

## اثر کادمیم و سیلیسیم بر رشد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی چغندر لبویی

فرهاد بهتاش<sup>۱</sup>، سید جلال طباطبایی<sup>۲\*</sup>، محمدجعفر ملکوتی<sup>۳</sup>، محمدحسین سرورالدین<sup>۴</sup> و شاهین اوستان<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۸۷/۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۸۸/۶/۱۶

۱- دانشجوی دکتری گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- استاد گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۴- استاد دانشکده‌ی شیمی، دانشگاه تبریز

۵- استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبه E-mail: tabtabaei@tabrizu.ac.ir

### چکیده

کادمیم (Cd) یکی از فلزات سنگین است که افزایش غلظت آن در محیط ریشه گیاه سبب بروز اختلالات متابولیسمی در گیاه می‌گردد. از طرف دیگر، سیلیسیم (Si) به عنوان عنصر کاهش دهنده اثرات سمی برخی عناصر سنگین شناخته شده است. به منظور بررسی اثر Cd و Si بر رشد و ویژگی‌های چغندر لبویی (*Beta vulgaris L. cv. DarK Red*) آزمایش گلخانه‌ای با سه سطح Cd (صفر، 2/5 و 5 میلی‌گرم در لیتر) از منبع سولفات کادمیم و سه سطح Si (صفر، 28 و 56 میلی‌گرم در لیتر) از منبع متاسیلیکات سدیم به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در سال 1386 انجام گرفت. بذور چغندر لبویی در گلدان‌های 14 لیتری در بستر پرلایت کاشته شدند. ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی در طول زمان رشد اندازه‌گیری و پس از رشد غده، چغندر لبویی برداشت و ویژگی‌های آن‌ها اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که مصرف Cd موجب افزایش معنی‌دار غلظت Cd در برگ‌ها و ریشه چغندر لبویی شد. هم‌چنین مصرف Cd باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک، سطح برگ، تعداد برگ و درصد مواد جامد محلول (TSS) گردید. با مصرف Cd غلظت هیدروژن پراکساید ( $H_2O_2$ ) و مالون دی‌آلدئید (MDA) در برگ‌های گیاه چغندر لبویی افزایش معنی‌دار یافت. میانگین غلظت MDA و  $H_2O_2$  در سطح 5 میلی‌گرم در لیتر Cd به ترتیب برابر  $84/48 \mu M / gFwt$  و  $2/35 mM / gFwt$  بود. مصرف Si باعث افزایش معنی‌دار عملکرد گیاه، سطح برگ، تعداد برگ و TSS گردید. با مصرف Si غلظت  $H_2O_2$  و MDA در برگ‌های چغندر لبویی نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی‌دار نشان داد. میانگین شدت فتوسنتز در برگ‌های گیاهان تحت آزمایش در تیمار شاهد، 5 میلی‌گرم در لیتر Cd و 56 میلی‌گرم در لیتر Si به ترتیب برابر با  $18/25$ ،  $7/9$  و  $25/76 \mu mol CO_2 m^{-2} S^{-1}$  بودند. اثرات متقابل بین Si و Cd فقط در میزان کلروفیل برگ و فتوسنتز معنی‌دار بود. مصرف Si تاثیری بر غلظت Cd در برگ‌ها و ریشه چغندر لبویی نداشت، ولی با توجه به اثرات مثبت Si در وزن خشک و برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی، مصرف آن در محلول غذایی قابل توصیه بوده ولی نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی: چغندر لبویی (*Beta vulgaris L.*)، سیلیسیم، فتوسنتز، کادمیم، کلروفیل، مالون دی‌آلدئید، هیدروژن پراکساید

## Effect of Cadmium and Silicon on Growth and Some Physiological Aspects of Red Beet

F Behtash<sup>1</sup>, SJ Tabatabaiee<sup>2\*</sup>, MJ Malakouty<sup>3</sup>, MH Sorour-Aldin<sup>4</sup> and Sh Ustan<sup>5</sup>

Received: 27 July 2008

Accepted: 16 June 2009

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Prof, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>3</sup>Prof, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Prof, Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>5</sup>Assistant Prof, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\*Corresponding author: [E-mail:tabtabaei@tabrizu.ac.ir](mailto:E-mail:tabtabaei@tabrizu.ac.ir)

### Abstract

Cadmium (Cd) as a heavy metal induces some disorders in normal metabolism in plants. Furthermore, Silicon (Si) is able to ameliorate the deleterious effects of some toxic elements like Cd. Keeping this in view, an experiment was conducted to find out the effects of Cd and Si on growth and some physiological aspects of *Beta vulgaris* L. cv. Dark Red. The experiment was arranged as a factorial scheme based on randomized complete block design with four replications. Three levels of Cd (0, 2.5 and 5 mg L<sup>-1</sup>) from CdSO<sub>4</sub> and three levels of Si (0, 28 and 56 mg L<sup>-1</sup>) from Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> were added to nutrient solution. Perlite was used as growing media and the seeds of red beet were planted in the pots (14 L). The results showed that Cd addition significantly increased Cd concentration in leaves and roots. Application of Cd significantly decreased photosynthesis rate, chlorophyll content, leaf number, leaf area and total soluble solids (TSS) in the roots. Additionally, increased Cd concentration in the growing media led to increased malondialdehyde (MDA) and hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) concentration in leaves. At 5 mg L<sup>-1</sup> Cd, concentrations of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and MDA in leaves were 2.4 mM/g Fwt and 84.5 nM/g Fwt, respectively. The rate of photosynthesis in 5 mg L<sup>-1</sup> Cd, control and 56 mg L<sup>-1</sup> Si treatments were 7.9, 18.25 and 25.76 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, respectively. Application of Si in nutrient solution significantly increased leaf number, leaf area, photosynthesis, chlorophyll content, total soluble solids (TSS) in roots and dry weight in plants. Increased Si in nutrient solution had no effect on the Cd concentration in leaves and roots of red beet. Nevertheless, malondialdehyde (MDA) and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrations in leaves of red beet were reduced with Si addition to the nutrient solution. In general, it is recommendable to take into consideration the benefits of Si addition to red beet growth media, but more investigations are needed.

