



استفاده از کشت مخلوط برای پالایش گیاهی خاک‌های آلوده به کادمیوم در حضور کی‌لیت‌های طبیعی و مصنوعی

دنیا متقی^۱، مهدی همایی^{۲*} و رسول راهنمایی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
^۲ استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
^۳ استادیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۷

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۱۰

Applying Multicropping System to Phytoremediate Cadmium Contaminated Soils by Using Natural and Synthetic Chelates

Donya Mottaghi¹, Mehdi Homaei^{2*} & Rasoul Rahnamaei³
¹MSc. Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

²Prof., Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

³Assistant Prof., Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

Abstract

Soil contamination is one of the most recent and important environmental challenges worldwide. The so-called phytoremediation is one of the reclamation technologies used to decontaminate polluted soils. Application of some chelate agents can increase the efficiency of phytoremediation. However, this technology has not been evaluated for decontamination of heavy metals under multicropping system. The objective of this study was to evaluate the phytoremediation capability of cress and radish, as a mixed-culture by using some natural and synthetic chelates in Cd-contaminated soils. Consequently, a factorial experiment in a completely randomized design with 20 treatments and three replications was conducted. The experimental factors were consisted of five levels of cadmium (0, 3, 10, 25, 50 mg Cd kg⁻¹ soil, added as Cd(NO₃)₂, EDTA and NTA chelates, and chelate concentrations of 1 and 2.5 mmol kg⁻¹ soil. Results indicated that the Cd phytoextraction potential in multicropping culture is higher than the single-cropping system. Phytoextraction of cadmium from contaminated soils for both cress and radish plants, in EDTA2.5 and Cd50 treatments was 7.7 and 5.7 kg Cd ha⁻¹ in multicropping system and was 4 and 5.4 kg Cd ha⁻¹ in the single-cropping system. Furthermore, radish could phytoextract more cadmium than cress from the contaminated soils. The results further indicated that EDTA could enhance more Cd phytoextraction than NTA and can better assist to transfer cadmium from roots to shoots.

Keywords: Cadmium, Chelate, Cress, Multicropping, Phytoremediation, Radish.

چکیده

آلودگی خاک از چالش‌های مهم عصر کنونی است. یکی از روش‌های آلودگی‌زدایی خاک، روش پالایش گیاهی است. استفاده از عوامل کی‌لیت کننده در خاک می‌تواند کارایی این روش را افزایش دهد. تاکنون از روش کشت مخلوط برای بررسی روش گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین استفاده نشده است. هدف از این پژوهش، ارزیابی توانایی گیاه پالایی دو گیاه شاهی و تربچه، به صورت کشت مخلوط، در حضور دو نوع کی‌لیت طبیعی و مصنوعی در خاک‌های آلوده به کادمیوم بود. بدین منظور آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۰ تیمار و سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل کادمیوم در پنج سطح (۰، ۳، ۱۰، ۲۵، ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از منبع نیترات کادمیوم)، کی‌لیت‌های اتیلن دی آمین تترا استیک اسید^۱ EDTA و نیتریلو تری استیک اسید^۲ NTA در دو غلظت ۱ و ۲/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک بود. نتایج نشان داد پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در کشت مخلوط بیشتر از روش تک‌کشتی است به گونه‌ای که پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی‌لیت EDTA2.5 در Cd50 گیاه تربچه و شاهی در کشت مخلوط به ترتیب ۷/۷ و ۵/۷ و در روش تک‌کشت ۵/۴ و ۴ کیلوگرم کادمیوم در هکتار است. همچنین، پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک توسط تربچه بیش از شاهی بود. نتایج همچنین نشان داد که کی‌لیت EDTA در مقایسه با NTA در استخراج سبز کادمیوم از خاک موثرتر بوده و انتقال کادمیوم از ریشه به شاخساره در حضور کی‌لیت EDTA بیشتر از NTA است.

کلمات کلیدی: پالایش گیاهی، تربچه، شاهی، کادمیوم، کشت مخلوط، کی‌لیت.

* Corresponding Author. E-mail Address: mhomaee@modares.ac.ir

۱- مقدمه

زیست‌فراهمی فلزات سنگین، در نتیجه افزایش جذب آن‌ها به وسیله گیاهان می‌شود [۸].

در پژوهشی که با هدف توسعه مدل ساده گیاه پالایی خاک‌های آلوده به نیکل و کادمیوم به طور جداگانه و توأم با استفاده از دو گیاه کلم زینتی و شاهی صورت گرفت مشخص شد که گیاه شاهی مقاومت بیشتری نسبت به کلم زینتی در خاک‌های آلوده به نیکل و کادمیوم دارد. همچنین زمان لازم برای گیاه پالایی خاک‌های آلوده به کادمیوم و یا نیکل کمتر از زمان لازم جهت گیاه پالایی خاک‌های آلوده به ترکیب نیکل و کادمیوم است [۹].

کی‌لیت‌های EDTA و NTA و بسیاری دیگر از انواع ترکیبات آلی طبیعی و مصنوعی را می‌توان برای افزایش زیست‌فراهمی فلزات سنگین در خاک استفاده کرد. برپایه تحقیقات به عمل آمده استفاده از کی‌لیت به‌ویژه EDTA، موجب افزایش غلظت سرب محلول در خاک می‌شود و جذب در ریشه و انتقال سرب را به شاخساره گیاه هویج افزایش می‌دهد [۱۰].

در پژوهشی عربی و همکاران [۱۱]، اثر افزودن کی‌لیت طبیعی اسید سیتریک و کی‌لیت‌های مصنوعی EGTA^۴ و HEDTA^۵ در خاک‌هایی که به صورت مصنوعی به کادمیوم آلوده شده‌اند و نیز توانایی آن‌ها در افزایش پالایش گیاهی کادمیوم را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که کی‌لیت‌های مصنوعی نسبت به اسید سیتریک که یک کی‌لیت طبیعی است، حلالیت را بیشتر افزایش داده و در نتیجه باعث جذب بیشتر کادمیم می‌شوند.

Quartacci و همکاران [۱۲]، با بررسی اثر کی‌لیت NTA و اسیدسیتریک روی جذب کادمیوم توسط گیاه خردل هندی نشان دادند که این ترکیبات دسترسی گیاه به کادمیوم و در نتیجه جذب آن را افزایش می‌دهند. همچنین Wenzel و همکاران [۱۳]، بیان داشتند که اضافه کردن NTA باعث می‌شود که گیاه کلزا میزان روی و کادمیوم بیشتری را در خود ذخیره کند. در پژوهشی دیگر که با هدف ارزیابی کارایی در افزایش غلظت سرب محلول در خاک و مقایسه NTA اثرات آن‌ها بر مقدار جذب سرب توسط گیاه شاهی انجام شد، نتایج نشان داد که استفاده از اسیدهای آمینو پلی کربوکسیلیک موجب افزایش غلظت سرب محلول در خاک و سپس جذب توسط ریشه و انتقال آن به شاخساره شاهی می‌شود. بنابراین مصرف این ترکیبات باعث افزایش بازده و کاهش زمان آلودگی‌زدایی سرب از

آلودگی خاک با فلزات سنگین، از چالش‌های مهم در بسیاری از کشورهای جهان است. فرآیندهای صنعتی و معدنی، گسترش شهرنشینی، سموم کشاورزی و روش‌هایی مانند دفع نامناسب پسماندها از جمله عوامل موثر در آلودگی خاک است. این وضعیت به خاطر اثرات زیانبار اکولوژیک آلاینده‌ها، پی‌آمدهای زیست‌محیطی خطرناکی را در پی دارد [۱]. برای کنترل و یا کاهش آلودگی خاک به وسیله فلزات سنگین، روش‌های بیوشیمیایی، الکتروکینتیک، آبشویی و پالایش گیاهی پیشنهاد شده است. پالایش گیاهی روشی مبتنی بر استفاده از گیاهان برای زدودن و یا کم کردن خطر آلاینده‌ها از زیست‌بوم است. این فن‌آوری در مقایسه با سایر روش‌های پالایش، بسیار کم هزینه و ساده است [۲ و ۲۵]. در این میان کادمیوم و سرب از مهم‌ترین آلاینده‌های سمی بوده که از منابع مختلف و به روش‌های گوناگون مانند عملیات مختلف زراعی (کودپاشی - سم‌پاشی)، استخراج معدن، فعالیت‌های صنعتی و یا از طریق آگزوز اتومبیل به محیط‌زیست، گیاهان و زنجیره غذایی وارد می‌شوند [۳ و ۲۶]. کودهای فسفوری نیز دارای مقادیر زیادی کادمیوم هستند که باعث تجمع این فلز در خاک می‌شوند [۴ و ۲۷].

