نتایج نشان داد تنش کادمیوم به‌صورت معنی‌داری سبب کاهش رشد گیاه و رنگیزه‌های فتوسنتزی کلروفیل و کاروتنوئید شد . همچنین افزایش ۹برابری میزان پرولین، ۱۹/۳ درصدی انتوسیانین و ۳۳/۳ درصدی پتانسیل آنتی‌اکسیدانی کل را به دنبال داشت. میزان پراکسیداسیون لیپید ریشه و اندام هوایی در طی تنش افزایش یافت. استفاده از سیلیکون به‌صورت معنی‌داری اثر سوء سمیت کادمیوم را در گیاهچه گوجه‌فرنگی کاهش داد. این امر هماهنگ با کاهش پراکسیداسیون لیپید در ریشه و اندام هوایی و تحریک فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها بود. سیلیکون میزان رشد و رنگیزه‌های فتوسنتزی نیز به صورت معنی‌داری در گیاهان تحت تنش کادمیوم بهبود بخشید. در تمام شاخص‌های مورد بررسی، تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار سیلیکون بیشترین اثر بهبود دهندگی را داشت. بنابراین غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار سیلیکون به‌عنوان یک بهبود دهنده اثرات سمی کادمیوم از جمله تنش اکسیداتیو در گوجه‌فرنگی پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، سیلیکون، فلز سنگین، کادمیوم،گوجه‌فرنگی

مقدمه:

فلزات سنگین با تراکم بالای ۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب مانند کادمیوم، سرب، کروم، نقره و جیوه آلوده کننده‌های محیطی مهمی هستند که بطور عمده در مناطقی با فعالیت‌های انسانی بالا یافت می‌شوند. آلودگی خاک بوسیله فلزات سنگین یکی از نگرانی‌های محیطی مهم برای بخش کشاورزی در چند دهه گذشته بخصوص در کشورهای در حال توسعه بوده است (Meers *et al*., 2009). آلودگی زمین‌های کشاورزی به علت تجمع فلزات سنگین اثرات مضری بر فعالیت زیستی خاک، متابولیسم گیاه، تنوع زیستی، و سلامت انسان ها و جانوران دارد (Ali *et al*., 2011). این فلزات حتی در غلظت کم از طریق تجمع‌شان در خاک و آب سبب اثرات مضری بر

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: mohsenzadeh@susc.ac.ir

موجودات زنده می‌شوند. فلزات سنگین ممانعت‌کننده رشد بوده و سبب کاهش رشد گیاه، پاسخ‌های سمیت نوری (phototoxic) و کاهش بازده و کیفیت محصولات کشاورزی می‌شوند (Ali *et al*., 2012). کادمیوم (Cd) یکی از مهمترین فلزات سنگین با فراهمی بالا در خاک، ورود آسان به اکوسیستم و تجمع از طریق زنجیره غذایی است، بنابراین به‌عنوان یک تهدید مهم برای سلامت انسان و جانوران مطرح می‌باشد (Li *et al*., 2016). این فلز عمدتا طی فرایندهای صنعتی، استخراج معادن، زباله‌های شهری و کودهای فسفاته به خاک وارد می‌شود (Kumar, 2013). با افزایش تنش کادمیوم، ممانعت از فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه از قبیل سنتز کلروفیل، فتوسنتز و جذب مواد غذایی و به دنبال آن تاخیر در رشد و کاهش بازده اتفاق می‌افتد (Yan *et al*., 2015). از آنجا که این فلز دوظرفیتی می‌باشد با عناصری مانند منیزیم موجود در کلروفیل یا با آهن که دو ظرفیتی‌اند رقابت کرده و جایگزین آن‌ها می‌شود بنابراین فتوسنتز را در گیاه دچار اختلال می‌نماید (علومی و همکاران، ۱۳۹۱). تنش اکسیداتیو ایجاد شده در اثر سمیت کادمیوم و به‌علت تولید گونه اکسیژن فعال (Reactive Oxygen Species) که به اختصار ROS گفته می‌شود، است. مولکول‌های ROS ترکیبات به‌شدت سمی هستند که می‌توانند لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلیک را اکسید و سبب مرگ سلول به‌علت پراکسیداسیون لیپید، تخریب غشا، و غیرفعال شدن آنزیم‌ها شوند (Daneshmand, 2014; Rady and Hemida, 2015).

سیلیکون (Si) دومین عنصر فراوان در خاک است اما در بسیاری از گیاهان به عنوان یک عنصر ضروری مطرح نیست (Adrees *et al*., 2015). در محلول خاک سیلیکون به صورت سیلیس حل شده مونوسیکلیک اسید (H_4SiO_4) تولید می شود و با همین فرم توسط گیاه جذب می‌شود (ترابی و همکاران، ۱۳۹۲). اخیرا مطالعات زیادی نشان داده‌اند که اضافه‌کردن سیلیکون به گیاهان تیمار شده می‌تواند بطور چشمگیری تنش‌های زیستی و غیر زیستی مانند فلزات سنگین، نمک، خشکی، سرما و یخ‌زدگی را کم کند و اثرات مفیدی بر رشد و تولید گیاهان داشته باشد (Liang *et al*., 2007; Shahrtash and Mohsenzadeh, 2011; Mohsenzadeh *et al*., 2011; Mohsenzadeh *et al*., 2012). سیلیکون مستقیما به کاهش اثرات گوناگون تنش فلزات سنگین از قبیل کروم (Cr) (Ali *et al*., 2013)، آلومینیوم (Al) (Liang *et al*., 2001)، بور (B) (Inal *et al*., 2009) و روی (Zn) (Kaya *et al*., 2009) کمک می‌کند. این اثرات مفید سیلیکون برای گیاهان به هر دو نوع سیلیکون محلول و ذخیره شده در بافت‌های گیاهی گوناگون مربوط می‌باشد. بخش عظیمی از سیلیکون ذخیره شده در بافت‌ها بصورت یک مانع فیزیکی عمل کرده و استحکام بافت را افزایش می‌دهد. سیلیکون محلول نقش فعالی در تحریک بعضی از مکانیسم‌های واکنش دفاعی و افزایش مقاومت گیاه میزبان علیه بیماری‌ها دارد (Farooq *et al*., 2013). سیلیکون از طریق ایجاد کمپلکس و مهار انتقال فلزات سنگین از ریشه به بخش هوایی، کده‌بندی یون‌های فلزی در درون گیاه و تحریک سیستم آنتی‌اکسیدان در گیاهان، سمیت برخی از فلزات سنگین را در گیاهان کاهش می‌دهد (کیانی چلمردی و همکاران، ۱۳۹۱).

