Archive of SID

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۳، ص. ۹۲۶-۹۱۶

Journal of Agroecology
Vol. 6, No. 4, Winter 2015, p. 916-926

پالایش گیاهی و تخمین زمان بهینه پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم با استفاده از گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea* L.)

سمیه عیسی زاده لزرجان[۱]، صفورا اسدی کپورچال[۲*] و مهدی همایی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰٤/۳۰

چکیده

پالایش گیاهی یکی از راه‌های آلودگی‌زدایی خاک است که به دلیل استفاده از گیاهان بیش‌اندوز بازده بالایی دارد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی امکان آلودگی‌زدایی خاک‌های آلوده به کادمیم با استفاده از گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) و تعیین دامنه کارآیی گیاه پالایی آن بود. به همین منظور، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار شامل شاهد، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک و سه تکرار انجام شد. پس از آلوده سازی خاک‌ها با سطوح مختلف کادمیم، بذر اسفناج در آن‌ها کاشته شد. گیاهان پس از طی دوره رشد کامل، برداشت شدند. غلظت کادمیم تجمع یافته در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه و همچنین خاک تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد با افزایش مقدار کادمیم موجود در خاک، مقدار افزایش غلظت کادمیم در ریشه‌ها به مراتب بیشتر از افزایش غلظت کادمیم در اندام‌های هوایی بود. بیشترین مقدار جذب در ساقه و ریشه به ترتیب ۷۳/۷ و ۷۵/۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. با توجه به توانایی اسفناج در جذب مقادیر زیاد کادمیم از ناحیه رشد ریشه و عملکرد گیاهی بالا و توانایی تجمع کادمیم در اندام‌های قابل برداشت، این گیاه برای پالایش سبز کادمیم گیاهی مناسب می‌باشد. لیکن با توجه به زمان پالایش و این که بیشترین مقدار ماده خشک تولید شده در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، بیشترین مقدار کادمیم استخراجی از اندام هوایی در یک هکتار در سال در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و بنابراین گیاه اسفناج برای پاکسازی کادمیم از اعماق سطحی خاک و غلظت‌های متوسط کادمیم کارآیی بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، استخراج گیاهی، فلزات سنگین، گیاه بیش‌اندوز

مقدمه

خاک یکی از اجزاء بیوسفر بوده و پالاینده طبیعت به شمار می‌آید. خاک، به عنوان بافر طبیعی نقشی مهم در کنترل و انتقال عناصر شیمیایی به اتمسفر، هیدروسفر و موجودات زنده ایفا می‌کند. آلودگی خاک از نظر ترکیب شیمیایی به آسانی قابل اندازه‌گیری نیست. آلودگی خاک و آب افزون بر مهلک بودن برای بشر، از طریق نفوذ عمقی آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی موجب آلودگی این منابع آبی و تخریب کلی زیست بوم می‌گردد. منشأ بسیاری از آلودگی‌های آب و خاک، پس مانده‌های فاضلاب صنعتی و کارگاه‌ها است. افزایش این مواد به خاک می‌تواند دامنه‌ای وسیع از آلودگی‌های متفاوت فیزیکی، شیمیایی و زیستی را ایجاد کند. درجه این تغییرات بستگی به نوع تولیدات صنعتی کارخانه‌ها متفاوت است (Brooks, 1994).

آلودگی خاک به عناصر سنگین از مهمترین مشکلات زیست محیطی در بسیاری از نقاط جهان می‌باشد (Salt et al., 1995). فعالیت‌های آتشفشانی، آتش سوزی جنگل‌ها، هوازدگی سنگ‌ها و کانی‌ها از جمله عوامل طبیعی هستند که باعث آلودگی زیست بوم به فلزات سنگین می‌شوند. فعالیت‌های حفاری و معدن‌کاوی، کارخانجات ذوب فلز و سوزاندن زباله و مواد زائد، ترافیک، مصرف سوخت‌های فسیلی در کارخانجات، مصرف حشره‌کش‌ها، کودهای شیمیایی و لجن فاضلاب در کشاورزی از جمله منابع انسانی آلاینده زیست بوم به فلزات سنگین به حساب می‌آیند. در حال حاضر مقدار فلزات سنگین آزاد شده در محیط زیست از منشأ انسانی به مراتب بیشتر از منشأ طبیعی می‌باشد (Asadi Kapourchal et al., 2009). آلودگی

۱، ۲ و ۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، استادیار گروه علوم خاک دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و استاد گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس
(*- نویسنده مسئول: Email: safooraasadi@guilan.ac.ir)

www.SID.ir

Archive of SID

زمین‌های کشاورزی و مراتع با فلزات سنگین و انتقال این عناصر از خاک به محصولات کشاورزی و دامی می‌تواند باعث ورود فلزات سنگین به چرخه مواد غذایی انسان از طریق مصرف فرآورده‌های کشاورزی و دامی گردد. از میان فلزات سنگین کادمیم دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا ریشه گیاهان آن را جذب کرده و سمیت کادمیم برای گیاه تا ۲۰ برابر سایر فلزات می‌باشد (Jafarnejadi et al., 2011). کادمیم از طریق معدن کاری، صنعت، سوخت های فسیلی و ضایعات صنعتی وارد هوا می‌شود. ترکیبات کادمیم در هوا می‌تواند فواصل طولانی را پیش از ورود به آب یا خاک طی کند. همچنین، کودهای فسفری دارای مقادیر زیادی کادمیم هستند که باعث تجمع زیاد این فلز سنگین آلاینده در خاک خواهند شد (Lefèvre et al., 2009). کادمیم از طریق ریختن ضایعات خطرناک وارد آب و خاک می‌شود و پیوند محکمی با ترکیبات خاک ایجاد می‌کند (Jafarnejadi et al., 2013).

