اندوزش و تحمل آلودگی کادمیومی و تأثیر تیمار سیلیسیم بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک در گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*)

الهام الهبخش[1*]، علیرضا سیروس مهر[2]، ام‌البنین ابراهیمی[1] و نرجس شهرکی[1]

[1] زابل، دانشگاه زابل، دانشکدهٔ کشاورزی، گروه علوم باغبانی

[2] زابل، دانشگاه زابل، دانشکدهٔ کشاورزی، گروه زراعت و اصلاح نباتات

تاریخ دریافت: ۹۴/۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۸

چکیده

کادمیوم (Cd) یکی از فلزات سنگین است که افزایش غلظت آن در محیط ریشه سبب بروز اختلالات متابولیسمی در گیاه می‌شود. به‌منظور مطالعه تأثیر فراهمی سیلیسیم بر تجمع کادمیوم و تأثیرات مورفوفیزیولوژیک آن بر گیاه خرفه، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل غلظت‌های مختلف کادمیوم (صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) و دو سطح سیلیسیم (عدم کاربرد سیلیسیم و کاربرد ۰/۹۳۷ میلی‌گرم سیلیسیم (به صورت سلیکات سدیم) در هر کیلوگرم خاک) بود. نتایج نشان داد، ارتفاع ساقه اصلی، تعداد شاخه جانبی، وزن تر و خشک در برگ و ریشه و میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی در غلظت ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک تفاوت معنی‌داری در سطح ($P \leq ۰/۰۵$) با شاهد نداشت، در حالی‌که همگام با افزایش غلظت کادمیوم، کاهش معناداری نسبت به شاهد در صفات یادشده مشاهده شد. مقدار کاروتنوئید و پرولین با افزایش غلظت کادمیوم نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری در سطح ($P \leq ۰/۰۵$) یافت. کاربرد سیلیسیم باعث افزایش ارتفاع ساقه اصلی، تعداد شاخه جانبی، وزن تر و خشک در برگ و ریشه و میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی در سطح ($P \leq ۰/۰۵$) شد. بنابراین نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که تیمار سیلیسیم می‌تواند اثر مثبتی در افزایش مقاومت و بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی در برابر عنصر سنگین کادمیوم در گیاه خرفه ایفا کند و در غلظت‌های بالای کادمیوم، می‌توان سیلیسیم را به‌عنوان عنصر مفید در افزایش عملکرد و همچنین افزایش مقاومت این گیاه به تنش محیطی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: کادمیوم، سیلیسیم، خرفه، پرولین

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۴۳۳۱۲۳۲۰۴۵، پست الکترونیکی: Elhamallahbakhsh@gmail.com

مقدمه

کادمیوم (Cd) عنصری غیرضروری و سمی برای گیاهان و یکی از فلزات سنگین دو ظرفیتی است که در طبیعت بیشتر در سنگ‌های معدنی همراه با روی (Zn) یافت می‌شود (۷). خطر فلزات سنگین برای سلامتی انسان و دام به دلیل دوام طولانی آنها در محیط‌زیست تشدید می‌شود (۲۱). در میان فلزات سنگین، کادمیوم به علت سهولت جذب آن توسط گیاه، دارای اهمیت ویژه‌ای است (۴۵) و اثر سمیت آن برای گیاهان تا ۲۰ برابر سایر فلزات سنگین می‌باشد. از این‌رو به علت سمیت بالا و حلالیت زیاد عنصر کادمیوم در آب، به‌عنوان یک آلاینده قوی محسوب می‌شود (۳۷) و دارای اهمیت زیادی از دیدگاه محیط‌زیست است (۴۲). سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۰۴ در مورد افزایش غلظت کادمیوم در محیط‌زیست ابراز نگرانی کرده و غلظت مجاز کادمیوم در خاک را بین ۱ تا ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بیان نمود (۱۱). کادمیوم از طریق فعالیت‌های مختلف بشر وارد خاک می‌شود و

راه‌های ورود آن به محیط از طریق ضایعات صنعتی ناشی از فرایندهای تولید پلاستیک، معدن‌کاری، تولید مواد رنگی، تولید آلیاژها و باتری‌هاست (۶). عناصر سنگین مانند کادمیوم، طیف وسیعی از مسمومیت را که شامل تخدیر اعصاب، مسمومیت کبدی، مسمومیت کلیه، ایجاد جنین ناقص و جهش ژنی در انسان است، سبب می‌شود (۲۳). برای پالایش مناطق آلوده به فلزات سنگین و دیگر آلاینده‌ها، روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی پیشنهاد شده است که عمدتاً پرهزینه و غیر اقتصادی می‌باشند. یکی از روش‌های سمیت‌زدایی و کاهش مواد سمی، ازجمله فلزات سنگین در محیط‌های آلوده، استفاده از گیاهان انباشته‌گر است که به این فرایند گیاه پالایی می‌گویند (۳۹). گیاه پالایی (Phytoremediation)، تکنولوژی پاکسازی خاک‌ها و سیستم‌های آبی از فلزات سنگین و آلاینده‌هاست (۳۲). این روش به کمک برخی گونه‌های گیاهی که توانایی جذب و انباشتگی فلزات سنگین را در بافت‌های خود دارند و می‌توانند آن را در غلظتی ۱۰ تا ۱۰۰ برابر آنچه که گیاهان زراعی تحمل می‌کنند در خود تجمع دهد، انجام می‌شود (۲۴). از فواید گیاه پالایی به این روش، حفظ ساختمان و حاصلخیزی خاک بعد از برداشت فلزات سنگین و جایگزینی مناسب برای روش‌های انرژی خواه و پرهزینهٔ مهندسی است (۳۹). گیاه‌پالایی، یک تکنیک با صرفهٔ اقتصادی، زیست محیطی و علمی است که برای کشورهای در حال توسعه بسیار مناسب بوده و روشی ارزشمند محسوب می‌شود، اما متأسفانه بر خلاف این پتانسیل، هنوز در برخی از کشورها مانند ایران به‌عنوان یک فناوری، استفاده تجاری ندارد (۴). تأثیر و کارایی گیاهان انباشت کننده فلزات سنگین به مقدار زیادی بستگی به خصوصیات گیاهان ازجمله سرعت رشد، بیوماس زیاد، دامنه تحمل و تجمع عناصر سنگین در خاک دارد (۸). افزایش وزن زیست تودهٔ تولیدی در خاک‌های آلوده به عناصر سنگین، با اعمال تیمارهای مناسب، نقش مهم در افزایش کارایی گیاه پالایی دارد (۱۵). یک گیاه ایده‌آل برای فرایند گیاه پالایی باید دارای زیست توده بالا، توان جذب زیاد، تکثیر آسان و رشد سریع بوده و همچنین نسبت به شرایط نامساعد محیطی مقاوم باشد (۳۲).