گوجه‌فرنگی *(Solanum Lycopersicum)* از خانواده Solanacea یکی از محصولات زراعی مهم در جهان است. این گیاه بصورت مستقیم و غیرمستقیم در رژیم غذایی انسان وجود داشته و منبع غنی از ویتامین A و C، عناصر ضروری، آنتی‌اکسیدان‌های فنولی و مواد مغذی دیگر است (Kalia and Palanisamy, 2014). مصرف این گیاه در کاهش بیماری‌های قلبی عروقی، سرطان‌های پروستات و روده و حفظ تعادل اسید و قلیای بدن موثر است (Rao and Rao, 2007). با توجه به اهمیت گوجه‌فرنگی به عنوان یکی از محصولات زراعی و مصارف گوناگون آن و اثرات منفی تنش کادمیوم بر این گیاه که کاهش رشد و بازده میوه را به دنبال داشته و همچنین تجمع این فلز در گیاه اثرات منفی بر سلامت انسان و جانوران استفاده کننده از این محصول دارد، هدف از این تحقیق بررسی نقش بهبود دهندگی سیلیکون و تعیین غلظت بهینه آن در کاهش اثرات منفی تنش اکسیداتیو ایجاد شده بوسیله کادمیوم بر گیاهچه‌های گوجه فرنگی بود.

مواد و روش‌ها:

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده علوم دانشگاه شیراز با دمای ۳±۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمای روز و شب) و نور طبیعی در سال ۱۳۹۲ اجرا گردید. بدین منظور نشاهای گوجه فرنگی یک ماهه، رقم سانسید از شرکت پارسیان نشا تهیه و به‌منظور سازگاری با گلدان به‌مدت ۱۵ روز در شرایط بدون تنش در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شیراز نگهداری شدند. سپس گلدان‌ها تحت تیمار کادمیوم ($CdN_2O_6 4H_2O$) با غلظت‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰ میکرومولار و سیلیکون ($Na_2O_3Si.5H_2O$) با غلظت‌های ۰، ۵۰ ۱۰۰ میلی‌مولار قرار گرفتند به‌گونه‌ای که به هر گلدان مقدار ۲۰۰ میلی‌لیتر از محلول با غلظت مورد نظر داده شد. گیاهان به مدت دو هفته در معرض تنش بوده و در طول این مدت گلدان‌ها یک روز در میان با ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مورد آبیاری قرار گرفتند. پس از مدت زمان مذکور گیاهچه‌های مورد آزمایش جهت بررسی شاخص‌های فیزیولوژیکی مورد نظر جمع‌آوری گردیدند.

سنجش شاخص‌های رشد و رنگیزه‌های فتوسنتزی: بلافاصله پس از برداشت گیاهان وزن تر اندام هوایی و ریشه بوسیله ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری مقدار کلروفیل کل و کاروتنوئیدها با استفاده از روش Lichtenthaler (۱۹۸۷) انجام پذیرفت. میزان کلروفیل کل و کاروتنوئیدها بر حسب میلی‌گرم کلروفیل یا کاروتنوئید در گرم بافت تر برگ محاسبه گردید.

اندازه‌گیری پرولین: مقدار پرولین با استفاده از معرف نین هیدرین و بر اساس روش Bates (۱۹۷۳) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در این روش از معرف نین هیدرین و اسید استیک گلاسیال برای اندازه‌گیری پرولین استفاده شد و نتایج بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر گزارش گردید.

اندازه‌گیری آنتوسیانین: از روش Wanger (۱۹۷۹) جهت اندازه‌گیری مقدار آنتوسیانین‌های برگ گیاه استفاده شد. مقدار ۰/۱ گرم از اندام هوایی گیاهان در هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر متانول اسیدی کاملا سائیده و عصاره در لوله‌های آزمایش به مدت ۲٤ ساعت در تاریکی و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ٤۰۰۰g سانتریفوژ و جذب محلول بالایی در طول موج ۵۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. مقدار آنتوسیانین با استفاده از فرمول $A=\varepsilon bc$ به دست آمد که ε ضریب خاموشی برابر $M^{-1}cm^{-1}$ ۳۳۰۰۰، b قطر کووت و مساوی ۱ و c غلظت ماده مورد نظر می‌باشد. نتایج بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر گزارش شد.

سنجش میزان پراکسیداسیون لیپید: اندازه‌گیری غلظت مالون دی‌آلدئید (MDA) به روش Heath and Packer (۱۹۸٦) انجام شد. برای محاسبه غلظت MDA از ضریب خاموشی معادل $M^{-1}cm^{-1}$ ۱/۵۵×۱۰۵ بر اساس فرمول $A= \varepsilon bc$ استفاده شد. در این فرمول A برابر با جذب خوانده شده، ε ضریب خاموشی مورد نظر، b قطر کووت و مساوی ۱ و c غلظت ماده مورد نظر می‌باشد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری بر حسب میکرومول در گرم وزن تر محاسبه و ارائه گردید. و اندازه‌گیری پتانسیل آنتی‌اکسیدانی کل: پتانسیل آنتی‌اکسیدانی با استفاده از رادیکال پایدار DPPH (Shimada *et al.*, 1992) اندازه‌گیری شد. بدین منظور، از عصاره متانولی نمونه‌های گیاهی، متانول ۱۰۰ درصد، محلول ۰/۰۰٤ درصد DPPH در متانول و محلول ترولوکس استفاده گردید. نتایج بر حسب میکرومول ترولوکس در گرم وزن تر نمونه گیاهی تعیین گردید.

از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل اسپکول ۱۵۰۰، شرکت آنالیتیک جنا از کشور آلمان) جهت اندازه‌گیری پارامترهای فوق استفاده شد.

آنالیز آماری: آزمایش‌ها در طرح بلوک کاملا تصادفی در قالب آزمایشات فاکتوریل در ۳ تکرار انجام شد. برای آنالیز داده‌ها از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱، برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن ($p<0.05$) و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

نتایج:

اثر کادمیوم و غلظت‌های مختلف سیلیکون بر وزن تر ریشه و اندام هوایی: بررسی داده‌ها نشان داد در شرایط تنش کادمیوم

جدول ۱ - تغییرات پارامترهای رشد و فتوسنتز گیاهچه گوجه‌فرنگی در تیمارهای مختلف کادمیوم و سیلیکون.

