

اثر اسید سولفوریک و EDTA بر گیاه پالایی سرب در خاک توسط سه گیاه آفتابگردان، ذرت و پنبه

ابراهیم فتاحی کیاسری*، امیر فتوت، علیرضا آستارایی و غلامحسین حق‌نیا^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۱/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۸/۳۰)

چکیده

افزایش فعالیت‌های صنعتی در طی سال‌های اخیر و به دنبال آن ورود انواع آلاینده‌های آلی و غیر آلی از جمله سرب به خاک از مشکلاتی است که سلامت بشر را تهدید می‌کند. گیاه‌پالایی (Phytoremediation) از جمله روش‌های پیشنهادی است که با انباشت عناصر سنگین در اندام هوایی گیاهان، خروج این عناصر از خاک‌های آلوده را امکان‌پذیر می‌کند. هدف این مطالعه بررسی امکان گیاه‌پالایی در خاک با استفاده از گیاهان آفتابگردان، ذرت و پنبه در حضور اسید سولفوریک و EDTA بود. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو سطح عنصر سرب (۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، EDTA با سه سطح ۰، ۱/۵، ۳ میلی‌مول در کیلوگرم خاک، اسید سولفوریک با سه سطح ۰، ۵/۵ و ۱ میلی‌مول در کیلوگرم خاک و سه گیاه آفتابگردان، ذرت و پنبه با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. نتایج نشان داد که مقدار ۱/۵ و ۳ میلی‌مول EDTA اثر معنی‌داری بر مقادیر سرب در ریشه و اندام هوایی گیاهان داشت. بیشترین افزایش سرب اندام هوایی به ترتیب به اندازه ۱۷ و ۲۸/۳ برابر شاهد در پنبه دیده شد. مقدار ۱/۵ میلی‌مول EDTA نسبت به ۳ میلی‌مول EDTA تأثیر بیشتری در انباشت مقدار کل این عنصر در بین گیاهان داشت. افزایش EDTA در سطوح ذکر شده بر مقدار کل سرب ریشه اثر معنی‌داری نداشت. افزایش اسید سولفوریک در غلظت‌های یاد شده با روند نامنظم، تغییراتی را در مقادیر سرب گیاهان ایجاد کرد. به طور کلی، ذرت در بین سه گیاه دارای توان بالاتری در جذب و انتقال سرب بود. مقایسه مقادیر سرب در ریشه و اندام هوایی گیاهی بر اثر استفاده از اسید سولفوریک و EDTA در غلظت‌های ذکر شده نشانگر اثر بیشتر EDTA در افزایش تجمع این عنصر در گیاهان بود.

واژه‌های کلیدی: گیاه‌پالایی، سرب، آفتابگردان، ذرت، پنبه، اسید سولفوریک، EDTA

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استادیاران و استاد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ekiasari59@yahoo.com

مقدمه

آلودگی خاک‌ها به سرب یکی از مشکلات بزرگی است که کشورهای در حال توسعه و صنعتی با آن روبه‌رو هستند (۱۱). منابع آلوده کننده سرب خاک‌ها را می‌توان به چندگروه بزرگ دسته‌بندی کرد: فعالیت‌های صنعتی مانند معادن و تصفیه‌خانه‌ها، فعالیت‌های کشاورزی مانند کاربرد آفت‌کش‌ها و کاربرد لجن فاضلاب و فعالیت‌های شهری مانند کاربرد سرب در بنزین و رنگ‌ها. تحقیقات زیادی در زمینه خروج سرب از خاک‌های آلوده با استفاده از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی در حال پیشرفت است (۲۱). روش‌های معمول برای خروج فلزات سنگین از خاک‌های آلوده عموماً پرهزینه بوده و هم‌چنین سبب تغییرات در بعضی از ویژگی‌های خاک مانند ساختمان، مواد آلی و جمعیت ریزموجودات خاک می‌شوند (۲۳). به تازگی توجه پژوهشگران زیادی به روش استفاده از گیاهان برای خروج فلزات سنگین از خاک‌های آلوده معطوف شده است (۳، ۱۴ و ۱۷). بعضی از گونه‌های اختصاصی گیاهان می‌توانند فلزات سنگین را به اندام هوایی انتقال دهند. برداشت اندام هوایی غنی از فلزات سنگین از مکان‌های آلوده می‌تواند در خروج فلزات سنگین از خاک بدون صرف هزینه‌های بالایی همچون خاک‌برداری و انتقال و خروج خاک‌های سطحی از منطقه مؤثر باشد (۲). موفقیت در امر گیاه‌پالایی مشروط به تولید زیست‌توده زیاد و تجمع زیاد فلزات سنگین در اندام هوایی گیاهان است. بیش‌اندوزها (Hyperaccumulator) گیاهانی هستند که می‌توانند فلزات سنگین را تا حد غیرطبیعی در اندام هوایی خود تجمع دهند (۳ و ۲۰). به هر حال بیشتر گیاهان بیش‌اندوز به دلیل رشد کند و تولید زیست‌توده اندک برای کاربرد در گیاه‌پالایی مناسب نیستند. در سال‌های اخیر به عنوان یک جایگزین خوب به جای بیش‌اندوزها، کاربرد بعضی از گونه‌های گیاهی مانند ذرت، نخود، پیاز، آفتابگردان، جو و خردل که دارای تولید زیست‌توده بالا هستند به همراه اقداماتی در جهت افزایش مقدار جذب این فلزات توسط گیاهان پیشنهاد شده است (۲ و ۶). به طور کلی برای انتخاب یک گیاه برای

هدف گیاه‌پالایی خاک باید عوامل زیر را در نظر گرفت: ۱- قدرت جذب زیاد ۲- تولید زیست‌توده بالا ۳- انتقال زیاد عنصر از ریشه به ساقه (۱۶).