بر اساس پژوهشی که جعفرنژادی و همکاران [۵] روی ویژگی‌های موثر خاک در غلظت کل و قابل جذب کادمیوم و تجمع آن در بذر گندم در خاک‌های آهکی استان خوزستان انجام دادند، مشخص شد که تفاوت شرایط اقلیمی، خاکی، اعمال مدیریت‌های مختلف کشت و کار و نوع رقم گندم از دلایل افزایش کادمیوم در خاک و بذر گندم خاک‌های مورد بررسی است. همچنین در پژوهشی دیگر که با هدف تخمین کادمیوم موجود در بذر گندم و ارتباط آن با خصوصیات خاک در ۴۰۰۰ کیلومتر مربع مزرعه گندم انجام گرفت، مشخص شد که عدم مدیریت صحیح در بخش کشاورزی و استفاده بیش از حد از کود یکی از عوامل مهم در افزایش غلظت کادمیوم در قشر سطحی خاک و بذر گندم است. میزان مصرف کودهای فسفاتی و تناوب زراعی از عوامل مهم در حلالیت و تغییرات منطقه‌ای میزان کادمیوم موجود در خاک‌های زراعی است [۷۶].

مهم‌ترین فاکتور محدودکننده در گیاه‌پالایی فلزات سنگین از خاک، زیست‌فراهمی اندک آن‌ها برای گیاه است که موجب کاهش بازده پالایش گیاهی می‌شود. افزودن کی‌لیت‌های طبیعی و یا مصنوعی به خاک، موجب افزایش

خاک شد و در این رابطه تاثیر EDTA بیشتر از NTA بوده است [۱۴].

از طرف دیگر، افزودن کی‌لیت به خاک، میزان شستشو و انتقال این فلزات را به آب‌های زیرزمینی افزایش می‌دهد. EDTA به دلیل ایجاد کمپلکس‌های فلزی قوی و همچنین پایداری زیاد در محیط، خطر مهمی برای آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی محسوب می‌شود. تقسیط و مدیریت صحیح آبیاری می‌تواند به طور قابل توجهی خطرات جانبی کاربرد EDTA را کاهش دهد [۱۳].

Li و همکاران نیز دریافتند که EDTA از EDDS^۶ در استخراج سرب و کادمیوم موثرتر است. هم‌چنین دریافتند که با اضافه کردن ۵ میلی‌مول بر کیلوگرم کی‌لیت EDTA به خاک‌های آلوده به کادمیوم، میزان جذب این عنصر توسط گیاه خردل هندی ۲۶ برابر افزایش می‌یابد. در این تحقیق مشخص شد که میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده در بودن کی‌لیت، ۱۱۴ برابر نسبت به نبودن کی‌لیت افزایش می‌یابد [۱۵]. در پژوهشی دیگر توسط Quartacci و همکاران [۱۲]، مشخص شد که در حضور ۱۰ میلی‌مول بر کیلوگرم کی‌لیت NTA مقدار کادمیوم جذب شده توسط گیاه خردل هندی دو برابر و مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک هشت برابر نسبت به حالت بدون کی‌لیت افزایش می‌یابد.

مدل‌های گیاه‌پالایی آلاینده‌ها، برای شناخت فرآیندهای بنیادین حاکم بر این فناوری و بهبود کارایی آن برای مدیریت خاک‌های آلوده بسیار با ارزش است. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان مقدار جذب آلاینده‌ها را به وسیله گیاه برآورد و به تبع آن زمان لازم برای پالایش آن‌ها را از مکان‌های آلوده کمی کرد. هم‌چنین، مدل‌سازی جذب و اندوزش آلاینده‌ها قبل از اجرا کردن آن در سطح مزرعه می‌تواند اطلاعاتی ارزشمند در مورد این فرایند در اختیار مدیران قرار دهد. از این‌رو، داوری و همایی مدلی کلان برای پالایش سبز خاک‌های آلوده به نیکل بر مبنای توابع کاهش خطی و غیر خطی و مدلی نوین برای گیاه‌پالایی توأمان نیکل و کادمیوم از خاک‌های آلوده بر مبنای توابع ضرب‌پذیر عملکرد، ارائه کردند [۱۶ و ۱۷].

پژوهش دیگری مبنی بر مدل‌سازی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نیکل و کادمیوم توسط کلم زینتی و شاهی انجام و کارایی مدل‌های پیشنهادی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بررسی شده است. مدل پیشنهادی قادر است نرخ گیاه‌پالایی کادمیوم از خاک را به وسیله گیاه شاهی برآورد کند [۱۸]. در پژوهش انجام شده با

هدف مدل‌سازی پالایش سبز خاک‌های آلوده به سرب و کادمیوم، مشخص شد که با افزایش آلودگی در خاک توانایی اسفناج و شاهی در زدودن آلودگی ثابت می‌ماند. در این پژوهش مدل‌هایی برای برآورد کلی زمان لازم برای پالایش سبز کادمیوم از خاک ارائه شده است [۱۹].

با توجه به اهمیت این موضوع و به منظور افزایش کارایی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، در این پژوهش، اثر کی‌لیت مصنوعی EDTA و کی‌لیت طبیعی NTA بر زیست‌فراهمی فلز سنگین کادمیوم و نیز اثر آن‌ها بر افزایش استخراج گیاهی کادمیوم در یک سیستم کشت مخلوط بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

خاک مورد آزمایش از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری یک زمین زراعی برداشت و پس از خشک کردن در مجاورت هوا از الک ۵ میلی‌متر رد شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک شامل فراوانی نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتری، هدایت الکتریکی و اسیدیته در عصاره گل اشباع خاک، ماده آلی خاک به روش واکلی و بلک (Walkley and Black)، جرم ویژه ظاهری به روش کلوخه و پارافین و مقدار کادمیوم اولیه خاک با استفاده از عصاره‌گیر ۰/۰۱ مولار CaCl_2 اندازه‌گیری شد. رطوبت ظرفیت زراعی خاک (θ_{FC}) به روش صفحات فشاری در مکش ۳۳ کیلو پاسکال اندازه‌گیری شد.

نمونه‌هایی از خاک آزمایشی با نیترات کادمیوم $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ به میزان ۰، ۳، ۱۰، ۲۵، ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک (به ترتیب تیمارهای: $\text{Cd}0$ ، $\text{Cd}3$ ، $\text{Cd}10$ ، $\text{Cd}25$ و $\text{Cd}50$) آلوده شدند. بدین منظور، محلول کادمیوم با آب‌فشان به طور یکنواخت روی نمونه خاک و جداگانه روی هر گلدان، پاشیده شد تا کادمیوم یکنواخت در خاک گلدان پراکنده شود. نمونه‌های همگن شده خاک به گلدان‌هایی با قطر ۲۵ و ارتفاع ۲۸ سانتی‌متر (عمق ریشه‌دوانی گیاه) اضافه شد. برای ایجاد تعادل میان کادمیوم و خاک، گلدان‌ها به مدت ۸ هفته در چرخه تر و خشک شدن قرار گرفتند. سپس دو هفته دیگر نیز در حالت رطوبت ظرفیت زراعی قرار داده شدند. در حدود ۱۰ روز پیش از برداشت گیاهان، کی‌لیت‌های EDTA و NTA، به شکل نمک‌های $\text{Na}_2\text{EDTA}^{\text{V}}$ و $\text{H}_3\text{NTA}^{\text{A}}$ ، با غلظت‌های ۱ و ۲/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک (به ترتیب تیمارهای $\text{EDTA}1^{\text{V}}$ ،

جذب اتمی بود به وسیله دستگاه کوره گرافیتی تجزیه شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه 9.1) استفاده شد. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$PP_{[shoot+root]} = \left[\frac{Cd_{[shoot+root]} \times Y_{[shoot+root]}}{1000} \right] \quad (1)$$

که در آن $PP_{[shoot+root]}$ پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک (کیلوگرم کادمیوم بر هکتار)، $Cd_{[shoot+root]}$ غلظت کادمیوم در شاخساره و ریشه (میلی گرم بر کیلوگرم) و $Y_{[shoot+root]}$ عملکرد ماده خشک شاخساره و ریشه گیاه (تن در هکتار) است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر کی‌لیت‌های EDTA و NTA بر غلظت

کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده با محلول ۰/۰۱ مولار $CaCl_2$ به عنوان تابعی از تیمارهای آزمایشی، به تفکیک نوع گیاه تحت کشت در شکل ۱ ارائه شده است. مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده پس از برداشت گیاهان از گلدان‌ها برآورد شده است. هر چند ممکن است مقدار آن با مقادیری که در زمان حضور گیاهان در خاک بوده است کمی تفاوت داشته باشد اما به‌رغم این تفاوت، این داده‌ها می‌توانند اثر تیمارهای آزمایشی (غلظت کادمیوم و غلظت و نوع کی‌لیت) و همچنین تاثیر نوع گیاه و نوع کشت ساده یا مخلوط بر غلظت کادمیوم قابل عصاره‌گیری برای گیاهان در حال رشد را نشان دهند.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت کادمیوم در تیمارهای تحت کشت گیاه شاهی در شکل ۱- الف نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که هم مقدار کادمیوم اولیه و هم مقدار و نوع کی‌لیت اثر قابل توجهی بر مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک گذاشته‌اند. مستقل از نوع و مقدار کی‌لیت، داده‌ها نشان می‌دهند که مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده متناسب با مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. همچنین در هر سطحی از غلظت اولیه کادمیوم، افزایش غلظت کی‌لیت‌ها موجب افزایش قابل توجه در غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک شده است. این اثر برای کی‌لیت EDTA بسیار بزرگ‌تر از NTA است. در مورد

EDTA 2.5^{10} ، NTA 1^{11} و NTA 2.5^{12} به صورت محلول در آب و طی دو دوره آبیاری به خاک اضافه شدند.

گیاه شاهی (*Lepidum Sativum L.*) به صورت شیاریهایی در امتداد شعاع گلدان و گیاه تربچه (*Raphanus Sativus L.*) به صورت نقطه‌ای در بین شیاریهای شعاعی به صورت مخلوط در گلدان‌ها کاشته شدند. برای حفظ توازن بیومس، گیاهان شاهی و تربچه به نسبت ۱ به ۳ و شعاعی کاشته شدند تا ارتباط کافی بین دو گیاه در گلدان برقرار باشد. بذرها در عمق تقریباً ۳ برابر قطرشان کاشته شدند. تربچه‌ها با فاصله ۳-۲ سانتی‌متری از یکدیگر کاشته شدند و فضای بین آن‌ها با کاشت شیاری شاهی پر شد. پس از دو تا سه هفته، بوته‌ها تنک شدند، به گونه‌ای که ۱۲ عدد تربچه و ۳۶ عدد شاهی در هر گلدان باقی ماند. طی دوره رشد، با کوتاه شدن طول روز از نور مصنوعی استفاده شد. هیچکدام از گلدان‌ها به آفات گیاهی آلوده نشد. مقدار عناصر غذایی N, P, K, Zn, Fe و کربن آلی خاک اندازه‌گیری و توصیه کودی لازم بر مبنای نتایج انجام شد. کود اوره در سه نوبت و کود سولفات پتاسیم در یک نوبت همراه با آب آبیاری به گلدان‌ها داده شد. آبیاری با توجه به نیاز گیاهان هر ۴۸ ساعت یکبار انجام و رطوبت گلدان‌ها در حد رطوبت ظرفیت زراعی نگه داشته شد. دمای گلخانه در طول شب و روز به میزان $22^{\circ}C$ که دمای بهینه برای رشد گیاه شاهی و تربچه است، نگهداری شد.

در انتهای دوره رشد، نمونه‌های گیاهی برداشت و با آب مقطر و اسید کلریدریک رقیق شسته شدند. نمونه‌ها در آون ($105^{\circ}C$ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت) خشک شده و پس از تعیین وزن، با آسیاب برقی خرد شدند. از روش اکسیداسیون تر برای عصاره‌گیری کادمیوم از نمونه‌های بافت گیاه استفاده شد. بدین‌منظور، آمیزه‌ای از اسیدنیتریک، اسیدپرکلریک و اسیدسولفوریک با نسبت حجمی ۴۰، ۴ و ۱ به کار رفت. برای عصاره‌گیری کادمیوم از خاک با استفاده از کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار، مقدار ۱۰ گرم خاک هوا خشک توزین و در ارلن‌مایر ۱۲۵ میلی‌لیتری ریخته و به آن ۲۰ میلی‌لیتر از عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار افزوده شد. درب ارلن‌ها با فویل پلاستیکی پوشانیده و به مدت ۲ ساعت در تکان‌دهنده‌ای با دور ۱۲۰ دور در دقیقه تکان داده شدند. سپس نمونه‌ها با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف شدند. غلظت کادمیوم در عصاره‌ها توسط دستگاه جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری شد. نمونه‌هایی که غلظت فلز در آن‌ها پایین‌تر از محدوده حساسیت دستگاه

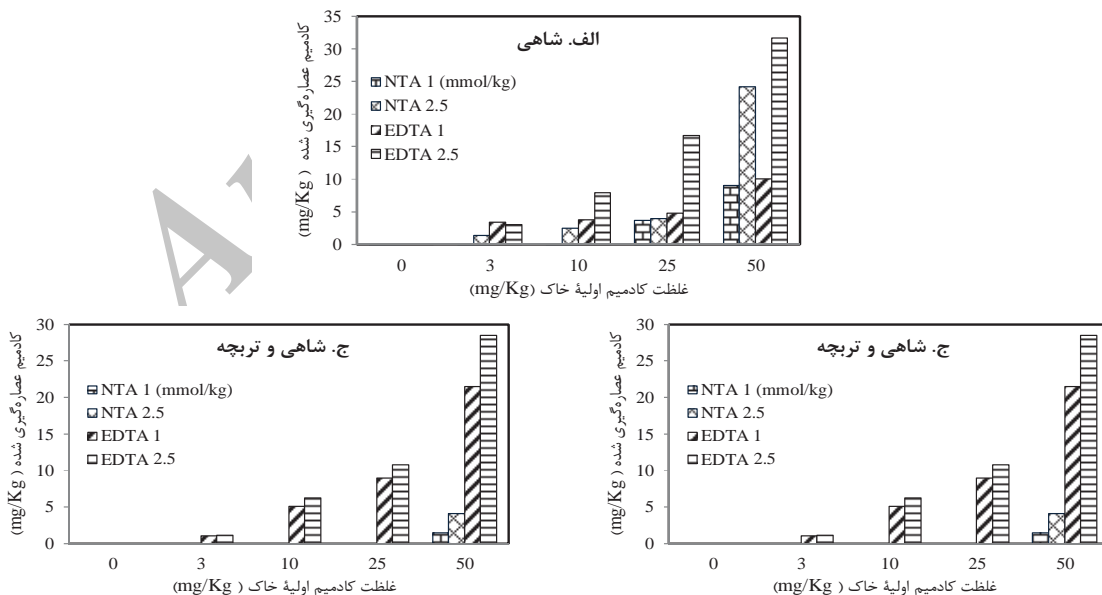
از داده‌های شکل ۱ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده (با محلول ۰/۰۱ مولار CaCl_2) از خاک تحت کشت شاهی در اکثر تیمارها بیش از خاک تحت کشت تربچه است. میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک تحت کشت مخلوط نیز کمتر از خاک تحت کشت تربچه است. این تفاوت‌ها توانایی بیشتر گیاه تربچه را نسبت به شاهی و همچنین توانایی بیشتر سیستم کشت مخلوط را نسبت به کشت جداگانه تربچه و شاهی در جذب کادمیوم از خاک نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل آماری داده‌های حاصل از اندازه‌گیری کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک در تیمارهای ذکر شده به وسیله نرم‌افزار SAS در جدول ۱ مشاهده می‌شود. محاسبات نشان می‌دهد که کی‌لیت‌ها، مستقل از سطح کادمیوم، اثر معنی‌داری بر میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک تحت کشت شاهی و تربچه در روش تک‌کشت و خاک تحت کشت مخلوط شاهی و تربچه دارند. همچنین غلظت کادمیوم اولیه خاک نیز مستقل از نوع کی‌لیت اثر معنی‌داری بر میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک تحت کشت شاهی و تربچه در روش تک‌کشت و خاک تحت کشت مخلوط شاهی و تربچه دارند. افزون بر اینکه اثر متقابل سطح اولیه کادمیوم و تیمار کی‌لیت نیز تاثیر معنی‌داری بر میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک تحت کشت شاهی و تربچه در روش تک‌کشت و خاک کشت مخلوط شاهی و تربچه دارند.

هر یک از دو کی‌لیت نیز، افزایش غلظت آن‌ها رابطه‌ای مثبت با مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده نشان می‌دهد. در تمام سطوح کادمیوم، به جز تیمار Cd50، غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک در تیمار EDTA2.5 بزرگ‌تر از EDTA1 و در تیمار EDTA1 بزرگ‌تر از NTA2.5 بود. در تیمار Cd50 مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده در NTA2.5 بیشتر از EDTA1 است که نشان‌دهنده زیاده‌بودن غلظت کادمیوم کمپلکس شده با NTA نسبت به توان گیاه برای جذب Cd است.

