Archive of SID

محیط‌شناسی، دورهٔ ٤٠، شمارهٔ ١، بهار ١٣٩٣، صفحهٔ ٢٨-١٧

بررسی پتانسیل گیاهان مورد (Myrtus communis) و کاج (Pinus brutia) در جذب کادمیوم

اصغر مصلح‌آرانی*[١]، مهری خسروی[٢]، حمیدرضا عظیم‌زاده[٣]، حمید سودایی‌زاده[٤]، اصغر سپه‌وند[٥]

١. دانشیار اکولوژی گیاهی، گروه محیط‌زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه یزد

٢. دانشجوی کارشناسی ارشد جنگلداری، گروه جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه یزد khosravimehri@yahoo.com

٣. دانشیار خاک‌شناسی، گروه محیط‌زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه یزد hrazimzadeh@yahoo.com

٤. استادیار زراعت و اصلاح نباتات، گروه مدیریت بیابان، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه یزد hsodaie@yazd.ac.ir

٥. دکتری جنگلداری، ادارهٔ کل منابع طبیعی استان لرستان sapahvand@yahoo.com

تاریخ وصول مقاله: ١٣٩٢/٧/١٠ تاریخ پذیرش مقاله: ١٣٩٢/٩/٢٧

چکیده

پژوهش حاضر به منظور مقایسهٔ انباشت کادمیوم در ریشه و برگ ٢ گیاه مورد (Myrtus communis) و کاج (Pinus brutia)، همچنین بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف کادمیوم در میزان پرولین و قندهای محلول در قالب طرح کاملاً تصادفی در ٣ تکرار انجام گرفت. نتایج نشان دادند با افزایش غلظت کادمیوم تا ٥٠٠ میلی‌گرم بر لیتر میزان پرولین در کاج به حدود ٢ برابر افزایش یافت. افزایش کادمیوم تأثیر معنی‌داری در میزان پرولین در گیاه مورد نداشت. میزان قندهای محلول در گیاه مورد در اثر افزایش کادمیوم تا ١٠٠٠ میلی‌گرم بر لیتر به حدود ٢ برابر افزایش یافت. بالاترین میزان تجمع یون کادمیوم در ریشهٔ کاج در غلظت ١٠٠٠ میلی‌گرم بر لیتر حدود ٤٨٠ پی‌پی‌ام به دست آمد که فقط ٢٩ پی‌پی‌ام (٦ درصد) آن به برگ‌ها منتقل شد. بالاترین میزان تجمع یون کادمیوم در ریشهٔ مورد در غلظت ١٠٠٠ میلی‌گرم بر لیتر حدود ٥٩٣/٩ پی‌پی‌ام به دست آمد که ١٧٧/٩٧ پی‌پی‌ام (٣٠ درصد) آن به برگ‌ها منتقل شد. به منظور تعیین حداکثر جذب کادمیوم از طریق خاک در تیمارهای مختلف، طی آزمایش مجزا روی نمونهٔ خاک به‌کاررفته در گلدان‌های کشت مورد و سرو، ضرایب معادلهٔ هم‌حرارت جذب لانگمویر به دست آمد. نتایج این آزمون نشان دادند حداکثر مقدار جذب کادمیوم ١٠٠٠ میلی‌گرم در ١ کیلوگرم خاک است. بر اساس نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد می‌توان گیاه مورد را با توجه به انتقال و انباشت مقدار زیاد کادمیوم در برگ‌ها، به‌منزلهٔ گیاه بیش‌انباشت‌کننده معرفی و در خاک‌های آلوده به کادمیوم به‌منزلهٔ گونهٔ گیاه استخراجی استفاده کرد.

کلیدواژه

پرولین، کاج بروسیا، کادمیوم، گیاه پالایی، مورد.

١. سرآغاز

کادمیوم نوعی فلز آلایندهٔ محیط است که در طبیعت منتشر می‌شود. منابع مختلف شامل صنایع، فاضلاب شهری و مواد سوختی غلظت این آلاینده را افزایش می‌دهند. همچنین، استفاده از کودهای شیمیایی، مخصوصاً فسفاته مقدار این عنصر را در خاک افزایش می‌دهد (Baryla, et al., 2001 ; Mejare and Bulow, 2001). کادمیوم برای رشد گیاه ضروری نیست، اما به راحتی از طریق پوست ریشه جذب و از راه سیمپلاستی یا آپوپلاستی وارد بافت چوب می‌شود (Sanita and Gabbrielli, 1999). کادمیوم بر تقسیم و رشد سلول‌ها، رشد کلی گیاه، تقسیم سلولی منطقهٔ مریستمی و تنظیم رشد و نمو گیاهان اثر می‌گذارد (Das, et al., 1997). کادمیوم همچنین سبب کلروز و نکروز برگ‌ها (Zhang, et al., 2002)، کاهش مقدار کلروفیل کل، a و b،

* نویسنده مسئول: تلفن تماس: ٠٣٥١-٨٢٠٣٨٧٤ Email: amosleh@yazd.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

کاروتنوئیدها در گیاهان آلی (Sanita and Gabbrielli, 1999 و Sheoran, et al., 1990) و اختلال در متابولیسم کربوهیدرات‌ها نیز می‌شود (Gouia, et al., 2001). مهم‌ترین علت اثر تخریبی کادمیوم این است که این عنصر سبب تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن مانند رادیکال‌های آزاد سوپراکساید (O_2^-)، هیدروکسیل (OH^-) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) می‌شود. این رادیکال‌ها در موجودات با متابولیسم‌های هوازی از طریق اندامک‌های انتقال‌دهندهٔ الکترون مانند میتوکندری‌ها، کلروپلاست‌ها و غشای پلاسمایی تولید می‌شوند. این رادیکال‌ها به سرعت با DNA، چربی‌ها و پروتئین‌ها واکنش می‌کنند و موجب تخریب سلول‌ها می‌شوند. گیاهان برای مقابله با این رادیکال‌های آزاد از آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی (مانند سوپراکساید دسموتاز، کاتالاز، پراکسیدازها و غیره) و غیرآنزیمی (مانند گلوتاتیون، اسکوربات، کاروتنوئیدهای توکو فرار و پرولین) استفاده می‌کنند (Shanti and Dietz, 2006). در بین آنتی‌اکسیدان های غیرآنزیمی پرولین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پرولین آنتی‌اکسیدانی است که پاک‌کنندهٔ رادیکال‌های آزاد است و با اتصال به کادمیوم و تشکیل کمپلکس کادمیوم- پرولین مانع سمیت این عنصر می‌شود (Alia, et al., 2001; Farago and Mullen, 1979). عناصر سنگین در بسیاری از گیاهان سبب افزایش قندهای محلول نیز می شوند. افزایش مقدار قندهای احیاکننده تحت شرایط تنش شوری، غرقابی و سرما نیز گزارش شده است (Verma and Duby, 2001). در گیاه Duckweed که یکی از گیاهان آبزی و جمع‌کنندهٔ عناصر به شمار می‌رود، اثر تیمارهای مختلف کادمیوم بررسی شد و مشخص شد در غلظت‌های زیر ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر میزان قندهای محلول، پرولین و پروتئین‌ها افزایش یافتند (John, et al., 2009). در آرابیدوپسیس افزایش غلظت پرولین و گلوتاتیون در اثر افزایش کادمیوم گزارش شده است (Xu, et al., 2010). در تحقیق حاضر اثر کادمیوم در میزان پرولین و قندهای محلول در دو گیاه مورد و کاج بروسیا ارزیابی می‌شود.