شکل‌های مختلف فلزات سنگین در خاک دارای حلالیت و در نتیجه دارای قابلیت جذب توسط گیاه متفاوتی هستند (۵ و ۲۶). با وجود مقدار زیاد سرب در خاک، مقدار قابل دسترس برای گیاهان (بخش محلول و قابل تبادل خاک) به علت ایجاد کمپلکس‌های قوی با مواد آلی، اکسیدهای آهن و منگنز و رس‌ها و تشکیل رسوب با کربنات‌ها، هیدروکسیدها و فسفات‌ها مقدار کمی را به خود اختصاص داده است (۱۹). بنابراین افزایش مقدار فراهم عنصر در خاک عاملی اساسی برای گیاه‌پالایی در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به حساب می‌آید. دو روش برای افزایش میزان حلالیت فلزات سنگین از جمله سرب در خاک و در نهایت افزایش مقدار جذب شده عنصر توسط گیاه پیشنهاد می‌شود، که عبارت‌اند از الف) کاهش pH خاک با استفاده از اسیدهای مختلف (۲، ۱۴ و ۱۸) ب) افزایش میزان حلالیت عنصر با استفاده از انواع کلات‌های شیمیایی از جمله

NTA (nitritotriacetic acid)

EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid)

HEDTA (hydroxyethylenediaminetriacetic acid)

DTPA (Diethylene triamine pentaacetic acid).

اسیدها و کلات‌ها در شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای برای افزایش مقدار جذب فلزات سنگین توسط گیاهان در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲ و ۸). از آنجایی که افزایش بیش از اندازه مواد شیمیایی افزایش‌دهنده حلالیت فلزات سنگین در خاک می‌تواند باعث افزایش انتقال به آب‌های زیرزمینی از طریق شستشوی آنها توسط آب آبیاری و یا آب باران شود، لذا توجه به مقدار لازم مورد استفاده از این کلات‌ها در خاک ضروری است (۴، ۷ و ۱۵). اهداف عمده این تحقیق عبارت بودند از: ۱) مقایسه توانایی دو ماده شیمیایی EDTA و اسید سولفوریک برای افزایش حلالیت سرب در خاک (۲) تعیین قابلیت گیاه‌پالایی سه گیاه آفتابگردان، ذرت و پنبه (۳) تعیین غلظت مناسب مورد استفاده برای مواد

اسیدسولفوریک و EDTA نیز به روش افشانه به خاک‌ها افزوده شدند. هر نمونه پس از اعمال تیمارها کاملاً مخلوط شده و در نایلون‌های مخصوص ریخته شدند. برای اینکه شرایط آلودگی خاک به عناصر سنگین تا حدی شبیه شرایط طبیعی موجود در زمین‌های آلوده گردد، نمونه‌های تیمار شده تا حد رطوبت ظرفیت مزرعه مرطوب شده و به مدت ۱۰ روز در این حد رطوبتی ثابت نگه داشته شد. پس از این مدت نمونه‌ها هوا خشک و پس از کوبیدن به مقدار ۳ کیلوگرم در گلدان‌ها ریخته شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌های خاک، تعداد ۸ عدد از بذر هر گیاه در گلدان‌ها کشت شد و گیاهچه‌های جوان پس از ۱۰ روز به ۳ عدد در گلدان تنک شد. در طی مراحل داشت که به مدت ۶۰ روز طول کشید مقدار رطوبت گلدان‌ها در حد رطوبت ظرفیت مزرعه ثابت نگه داشته شد. پس از این مدت، اندام هوایی گیاهان توسط تیغه مخصوص از سطح خاک بریده شد و ریشه گیاهان نیز توسط الک مخصوص و حرکات متناوب در آب برداشت شد. نمونه‌های گیاهی پس از شستشو در آب مقطر، توسط پاکت‌های کاغذی مخصوص به آزمایشگاه انتقال یافتند و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شده و پس از توزین و آسیاب شدن در کوره الکتریکی مخصوص به دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس خاکستر شدند. هضم نمونه‌های گیاهی توسط روش هضم تر صورت گرفت و مقدار سرب موجود در اندام هوایی و ریشه گیاهان توسط دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی (Shimadzu-AA 670) اندازه‌گیری شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده در مورد گیاهان عبارت‌اند از: زیست توده گیاهان تحت تأثیر تیمارهای مختلف اسید سولفوریک و کلات EDTA، غلظت سرب در اندام هوایی و ریشه گیاهان، مقدار جذب کل سرب توسط اندام گیاهی که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A = B \times C$$

A = مقدار کل تجمع فلزات در اندام گیاهی (میلی‌گرم)

B = غلظت فلزات در اندام گیاهی (میلی‌گرم در کیلوگرم)

C = وزن خشک نمونه‌های گیاهی (کیلوگرم)

شیمیایی جهت افزایش مقدار جذب کل عنصر سرب به وسیله اندام‌های گیاهی.

مواد و روش‌ها

مقدار خاک مورد نیاز از یک نوع خاک با رده‌بندی Typic Haplocambids واقع در منطقه مشهد تهیه شد و پس از هواخشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری برای تجزیه‌های اولیه خاک به آزمایشگاه انتقال یافت. نتایج تجزیه برخی از ویژگی‌های خاک در جدول ۱ آورده شده است. برای تعیین بافت خاک از روش هیدرومتر بایکاس (کلوت ۱۹۸۶)، pH نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه pH متر در گل اشباع، EC خاک در عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت سنج الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی از روش چاپمن (کلوت ۱۹۸۶)، کربن آلی خاک از روش والکلی و بلاک (۱۹۳۴)، حد ظرفیت مزرعه خاک از روش سانتیفریژ دور سریع (کازل و نیلسن ۱۹۸۲)، کربنات کلسیم خاک با روش خنثی‌سازی با اسید (ریچارد ۱۹۶۹)) و عناصر سنگین قابل استخراج توسط (Diethylene DTPA-TEA (triamine pentaacetic acid-Triethanolamine از روش شیمیایی لیندزی و نورول (۱۹۷۸) استفاده شد. آزمایش در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو سطح عنصر سرب (۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) و سه سطح اسید سولفوریک (۰، ۵ و ۱ میلی‌مول در کیلوگرم) و سه سطح EDTA (۰، ۱/۵ و ۳ میلی‌مول در کیلوگرم) و سه گیاه آفتابگردان (*Zea mays* L. (رقم آجیلی)، ذرت، *Helianthus annuus* L. (رقم سینگل کراس ۷۰۴) و پنبه *Gossypium hirsutum* L. (رقم ورامین) با سه تکرار انجام شد. نمونه خاک پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری در واحدهای ۹ کیلوگرمی توزین و روی نایلون‌های پلاستیکی ریخته و کودهای پرمصرف مورد نیاز گیاهان آفتابگردان، ذرت و پنبه (نیتروژن، فسفر، پتاسیم) بر اساس آزمون خاک به نمونه‌ها افزوده شد. مقادیر مورد نیاز سرب (به صورت نترات سرب)،