**Keywords:** Cadmium, Chlorophyll, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, MDA, Photosynthesis, Red Beet, Silicon

## مقدمه

کادمیم (Cd) یکی از فلزات سنگین بوده که برای انسان، حیوانات و گیاهان سمی است و نیمه عمر بیولوژیکی این عنصر 30 سال است (واگنر 1993). Cd به راحتی توسط ریشه‌های گیاهان جذب شده و به اندامهای مختلف گیاهی منتقل می‌شود، تجمع زیاد Cd باعث جلوگیری از رشد شده و حتی باعث مرگ گیاه در نتیجه کاهش فعالیت آنزیمی، فتوسنتز، تنفس، تعرق و کاهش جذب مواد غذایی می‌شود (چو و سیوو 2005). اتحادیه اروپا حداکثر مجاز Cd در خاکهای زراعی، 1 تا 3 میلی‌گرم Cd در کیلوگرم خاک تعیین نموده است. اولین بار در سال 1963 تعدادی از محققان آلودگی کودهای شیمیایی به برخی فلزات سنگین به خصوص Cd را به عنوان عامل خطرناکی برای سلامتی انسان و محیط زیست گزارش کردند و محققان عامل بیماری ایتایی ایتایی در ژاپن را مربوط به آبیاری مزارع برنج توسط آبهای آلوده به Cd تشخیص دادند (سماوات و همکاران 1384). در ایران نیز گزارش‌هایی دال بر تجمع Cd در برخی محصولات زراعی به ویژه برنج و سیب‌زمینی وجود دارد (خانی و همکاران 1379، چراتی و ملکوتی 1383 و ملکوتی و همکاران 1383). ثوابقی و ملکوتی (1379) علایم عمومی ناشی از جذب مقادیر اضافی Cd در گیاه را کاهش و توقف رشد ریشه و چوب پنبه‌ای شدن ساختمان آن، تداخل با جذب و انتقال طبیعی عناصر غذایی، کاهش میزان کلروفیل و اختلال در فعالیت آنزیمهای دخیل در فتوسنتز اعلام نمودند. فرایند فتوسنتز نسبت به Cd بسیار حساس می‌باشد و Cd باعث کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش مقدار کلروفیل برگ، کاهش انتقال الکترون در فتوسیستم I و II و اختلال در فعالیت آنزیم‌های دخیل در تثبیت CO<sub>2</sub> می‌شود (مالیک و همکاران 1992). از علایم مهم سمیت Cd در گیاهان ایجاد حالت کلروزه و نکروزه، در برگ، تغییر رنگ برگ از سبز به قرمز قهوه‌ای، افت عملکرد و تغییر در مقدار سایر عناصرریز مغذی در گیاه می‌باشد (لاگریفول و همکاران 1998). کلاً Cd از سه طریق باعث تنشهای اکسیداتیو می‌شود: ابتدا Cd باعث تولید مواد اکسید

کننده نظیر سوپر اکساید، هیدروژن پراکساید و رادیکالهای هیدروکسیل شده و دوم اینکه Cd باعث جلوگیری یا تحریک فعالیت سیستم آنتی اکسیداتیو می‌شود و نهایتاً Cd باعث پراکسیداسیون لیپید می‌گردد (هیو و کائو 2007). سیلیسیم (Si) باعث کاهش سمیت فلزات سنگین از قبیل آهن، منگنز و آلومینیم در گیاهان شده و باعث متحرک کردن فسفر خاک می‌شود و تاثیر مثبت بر فتوسنتز گیاهان دارد و همچنین باعث افزایش مقاومت گیاهان به آفات، بیماریها و افزایش مقاومت به خوابیدگی در غلات می‌شود (خلد برین و اسلامزاده 1380). همچنین، Si بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در جو و فعالیت آنزیم پراکسیداز در خیار دخالت دارد (واتانابی و همکاران 2001). با مصرف Si هیدروژن پراکساید تولید شده در نتیجه شوری کاهش یافته و Si باعث افزایش کلروفیل برگ و فتوسنتز در گیاهان گوجه‌فرنگی رشد یافته در شرایط تنش شوری گردید (ال اقبیری و همکاران 2004). سیلیسیم به عنوان عنصری که باعث کاهش انواع تنشها از قبیل سمیت عناصر، شوری، خشکی و سرمازدگی می‌شود، شناخته شده است و Si با تحریک سیستم آنتی اکسیداتیو در گیاه، تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین و انتقال فلزات سنگین به اندامهایی نظیر واکوئل سلولهای گیاهی باعث کاهش اثرات تنش و سمیت فلزات سنگین در گیاهان می‌شود (لیانگ و همکاران 2005). چن و همکاران (2000) دلایل اثرات سودمند مصرف Si در ایجاد مقاومت گیاهان برنج به Cd را به ترتیب جلوگیری از جذب و انتقال Cd، توقف انتقال Cd از طریق مسیر آپوپلاست و انتقال کادمیم به واکوئل توسط Si را بیان نموده‌اند. وانگ و همکاران (2000) گزارش نمودند که Si باعث کاهش تجمع Cd در سیمپلاست شده و مصرف Si باعث رسوب Cd در دیواره سلولی گیاه برنج شده و بدین طریق مصرف Si باعث ایجاد مقاومت نشاهای برنج در برابر Cd گردید. نیومن و نیدن (2001) گزارش نمودند که گیاهان تک لپه‌ای بیشتر از گیاهان دو لپه‌ای Si را جذب نموده و گیاهان تک لپه‌ای Si را تا 15 درصد وزن خشک تجمع داده و فلزات سنگین را کمتر جذب

گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل و در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه سطح Si (صفر، 28 و 56 میلی‌گرم در لیتر) از منبع متاسیلیکات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) و سه سطح Cd (صفر، 2/5 و 5 میلی‌گرم در لیتر) از منبع سولفات کادمیم در چهار تکرار در گلخانه‌ی تحقیقاتی هایدروپونیک تحصیلات تکمیلی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه تبریز در سال 1386 اجرا گردید. محلول غذایی مورد استفاده محلول هوگلدن تغییر یافته بود که ترکیب و غلظت نمکهای موجود در محلول در جدول 1 آمده است. محلول غذایی در  $\text{pH}=6/5$  تنظیم گردید و برای این کار از اسید کلریدریک یک مولار استفاده شد. دمای محیط در طی روز حدود  $27 \pm 3$  و در شب  $20 \pm 3$  درجه سانتی‌گراد، تنظیم شد. از پرلایت به عنوان بستر کاشت و از گلدانهای پلاستیکی 14 لیتری به عنوان ظروف کاشت استفاده گردید. هر واحد آزمایشی شامل دو گلدان بود و در هر گلدان پس از تنک کردن پنج گیاه نگهداری گردید. تیمارهای Si و Cd از زمان چهار برگی گیاهان اعمال گردیدند و مقدار مصرف محلول بر اساس اندازه گیاه و در طول زمان رشد متفاوت بود و به طور متوسط به مقدار یک لیتر به هر گلدان محلول حاوی تیمارها داده می‌شد. به منظور جلوگیری از افزایش غلظت عناصر در گلدانها، هدایت الکتریکی محلول خروجی روزانه کنترل و هر سه روز یکبار بستر کاشت به طور کامل آبشویی و مجدداً از محلولها استفاده می‌شد. پس از 20 روز از اعمال تیمارها، مقدار کلروفیل برگها با استفاده از دستگاه کلروفیل متر (Minolta, SPAD-504) تعیین گردید و برای این منظور از برگهای جوان بالغ به تعداد 10 برگ از هر گلدان، نمونه‌برداری شد. فتوسنتز خالص یکبار در دوره رویشی به وسیله دستگاه فتوسنتز سنچ (Wallz, DA-1010, Germany) اندازه‌گیری شد، واحد نوری (PAR) آن در حدود  $1000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{S}^{-1}$ ، واحد نوری ورودی به غلظت 450 میلی لیتر در لیتر و شدت ورودی هوا حدود 800 ml/min تنظیم گردید. برای تعیین فتوسنتز خالص از برگهای جوان بالغ نمونه‌برداری به عمل آمد. برای اندازه‌گیری سطح برگ گیاهان از دستگاه سنچس سطح برگ (Li-corr, 3100, USA) استفاده

نموده و نسبت به فلزات سنگین متحمل می‌باشند، ولی دو لپه ایها از نظر تجمع Si ضعیف بوده و اکثر دو لپه ایها Si را کمتر از یک درصد وزن خشک تجمع می‌دهند. لیانگ و همکاران (2005) چنین نتیجه‌گیری کردند که Cd به طور معنی‌داری وزن خشک ریشه و اندام هوایی ذرت را کاهش داد، ولی مصرف Si باعث افزایش عملکرد گیاه ذرت گردید و کاربرد Si توام با Cd از سمیت Cd در گیاه ذرت جلوگیری نمود. شی و همکاران (2005) نشان دادند که با مصرف Si سمیت Cd در نشاهای برنج به طور معنی‌دار کاهش می‌یافت و چنین نتیجه‌گیری کردند که رسوب زیاد سیلیکا در ناحیه آندودرم ریشه، مسیر آپوپلاست را مسدود نموده و انتقال Cd از طریق مسیر آپوپلاست را کاهش می‌دهد. ترندر و سیسلینسکی (2005) گزارش نمودند که کاربرد Si در خاک آلوده به Cd، باعث کاهش غلظت Cd در اندامهای مختلف توت فرنگی گردید، ولی مصرف Si به صورت محلولپاشی برگی تاثیری در کاهش غلظت Cd در اندامهای مختلف گیاه توت فرنگی نداشت. ژانگ و همکاران (2008) اعلام نمودند که با کاربرد Si عملکرد گیاه برنج افزایش یافت و Si باعث کاهش غلظت Cd در ریشه و ساقه برنج گردید و Si سمیت Cd در برنج را کاهش داد. از آنجایی که بررسی‌های محدودی در مورد اثرات متقابل بین Si و Cd در رشد و نمو انواع سبزی‌ها بخصوص سبزیهای غده ای که در تماس مستقیم با خاک می‌باشند به انجام رسیده، بعلاوه اکثر تحقیقات انجام شده نیز در مورد اثرات متقابل بین Si و Cd در گیاهان تک لپه ای می‌باشد و تحقیقات محدودی در مورد اثرات متقابل بین Si و Cd در گیاهان دو لپه ای به انجام رسیده است، لذا هدف از اجرای این پژوهش، بررسی اثر غلظتهای مختلف Si بر ویژگیهای فیزیولوژی گیاه چغندر لبویی و امکان کاهش اثرات سمی Cd بود.

#### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثرات اصلی و اثرات متقابل Si و Cd بر ویژگیهای رویشی و فیزیولوژیکی چغندر لبویی (*Beta vulgaris L.*) رقم Dark Red، یک آزمایش

منحنی استاندارد از غلظتهای مشخص  $H_2O_2$  تعیین گردید (ولیکووا و همکاران 2000). میزان پراکسیداسیون لیپید، از مقدار مالون دی آلدئید (MDA) تشکیل شده در محلول واکنش محاسبه گردید. جهت استخراج عصاره گیاهی، از محلول تری کلرواستیک اسید (TCA) (20W/V) حاوی تیوباریتوریک اسید (TBA) (W/V) 0/5% و به نسبت 1 به 2 در داخل میکرو تیوپ ها ریخته شد. محلول در 95 درجه سانتی گراد به مدت 30 دقیقه، در حمام آب گرم قرار گرفته و سریعاً روی یخ سرد شد. سپس محلول در دور 10000 g به مدت 15 دقیقه، سانتریفوژ شده و غلظت MDA از طریق تفاضل جذب در 532 nm و 600 nm ضربدر ضریب خاموشی (mM<sup>-1</sup> 155) محاسبه گردید (بومیناتان و دوران 2002). برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش از نرم افزار MSTATC استفاده شد و مقایسه میانگین داده هابه وسیله آزمون دانکن در سطح احتمال 5 درصد صورت گرفت.