علاوه بر تفاوت‌های ژنتیکی، عوامل محیطی مختلف ازجمله برهم‌کنش عناصر سنگین با عناصر غذایی ضروری گیاه می‌تواند بر میزان جذب فلزات سنگین توسط گیاهان مؤثر باشد (۴۱). در محلول خاک سیلیسیم به صورت سیلیس حل شده، مونوسیلیسیک اسید (H_4SiO_4) وجود دارد و با همین فرم توسط گیاهان جذب می‌شود و دومین ترکیب عنصر معدنی در خاک پس از اکسیژن (۴۷ درصد) بوده و تقریبا ۲۸ درصد پوستهٔ زمین را اشغال کرده است (۲۳). اگرچه سیلیسیم به عنوان عنصر ضروری برای رشد بیشتر گیاهان معرفی نشده است، اما اثرهای سودمندی در رشد و نمو گیاهان در تنش‌های محیطی نشان داده است (۲۹). یکی از سودمندی‌های کاربرد سیلیسیم، افزایش تحمل برخی گونه‌های گیاهی در برابر سمیت فلزات سنگین می‌باشد (۴۰). سیلیکون در آندودرم رسوب کرده و سبب کاهش انتقال کادمیوم از راه آپوپلاست یا فضای آزاد بین سلولی می‌شود (۴۳) و به‌عنوان عنصر کاهش دهندهٔ اثر سمی برخی عناصر سنگین و نیز انواع تنش‌های محیطی از قبیل شوری، خشکی و سرمازدگی شناخته شده است. اثر مثبت دیگر سیلیسیم افزایش کارایی دریافت نور است که با تجمع در دیواره‌های سلولی آوندهای چوبی گیاهان، مقاومت گیاه به خوابیدگی را افزایش می‌دهد و به‌دنبال آن تحریک و تشدید فتوسنتز، سبب تولید بیشتر محصول می‌شود (۴۶). این عنصر با تحریک سیستم آنتی اکسیداتیو در گیاه، تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین و انتقال فلزات سنگین به اندامک‌هایی مانند واکوئل سلول‌های گیاهی باعث کاهش اثرات تنش و سمیت فلزات سنگین در گیاهان می‌شود (۳۵). با کمبود عنصر سیلیسیم در خاک، مقدار کلروفیل a در گیاه کم می‌شود و در ادامه رشد گیاه و میزان فتوسنتز کاهش می‌یابد. بیشتر محققان این کاهش

فتوسنتز را به دلیل نقش سیلیسیم در زنجیر سنتز کلروفیل می‌دانند (۳).

خرفه (*Portulaca oleracea*) گیاهی یکساله، گرمادوست و چهار کربنه از خانواده *Portulacaceae* دارای ساقه علفی، خوابیده و گوشتی است (۲۵). خرفه گیاهی است که به‌سهولت در خاک‌های اسیدی و شور رشد می‌کند و به همین دلیل ازجمله گیاهان هالوفیت است (۳۲). اگرچه این گیاه به‌عنوان علف هرز شناخته می‌شود، اما استفاده از این گیاه به‌عنوان یک گیاه خوراکی و دارویی سابقه طولانی دارد (۴). این گیاه یک منبع عالی از اسیدهای چرب امگا۳ (اسید لینولنیک) و امگا۶ (اسید لینولئیک)، ویتامین های A، C و E، بتاکاروتن و آنتی‌اکسیدان‌های آلفا توکوفرول، اسید اسکوربیک و گلوتاتیون است (۲۶).

با توجه به اینکه خرفه بیشتر به‌عنوان علف هرز مطرح است و توانایی رشد و حفظ بقاء در شرایط نامساعد محیطی را دارد، در این آزمایش اثر مقادیر مختلف کادمیوم بر شاخص‌های فیزیولوژیک خرفه به‌عنوان یک گیاه پیش‌اندوز و تأثیر سیلیسیم در افزایش مقاومت این گیاه در برابر تنش عنصر سنگین کادمیوم و به‌عنوان عنصر کاهش دهندهٔ اثرات سمی آن مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روشها

آزمایش در گلخانهٔ تحقیقاتی دانشگاه زابل به‌منظور بررسی اندوزش و تحمل آلودگی کادمیومی و تأثیر تیمار سیلیسیم بر ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه خرفه انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح کادمیوم در غلظت‌های صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، از منبع نیترات کادمیوم $Cd(NO_3)_2$ و دو سطح سیلیسیم، عدم کاربرد سیلیسیم و کاربرد ۰/۹۳۷ میلی‌گرم سیلیسیم به صورت سلیکات سدیم (Na_2SiO_3) در هر کیلوگرم خاک انجام گردید. قبل از مخلوط کردن عنصر سنگین، به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بافت خاک، نمونه‌ای از آن تهیه و مورد آنالیز قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بافت خاک مورد آزمایش

بافت	شن	سیلت	رس	پتاسیم	فسفر	ازت کل	هدایت الکتریکی	pH
لومی	(درصد)	(درصد)	(درصد)	mg/kg	mg/kg	(درصد)	ds/m	
رسی	۱۷	۴۵	۳۸	۱۱۹	۱۳/۷	۰/۱۸	۱/۳	۷/۵

ابتدا مقدار برابر نمک نیترات کادمیوم، به یک کیلوگرم از خاک افزوده شد و به‌طور کامل با آن مخلوط شد تا پیش ماده‌ای همگن به‌دست آید. این پیش ماده آلوده، سپس با جرم ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک ایجاد شد (۲). به‌منظور اینکه تا حد امکان واکنش‌های بین آلودگی و خاک تکوین یابد و شرایط آلودگی به شرایط طبیعی نزدیک‌تر شود. خاک آلوده به مدت ۲ ماه در معرض تناوب‌های تر و خشک شدن قرار گرفت (۲). بذرهای خرفه بومی خمینی شهر اصفهان تهیه شده از شرکت پاکان بذر اصفهان، در داخل پتری‌دیش تا مرحله جوانه‌زنی پیش رفتند. سپس در فاصله‌های منظم در گلدان سه کیلوگرمی شامل خاک آلوده به کادمیوم در شرایط گلخانه کشت و با آب معمولی آبیاری شدند. در مرحلهٔ ۴ برگی تنک انجام شد و در هر گلدان ۶ بوته باقی ماند و بعد از این مرحله به علت مساعد بودن شرایط محیطی، گلدان‌ها به فضای باز منتقل شدند. سیلیکون نیز یک هفته پس از مرحله چهار برگی گیاه به صورت سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) به خاک گلدان‌های تحت تیمار کاربرد ۰/۹۳۷ میلی‌گرم سیلیسیم در هر کیلوگرم خاک اضافه شد.

تعیین وزن تر و خشک نمونه‌ها: پس از گذشت ۲ ماه از زمان کاشت، نمونه‌ها به طور تصادفی از هر واحد آزمایشی برداشت شد و پس از جدا کردن اندام هوایی از ریشه گیاه، محاسبه گرم وزن تر برگ و ریشه انجام شد. سپس برای به‌دست آوردن وزن خشک، نمونه‌ها را درون پاکت کاغذی قرار داده و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون به مدت ۴۸ساعت خشک شدند. همچنین ارتفاع و تعداد شاخه‌های جانبی در گیاه نیز اندازه‌گیری شد.