جدول ۱. پاره‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی	واحد	مقدار
نیترژن	درصد	۰/۰۳۱۵
فسفر	میلی‌گرم در کیلوگرم	۷/۷۸
پتاسیم	میلی‌گرم در کیلوگرم	۷۸/۶۸
کربن آلی	درصد	۰/۴۶۵
آهک	درصد	۱۱/۸
CEC	میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم	۱۱/۲۶
FC	درصد رطوبت وزنی	۱۲/۷۹
pH	-----	۷/۸۴
EC	دسی‌زیمنس بر متر	۲/۹۴
سرب	میلی‌گرم در کیلوگرم	۱۸/۲۱
کادمیم	میلی‌گرم در کیلوگرم	۰/۰۴
شن	درصد	۳۸
سیلت	درصد	۳۸
رس	درصد	۲۴

اثرگذار است. بعضی از تراوش‌های ریشه گیاهان و هم‌چنین ترکیبات چنگالی کلات‌ها عوامل مؤثری بر افزایش جذب عناصر از خاک توسط گیاهان به حساب می‌آیند (۱۲).

نمونه‌های خاک نیز پس از برداشت اندام هوایی و قبل از برداشت ریشه گیاهان، برداشت شده و پس از هوا خشک شدن برای تجزیه بعدی به آزمایشگاه انتقال یافتند. تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار MSTATC انجام شد.

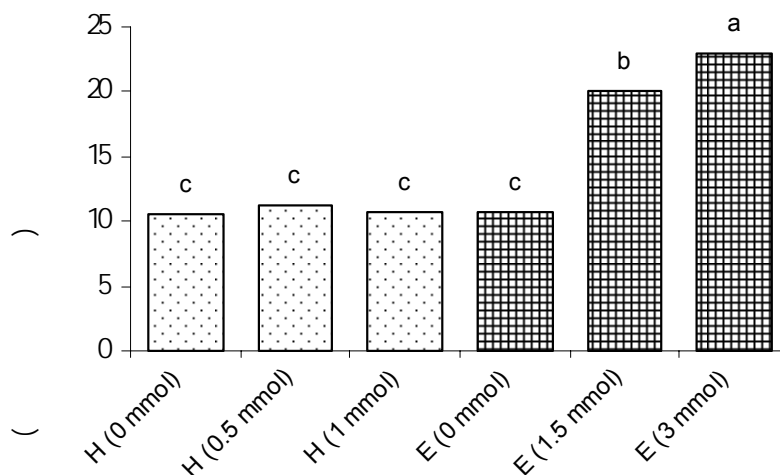
سرب قابل استخراج با عصاره‌گیر DTPA-TEA

EDTA نسبت به اسید سولفوریک مقدار سرب فراهم (قابل استخراج با DTPA) را به طور متوسط ۱/۶۶ برابر افزایش داد. با توجه به شکل ۱ مشخص می‌شود افزایش مقدار ۳ میلی‌مول EDTA در هر کیلوگرم خاک مقدار سرب فراهم در خاک را به طور معنی‌داری ($P < 0.01$) نسبت به نمونه‌های دیگر افزایش داد. پس از آن نمونه‌های دارای مقدار ۱/۵ میلی‌مول در کیلوگرم EDTA قرار داشتند. افزودن مقدار ۰/۵ و ۱ میلی‌مول اسید سولفوریک در خاک افزایشی را در فراهمی سرب خاک سبب نشد. در آزمایشی توسط شن و همکاران (۲۱) مشخص شد

نتایج و بحث

pH و EC نمونه‌های خاک پس از برداشت

اختلاف بین مقادیر pH و EC خاک در هیچ سطحی معنی‌دار نبود. مادرید و کیرکهام (۱۳) نشان دادند افزایش مقدار ۱/۵ میلی‌مول EDTA در خاکی با pH= ۷/۹-۸ و آهک تقریباً مشابه، اثری بر pH خاک نداشته است. تورگات و همکاران (۲۴) نیز نشان دادند افزودن مقادیر ۱/۵ و ۳ میلی‌مول EDTA و اسیدسیتریک کاهش pH خاک را در بر نداشته است. مقدار pH و EC خاک در فراهمی عناصر و جذب آنها توسط گیاهان



شکل ۱. سرب عصاره‌گیری شده در خاک‌ها توسط عصاره‌گیر DTPA-TEA پس از برداشت گیاهان. EDTA (E), H₂SO₄ (H).

معنی‌داری در زیست‌توده ریشه گیاهان ایجاد نکرد (شکل ۳). شن و همکاران (۲۱) نشان دادند مقدار ۱/۵ و ۳ میلی‌مول EDTA افزوده شده به یک کیلوگرم خاک کاهش زیست‌توده اندام هوایی برخی از گیاهان مانند لوبیا، کلم و گندم را سبب شد. افزایش بیشتر EDTA باعث کاهش بیشتر در مقدار زیست‌توده اندام هوایی این گیاهان شده است. این پژوهشگران کاهش مقدار زیست‌توده گیاهان را به دلیل افزایش مقدار سرب در گیاهان گزارش کردند. چن و ترسا (۴) نیز با افزودن مقدار ۰/۳ میلی‌مول EDTA به یک کیلوگرم خاک مشاهده کردند، مقدار زیست‌توده گیاه آفتابگردان نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری ($P < 0/01$) داشته است. این محققان علت کاهش زیست‌توده آفتابگردان را به افزایش مقدار جذب کادمیم توسط گیاه نسبت دادند.

