فصلنامه علوم محیطی، دوره سیزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴

۷۵-۸۸

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 دریافت: ۹۳/۳/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۷

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 کارآیی 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 درپنج سطح (۰،۳،۱۰،۲۵،۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از منبع نیترات کادمیوم)، کی‌لیت‌های اتیلن دی آمین ترا استیک اسید EDTA[۱] و نیتریلو تری استیک اسید NTA[۲] 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 به‌گونه‌ای که پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی‌لیت EDTA2.5 در Cd50[۳] 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.

کلمات‌کلیدی: پالایش گیاهی، تربچه، شاهی، کادمیوم، کشت مخلوط، کی‌لیت.

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

Donya Mottaghi[1], Mehdi Homaee[2]*& Rasoul Rahnemaie[3]
[1]*MSc. Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran*
[2]*Prof., Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran*
[3]*Assistant 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.

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

۱- مقدمه

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 پسمانده‌ها 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 اگزوز اتومبیل به محیط‌زیست، گیاهان و زنجیرهٔ غذایی وارد می‌شوند [۳ و ۲۶]. کودهای فسفری نیز دارای مقادیر زیادی کادمیوم هستند که باعث تجمع این فلز درخاک 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 درپژوهشی دیگر که با هدف تخمین کادمیوم موجود در بذر گندم و ارتباط آن با خصوصیات خاک در ۴۰۰۰ کیلومتر مربع مزرعهٔ 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 [۶و۷].

مهم‌ترین فاکتور محدودکننده در گیاه‌پالایی فلزات سنگین از خاک، زیست فراهمی اندک آن‌ها برای گیاه است که موجب کاهش بازده پالایش گیاهی می‌شود. افزودن کی‌لیت‌های طبیعی و یا مصنوعی به خاک، موجب افزایش زیست فراهمی فلزات سنگین و در نتیجه افزایش جذب آن‌ها به وسیله گیاهان می‌شود [۸].

در پژوهشی که با هدف توسعه مدل سادهٔ 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].

کی‌لیت‌هایEDTA و NTA و بسیاری دیگر از انواع ترکیبات آلی طبیعی و مصنوعی را می‌توان برای افزایش زیست فراهمی 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 شاخسارهٔ گیاه هویج افزایش می‌دهد [۱۰].

در پژوهشی عربی و همکاران [۱۱]، اثر افزودن کی لیت طبیعی اسید سیتریک و کی‌لیت‌های مصنوعی[۴] EGTA و [۵] HEDTA 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 اضافه‌کردن NTA باعث می‌شود که گیاه کلزا میزان روی و کادمیوم بیشتری را در خود ذخیره کند. در پژوهشی دیگر که با هدف ارزیابی کارآیی 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 درخاک و سپس جذب توسط ریشه و انتقال آن به شاخساره شاهی می‌شود. بنابراین مصرف این ترکیبات باعث افزایش بازده وکاهش زمان آلودگی‌زدایی سرب از

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 درسطح مزرعه می‌تواند اطلاعاتی ارزشمند درمورد این فرایند دراختیار 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 گیاه پالایی توأمان نیکل و کادمیوم از خاک‌های آلوده بر مبنای توابع ضرب‌پذیر عملکرد، ارائه کردند[۱۶و 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 گیاه پالایی کادمیوم ازخاک 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 کارآیی گیاه پالایی 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 اندازهٔ ذرات به روش هیدرومتری، هدایت الکتریکی و اسیدیته در عصارهٔ گل اشباع خاک، مادهٔ آلی خاک به روش واکلی و بلک (Walkley and Black)، جرم ویژهٔ 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 $Cd(NO_3)_2$ به میزان ۰، ۳، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک (به ترتیب تیمارهای: Cd0، Cd3، Cd10، Cd25 و Cd50) آلوده شدند. بدین منظور، محلول کادمیم با آب‌فشان به طور یکنواخت روی نمونه خاک و جداگانه روی هر گلدان، پاشیده شد تا کادمیم یکنواخت در خاک گلدان پراکنده شود. نمونه‌های همگن شده خاک به گلدان‌هایی با قطر ۲۵ و ارتفاع ۲۸سانتی‌متر (عمق ریشه‌دوانی گیاه) اضافه شد. برای ایجاد تعادل میان کادمیم و خاک، گلدان‌ها به مدت ۸ هفته در چرخهٔ تر و خشک‌شدن قرار گرفتند. سپس دو هفتهٔ 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 Na_2EDTA[۷] و H_3NTA[۸]، با غلظت‌های ۱ و ۲/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم خاک (به ترتیب تیمارهای EDTA1[۹]،

EDTA2.5[10]، NTA1[11] و NTA2.5[12]) به صورت محلول در آب و طی دو دورهٔ آبیاری به خاک اضافه شدند.