نتایج حاصل از عصاره‌گیری کادمیوم از خاک تیمارهای تحت کشت گیاه تربچه (شکل ۱-ب) روندی مشابه با تیمارهای تحت کشت گیاه شاهی را نشان داد. در کشت تربچه مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک، در تمام سطوح کادمیوم، در تیمار EDTA2.5 بزرگ‌تر از EDTA1 و در تیمار EDTA1 بزرگ‌تر از NTA2.5 و در تیمار NTA2.5 بزرگ‌تر از NTA1 است.

در تیمارهای تحت کشت مخلوط گیاهان شاهی و تربچه نیز افزایش غلظت اولیه کادمیوم و کی‌لیت‌ها موجب افزایش قابل توجهی در مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک شد (شکل ۱-ج). داده‌های آزمایشی نشان می‌دهد که در کشت مخلوط همانند تیمارهای تحت کشت تربچه، غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک در تیمارهای NTA1 و NTA2.5 بسیار کمتر از تیمارهای EDTA است.



شکل ۱- غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک پس از برداشت گیاهان، برآورد شده با استفاده از محلول ۰/۰۱ مولار CaCl_2 ، به صورت تابعی از غلظت اولیه کادمیوم و غلظت و نوع کی‌لیت‌ها تحت کشت الف) گیاه شاهی ب) گیاه تربچه و ج) مخلوط شاهی و تربچه

جدول ۱- تجزیه واریانس میانگین مربعات غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک با محلول ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم در خاک تحت کشت مخلوط و روش تک کشت

میانگین مربعات (MS)		درجه آزادی	منابع تغییرات
تک کشت	کشت مخلوط	(df)	(S.O.V)
شاهی	تریچه		
۳۷۲/۷۶*	۱۵۹/۴۱*	۳	کی لیت
۴۸۵/۱*	۶۱۹/۷۵*	۴	کادمیوم
۹۳/۰۳*	۴۷/۴۱*	۱۲	کی لیت × کادمیوم
۰/۰۸	۰/۱۷	۴۰	خطا

*آزمون t-student، معنی دار در سطح ۵ درصد

و شاخساره شاهی بیشتر از ریشه تریچه و ریشه تریچه بیشتر از ریشه شاهی است.

کادمیوم موجود در ریشه و شاخساره گیاهان در تیمار NTA2.5 در شکل ۲- ب نشان داده شده است. در این تیمار، همچون تیمار NTA1، افزایش کادمیوم اولیه تقریباً در اکثر موارد تأثیری مثبت بر افزایش کادمیوم موجود در گیاهان گذاشته است. غلظت کادمیوم در ریشه شاهی و تریچه و شاخساره تریچه در روش تک کشت و ریشه شاهی در روش کشت مخلوط در تیمار Cd50 بی نظمی نشان می‌دهد که ممکن است به علت اثر سمیت کادمیوم بر رشد گیاه باشد. در این تیمار میزان کادمیوم موجود در بافت گیاه در روش کشت مخلوط در اکثر موارد بیشتر از روش تک کشت است. مستقل از نوع و مقدار کی لیت و نوع کشت همانند تیمار NTA1 میزان کادمیوم جذب شده توسط گیاه در شاخساره تریچه بیشتر از شاخساره شاهی و شاخساره شاهی بیشتر از ریشه تریچه و ریشه تریچه بیشتر از ریشه شاهی است.

شکل ۲- ج نشان دهنده میزان کادمیوم در گیاهان در تیمار EDTA1 است. همانند دو تیمار قبل، این نتایج نشان می‌دهد که مقدار کادمیوم اولیه و نوع گیاه اثری قابل توجه بر مقدار کادمیوم موجود در ریشه و شاخساره دارند. داده‌ها نشان می‌دهند که مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده از اندام گیاه متناسب با مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. افزایش کادمیوم عصاره‌گیری شده از گیاهان در کشت مخلوط در مقایسه با روش تک کشت بیشتر از دو تیمار قبل در تیمار EDTA1 مشهود است. میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده مانند دو تیمار قبل در شاخساره تریچه بیشتر از شاخساره شاهی و شاخساره شاهی بیشتر از ریشه تریچه و ریشه تریچه بیشتر از ریشه شاهی است.

۳-۲- اثر کی لیت‌های EDTA و NTA بر تجمع کادمیوم در ریشه و بخش هوایی تریچه و شاهی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت کادمیوم به روش عصاره‌گیری تر با آمیزه سه اسید، به صورت تابعی از تیمارهای آزمایشی، به تفکیک غلظت و نوع کی لیت به کار رفته در اندام هوایی و ریشه دو گیاه تریچه و شاهی در شکل ۲ ارائه شده است. غلظت کادمیوم پس از برداشت گیاهان از گلدان‌ها برآورد شده است. لذا این داده‌ها اثر تیمارهای آزمایشی (غلظت کادمیوم و غلظت و نوع کی لیت) و همچنین تأثیر نوع گیاه و نوع کشت (ساده یا مخلوط) را بر غلظت کادمیوم جذب شده در اندام‌های مختلف گیاه نشان می‌دهند.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت کادمیوم در تیمار NTA1 تحت کشت گیاه شاهی و تریچه در شکل ۲- الف نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مقدار کادمیوم اولیه و نوع گیاه اثر قابل توجهی بر غلظت کادمیوم موجود در ریشه و شاخساره گذاشته‌اند. مستقل از نوع و مقدار کی لیت، داده‌ها نشان می‌دهند که غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده از بافت‌های گیاه متناسب با مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که در این تیمار غلظت کادمیوم موجود در شاخساره تریچه در روش کشت مخلوط بیشتر از روش تک کشت است ولی غلظت کادمیوم در ریشه تریچه و ریشه شاهی در هر دو روش کشت تفاوت چندانی ندارند در حالی که غلظت کادمیوم در شاخساره شاهی در روش تک کشت بیشتر از کشت مخلوط است. در این تیمار با افزایش غلظت کادمیوم اولیه غلظت کادمیوم موجود در گیاه نیز افزایش می‌یابد. مستقل از نوع و مقدار کی لیت میزان کادمیوم جذب شده توسط گیاه در هر دو روش کشت در شاخساره تریچه بیشتر از شاخساره شاهی

کادمیم جذب شده به وسیله ریشه نسبت به اندام هوایی افزایش بیشتری می‌یابد [۲۲]. علت تجمع بیشتر کادمیوم در شاخساره شاهی و تربچه نسبت به ریشه در پژوهش حاضر، استفاده از کی‌لیت است که موجب افزایش جذب کادمیوم توسط ریشه گیاه تربچه و شاهی و همچنین افزایش انتقال کادمیوم از ریشه به شاخساره می‌شود. همچنین علت تجمع بیشتر کادمیوم در تربچه نسبت به شاهی سیستم یکپارچه آوندی در تربچه است که جذب و انتقال کادمیوم به شاخساره را افزایش می‌دهد.