از طرف دیگر گونه‌های مختلف گیاهی می‌توانند به‌منزلهٔ فیلترهای زیستی نقش مهمی را در حذف آلودگی‌های محیطی به عهده داشته باشند. برخی از عناصر سنگین مانند سرب و کادمیوم می‌توانند جذب گیاه و در برگ یا شاخه‌ها انباشته شوند. اطلاع از این امر کمک شایانی به مدیریت طرح‌های زیست‌پالایی در مناطق آلوده می‌کند (آفتاب‌طلب، ۱۳۸٦ ؛ خداکرمی، ۱۳۸٦). این روش رفع آلودگی، سبب حفظ فعالیت بیولوژیک و ساختار فیزیکی خاک می‌شود و بسیار ارزان است (Pulford and Watson, 2003). همچنین، به علت هماهنگ‌بودن با محیط زیست و داشتن کمترین آسیب، بیشترین توجهات را به خود معطوف کرده است (آفتاب‌طلب، ۱۳۸٦). گیاه‌پالایی (Phytoremediation) به فلزات سنگین شامل ۲ فرایند اصلی است که عبارت‌اند از: گیاه تثبیتی (Phytostabilization) که به تثبیت فلزات در خاک یا ریشه گفته می‌شود و گیاه استخراجی (Phytoextraction) که به معنای جذب آلاینده‌ها از طریق گیاه از محیط خاک و انتقال آن از ریشه به اندام‌های هوایی است (Pivetz, 2001). گیاهان مورد استفاده در گیاه‌پالایی باید بتوانند مقدار زیادی از فلز سنگین را انباشت کنند، همچنین به حضور فلز سنگین در خاک بردبار باشند و توانایی تولید زیتودهٔ بالا در خاک آلوده را داشته باشند (McGrath, et al., 2002). در سال‌های اخیر، بررسی‌های گیاه‌پالایی بر گیاهان بیش‌انباشت‌کننده که توانایی انباشت مقدار زیادی از فلزات را دارند، متمرکز شده است (Doumett, et al., 2008). تحرک و قابلیت جذب عناصر سنگین با مکانیسم‌های جذب و دفع که به ویژگی‌های خاک بستگی دارد، کنترل می‌شود. ارتباط تعادلی بین مقدار مادهٔ جذب‌شده در هر واحد جرم جاذب (x) و غلظت تعادل مادهٔ جذب‌شده در محلول (C) در دمای مشخص «ایزوترم جذب» نامیده می‌شود (Langmuier, 1996). در این زمینه معادلات مختلفی وجود دارند که می‌توان به فرندلیچ و لانگمیر اشاره کرد. هر کدام به نوعی سعی در بیان رابطهٔ

www.SID.ir

Archive of SID

ریاضی تعادلی مقدار عنصر فلزی در سطح جاذب و محلول آن دارند (Li, Y. et al., 2008; Li, Q. et al., 2012).

این تحقیق میزان کادمیوم انباشته‌شده به وسیلهٔ ریشه‌ها و برگ‌ها در گونهٔ کاج بروسیا و مورد را برای تعیین گونهٔ مناسب‌تر به منظور گیاه‌پالایی مقایسه می‌کند. شناسایی گیاهان بیش‌انباشت‌کننده و مکانیسم تحمل آن ها به عناصر سنگین می‌تواند کمک شایانی برای مدیریت طرح‌های زیست‌پالایی در مناطق آلوده باشد. اطلاع از انباشت عناصر سنگین در ریشه یا اندام‌های هوایی این گیاهان نیز فرایند گیاه تثبیتی یا استخراجی را مشخص و مدیران محیط‌زیستی را در ایجاد محیط پاک کمک می‌کند.

۲. مواد و روش بررسی

۱.۲. گیاهان مورد مطالعه

کاج بروسیا با نام علمی Pinus brutia از خانوادهٔ Pinaceae است. کاج بروسیا از معروف‌ترین گونه‌ها از گروه کاج‌های مدیترانه‌ای است که در جنوب و شرق اروپا پراکنده است. این گونه در خاک‌های آهکی و فقیر که عمق کمی دارند رشد می‌کند (جزیره‌ای، ۱۳۸٤). کاج بروسیا گونه‌ای کم‌توقع است که در مناطقی با زمستان‌های ملایم و تابستان‌های گرم و خشک، رشد می‌کند و از گونه‌های تندرشد محسوب می‌شود و رشد آن به ویژه در جوانی سریع است. این گیاه در پارک‌ها و ایجاد مجسمه‌های سبز و فضای سبز شهری و زیبایی منظر در زمستان استفاده می‌شود.

مورد با نام علمی Myrtus communis از خانوادهٔ Myrtaceae است. مورد درختچه‌ای است همیشه‌سبز و معطر، با پوست سبز و شاخه‌های فراوان که اغلب گرماپسند است و در مناطق گرمسیری ایران و به ندرت در نواحی معتدل و معتدل گرم می‌روید. از این گیاه با توجه به بافت نرم و انبوه آن در فضای سبز برای پرچین‌سازی و زیباسازی حاشیه‌ها و وسط چمن‌ها استفاده می‌شود. ازدیاد آن از طریق تهیهٔ قلمهٔ نیمه‌سبز و کاشت بذر در پاییز صورت می‌گیرد (جزیره‌ای، ۱۳۸٤).