گیاه شاهی (LepidumSativum L.) به صورت شیارهایی در امتداد شعاع گلدان و گیاه تربچه (RaphanusSativus L.) به صورت نقطه‌ای در بین شیارهای 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 تقریبا ۳ برابر قطرشان کاشته شدند. تربچه‌ها با فاصلهٔ ۳-۲سانتی‌متری از یگدیگر 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 توصیهٔ 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 C^o ۲۲ که دمای بهینه برای رشد گیاه شاهی و تربچه است، نگهداری شد.

در انتهای دورهٔ رشد، نمونه‌های گیاهی برداشت و با آب مقطر و اسید کلریدریک رقیق شسته شدند. نمونه‌ها در آون (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت) خشک شده و پس از تعیین وزن، با آسیابِ 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 ارلن مایر 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 کادمیم در عصاره‌ها توسط دستگاه جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری شد. نمونه‌هایی که غلظت فلز در آن‌ها پایین‌تر از محدودهٔ حساسیت دستگاه جذب اتمی بود به وسیلهٔ دستگاه کورهٔ گرافیتی تجزیه شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار آماری SAS (نسخهٔ 9.1) استفاده شد.

پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک با استفاده از معادلهٔ زیر محاسبه شد:

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

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 (میلی‌گرم 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 $CaCl_2$[13]،به عنوان تابعی از تیمارهای آزمایشی، به تفکیک نوع گیاه تحت کشت در شکل ۱ ارائه شده است. مقدارکادمیوم عصاره‌گیری شده پس از برداشت گیاهان ازگلدان ها برآورد شده است. هر چند ممکن است مقدارآن با مقادیری که در زمان حضور گیاهان درخاک 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 ا- 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

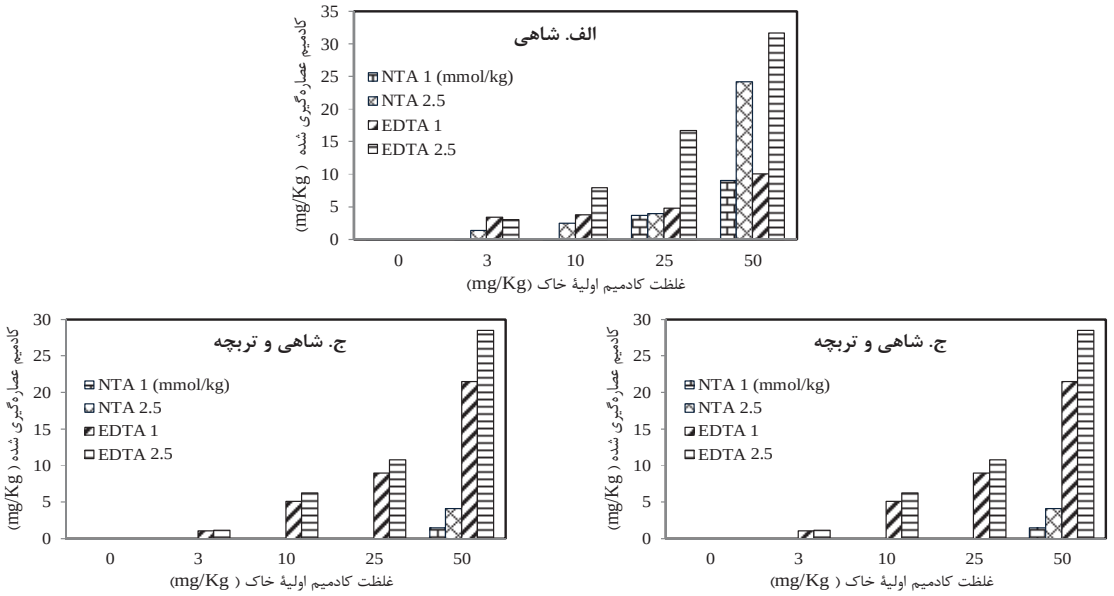
هر یک از دو کی‌لیت نیز، افزایش غلظت آن‌ها رابطه‌ای مثبت با مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده نشان می‌دهد. در تمام سطوح کادمیوم، به‌جز تیمار Cd50، غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک در تیمار EDTA2.5 بزرگ‌تر از EDTA1 و در تیمار EDTA1 بزرگ‌تر از NTA2.5 بود. در تیمارCd50 مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده در NTA2.5 بیشتر از EDTA1 است که نشان‌دهنده زیادبودن 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.