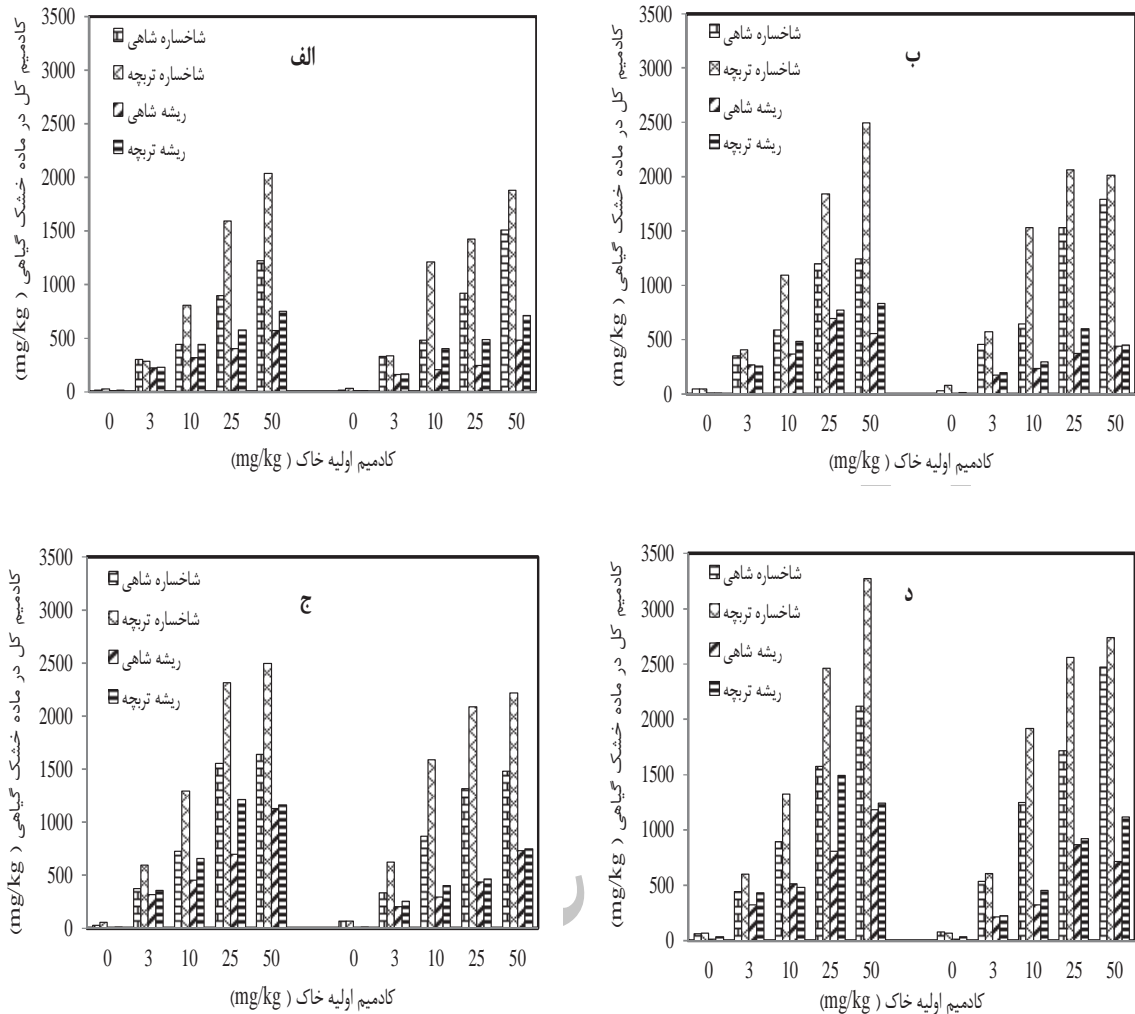
نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌های حاصل از اندازه‌گیری کادمیوم و وزن خشک شاهی و تربچه در حضور کادمیوم و کی‌لیت پس از برداشت در روش تک‌کشت در جدول ۲ نشان می‌دهد که نوع گیاه، سطح اولیه کادمیوم، کی‌لیت و اثر متقابل بین آن‌ها اثر معنی‌داری بر میزان کادمیوم و وزن خشک شاهی و تربچه در روش تک‌کشت داشته است. بیشترین تأثیر مربوط به اثر متقابل نوع گیاه و سطح اولیه کادمیوم است. نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌های حاصل از اندازه‌گیری کادمیوم و وزن خشک شاهی و تربچه در حضور کادمیوم و کی‌لیت پس از برداشت در کشت مخلوط در جدول ۳ نشان می‌دهد که نوع گیاه، سطح اولیه کادمیوم، کی‌لیت، اثر متقابل بین گیاه و سطح اولیه کادمیوم، اثر متقابل تیمار کی‌لیت و گیاه و اثر متقابل تیمار کی‌لیت و سطح اولیه کادمیوم اثر معنی‌داری بر میزان کادمیوم و وزن خشک شاهی و تربچه در روش تک‌کشت داشته است. ولی اثر متقابل نوع گیاه، تیمار کی‌لیت و سطح اولیه کادمیوم اثر معنی‌داری بر کادمیوم تربچه و شاهی در کشت مخلوط نداشته است. بیشترین تأثیر مربوط به اثر متقابل نوع گیاه و سطح اولیه کادمیوم است.

نتایج حاصل از تحلیل آماری مقایسه میانگین صفات وزن خشک و غلظت کادمیوم شاهی و تربچه در روش تک‌کشت و کشت مخلوط با استفاده از نرم‌افزار SAS در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج میزان کادمیوم شاهی و تربچه پس از برداشت در کشت مخلوط بیش از روش تک‌کشت است و با هم تفاوت معنی‌دار دارند. با توجه به نتایج تحلیل آماری میزان کادمیوم اندازه‌گیری شده در تربچه در هر دو روش کشت بیش از کادمیوم اندازه‌گیری شده در شاهی است. با توجه به نتایج تحلیل آماری وزن خشک شاهی پس از برداشت در هر دو روش کشت بیش از وزن خشک اندازه‌گیری شده تربچه است. همچنین وزن خشک شاهی و تربچه در کشت مخلوط بیش از روش تک‌کشت است و اختلاف معنی‌دار دارند.

مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده از گیاهان در تیمار EDTA2.5 کشت گیاه شاهی و تربچه در شکل ۲-د نشان می‌دهد که همانند تیمارهای قبل، کادمیوم اولیه و نوع گیاه اثر قابل توجهی بر مقدار کادمیوم موجود در ریشه و شاخساره گذاشته‌اند. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده از اندام گیاه متناسب با مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده مانند دو تیمار قبل در شاخساره تربچه بیشتر از شاخساره شاهی و شاخساره شاهی بیشتر از ریشه تربچه و ریشه تربچه بیشتر از ریشه شاهی است. با توجه به نتایج تیمارهای قبل میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده در تیمار EDTA2.5 به دلیل حلالیت بیشتر کادمیوم بیشترین میزان را دارد و به طور مشهودی در اکثر قسمت‌های دو گیاه در کشت مخلوط بیشتر از روش تک‌کشت است. بیشترین میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده بین تیمارها، تیمار EDTA2.5 در حضور Cd50 است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که به طور کلی، مقدار کادمیوم در شاخساره گیاه تربچه و شاهی بیشتر از ریشه دو گیاه تربچه و شاهی است. در گیاه تربچه انتقال کادمیوم به شاخساره از گیاه شاهی بیشتر است که ممکن است به دلیل سیستم یکپارچه آوندی در غده تربچه باشد.

بررسی نتایج هم‌چنین نشان می‌دهد که در کشت مخلوط، غلظت کادمیوم در شاخساره گیاه شاهی در تیمارهای EDTA1، NTA2.5، EDTA1 و EDTA2.5 نسبت به تیمار شاهد، به ترتیب ۱۶/۷، ۴۴/۴، ۶۷/۹ و ۷۸/۹ درصد افزایش داشته است. در پژوهش دیگری نیز نشان داده شده بود که با افزایش غلظت سرب در خاک، تجمع این عنصر در بافت گیاهی افزایش می‌یابد [۲۰]. سرب (Pb) با مقدار معمول ۲ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک کم‌تر حرکت ترین عنصر سنگین در خاک به شمار می‌آید. در بین فلزات سنگین، فلز کادمیوم به دلیل تحرک و پویایی زیاد در خاک و جذب توسط گیاه و سمیت قابل توجه دارای اهمیتی خاص است [۲۱]. استفاده از کشت مخلوط در خاک آلوده به کادمیوم که دارای تحرک بیشتری نسبت به سرب در خاک است، به همراه کی‌لیت EDTA و NTA موجب افزایش انتقال کادمیوم از ریشه به شاخساره و تجمع بیشتر کادمیوم در شاخساره نسبت به ریشه شاهی و تربچه می‌شود.

نتایج یکی از پژوهش‌های انجام شده با هدف مدل‌سازی گیاه‌پالایی کادمیوم و سرب از خاک‌های آلوده نیز نشان داده که با افزایش غلظت کادمیم در خاک، مقدار



شکل ۲- غلظت کادمیوم در ریشه و اندام‌های هوایی تربچه و شاهی برآورد شده با استفاده از روش عصاره‌گیری تر در سیستم کشت مخلوط (سمت چپ شکل‌ها) و سیستم تک‌کشت (سمت راست شکل‌ها) به صورت تابعی از غلظت کادمیوم و غلظت نوع کی‌لیت: الف) NTA1 (ب) NTA2.5 (ج) EDTA1 و د) EDTA2.5.