پالایش گیاهی[1] یکی از روش‌های زیست پالایی[2] خاک می‌باشد که در دهه‌های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است. این روش در مقایسه با دیگر روش‌های پالایش، روشی پایدار، ارزان، ساده و دوستدار زیست بوم است. در این روش، از گیاهان بیش‌اندوز برای پالایش خاک‌های آلوده (بدون تخریب ساختمان خاک) استفاده می‌شود. گیاهان بیش‌اندوز گیاهانی با سرعت رشد زیاد، زیست توده بالا و قابلیت تحمل غلظت زیاد فلزات در بخش‌های قابل برداشت گیاهی (>۱۰۰۰ ppm) بوده که قادر به انتقال و تجمع در بافت‌های ذخیره‌ای می‌باشند. رشد آهسته، سیستم ریشه‌ای کم عمق و تولید زیست توده کم امکان استفاده از گونه‌های بیش‌اندوز را محدود می‌کند (Brooks, 1994). گیاه با برداشت و یا تجزیه ترکیبات آلاینده در ریشه، جذب انتخابی فلزات و تجمع در بافت خویش و یا فرا رفت آلاینده به نیوار، موجب کاهش آلاینده می‌شود. نظریه کاربرد گیاهان بیش اندوز در سال ۱۹۸۳ عنوان گردید لیکن در حقیقت این مفهوم از حدود ۳۰۰ سال گذشته به کار گرفته می‌شد (Henry, 2000).

حداقل ۴۵ خانواده به عنوان بیش‌اندوز شناسایی شده است که اغلب خانواده‌های Brassicaceae, Fabaceae, Euphorbiaceae, Lamiaceae, Asteraceae و Scrophulariaceae را شامل می‌شوند (Salt et al., 1997; Dushenkov, 2003). فرم قابل جذب کادمیم توسط گیاه کاملاً مشخص نشده ولی به نظر می‌رسد که ریشه عمدتاً یون فلزی آزاد را از محلول خاک جذب می‌کند. مقدار کادمیمی که از ریشه به ساقه، برگ و اندام‌های هوایی حرکت می‌کند بستگی به عواملی چند از جمله گونه گیاهی، نوع خاک و غلظت اولیه کادمیم موجود در خاک دارد (Taylor & Percival, 2001; Glick, 2003).

گیاه پالایی و نقش عناصر سنگین در ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و ورود آن‌ها به چرخه غذایی انسان و دام از دیدگاه‌های متفاوتی توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Panahpoor et al., 2008; Davari et al., 2010; Jafarnejadi et al., 2011; Babaeian et al., 2012; Jafarnejadi et al., 2012). در ایران نیز پژوهش‌هایی پیرامون پالایش گیاهی انجام شده است که برخی آلاینده‌های آلی (Nouri, 2014) و برخی آلاینده‌های معدنی را مورد مطالعه قرار داده‌اند (Dalalian & Homaee, 2011; Babaeian & Homaee, 2011). بیشتر این پژوهش‌ها بر امکان آلودگی‌زدایی خاک‌ها با استفاده از گیاهان بیش‌اندوز متمرکز بوده‌اند (Babaeian & Homaee, 2011). اغلب این پژوهش‌ها بر این نکته اتفاق نظر دارند که پالایش گیاهی هر چند روشی نسبتاً مؤثر برای آلودگی‌زدایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است، لیکن گیاهانی که در چنین خاک‌هایی کشت می‌شوند به هیچ عنوان نباید وارد چرخه غذایی انسان و دام شوند (Asadi kapourchal et al., 2009; Khodaverdiloo & Homaee, 2008a; Jafarnejadi et al., 2013). پژوهش‌های انجام شده پیرامون ارزیابی ویژگی‌های مؤثر خاک بر وضعیت غلظت کادمیم در خاک نشان داد که ویژگی‌های ظرفیت تبادل کاتیونی و مقدار مواد آلی خاک نسبت به دیگر ویژگی‌های خاک تأثیر بیشتری بر میزان حلالیت کادمیم خاک (کل و قابل جذب) داشته و مواد آلی بر خلاف مقدار اندک، نقش مهمی را در حلالیت کادمیم در خاک‌های مورد مطالعه دارند (Jafarnejadi et al., 2012). نتایج مطالعات درباره توان بیش‌اندوزی شاهی (*Lepidium sativum* L.) برای پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم نشان داد که ریشه گیاه شاهی نسبت به اندام هوایی آن از قدرت بیش‌اندوزی بیشتری برخوردار بوده و می‌توان از ریشه شاهی به عنوان بیش‌اندوز کادمیم استفاده کرد. بنابراین با توجه به این‌که شاهی گیاهی با دوره رشد نسبتاً کوتاه و عملکرد بالا می‌باشد، می‌توان از این گیاه به عنوان گیاهی بیش‌اندوز برای پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم استفاده کرد (Mohammadipour & Asadi Kapourchal, 2012).

1- Phytoextraction
2- phytoremediation

www.SID.ir

Archive of SID

پالایش گیاهی از دیدگاه مدل‌سازی هم مورد مطالعه قرار گرفته است و مدل‌های پالایش سبز به منظور شناخت بیشتر فرآیندهای حاکم بر پدیده‌ی پالایش و مدیریت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین از اهمیت به سزایی برخوردار بوده و پژوهشگران مختلفی در این زمینه کار کرده‌اند (Khodaverdiloo & Homaee, 2008b; Davari & Homaee, 2012; Dalalian & Homaee, 2011). با توجه به این که پالایش گیاهی روشی ارزان و دوست‌دار زیست بوم است و تحقیقات انجام شده در مورد پالایش گیاهی در ایران نیز چندان فراوان نیست لذا، انجام تحقیقاتی به منظور شناسایی و معرفی گونه-های گیاهی مناسب برای پالایش گیاهی فلزات سنگین از خاک، لازم و ضروری است هدف از انجام این پژوهش ارزیابی توان بالقوه و کارآیی گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) برای پالایش گیاهی خاک‌های آلوده به کادمیم بود.

مواد و روش ها

در این پژوهش برای پالایش سبز کادمیم، گیاه اسفناج انتخاب گردید. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار و سه تکرار انجام شد. مقادیر کادمیم خاک شامل صفر (شاهد)، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود. با توجه به این که مناسب‌ترین بافت خاک برای کاشت اسفناج بافت سبک می‌باشد (Khodaverdiloo & Homaee, 2008b)، خاک‌های یکی از مزارع صیفی‌کاری منطقه شمال غرب شهرستان چالوس انتخاب و پس از هوا خشک شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. سپس نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نظر به آزمایشگاه منتقل و تجزیه‌های مورد نظر بر روی آن‌ها انجام شد. اندازه‌گیری‌های انجام شده شامل pH عصاره اشباع خاک با دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج، فراوانی نسبی اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری، جرم ویژه ظاهری خاک به روش سیلندر، غلظت کادمیم خاک با استفاده از روش عصاره‌گیری و مقدار ماده آلی خاک به روش واکلی و بلاک بود (جدول ۱).