گردید. به طور تصادفی از هر واحد آزمایشی 5 گیاه برداشت گردید و وزن تر برای کلیه تیمارها محاسبه گردید، سپس نمونه‌ها در درون پاکت کاغذی قرار داده و به مدت 48 ساعت در دمای 80 درجه سانتی گراد در آون قرار داده شدند تا وزن خشک آنها تعیین گردد. برای تعیین غلظت Cd در نمونه‌های گیاهی از دستگاه جذب اتمی (Shimadzu, AA6300, Japan) مورد استفاده قرار گرفت. درصد مواد جامد محلول (TSS) ریشه به وسیله رفاکتومتر (Erma, Japan) تعیین گردید. برای تعیین غلظت Si در نمونه های گیاهی به روش کالریمتری و ندرن ورم (1987) استفاده گردید. جهت تعیین غلظت  $H_2O_2$  از محلول تری کلرواستیک اسید (W/V) 0/1% استفاده شد. سپس عصاره گیاهی به مدت 15 دقیقه در دور 12000 g سانتریفوژ شد. محلول واکنش شامل 0/5 میلی لیتر بافر فسفات پتاسیم (KI) یک مولار (pH=7) و 1 میلی لیتر یدور پتاسیم (KI) یک مولار بود. بعد از افزودن عصاره گیاهی، به مدت 15 دقیقه در دمای 25 درجه سانتی گراد نگهداری شده و جذب در 390nm قرائت شد و غلظت  $H_2O_2$  در نمونه‌ها از

جدول ۱- ترکیب و غلظت نمکها در محلول هوگلدن تغییر یافته (زائو و همکاران ۲۰۰۵)

غلظت (mM)	نوع نمک	غلظت (μM)	نوع نمک
۱/۳	KNO <sub>3</sub>	۵۰/۰	FeEDTA
۱/۳	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , 2H <sub>2</sub> O	۰/۵	CuSO <sub>4</sub> , 5H <sub>2</sub> O
۰/۵	MgSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	۲/۵	Mncl <sub>2</sub>
۰/۴	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	۵/۰	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>
		۰/۲۵	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O
		۰/۵	ZnSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O

معنی دار مقادیر  $H_2O_2$  و MDA در برگ‌های گیاه چغندر لبویی شد و مصرف Cd باعث افزایش غلظت Cd در برگ و ریشه گیاه گردید (جدول 3). کاربرد Si باعث افزایش معنی دار سطح برگ، وزن تر و خشک، شدت فتوسنتز، شاخص کلروفیل، TSS و تعداد برگ‌های گیاه چغندر لبویی گردید (جدول 3). مصرف Si باعث کاهش

## نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان دادند که کاربرد Cd باعث کاهش معنی دار سطح برگ، وزن تر و خشک، شدت فتوسنتز، شاخص کلروفیل، درصد مواد جامد محلول (TSS) و تعداد برگهای گیاه چغندر لبویی گردید (جدول 2). همچنین، مصرف Cd باعث افزایش

معنی دار غلظت هیدروژن پراکساید ( $H_2O_2$ ) و MDA نسبت به تیمار شاهد گردید و همچنین کاربرد Si، باعث افزایش معنی دار غلظت Si در برگ و ریشه گیاه گردید (جدول ۵). اثرات متقابل Cd و Si فقط در شاخص کلروفیل و فتوسنتز محلول معنی دار بودند (شکل‌های ۱ و ۲).

جدول ۲- مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح Cd بر خصوصیات رویشی و فیزیولوژیکی

سطوح Cd (میلی گرم در لیتر)	وزن تر (g/plant)	وزن خشک (g/plant)	سطح برگ ( $cm^2$ )	فتوستنز ( $\mu mol CO_2 m^{-2} S^{-1}$ )	شاخص کلروفیل (SPAD)	تعداد برگ در گیاه	مواد جامد محلول (درصد)
0	189/60 a	21/5 a	515/12 a	21/17 a	59/15 a	12/00 a	12/04 a
2/5	151/13 b	16/94 b	464/85 b	18/04 b	54/32 b	11/40 ab	9/63 b
5	139/37 c	14/26 c	430/96 b	14/18 c	53/24 b	10/60 b	8/38 c
معنی داری	***	***	***	***	***	*	***

ns، \*، \*\* و \*\*\* به ترتیب به مفهوم غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال 0/05، 0/01 و 0/001 میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال 5% در آزمون دانکن اختلاف معنی دار ندارند.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح Cd بر غلظت کادمیوم، سیلیسیوم،  $H_2O_2$  و MDA

سطوح Cd (میلی گرم در لیتر)	MDA (n M/ gFwt)	$H_2O_2$ (m M/ gFwt)	غلظت Cd (میلی گرم در کیلوگرم)	غلظت Si (میلی گرم در گرم)
			برگ	ریشه
0	62/26 b	1/52 b	0/00 c	0/60 a
2/5	71/31 a	1/78 a	177/60 b	0/57 a
5	76/34 a	1/89 a	221/62 a	0/55 a
سطح معنی دار	***	***	***	ns

ns، \*، \*\* و \*\*\* به ترتیب به مفهوم غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال 0/05، 0/01 و 0/001 میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال 5% در آزمون دانکن اختلاف معنی دار ندارند.

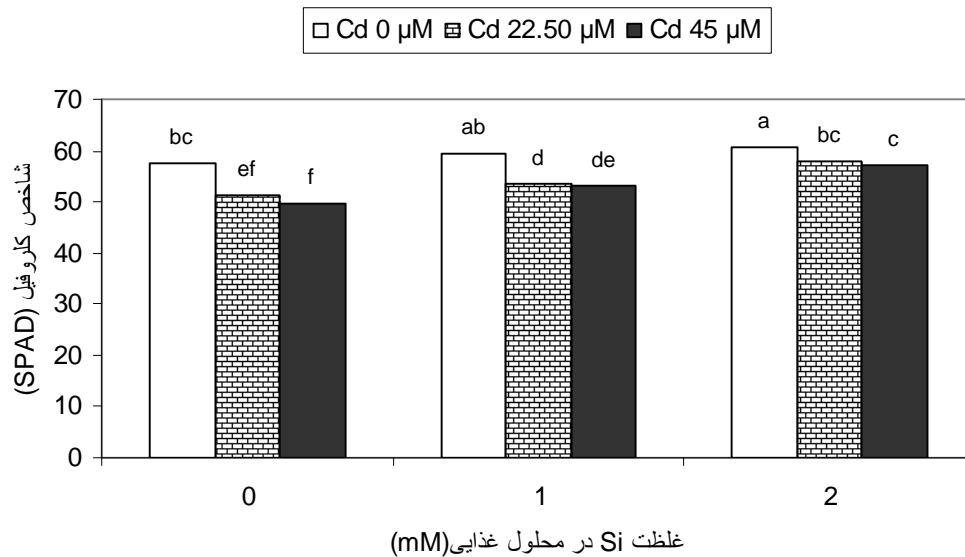
Si ( $Si_1Cd_3$ ) به حالت قرمز قهوه ای بود و لکه‌های نکروزه در گیاهان مشاهده گردید (شکل‌های 3 و 4). چنان که عنوان شد با افزایش مصرف Cd درصد TSS کاهش معنی دار نشان داد و بیشترین کاهش مربوط به تیمار 5 میلی‌گرم در لیتر Cd بود (جدول 2). نتایج به دست آمده نشان داد که وجود Cd زیاد در محیط رشد چغندر لبویی و جذب آن توسط گیاه چغندر لبویی،