۳. روش تحقیق

نهال‌های ۲ سالهٔ کاج بروسیا و مورد که در مخلوط رس، ماسه و کود به نسبت مساوی کشت شده بودند، از نهالستان شهرستان خرم‌آباد تهیه شدند. نهال‌های هم‌اندازه انتخاب و در یک طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار قرار داده شدند. برای تهیهٔ تیمار کادمیوم از نیترات کادمیوم استفاده و دامنه‌ای از غلظت‌های کم تا خیلی زیاد ساخته شد. علت انتخاب این غلظت‌ها این بود که مقداری از کادمیوم جذب ذرات خاک می‌شود که کاهش کادمیوم در دسترس را به دنبال خواهد داشت. بنابراین، غلظت‌های ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از مواد بالا ساخته شد. برای تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد. گلدان‌های مورد نظر طی ۷۰ روز از اوایل تابستان از طریق محلول‌های تهیه‌شده به اندازه‌های مساوی آبیاری شدند.

اندازه‌گیری مقدار پرولین: ۰/۵ گرم از برگ گیاهان توزین و در ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۳ درصد اسید سولفوسالیسیلیک ساییده، سپس نمونه‌ها صاف شد. آنگاه ۲ میلی‌لیتر معرف نین هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک خالص به نمونه‌ها افزوده شد و لوله‌ها در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت قرار داده شدند، سپس لوله‌ها نیم ساعت در حمام یخ قرار گرفتند. آنگاه به هر لولهٔ آزمایش ٤ میلی‌لیتر تولوئن افزوده شد و لوله‌ها، خوب تکان داده شدند. سپس، میزان جذب لایهٔ رنگی بالایی (حاوی تولوئن و پرولین) با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد (Bates, et al., 1973).

اندازه‌گیری مقدار قندهای محلول: برای سنجش قندهای محلول، ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد به ۰/۱ گرم از مادهٔ خشک گیاهی (برگ) اضافه و ۱ هفته در یخچال نگهداری شد. پس از گذشت ۱ هفته، ۱ میلی‌لیتر از محلول

www.SID.ir

Archive of SID

رویی نمونه برداشته، سپس روی آن ۱ میلی‌لیتر فنل ۵ درصد اضافه و خوب هم زده و پس از آن ۵ میلی‌لیتر سولفوریک اسید غلیظ اضافه شد. محلول زردرنگی به دست آمد که به مرور زمان تغییر رنگ داد و به قهوه‌ای روشن تمایل یافت. پس از ۳۰ دقیقه جذب آن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ٤٨٥ نانومتر قرائت و با استفاده از منحنی استاندارد گلوکز، میزان تغییرات قندها بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک ارزیابی شد (Kochert, 1978).

اندازه‌گیری میزان کادمیوم: با در نظر گرفتن تیمارهای مورد مطالعه، ٤٨ نمونهٔ گیاهی (ریشه و برگ) تهیه شد که پس از کدگذاری به آزمایشگاه انتقال داده شدند، سپس نمونه‌ها به منظور زدودن آلاینده‌های سطحی با آب شسته و کاملاً خشک شدند. نمونه‌های خشک‌شده با آسیاب برقی به صورت پودر درآورده شدند. سپس، از نمونه‌های گیاهی ۲ گرم برگ و ۱ گرم ریشه به طور جداگانه در بالن ژوژه‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و با افزودن اسید نیتریک و اسید کلریدریک غلیظ با نسبت ۱:۳ به مدت ١٦ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند تا نمونه‌های گیاهی به خوبی در اسید حل شوند. پس از آن محلول حاصل ا گرم شد تا بخارهای اسیدی از محلول خارج شوند. سپس محلول مذکور از کاغذ صافی واتمن ٤٢ عبور داده شد و حجم محلول با آب مقطر Deionized به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد تا برای تجزیه با دستگاه جذب اتمی آماده شود. در پایان کادمیوم با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل novAA300 سنجش شد. داده‌های حاصل با نرم‌افزار Spss (Version١٤) و با استفاده از آنالیز واریانس تجزیه و تحلیل شدند. برای مقایسهٔ میانگین‌ها از آزمون Tukey استفاده شد. رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

به منظور تعیین مقدار جذب کادمیوم از طریق خاک گلدان‌ها از معادلات هم‌حرارت جذب- مدل لانگمویر استفاده شد (Langmuir, 1996). این مدل، اولین بار به منظور تشریح جذب گازها به سطوح جامد معرفی شد. فرمول کلی مدل لانگمویر در معادلهٔ ۱ نشان داده شده است که در آن، x_m حداکثر جذب کادمیوم در واحد وزن خاک، K بیان‌کنندهٔ انرژی پیوندی سطح جاذب، C غلظت تعادلی کادمیوم در محلول خاک و x مقدار کادمیوم جذب‌شده در واحد وزن خاک است. به منظور کاربردی‌کردن این معادله و تبدیل آن به فرم خطی معادلهٔ ۱ به صورت معادلهٔ ۲ قابل دسترسی است (Goldberg, 1995).

$$x = \frac{x_m KC}{1 + KC} \qquad (1)$$

$$\frac{C}{x} = \frac{1}{x_m K} + \frac{C}{x_m} \qquad (2)$$

برای تعیین ضرایب معادلهٔ هم‌حرارت جذب لانگمویر، ابتدا از خاک مورد استفاده در گلدان‌های کاج و مورد نمونهٔ همگنی تهیه شد. نمونهٔ خاک در آون ٢٤ ساعت در حرارت ۱۰۵ درجه قرار داده شد تا کاملاً خشک شود. سپس، ٤ ارلن مایر کاملاً سترون از آلودگی انتخاب و از نمونهٔ خاک خشک در هر کدام ۳ گرم به دقت توزین و ریخته شد. محلول‌های استاندارد کادمیوم با غلظت‌های اولیهٔ ۵، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم تهیه شدند و از هر محلول به یک ارلن مایر، ۵۰ میلی‌لیتر اضافه شد. بدین ترتیب امکان به تعادل رسیدن محلول با غلظت مشخص با خاک فراهم شد. پس از ٢٤ ساعت، سوسپانسیون از کاغذ صافی واتمن ٤٢ عبور داده شد و غلظت محلول حاصل به‌منزلهٔ غلظت تعادلی با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. مقدار جذب از طریق واحد وزن خاک از معادله ۳ به دست آمد.