برای رسیدن به سطوح آلودگی فوق، نخست، مقدار کادمیم لازم (از منبع نیترات کادمیم) برای آلوده سازی جرم مشخصی از خاک محاسبه و به نمونه‌های خاک اضافه شد. آزمایش‌های مربوط به زیست پالایی عموماً در مقیاس گلدانی انجام می‌شوند. زیرا، آلوده سازی خاک و حفظ بیلان جرمی آلاینده‌ها در درون سیستم طی دوره‌ی آزمایش بسیار مهم است. به همین دلیل امکان انجام چنین آزمایش‌هایی حتی در سطح کرت‌های بسیار کوچک نیز امکان‌پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل در این پژوهش نیز همانند دیگر پژوهش‌های زیست پالایی امکان انجام آزمایش به صورت درجا وجود نداشت. بنابراین، آزمایش‌های لازم در لایسیمترهایی با قطر ۴۰ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام شد. بدین صورت که ابتدا مقدار خاک لازم برای هر یک از تیمارها و تکرارها تهیه و سپس مقدار آلاینده مورد نظر به آرامی و به صورت اسپری به خاک اضافه گردید. طی فرآیند مه پاشی، خاک‌ها به آرامی به هم زده شدند تا حداکثر اختلاط لازم بین خاک و آلاینده فراهم شود. سپس وزن معینی از خاک با جرم ویژه ظاهری ۱/۳۳ $g.cm^{-3}$ در درون لایسیمترها قرار داده شد. به منظور نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی، نمونه‌ها در فضای باز و نه در گلخانه نگهداری شدند تا گیاه در شرایط طبیعی‌تری رشد کند. در ته لایسیمترها سوراخ‌هایی تعبیه شد تا امکان زهکشی فراهم گردد. به منظور حفظ بیلان جرمی آب و آلاینده، آب خروجی از زهکش‌ها مجدداً از بالا به نمونه‌های خاک اضافه گردید.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1- Some physical and chemical properties of the experimental soil

واکنش عصاره اشباع pH_e	ماده آلی (درصد) OM (%)	کادمیم کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Total Cd ($mg.kg^{-1}$)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی‌زیمنس بر متر) EC_e ($dS.m^{-1}$)	جرم ویژه ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) ρb ($g.cm^{-3}$)	بافت Texture	رس (درصد) Clay (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	شن (درصد) Sand (%)
7.30	0.69	0.63	0.26	1.33	SCL	23.32	5.70	71.60

www.SID.ir

Archive of SID

خاک‌های آلوده در شرایط رطوبت ظرفیت زراعی قرار داده شدند و به مدت ۴۵ روز به منظور انجام برهمکنش‌های آلاینده و خاک رها گردیدند تا تعادل لازم بین خاک و آلاینده فراهم شود. سپس، کاشت بذرها در تیمارهای طراحی شده با تراکم کشت ۴۰ بذر در متر مربع انجام شد. آبیاری به گونه‌ای انجام شد که هیچ نوع تنش آبی رخ نداده و رطوبت در حد ظرفیت زراعی حفظ شود. با توجه به این که طول دوره رشد این گیاه ۴۰ روز می‌باشد، برای مقابله با انواع بیماری‌ها و آفات از هیچ گونه سمی استفاده نگردید. پس از طی دوره رشد رویشی اسفناج، نمونه‌های گیاهی برداشت و با آب مقطر شسته شده و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند (Khodaverdiloo & Homaee, Davari & Homaee, 2012 ;2008a). نمونه‌ها پس از خشک شدن با استفاده از آسیاب برقی با محفظه استیل، آسیاب شده و تا زمان عصاره‌گیری در ظروف پلاستیکی نگهداری شدند. به منظور شناسایی اثرات شکل‌های مختلف کادمیم در خاک بر جذب گیاهی آن توسط اسفناج، نخست با تجزیه اجزاء خاک، مقادیر مختلف کادمیم قابل دسترس مشخص شد. سپس، کادمیم موجود در نمونه‌های گیاه و خاک عصاره‌گیری و مقدار کادمیم نمونه‌ها به وسیله دستگاه‌های جذب اتمی (Shimadzu AA-670G) و پرتوسنجی نشری پلاسمایی جفت شده القایی (Varian Vista-PRO) اندازه‌گیری شد. نمونه‌هایی که غلظت فلز در آن‌ها از محدوده حساسیت دستگاه جذب اتمی کمتر بود با استفاده از دستگاه پرتوسنجی نشری پلاسمایی جفت شده القایی قرائت شدند. غلظت کادمیم موجود در گیاه به روش اکسیداسیون تر با نسبت حجمی یک، چهار و ۴۰ از مخلوط اسید نیتریک، اسید پرکلریک و اسید سولفوریک عصاره‌گیری گردید (Gupta, 2000; Greman et al., 2001). محاسبه زمان لازم برای پالایش گیاهی کادمیم با استفاده از فرمول ارائه شده توسط اسکنور (Schnoor, 1997) انجام شد. در نهایت به منظور بررسی قابلیت پالایش اسفناج و اثر میزان کادمیم موجود در خاک بر جذب توسط بخش‌های مختلف گیاه و دستیابی به مناسب‌ترین تیمار برای پالایش گیاهی، پارامترهای مقدار جذب و فاکتور انتقال محاسبه شد. مقدار جذب حاصل‌ضرب غلظت فلز در وزن ماده خشک اندام هوایی و فاکتور انتقال یک فلز یا شبه فلز عبارت از مقدار انباشت فلز در شاخساره به مقدار انباشت آن در ریشه گیاه می‌باشد (Barman et al., 2000; Gupta et al., 2008). در پایان، تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS (نسخه ۱۶) انجام و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۰/۰۵ درصد صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

غلظت شکل‌های مختلف کادمیم موجود در خاک برای هر یک از تیمارهای ایجاد شده پس از برداشت نیز اندازه‌گیری گردید که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که کمترین غلظت کادمیم مربوط به شکل محلول آن می‌باشد.