جدول ۲- جدول تجزیه واریانس میانگین مربعات غلظت کادمیوم و وزن خشک در شاهی و تربچه، در حضور کادمیوم و کی‌لیت در روش تک‌کشت

میانگین مربعات (MS)		درجه آزادی (df)	منابع تغییرات (S.O.V)
وزن خشک	غلظت کادمیوم		
۲۵۷۴۵۱۲*	۱۳۹۴۶۸۴۷*	۱	گیاه
۳۲۵۸۶۹*	۲۷۱۹۲۶۱*	۳	کی‌لیت
۱۹۶۶۹۶۲۹*	۲۶۵۴۷۳۲۰*	۴	کادمیوم
۳۷۲۶۹*	۲۲۷۱۰۹*	۶	گیاه×کی‌لیت
۳۵۶۱۶۴*	۲۰۴۷۶۵۴*	۸	گیاه×کادمیوم
۱۳۸۰۰۰*	۳۳۸۰۶۶*	۱۲	کی‌لیت×کادمیوم
۳۸۲۱۶*	۹۸۶۹۳*	۲۴	گیاه×کی‌لیت×کادمیوم
۳۸۹۱/۹	۲۲۴۸۴/۲	۱۲۰	خطا

*آزمون t-student، معنی دار در سطح ۵ درصد

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس میانگین مربعات غلظت کادمیوم و وزن خشک در شاهی و تربچه، در حضور کادمیوم و کی‌لیت در کشت مخلوط

میانگین مربعات (MS)		درجه آزادی (df)	منابع تغییرات (S.O.V)
وزن خشک	غلظت کادمیوم		
۶۸۰۳۹۱۶*	۱۵۸۹۱۸۲۳*	۱	گیاه
۶۳۷۳۶۸*	۳۹۶۸۸۸۹*	۳	کی‌لیت
۳۹۷۱۰۰۰۰*	۳۴۸۱۲۸۴۷*	۴	کادمیوم
۵۶۰۶۶*	۴۳۴۵۱۲*	۶	گیاه×کی‌لیت
۲۹۳۱۸۱۷*	۲۵۲۸۰۴۴*	۸	گیاه×کادمیوم
۲۴۲۸۲۱*	۵۷۲۱۰۱*	۱۲	کی‌لیت×کادمیوم
۶۹۰۳۶*	۹۳۸۵۱ ^{ns}	۲۴	گیاه×کی‌لیت×کادمیوم
۹۹۸۲	۹۲۶۹۶/۳	۱۲۰	خطا

*آزمون t-student، معنی دار در سطح ۵ درصد، ns عدم وجود اختلاف معنی دار

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات وزن خشک و مقدار کادمیوم در شاهی و تربچه در روش‌های تک‌کشت، تک‌کشت و مخلوط

وزن خشک (Kg/ha)		کادمیوم گیاه (mg/Kg)		گیاه
میانگین	میانگین	میانگین	میانگین	
D	۱۰۳۴/۱۵	B	۹۳۲/۹۱	شاهی (تک‌کشت تک‌کشت)
B	۱۵۶۹/۷۶	E	۷۳۵/۷۸	تربچه (تک‌کشت تک‌کشت)
C	۱۲۲۷/۸۵	A	۱۳۹۱/۴۷	شاهی (کشت مخلوط)
A	۱۸۱۲/۵۱	D	۷۷۸/۵۷	تربچه (کشت مخلوط)

انتخابی در مسیر سیمپلاستیک سرعت بیشتری می‌گیرد [۲۳]. کم‌ترین آثار سمیت در شاخساره در تیمار NTA1 و Cd3 مشاهده شد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری وزن خشک گیاهان، به صورت تابعی از تیمارهای آزمایشی، به تفکیک نوع گیاه تحت کشت در شکل ۳ ارائه شده است. وزن خشک هر دو بخش ریشه و اندام هوایی گیاهان پس از خارج کردن از گلدان‌ها برآورد شده است. این داده‌ها می‌تواند اثر تیمارهای آزمایشی (غلظت کادمیوم و غلظت و نوع کی‌لیت) و همچنین تاثیر نوع کشت ساده یا مخلوط بر میزان رشد و وزن خشک گیاهان را نشان دهد.

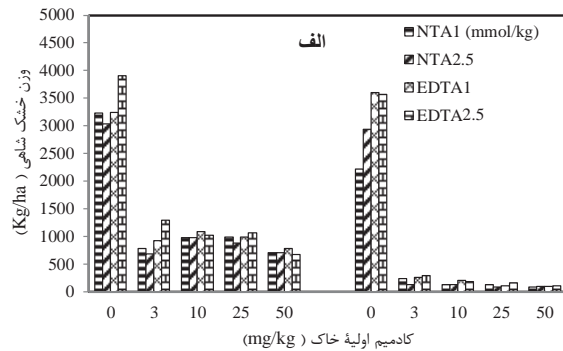
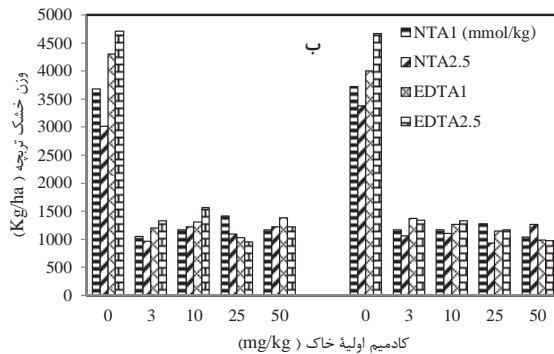
نتایج حاصل از اندازه‌گیری وزن خشک گیاه در تیمارهای تحت کشت گیاه شاهی در شکل ۳- الف نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که هم مقدار کادمیوم اولیه و هم مقدار و نوع کی‌لیت اثر قابل توجهی بر وزن خشک گیاه گذاشته‌اند. مستقل از نوع و مقدار کی‌لیت و نوع کشت، داده‌ها نشان می‌دهند که وزن خشک شاهی متناسب با مقدار کادمیوم اولیه کاهش یافته است. کاهش وزن خشک گیاه می‌تواند به دلیل از بین رفتن بخش‌هایی از گیاه و عدم امکان اندازه‌گیری وزن خشک آن‌ها باشد. هم‌چنین در سطوح پایین‌تر غلظت اولیه کادمیوم، افزایش

۳-۳- اثر کی‌لیت‌های EDTA و NTA بر رشد تربچه و شاهی

در ابتدای دوره رشد، گیاهان در حضور کادمیوم رشد خوبی داشتند. این افزایش رشد می‌تواند به خاطر وجود نیترات استفاده شده در نمک نیترات کادمیوم و یا به دلیل زیاد شدن غلظت فلز سنگین در خاک و ایجاد نوعی مکانیسم دفاعی گیاه برای کاهش اثر سمیت باشد. با افزایش غلظت فلز سنگین، گیاه برای کاهش غلظت آن در اندام خود تقسیم سلولی انجام می‌دهد تا از غلظت آلاینده در سلول خود بکاهد. این مکانیسم دفاعی مکانیسم رقیق‌سازی (Dilution)، نامیده می‌شود. هم‌چنین با جذب کادمیوم و دخالت آن در فعالیت‌های سوخت و ساز سلولی نیاز گیاه به عناصر غذایی زیاد شده و باعث جذب بیشتر عناصر غذایی و در نتیجه افزایش بیومس گیاه می‌شود.

سه روز پس از اضافه کردن کی‌لیت به خاک، نشانه‌های سمیت مانند کلروز و نقاط نکروز روی برگ‌های گیاهان مخصوصاً تربچه مشاهده شد. کلروز ممکن است به دلیل اثر رقابتی بین کادمیوم و آهن و کاهش جذب آهن باشد. بیشترین آثار سمیت در تیمارهای دارای کی‌لیت EDTA2.5 و در Cd25 و Cd50 مشاهده شد. در حضور کی‌لیت‌ها غلظت فلز محلول زیاد می‌شود و جذب

اولیه کادمیوم، افزایش غلظت کی‌لیت‌ها مخصوصاً کی‌لیت EDTA به دلیل حلالیت و جذب بیشتر عناصر غذایی مورد نیاز گیاه موجب افزایش وزن خشک گیاه شده است. هم‌چنین در غلظت Cd50 افزایش غلظت کی‌لیت به دلیل سمیت و از بین رفتن قسمتی از گیاه موجب کاهش وزن خشک گیاه شده است. این اثر در کی‌لیت EDTA بیشتر از NTA است. همان‌گونه که در نتایج دیده می‌شود، وزن خشک شاهی در روش تک‌کشت کمتر از کشت مخلوط است که می‌تواند به دلیل جذب کمتر مواد غذایی از خاک باشد، لیکن تفاوت چندانی در رشد گیاه تربچه در دو روش کشت مخلوط و تک‌کشت وجود ندارد.



شکل ۳- اثر غلظت و نوع کی‌لیت بر وزن خشک گیاه در دو روش کشت مخلوط (سمت چپ) و تک‌کشت (سمت راست) به صورت تابعی از غلظت کادمیوم و غلظت نوع کی‌لیت در کشت الف) گیاه شاهی و ب) گیاه تربچه.