$$x = \frac{(C_i - C_e)\,V}{w} \qquad (3)$$

که در آن، C_i غلظت اولیهٔ کادمیوم در محلول (میلی‌گرم بر لیتر)، C_e غلظت تعادلی کادمیوم در محلول (میلی‌گرم بر لیتر)، V حجم محلول تعادلی بر حسب لیتر، w وزن خاک بر حسب کیلوگرم و x مقدار کادمیوم جذب سطحی‌شده (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) است.

www.SID.ir

Archive of SID

٤. نتایج

با افزایش غلظت کادمیوم میزان پرولین در کاج افزایش یافت (جدول ۱). کادمیوم به ویژه در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب افزایش معنی‌دار میزان پرولین در کاج شد. میزان پرولین در نمونهٔ شاهد کاج برابر با حدود ۱۳ میلی‌گرم بر گرم مادهٔ تر بود که بر اثر تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم به حدود ۲۵ میلی‌گرم بر گرم رسید. در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر پرولین کاج نسبت به غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم کاهش جزئی نشان داد. با افزایش غلظت کادمیوم میزان قندهای محلول در گیاه مورد افزایش یافت. این افزایش به ویژه در ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم معنی‌دار بود. میزان قندهای محلول در نمونهٔ شاهد گیاه مورد برابر با حدود ۷۶ میلی‌گرم بر گرم مادهٔ خشک بود که در اثر تیمار ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم به حدود ۱۴۰ میلی‌گرم بر گرم رسید. کادمیوم سبب افزایش تدریجی میزان قندهای محلول در گیاه کاج نیز شد، اما این افزایش معنی‌دار نبود (جدول ۱).

جدول ۱. مقادیر میانگین اثر سطوح مختلف کادمیوم در میزان پرولین، قندهای محلول، انباشت در برگ و ریشه در ۲ گیاه کاج و مورد است. حروف یکسان بیانگر نبود اختلاف با استفاده از آزمون دانکن است.

تیمار (ppm)	پرولین (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)		قندهای محلول (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک)	
	کاج	مورد	کاج	مورد
شاهد	۱۳/ ۳±۱/۱ ab	۴/ ۹±۱ a	۱۱۰±۹ a	۷۶± ۶ a
۲۰۰	۸/ ۷±۱/۵ ab	۵/ ۷±۱/۲ a	۱۲۲±۸ a	۷۷/ ۵± ۷ a
۵۰۰	۲۴/ ۸±۱/۸ b	۳/۷±۰/۹ a	۱۲۲±۸ a	۸۷/۹± ۵/۵ a
۱۰۰۰	۱۶/۸±۱/۶ b	۵/۱±۱ a	۱۳۲± ۱۰ a	۱۴۰± ۱۰ a
تیمار (ppm)	انباشت در برگ (ppm)		جذب در ریشه (ppm)	
	کاج	مورد	کاج	مورد
شاهد	۲/۱± ۱ a	۰/۴± ۰/۰۱ a	۳/ ۳± ۰/۵ a	۰/۴± ۰/۰۱ a
۲۰۰	۱۲/۵± ۲/۵ a	۱۵/ ۸± ۲/۵ a	۹۵/۸± ۴/۵ a	۱۹/۸± ۲/۵ a
۵۰۰	۱۰/ ۴± ۲/۱ b	۴۱± ۴/۵ a	۳۱۶± ۱۶/۵ a	۴۲۸± ۱۸/۵ a
۱۰۰۰	۲۹/۷± ۳/۱ b	۱۷۸± ۱۱/۵ a	۴۸۰± ۱۶/۵ a	۵۹۴± ۱۹/۵ a

*حروف متفاوت نشان‌دهندهٔ اختلاف معنی‌دار بین تیمارهاست (میانگین‌هایی که حداقل ۱ حرف مشترک دارند، فاقد تفاوت معنی‌دار آماری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصدند).

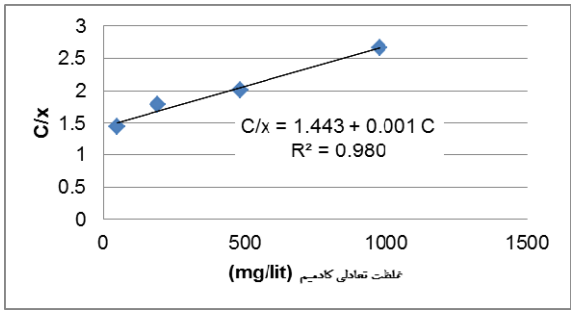
www.SID.ir

Archive of SID

نتایج همچنین نشان دادند که میزان پرولین در کاج در تمام غلظت‌ها بیشتر از میزان پرولین در گیاه مورد بود، اما تنها در ۲ غلظت ppm ۵۰۰ و ۱۰۰۰ تفاوت‌ها معنی‌دار بود. در مقابل تفاوت معنی‌داری در میزان قندهای محلول در ۲ گیاه مشاهده نشد. جذب و انباشت کادمیوم در ریشه و برگ مورد به ویژه در غلظت‌های بالا بیشتر از گیاه کاج بود (جدول ۱).

نتایج حاصل از این تحقیق نشان دادند که انباشتگی یون کادمیوم در ریشه و برگ‌های کاج با افزایش غلظت کادمیوم افزایش معنی‌داری یافت. میزان انباشتگی یون کادمیوم در ریشهٔ کاج به مراتب بیشتر از برگ‌ها بود. بالاترین میزان تجمع یون کادمیوم در ریشهٔ کاج در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر حدود ppm ۴۸۰ بود که فقط ppm ۲۹ (٦ درصد) آن به برگ‌ها منتقل شد. نتایج مشابه در گیاه مورد به دست آمد. نتایج انباشتگی یون کادمیوم در ریشه و برگ‌های گیاه مورد نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم تجمع این عنصر افزایش یافت. بالاترین میزان تجمع یون کادمیوم در ریشهٔ مورد در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر حدود ppm ۵۹۳/۹ بود که ppm ۱۷۷/۹۷ (۳۰ درصد) آن به برگ‌ها منتقل شد (جدول ۱).