از داده‌های شکل ۱ می‌توان نتیجه گرفت که مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده (با محلول ۰/۰۱مولار$CaCl_2$) 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 جداگانهٔ 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 به‌وسیله نرم‌افزار SAS در جدول ۱مشاهده 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 اولیهٔ 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.



شکل ۱- غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده از خاک پس از برداشت گیاهان، برآورد شده با استفاده از محلول ۰/۰۱مولار$CaCl_2$، 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

جدول۱- تجزیه واریانس میانگین مربعات غلظت کادمیوم عصاره‌گیری شده ازخاک با محلول ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم در خاک تحت کشت مخلوط و روش تک‌کشت

منابع تغییرات (S.0.V)	درجهٔ‌آزادی (df)	میانگین‌مربعات (MS)		
		کشت‌مخلوط	تک‌کشت	
			تربچه	شاهی
کی‌لیت	۳	*۲۴۵/۴۱	۱۵۹/۴۱*	۳۷۲/۷۶*
کادمیوم	۴	*۳۲۱/۸۸	۶۱۹/۷۵*	۴۸۵/۱*
کی‌لیت×کادمیوم	۱۲	*۶۶/۵۲	۴۷/۴۱*	۹۳/۰۳*
خطا	۴۰	۰/۳۷	۰/۱۷	۰/۰۸

*آزمونt-student ، معنی‌دار در سطح ۵ درصد

۳-۲- اثر کی‌لیت‌های EDTA و NTA بر تجمع کادمیوم در ریشه و بخش هوایی تربچه و شاهی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت کادمیوم به روش عصاره‌گیری‌تر با آمیزهٔ سه اسید، به صورت تابعی از تیمارهای آزمایشی، به تفکیک غلظت و نوع کی‌لیت به کار رفته در اندام هوایی و ریشهٔ دو گیاه تربچه 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 کی‌لیت) و هم‌چنین تاثیر نوع گیاه و نوع کشت (ساده یا مخلوط) را بر غلظت کادمیوم جذب شده دراندام‌های مختلف گیاه نشان می‌دهند.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت کادمیوم در تیمارNTA1 تحت کشت گیاه شاهی و تربچه 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 کی‌لیت، 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 تیمارغلظت کادمیوم موجود در شاخساره تربچه در روش کشت مخلوط بیشتر از روش تک‌کشت است ولی غلظت کادمیوم در ریشه تربچه و ریشه شاهی در هر دو روش کشت تفاوت چندانی ندارند در حالی که غلظت کادمیوم در شاخسارهٔ شاهی در روش تک‌کشت 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 کی‌لیت میزان کادمیوم جذب شده توسط گیاه درهر دو روش کشت در شاخسارهٔ تربچه بیشتر از شاخسارهٔ شاهی و شاخسارهٔ شاهی بیشتر از ریشهٔ تربچه و ریشهٔ تربچه بیشتر از ریشهٔ شاهی است.