جدول ۲- غلظت کادمیم کل و محلول در تیمار های مختلف خاک
Table 2- Total and soluble cadmium concentrations in the experimental soil treatments

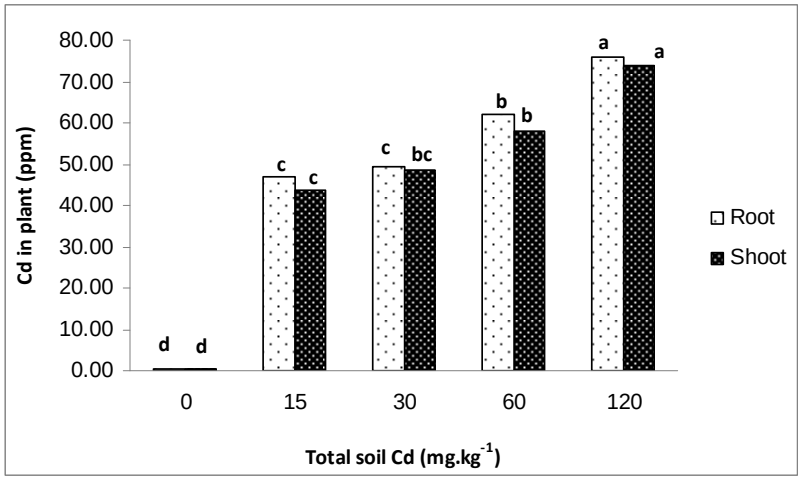
کادمیم محلول (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Soluble Cadmium (ppm)	کادمیم کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Total cadmium (ppm)	تیمار (پی‌پی‌ام) Treatment (ppm)
0.03	0.63	0
0.04	10.36	15
0.06	19.46	30
0.10	41.01	60
0.35	52.01	120

غلظت کادمیم تجمع یافته در اندام‌های هوایی و ریشه اسفناج در شکل ۱ نشان داده شده است. همان گونه که شکل ۱ نشان می‌دهد، با افزایش غلظت کادمیم در خاک، کادمیم جذب شده به وسیله ساقه و ریشه افزایش یافته است. غلظت کادمیم تجمع یافته در ساقه‌های اسفناج بین ۰/۳۳ تا ۷۳/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در ریشه بین ۰/۶۰ تا ۷۵/۸۶ به دست آمد. همچنین، نتایج ارائه شده در شکل ۱ به خوبی نشان می‌دهد که به رغم این‌که بین مقدار کادمیم تجمع یافته در ریشه و اندام هوایی در سطوح مختلف آلودگی، اختلاف معنی‌داری وجود نداشته لیکن، در نهایت مقدار کادمیم تجمع یافته در اندام‌های هوایی اسفناج کمتر از مقدار تجمع یافته آن در ریشه‌ها بوده که این با نتایج به دست آمده از برخی پژوهش‌های پیشین مانند توان بیش‌اندوزی تربچه (*Raphanus sativus* L.) برای جذب سرب (Asadi Kapourchal et al., 2009)، شبدر برسیم (*Trifolum alexanderium* L.) برای جذب کادمیم (Mousavi et al., 2014)، شاهی برای جذب کادمیم (Mohammadipour & Asadi Kapourchal, 2012) و قدومه کوهی (*Arabis arenosa* L.)، تاج

www.SID.ir

Archive of SID

خروس وحشی (*Amaranthus retroflexus* L.) و علف‌مرغ (*Agropyron repens* L.) برای پالایش کادمیم (Akbarpour Saraskanroud et al., 2012) همخوانی دارد. بدین ترتیب بیشترین مقدار جذب کادمیم توسط اسفناج مربوط به ریشه بود. همچنین، نتایج حاصل از مقایسه میانگین کادمیم تجمع یافته در ریشه و ساقه اسفناج به وسیله آزمون دانکن نشان داد، در سطح احتمال پنج درصد بالاترین میزان جذب در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بوده، لیکن تفاوت معنی‌داری بین میزان تجمع کادمیم در سطوح ۱۵ و ۳۰ میلی-گرم کادمیم برای هر کدام از بخش‌های گیاهی (ریشه و اندام هوایی) وجود ندارد. نتایج تجزیه واریانس نیز نشان داد که بین جذب کادمیم توسط ریشه و اندام هوایی در سطوح مختلف آلودگی، اختلاف معنی-داری وجود نداشت (جدول ۳).



شکل ۱- مقادیر مختلف کادمیم خاک و غلظت آن در ریشه و اندام هوایی اسفناج

Fig. 1- The relationship between total soil Cd and the cadmium absorbed by roots and shoots

ارقام ارائه شده میانگین نتایج حاصل از سه تکرار می‌باشد. حروف مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بودن در سطح احتمال $P\leq0.05$ است.

All the values are mean of three replicates. Different letters show significant differences at $P\leq0.05$ (one-way ANOVA, Duncan test).

جدول ۳- تجزیه واریانس مقادیر مختلف کادمیم تجمع یافته در ساقه و ریشه گیاه اسفناج

Table 3- Statistical analysis of accumulated cadmium in spinach shoot and root

	بافت گیاهی Plant tissue	درجه آزادی df	مجموع مربعات SS	میانگین مربعات MS	مقدار F F value	معنی‌داری Sig.
بین گروه‌ها Between groups	ساقه Shoot	4	9006.078	2251.519	63.472	< 0.0001
	ریشه Root	4	9664.577	2416.144	756.700	< 0.0001
درون گروه‌ها Within groups	ساقه Shoot	10	354.726	35.473		
	ریشه Root	10	31.930	3.193		
جمع کل Total	ساقه Shoot	14	9360.804			
	ریشه Root	14	9696.507			