بررسی نتایج آزمون هم‌حرارت‌های جذب لانگمویر نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم در محیط خاک تحت آزمایش تا حد ماکزیمم افزایش در جذب وجود دارد. شکل ۱ فرم خطی معادلهٔ لانگمویر و ضرایب آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تعیین ضرایب معادلهٔ خطی لانگمویر

همان‌گونه که از ضرایب معادلهٔ ٤ مشخص است حداکثر جذب کادمیوم روی سطوح خاک معادل ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است. با توجه به وزن اتمی کادمیوم ۱۲۱/٤۱ گرم بر مول، ۸/۲٤ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک است. با استفاده از معادله‌های تعادلی ٤ و ٥ می‌توان در غلظت‌های مختلف تعادلی مقدار جذب کادمیوم به سطوح ذرات خاک تحت آزمایش را برآورد کرد.

$$\frac{C}{x}=\frac{۱}{۰/۶۹۳}+\frac{C}{۱۰۰۰} \qquad (٤)$$

$$x=\frac{۱۰۰۰(۶/۹۳E-۴)C}{۱+(۶/۹۳E-۴)C} \qquad (٥)$$

۵. بحث

نتایج این تحقیق نشان دادند که با افزایش غلظت کادمیوم میزان پرولین در کاج در غلظت ۵۰۰ دو برابر افزایش یافت. پرولین از مهم‌ترین اسیدهای آمینه در گیاهان است که در برابر انواع تنش‌ها از جمله شوری، خشکی، سرما، گرما و عناصر سنگین از گیاهان محافظت می‌کند. به طور کلی می‌توان ۳ نقش عمده را برای پرولین در مواجهه با عناصر سنگین قائل شد. پرولین می‌تواند با ترکیب‌شدن با کادمیوم و تشکیل کمپلکس پرولین- کادمیوم، کادمیوم سمی را به ترکیب غیرسمی تبدیل کند. Sun و همکاران (۲۰۰۷) تجمع پرولین در گیاه Solanum nigrum را به علت نقش این ماده در کیلات‌کردن کادمیوم و تشکیل ترکیب غیرسمی پرولین- کادمیوم می‌دانند. Sharma و همکاران (۱۹۹۸) نیز تجمع پرولین در محیط کشت حاوی کادمیوم را به علت نقش این ماده در کیلات‌کردن کادمیوم و تشکیل کمپلکس غیرسمی از پرولین- کادمیوم می‌دانند. پرولین همچنین می‌تواند به‌منزلهٔ مادهٔ تنظیم‌کنندهٔ اسمزی در گیاهان عمل کند. کادمیوم موجب تغییر در رژیم آبی گیاهان می‌شود. تغییر پتانسیل آب موجب تغییر در عملکرد آنزیم پیرولین -٥- کربوکسیل (که آنزیم مهم در سنتز پرولین است) و در نتیجه سبب تجمع پرولین می‌شود

www.SID.ir

Archive of SID

(Delauney and Verma, 1993 و Ali, et al., 2001). Pandy (۲۰۰۲) و Sharma نشان دادند که نیکل، کبالت و کادمیوم سبب تجمع پرولین می‌شوند و پیشنهاد کردند که افزایش پرولین با تغییرات رژیم آبی گیاه مورد مطالعه مرتبط است. Schat و همکاران (۱۹۹۷) نیز تجمع پرولین در گیاه Silene vulgaris را به کمبود آب که در نتیجهٔ اثر عناصر سنگین حاصل می‌شود نسبت داده‌اند. پرولین می‌تواند در حکم آنتی‌اکسیدان عمل کند و با ممانعت از پراکسیداسیون لیپید خطر رادیکال‌های آزاد را کاهش دهد و سبب حفظ تمامیت غشاها شود (Mehta and Gaur, 1999 و Alia and Saradhi, 1991). مشابه این نتایج روی گیاه Groenlandia densa نشان داد که میزان پرولین با افزایش غلظت کادمیوم به طور تدریجی افزایش یافت (Parlak and Yilmaz, 2011). بیشترین میزان پرولین در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر کادمیوم به دست آمد. Dinakar و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که تحت تأثیر کادمیوم میزان پرولین در ریشه و برگ در گیاه Arachis hypogaea افزایش یافت. این محققان همچنین نشان دادند که زمان تأثیر کادمیوم روی گیاه نیز سبب افزایش میزان پرولین شد به طوری که بالاترین میزان پرولین در غلظت ۱۰۰ میکرومول بر لیتر کادمیوم در ۲۵ روز کاشت به میزان ۷۰۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به دست آمد. نتایج مشابه در مطالعهٔ Balestrasse و همکاران (۲۰۰۵) به دست آمد. این محققان نشان دادند که میزان پرولین در گیاه سویا (Soya been) با افزایش غلظت کادمیوم در محیط کشت افزایش یافت. تجمع پرولین تحت تأثیر کادمیوم در چند گیاه دیگر نیز نشان داده شده است (Alia and Saradhi, 1991). تجمع پرولین در لوبیا (Phaseolus vulgaris) (Zengin and Munzuroglu, 2005) نیز تحت تأثیر کادمیوم گزارش شده است. کادمیوم همچنین سبب افزایش میزان پرولین در گیاه Atriplex halimus شد (Nedjimi and Daoud, 2009). میزان پرولین در ریشه و ساقهٔ این گیاه با افزایش میزان کادمیوم در مادهٔ غذایی به طور معنی‌داری افزایش نشان داد. شریعت و همکاران (۱۳۸۷) در بررسی اثر کادمیوم بر برخی پارامترهای فیزیولوژی در گیاه Eucalyptus occidentalis نشان دادند که میزان پرولین در این گیاهان افزایش یافت. نتایج این آزمایش همچنین نشان داد که تجمع پرولین به نوع گیاه بستگی دارد و در گیاه مورد، افزایش کادمیوم تأثیر معنی‌داری در میزان پرولین نداشت. این موضوع نشان داد که مورد از مکانیسم‌های متفاوتی در برابر کادمیوم استفاده می‌کند. در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر پرولین کاج نسبت به غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم کاهش جزئی نشان داد. این موضوع می‌تواند به تأثیر سمیت کادمیوم در غلظت‌های بالا بر متابولیسم پروتئین‌ها مربوط باشد. مشابه این موضوع در مطالعهٔ اثر کادمیوم در تجمع میزان پرولین در ۲ گیاه هویج و کلم نشان دادند که با افزایش این عنصر در محیط کشت میزان پرولین افزایش قابل ملاحظه‌ای یافت، اما افزایش غلظت کادمیوم بیشتر از ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، کاهش نشان می‌دهد (Chen, et al., 2003).