کادمیوم موجود در ریشه و شاخسارهٔ گیاهان در تیمارNTA2.5 در شکل ۲- ب نشان داده شده است. در این تیمار، همچون تیمارNTA1، افزایش کادمیوم اولیه تقریباً در اکثر موارد تاثیری مثبت بر افزایش کادمیوم موجود در گیاهان گذاشته است. غلظت کادمیوم در ریشه شاهی و تربچه و شاخسارهٔ تربچه در روش تک‌کشت و ریشهٔ شاهی در روش کشت مخلوط در تیمارCd50 بی نظمی نشان می‌دهد که ممکن است به علت اثرسمیت کادمیوم بر رشد گیاه باشد. در این تیمار میزان کادمیوم موجود در بافت گیاه در روش کشت مخلوط در اکثر موارد بیشتر از روش تک‌کشت است. مستقل از نوع و مقدار کی‌لیت و نوع کشت همانند تیمار NTA1میزان کادمیوم جذب شده توسط گیاه در شاخسارهٔ تربچه بیشتر از شاخسارهٔ شاهی و شاخسارهٔ شاهی بیشتر از ریشهٔ تربچه و ریشهٔ تربچه بیشتر از ریشهٔ شاهی است.

شکل۲- ج نشان‌دهنده میزان کادمیوم در گیاهان در تیمارEDTA1 است. همانند دو تیمار قبل،این نتایج نشان می‌دهد که مقدارکادمیوم 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 تک‌کشت بیشتر از دو تیمار قبل در تیمار EDTA1 مشهود است. میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده مانند دو تیمار قبل در شاخسارهٔ تربچه بیشتر از شاخسارهٔ شاهی و شاخسارهٔ شاهی بیشتر از ریشهٔ تربچه و ریشهٔ تربچه بیشتر از ریشهٔ شاهی است.

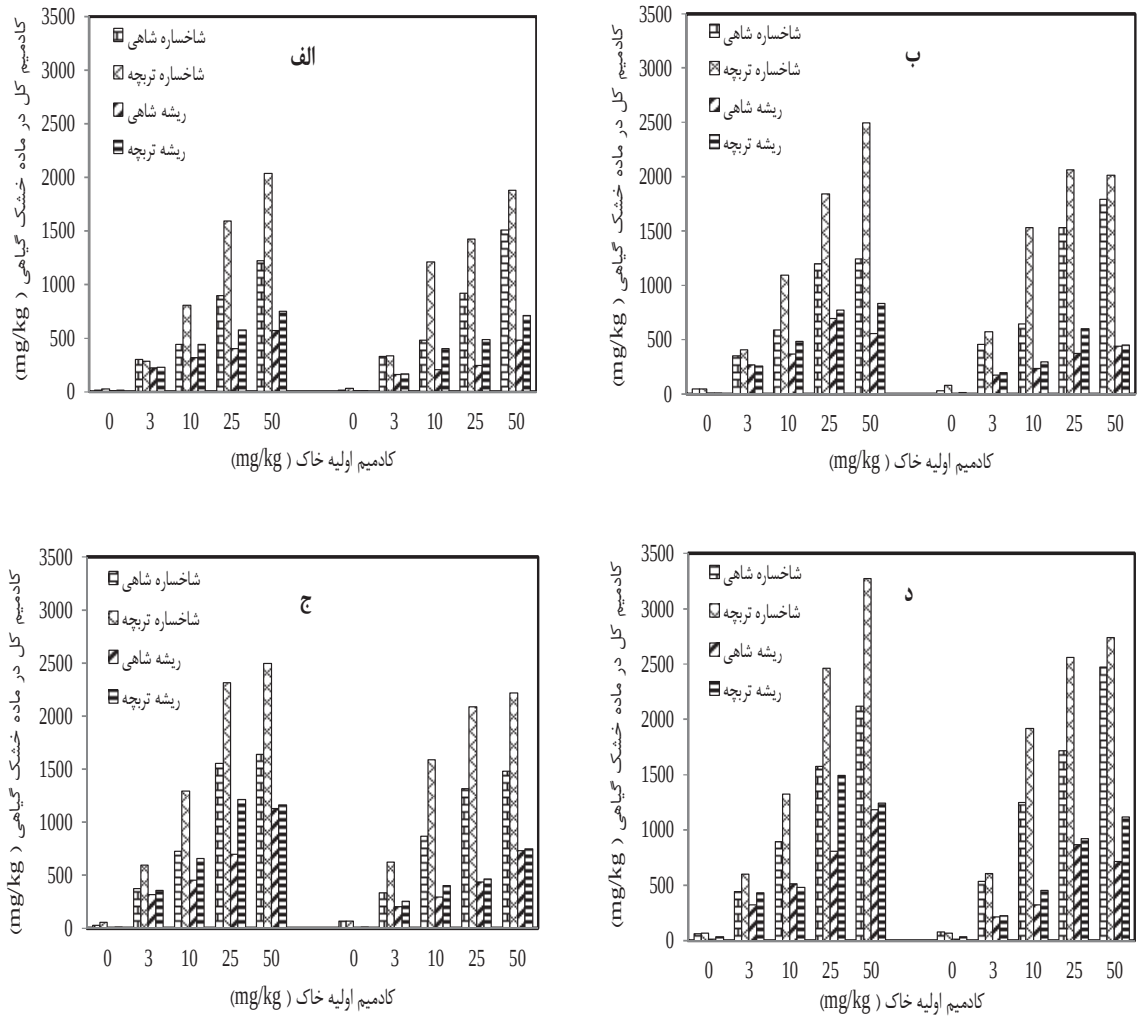
مقدارکادمیوم عصاره‌گیری شده از گیاهان در تیمار EDTA2.5 کشت گیاه شاهی و تربچه در شکل ۲- د نشان می‌دهد که همانند تیمارهای قبل، کادمیوم اولیه و نوع گیاه اثر قابل توجهی بر مقدار کادمیوم موجود در ریشه و شاخساره گذاشته‌اند. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که مقدار کادمیوم عصاره‌گیری شده از اندام گیاه متناسب با مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. میزان کادمیوم عصاره‌گیری شده مانند دو تیمار قبل در شاخسارهٔ تربچه بیشتر از شاخسارهٔ شاهی و شاخسارهٔ شاهی بیشتر از ریشهٔ تربچه و ریشهٔ تربچه بیشتر از ریشهٔ 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 طورکلی، مقدار کادمیوم در شاخسارهٔ گیاه تربچه و شاهی بیشتر از ریشهٔ دو گیاه تربچه و شاهی است. در گیاه تربچه انتقال کادمیوم به شاخساره از گیاه شاهی بیشتر است که ممکن است به دلیل سیستم یکپارچهٔ آوندی در غدهٔ تربچه باشد.