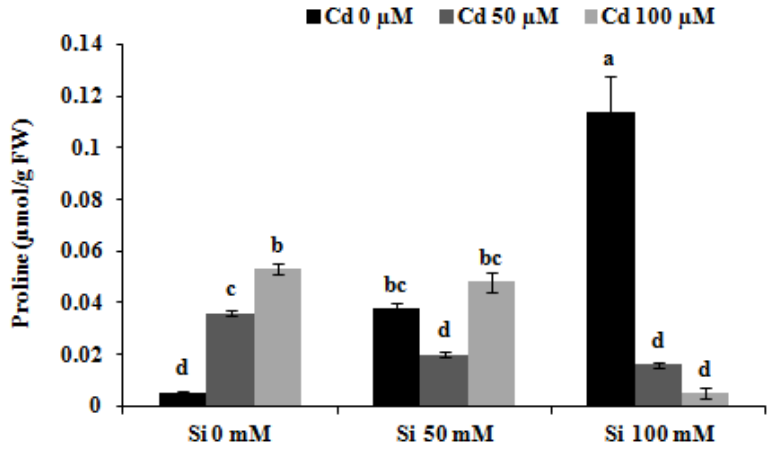
تیمار Si (mM)	تیمار Cd (µM)	پارمترهای مربوط به رشد و فتوسنتز			
		وزن تر اندام هوایی (g)	وزن تر ریشه(g)	میزان کلروفیل (mg/g FW)	میزان کاروتنوئید (mg/g FW)
Si ۰	۰	۲۰/۵۰^{d}± ۰/۲۹	۷/۶۵^{bc}± ۰/۶۶	۰/۷۳^{bc}± ۰/۰۳	۱/۳۳^{b}± ۰/۰۳
Si ۵۰	۰	۲۵/۳۳^{ab}± ۱/۰۱	۸/۲۰^{ab}± ۰/۳۸	۰/۹۴^{a}± ۰/۰۳	۱/۴۳^{b}± ۰/۰۴
Si ۱۰۰	۰	۲۱/۱۵^{d}± ۰/۸۷	۵/۳۰^{e}± ۰/۷۵	۰/۸۰^{b}± ۰/۰۲	۱/۱۹^{c}± ۰/۰۱
Si ۰	۵۰	۲۳/۴۶^{c}± ۰/۶۱	۹/۱۶^{ab}± ۰/۴۲	۰/۶۶^{cd}± ۰/۰۵	۱/۰۰^{d}± ۰
Si ۵۰	۵۰	۲۵/۱۰^{b}± ۰/۲۱	۸/۵۰^{ab}± ۰/۲۳	۰/۷۸^{b}± ۰/۰۴	۱/۱۷^{c}± ۰/۰۵
Si ۱۰۰	۵۰	۲۱/۸^{d}± ۰/۴۶	۹/۵۵^{a}± ۰/۲۶	۰/۷۶^{b}± ۰/۰۳	۱/۱۶^{c}± ۰/۰۹
Si ۰	۱۰۰	۱۷/۲۳^{f}± ۰/۷۲	۶/۳۹^{cd}± ۰/۲۲	۰/۶۰^{d}± ۰	۱/۰۳^{d}± ۰/۰۳
Si ۵۰	۱۰۰	۱۸/۹۰^{e}± ۰/۳۲	۸/۴۵^{ab}± ۰/۶۱	۰/۷۵^{b}± ۰/۰۴	۱/۷۰^{a}± ۰/۰۴
Si ۱۰۰	۱۰۰	۲۶/۸۳^{a}± ۰/۲۰	۶/۵۰^{cd}± ۰/۶۹	۰/۹۳^{a}± ۰/۰۲	۱/۶۶^{a}± ۰/۰۳

مقادیر، میانگین ۳تکرار ± خطای معیار است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح $p<0.05$ است.

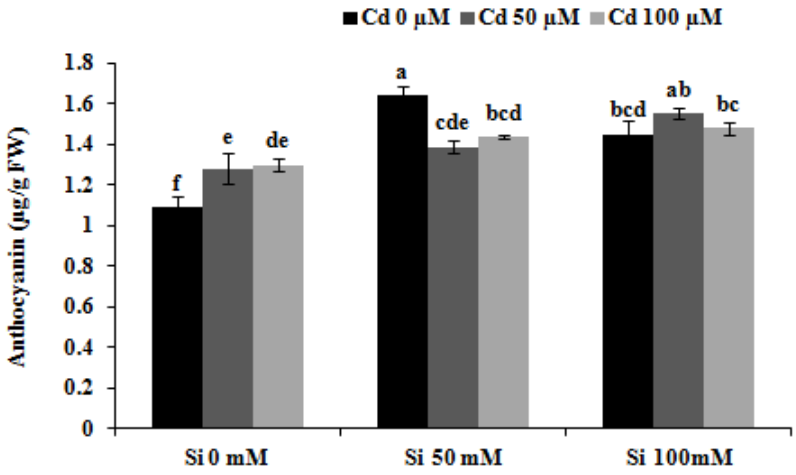
وزن تر اندام هوایی و ریشه‌ها بطور معنی‌داری (در سطح ۵٪) کاهش یافت. بیشترین کاهش در تیمار ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم با ۱۵/۹۵ و ۱٦/٤۷ درصد به ترتیب در اندام هوایی و ریشه بود. استفاده از سیلیکون کاهش وزن تر اندام هوایی و ریشه را در شرایط تنش جبران کرد. نتایج نشان داد تیمار سیلیکون ۵۰ میلی‌مولار نسبت به ۱۰۰ میلی‌مولار اثری بهتری بر افزایش وزن تر اندام هوایی و ریشه داشته است. این تیمار افزایش ۲۳/۵٦ و ۷/۱۹ درصدی وزن تر را به‌ترتیب در اندام هوایی و ریشه نشان داد. بیشترین و کمترین اثر بهبود دهندگی وزن تر اندام هوایی در شرایط تنش به ترتیب مربوط به تیمار ۱۰۰ mM سیلیکون، ۱۰۰ µM کادمیوم با میانگین ۲٦/۸۳ و تیمار ۵۰ mM سیلیکون، ۱۰۰ µM کادمیوم با میانگین ۱۸/۹ گرم بود. بیشترین اثر بهبود دهندگی وزن تر ریشه نیز به ترتیب در تیمار ۱۰۰ mM سیلیکون، ۵۰ µM کادمیوم با میانگین ۹/۵۵ و کمترین آن در تیمار ۱۰۰ mM سیلیکون، ۱۰۰ µM کادمیوم با میانگین ٦/۵ گرم مشاهده شد (جدول ۱).