با افزایش غلظت کادمیوم میزان قندهای محلول در گیاه مورد افزایش یافت. کادمیوم با کاهش انتقال آب به برگ‌ها و در نتیجه اختلال در سرعت تعرق برگ به بروز تغییرات فراساختاری اندامک‌های سلول و تغییر در رفتار آنزیم‌های کلیدی چند مسیر متابولیسمی از جمله مسیر متابولیسم قند منجر می‌شود. با کاهش انتقال آب به برگ‌ها به علت تجمع کادمیوم در سلول‌ها محتوای قندهای محلول در گیاه افزایش می‌یابد. این پدیده احتمالاً مکانیسم سازشی گیاه برای حفظ پتانسیل اسمزی در شرایط سمیت با کادمیوم است. علاوه بر نقش قندهای محلول در تنظیم فشار اسمزی تصور می‌شود با افزایش قندهای حل‌شونده، گیاه بتواند ذخیرهٔ کربوهیدراتی خود را برای حفظ متابولیسم پایهٔ سلول در شرایط محیطی تحت تنش در حد مطلوب نگه دارد (Verma and Duby, 2001). مشابه این نتایج در بررسی اثر کادمیوم در قندهای محلول و آنزیم‌های

www.SID.ir

Archive of SID

متابولیسمی گیاه برنج نشان داده شد که کادمیوم سبب افزایش قندهای محلول شد (Verma and Duby, 2001). افزایش میزان قندهای محلول می‌تواند به علت اثر عناصر سنگین در کاهش استفاده از قندهای محلول برای رشد گیاه باشد (Moya, et al., 1993). همچنین، این محققان افزودند که عناصر سنگین می‌توانند سبب کاهش تثبیت Co_2 و کاهش قندها شوند، اما اثر عامل اول خیلی بیشتر از تأثیر منفی آن است، لذا قندهای محلول در گیاه افزایش می‌یابند. غلظت‌های بالای عناصر سنگین سبب بی‌نظمی در متابولیسم مواد غذایی به ویژه بی‌تعادلی بین پروتئین‌ها و قندها می‌شوند (Costa and Spitz, 1997). افزایش نشاسته و قند در برگ‌های گیاهان Betula، Picea و Pinus در اثر عناصر سنگین نشان‌دهندهٔ اثر این عناصر در ممانعت از هیدرولیز این مواد است (Bishnoi, et al., 1993). مشابه نتایج به‌دست‌آمده در خصوص گیاه مورد، سلطانی و همکاران (۱۳۸۵) در بررسی اثر کادمیوم در مقدار رنگیزه های فتوسنتزی، قند ها و مالون دآلدئید در گیاه کلزا نشان دادند که با افزایش کادمیوم میزان قندهای محلول افزایش یافت. همچنین، نتایج مشابهی از سوی کریمی و نوجوان (۱۳۸۵) در بررسی اثر کادمیوم کلرید روی دانه‌رست‌های عدس به دست آمد.

انباشتگی یون کادمیوم در ریشهٔ کاج و مورد با افزایش غلظت کادمیوم افزایش معنی‌داری یافت به طوری که در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر میزان انباشت آن در ریشهٔ مورد برابر با ۵۹۳/۹ ppm و در گیاه کاج برابر با حدود ٤٨٠ ppm اندازه‌گیری شد. این میزان انباشت کادمیوم در ریشهٔ گیاهان تحت مطالعه شایان توجه است. در گیاهان، اصولاً انتقال یون‌ها از طریق غشای سلولی از طریق پروتئین‌هایی به نام ترانسپورترها میانجی‌گری می شود. این ترانسپورترها (حمل‌کننده‌های یونی) انتقال‌دهندهٔ یون خاص‌اند و به صورت اختصاصی عمل می‌کنند. از کل یون‌هایی که در اطراف ریشه قرار می‌گیرند فقط قسمت اندکی جذب گیاه می‌شوند. قسمت اعظم این یون‌ها به طور فیزیکی جذب دیوارهٔ سلولی می‌شوند. در دیوارهٔ سلولی بخشی که به طور منفی باردار است و به نام سایت Coo^- نامیده می‌شود مسئول جذب سطحی در دیوارهٔ سلولی است. یون‌هایی که به این قسمت می‌چسبند نمی‌توانند وارد سلول و به قسمت‌های هوایی گیاه منتقل شوند. یکی دیگر از دلایل افزایش میزان کادمیوم در ریشهٔ گیاهان مورد مطالعه تجمع آن ها در واکوئل‌هاست. تجمع این عناصر در واکوئل‌های سلولی مانع انتقال آن‌ها به قسمت‌های هوایی می‌شود و به همین علت مقدار این عنصر در ریشه به مراتب بیشتر از اندام‌های هوایی است. در هر صورت، جذب عناصر سنگین در واکوئل‌ها و به ویژه در دیوارهٔ سلولی برای گیاه از سمیت بسیار کمتری برخوردار است. حالتی که احتمالاً برای گیاهان مورد مطالعهٔ حاضر اتفاق افتاده است. در بررسی تحمل گیاه Thlaspi caerulescens نشان داده شد که واکوئل‌ها و دیوارهٔ سلولی از مهم‌ترین مکان‌های تجمع یون کادمیوم به شمار می‌روند. بنابراین، در صورتی که شرایط رویش برای این گیاهان فراهم باشد می‌توان از آن ها در خاک‌های آلوده به این عنصر برای امر گیاه تثبیتی استفاده کرد (Wojcik, et al., 2005). مشابه مطالعهٔ حاضر در بررسی اثر کادمیوم در گیاه Atriplex halimus نشان داده شد که با افزایش این عنصر تجمع آن در ریشه و ساقهٔ گیاه افزایش می‌یابد (Nedjimi and Daoud, 2009). در بررسی اثر کادمیوم روی گیاه Lepidium Sativum نشان داده شد که با افزایش غلظت کادمیوم انباشتگی این عنصر در ریشه و برگ‌ها افزایش یافت به طوری که میزان آن در ریشه در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به ۷۰۰ ppm رسید (Gill, et al., 2012). در بررسی اثر کادمیوم در گونهٔ Solanum nigrum نشان داده شد که افزایش غلظت کادمیوم سبب افزایش تجمع این عنصر در ریشه و ساقهٔ آن شد (Sun, et al., 2007). در مطالعات Fan و همکاران (۲۰۱۱) در

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی اثر کادمیوم روی گونهٔ Swietenir macrophyl، مطالعات Nikolic و همکاران (۲۰۰۸) در بررسی اثر کادمیوم در گونه‌های هیبرید تبریزی، مطالعهٔ علی‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) در بررسی تأثیر بهبود شرایط خاک در پاسخ‌های انباشت فلز کادمیوم در نهال‌های یک‌سالهٔ صنوبر (Populus alba)، مطالعات Kadukova و همکاران (۲۰۰٦) روی Nerium oleander، Kovacevic و همکاران (۱۹۹۹) روی دو گونهٔ Triticum aestivum و T.durum، Linger و همکاران (۲۰۰۵) روی Cannabis sativa، Ekmekcl و همکاران (۲۰۰۸) روی ذرت، Pandy (2002) و Sharma روی Cabbage نتایج مشابهی به دست آمد.