تعیین میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی: برای تعیین مقادیر کلروفیل a، b و کاروتنوئید، مقدار ۰/۵ گرم از بافت سبز برگ‌های جوان به همراه ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ درصد ساییده شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند و پس از آن به طور جداگانه مقدار کلروفیل a در طیف جذبی ۶۶۳، کلروفیل bدر ۶۴۵ و طیف جذبی کاروتنوئید در طول موج ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر UV- Visible مدل Cary-50 قرائت شد. برای تنظیم دستگاه، استون ۸۰ درصد مورد استفاده قرار گرفت. غلظت رنگیزه‌ها با استفاده از فرمول‌های زیر و برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر نمونه محاسبه شد (۵).

$$\text{Chlorophyll a} = (19.3\times A_{663} - 0.886\times A_{645})\ V/\ 100W\ mg.g^{-1}\ FW \quad (۱)$$

$$\text{Chlorophyll b} = (19.3\times A_{645} - 3.6\times A_{663})\ V/\ 100W\ mg.g^{-1}\ FW \quad (۲)$$

$$\text{Carotenoides} = 100\ (A_{470}) - 3.27\ (\text{mg chl. A}) - 104\ (\text{mg chl. b})/\ 227\ mg.g^{-1}\ FW \quad (۳)$$

در رابطه‌های فوق A طول موج قرائت شده توسط دستگاه، V حجم محلول صاف شده (محلول فوقانی حاصل از سانتریفیوژ) و W وزن تر نمونه برحسب گرم است.

تعیین محتوای نسبی آب برگ (RWC): به‌منظور تعیین میزان نسبی آب برگ، نمونه‌گیری از جوان‌ترین برگ‌های کامل شده انجام شد. برای تعیین وزن تورژسانس، ابتدا از برگ جدا شده از بوته، دیسک‌هایی تهیه شد. پس از تعیین وزن تر (FW) برگ‌ها به مدت ۵ ساعت در داخل آب مقطر غوطه‌ور شده و پس از خارج کردن و گرفتن آب سطحی با استفاده از دستمال کاغذی وزن شدند (SW). در مرحله بعدی آزمایش، دیسک‌های اشباع شده به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در پایان این زمان، دیسک‌ها دوباره وزن شدند و (DW) به‌دست آمد (۴۷).

میزان نسبی آب برگ با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$RWC = (FW-DW)/(SW-DW) \quad (۴)$$

FW وزن تر برگ، DW وزن خشک برگ و TW وزن برگ اشباع شده است.

استخراج و سنجش پرولین: برای تهیه معرف ۱/۲۵ گرم نین هیدرین در ۳۰ میلی‌لیتر استیک اسید گلاسیال، به همراه ۲۰ میلی لیتر اسید فسفریک ۶ مولار مخلوط و در حرارت ملایم به هم زده تا کاملاً حل شد. این محلول در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت۲۴ ساعت پایدار می‌باشد. برای سنجش محتوای پرولین ۰/۵ گرم بافت تر گیاه را برداشته و در ۱۰ میلی لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳٪ در هاون چینی ساییده، تا کاملاً یکنواخت شد. عصاره حاصل با کاغذ واتمن شماره ۲ صاف و بعد ۲ میلی لیتر از عصاره صاف شده با ۲ میلی لیتر محلول معرف نین هیدرین و ۲ میلی‌لیتر استیک اسید گلاسیال مخلوط شده و به‌مدت یک ساعت در حمام آب گرم ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از آن با قرار دادن لوله‌های آزمایش در حمام یخ واکنش مذکور پایان یافت. سپس ۴ میلی‌لیتر تولوئن به محتویات هر لوله اضافه شد و به‌مدت ۳۰ ثانیه لوله‌های فالکون را تکان می‌دهیم؛ تولوئن کاملا پرولین را در خود حل می‌کند و اشباع از پرولین نمی‌شود، بنابراین نیاز به سانتریفیوژ نیست. مرحله رویی که شامل تولوئن و پرولین بود از مرحله آبی جدا می‌شود. سپس جذب آن به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری و غلظت پرولین برحسب میلی‌گرم

بر گرم بافت تازه، با استفاده از منحنی استاندارد تعیین شد (۹).

داده‌های حاصل با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۱، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین نیز بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نمودارها با نرم افزار Excel ترسیم شد.

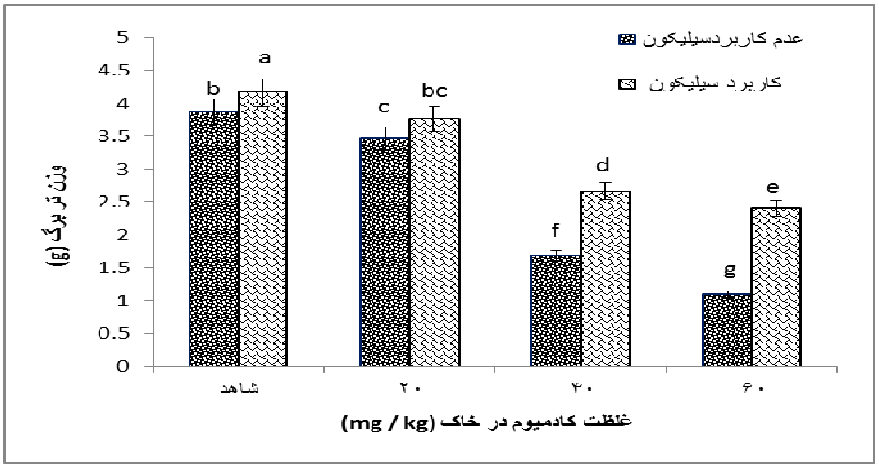
نتایج

وزن تر گیاه (برگ و ریشه): نتایج تجزیه داده‌های حاصل از آزمایش نشان داد که اثر تیمارهای کادمیوم، سیلیسیم و اثر متقابل آنها، بر وزن تر برگ و ریشه بسیار معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۱$) شد. اثر سمیت کادمیوم و افزایش غلظت آن در محیط ریشه سبب کاهش وزن تر ریشه شد. علاوه بر این با افزایش میزان کادمیوم، وزن تر برگ نیز کاهش یافت که از این میان کاهش وزن در ریشه محسوس‌تر بود. طبق نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل (شکلهای۲و۱) کمترین میزان وزن تر برگ و ریشه، در غلظت ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک و عدم کاربرد سیلیسیم مشاهده شد. تیمار سیلیسیم سبب کاهش خسارت ناشی از غلظت‌های مختلف کادمیوم شد و مقاومت گیاه را در برابر عنصر سنگین کادمیوم افزایش داد.

وزن خشک گیاه (برگ و ریشه): بین تیمار شاهد (غلظت صفر کادمیوم) و افزایش میزان کادمیوم تا ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک، اختلاف معنی‌داری در وزن خشک مشاهده نشد. اما در سطوح ۴۰ و۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک در مقایسه با شاهد کاهش معنی‌دار مشاهده شد و از میزان زیست تودهٔ گیاه در شرایط آلودگی کادمیومی کاسته شد. اثر تیمار سیلیسیم نیز بر وزن خشک برگ و ریشه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد. اما اثر متقابل تیمار سیلیسیم و کادمیوم بر وزن خشک برگ و ریشه معنی‌دار نشد.