اثر کادمیوم و غلظت‌های مختلف سیلیکون بر میزان کلروفیل و کاروتنوئید: نتایج نشان داد در شرایط تنش کادمیوم ۱۰۰µM میزان کلروفیل کل و کاروتنوئید به ترتیب ۱۷/۸ و ۲۲/٦ درصد کاهش یافت. در این تحقیق تیمار سیلیکون به تنهایی سبب افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی شد. افزایش تیمار سیلیکون نتایج عکس داشت و بهترین اثر سیلیکون در غلظت ۵۰ میلی‌مولار با افزایش ۲۸/۷۷ و ۷/۵۲ درصدی نسبت به شاهد به ترتیب کلروفیل و کاروتنوئید بود. تیمار غلظت‌های مختلف سیلیکون کاهش کلروفیل و کاروتنوئید حاصل از تنش را جبران کرد. بیشترین اثر بهبود دهندگی در تیمار ۱۰۰ mM سیلیکون، ۱۰۰ µM کادمیوم به ترتیب با افزایش ۲۷/٤ و ۲٤/۸ درصدی نسبت به شاهد مشاهده شد (جدول۱).

اثر کادمیوم و غلظت‌های مختلف سیلیکون بر میزان اسید آمینه پرولین برگ: نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که میزان پرولین در شرایط تنش کادمیوم نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵٪) به‌میزان ۹ برابر افزایش یافت. سیلیکون نیز میزان پرولین را نسبت به شاهد افزایش داد و بیشترین میزان پرولین در تیمار ۱۰۰ mM سیلیکون با میانگین ۱۱٤ µmol/g مشاهده شد که نسبت به شاهد ۲۱/۸ برابر شده بود. تیمار گیاه تحت تنش کادمیوم با سیلیکون سبب کاهش پرولین (در سطح ۵٪) شد. بیشترین کاهش مربوط به تیمار ۱۰۰ mM سیلیکون، ۱۰۰ µM کادمیوم با میانگین ۵ µmol/g



شکل ۱- تغییرات پرولین گیاهچه گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای مختلف کادمیوم و سیلیکون. مقادیر میانگین ۳تکرار ± خطای معیار است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح P<0.05 است.

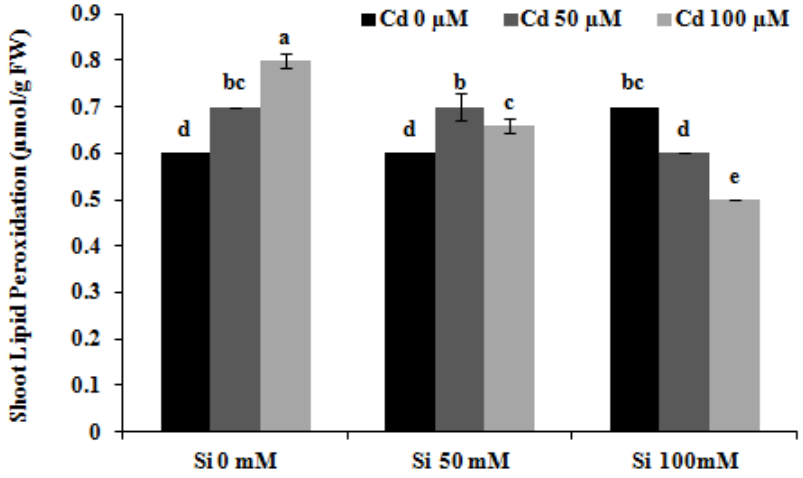


شکل ۲- تغییرات آنتوسیانین گیاهچه گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای مختلف کادمیوم و سیلیکون. مقادیر میانگین ۳تکرار ± خطای معیار است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح P<0.05 است.

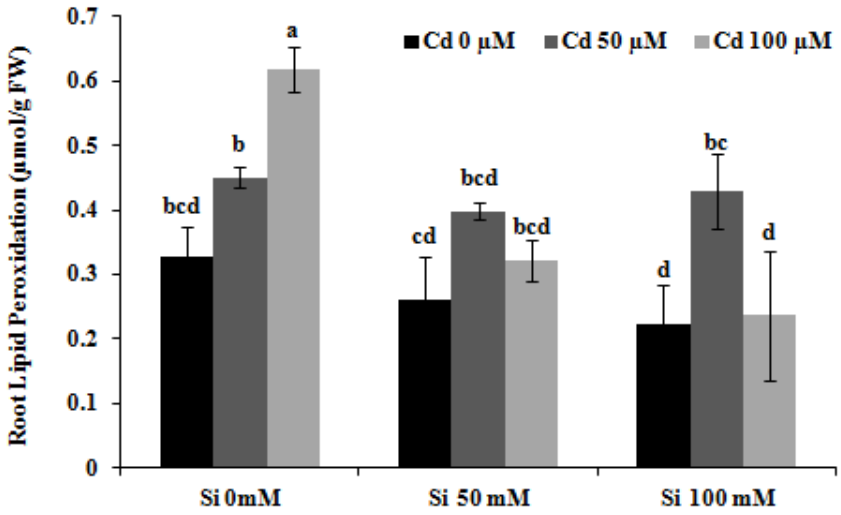
بود که تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت (شکل ۱).

اثر کادمیوم و غلظت‌های مختلف سیلیکون بر آنتوسیانین: نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد میزان تجمع آنتوسیانین در شرایط تنش کادمیوم نسبت به شاهد (در سطح ۵٪) افزایش یافت. تیمار کادمیوم ۱۰۰µM نسبت به شاهد افزایش ۱۹/۳ درصدی داشت. سیلیکون نیز در این تحقیق میزان آنتوسیانین را افزایش داد و بیشترین افزایش در تیمار ۵۰ میلی‌مولار سیلیکون با ۵۰/۷ درصد بود. تیمار گیاه تحت تنش کادمیوم با سیلیکون سبب افزایش معنی‌دار آنتوسیانین (در سطح ۵٪) شد و بیشترین افزایش مربوط به تیمار ۱۰۰ mM سیلیکون، ۵۰µM کادمیوم با ٤۲/۵ درصد مشاهده شد (شکل ۲).