نتایج نشان می‌دهد که مقدار کادمیوم اولیه و نوع و مقدار کی‌لیت مستقل از نوع کشت اثر قابل توجهی بر پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک گذاشته‌اند. مستقل از نوع و مقدار کی‌لیت و نوع کشت، داده‌ها نشان می‌دهند که پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک متناسب با مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. مستقل از سطوح اولیه کادمیوم، پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی‌لیت EDTA2.5 تقریباً در اکثر موارد در بین مقادیر و انواع دیگر کی‌لیت بیشترین مقدار را دارد. بعد از EDTA2.5 در اکثر موارد بیشترین پتانسیل در استخراج سبز کادمیوم از خاک در حضور کی‌لیت EDTA1 است. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی‌لیت EDTA بیشتر از کی‌لیت NTA بود.

پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک تحت کشت گیاه شاهی در روش کشت مخلوط در شکل ۴-الف (سمت چپ) نشان می‌دهد که مقدار کادمیوم اولیه و نوع و مقدار

غلظت کی‌لیت‌ها مخصوصاً کی‌لیت EDTA به دلیل حلالیت و جذب بیشتر عناصر غذایی مورد نیاز گیاه موجب افزایش وزن خشک گیاه شده است. در صورتی که در غلظت Cd50 افزایش غلظت کی‌لیت موجب کاهش وزن خشک گیاه شده است. این اثر در کی‌لیت EDTA بیشتر از NTA است.

وزن خشک گیاه تربچه به صورت تابعی از مقدار و نوع کی‌لیت و نوع کشت و میزان اولیه کادمیوم در شکل ۳-ب نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج در این شکل نشان می‌دهد، نظیر شکل ۳-الف، مقدار کادمیوم اولیه و هم مقدار نوع کی‌لیت اثر قابل توجهی بر وزن خشک گیاه گذاشته‌اند. مستقل از نوع و مقدار کی‌لیت و نوع کشت، داده‌ها نشان می‌دهند که وزن خشک تربچه متناسب با افزایش مقدار کادمیوم اولیه کاهش یافته است. در سطوح پایین‌تر غلظت

۳-۴- اثر کشت مخلوط بر پالایش خاک آلوده به کادمیوم

پتانسیل پالایش گیاهی کادمیوم از خاک با استفاده از معادله ۱، به صورت تابعی از تیمارهای آزمایشی، محاسبه و نتایج آن به تفکیک نوع گیاه و روش کشت در شکل ۴-الف برای گیاه شاهی و در شکل ۴-ب برای گیاه تربچه ارائه شده است. مقدار پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک پس از برداشت گیاهان از گلدان‌ها با استفاده از غلظت کادمیوم موجود در ساقه و بخش هوایی گیاه و عملکرد ماده خشک شاخساره و ریشه گیاه برآورد شده است و می‌تواند اثر تیمارهای آزمایشی (غلظت کادمیوم و غلظت و نوع کی‌لیت) و هم‌چنین تأثیر نوع گیاه و نوع کشت ساده یا مخلوط را بر پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک نشان دهد.

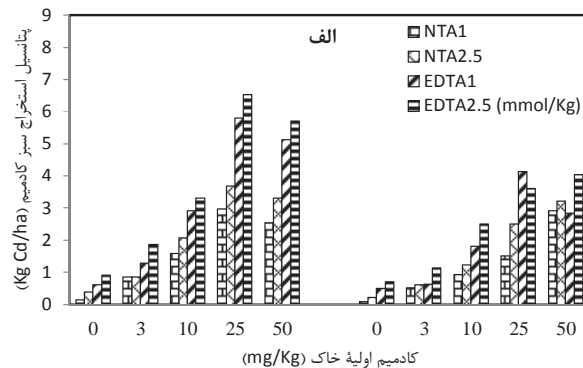
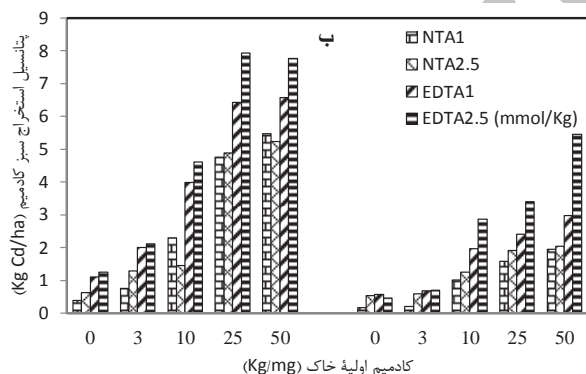
نتایج حاصل از محاسبه پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک تحت کشت گیاه شاهی در روش تک‌کشت در شکل ۴-الف (سمت راست) نشان داده شده است. این

استخراج سبز کادمیوم از خاک متناسب با مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی لیت EDTA2.5 تقریباً در اکثر سطوح اولیه کادمیوم در بین مقادیر و انواع دیگر کی لیت بیشترین مقدار را دارد. بعد از آن بیشترین پتانسیل در استخراج سبز کادمیوم از خاک در حضور کی لیت EDTA1 است.

شکل ۴- ب (سمت چپ) نتایج حاصل از محاسبه پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک تحت کشت گیاه تربچه در روش کشت مخلوط را نشان می دهد. با توجه به این نتایج، همانند تیمارهای قبل، مقدار کادمیوم اولیه و نوع و مقدار کی لیت مستقل از نوع کشت اثر قابل توجهی بر پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک گذاشته اند و داده ها نشان می دهند که پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک متناسب با افزایش مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی لیت EDTA2.5 تقریباً در اکثر سطوح اولیه کادمیوم در بین مقادیر و انواع دیگر کی لیت بیشترین مقدار را دارد. بعد از آن بیشترین پتانسیل در استخراج سبز کادمیوم از خاک در حضور کی لیت EDTA1 است. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی لیت EDTA1 بیشتر از

کی لیت مستقل از نوع کشت اثر قابل توجهی بر پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک گذاشته اند. داده ها نشان می دهند که پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک متناسب با افزایش مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. مستقل از سطوح اولیه کادمیوم، پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی لیت EDTA2.5 تقریباً در اکثر موارد بیشترین مقدار را در بین مقادیر و انواع کی لیت دارد. بعد از EDTA2.5 در اکثر موارد بیشترین پتانسیل در استخراج سبز کادمیوم از خاک در حضور کی لیت EDTA1 است. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی لیت EDTA بیشتر از کی لیت NTA بود. با توجه به نتایج به دست آمده، پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در سطوح اولیه کادمیوم و مقدار و نوع کی لیت در روش کشت مخلوط بیشتر از تک کشت است.

نتایج حاصل از محاسبه پتانسیل پالایش گیاهی کادمیوم از خاک تحت کشت گیاه تربچه در روش تک کشت در شکل ۴- ب (سمت راست) نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهد که مانند گیاه شاهی در کشت مخلوط و تک کشت، مقدار کادمیوم اولیه و نوع و مقدار کی لیت مستقل از نوع کشت اثر قابل توجهی بر پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک گذاشته اند. مستقل از نوع و مقدار کی لیت و نوع کشت، داده ها نشان می دهند که پتانسیل



شکل ۴- پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک توسط گیاه شاهی و تربچه، به صورت تابعی از غلظت کادمیوم و غلظت و نوع کی لیت در کشت الف) گیاه شاهی در روش تک کشت (سمت راست) و کشت مخلوط (سمت چپ) و ب) گیاه تربچه در روش تک کشت (سمت راست) و کشت مخلوط (سمت چپ).