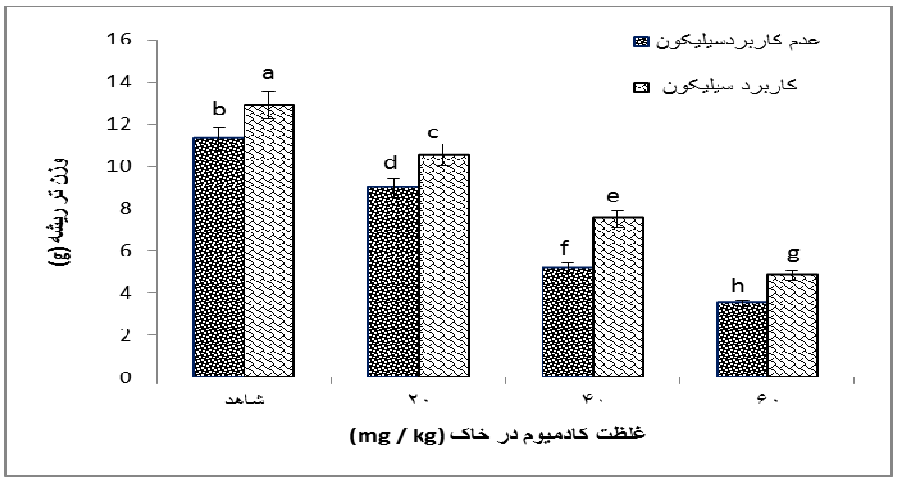
ارتفاع بوته و تعداد شاخهٔ جانبی: نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌ها نشان می‌دهد که اثر کادمیوم بر ارتفاع بوته و تعداد شاخهٔ جانبی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. افزایش غلظت کادمیوم علاوه بر اختلال در رشد و ارتفاع گیاه، سبب کاهش تعداد شاخه‌های جانبی در غلظت‌های ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک شد. اثر تیمار سیلیسیم بر ارتفاع بوته و تعداد شاخهٔ جانبی نیز به‌ترتیب در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌دار بود و مصرف سیلیسیم باعث بهبود شرایط رشد گیاه در شرایط آلودگی کادمیومی شد. اثر متقابل تیمار سیلیسیم و کادمیوم بر ارتفاع بوته و تعداد شاخهٔ جانبی معنی‌دار نشد.

رنگیزه‌های فتوسنتزی: آنالیز داده‌های مربوط به محتوای کلروفیل a و b نشان داد که اثر تیمار کادمیوم بر هر دو صفت در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. مقدار کلروفیل a و b در گیاهان شاهد (عدم استفاده از سیلیسیم) و همچنین در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم در اثر سمیت کادمیوم کاهش یافت (شکل ۳). اما تیمار سیلیسیم سبب کاهش خسارت ناشی از سمیت کادمیوم شد. اثر سیلیسیم بر میزان کلروفیل a در سطح احتمال ۱ درصد و کلروفیل b در سطح احتمال ۵ درصد در غلظت‌های مختلف کادمیوم معنی‌دار شد. کادمیوم باعث افزایش میزان کاروتنوئید در گیاه شد. افزایش کادمیوم تا غلظت ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک بر میزان کاروتنوئید تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت، اما در غلظت‌های ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک معنی‌دار بود و به‌موازات افزایش غلظت کادمیوم مقدار کاروتنوئید در برگ افزایش یافت. اثر متقابل کادمیوم و سیلیسیم بر مقدار کلروفیل a و کاروتنوئید نیز معنی‌دار ($P \leq ۰/۰۵$) بود. بیشترین مقدار کلروفیل a از تیمار شاهد (غلظت صفر میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) و کاربرد ۰/۹۳۷ میلی‌گرم سیلیسیم در هر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (شکل۳). کاربرد سیلیسیم سبب افزایش توانایی گیاه در حفظ میزان کلروفیل a و کاهش میزان کاروتنوئید در برگ شد (شکل۴).



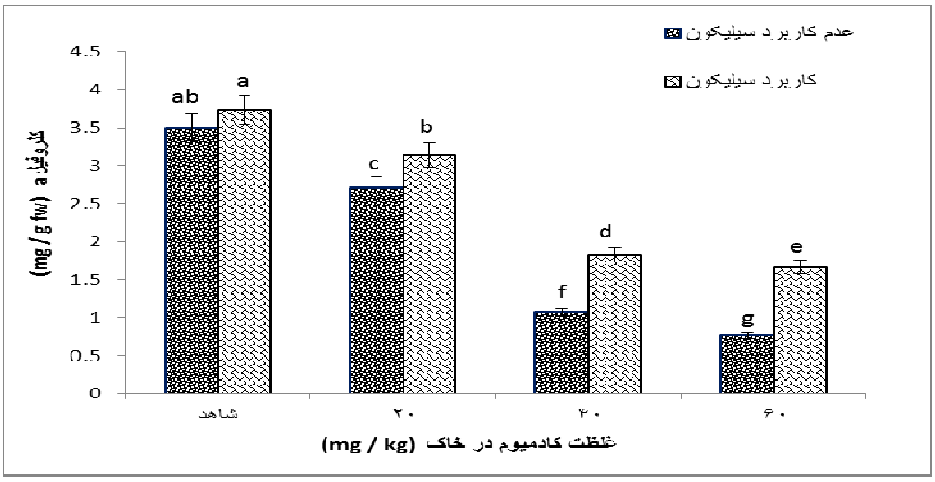
شکل۱- وزن‌تر برگ تحت اثر متقابل تیمارهای سیلیکون و کادمیوم

حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.



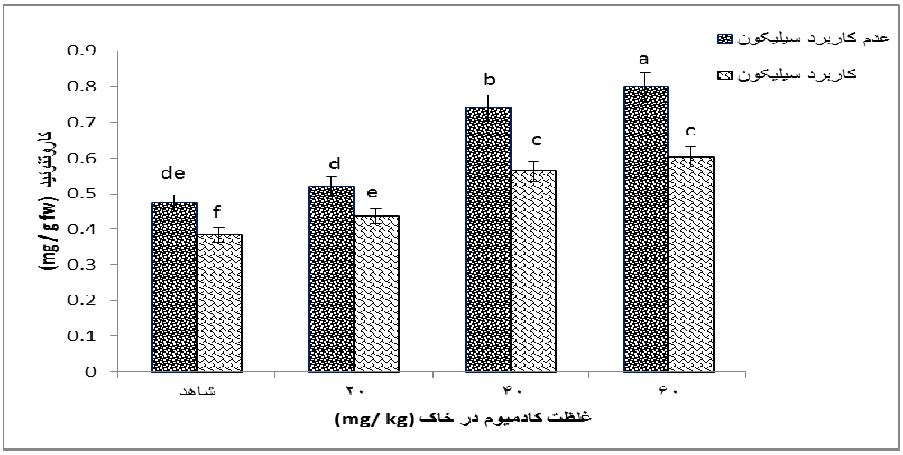
شکل۲- وزن‌تر ریشه تحت اثر متقابل تیمارهای سیلیکون و کادمیوم

حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است



شکل۳- غلظت برگی کلروفیل a تحت اثر متقابل تیمارهای سیلیکون و کادمیوم

حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.



شکل۴- غلظت برگی کاروتنوئید تحت اثر متقابل تیمارهای سیلیکون و کادمیوم

حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

پرولین: آنالیز داده‌های مربوط به مقدار پرولین در برگ نشان داد که اثر کادمیوم و تیمار سیلیسیم بسیار معنی‌دار (P ≤۰/۰۱) بود. مقایسهٔ نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بین شاهد و سطوح کاربرد کادمیوم اختلاف معنی‌داری مشاهده شد، به‌طوری‌که مقدار پرولین، در سطح ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک و عدم کاربرد سیلیسیم به ۵ برابر شاهد رسید (شکل۵). اثر متقابل سیلیسیم و کادمیوم بر مقدار پرولین برگ نیز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد.