اثر کادمیوم و غلظت‌های مختلف سیلیکون بر میزان پراکسیداسیون لیپید برگ و ریشه: بررسی داده‌ها نشان داد در شرایط تنش کادمیوم میزان پراکسیداسیون لیپید برگ و ریشه بطور معنی‌داری (در سطح ۵٪) نسبت به شاهد افزایش یافت. بیشترین میزان پراکسیداسیون لیپید برگ و ریشه در تیمار کادمیوم ۱۰۰µM به‌ترتیب با ۳۳/۳ و ۸۸/۱ درصد مشاهده شد. سیلیکون میزان پراکسیداسیون لیپید را در گیاه کاهش داد. تیمار سیلیکون ۵۰ میلی‌مولار کاهش ۳۲/۳ درصدی پراکسیداسیون لیپید ریشه را نشان داد. تیمار گیاه تحت تنش با سیلیکون سبب



شکل ۳- تغییرات پراکسیداسیون لیپید برگ گیاهچه گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای مختلف کادمیوم و سیلیکون. مقادیر میانگین ۳تکرار ± خطای معیار است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح P<0.05 است.



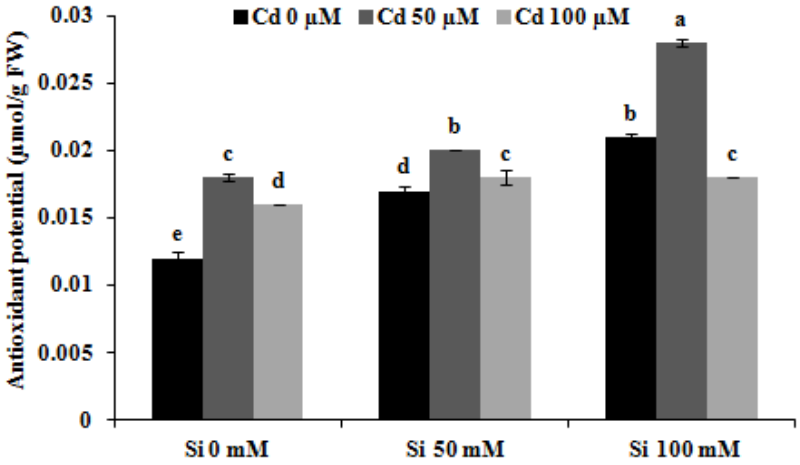
شکل ٤- تغییرات پراکسیداسیون لیپید ریشه گیاهچه گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای مختلف کادمیوم و سیلیکون. مقادیر میانگین ۳تکرار ± خطای معیار است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح P<0.05 است.

کاهش اثر کادمیوم شد و بیشترین اثر کاهشی در برگ و ریشه مربوط به تیمار ۱۰۰ mM سیلیکون، ۱۰۰ µM کادمیوم به‌ترتیب با ۱٦/۷ و ۲۸/۱ درصد کاهش بود. (شکل ۳ و ٤).

اثر کادمیوم و غلظت‌های مختلف سیلیکون بر میزان پتانسیل آنتی‌اکسیدانی: بررسی نتایج نشان داد تنش کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار (در سطح ۵٪) پتانسیل آنتی‌اکسیدانی شد. این افزایش در تیمار کادمیوم ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار به‌ترتیب افزایش ۵۰ و ۳۳/۳ درصدی بود. تیمار گیاه با سیلیکون ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار به ترتیب افزایش ٤۱/۷ و ۷۵/۰ درصدی را نشان داد. نتایج حاصله نشان داد تیمار گیاهچه تحت تنش کادمیوم با سیلیکون سبب افزایش بیشتر میزان پتانسیل آنتی‌اکسیدانی گردید. بیشترین میزان پتانسیل آنتی‌اکسیدانی در گیاهچه تحت تنش کادمیوم تیمار شده با سیلیکون در تیمار ۱۰۰ mM سیلیکون، ۵۰ µM کادمیوم بود که این میزان ۱/۳ برابر شد (شکل ۵).

بحث:

تحقیقات نشان داده است که سیلیکون اثرات سمی فلزات



شکل ۵- تغییرات پتانسیل آنتی‌اکسیدانی برگ گیاهچه گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای مختلف کادمیوم و سیلیکون. مقادیر میانگین ۳تکرار ± خطای معیار است. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح $P<0.05$ است.

سنگین در گیاهان را کاهش می‌دهد. بطور مثال کاهش رشد گیاهچه *Avicennia marina* (Zhang *et al*., 2013; Zhang *et al*., 2014)، ذرت (Vaculik *et al*., 2015) و جو (Ali *et al*., 2013) تحت تنش کادمیوم بوسیله تیمار با سیلیکون بطور چشمگیری بهبود پیدا کرد. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که تیمار کادمیوم بطور معنی‌داری وزن تر اندام هوایی و ریشه، کلروفیل و کاروتنوئید را کاهش و تیمار سیلیکون سبب کاهش اثرات منفی کادمیوم بر رشد و رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهچه گوجه‌فرنگی شد. مهار رشد توسط کادمیوم می‌تواند به علت مهار تقسیم سلولی و سرعت طویل شدن سلول‌ها باشد که اغلب توسط مهار غیرقابل برگشت پمپ پروتون که مسئول این فرآیند است، رخ می‌دهد (Liu *et al*., 2003). کاهش رشد ناشی از کاهش فتوسنتز، تنفس، متابولیسم کربوهیدرات‌ها و همچنین کلروز نیز می‌باشد (قادریان و جمال حاجیانی، ۱۳۸۹). دلیلی دیگر برای این کاهش رشد می‌تواند به‌علت تحرک بالای کادمیوم در آوند آبکش و تجمع آن در هر یک از اندام‌های گیاه باشد. تجمع بالای کادمیوم در اندام هوایی می‌تواند رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ را تحت تاثیر قرار داده و کاهش رشد گیاه را سبب می‌شود (Hussain *et al*., 2015). افزایش غلظت کادمیوم در اندام هوایی و به‌دنبال آن کاهش رنگیزه‌های کلروفیل و کاروتنوئید در گیاهان گندم و سورگوم نیز مشاهده شده است (Tantrey and Agnihotri, 2010; Hussain *et al*., 2015). کادمیوم می‌تواند دستگاه فتوسنتزی گیاهان به‌خصوص سیستم جمع کننده نور فتوسیستم I و II را تخریب کند. به‌علاوه کادمیوم کاهش فتوسنتزی رنگدانه‌ها را به‌علت افزایش سطوح گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر (ROS) در گیاهان سبب شود. ROS به‌عنوان عامل تخریب کننده رنگدانه‌ها و دیگر ماکرومولکول‌ها در گیاهان است (Chen *et al*., 2011). در پژوهش حاضر اضافه کردن سیلیکون غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی را در گیاهان تحت تنش کادمیوم بصورت معنی‌داری افزایش داد. پژوهشگران نشان داده‌اند که تیمار سیلیکون سبب افزایش فتوسنتز و بازده فلورسنس کلروفیل در گیاهان تحت تنش می‌گردد (Li *et al*., 2007).