بررسی نتایج هم‌چنین نشان می‌دهد که در کشت مخلوط، غلظت کادمیوم درشاخساره گیاه شاهی در تیمارهایNTA1، NTA2.5، EDTA1 وEDTA2.5 نسبت به تیمار شاهد، به‌ترتیب 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 کم تحرک ترین عنصر سنگین درخاک به شمار می‌آید. در بین فلزات سنگین، فلزکادمیوم 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 کادمیم جذب شده به وسیله ریشه نسبت به اندام هوایی افزایش بیشتری می‌یابد [۲۲]. علت تجمع بیشتر کادمیوم در شاخسارهٔ شاهی و تربچه نسبت به ریشه در پژوهش حاضر، استفاده از کی‌لیت است که موجب افزایش جذب کادمیوم توسط ریشهٔ 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 اولیهٔ 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 اولیهٔ 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 اولیهٔ کادمیوم، کی‌لیت، اثر متقابل بین گیاه و سطح اولیهٔ کادمیوم، اثر متقابل تیمار کی‌لیت و گیاه و اثر متقابل تیمار کی‌لیت و سطح اولیهٔ 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 اولیهٔ کادمیوم اثر معنی‌داری بر کادمیوم تربچه و شاهی در کشت مخلوط نداشته است. بیشترین تاثیر مربوط به اثر متقابل نوع گیاه و سطح اولیهٔ کادمیوم است .

نتایج حاصل از تحلیل آماری مقایسه میانگین صفات وزن خشک و غلظت کادمیوم شاهی و تربچه در روش تک کشت و کشت مخلوط با استفاده از نرم‌افزارSAS در جدول۴ 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.



شکل۲- غلظت کادمیوم در ریشه و اندام‌های هوایی تربچه و شاهی برآورد شده با استفاده از روش عصاره‌گیری تر در سیستم تحت کشت مخلوط (سمت چپ شکل‌ها) و سیستم تک‌کشت (سمت راست شکل‌ها) به صورت تابعی ازغلظت کادمیوم وغلظت ونوع 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

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

*آزمونt-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

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

*آزمونt-student، معنی دار در سطح ۵ درصد،ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار

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

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

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 درفعالیت‌های سوخت و ساز سلولی نیاز گیاه به عناصر غذایی زیاد شده و باعث جذب بیشتر عناصر غذایی و در نتیجه افزایش بیومس گیاه می‌شود.