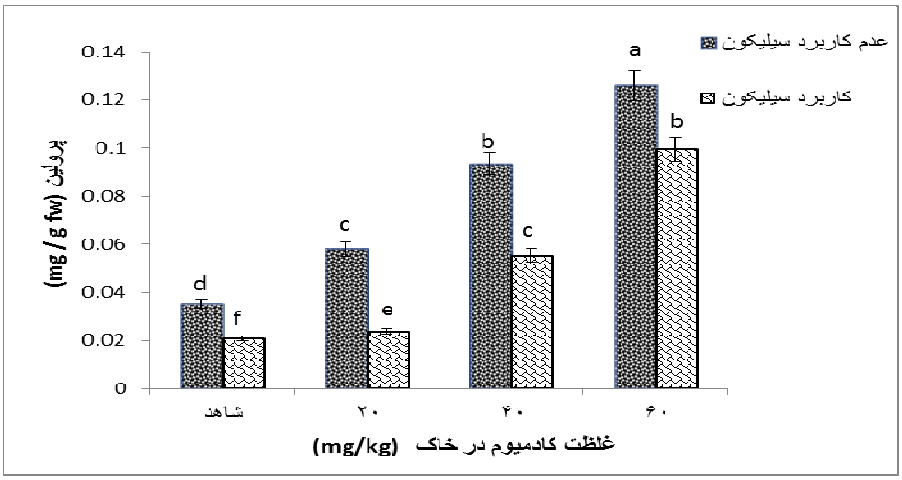
محتوای نسبی آب برگ: نتایج اثر تنش کادمیوم و تیمار سیلیسیم بر محتوای نسبی آب برگ بسیار معنی‌دار (P ≤۰/۰۱) بود. بررسی اثر متقابل غلظت‌های مختلف کادمیوم و تیمار سیلیسیم (شکل ۶) نشان داد، سیلیسیم مانع از کاهش شدید محتوای نسبی آب برگ در مقایسه با تیمارهای عدم کاربرد سیلیسیم به‌ویژه در غلظت‌های کم کادمیوم شد.

بحث

علائم سمیت کادمیوم در خرفه به صورت کاهش عملکرد و زرد شدن و ریزش برگ‌ها در غلظت‌های ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد و با نتایج آزمایش رشید شمالی و همکاران (۱۳۹۱) مطابقت داشت (۲). بررسی صفات مورد مطالعه نشان داد که در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم، با افزایش غلظت کادمیوم در محیط ریشه، میزان کاهش عملکرد، در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم نسبت به عدم کاربرد آن، بردباری بیشتری به عنصر سنگین کادمیوم نشان داد.

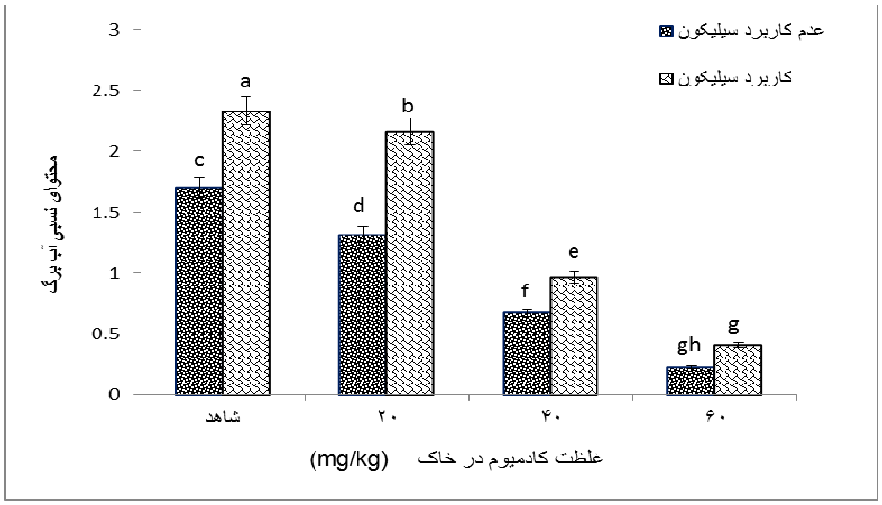
کادمیوم با اختلال در متابولیسم نیتروژن و سنتز پروتئین و به‌دنبال آن کاهش فتوسنتز در گیاهان، منجر به کاهش رشد گیاه می‌شود (۱۱). در اثر افزایش فراهمی کادمیوم در محیط رشد خرفه، کاهش وزن‌تر در برگ و ریشه مشاهده شد. شریفا و ابو مرفح (۲۰۱۵) نشان دادند که کادمیوم با اختلال در متابولیسم نیتروژن از طریق مهار فعالیت آنزیم‌هایی مانند گلوتامین سینتاز، گلوتامات سینتاز و نیترات ردوکتاز و فرایند احیاء نیترات سبب کاهش تولید پروتئین شده و رشد گیاه را متوقف می‌کند (۴۳) و به‌دنبال آن از تقسیم سلول‌های منطقه مریستمی کاسته شده و از رشد سلول‌های منطقه رشد جلوگیری می‌کند (۳۳). همچنین ایجاد شرایط اکسایشی سبب بر هم زدن ساختمان میکروتوبول در سلول‌های مریستمی ریشه می‌شود (۳۹) و از تعداد ریشه‌های مویین گیاه کاسته می‌شود (۲۳). ریشه گیاهان دارای چندین مکانیسم برای حفظ بقاء در محیط آلوده به عناصر سنگین است. در برخی از گیاهان یون‌ها توسط دیواره‌های سلولی ریشه جذب و درون ساختارهای سلولی مانند واکوئل‌ها اسیر و برای انتقال به ساقه، غیر قابل

دسترس می‌شوند. علاوه بر این، مکانیسم‌های تخصصی دیگری نیز برای محدود کردن انتقال فلز وجود دارد. به عنوان مثال بسیاری از فلزات سنگین با تغییر در فعالیت پروتئین‌های کانال انتقال آب و با بستن روزنه‌های برگ، جریان آب را در گیاه متوقف می‌سازند (۴۳).



شکل ۵- غلظت برگی پرولین تحت اثر متقابل تیمارهای سیلیکون و کادمیوم

حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.