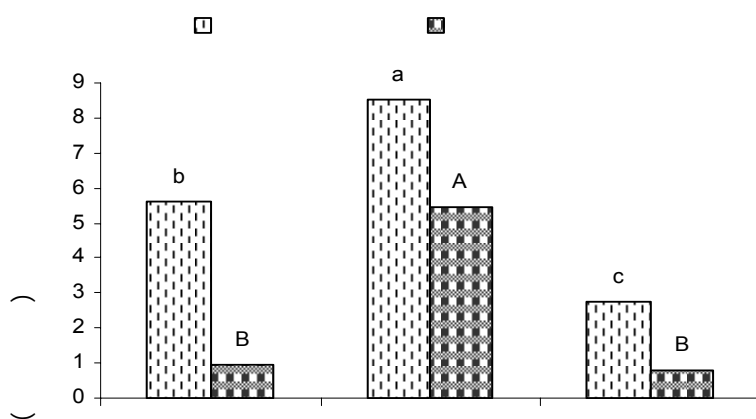
سرب اندام هوایی گیاهان

میانگین سرب اندام هوایی آفتابگردان و ذرت با اختلاف معنی‌داری ($P < 0/01$) بیشتر از مقدار آن در اندام هوایی پنبه بود. سرب موجود در اندام هوایی آفتابگردان و ذرت تحت تأثیر اسید سولفوریک، بیشتر از سرب اندام هوایی پنبه بود (شکل ۴). با توجه به شکل ۵ افزودن EDTA به مقدار ۱/۵ و ۳ میلی‌مول

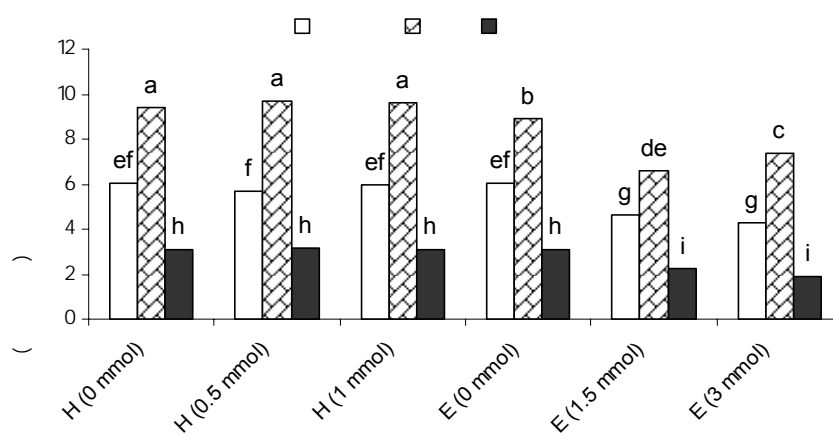
مقادیر ۱/۵ و ۳ میلی‌مول کلات EDTA در مقایسه با مقادیر مشابه از کلات‌های دیگر همچون HEDTA، NTA و اسید سیتریک توانست مقدار حلالیت عنصر سرب را به مقدار بیشتری افزایش دهد. در مطالعات دیگر مقدار قابل استخراج عناصر کم‌مصرف مس، آهن و منگنز توسط افزودن مقدار ۱/۵ میلی‌مول کلات EDTA به خاک افزایش یافت (۱۰ و ۱۳). وجود پیوندهای آلی-فلزی در ترکیب کلات و فلزات سبب می‌شود فلزات کمتر در معرض کلوئیدها و هیدروکسیدها و اکسیدها قرار گرفته، لذا مانع از رسوب و تثبیت آنها در خاک می‌شود. از طرفی کلات‌ها توسط ریشه گیاهان قابل جذب بوده، می‌توانند فلزات را از فاز جامد و غیر محلول به فازهای تبادل‌پذیر انتقال داده و در نهایت میزان جذب فلزات توسط گیاهان را افزایش دهند. نتایج این آزمایش نیز موید این مطلب است.

زیست‌توده اندام‌های گیاهی

میانگین مقدار زیست‌توده اندام هوایی و ریشه ذرت نسبت به دو گیاه آفتابگردان و پنبه حداکثر بود (شکل ۲). داده‌ها همچنین نشان می‌دهند افزودن مقادیر EDTA به نمونه‌های خاک کاهش مقدار زیست‌توده اندام هوایی را در برداشت در صورتی که افزودن اسید به خاک در هیچ یک از سطوح غلظتی تغییر

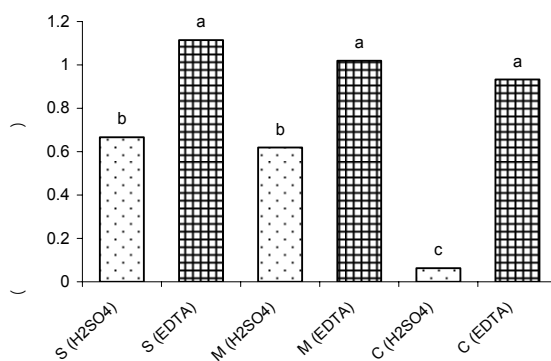


شکل ۲. میانگین وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاهان (گرم) ماده خشک در هر گلدان



شکل ۳. اثر سطوح مختلف اسیدسولفوریک و کلات EDTA بر میانگین وزن خشک اندام هوایی و

ریشه گیاهان. H_2SO_4 (H), EDTA (E)



شکل ۴. اثر اسید سولفوریک و EDTA بر میانگین غلظت سرب اندام هوایی گیاهان بر حسب

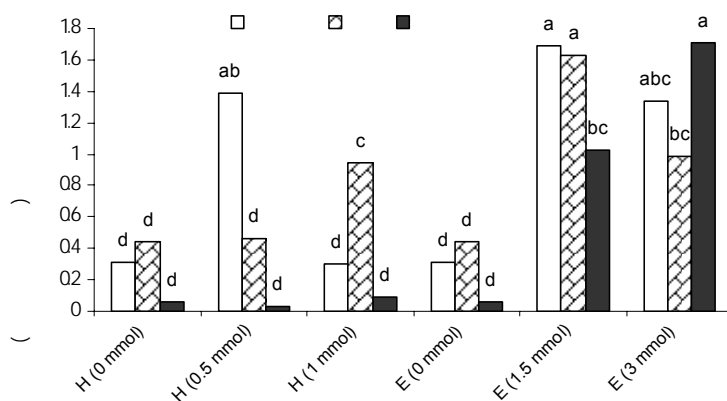
میلی گرم در کیلوگرم. (آفتابگردان (S)، ذرت (M) و پنبه (C))

بر اساس شکل ۶ کاهش ناچیزی در غلظت سرب ریشه آفتابگردان صورت گرفته است. تحقیقات نیز نشان می‌دهد که افزایش اسید به خاک سبب افزایش انتقال عناصر از ریشه به اندام هوایی شده است (۲۲، ۲۴ و ۲۵). شاید یکی از دلایلی که با افزایش اسید در خاک تغییرات منظمی در مقدار سرب اندام هوایی گیاهان اتفاق نیفتاده است، مناسب نبودن عصاره‌گیر DTPA-TEA برای تخمین فراهمی عنصر سرب برای گیاهان باشد.