افزایش معنی‌دار آنتوسیانین در دو رقم گندم در پاسخ به تنش کادمیوم گزارش شد که این افزایش در گیاهان تیمار شده با سیلیکون بیشتر بوده است (Hussain *et al*., 2015). همچنین کاربرد سیلیکون آنتوسیانین را در گیاه *Echium amoenum* رشد کرده تحت تنش کادمیوم افزایش داده است (Amiri *et al*., 2012). در تحقیق حاضر نیز افزایش آنتوسیانین در اثر تنش کادمیوم مشاهده و اضافه کردن سیلیکون سبب افزایش بیشتر آنتوسیانین شد. در کل، تنش غیرزیستی مانند تنش فلزات سنگین منجر به افزایش آنتوسیانین در گیاهان می‌شود. هرچند

این امر مشخص نشده است که افزایش آنتوسیانین در گیاهان فقط پاسخی در برابر تنش فلزات سنگین است یا نقش مهمی در کاهش تنش بازی می‌کند. بعضی از محققین مشاهده کرده‌اند که آنتوسیانین انتقال فلزات سنگین به واکوئل را تسهیل می‌نماید (Amiri *et al*., 2012). بنابراین افزایش سطوح آنتوسیانین در این تحقیق نیز می‌تواند به‌عنوان مکانیسم سازگاری در گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی رشد کرده در محیط تحت تنش کادمیوم مطرح باشد. آنتوسیانین همچنین رادیکال‌های آزاد را جاروب کرده و گیاهان را از صدمات اکسیداتیو حفظ می‌نماید.

نتایج این تحقیق نشان داد که میزان مالون دی آلدئید به طور معنی داری در برگ و ریشه‌های گیاهچه گوجه‌فرنگی تحت تنش کادمیوم در مقایسه با شاهد افزایش یافت. کاهش میزان مالون دی آلدئید در برگ و ریشه‌های گیاهچه گوجه‌فرنگی با اضافه شدن سیلیکون در مقایسه با آنهایی که تحت شرایط تنش کادمیوم بودند مشاهده شد. کاهش سمیت کادمیوم بوسیله سیلیکون در گیاهان پنبه، گندم، بادام زمینی، برنج و *Brassica chinensis* نیز مشاهده شده است (Farooq *et al*., 2013; Hussain *et al*., 2015; Kim *et al*., 2014; Shi *et al*., 2010; Song *et al*., 2009). کادمیوم سبب آسیب آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گوناگون شده و این دلیل عمده برای کاهش یکپارچگی غشا است که افزایش سطوح مالون دی آلدئید و نفوذپذیری غشا را سبب می‌شود (Gallego *et al*., 2012). کاهش سمیت کادمیوم به‌وسیله سیلیکون به افزایش معنی‌دار آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی و بنابراین کاهش تولید ROS، کاهش پراکسیداسیون لیپید و تشکیل مالون دی آلدئید مرتبط است (Song *et al*., 2009). در گیاهان کادمیوم مستقیما تولید کننده ROS نیست بلکه غیرمستقیم و با اتصال به بقایای تیول، کربوکسیلیک اسید و هیستیدیل پروتئین‌ها، عملکرد پروتئین‌های هدف را تغییر و سبب تولید ROS می‌شود. جهت تنظیم سطح پایدار ROS در سلول به مکانیسم‌های جاروب کننده آنزیمی و غیرآنزیمی ROS در سلول نیاز است. نتایج این تحقیق نشان داد سطح پتانسیل آنتی‌اکسیدانی کل تحت تاثیر تنش کادمیوم بصورت معنی‌داری افزایش پیدا کرد و تیمار سیلیکون با افزایش بیشتر پتانسیل آنتی‌اکسیدانی سبب محافظت گیاه در برابر تنش اکسیداتیو شده‌است. اثرات تحریکی سیلیکون بر آنتی‌اکسیدان‌ها تحت تنش کادمیوم در گیاهان ذرت، گندم، پنبه، برنج و پنبه مشاهده شده است (Lukacova *et al*., 2013; Hussain *et al*., 2015; Farooq *et al*., 2013; Tripathi *et al*., 2012a, Tripathi *et al*., 2012b; Shi *et al*., 2010). افزایش سطح فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها می‌تواند ROS اضافه تولید شده به‌وسیله فلزات سنگین را جاروب و سبب حفظ سلول از اثرات مخرب تنش اکسیداتیو شود. این امر تحمل گیاه به فلزات سنگین را افزایش می‌دهد (Wang *et al*., 2008). بنابراین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم آنتی‌اکسیدانی موثری در گیاهچه گوجه‌فرنگی جهت جاروب ROS اضافه تولید شده در بافت گیاهی وجود دارد. این نتایج در گیاه *Solanum nigrum* نیز مشاهده شده است (Liu *et al*., 2013). کاربرد خارجی سیلیکون سنتز اسمولیت‌های خاص از قبیل پرولین را تحریک کرده که القا کننده تحمل گیاهان علیه تنش فلزات سنگین است. تجمع پرولین در گیاهان شاید به‌عنوان نشانگر زیستی تنش کادمیوم مطرح باشد چون پرولین می‌تواند رادیکال‌های آزاد را جاروب و بنابراین سلول را از اثرات مخرب آن‌ها حفظ کند (Liang *et al*., 2007). غلظت بالاتر پرولین می‌تواند دلیلی برای کاهش میزان Ros و کاهش پراکسیداسیون لیپید باشد چون توانایی آنتی‌اکسیدانی پرولین شناخته شده است (Esfandiari *et al*., 2007). در این تحقیق پرولین در گیاهچه گوجه‌فرنگی تحت تنش کادمیوم افزایش یافت و تیمار گیاه تحت تنش با سیلیکون سبب کاهش پرولین و در نتیجه افزاش مقاومت در برابر تنش کادمیوم گردید. افزایش میزان پرولین تحت تنش کادمیوم در گیاهچه ذرت نیز مشاهده گردید (Mohsenzadeh *et al*., 2011). نقش واقعی پرولین در سازگاری اسمزی بحث برانگیز است. در بعضی از مطالعات تجمع پرولین تحت تنش نشان دهنده افزایش تحمل گیاه نسبت به انواع حساس است (Nayyar and Wali, 2003). در حالی که تحقیقات دیگر پیشنهاد می‌کنند تجمع پرولین نشانه‌ی آسیب تنش در گیاهان حساس نسبت به انواع تحمل کننده

است (De Lacerda *et al*., 2003). پرولین علاوه بر نقش اسمولیتی، می‌تواند به عنوان ذخیره کربن و نیتروژن برای مقابله با تنش مفید باشد. هماهنگ با این تحقیق، کاربرد سیلیکون در گیاهچه ذرت تحت تنش سبب کاهش تجمع پرولین شد (زارع و همکارن ۱۳۹٤). نتایج مشابهی نیز در گیاهان تحت تنش تیمار شده با سیلیکون مانند *Nicotiana rustica L.* (Hajiboland and Cheraghvareh, 2014)، و برنج (Lutts *et al*., 1999) نیز گزارش شده است.