شاهی در کشت مخلوط به ترتیب ۷/۷ و ۵/۷ و در روش تک کشت ۵/۴ و ۴ کیلوگرم کادمیوم در هکتار بود. هم چنین مستقل از نوع کشت پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک توسط کشت تربچه بیشتر از شاهی است. Blaylock و همکاران [۲۴] نیز با بیان اینکه پتانسیل پالایش گیاهی

نتایج به دست آمده در شکل ۴- الف و ب نشان می دهد که مستقل از نوع گیاه، پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در کشت مخلوط بیش از روش تک کشت است. به طوریکه میزان پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی لیت EDTA2.5 در Cd50 گیاه تربچه و

- [2] Khodaverdiloo H, Homae M, Liaghat A M, Mirnia KH. Quantitative assessment Ability to Phytoremediation of Cadmium contaminated soils using Cress. Iranian Journal of Agriculture science; **2008**; **13**(2): 357-371. [In Persian]
- [3] Dallalian M R, Homae M. Simulating of Phytoremediation Time of Cadmium and Copper Spiked Soil by Salvia Sclarea. Water and Soil Science; **2010**; **20**(4): 129-141. [In Persian]
- [4] Asadi Kapourchal S, Eisazadeh Lazarjan S, Homae M. Phytoremediation of cadmium polluted soils resulting from use of phosphorus fertilizers. Curr Opinion in Biotech; **2011**; **22**: S15-S152.
- [5] Jafarnejadi A R, Homae M, Sayad G, Baybordi M. 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; **2012**; **19**(2): 149-164. [In Persian]
- [6] Jafarnejadi AR, Homae M, Sayyad G. Large scale spatial variability of accumulated Cadmium in the wheat farm grains. Soil and Sediment Contamination Journal; **2011**; **20**(1): 93-99.
- [7] Jafarnejadi AR, Sayyad G, Homae M, Davami A H. Spatial variability of soil total and DTPA-extractable cadmium caused by long-term application of phosphate fertilizer, crop rotation and soil characteristics. Environ Monito Assess; **2013**; **185**: 4087-4096.
- [8] Evangelou M, Ebel W H M, Schaeffer A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soils. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. Chemosphere; **2007**; **68**: 989-1003.
- [9] Davari M, Homae M, Rahnamaei R. An analytical deterministic model for simultaneous phytoremediation of Ni and Cd from contaminated soils. Environmental science and pollution research; **2015**; DOI: 10.1007/S11356-014-4032-Z.
- [10] Bабaeian E, Homae M, Rahnamaie. Enhancing Phytoextraction of Lead Contaminated Soils by Carrot (*Daucus carota*) Using Synthetic and Natural Chelates. Journal of Soil and Water; **2012**; **26**(3): 607-618. [In Persian]
- [11] Arabi Z, Homae M, Asadi M A. Comparison Effects of Citric Acid and Synthetic Chelators In Enhancing Phytoremediation of Cadmium. Journal of science and technology of Agriculture and Natural Resources Water and Soil Science; **2010**; **14**(54): 85-95. [In Persian]

کادمیوم گیاه خردل سبز در حضور EDTA 2.5، ۳ کیلوگرم کادمیوم در هکتار در سال است، توانایی زیاد کی‌لیت EDTA را نسبت با سایر کی‌لیت‌ها در استخراج فلزات از خاک گزارش کرده‌اند. به دلیل پایداری و تحرک بالای کمپلکس EDTA-Cd در خاک، زیست تجزیه‌پذیری اندک EDTA در محیط و زیست تجزیه‌پذیری زیاد NTA در خاک، کارایی EDTA در مقایسه با NTA در استخراج کادمیوم از خاک و انتقال آن به درون گیاه بیشتر است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که گیاه تربچه و شاهی در روش کشت مخلوط توانایی بیشتری در جذب کادمیوم از خاک نسبت به روش تک‌کشت دارند. در نتیجه کشت مخلوط در پالایش سبزی کادمیوم از خاک‌های آلوده روش مناسب‌تری است. نتایج این پژوهش نشان داد که کی‌لیت EDTA در مقایسه با NTA در استخراج سبزی کادمیوم از خاک توانا تر است. هم‌چنین انتقال کادمیوم از ریشه به شاخساره در حضور کی‌لیت EDTA بیشتر از NTA بود که نشانگر توانایی بیشتر EDTA در افزایش قابلیت جذب کادمیوم است. هم‌چنین نتایج نشان داد که گیاه تربچه در جذب و تجمع کادمیوم از خاک نسبت به گیاه شاهی توانا تر است.

پی‌نوشت‌ها

- ^۱ اتیلن دی آمین تترا استیک اسید
- ^۲ نیتریلو تری استیک اسید
- ^۳ تیمار آلوده به کادمیوم در سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم
- ^۴ اتیلن گلیکول تترا استیک اسید
- ^۵ هیدروکسی اتیلن دی آمین تری استیک اسید
- ^۶ اتیلن دی آمین دی ساکسینیک اسید
- ^۷ نمک سدیمی اتیلن دی آمین تترا استیک اسید
- ^۸ نیتریلو تری استیک اسید
- ^۹ اتیلن دی آمین تترا استیک اسید در غلظت ۱ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک
- ^{۱۰} اتیلن دی آمین تترا استیک اسید در غلظت ۲/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک
- ^{۱۱} نیتریلو تری استیک اسید در غلظت ۱ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک
- ^{۱۲} نیتریلو تری استیک اسید در غلظت ۲/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک
- ^{۱۳} کلرید کلسیم

منابع

- [1] Atafar Z, Mesdaghinia A R, Nouri J, Homae M, Yunesian M, Ahmadimoghaddam M, Mahvi A H. Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration. Environmental Monitoring and Assessment; **2010**; **160**: 83-89.

- [22] Khodaverdiloo, H. and M. Homae. Modeliung Cadmium and Lead phytoextraction from contaminated soils. Polish Journal of soil Science; **2008**; **XLI**(2): 149-162.
- [23] Nowack B, Schulin R, Robinson B H. Critical assessment of chelant-enhanced metal phytoextraction. Environmental Science & Technology; **2006**; **40**(17): 5225-5232.
- [24] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, Zakharova O, Gussman C, Kapulnik Y, Ensley B D, Raskin I. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. Environmental Science and Technology; **1997**; **31**: 860-865.
- [25] Alipour N, Asadi Kapourchal S, Homae M, Mazhari, M. Assessing Chenopodium album L. to Tolerate and Phytoextract Lead from Heavy Metal Contaminated Soils. Environmental Sciences; **2015**; **13**(1):105-112. [In Persian]
- [26] Mohammadipour F, Asadi Kapourchal S. Assessing land cress potential for phytoextraction of cadmium from Cdcontaminated soils. Journal of Soil and Water Resources Conservation; **2012**; **2**(2):25-35. [In Persian]
- [27] Eisazadeh Lazarjan S, Asadi Kapourchal S, Homae M. Phytoextraction and estimating optimal time for remediation of Cd-contaminated soils by spinach (*Spinacia oleracea* L.). Journal of Agroecology; **2015**; **4**(2): 916-926. [In Persian].
- [12] Quartacci MF, Baker A J M, Navari-Izzo F. Nitroacetate and citric acid assisted phytoextraction of cadmium by Indian mustard (*Brassica juncea* (L.) Czernj, Brassicaceae). Chemosphere; **2005**; **59**: 1249-1255.
- [13] Wenzel WW, Unterbrunner R, Sommer P, Pasqualina S. Chelate-assisted phytoextraction using canola (*Brassica napus* L.) in outdoors pot and lysimeter experiments. Plant Soil; **2003**; **249**: 83-96.
- [14] Babaeian E, Homae M, Rahnemaie R. Enhancing Lead Phytoextraction of Land Cress (*Barbara verna*) Using Aminopolycarboxylic Acids. Soil and Water Journal; **2010**; **24**(6): 1-9, Mashhad, Iran. [In Persian]
- [15] Li HF, Wang Q R, Cui Y S, Dong Y T, Christie P. Slow release chelate enhancement of lead phytoextraction by corn (*Zea mays* L.) from contaminated soil-a preliminary study. Environmental Pollution; **2005**; **339**: 179-187.
- [16] Davari M, Homae M. Providing a macromodel for Phytoremediation of soils contaminated with nickel based on Linear and non-linear decline functions. Journal of Agroecology; **2011**; **1**(1): 1-13. [In Persian]
- [17] Davari M, Homae M. A New Yield Multiplicative Model for Simultaneous Phytoextraction of Ni and Cd from Contaminated Soils. Soil and Water Journal; **2011**; **25**(6): 1332-1343. Mashhad, Iran. [In Persian]
- [18] Davari M, Homae M, Khodaverdiloo H. Modeling Phytoremediation of Ni and Cd from Contaminated Soils Using Macroscopic Transpiration Reduction Functions. Journal of science and technology of Agriculture and Natural Resources Water and Soil Science; **2010**; **14**(52): 75-85. [In Persian]
- [19] Khodaverdiloo H, Homae M. Modeling Phytoremediation of Cd from Contaminated Soils Using Macroscopic Transpiration Reduction Functions. Iranian Journal of Irrigation & Drainage; **2008**; **2**(1): 1-16. [In Persian]
- [20] Asadi Kapourchal S, Asadi Kapourchal S, Pazira E, Homae M. Assessing radish potential for phytoremediation of lead-polluted soils resulting from air pollution. Plant Soil and Environment; **2009**; **55**(5): 202-206.
- [21] Mauskar JM. cadmium – An Environment Toxicant central pollution control Board, Ministry of Environment & Forests, Govt of India, parivesh Bhawan; **2007**; East Arjun Nagar, Delhi -110032.

Archive of SID