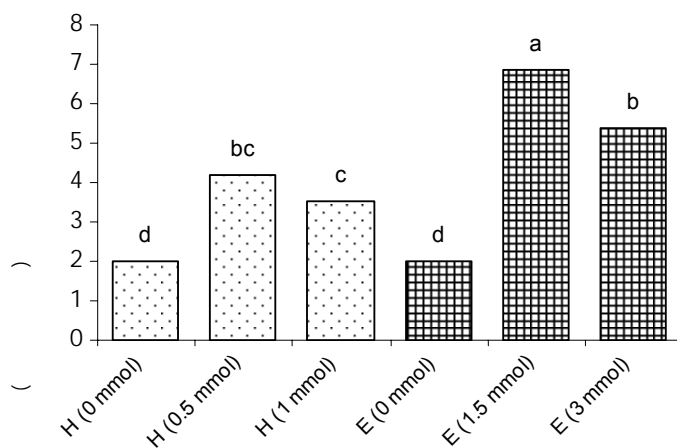
از آنجایی که ذرت دارای غلظت زیاد سرب در اندام هوایی بود و در عین حال تولید زیست‌تودهٔ زیادتری نسبت به گیاهان دیگر داشت بنابراین در مقایسه با دو گیاه دیگر، دارای بیشترین مقدار کل سرب در اندام هوایی بود. مواد افزایندهٔ فراهمی در خاک در افزایش میانگین کل سرب موجود در اندام هوایی مؤثر بوده به گونه‌ای که مقدار ۰/۵ و ۱ میلی‌مول اسید توانست غلظت سرب اندام هوایی را نسبت به شاهد افزایش دهد (شکل ۶). اما تأثیر EDTA به عنوان کلات فراهم‌کنندهٔ عناصر بسیار بیشتر از اسیدسولفوریک بود. روند افزایشی مقدار کل سرب اندام هوایی با EDTA همانند روند غلظت نسبی سرب در اندام هوایی حالت پایداری نداشت. به گونه‌ای که در مقدار ۱/۵ میلی‌مول EDTA افزوده شده به خاک بیشترین افزایش سرب در اندام هوایی را سبب شد (شکل ۶).

ذرت در تیمار ۱/۵ میلی‌مول EDTA دارای بیشترین مقدار سرب در اندام هوایی در مقایسه با پنبه بود، ولی مقدار آن نسبت به مقدار موجود در آفتابگردان اختلاف معنی‌داری نداشت. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه می‌توان به شکل ۷ مراجعه نمود. طبق مشاهدات افزایش مقدار EDTA از ۱/۵ به ۳ میلی‌مول در کیلوگرم باعث کاهش معنی‌داری در سرب اندام هوایی آفتابگردان و ذرت شده است، ولی در پنبه این نتیجه صادق نبود. تعیین مقدار کل عناصر تجمع یافته در گیاه از معیارهایی است که برای تعیین گیاه مناسب برای گیاه‌جذب ضروری است. به عنوان مثال تورگات و همکاران (۲۴) و چن و ترسا (۴) با تعیین مقدار کل عناصر نیکل و کادمیم

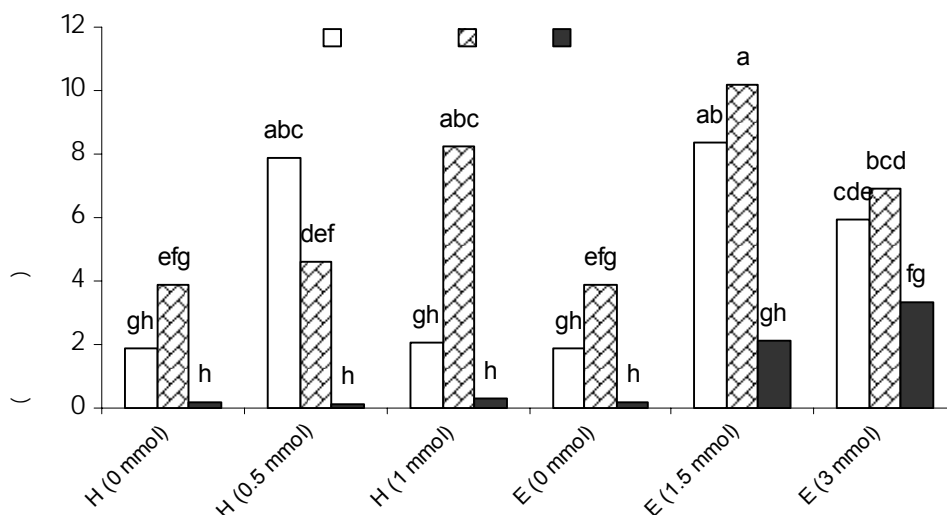
در یک کیلوگرم خاک باعث شد غلظت سرب در اندام هوایی پنبه به ترتیب ۱۷ و ۲۸/۳ برابر شاهد پنبه شود. نسبت‌های یاد شده در آفتابگردان ۵/۳۳ و ۴/۲۳ و در ذرت این نسبت ۳/۶۶ و ۲/۲۲ برابر نسبت به شاهد بود. افزایش مقدار EDTA از ۱/۵ به ۳ میلی‌مول باعث کاهش معنی‌داری ($P < 0.01$) در میزان سرب اندام هوایی ذرت شده است، در صورتی که افزایش همین مقدار EDTA باعث افزایش در میزان سرب اندام هوایی پنبه شد (شکل ۵). غلظت سرب در اندام هوایی گیاهان در سطوح مختلف تیمارهای اسیدسولفوریک دارای روند خاصی نبود. به ترتیبی که افزایش مقدار ۰/۵ میلی‌مول اسید سولفوریک در خاک باعث افزایش معنی‌داری در سرب اندام هوایی آفتابگردان و افزایش ۱ میلی‌مول اسید سولفوریک در مورد ذرت افزایش سرب اندام هوایی را به دنبال داشته است (شکل ۵). در مورد پنبه گزارش‌ها حاکی از آن است که پنبه برای گیاه‌جذب گیاه مناسبی به نظر نمی‌رسد (۱). افزودن مقدار ۳ میلی‌مول EDTA در خاک باعث افزایش قابل توجهی در میزان سرب موجود در کلم در عرض ۷ تا ۱۴ روز پس از کاربرد این ماده در خاک شده است، به طوری که مقدار سرب در اندام‌های کلم را به ۴۰ و ۴۶ برابر شاهد رسانده است (۲۱). افزودن مقدار ۱/۵ و ۳ میلی‌مول EDTA در خاک‌هایی با pH حدود ۵/۵ باعث افزایش میزان کادمیم و نیکل به اندازه ۲ و ۴ برابری نمونه‌های شاهد شده است (۱۳). بعضی از پژوهشگران گزارش کرده‌اند EDTA و HEDTA می‌توانند غلظت سرب موجود در اندام هوایی را تا ۱۰۰ برابر بیشتر از مقدار آن در گیاهان شاهد افزایش دهند (۹). تحقیقات متعدد در مورد استفاده از اسید نشان می‌دهد که یکی از مکانیسم‌های اثرگذار بر افزایش جذب فلزات از خاک توسط گیاه، کاهش در مقدار pH خاک است (۱۹). در خاک مورد آزمایش به علت ظرفیت بافری زیاد خاک کاهش pH اتفاق نیفتاده است. لذا نمی‌توان کاهش میزان pH را دلیلی بر جذب سرب در غلظت‌های یاد شده بیان کرد. اما شاید بتوان افزایش در میزان سرب اندام هوایی را به افزایش انتقال سرب از ریشه به اندام هوایی ربط داد چرا که