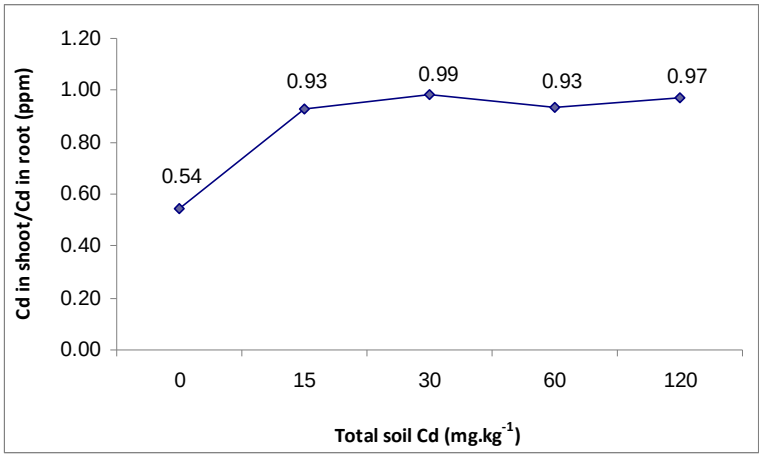
شکل ۲ روند تغییرات کادمیم جذب شده در اندام هوایی نسبت به ریشه را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده

www.SID.ir

Archive of SID

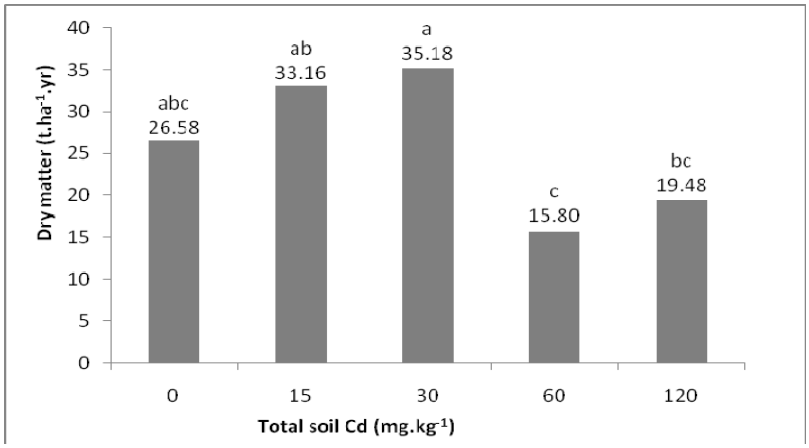
می‌شود با افزایش مقدار کادمیم خاک، فاکتور انتقال تا تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم روند افزایشی داشته، لیکن از تیمار ۳۰ تا ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روند کاهشی داشته که مقدار این کاهش چندان قابل‌توجه نیست و پس از آن مجدداً تا تیمار ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم افزایش یافته است. بنابراین گیاه اسفناج تا غلظت ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم، از توانایی بالایی برای انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی برخوردار است.

با توجه به این‌که گیاه اسفناج را می‌توان حداقل تا چهار بار در سال برداشت نمود، میزان ماده خشک گیاهی تولیدی در طول یک سال محاسبه گردید. با افزایش میزان کادمیم خاک، میزان ماده خشک تولیدی افزایش یافته و بیشترین میزان ماده خشک در تیمار ۳۰ میلی‌گرم برکیلوگرم، نزدیک به ۳۵ تن در هکتار در طول یک سال به دست آمد. در تیمارهای ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیز میزان ماده خشک تولیدی به ترتیب حدود ۱۶ و ۲۰ تن در هکتار در سال بود که با توجه به این که اکثر گیاهان بیش‌اندوز شناخته شده دارای زیست توده کمی می‌باشند، این مقدار زیست توده مقداری قابل توجه قلمداد می‌شود (شکل ۳).



شکل ۲- روند تغییرات فاکتور انتقال در سطوح مختلف آلودگی خاک

Fig. 2- The trend of transfer factor in the different levels of contaminated soils



شکل۳- مقدار ماده خشک گیاهی در سطوح مختلف آلودگی خاک

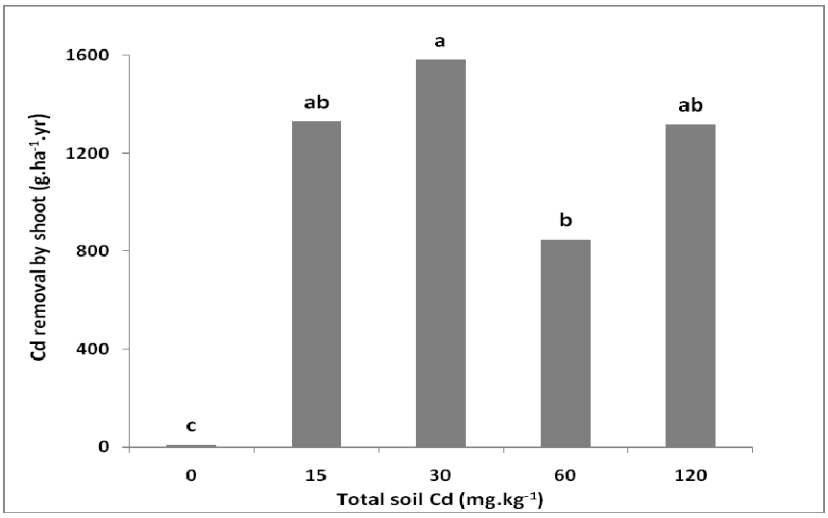
Fig. 3- Amount of dry matter in the different levels of contaminated soils

ارقام ارائه شده میانگین نتایج حاصل از سه تکرار می‌باشد. حروف مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار یودن در سطح احتمال $P\leq0.05$ است.

All the values are mean of three replicates. Different letters show significant differences at $P\leq0.05$ (one-way ANOVA, Duncan test)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل٤- مقدار کادمیم برداشت شده به وسیله اندام‌های هوایی اسفناج در سطوح مختلف آلودگی خاک

Fig. 4- Amount of cadmium removal by shoots of spinach in the different levels of contaminated soils

ارقام ارائه شده میانگین نتایج حاصل از سه تکرار می‌باشد. حروف مختلف نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار یودن در سطح احتمال $P\leq0.05$ است.

All the values are mean of three replicates. Different letters show significant differences at $P<0.05$ (one-way ANOVA, Duncan test).