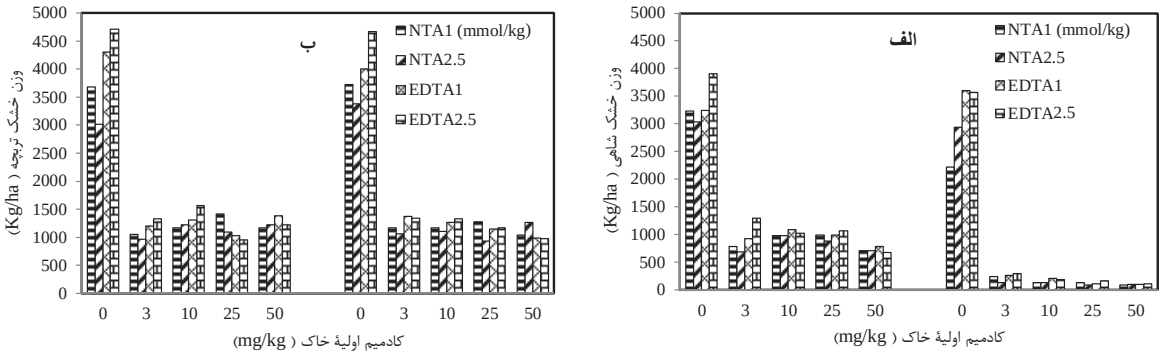
سه روز پس از اضافه کردن کی‌لیت به خاک، نشانه‌های سمیت مانند کلروز و نقاط نکروز روی برگ‌های گیاهان مخصوصاً تربچه مشاهده شد. کلروز ممکن است به دلیل اثر رقابتی بین کادمیوم و آهن و کاهش جذب آهن باشد. بیشترین آثار سمیت در تیمارهای دارای کی‌لیت EDTA2.5 و در Cd25 و Cd50 مشاهده شد. در حضور کی‌لیت‌ها غلظت فلز محلول زیاد می‌شود و جذب انتخابی در مسیر سیمپلاستیک سرعت بیشتری می گیرد[۲۳]. کم‌ترین آثار سمیّت 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

غلظت کی‌لیت‌ها مخصوصاً کی‌لیتEDTA به دلیل حلالیّت وجذب بیشتر عناصر غذایی مورد نیازگیاه موجب افزایش وزن خشک گیاه شده است. درصورتی‌که درغلظت Cd50 افزایش غلظت کی‌لیت موجب کاهش وزن خشک گیاه شده است. این اثر در کی‌لیتEDTA بیشتر از NTA است.

وزن خشک گیاه تربچه به صورت تابعی از مقدار و نوع کی‌لیت و نوع کشت و میزان اولیهٔ کادمیوم در شکل ۳- ب نشان داده شده است. همان‌طورکه نتایج در این شکل نشان می‌دهد، نظیرشکل ۳- الف، مقدار کادمیوم اولیه و هم مقدار و نوع کی لیت اثرقابل توجهی بر وزن خشک گیاه گذاشته‌اند. مستقل از نوع و مقدار کی‌لیت و نوع کشت، داده‌ها نشان می دهند که وزن خشک تربچه متناسب باافزایش مقدار کادمیوم اولیه کاهش یافته است. در سطوح پایین‌تر غلظت اولیه کادمیوم، افزایش غلظت کی‌لیت‌ها مخصوصا 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 ازغلظت کادمیوم وغلظت ونوع کی‌لیت درکشت الف)گیاه شاهی وب) گیاه تربچه.

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 ریشهٔ 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 برپتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک نشان دهد.