در تحقیق حاضر بیشترین نسبت انتقال کادمیوم از ریشه به برگ در گیاه مورد به میزان ۳۰ درصد مشاهده شد. بیشترین میزان انتقال کادمیوم نیز در گیاه مورد به میزان ۱۷۷/۹۷ ppm مشاهده شد. طبق تعریف یک بیش‌انباشت‌کننده باید حداقل قادر به انباشت ۱۰۰ ppm یا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۰/۰۱ درصد وزن خشک) کادمیوم و برخی فلزات ردیابی‌شدهٔ دیگر، ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۰/۱ وزن خشک) کبالت، مس، کروم، نیکل و سرب و ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۱ درصد وزن خشک) منگنز و نیکل باشد (Wantanable, 1997). همچنین، بر اساس نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد گیاه مورد با توجه به انتقال و انباشت حدود ۱۷۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم می‌تواند به‌منزلهٔ گیاه بیش‌انباشت‌کننده معرفی و در خاک‌های آلوده به‌منزلهٔ گونهٔ گیاه استخراجی استفاده شود.

منابع

آفتاب‌طلب، ن. ۱۳۸٦. «بررسی توان پالایش دو عنصر سمی کادمیوم و سرب به‌وسیلهٔ نهال‌های دو سالهٔ دو گونهٔ چنار و سرو سیمین»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱۳۰ ص. ۱۳۸٦.

جزیره‌ای، م. ۱۳۸٤. *جنگل‌کاری در خشک بوم*، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

خداکرمی، ی. ۱۳۸٦. «ارزیابی توان زیست‌پالایی خاک در دو گونه بلوط ایرانی و بنه، (Quercus brantii & Pistacia atlantica)، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱٤٦ ص.

سلطانی، ف؛ قربانلی، م؛ منوچهری‌کلانتری، خ. ۱۳۸۵. «اثر کادمیوم در مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی، قندها و مالون دآلدئید در گیاه کلزا (Brassica napus L.)». مجلهٔ *زیست‌شناسی ایران*، ۲: ۱۳٦– ۱٤۵.

شریعت، آ؛ عصاره، م.ح؛ قمری‌زارع، ع. ۱۳۸۹. «اثر کادمیوم در برخی پارامترهای فیزیولوژی در Eucalyptus occidentalis»، مجلهٔ *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، علوم آب و خاک، ۵۳: ۱۴۵– ۱۵۳.

علی‌زاده، س.م؛ زاهدی‌امیری، ق، ثواقبی‌فیروزآبادی، غ؛ اعتماد، و. ۱۳۹۰. «تأثیر بهبود شرایط خاک در پاسخ‌های انباشت فلز کادمیوم در نهال‌های یک سالهٔ صنوبر (Populus alba L.)». مجلهٔ *جنگل ایران*، انجمن جنگلبانی ایران، ۳: ۳۵۵– ۳٦٦.

Alia, S.P.P. 1991. Proline accumulation under heavy metal stress. Journal of Plant Physiology 138: 504-508.

Alia, G., Srivastava, P.S. and Iobal, M. 2001. Responses of bacopa moniera cultures to cadmium toxicity. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 66: 342-349.

Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant soil 39: 205-207.

Balestrasse, K.B., Gallego, S.M., Benavides, M.P. and Tomaro, M.L. 2005. Polyamines and proline are affected by cadmium stress in nodules and roots of soybean plants. Plant Soil 270: 343-353.

www.SID.ir

Archive of SID

Baryla, A., Carrier, P., Frank, F., Coulomb, C., Sahut, C. and Havaux, M. 2001. Leaf chlorosis oilseed rape plants (Brassica napus) grown on cadmium-polluted soil: Causes and consequences for photosynthetic and growth. Planta 212: 696-709.

Bishnoi, N.R., Dua, A., Gupta, V.K. and Sawhney, S.K. 1993. Effect of chromium on seed germination, seedling growth and yield of peas. Agriculture, Ecosystems and Environment 47 (1): 47-57.

Chen, Y.X., He, Y.F., Luo, Y.M., Yu, Y.L., Lin, Q. and Wong, M.H. 2003. Influence of cadmium on soluble carbohydrate, free amino acids, protein content of in vitro cultured *Lupinus albus*. Plant Science 128: 131-140.

Costa, G., Spitz, E. 1997. Influence of cadmium on soluble carbohydrate, free amino acids, protein content of in vitro cultured Lupinus albus. Plant Science. 128, 131-140.

Das, P., Samantaray, S. and Rout, G.R. 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. Environmental Pollution 98: 29–36.

Delauney, A.J. and Verma, D.P.S. 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. Plant Journal 41: 215-223.

Dinakar, N., Nagajyothi, P.C., Suresh, S., Udaykiran, Y. and Damodharam, T. 2008. Phytotoxicity of cadmium on protein, proline and antioxidant enzyme activities in growing *Arachis hypogaea* L. seedlines. Journal of Environmental Sciences 20: 199-206.

Doumett, S., Lamperi, L., Checchini, L., Azzarello, E., Mugnai, S., Mancuso, S., Petruzzelli G. and Del bubba. M. 2008. Heavy metal distribution between contaminated soil and Paulownia tomentosa, in a pilot-scale assisted phytoremediation study: influence of different complexing agents. Chemosphere 72: 1481-1490.

Ekmekcl, Y., Tanyolac, D. and Ayhan, B. 2008. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. Journal of Plant Physiology: 165: 600-611.

Fan, K.C., Hsi, H.C., Cheng, C.W., Lee, H.L. and Hseu, Z.Y. 2011. Cadmium accumulation and tolerance of mahogany (*Swietenia macrophylla*) seedlings for phytoextraction pplications. Journal of Environmental Management 92: 2818-2822.