شکل ۴ مقدار جذب کادمیم بر حسب گرم بر کیلوگرم ماده خشک به دست آمده از سطح یک هکتار در یک سال را نشان می‌دهد. با توجه به افزایش میزان ماده خشک گیاهی تا تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، میزان کادمیم برداشتی نیز در این قسمت روند افزایشی داشته و با کاهش میزان ماده خشک گیاهی در تیمارهای بالاتر، میزان کادمیم برداشتی نیز کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار جذب کادمیم، حدود ۱۵۸۰ گرم در هکتار در سال بود که در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم که بیشترین میزان تولید ماده خشک را دارد، مشاهده شد. بنابراین صحت این‌که استخراج گیاهی برای پالایش گیاهی خاک‌های با میزان آلودگی کم تا متوسط مناسب می‌باشد، در این تحقیق نیز مشاهده شد.

مقایسه میزان جذب کادمیم در اندام هوایی گیاه با مقادیر کادمیم استخراجی از اندام هوایی در یک هکتار در سال نشان داده که هرچند با افزایش غلظت کادمیم در خاک مقدار کادمیم برداشت شده توسط اندام هوایی نیز افزایش یافته است، لیکن با توجه به این که بیشترین مقدار ماده خشک تولید شده در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، بنابراین بیشترین مقدار کادمیم استخراجی از اندام هوایی در یک هکتار در سال در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. این نتیجه با نتایج برخی محققان (Sahmurova et al., 2010; Zhuang et al., 2007) در مورد این که، مقادیر بالای زیست توده گیاهی ظرفیت نسبتاً پایین تجمع فلز در گیاه را جبران می‌کند و منجر به تجمع مقدار بالای فلزات سنگین در گیاه می‌شود، همخوانی دارد. مطالعات پیشین نشان داده که گونه‌های چغندریان (Chenopodiaceae) با تولید زیست توده بالا از توانایی خوبی برای اندوزش فلزات سنگین برخوردار هستند (Alexander et al., 2006; Del R´ıo-Celestino et al., 2006; Gupta and Sinha, 2006; Bhargava et al., 2008; Yosefi et al., 2010). اسفناج نیز که متعلق به خانواده Chenopodiaceae است با تولید زیست توده بالا توانایی خوبی در برداشت کادمیم از خاک داشت.

در این پژوهش زمان لازم برای پالایش پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد کادمیم از هرکدام از سطوح آلودگی نیز محاسبه شد. لازم به ذکر است که زمان‌های محاسبه شده برای پالایش گیاهی کادمیم، برای اعماق سطحی خاک (عمق ۱۰ سانتی‌متری) می‌باشد. نتایج نشان داد رابطه‌ای غیرخطی بین زمان پالایش و سطوح مختلف آلودگی کادمیم وجود دارد و در هر سه سطح، نمودار از روند یکسانی برخوردار است. زمان پالایش از تیمار ۱۵ به ۳۰ افزایش یافته لیکن این افزایش چندان قابل توجه نیست و کمترین میزان زمان پالایش در این دو تیمار دیده می‌شود. علت این امر بالا بودن میزان ماده خشک تولیدی نسبت به سایر تیمارها و عدم تفاوت زیاد بین میزان ماده خشک گیاهی (مجموع ریشه و اندام هوایی) در دو تیمار می‌باشد که بالاترین میزان عملکرد جذب گیاهی و در نتیجه بالاترین میزان ثابت سرعت جذب را به دنبال دارد. در تیمارهای ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم

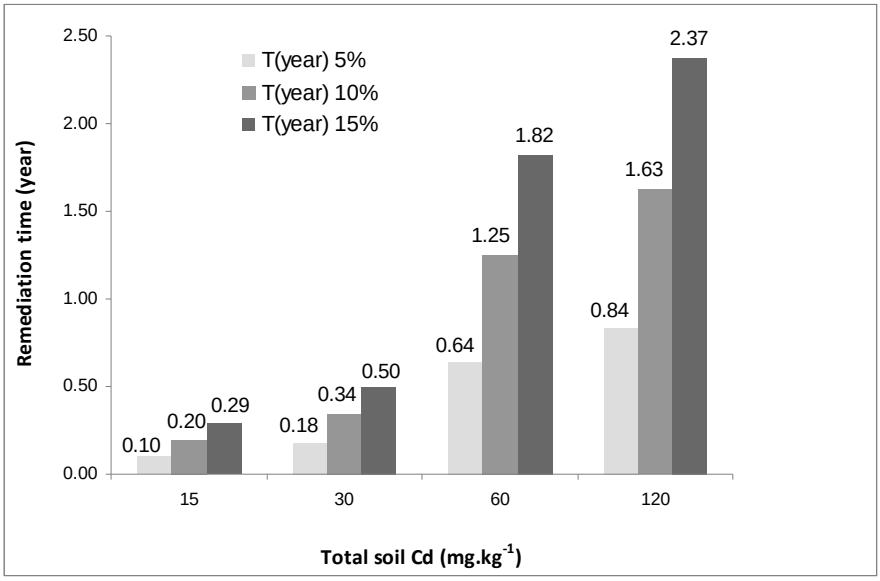
www.SID.ir

Archive of SID

زمان پالایش رو به افزایش است (شکل ۵). با توجه به این که کمترین زمان پالایش در سطح ۵٪ از آلودگی‌های مختلف کادمیم به دست آمد، می‌توان گفت این گیاه برای پالایش خاک‌هایی که آلودگی کادمیمی آن‌ها در حد پایین تا متوسط می‌باشد، نظیر خاک‌های کشاورزی، کارآیی بیشتری می‌تواند داشته باشد.