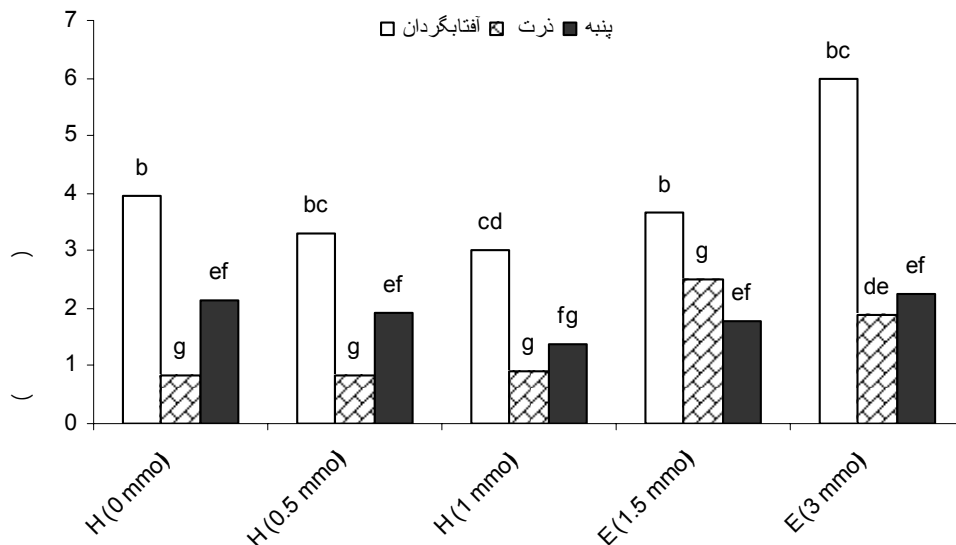
شکل ۵. تأثیر متقابل سطوح مختلف اسید سولفوریک و EDTA و نوع گیاه بر میانگین سرب در اندام هوایی گیاهان بر حسب میلی گرم سرب در کیلوگرم. H₂SO₄ (H), EDTA (E).



شکل ۶. میانگین جذب کل سرب گیاهان تحت اثر سطوح مواد افزاینده حلالیت. H₂SO₄ (H), EDTA (E).



شکل ۷. جذب کل سرب بر حسب میکروگرم در اندام هوایی هر گلدان تحت تأثیر مصرف اسید سولفوریک و یا EDTA. H₂SO₄ (H), EDTA (E).



شکل ۸. میانگین غلظت سرب ریشه گیاهان بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک

تحت تأثیر مصرف اسید سولفوریک و یا EDTA. H₂SO₄ (H), EDTA (E)

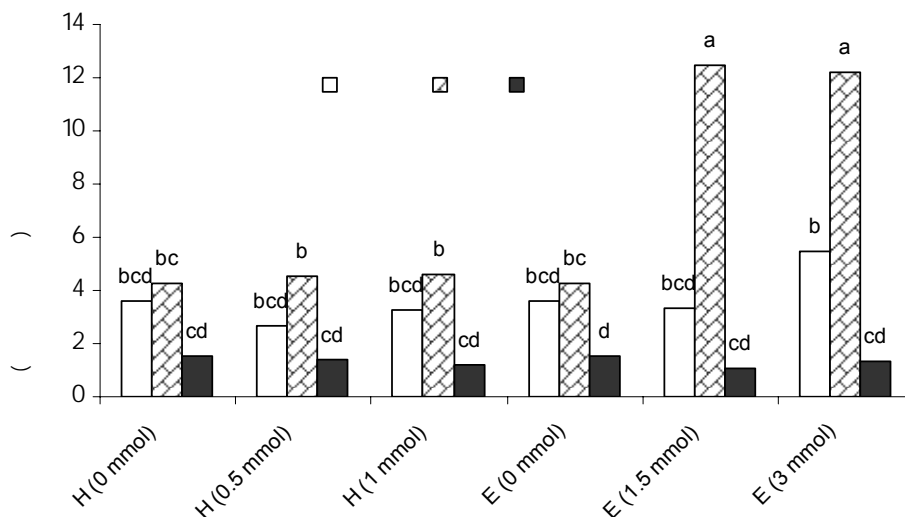
سرب ریشه آفتابگردان شد. ولی مقدار افزایش سرب ریشه پنبه و ذرت با ۳ میلی‌مول EDTA، نسبت به سطح ۱/۵ میلی‌مول اختلاف قابل‌تمایزی را نشان نمی‌دهد. اثر مقدار ۱/۵ میلی‌مول EDTA نیز در گیاهان مختلف بود، به ترتیبی که اثر آن در آفتابگردان و پنبه مشهود نیست، در صورتی که در ذرت باعث افزایش ۳/۰۷ برابری نسبت به شاهد شده است (شکل ۸). این شکل نشان می‌دهد افزایش EDTA به خاک در هیچ یک از سطوح باعث افزایش معنی‌داری در مقدار سرب ریشه گیاه پنبه نشده است. مشاهدات مشابهی در مورد عنصر کروم با افزودن ۳ میلی‌مول EDTA در مورد آفتابگردان توسط چن و ترسا (۴) گزارش شده است. افزودن مقدار ۰/۸ میلی‌مول EDTA باعث شده است مقدار کادمیم ریشه آفتابگردان ۲ برابر مقدار مربوطه توسط ۰/۱ EDTA شود (۲۴).