شکل ۶- محتوای نسبی آب برگ تحت اثر متقابل تیمارهای سیلیکون و کادمیوم

حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

بنابراین مقدار جذب کادمیوم، درون ریشه‌ها زیاد می‌باشد اما امکان انتقال آن به ساقه محدود می‌شود (۲۷). از سوی دیگر تمایز زودرس و چوبی شدن دیوارهٔ سلول‌های واقع در منطقهٔ رشد طولی سلول، می‌تواند از دلایل دیگر کاهش رشد ریشه در شرایط تنش کادمیوم باشد که این اثر همراه با تغییر رنگ ریشه نیز خواهد بود (۱۸). در نتیجه بیوماس یا توده زنده گیاه نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر این در این آزمایش، تیمار سیلیسیم سبب افزایش وزن‌تر برگ و ریشه شد. گویا و همکاران (۲۰۰۱) و ساموئلز و همکاران (۱۹۹۳) نشان دادند که افزایش رشد و عملکرد گیاه در حضور سیلیسیم، به دلیل رسوب آن در پهنای برگ، افزایش استحکام برگ‌ها و نیز افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ است و از این طریق موجب بهبود توانایی مکانیکی ساقه و برگ‌ها در جذب نور و افزایش ظرفیت

فتوسنتزی گیاه می‌شود (۲۱ و ۴۰). به طور کلی، با کاهش جذب و انتقال کادمیوم به برگ‌ها و به‌دنبال تجمع سیلیسیم در دیوارهٔ سلول‌ها، میزان قندهای محلول در گیاه افزایش یافته و به گیاه کمک می‌کند تا بتواند ذخیرهٔ کربوهیدراتی خود را برای حفظ متابولیسم پایه، در شرایط تنش در حد مطلوب نگه دارد و از این طریق گیاه بتواند با حفظ شرایط اسمزی حداکثر توان خود را برای حفظ مقادیر آبی و ادامهٔ رشد گیاه انجام دهد (۳۸).

وزن خشک برگ و ریشه نیز تحت تأثیر تنش کادمیوم کاهش یافت، اما تیمار سیلیسیم باعث بهبود شرایط رشد و افزایش مقاومت گیاه شد. طبق آزمایش یانگ و همکاران (۲۰۱۳)، در فرایند گیاه پالایی مکان‌های آلوده به فلزات سنگین، شناسایی گونه‌های گیاهی با تولید زیست تودهٔ بالا که بتوانند آلاینده‌ها را در خود تحمل کنند، دارای اهمیت بسیاری است، زیرا افزایش زیست توده، توانایی حذف فلز از خاک را به وسیلهٔ گیاه افزایش می‌دهد و همچنین موجب افزایش کارایی گیاه در اندوزش عناصر سنگین می‌شود (۴۸).

کادمیوم بر تقسیم و رشد سلول‌های گیاهان اثر می‌گذارد و همچنین آلودگی خاک به عنصر کادمیوم موجب کاهش هدایت هیدرولیکی ریشه گیاهان، کاهش انبساط سلولی و کاهش جذب آب توسط گیاهان شده و به‌دنبال آن کاهش تولید مواد فتوسنتزی، سبب کاهش ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های‌جانبی در گیاه می‌شود (۳۰). فتوسنتز به کادمیوم حساس بوده و کادمیوم کلروفیل و آنزیم‌های دخیل در تثبیت CO_2 را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱). چن و همکاران (۲۰۰۷)، دلایل اثرات سودمند مصرف سیلیسیم در بهبود رشد و ایجاد مقاومت گیاه به کادمیوم را به‌ترتیب جلوگیری از جذب، توقف انتقال از طریق مسیر آپوپلاست و انتقال کادمیوم به واکوئل توسط عنصر سیلیسیم بیان کردند (۱۳).

نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش یون کادمیوم از مقدار رنگیزه‌های گیاه به طور معنی‌داری کاسته شد. یانگ و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که کاهش مقدار کلروفیل برگ، در اثر سمیت کادمیوم، ناشی از واکنش این عنصر با گروه سولفیدریل موجود در ساختار آنزیم‌ها و پروتئین‌ها است که موجب اختلال در فرایند فتوسنتز می‌شود. از سوی دیگر به علت کاهش جذب برخی عناصر مانند آهن، مقدار کلروفیل در سلول کاهش یافته و از فعالیت آنزیم احیاکنندهٔ آهن ممانعت می‌شود (۴۸). بنابراین به نظر می‌رسد در شرایط تنش، کاهش کلروفیل بواسطه افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز و در نتیجه تجزیهٔ کلروفیل است (۲۲). مرس و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که کاهش کلروفیل در شرایط آلودگی محیط رشد به عناصر سنگین مانند کادمیوم به صورت مستقیم به علت مهار سنتز آنزیم‌های سازندهٔ آن و از سوی دیگر کاهش جذب عناصر ضروری مانند نیتروژن در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است (۳۳). تجزیهٔ کلروفیل در این شرایط امری بدیهی است و بدنبال تخریب رنگیزه سبز (کلروفیل)، گیاه رنگی به نظر می‌رسد که دلیل آن افزایش و قابل رؤیت شدن رنگیزه‌های محافظ مانند کاروتنوئیدها (کاروتن، گزانتوفیل و لیکوپن) و آنتوسیانین‌ها است (۳۷). کاربرد سیلیسیم برای تولید غلظت‌های بالای آنزیم ریبولوز بیوفسفات کربوکسیلاز در برگ لازم است. این آنزیم سوخت و ساز دی اکسیدکربن را تنظیم کرده، در نتیجه کارایی تثبیت دی اکسیدکربن توسط گیاهان را افزایش می‌دهد و در نهایت منجر به بهبود فتوسنتز در گیاه می‌شود (۴۴).

در این آزمایش نیز مشابه تحقیقی که توسط لیامس و همکاران (۲۰۰۰) انجام گردید مشاهده شد که همگام با افزایش کادمیوم میزان پرولین در گیاه افزایش یافت (۳۰). در برگ‌های بالغ تحت شرایط تنش سمیت کادمیوم، تجزیهٔ پروتئین‌ها باعث کاهش غلظت پروتئین در برگ و در نتیجه افزایش اسیدهای آمینهٔ آزاد ازجمله پرولین می‌شود (۴۴). چهار دلیل برای افزایش تجمع پرولین در زمان تنش پیشنهاد شده است که عبارتند از: الف) تحریک سنتز آن از اسید گلوتامیک، ب) کاهش انتقال آن از طریق آوند آبکش،

ج) جلوگیری از اکسیداسیون در سلول در طول تنش و د) تخریب و اختلال در فرایند سنتز پروتئین (۱۰). با توجه به افزایش غلظت پرولین در برگ تحت تنش، میزان پرولین برگ بیش از آنکه معیاری از مقاومت به تنش گیاه باشد، معیاری از شدت تنش است. اثر سیلیسیم در کاهش آسیب غشاء و نشتی املاح از سلول، می‌تواند به طور غیر مستقیم سبب افزایش پرولین در سلول و حفظ بقاء آن شود (۴۱). بنابراین می‌توان گفت که تجمع پرولین در شرایط تنش، بیشتر به تداوم بقاء و رشد گیاه تا پایان دورهٔ حیات گیاه کمک می‌کند (۳۸).

هر فرایند گیاهی به طور مستقیم یا غیر مستقیم تحت تأثیر محتوای آب گیاه بوده و می‌توان آب را یک عامل اساسی در تنظیم رشد گیاه محسوب نمود. بنابراین در اغلب پژوهش‌ها در ارتباط با پاسخ گیاهان به تنش‌های محیطی، توجه ویژه‌ای به روابط آبی از سطح سلولی تا کل گیاه می‌شود. همانطور که در این آزمایش نیز مشاهده شد، میزان رطوبت نسبی برگ (RWC) در اثر تنش کادمیوم کاهش یافت. شریفا و ابومرفح (۲۰۱۵) گزارش کردند که دلیل افزایش (RWC) در اثر اعمال سیلیسیم، کاهش شدت نفوذپذیری غشاء به علت رسوب سیلیکا ($SiO_2\ nH_2O$) در آپوپلاست دیواره سلولی است که باعث استحکام بافت گیاه می‌شود (۴۳). نتایج حاصل از مطالعه مورنو و همکاران (۱۹۹۹) نشان داده است که میزان پراکسیداسیون چربی‌ها در سلول، در حضور یون کادمیوم افزایش می‌یابد که موجب افزایش نفوذپذیری غشاء سلول می‌شود و این وضعیت باعث برهم خوردن تعادل آبی و تغذیه‌ای سلول شده که این یکی از مهمترین دلایل کاهش عملکرد، وزن و محتوای نسبی آب برگ در گیاه می‌باشد (۳۴).