تامین سیلیکون همیشه همراه با کاهش پرولین تحمل به تنش را بهبود می‌بخشد (Tuna *et al*., 2008; Pei *et al*., 2010; Lee *et al*., 2010).

نتیجه‌گیری کلی:

نتایج بیان‌گر این مطلب است که کادمیوم رنگیزه‌های فتوسنتزی را در گیاهچه‌گوجه‌فرنگی کاهش و میزان تولید مالون دی‌آلدئید را افزایش داده و این امر سبب کاهش فتوسنتز و به‌دنبال آن کاهش رشد گیاهچه گوجه‌فرنگی شده است. سیلیکون با کاهش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن و کمک به افزایش سنتز آنتی‌اکسیدان‌ها سبب کاهش اثرات منفی کادمیوم بر رشد و بازده گیاهچه گوجه‌فرنگی شده است. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد می گردد که از سیلیکون به عنوان بهبود دهنده اثرات تنش فلزات سنگین به‌خصوص کادمیوم استفاده گردد.

تشکر و قدردانی:

از حوزه معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه شیراز که حمایت مالی این تحقیق را به عهده داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع:

ترابی، ف.، مجد، ا و انتشاری، ش. (۱۳۹۲) مطالعه بر هم کنش سیلیکون و شوری بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و تشریحی گیاه گاوزبان دارویی (*Borago officinalis* L.) . مجله فرآیند و کارکرد گیاهی ۲ (٦) :۳۹-۵۱.

زارع، ح. ر.، قنبرزاده، ز.، بهداد، آ. و محسن‌زاده، س. (۱۳۹٤) اثر سیلیکون و نانوسیلیکون در کاهش صدمات ناشی از تنش شوری بر گیاهچه ذرت. زیست‌شناسی گیاهی ایران ۷(۲٦): ۷٤-۵۹.

علومی، ح.، احمدی موسوی، ع. و حسیبی، ن. (۱۳۹۱) بررسی تیمار برون‌زای اسیدهای آلی کربوکسیلیک بر برخی ویژگی‌های بیوشمیایی و میزان جذب فلزات کادمیوم و سرب در گیاهچه کلزا. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی ۱ (۲) :۲۵-۳۷.

قادریان، س. م.، جمالی حاجیانی، ن. (۱۳۸۹) بررسی مقاومت، جذب و انباشتگی کادمیوم در گیاه *Matthiola chenopodiifolia* Fisch & C. A. Mey (Brassicaceae)، زیست شناسی گیاهی ۲(٦): ۹۸-۸۷.

کیانی چلمردی، ز.، عبدل زاده، ا. و صادقی‌پور، ح. (۱۳۹۱) بررسی اثر تغذیه سیلیکون در تخفیف کمبود آهن در گیاه برنج (*Oryza sativa* L.) با تأکید بر رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان. زیست شناسی گیاهی ایران ۱٤(۱٤): ۷٤-٦۱.

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., 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.

Ali, S., Farooq, M. A., Yasmeen, T., Hussain, S., Arif, M. S., Abbas, F., Bharwana, S. A. and Zhang, G. P. (2013) The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. Ecotoxicology and Environmental Safety 89: 66–72.

Amiri, J., Entesari, S., Delavar, K., Saadatmand, M. and Rafie, N. A. (2012) The Effect of silicon on cadmium stress in *Echium amoenum*. World Academy of Science, Engineering and Technology 62: 242–245.

Bates, L. S., Waldron, R. P. and Teare, I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studied. Plant and Soil 39: 205-207.

Chen, S., Xu, B., Liu, L., Luo, Y., Zhou, H., Chen, W., Shen, T., Han, X., Kontes, C. D. and Huang S. (2011) Cadmium induction of reactive oxygen species activates the mTOR pathways, leading to neuronal cell death. Free Radical Biology and Medicine 50: 624–632.

Daneshmand, F. (2014) Response of antioxidant system of tomato to water deficit stress and its interaction with ascorbic acid. Journal of Plant Biology 6(19): 2008-8264

De Lacerda, C. F., Cambraia, J., Oliva, M. A., Ruiz, H. A. and Prisco, J. T. (2003) Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. Environmental Experimental Botany 49: 107-120.

Esfandiari, E., Shekari, F., Shekari, F. and Esfandiari, M. (2007) The effect of salt stress on antioxidant enzymes activity and lipid peroxidation on the wheat seedling. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj 35: 48–56.

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.

Gallego, S. M., Pena, L. B., Barcia, R. A., Azpilicueta, C. E., Iannone, M. F., Rosales, E. P. and Benavides, M. P. (2012) Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms.Environmental and Experimental Botany 83: 33-46.

Hajiboland, R. and Cheraghvareh, L. (2014) Influence of Si Supplementation on Growth and Some Physiological and Biochemical Parameters in Salt- Stressed Tobacco (*Nicotiana rustica* L.) Plants. Journal of Sciences 25(3): 205-217.

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(1): 189-198.

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(2): 223-234.

Inal, A., Pilbeam, D. J. and Gunes, A. (2009) Silicon increases tolerance to boron toxicity and reduces oxidative damage in barley. Journal of Plant Nutrition 32: 112–128.

Kalia, P. and Palanisamy, M. (2014) Tomato. In Alien Gene Transfer in Crop Plants, 2: 347-380 Springer New York.

Kaya, C., Tuna, A. L., Sonmez, O., Ince, F. and Higgs, D. (2009) Mitigation effects of silicon on maize plants grown a thigh zinc. Journal of Plant Nutrition 32: 1788–1798.

Kim, Y. H., Khan, A. L., Kim, D. H., Lee, S. Y., Kim, K. M., Waqas, M. and Lee, I. J. (2014) Silicon mitigates heavy metal stress by regulating P-type heavy metal ATPases, *Oryza sativa* low silicon genes, and endogenous phytohormones. BMC Plant Biology 14(1): 13.