با وجود این‌که ریشه ذرت در بین گیاهان دارای کمترین غلظت سرب بود، میزان کل سرب ریشه ذرت بیشتر از ریشه‌های آفتابگردان و پنبه بود. شاید دلیل این امر را بتوان به تولید زیست‌توده بیشتر ذرت در مقایسه با دو گیاه دیگر ربط داد. افزایش مقدار EDTA از مقدار ۱/۵ به ۳ میلی‌مول در

نشان دادند، اگرچه آفتابگردان در جذب نسبی این عناصر در اندام هوایی و ریشه با استفاده از EDTA موفق عمل کرده بود اما کاهش زیست‌توده این گیاه بر اثر افزایش EDTA سبب شد مقدار کل جذب این عناصر کاهش یابد و لذا این پژوهشگران نتیجه گرفتند که استفاده از آفتابگردان برای گیاه‌جذبی با استفاده از EDTA و در شرایط خاک‌هایی با pH حدود ۵/۵ مناسب نیست. مقایسه بین مقادیر سرب کل در اندام هوایی نشان داد مقدار ۳ میلی‌مول EDTA اگرچه در مقایسه با گیاهان شاهد توانست غلظت سرب را در اندام هوایی به طور معنی‌داری افزایش دهد اما کاهش مقدار سرب در اندام هوایی در مقایسه با مقدار ۱/۵ میلی‌مول این ماده سبب شد مقدار ۳ میلی‌مول از EDTA مناسب نباشد.

سرب ریشه گیاهان

آفتابگردان در مقایسه با دو گیاه دیگر توانست حداکثر مقدار سرب را در ریشه خود انباشت کند ($P < 0/01$) در صورتی که ذرت کمترین مقدار سرب را در ریشه خود داشت. افزایش EDTA در یک کیلوگرم خاک باعث افزایش معنی‌داری در



شکل ۹. مقدار سرب ریشه بر حسب میکروگرم در هر گلدان، تحت تأثیر سطوح مواد افزوده شده

جدول ۲. نسبت سرب اندام هوایی به ریشه در گیاهان

گیاه	نسبت سرب اندام هوایی به ریشه
آفتابگردان	۰/۲۲ (b)
ذرت	۰/۶۸ (a)
پنبه	۰/۱۷ (b)

EDTA در خاکها باعث افزایش نسبت کادمیم و نیکل اندام هوایی به ریشه شده است (۴). از آنجایی که پس از اعمال تیمارها از غلظت عناصر در ریشه گیاهان کاسته شده است، لذا به نظر می‌رسد که افزودن EDTA به خاک باعث افزایش انتقال عناصر از ریشه به ساقه شده است. افزایش نسبت سرب اندام هوایی به ریشه در مورد کلم و لوبیا و گندم نیز گزارش شده است. به طوری که نتایج شن و همکاران (۲۱) نشان داد مقدار نسبت سرب از ۰/۳۵ در گیاهان شاهد کلم به مقدار ۰/۷۳ در تیمار ۱/۵ میلی‌مول EDTA رسید.

نتیجه‌گیری

با وجود اینکه ذرت در بعضی از قسمت‌ها نتوانسته است غلظت عنصر را در اندام خود بیشتر از آفتابگردان و پنبه افزایش دهد اما تولید زیست‌توده زیادتر در بخش‌های هوایی و ریشه

کیلوگرم باعث افزایش مقدار کل سرب در ریشه گیاهان نگردید (شکل ۹)، که احتمالاً به دلیل عدم تفاوت غلظت سرب ریشه در سطوح ۱/۵ و ۳ میلی‌مول EDTA در مورد پنبه و ذرت و کاهش زیست‌توده ریشه در مورد آفتابگردان است.

نسبت غلظت سرب اندام هوایی به ریشه گیاهان

در انتخاب گیاهان به منظور گیاه پالایی، گیاهی مناسب‌تر است که بتواند علاوه بر جذب زیاد عنصر، نسبت انتقال آن از ریشه به ساقه بیشتر باشد. نتایج نشان می‌دهد که ذرت در بین گیاهان با ۰/۶۸ دارای بالاترین نسبت غلظت سرب اندام هوایی به ریشه بود و آفتابگردان و پنبه به ترتیب با مقادیر ۰/۲۲ و ۰/۱۷ پس از ذرت قرار گرفتند (جدول ۲) و این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$). نسبت مذکور با افزایش EDTA به خاک از میانگین ۰/۲۹۵ به ۰/۴۲۱ افزایش پیدا کرد. تحقیقات دیگر نیز نشان داده‌اند که مقدار ۱/۵ و ۳ میلی‌مول

سولفوریک دارای قابلیت اندکی در افزایش مقدار فراهم شده عنصر و در نهایت مقدار جذب شده توسط گیاه داشت. در صورتی که استفاده از کلات EDTA با کاشت گیاهانی از قبیل ذرت و آفتابگردان همراه باشد می‌تواند برای رسیدن به هدف پاکسازی خاک‌های آلوده مؤثر باشد. مقدار ۱/۵ میلی‌مول EDTA در موارد مختلف نشان داد که دارای قابلیت بیشتر و یا برابر با مقدار ۳ میلی‌مول از این ماده در افزایش مقدار قابل جذب گیاهان مختلف است. از آنجایی که مصرف زیاد از حد این ماده می‌تواند باعث حلالیت بیشتر عناصر سنگین در خاک شود بدون این‌که جذب گیاه را افزایش دهد، لذا استفاده از سطوح غلظتی بالاتر EDTA توصیه نمی‌شود.