نتیجه‌گیری

نتایج این آزمایش نشان داد که کاهش وزن تر و خشک برگ و ریشه در اثر تنش کادمیوم، می‌تواند در اثر اختلال در فرایند فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن باشد. همچنین در اثر کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی تولید بیوماس و رشد در گیاه مورد مطالعه کاهش یافته است. با توجه به اینکه خرفه یک علف هرز بوده و از سرعت تکثیر و رشد بالا برخوردار است، لذا کاربرد آن به‌عنوان یک گیاه بیش اندوز در گیاه پالایی بدون اشکال و مقرون به صرفه بوده و از سوی دیگر بقایای گیاهی آن پس از برداشت، در فناوری گیاه پالایی می‌توانند خاکستر و دفن شوند یا در صورت امکان فلزات جذب شده توسط گیاه، از خاکستر آن جداسازی گردند. همچنین با توجه به افزایش معنی‌دار شاخص‌های فیزیولوژیک در تیمارهای کاربرد سیلیسیم می‌توان به علت اثر مثبت آن در افزایش بردباری و بیوماس خرفه، در شرایط آلودگی کادمیوم و به‌دنبال آن افزایش توانایی گیاه در جذب عنصر سنگین کادمیوم، به‌عنوان راهکاری مناسب در افزایش کارایی این روش پاکسازی در خاک‌های آلوده و نیز یک عنصر مفید در افزایش عملکرد و مقاومت به تنش‌های محیطی استفاده کرد.

منابع

۱ – دژبان.ع.، شیروانی. ش.، عطارد. پ.، دلشاد. م و متینی‌زاده.م. ۱۳۹۴. اثر تنش کادمیوم بر فلورسانس کلروفیل، محتوای رنگدانه‌های کلروفیلی و پرولین برگ نهال‌های داغداغان (*Robinia pseudoacacia* L) و اقاقیا (*Celtis caucasica* L). مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران)، ۲۸: ص۷۴۶–۷۵۸.

۲ – رشید شمالی ،آ.، خداوردی لو، ح.، و صمدی، ع. ۱۳۹۱. اندوزش و تحمل آلودگی کادمیومی خاک توسط ارزن وحشی، سلمه تره ، خرفه و خاکشیر، مجله مدیریت خاک و تولید پایدار ۱: ۶۲–۴۵.

۳ – مالمیر. ح و رودی. س. ۱۳۹۳. اثر سیلیکون روی میزان فیتوکلات، کربوهیدرات غیر ساختمانی و پتاسیم در دو رقم برنج ایرانی (*Oriza sativa*). مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست شناسی ایران). ۲۷: ص۹۳۷–۹۴۸.

۴ - موحدیان عطار، ا.، عسگری، ص.، نادری، غ. و بدیعی، ا. ۱۳۸۹. بررسی اثر آنتی‌اکسیدانی گیاهان عناب، زرشک، خرفه و کنگر بر روی سیستم اکسیداتیو، فصلنامه گیاهان دارویی.۱۰ :۸۸-۷۹.

5- Arnon, A. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. Journal of Plant Physiology, 23:112-121.

6- Aravind, P. and Prasad, M. 2004. Zinc protects chloroplasts and associated photochemical function in cadmium exposed Ceratophyllum demersum L., a fresh water macrophyte. Journal of Plant Science, 166(5): 1321-1327.

7- Baker, A. and Proctor, J. 1990. The influence of cadmium copper lead and Zinc on the distribution and evolution of metallophyte in the British Isles. journal of Plant Systematic and Evolution, 173: 91-108.

8- Barcelo, J. and Poschenreider, C. 2013. Plant water relations as affected by heavy metals. areview, Journal of Plant Nutrient, 13: 1-37.

9- Bates, I., Waldren, S. and Teare, I. 1993. Rapid determination of free proline for water–stress studies. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 39: 205-217.

10- Bert, V., Meerts, P., Saumitou-Laprade, P., Salis, P., Gruber, W. and Verbruggen, N. 2003. Genetic basis of Cadmium tolerance and hyperaccumulation in Arabidopsis halleri. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 249: 9-48.

11- Burd, G.I., Dixon, D.G. and Glick, B. 2000. Plant growth-promoting bacteria that decrease heavy metal toxicity in plants. Journl of Microbiolgy, 46: 237–245.

12- Chauhan, B.S. and Johnson, D.E. 2009. Seed germination ecology of *Portulaca oleracea* L, an important weed of rice and upland crops. International Journal of Agriculture and Biology, 5: 272-279.

13- Chen, J., Zhu, C., Lin, D. and Sun, Z. 2007. The effect of Cadmium on lipid peroxidation hydrogen peroxide content and antioxidant enzyme activities in Cadmium sensitive mutant rice seedlings. Journal of Plant Science, 87: 49-57.

14- Cho, H. and Seo, N.H. 2005. Oxidative stress in Arabidiopsis thaliana exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation. Journal of Plant Science, 168: 113-120.

15- Das, P., Samantaray, S. and Routm, G.R. 2011. Studies on cadmium toxicity in plants, Journal Environmental Pollution, 98: 29-36.

16- Eun, S.O., Youn, H.S., and Lee, Y. 2000. Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of Zia mays, Journal of Plant Physiology. 103: 695-702.

17- Ewaise, E.A. 1997. Effects of cadmium nickel and lead on growth chlorophyll content and proteins of weed. Journal of Biologia Plantarum, 39(3): 403-410.

18- Fusconi, A., Gallo, C. and Camusso, A. 2007. Effect of cadmium on root apical meristems of Pisum sativum L. cell viability cell proliferation and microtubule pattern as suitable makers for assessment of stress pollution. Journal of Plant Science, 183: 9–19.

19- Gisbert, C., Ros R., Haro, A., Walker, D.G., Bernal, M.P., Serrano, R. and Navarro Avino, G.A. 2003, Plant genetically modified that accumulates Pb is specially promising for phytoremediation. Journal. Biochemical and Biophysical Research Communications, 5: 303-440.

20- Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S. and Zhang, C. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat 0plants in pot under drought. Journal of Plant Science, 69: 313-321.

21- Gouia, A., Ghorbal, M.H. and Meyer, C. 2001. Effect of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean. Journal of Plant Physiology, 38: 629-638.

22- Hegedus, A., Erdei, S., Janda, T., Toth, E., Horvath, G. and Dubits, D. 2014. Transgenic tobacco plants over producing alfafa aldose/aldehyde reductase show higher tolerance to low temperature and cadmium stress, Journal of Plant Science, 166:1329-1333.