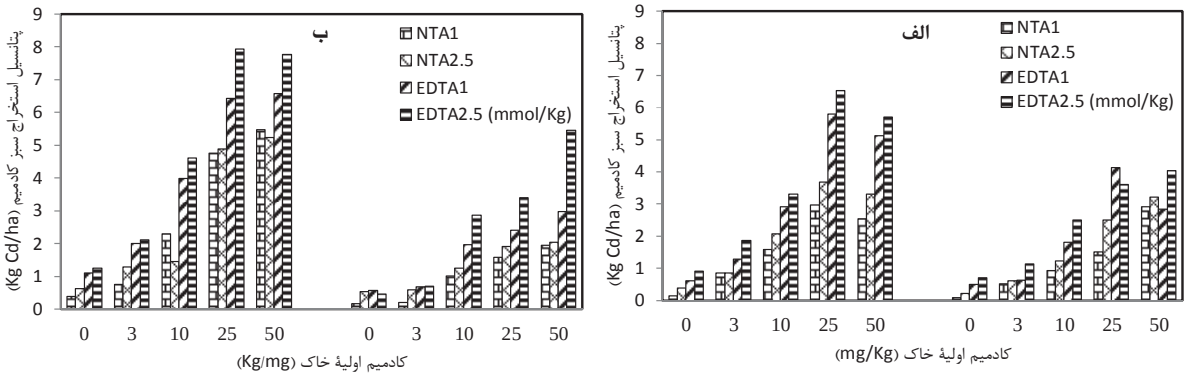
نتایج حاصل از محاسبهٔ پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک تحت کشت گیاه شاهی در روش تک‌کشت در شکل ۴-الف (سمت راست) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مقدار کادمیوم اولیه و نوع و مقدار کی‌لیت مستقل از نوع کشت اثر قابل توجهی بر پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک گذاشته‌اند. مستقل از نوع و مقدار کی‌لیت و نوع کشت، داده‌ها نشان می‌دهند که پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک متناسب بامقدارکادمیوم اولیه افزایش یافته است. مستقل ازسطوح اولیهٔکادمیوم، 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 DTA1 است. پتانسیل استخراج سبزکادمیوم از خاک در تیمار کی‌لیتEDTA بیشتر از کی‌لیتNTA 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

کی‌لیت مستقل از نوع کشت اثر قابل توجهی بر پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک گذاشته‌اند. داده‌ها نشان می‌دهند که پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک متناسب با افزایش مقدارکادمیوم اولیه افزایش یافته است. مستقل ازسطوح اولیهٔکادمیوم، پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی‌لیت EDTA2.5 تقریباً در اکثر موارد بیشترین مقدار را در بین مقادیر و انواع کی‌لیت دارد. بعد از EDTA2.5 در اکثر موارد بیشترین پتانسیل در استخراج سبز کادمیوم از خاک در حضور کی‌لیت DTA1 است. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی‌لیت EDTA بیشتر از کی‌لیت NTA بود. با توجه به نتایج به دست آمده، پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در سطوح اولیهٔ کادمیوم و مقدار و نوع کی‌لیت در روش کشت مخلوط بیشتر از تک‌کشت است.

نتایج حاصل از محاسبهٔ پتانسیل پالایش گیاهی کادمیوم از خاک تحت کشت گیاه تربچه در روش تک‌کشت درشکل۴-ب (سمت راست) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مانند گیاه شاهی در کشت مخلوط و تک‌کشت، 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. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در تیمار کی‌لیت EDTA2.5 تقریباً در اکثر سطوح اولیهٔ کادمیوم در بین مقادیر و انواع دیگر کی‌لیت بیشترین مقدار را دارد. بعد از آن بیشترین پتانسیل در استخراج سبز کادمیوم از خاک در حضور کی‌لیت EDTA1 است.

شکل ۴- ب (سمت چپ) نتایج حاصل از محاسبهٔ پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک تحت کشت گیاه تربچه در روش کشت مخلوط را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، همانند تیمارهای قبل، مقدار کادمیوم اولیه و نوع و مقدار کی‌لیت مستقل از نوع کشت اثر قابل توجهی بر پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک گذاشته‌اند و داده‌ها نشان می‌دهند که پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک متناسب با افزایش مقدار کادمیوم اولیه افزایش یافته است. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم ازخاک در تیمار کی‌لیت EDTA2.5 تقریباً در اکثر سطوح اولیهٔ کادمیوم در بین مقادیر و انواع دیگر کی‌لیت بیشترین مقدار را دارد. بعدازآن بیشترین پتانسیل دراستخراج سبزکادمیوم از خاک در حضور کی‌لیت EDTA1 است. پتانسیل استخراج سبز کادمیوم ازخاک در تیمار کی‌لیتEDTA بیشتر از کی‌لیتNTA بود.