باعث شد که این گیاه بتواند مقدار بیشتری از عنصر را در اندام‌های خود انباشت نماید. به نظر می‌رسد ذرت در بین سه گیاه بیشترین قابلیت را در گیاه‌جذبی داشته باشد. پنبه قابلیت کمی در تجمع عناصر سنگین از خاک نشان داد. در صورتی که هدف از کشت گیاه در مناطق آلوده، عدم انتقال فلزات سنگین به گیاه و در نهایت عدم ورود به زنجیره غذایی باشد، پیشنهاد می‌شود از گیاه پنبه بدین منظور استفاده شود. اسید سولفوریک و کلات EDTA که برای افزایش قابلیت فراهمی عناصر سرب و کادمیم مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای توانایی متفاوتی بودند. افزایش EDTA به خاک توانست باعث افزایش قابلیت فراهمی عنصر سنگین سرب در خاک شود، حال آن‌که اسید

منابع مورد استفاده

1. Angelova, V., R. Ivanova, V. Delibaltova and K. Vanov. 2004. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). *Indust. Crops and Prod.* 19:197-205.
2. Blaylock, M.J., D.E. Salt, S. Dushenkov, O. Zakharova, C. Gussman and Y. Kapulnik. 1997. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *Environ. Sci. Technol.* 31:860-865.
3. Chaney, R.L., M. Malik, Y.M. Lim, S.L. Brown, E.P. Brewer, J.S. Angle and A.J.M. Baker. 1997. Phytoremediation of soil metals. *Curr. Opin. Biotechnol.* 8:279-284.
4. Chen, H. and C. Teresa. 2001. EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr and Ni uptake by *Helianthus annuus*. *Chemosphere* 45:21-28.
5. Davis, A., J.W. Drexler, M.V. Ruby and A. Nicholson. 1993. Micromineralogy of mine wastes in relation to lead bioavailability, Butte, Montana. *Environ. Sci. Technol.* 27:1415-1425.
6. Deram, A., D. Petit, B. Rabinson, R. Brooks, P. Gregg and C.V. Halluwyn. 2000. Natural and induced heavy metal accumulation by *Arrhenatherum elatius*: implication for phytoremediation communications. *Soil Sci. and Plant Anal.* 31:413-421.
7. Greman, H., S. Velikonja-Bolta, D. Vodnik, B. Kos and D. Lestan. 2001. EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: Metal accumulation, leaching and toxicity. *Plant and Soil* 235:105-114.
8. Huang, J.W., J.J. Chen, W.R. Berti and S.D. Cunningham. 1997. Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environ. Sci. Technol.* 31:800-805.
9. Huang, J.W. and S.D. Cunningham. 1996. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New Phytologist.* 134:175-184.
10. Kabata-Pendias, A. 2004. Soil-Plant transfer of trace elements-an environmental issue. *Geoderma* 122:143-149.
11. Kabata-pendias, A. and H. Pendias. 2000. Trace Element in Soils and Plants. 2nd ed., CRC Press., Boca Raton, FL.
12. Knight, B., F.J. Zhao, S.P. McGrath and Z.G. Shen. 1997. Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thalasspi caerulescens* in contaminated soils and its effect on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution. *Plant and Soil* 197:71-78.
13. Madrid, F. and M.B. Kirkham. 2000. Heavy metal uptake by barely and sunflower grown in abandoned animal lagoon soil. *Plant and Soil* 195:62-68.
14. McGrath, S.P., C.M.D. Sidoli, A.J.M. Baker and R.D. Reeves. 1993. The potential for the use of metal-accumulating plants for the in situ decontamination of metal-polluted soils. PP. 673-677. *In: H.J.P. Eijsackers and T. Hamers (Eds.), Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection.* Kluwer Academic Pub., Dordrecht, The Netherlands.
15. Means, J.L., T. Kucak and D.A. Crerar. 1980. Relative degradation rates of NTA, EDTA and DTPA and environmental implications. *Environ. Pollut. Ser. B* 1:45-60.
16. Raskin, I. and B.D. Ensley. 2000. *Phytoremediation of Toxic Metals Using Plants to Clean Up the Environment.* A

Wiley-Interscience Publication.

17. Raskin, I., P.B.N.A. Kumar, V. Dushenkov and D.E. Salt. 1994. Bioconcentration of heavy metals by plants. *Curr. Opin. Biotechnol.* 5:285–290.
18. Salt, D.E., R.C. Prince, I.J. Pickering and I. Raskin. 1995. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiol.* 109:1427–1433.
19. Sauve, S., M. McBride and W. Hendershot. 1998. Soil solution speciation of lead.(II): effect of organic matter and pH. *Soil Sci. Soc. Am.* 62:618-621.
20. Shen, Z.G., F.J. Zhao and S.P. McGrath. 1997. Uptake and transport of zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the nonhyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum*. *Plant Cell Environ.* 20:898–906.
21. Shen, Z.G., X.D. Li, C.C. Wang, H. M. Chen and H. Chua. 2002. Lead phytoextraction from contaminated soils with high-biomass plant species. *J. Environ. Quality* 31:1893-1900.
22. Shu, W.S., Z.H. Ye, C.Y. Lan, Z.Q. Zhang and M. H. Wong. 2001. Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environ. Int.* 26:389-394.
23. Terry, N. and G. Banuelos. 2000. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Lewis Pub., Boca Raton.
24. Turgut, C., M.K. Pepe and T.J. Curight. 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*. *Environ. Pollut.* 131:147-154.
25. Walker, D.J., R. Clemente and M.P. Bernal. 2004. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyretic mine wast. *Chemosphere* 57:215-224.
26. Zhang, M., A.K. Alva, Y.C. Li and D.V. Calvert. 1997. Chemical association of Cu, Zn, Mn, and Pb in selected sandy citrus soils. *Soil Sci.* 162:181–188.