23- Jiawen, W. U., Jia. G., Yanhong, H.U. and Haijun, G. 2015. Distinct physiological responses of tomato and cucumber plants in silicon-mediated alleviation of cadmium stress. Journal of Plant Science, 453: 1-14.

24- Kayser, A., Wenger, K., Attinger, W. and Schulin, R. 2000. Enhancement of Phytoextraction of Zn, Cd and Cu from calcareous soil, The use of NTA and Sulfur amendments. Journal of Chromatography, 34: 1778-1783.

25- Kaimak, H. C. 2013. Effect of nitrogen forms on growth, yield and nitrate accumulation of

cultivated purslane (*portulaca oleracea* l.). Bulg. J. Agricarcher Science, 19: 444-449.

26- Kamal Uddin, A. S. Juraimi,M. A. Hossain, F. Anwar, andM. A. Alam. 2012. Effect of salt stress of *Portulaca oleracea* on antioxidant properties and mineral compositions," Australian Journal Crop Science,17: 1732–1736

27- Lasat, M.M., Baker, J. and Kochian, V. 2011. Altered Zn compartmentation in the root symplasm and stimulated Zn absorption in to the leaf as mechanisms involved in Zn hyperaccumulation in Thlaspi caerulescens. Journal of Plant Physiology, 218: 875-883.

28- Liang, T.C., Sun, W., Zhu, Y.N. and Christie, P. 2006, Mechanism of abiotic stress in higher plants: A review. Journal Environmental Pollution, 28: 1-7.

29- Liang, Y., J. Si, and V. Romheld. 2005. Silicon uptake and transport is an active process in Cucumis sativus. New Phytologist, 167: 797-804.

30- Liamas, A., Ullrich, B. and Sanz, A. 2000. Cadmium effects on transmembrance electrical potential difference, respiration and membrane permeability of rice roots. International Journal of Plant and Soil Science, 219: 21-28.

31- Liu, L., Howe, P., Zhou, Y., Hocart, C. and Zhan, N. 2000. Fatty acids and beta carotene australian purslane (*Portulaca oleracea*). Journal of Chromatography, 893(1): 127-138.

32- Lombi, E,. Zhao, F., Dunham, S. and Grath, P. 2001. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Journal of Environmental Quality, 30: 1919-1926.

33- Meers, E., Van Slycken, S., Adriaensen, K., Ruttens, A., Vangronsveld, J., Witters, G., Thewys, N. and Tack, T.F. 2010. The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils, Journal of Advanced Research in Biological Sciences, 78(1): 35-41.

34- Moreno, J.L., Hernandez, T. and Garcia, C. 1999. Effects of a cadmium containing sewage sludge compost on dynamics of organic matter and microbial activity in an arid soils. Biology and Fertility of Soils, 28: 230-237.

35- Neumann, D. and Nieden, U.Z. 2001. Silicon and heavy metals tolerance of higher plants. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 56: 685-692.

36- Pandey, S. and Agarwal, R.M. 1998. Water stressinduced change in proline contents and nitrate reductase activity in Rice under light and dark condition. Journal Physiology and Molecular Biology of Plants, 4: 53-57.

37- Pinto, A., Motaa, A. 2004. Influence of organic matter on the uptake of cadmium zinc copper and iron by sorghum plants. Science of the Total Environment, 326: 239- 247.

38-Redjala T, Zelko I, Sterckeman T, Legue´ V, Lux A. 2011. Relationship between root structure and root cadmium uptake in maize. Environmental and Experimental Botany, 71: 241–248.

39- Raskin, I, and Ensley, B.D. 2000. Phytoremediation of Toxic Metals Using Plants to Clean Up the Environment.. Science of the Total Environment, 75: 253-276.

40- Samuels, A., Glass, d. and Menzies, J.G. 1993. The effects of silicon supplementation on cucumber fruit. Changes in surface characteristics. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 71: 433-440.

41- Sahebi M, Hanafi MM, Akmar AS, Rafii MY, Azizi P, Tengoua FF, Azwa JNM, Shabanimofrad M. 2015. Importance of Silicon and Mechanisms of Biosilica Formation in Plants. Journal of Plant Science, 205: 1-16.

42- Sharifa, S. and Abu-Muriefah. 2015. Effects of Silicon on Faba Bean (*Vicia faba* L.) plants grown under heavy metal stress conditions. African Journal of Agricultural Science and Technology (AJAST), 3(5): 255-268.

43- Sharifa, S. and Abu-Muriefah. 2015. Effects of Silicon on membrane characteristics, photosynthetic pigments, antioxidative ability, and mineral element contents of faba bean (*Vicia faba* L.) plants grown under Cd and Pb stress. International Journal of Advanced Research in Biological Sciences, 2(6): 1–17.

44- Sang, G.K., Ean, W.P. and Doil, C. 2014. Silicon induced cell wall fortification of rice leaves a possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. Journal of Phytopathology, 92: 1095-1103.

45- Tripathi P, Tripathi RD, Singh RP, Dwivedi S, Goutam D, Shri M, Trivedi PK, Chakrabarty D. 2013. Silicon mediates arsenic tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) through lowering of arsenic uptake and improved antioxidant defence system. Journal Ecology Eng, 52: 96-103.

46- Watanabe, D., FujiWara, Y., Yone Yama, T and Hajashi, H. 2014. Effects of silicon nutrition on metabolism and translocation of nutrients in rice

plants. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 174: 75-79.

47- Weatherley, P.E. 1950. Some aspects of water relations. Science of the Total Environment, 3: 171-206.

48- Yang, X., Baligar, V., Martens, D. and Clark. 2013. Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrients in plant species. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 112: 643-656.

Accumulation potential and tolerance to Cadmium pollution and the effect of Silicon on some physiological indices of *Portulaca oleracea*

Alahbakhsh E.[1], Sirousmehr A.R.[2], Ebrahimi O.[1] and Shahraki N.[1]

[1] Horticulture Dept, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, I. R. of Iran

[2] Agronomy and Plant Breeding Dept, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, I. R. of Iran

Abstract

Cadmium (Cd) is a heavy metal and the extra concentration of Cd around the root create metabolic problems in the plant. To study the effect of silicon on the availability of Cd accumulation in roots and shoots of morphological and physiological effects on the *Portulaca oleracea*, a factorial experiment in a completely randomized design with three replications. The experimental factors consisted of different concentrations of cadmium (0, 20, 40 and 60 mg Cd kg soil) and two levels of silica (without silicon and with 0.937 mg Si kg soil), respectively. The results showed that the plant height, number of lateral shoots, leaves and root dry weight and the amount of photosynthetic pigments, at concentrations of 20 Cd had no significant with control ($p \leq \%5$), but with increasing the concentration of Cd, was observed in the above mentioned factors. Amount of carotenoeid and proline increased by increasing Cd content up to 20 mg.kg-1 over the control. Applying silicon significant positive effect on the main stem height, number of lateral shoots, leaves and root dry weight and levels of photosynthetic pigments ($p \leq \%5$). In the plant exposed to silicon the amount of biomass was significantly increased compared to control %5 at level. The amount of biomass declined with increasing the concentration of Cd. However, it is understood that a positive effect on the treatment silicon can increase strength and improve the indices of heavy metal cadmium.

Key words: cadmium, silicon, *Portulaca oleracea*, proline