### اثرات کاربرد Cd

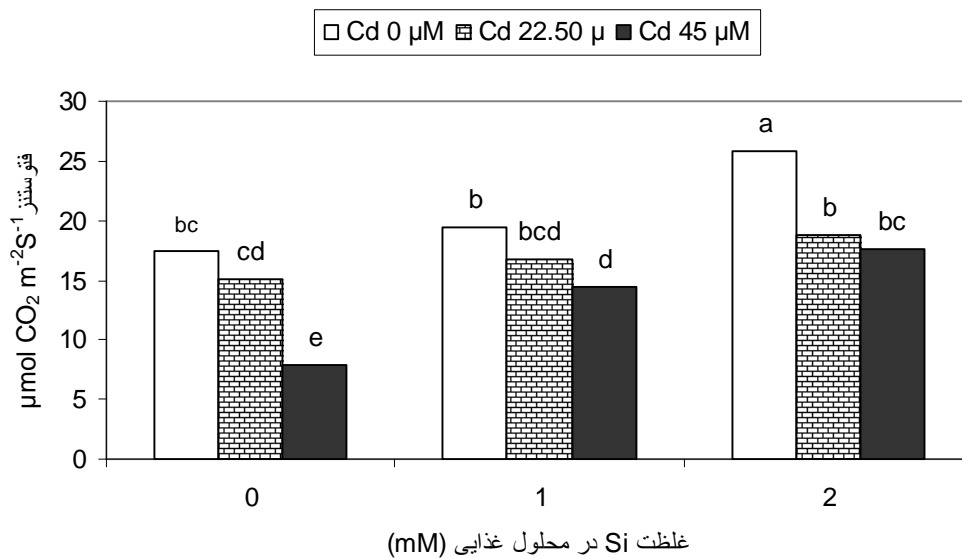
علایم مسمومیت در گیاهان با مصرف 2/5 میلی‌گرم در لیتر Cd دیده شد به طوریکه این گیاهان برگ‌های ریز و زرد داشتند. در مراحل پیشرفته با افزایش مصرف Cd سطح برگ، تعداد برگ و اندازه گیاهان کاهش یافت (اشکال 3 و 4). رنگ برگ‌های تیمار حاوی 5 میلی‌گرم در لیتر Cd و صفر میلی‌گرم در لیتر

کاهش فتوسنتز و در نهایت باعث افت عملکرد می‌شود (آراویند و پراساد ۲۰۰۴).

می‌تواند موجب کاهش عملکرد گردد. بخشی از کاهش عملکرد گیاه ناشی از Cd زیاد به دلیل اثرات سمی Cd در گیاه که باعث کاهش تعداد برگها، کاهش سطح برگها و



شکل ۱- تاثیر متقابل Si و Cd بر شاخص کلروفیل برگ چغندر لبویی



شکل ۲- تاثیر متقابل Si و Cd بر فتوسنتز برگ چغندر لبویی



شکل 3- از چپ به راست: تیمار شاهد (بدون Cd و Si)، تیمار 2/5 میلی گرم در لیتر Cd و صفر میلی گرم در لیتر Si، تیمار 5 میلی گرم در لیتر Cd و صفر میلی گرم در لیتر Si.



شکل 4- از چپ به راست: تیمار 5 میلی گرم در لیتر Cd و صفر میلی گرم در لیتر Si (Si1Cd3) و دو گیاه مربوط به تیمار Si2Cd1 (Cd صفر و Si 28 میلی گرم در لیتر)

باعث آسیبهای اکسیداتیو به وسیله رادیکالهای آزاد اکسیژن می شود. همچنین، زیادی مواد اکسیداتیو باعث افزایش موادی نظیر MDA شده و پراکسیداسیون لیپید افزایش می یابد (شی و همکاران 2005). در این آزمایش

اثرات Cd بر غلظت  $H_2O_2$  و MDA در برگهای چغندر لبویی

با افزایش مصرف Cd غلظت  $H_2O_2$  و MDA افزایش معنی داری یافت (جدول 2). زیادی فلزات سنگین



مصرف Cd تاثیر معنی داری بر غلظت Si در برگ و ریشه گیاه چغندر لبویی نداشت (جدول 2).

اثرات مصرف Cd بر شدت فتوسنتز و شاخص کلروفیل برگ

کاربرد Cd باعث کاهش معنی دار شدت فتوسنتز و شاخص کلروفیل در برگ‌های گیاه چغندر لبویی گردید و بیشترین کاهش شدت فتوسنتز متعلق به تیمار 5 میلی گرم در لیتر Cd بود (جدول 2). Cd باعث کاهش سنتز کلروفیل از طریق جلوگیری از فعالیت آنزیم گاما آمینولولینیک اسید دهیدراتاز می‌شود (آراویند و پراساد 2004). این فلز سنگین با کاهش فعالیت آنزیم پروتوکرو فیلیدر دوکتاز از طریق تاثیر بر گروه‌های سولفیدریل (-SH) باعث کمتر شدن تولید اسید 5- آمینولولینیک (ALA) می‌شود. اسید 5- آمینولولینیک یک پیش ماده برای حلقه تتراپیرول موجود در ساختمان کلروفیل است (اوزونیدو 1995). افزایش Cd در بافت‌های گیاهی سبب کاهش فتوسنتز از طریق اثر مخرب آن بر روی واکنش‌های تاریکی شده و در فعالیت آنزیم‌های لازم در طی واکنش‌های تاریکی اختلال ایجاد می‌کند (چاگ و شاونی 1999). کادمیم مرحله کربن گیری (کربوکسیلاسیون) را تحت تاثیر قرار داده (ویگ 1985)، همچنین Cd فعالیت آنزیم ریبولوزی فسفات کربوکسیلاز را کاهش می‌دهد (مالیک و همکاران 1992). گیاهانی که در محیط حاوی Cd رشد می‌کنند، کلروفیل کمتری داشته و برگ‌های این گیاهان قابلیت خود را برای دریافت نور از دست می‌دهند و این امر باعث اختلال در فتوسیستم II می‌شود (آراویند و پراساد 2004). همچنین با وجود رنگریزه‌های فتوسنتزی، Cd باعث اختلال در عمل واکنش‌های نیازمند به نور می‌شود (چاگ و شاونی 1999).