Farago, M.E. and Mullen, W.A. 1979. Plants which accumulate metals. Part IV. A possible copper-proline complex from the roots of Armeria maritima, Inorganica Chimica Acta 32:93–94.

Gill, S.S., Khan, N.A. and Tuteja, N. 2012. Cadmium at high dose perturbs groth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (Lepidium sativum L.). Plant Science 182: 112-120.

Goldenberg, S. 1995. Adsorption Models Incorporated into Chemical Equilibrium Models. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Chemical Equilibrium and Reaction Models, SSSA Special Publication 42.75

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

John, R., Ahmad, P., Gadgil, K. and Sharma, S. 2009. Heavy metal toxicity: effect on plant growth, biochemical parameters and metal accumulation by *Brassica juncea* L. International Journal of Plant Production 3: 1735-8043.

Kadukova, J., Manousaki, E. and Kalogerakis, N. 2006. Lead and cadmium accumulation from contaminated soils by Nerium oleander. Acta Metallurgica Slovaca 12: 181-187.

www.SID.ir

Archive of SID

Kochert, G. 1978. Carbohydrate determination by the phenol sulfuric acid method. In: hand book of physiological method. (Eds. Helebust, J.A. and Craig, J.S.) : 56-97. Cambridge Univ. Press. Cambridge.

Kovacevic, G., Kastori, R. and Merkulov, L.J. 1999. Dry matter and leaf structure in young wheat plants as affected by cadmium, lead and nickel. Biologiia Plantarum 42: 119-123.

Langmuir, D. 1996. Aqueous environmental geochemistry. New Jersey Prentice Hall. 600p.

Li، Q., Chai، L. and Qin, W. 2012. Cadmium(II) adsorption on esterified spent grain: Equilibrium modeling and possible mechanisms، Chemical Engineering Journal 197:173–180.

Li، Y., Gou، X., Wang, G., Zhang، Q., Su، Q. and Xiao، G. 2008. Heavy metal contamination and source in arid agricultural soil in central Gansu Province, China، Journal of Environmental Sciences 20: 607–612.

Linger, P., Ostwald, A. and Haensler, J. 2005. *Cannabis sativa* growing on heavy metal contaminated soil: growth, cadmium uptake and photosynthesis. Biologia Plantarum 49: 567-576.

McGrath, S.P., Zhao, F.J. and Lombi, E. 2002. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides. Advance in Agronomy 75:1– 56.

Mehta, S.K., and Gaur J.P. 1999. Heavy metal-induced proline accumulation and its role in ameliorating metal toxicity in *Chlorella vulgaris*. New Phytology 143: 253-259.

Mejare, M., Bulow, L. 2001. Metal binding proteins and peptides in bioremediation and hytoremediation of heavy metals. Trends in Biotechnology 19, 67-73.

Moya J.L., Ros, R. and Picazo, I. 1993. Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants. Photosynthesis Research 36: 75–80.

Nedjimi, B. and Daoud, Y. 2009. Cadmium accumulation in *Atriplex halimus* subsp. Schweinfurthii and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake. Flora 204: 316-324.

Nikolic, N., Kojic, D., Pilipovic, A., Pajevic, S., Krstic, B., Borisev, M. and Orlovic, S. 2008. Responses of hybrid poplar to cadmium stress: Photosynthetic characteristics, cadmium and proline accumulation, and antioxidant enzyme activity. Acta Biological Cracoviensia Series Botanica 50: 95-103.

Pandey, N. and Sharma, C.P. 2002. Effect of heavy metals Co^{2+}, Ni^{2+} and Cd^{2+} on growth and matabolism of cabbage. Plant Science 163: 753-758.

Pivetz, B.E. 2001. Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous sites, Ground Water Issue, EPA/540/S-01/500. 59 pp.

Pulford, I.D. and Watson, C. 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by tree- a review, Environment International 29: 529-540.

Sanita, L. and Gabbrielli, R. 1999. Response to cadmium in higher plants. Environmental and Experimental Botany 41: 105-130.

Schat, H., Sharma, S. and Vooijs, R. 1997. Heavy metal induced accumulation of free proline in a metal tolerant and non tolerant ecotype of *Silene vulgaris*. Physiologia Plantarum 101: 477-482.

Shanti, S.S. and Dietz, K.J. 2006. The significance of amino acids and amino acid-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress. Journal of Experimental Botany 57: 711-726.

www.SID.ir

Archive of SID

Sharma, S.S., Schat, H. and Vooijs, R. 1998. In vitro alleviation of heavy metal-induced enzyme inhibition by proline. Phytochemistry 49: 1531-1535.

Sun, Q., Ye, Z.H., Wang, X.R., Wong, M.H. 2007. Cadmium hyperaccumulation leads to an increase of glutathione rather than phytochelatins in the cadmium hyperaccumulator Sedum alfredii. J. Plant Physiology, 164, 1489–1498.

Sheoran, I.S., Singal, H.R. and Singal, R. 1990. Effect of cadmium and nickel on photosynthesis and the enzymes of the photosynthetic carbon reduction cycle in pigeon pea (*Cajanus cajan*). Photosynthetic Research 23: 345-351.

Verma, S. and Duby, R.S. 2001. Effect of cadmium on soluble sugares and enzymes of metabolism in rice. Biologia Plantarum 1: 117-123.

Wantanable, M.A. 1997. Phytoremediation on the brink of commercialization, Environmental Science and Technology 31: 182–186.

Wojcik, M., Vangronsveld, J. and Tukiendorf, A. 2005. Cadmium tolerance in Thalaspi caerulescens. Growth parameters, metal accumulation and phytochelatin synthesis in response to cadmium. Environmental and Experimental Botany 53: 151-161.

Xu, J., Yin, H.X., Li, Y.L. and Liu, X.J. 2010. Nitric oxide is associated with long-term zinc tolerance in Solanum nigrum. Plant Physiology 154: 1319–1334.

Yilmaz, D.D. and Parlak, K.U. 2011. Changes in proline accumulation and antioxidative enzyme activities in *Groenlandia densa* under cadmium stress. Ecological Indicators 11: 417-423.

Zengin, F.K. and Munzuroglu, O. 2005. Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. Acta Biological Cracoviensia Series Botanica 47(2): 157-164.

Zhang, G., Fukami, M. and Sekimoto, H. 2002. Influence of cadmium on mineral concentration and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage. Field Crops Research 77: 93-98.

www.SID.ir