Kumar, M. (2013) Crop plants and abiotic stresses. Biomolecular Research Therapeutics 3: e125.

Lee, S. K., Sohn, E. Y., Hamayun, M., Yoon, J. Y. and Lee, I. J. (2010) Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. Agroforestry Systems 80: 333-340.

Li, G.J., Liu, Y.H., Wu, X. H., Zhu, Z. J., Wang, B. G. and Lu, Z. F. (2007) Effects of exogenous silicon on reactive oxygen species metabolism of asparagus bean seedlings under rust stress. Acta Horticulture Sinica 34: 1207–1212.

Li, X., Zhou, Q., Sun, X. and Ren, W. (2016) Effects of cadmium on uptake and translocation of nutrient elements in different welsh onion (*Allium fistulosum* L.) cultivars. Food Chemistry 194: 101-110.

Liang, Y. C., Sun, W. C., 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.

Liang, Y. C., Yang, C. G. and Shi, H. H. (2001) Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminum. Journal of Plant Nutrition 24: 229–243.

Lichtenthaler, H. K. (1987) Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology 148: 350-382.

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*(1) 79-83.

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.

Lutts, S., Majerus V., Kinet J.M. (1999) NaCl effects on proline metabolism in rice (*Oryza sativa*) seedlings. Physiologia Plantarum 105: 450–458.

Meers, E., Qadir, M., De Caritat, P., Tack, F. M. G., Laing, G. and Zia, M. H. (2009) EDTA-assisted Pb phytoextraction. Chemosphere 74: 127–129.

Mohsenzadeh, S., Shahrtash, M. and Mohabatkar, H. (2011) Interactive effects of salicylic acid and silicon on some physiological responses of cadmium-stressed maize seedlings. Iranian Journal of Science and Technology 201(1): 57-60.

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(1): 39-43.

Nayyar, H. and Walia DP (2003) Water stress induced proline accumulation in contrasting wheat genotypes as affected by calcium and abscisic acid. Biological Plantarum 46: 275-279.

Pei, Z. F., Ming, D. F., Liu, D., Wan, G. L., Geng, X. X., Gong, H. J. and Zhou, W. J. (2010) Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling. Journal Plant Growth Regulation 29: 106-115.

Rady, M. M. and Hemida, K. A. (2015) Modulation of cadmium toxicity and enhancing cadmium-tolerance in wheat seedlings by exogenous application of polyamines. Ecotoxicology and Environmental Safety 119: 178-185.

Rao, A. V. and Rao, L. G. (2007) Carotenoids and human health. Pharmacological Research 55: 207–216.

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(1): 96-101.

Shi, G. R., Cai, Q. S., Liu, C. F. 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.

Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K. and Nakamura, T. (1992) Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. Journal of Agricultural and Food Chemistry 40(6): 945-948.

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(1): 74-83.

Tantrey, M.S. and Agnihotri, R. K. (2010) Chlorophyll and proline content of gram (*Cicer arietinum* L.) under cadmium and mercury. Research Journal of Agricultural Sciences 1(2): 119–122.

Tripathi, D. K., Singh, V. P., Kumar, D. and Chauhan, D. K. (2012a) Impact of exogenous silicon addition on chromium uptake, growth, mineral elements, oxidative stress, antioxidant capacity, and leaf and root structures in rice seedlings exposed to hexavalent chromium. Acta Physiologiae Plantarum 34(1): 279-289.

Tripathi, D. K., Singh, V. P., Kumar, D. and Chauhan, D. K. (2012b) 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(3): 281-291.

Tuna, A. L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S. and Girgin, A. R. (2008) Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. Environmental and Experimental Botany 62: 10-16.

Vaculik, M., Pavlovic, A. and Lux, A. (2015) Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize. Ecotoxicology and Environmental Safety 120: 66-73.

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(1-2): 137-149.

Wanger, G. J. (1979) Content and vacuole/extra vacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanins in protoplasts. Plant Physiology 64: 88-93.

Yan, Z., Li, X., Chen, J. and Tam, N. (2015) Combined toxicity of cadmium and copper in *Avicennia marina* seedlings and the regulation of exogenous jasmonic acid. Ecotoxicology and Environmental Safety 113: 124–132.

Zhang, Q., Yan, C., Liu, J., Lu, H., Duan, H., Du, J. and Wang, W. (2014) Silicon alleviation of cadmium toxicity in mangrove (*Avicennia marina*) in relation to cadmium compartmentation. Journal of Plant Growth Regulation 33(2): 233-242.

Zhang, Q., Yan, C., Liu, J., Lu, H., Wang, W., Du, J. and Duan, H. (2013) Silicon alleviates cadmium toxicity in *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. seedlings in relation to root anatomy and radial oxygen loss. Marine Pollution Bulletin 76(1): 187-193.

Interaction of silicon and cadmium on growth, and physiological parameters of tomato seedlings (*Solanum Lycopersicum)*

Parichehreh Rahimi, Zohreh Ghanbarzadeh, Assieh Behdad, Sasan Mohsenzadeh*

Department of Biology, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

(Received: 14/06/2016, Accepted: 07/02/2017)

Abstract

Silicon is the second most abundant element in soil. It is generally considered a beneficial element for the growth of higher plants, especially those grown under stressed environments. Cadmium is a toxic and nonessential element for plant growth and development. The aim of this study was to investigate the effect of silicon in improving cadmium stress improvement in tomato. Therefore, the interactional effects of cadmium (0, 50, 100 µM) and silicon (0, 50, 100 mM) were studied. A completely randomized design study with three replications was conducted in the research laboratory of Shiraz University in 1392. The results showed that cadmium exposure significantly decreased plant growth, the content of chlorophyll and carotenoid pigments. Furthermore, increasing 9 times proline, %19.3 anthocyanins and %33.3 the potential total antioxidant, were as consequences of cadmium stress. Lipid peroxidation rate in roots and shoots increased during stress. The application of silicon significantly alleviated the adverse effect of cadmium toxicity in tomato seedlings. This was correlated with reduction of lipid peroxidation in roots and shoots and stimulation of antioxidative activity. Silicon significantly improved growth and photosynthetic pigments in plants under cadmium stress. In all the examined parameters, the treatment 100 mM of silicon had maximum effect of improvement potentiality. Therefore, the concentration of 100 mM silicon is proposed as alleviation of cadmium stress such as oxidative stress in tomato.

Key words: Antioxidant, Cadmium, Heavy metal, *Lycopersicum esculentum*, Silicon

mohsenzadeh@susc.ac.ir