#### اثرات کاربرد Si

کاربرد Si باعث افزایش معنی دار وزن تر و خشک، TSS، ریشه، تعداد و سطح برگ در گیاه چغندر

در تیمارهای حاوی Cd، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در برگ‌های گیاه چغندر لبویی تولید گردید، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> باعث تولید رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود که باعث تغییر اسیدهای چرب شده و دیواره سلولی را تخریب می‌کند (چن و همکاران، 2007). کلاً، Cd باعث افزایش تولید H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> شده و باعث افزایش پراکسیداسیون لیپید گردید. این نتایج نشان می‌دهند که تیمار با Cd باعث تنش‌های اکسیداتیو در گیاهان می‌شود. تحقیقات قبلی نشان داده‌اند که Cd باعث تجمع زیاد H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در برگ‌های برنج، ریشه و برگ‌های نخود و سلول‌های توتون گردید (هیو و کلاو 2007). اندازه‌گیری H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در بافت‌های گیاهی در شرایط تنش مهم می‌باشد، زیرا H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> پیش ماده‌ای برای بسیاری از رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌باشد که اکسید کننده قوی هستند (گانگ و همکاران 2005). گانز و همکاران (2007) اعلام نمودند که رادیکال‌های آزاد اکسیژن، اکسید کننده قوی بوده که باعث اکسید شدن بیومولکولها نظیر چربی‌ها و پروتئین‌ها شده و نهایتاً باعث مرگ سلول می‌شوند. MDA در نتیجه تجزیه اسیدهای چرب اشباع نشده حاصل می‌شود و MDA به عنوان بیومارکر برای تشخیص پراکسیداسیون لیپید محسوب می‌شود. آسیب به دیواره سلولی تحت تاثیر انواع تنش‌ها ایجاد می‌شود که نتیجتاً باعث پراکسیداسیون لیپید می‌شود. معلوم شده که پراکسیداسیون لیپید در نتیجه رادیکال‌های آزاد ایجاد شده و بازتابی از خسارت ناشی از تنش‌ها در سطح سلولی می‌باشد، بنابراین مقدار MDA که در طی پراکسیداسیون لیپید ایجاد می‌شود، به عنوان شاخصی از آسیب اکسیداسیون محسوب می‌شود.

اثرات مصرف Cd بر غلظت Cd و Si در برگ و ریشه چغندر لبویی

غلظت زیاد Cd در محلول غذایی باعث افزایش جذب Cd توسط ریشه و برگ‌های گیاه چغندر لبویی گردید با افزایش مصرف Cd، غلظت Cd نیز افزایش معنی دار نشان داد. داده‌ها نشان می‌دهند که غلظت Cd در برگ چغندر لبویی بیشتر از ریشه این گیاه بود.

داده و باعث کاهش پراکسیداسیون لیپید می‌شود و همچنین Si از دیواره سلولی در شرایط تنش خشکی و گرما محافظت نموده و از تخریب آن جلوگیری می‌کند (لیانگ 1999). تحقیقات قبلی نشان داده که Si از تخریب ساختمان چربی دیواره سلولی گیاهان برنج رشد یافته در شرایط خشکی و گرما جلوگیری نموده و کاربرد Si باعث ثبات و جلوگیری از اختلال عمل در دیواره سلولی گیاهان رشد یافته در شرایط تنش می‌گردد (ژو و همکاران 2004).

لبویی گردید (جدول 4). بیشترین میزان وزن خشک، وزن تر و تعداد برگ مربوط به تیمار 56 میلی‌گرم در لیتر Si و صفر میلی‌گرم در لیتر Cd ( $Si_3Cd_1$ ) بود (جدول 5). مصرف Si باعث کاهش معنی‌دار غلظت  $H_2O_2$  و MDA نسبت به تیمار شاهد گردید (جدول 3). Si با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو نظیر کاتالاز و پراکسیداز، باعث کاهش غلظت هیدروژن پراکساید ( $H_2O_2$ ) و MDA می‌شود (ال اتابری و همکاران 2004). اضافه نمودن Si به محیط رشد گیاه نفوذ پذیری دیواره پلاسما سلولهای برگ را کاهش

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح Si بر پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری شده

سطوح Si (میلی‌گرم در لیتر)	وزن تر (g/plant)	وزن خشک (g/plant)	سطح برگ ( $cm^2$ )	فتوستتوز $\mu mol CO_2 m^{-2} S^{-1}$	شاخص کلروفیل (SPAD)	تعداد برگ در گیاه	درصد مواد جامد محلول
۰	۱۳۵/۹۳ c	۱۴/۸۷ c	۳۹۸/۱۷ b	۱۴/۵۷ c	۵۲/۷۷ c	۱۰/۵۰ b	۸/۹۲ b
۲۸	۱۶۴/۴۰ b	۱۸/۰۶ b	۴۹۵/۳۳ a	۱۸/۱۴ b	۵۵/۴۶ b	۱۱/۶ a	۱۰/۲۵ a
۵۶	۱۷۹/۷۸ a	۱۹/۷۸ a	۵۱۷/۴۴ a	۲۰/۶۹ a	۵۸/۴۷ a	۱۲/۰۰ a	۱۰/۸۸ a
سطح معنی‌دار	***	***	***	***	***	*	***

ns، \*، \*\* و \*\*\* به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱.

میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵% در آزمون دانکن اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح Si بر متغیرهای گیاهی اندازه‌گیری شده

سطوح Si (میلی‌گرم در لیتر)	MDA (nM/g Fwt)	$H_2O_2$ (mM/g Fwt)	غلظت Cd (میلی‌گرم در کیلوگرم)	غلظت Si (گرم در کیلوگرم)	ریشه	برگ	ریشه	برگ
۰	۷۶/۱۰ a	۲/۰۰ a	۳۹/۵۲ a	۱۳۵/۹۴ a	۰/۲۷ b	۰/۴۵ b	ریشه	برگ
۲۸	۶۶/۶۵ b	۱/۵۸ b	۴۴/۳۷ a	۱۴۹/۶۳ a	۰/۷۷ a	۰/۸۷ a	ریشه	برگ
۵۶	۶۷/۱۷ b	۱/۶۱ b	۳۷/۱۶ a	۱۱۳/۶۵ a	۰/۶۸ a	۰/۸۸ a	ریشه	برگ
معنی‌داری	*	***	ns	ns	***	***	***	***

ns، \*، \*\* و \*\*\* به مفهوم غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱.