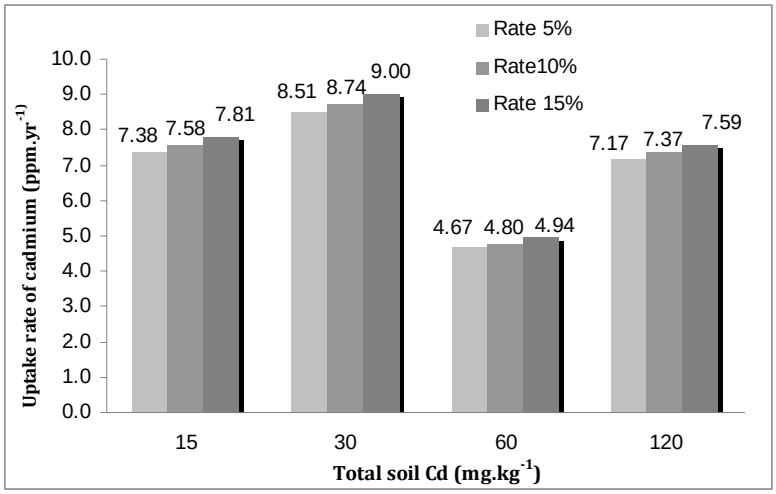
آهنگ یا شدت برداشت کادمیم از خاک در سه سطح پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد از غلظت‌های مختلف کادمیم در شکل ۶ آورده شده است.

هر سه سطح از روند یکسانی برخوردار است، بدین صورت که با افزایش غلظت کادمیم در خاک از تیمار ۱۵ به ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم آهنگ برداشت (میزان کادمیم پالایش شده درطول یک سال) افزایش می‌یابد. در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بالاترین میزان شدت برداشت وجود داشته که علت آن بالا بودن مقدار ماده خشک و عملکرد گیاهی می‌باشد. سپس در تیمار ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم شدت برداشت کاهش یافته است.



شکل ۵- زمان پالایش کادمیم در پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد از سطوح آلودگی خاک

Fig. 5- The required remediation time for 5, 10 and 15 percents of contaminated soil levels



شکل ٦- آهنگ برداشت کادمیم از خاک در پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد از سطوح مختلف آلودگی

Fig. 6- Uptake rate of cadmium from contaminated soils at three levels of 5, 10 and 15 percent of contamination

www.SID.ir

Archive of SID

اگرچه پالایش گیاهی روشی زمان بر بوده و برای پاکسازی محل آلوده بسته به میزان آلودگی از یک تا چندین سال زمان لازم است تا غلظت آلاینده به طور معنی‌داری کاهش یابد، لیکن این روش می‌تواند غلظت کل آلاینده را با حداقل قیمت کاهش دهد. همچنین، بسیاری از مناطقی که نیاز به پالایش دارند حداقل در یک بازه زمانی ده ساله آلوده شده‌اند و سال‌ها بلکه ده‌ها سال در شرایط آلودگی که به وسیله انسان ایجاد شده است، باقی مانده‌اند، بنابراین صرف چندین سال برای پالایش این مناطق از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده و چندان طولانی نمی‌باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به این که پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بسیار دشوار است و نیز برای پالایش فلزات سنگین، حذف کامل آن‌ها از خاک لازم نمی‌باشد لذا، در شرایطی که شدت آلودگی فراتر از تحمل گیاه نباشد پالایش گیاهی روش مناسبی برای آلودگی‌زدایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که با افزایش غلظت کادمیم در خاک، غلظت تجمع یافته در گیاه نیز افزایش یافته و مقدار این افزایش در ریشه به مراتب بیشتر از افزایش غلظت کادمیم در اندام هوایی بوده است. با توجه به توانایی گیاه اسفناج در جذب مقادیر زیاد کادمیم، عملکرد گیاهی بالا و توانایی انتقال و تجمع کادمیم در اندام‌های قابل برداشت، گیاه اسفناج گیاه مناسبی برای پالایش سبز خاک‌های آلوده به کادمیم تا غلظت ۱۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به شمار می‌آید. لیکن با توجه به زمان پالایش و این که بیشترین مقدار ماده خشک تولید شده در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، بیشترین مقدار کادمیم استخراجی از اندام هوایی در یک هکتار در سال در تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و بنابراین گیاه اسفناج برای پاکسازی کادمیم از اعماق سطحی خاک و غلظت‌های متوسط کادمیم کارآیی بهتری دارد. با توجه به اینکه اسفناج جزء سبزی‌های خوراکی رایج در ایران می‌باشد، چنانچه با هدف استخراج گیاهی به کار رود باید مانند زباله‌های خطرناک بلافاصله پس از برداشت اقدام به سوزاندن و دفن آن نمود.

منابع

Akbarpour Saraskanroud, F., Sadri, F., and Golalizadeh, D. 2012. Phytoremediation of heavy metal (Lead, Zinc and Cadmium) from polluted soils by Arasbaran protected area native plants. Journal of Soil and Water Resources Conservation 1(4):53-67. (In Persian with English Summary)

Alexander, P.D., Alloway, B.J., and Dourado, A.M. 2006. Genotypic variation in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grow vegetables. Environmental Pollution 144(3): 736-745.

Asadi Kapourchal, S., Asadi Kapourchal, S., Pazira, E., and Homaee, M. 2009. Assessing radish (*raphanus sativus* L.) potential for phytoremediation of Lead- contaminated soils resulting from air pollution. Soil Plant Environment Journal 55(5): 202-206.

Babaeian, E., and Homaee, M. 2011. Enhancing lead phytoextraction of land cress (*Barbara verna*) using aminopolycarboxylic acids. Journal of Water and Soil 24(6): 1142-1150. (In Persian with English Summary)

Babaeian, E., Homaee, M., and Rahnemaie, R. 2012. Enhancing phytoextraction of lead contaminated soils by carrot (*Daucus carrota*) using chelated synthetic and natural. Journal of Water and Soil 26(3): 607-618. (In Persian with English Summary)

Barman, S.C., Sahu, R.K., Bhargava, S.K., Chaterjee, C. 2000. Distribution of heavy metals in Wheat, Mustard and weed grown in field irrigated with industrial effluents. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 64: 489–496.

Bhargava, A., Shukla, S., Srivastava, J., Singh, N., and Ohri, D. 2008. Chenopodium: a prospective plant for phytoextraction. Acta Physiologiae Plantarum 30(1): 111-120.

Brooks, R.R. 1994. In Plants and Chemical Elements: Biochemistry, Uptake, Tolerance and Toxicity. (Ed. Gargo M E). VCH Verlagsgesellsschaft, Wenham, Germany. p. 88-105.