شکل۴- پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک توسط گیاه شاهی و تربچه، به صورت تابعی از غلظت کادمیوم و غلظت و نوع کی‌لیت در کشت الف) گیاه شاهی در روش تک‌کشت (سمت راست) و کشت مخلوط (سمت چپ) و ب) گیاه تربچه در روش تک‌کشت (سمت راست) و کشت مخلوط (سمت چپ).

نتایج به دست آمده در شکل ۴- الف و ب نشان می‌دهد که مستقل از نوع گیاه، پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک در کشت مخلوط بیش از روش تک‌کشت است. به‌طوریکه میزان 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 تک کشت ۵/۴ و ۴ کیلوگرم کادمیوم در هکتار بود. هم‌چنین مستقل از نوع کشت پتانسیل استخراج سبز کادمیوم از خاک توسط کشت تربچه بیشتر از شاهی است. Blaylock و همکاران[۲۴] نیزبا بیان اینکه پتانسیل پالایش گیاهی

کادمیوم گیاه خردل سبز در حضور EDTA2.5، ۳ کیلوگرم کادمیوم در هکتار در سال است، توانایی زیاد کی‌لیتEDTA را نسبت با سایر کی‌لیت‌ها در استخراج فلزات از خاک گزارش کرده‌اند. به دلیل پایداری و تحرک بالای کمپلکسEDTA-Cd در خاک، زیست تجزیه‌پذیری اندک EDTA در محیط و زیست تجزیه‌پذیری زیادNTA در خاک، کارآییEDTA 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 سبز کادمیوم از خاک‌های آلوده روش مناسب‌تری است. نتایج این پژوهش نشان داد که کی لیت EDTA در مقایسه با NTA در استخراج سبز کادمیوم از خاک تواناتر 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 تواناتر 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 میلی مول بر کیلوگرم خاک
[۱۳] کلرید کلسیم

منابع

[1] Atafar Z, Mesdaghinia A R, Nouri J, Homaee 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.

[2] Khodaverdiloo H, Homaee M, Liaghat A M, Mirnia KH. Quantitative assessmentAbility toPhytoremediation of Cadmium contaminated soils using Cress. Iranian Journal of Agriculture science; **2008; 13**(2): 357-371. [**In Persian**]

[3] Dallalian M R, Homaee 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, Homaee M. Phytoremediation of cadmium polluted soils resulting from use of phosphorus fertilizers. Curr Opinion in Biotech; **2011; 225**:S15-S152.

[5] Jafarnejadi A R, Homaee 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, Homaee 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] JafarnejadiAR, Sayyad G, Homaee 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] DavariM, Homaee M, Rahnemaei R. An analytical deterministic model forsimultaneous phytoremediation of Ni and Cd from contaminated soils. Environmental science and pollution research; **2015**; DOI: 10.1007/S11356-014-4032-Z.

[10] Babaeian E, Homaee M, Rahnemaie. Enhancing Phytoextraction of Lead Contaminated Soils by Carrot (Daucus carrota) Using Synthetic and Natural Chelates.Journal ofSoil and Water; **2012; 26**(3): 607-618. [**In Persian**]

[11] Arabi Z, Homaee 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**]

[12] Quartacci MF, BakerA J M, Navari-Izzo F. Nitriloacetate 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, Homaee 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, Homaee M. Providingamacromodel forPhytoremediationofsoils contaminated withnickelbased onLinearandnon-linear declinefunctions. Journal of Agroecology; **2011; 1**(1): 1-13. [**In Persian**]

[17] Davari M, Homaee 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, Homaee 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, Homaee 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, Homaee M. Assessing radish potential for phytoremediation of lead-polluted soils resulting from air pollution . Plant Soil and Environment; **2009; 55**(5): 202-206.

[21] MauskarJM. cadmium – An Environment Toxicant central pollution control Board , Ministry of Environment & Forests , Govt of India , parivesh Bhawan; **2007**; East Arjun Nagar , Delhi -110032.

[22] Khodaverdiloo, H. and M. Homaee. 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, Homaee 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, Homaee 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**].