میانگین‌های دارای حروف مشابه در سطح احتمال ۵% در آزمون دانکن اختلاف معنی‌دار ندارند.

اثرات Si بر غلظت Cd و Si در برگ و ریشه چغندر لبویی

اگر چه نتایج آزمایش‌های متعدد نشان داده که کاربرد Si باعث کاهش غلظت Cd در اندام‌های مختلف گیاهی می‌شود (ژو و همکاران 2004، شی و همکاران 2005 و ژانگ و همکاران 2008)، ولی نتایج این آزمایش نشان داد که مصرف Si تاثیر معنی‌داری بر کاهش Cd در اندام‌های مختلف گیاه چغندر لبویی نداشت. لیانگ و همکاران (2005) طی یک آزمایش گلدانی چنین نتیجه‌گیری کردند که در صورت مصرف متاسیلیکات سدیم، pH خاک افزایش یافته و Cd در خاک غیر متحرک گردید و بدین ترتیب مصرف متاسیلیکات سدیم سمیت Cd در گیاه نرت را کاهش داد. لیانگ و همکاران (2005) اعلام نمودند که در صورت مصرف متاسیلیکات سدیم، pH خاک افزایش یافته و در نتیجه Cd غیر متحرک شده و قابلیت در دسترس بودن Cd کاهش می‌یابد و این محققین دلیل تاثیر Si برای کاهش سمیت Cd در سیستم گیاه خاک را افزایش pH محلول خاک در نتیجه مصرف متاسیلیکات سدیم دانستند. نیومان و نیدن (2001) گزارش نمودند که گیاهان تک لپه‌ای بیشتر از گیاهان دو لپه‌ای Si را جذب نموده و گیاهان تک لپه‌ای Si را تا 15 درصد وزن خشک تجمع داده و فلزات سنگین را کمتر جذب نموده و نسبت به فلزات سنگین متحمل می‌باشند، ولی دو لپه‌ایها از نظر تجمع Si ضعیف بوده و اکثر دو لپه‌ایها Si را کمتر از یک درصد وزن خشک تجمع می‌دهند، با این حال در برخی از گیاهان نظیر *Minnartia verna* و *Pisum sativum* رسوبات Si نه تنها در دیواره سلولها و فضای بین سلولی دیده شده، بلکه رسوبات Si در واکوئل و سیتوپلاسم این گیاهان مشاهده شده است و این محققین اعلام نمودند گیاهان دو لپه‌ای که Si را تجمع می‌دهند، فلزات سنگین را کمتر جذب نموده و نسبت به فلزات سنگین مقاوم می‌باشند. با توجه به جدول 5، ملاحظه می‌گردد که میانگین غلظت Si در گیاه چغندر لبویی در تیمارهای مختلف کمتر از یک درصد می‌باشد و شاید یکی از دلایل عدم تاثیر Si در کاهش غلظت Cd در آزمایش فوق، تجمع کمتر Si به وسیله چغندر لبویی باشد.

اثرات Si بر شدت فتوسنتز و شاخص کلروفیل برگ مصرف Si باعث افزایش معنی‌دار فتوسنتز و شاخص کلروفیل نسبت به تیمار شاهد شد (جدول 3). آداتیا و بستفورد (1986) گزارش نمودند که افزودن Si به محیط رشد گیاه خیار، باعث افزایش مقدار کلروفیل برگ و افزایش فتوسنتز از طریق تاثیر بر فعالیت آنزیم ریبولوز بی فسفات کربوکسیلاز گردید.

اثرات متقابل Cd و Si بر شاخص کلروفیل برگ و شدت فتوسنتز

در مورد کلروفیل Si و Cd اثر متقابل معنی‌دار داشتند، یعنی Si از تخریب و کاهش زیاد کلروفیل به وسیله Cd جلوگیری نمود (شکل 1). در مورد میزان فتوسنتز Si و Cd تاثیر متقابل داشتند، به طوری که مصرف Si از کاهش فتوسنتز توسط Cd جلوگیری نمود (شکل 2). ال اتابری و همکاران (2004) گزارش نمودند که با مصرف Si هیدروژن پراکسید تولید شده در نتیجه شوری کاهش یافته و Si باعث افزایش کلروفیل برگ و فتوسنتز در گیاهان گوجه‌فرنگی رشد یافته در شرایط تنش شوری گردید. دانگ و همکاران (2005) نشان دادند که در صورت افزایش غلظت Cd در محلول غذایی، غلظت CO<sub>2</sub> در فضای بین سلولی در برگ گوجه‌فرنگی به طور معنی‌داری افزایش یافت و این محققین عوامل موثر در کاهش فتوسنتز در اثر مصرف Cd را در نتیجه افزایش غلظت CO<sub>2</sub> در فضای بین سلولی، کاهش تثبیت CO<sub>2</sub>، کاهش شاخص کلروفیل و جلوگیری از مراحل مختلف چرخه کالوین اعلام نمودند. هاتوری و همکاران (2008) اعلام نمودند که مصرف Si باعث کاهش غلظت CO<sub>2</sub> فضای بین سلولی برگ در نشاهای خیار تحت تنش اسمزی گردید و چنین نتیجه‌گیری کردند که Si باعث کاهش آسیب به بافت‌های مزوفیل برگ در تحت شرایط تنش شده و بدین طریق Si از کاهش فتوسنتز در شرایط تنش جلوگیری نمود.