Del Rìo-Celestino, M., Font, R., Moreno-Rojas, R., and De Haro-Bailòn, A. 2006. Uptake of lead and zinc by wild plants growing on contaminated soils. Industrial Crops and Products 24(3): 230-237.

www.SID.ir

Archive of SID

Dushenkov, D. 2003. Trends in phytoremediation of radionuclides. Plant and Soil 249: 167-175.

Dalalian, M.R., and Homaee, M. 2011. Simulating of phytoremediation time of cadmium and copper spiked soils by Salvia Sclarea. Water and Soil Science 20(4): 129-141. (In Persian with English Summary)

Davari, M., Homaee, M., and Khodaverdiloo, H. 2010. Modeling Phytoremediation of Ni and Cd from contaminated soils using macroscopic transpiration reduction function. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science 14(52): 75-84. (In Persian with English Summary)

Davari, M., and Homaee, M. 2012. A new yield multiplicative model for simultaneous phytoextraction of Ni and Cd from contaminated soils. Journal of Water and Soil 25(6): 1332-1343. (In Persian with English Summary)

Glick, B.R. 2003. Phytoremediation: Synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. Biotechnology Advances 21: 383-393.

Greman, H., Velikonja-Bolta, S., Vodnik, D., Kos, B., and Lestan, D. 2001. EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: metal accumulation, leaching and toxicity. Plant and Soil 235: 105-114.

Gupta, A.K., and Sinha, S. 2006. Phytoextraction capacity of the *Chenopodium Album* L. Grown on soil amended with tannery sludge. Bioresource Technology 98(2): 442-446.

Gupta, N., Khan, D.K., Santra, S.C. 2008. An assessment of heavy metal contamination in vegetable grown in waste water irrigated areas of Titagarh, West Bengal, India. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 80: 115-118.

Gupta, P.K. 2000. Soil, Plant, Water and Fertilizer Analysis. Agrobios, New Dehli, India.

Henry, J.R. 2000. In an Overview of Phytoremediation of Lead and Mercury. NNEMS Report. Washington, D.C. p. 3-9.

Jafarnejadi, A.R., Homaee, M., and Sayyad, G.A. 2011. Large scale spatial variability of accumulated cadmium in the wheat farm grains. Soil and Sediment Contamination Journal 20(1): 93-99.

Jafarnejadi, A.R., Homaee, M., Sayyad, G.A., and Bybordi, M. 2012. Evaluation of main soil properties affecting Cd concentrations in soil and wheat grains on some calcareous soils of Khuzestan province. Journal of Water and Soil Conservation 19(2): 149-164. (In Persian with English Summary)

Jafarnejadi, A.R., Sayyad, G.A., Homaee, M., and Davamei, A.H. 2013. Spatial variability of soil total and DTPA-extractable cadmium caused by long-term application of phosphate fertilizers, crop rotation and soil characteristics. Environmental Monitoring and Assessment 185(5): 4087-4096.

Khodaverdiloo, H., and Homaee, M. 2008a. Modeling Cadmium and Lead phytoextraction from contaminated soils. Polish Journal of Soil Science XLI (2): 149-162.

Khodaverdiloo, H., and Homaee, M. 2008b. Modeling Phytoremediation of Soils Polluted with Cadmium and Lead. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science 11(42): 417-426. (In Persian with English Summary)

Lefèvre, I., Marchal, G., Meerts, P., Corréal, E., and Lutts, S. 2009. Chloride salinity reduces cadmium accumulation by the Mediterranean halophyte species *Atriplex halimus* L. Environmental and Experimental Botany 65(1): 142-152.

Mohammadipour, F., and Asadi Kapourchal, S. 2012. Assessing land cress potential for phytoextraction of cadmium from Cd contaminated soils. Journal of Soil and Water Resources Conservation 2(2): 25-35. (In Persian with English Summary)

Mousavi, S.M., Ahmadabadi, Z., and Bahmanyar, M.A. 2014. Investigation the hyper-accumulative potential of creeping wheat grass (*Agropyronrepens* L.) and berseem clover (*Trifolum Alexanderium* L.) in adsorption of heavy metals from treated soil with sewage sludge. Journal of Water and Wastewater. in Press 25(92). (In Persian with English Summary)

Nouri, M., Homaee, M., and Bybordi, M. 2014. Comparing petroleum and water hydraulic properties in soil. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science 17(66): 123-134. (In Persian with English Summary)

Panahpoor, E., Afyuni, M., Homaee, M., and Hoodaji, M. 2008. Cd, Cr, and Co Motion in Soil Treated with Sewage Sludge and Salts of the Metals and their Uptake by Vegetable Crops A Case Study in East Isfahan. Journal of Water and Wastewater 19(67): 9-17. (In Persian with English Summary)

Sahmurova, A., Celik, M., and Allahverdiyev, S. 2010. Determination of the accumulator plants in Kucukcekmece Lake (Istanbul). African Journal of Biotechnology 9(39): 6545-6551.

www.SID.ir

Archive of SID

Salt, D.E., Blaylock, M., Kumar, N.P.B.A., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I., and Raskin, I. 1995, Phytoremediation: A novel Strategy for the Removal of Toxic Metals from the Environment Using Plants. Biotechnology 13(5):468-474.

Salt, D.E., Pickering, I.J., Prince, R.C., Gleba, D., Dushenkov, S., Smith, R.D., and Raskin, I. 1997. Metal accumulation by aquacultured seedlings of Indian Mustard. Environmental Science and Technology 31(6): 1636-1644.

Schnoor, J.L. 1997. Phytoremediation. GWRTAC (Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center) Technology Evaluation Report TE-98-01, 43 pp.

Taylor, M.D., and Percival, H.J. 2001. Cadmium in soil solutions from a transect of soils away from a fertilizer bin. Environmental Pollution 113: 35-40.

Yosefi, N., Chehregani, A., Malayeri, B., Lorestani, B., and Cherghi, M. 2010. Investigating the effect of heavy metals on developmental stages of anther and pollen in *Chenopodium botrys* L. (Chenopodiaceae). Biological Trace Element Research DOI 10.1007/s12011-010-870.1-6.

Zhuang, P., Yang, Q.W., Wang, H.B., and Shu, W.S. 2007. Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field. Water Air and Soil Pollution 184: 235-242.

www.SID.ir