## منابع مورد استفاده

- ثواقبی غ و ملکوتی م ج، 1379. بررسی نقش روی در کاهش اثرات سوء کادمیم بر عملکرد و کیفیت دانه گندم. مجله علوم آب و خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب. ویژه نامه کشاورزی پایدار. جلد 12، شماره 9، صفحه‌های 66 تا 75.
- چراتی ع و ملکوتی م ج، 1383. ضرورت کاهش آلاینده‌های کادمیم و نیترات در شالیزارهای شمال کشور (بررسی تاثیر روی و کادمیم بر رشد و ترکیب شیمیایی برنج). کتاب تغذیه متعادل برنج. انتشارات سنا. وزارت جهاد کشاورزی معاونت زراعت.
- خانی م، ملکوتی م ج و شریعت س م، 1379. بررسی تغییرات کادمیم در خاکهای شالیزاری و برنج در شمال کشور. مجله علوم آب و خاک موسسه تحقیقات خاک و آب. ویژه نامه کشاورزی پایدار، جلد 12، شماره 9. صفحه‌های 19 تا 26.
- خلدبرین ب و اسلام زاده ط، 1380. تغذیه معدنی گیاهان عالی (ترجمه). انتشارات دانشگاه شیراز.
- سماوات س، بایبوردی الف، ملکوتی م ج و طهرانی م، 1384. حد مجاز کادمیم در کودهای شیمیایی، محصولات زراعی و باغی. نشریه فنی شماره 437، موسسه تحقیقات خاک و آب. انتشارات سنا.
- ملکوتی م ج، بایبوردی الف و طباطبایی س ج، 1383. مصرف بهینه کود گامی موثر در افزایش عملکرد و بهبود کیفیت و کاهش آلاینده‌ها در محصولات سبزی و صیفی و ارتقای سطح سلامت جامعه. نشر علوم کشاورزی کاربردی. ص 19 تا 30.
- Adatia MH and Bestford RT, 1986. The effect of silicon on the cucumber plants grown in recirculating nutrition solution . *Annals of Botany* 58: 343-351.
- Al-aghaby K, Zhu Z and Shi Q, 2004. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition* 27(12): 2101-2115.
- Aravind P and Prasad MNV, 2004. Zinc protects chloroplasts and associated photochemical function in cadmium exposed *Ceratophyllum demersum* L., a fresh water macrophyte. *Plant Science* 166(5): 1321-1327.
- Boominathan R and Doran PM, 2002. Ni-induced oxidative stress in roots of the Ni hyperaccumulator, *Alyssum bertolonii*. *New Phytologist* 156: 205-215.
- Chen HM , Zheng CR , Tu C and Slen ZG, 2000. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. *Chemosphere* 41: 229-234.
- Chen J, Zhu C, Lin D and Sun Z, 2007. The effect of Cd on lipid peroxidation , hydrogen peroxide content and antioxidant enzyme activities in Cd-sensitive mutant rice seedlings. *Canadian Journal of Plant Science* 87: 49-57.
- Cho UH and Seo NH, 2005. Oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation. *Plant Science* 168: 113-120.
- Chug IK and Sawhney SK, 1999. Photosynthetic activities of *Pisum sativum* seedlings grown in presence of cadmium. *Plant Physiology and Biochemistry* 37(4): 297-303.

- Dong J , Wu F and Zhang G, 2005. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. *Journal of Zhejiang University Science* 6(10): 974-980.
- Gong H, Zhu X, Chen K, Wang S and Zhang C, 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pot under drought. *Plant Science* 169: 313-321.
- Gunes A, Inal A, Bagci EG, Coban S and Pilbeam DJ, 2007. Silicon mediates changes to some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown under B toxicity. *Scientia Horticulturae* 113: 113-119.
- Hattori T, Sonobe K, Inanaga S, An P and Morita S, 2008. Effects of silicon on photosynthesis of young cucumber seedlings under osmotic stress. *Journal of Plant Nutrition* 31:1046-1058.
- Hsu YT and Kao CH, 2007. Cadmium-induced oxidative damage in rice leaves is reduced by polyamines. *Plant and Soil*. 291:27-37.
- Lagriffoul A, Mocquot B, Mench M, and Vangronsveld J, 1998. Cadmium toxicity effects on growth ,mineral and chlorophyll contents, and activities stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays*). *Plant and Soil* 200: 241-250.
- Liang YC, Wong JWC and Long W, 2005. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere* 58: 475-483.
- Liang YC, Sun W, Zhu YG and Christie P, 2006. Mechanism of abiotic stress in higher plants: A review. *Environmental Pollution* 28: 1-7.
- Malik D, Sheoran IC and Singh R, 1992. Carbon metabolism in leaves of cadmium treated Wheat seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* 30: 223-229.
- Neumann D and Nieten UZ, 2001. Silicon and heavy metals tolerance of higher plants. *Phytochemistry* 56: 685-692.
- Ouzounidou G, 1995. Cu-ions mediated changes in growth, chlorophyll and other ion contents in Cu-tolerant *Koleria splendens*. *Biology Plantarum* 37: 71-79.
- Shi X, Zhang C, Wang H and Zhang F, 2005. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings. *Plant and Soil* 272: 53-60.
- Trender W and Cieslinski G, 2005. Effect of silicon application on cadmium uptake and distribution in strawberry plants grown on contaminated soils. *Journal of Plant Nutrition* 28: 917-929.
- Van der Vorm PDG, 1987. Dry ashing of plant material and dissolution of the ash in HF for the colorimetric determination of silicon. *Communication in Soil Science and Plant analysis* 18 (11): 1181-1189.
- Velikova V, Yordanov I and Edreva A, 2000. Oxidative stress and some antioxidant system in acid-rain treated bean plants. Protective role of exogenous polyamines. *Plant Science* 151: 59-66.
- Wagner GJ, 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Advances in Agronomy* 5: 173-212.

- Wang LG, Wang YH, Chen Q, Cao WD, Li M and Zhang FC, 2000. Silicon induced cadmium tolerance of rice seedlings. *Journal of Plant Nutrition* 23: 1397-1406.
- Watanabe D, Fuji Wara T, Yone Yama T and Hajashi H, 2001. Effects of silicon nutrition on metabolism and translocation of nutrients in rice plants. *Plant Nutrition-Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystem* 174: 75-79.
- Weige HG, 1985. Inhibition of photosynthetic reactions of isolated intact chloroplast by cadmium. *Journal of Plant Physiology* 119: 179-189.
- Zhang C, Wang L, Nie Q, Zhang W and Zhang FS, 2008. Long-term effects of exogenous silicon on cadmium translocation and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental and Experimental Botany* 62: 300-307.
- Zhao ZQ, Zhu YG, Kneer R and Smith SE, 2005. Effect of Zinc on Cadmium toxicity-induced oxidative stress in winter wheat seedlings. *Journal of Plant Nutrition* 28: 1947-1959.
- Zhu ZG, Wei GQ, Li J, Qian QQ and Yu JQ, 2004. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidants enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science* 167: 527-533.