University of Tehran Press

Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

Evaluation of phytoremediation potential of lead and cadmium in rangeland plant species, *Dactylis glomerata*, *Festuca ovina* and *Medicago sativa*

Mohammad Reza Tatian[1]✉ | Reza Tamratash[2] | Hossein Agajantabar Ali[3]| Ailin Faraji[4]

1. Corresponding Author, Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: m.tatian@sanru.ac.ir
2. Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: r.tamartash@sanru.ac.ir
3. Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: hoali@sanru.ac.ir
4. Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: a.faraji@stu.sanru.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 8 May 2022

Received in revised form 20 July 2022

Accepted 30 August 2022

Published online 5 May 2023

Keywords:

Lead, Biological stimulation coefficient, Transfer factor, Heavy metals, Cadmium.

ABSTRACT

Potentially toxic elements (PTEs) contain two classes of essential and non-essential elements that are significant in toxicological ecology. These elements have high stability and have the ability to cause toxicity in living organisms. Phytoremediation has been considered as one of the most appropriate and efficient methods to uptake these elements. The aim of this study was to investigate the ability of different forage species to absorb PTEs and to be aware of the compatibility and resistance of each to contamination, a comparison between species with different biological conditions. This study was performed in a greenhouse environment and *Dactylis glomerata*, *Festuca ovina* and *Medicago sativa* species were considered. To measure PTEs (lead and cadmium), dry ash extraction method was used. Also, to determine the phytoremediation potential of plant indices TF, BCF and BAC were used. To compare the data statistically, multivariate analysis of variance test in the form of general linear model was used and for multiple comparison of means, Duncan test was used. The results showed that *D. glomerata* with increasing concentrations of lead (200 to 800 mg/kg) and cadmium (50 to 200 mg/kg) increased their concentration in shoots and roots by about 84% and 86%, respectively in the shoot and root. The root uptake of *M. sativa* increased with increasing lead concentration, and as a result, *M. sativa* is an extractive plant for both cadmium and lead. In *Festuca ovina* species, with increasing lead concentration, the rate of uptake by roots and shoots was 70% and 58%, respectively, and for cadmium was 79% and 73%, respectively. In general, in the studied species, the efficiency of phytoremediation of lead was higher in the aerial parts to the root, but cadmium of the roots of *D. glomerata* and *F. ovina*, had more phytoremediation efficiency than the aerial parts.

Cite this article: Tatian, M.R., Tamratash, R., Agajantabar Ali, H., & Faraji, A. (2023). Evaluation of phytoremediation potential of lead and cadmium in rangeland plant species including *Dactylis glomerata*, *Festuca ovina* and *Medicago sativa*. *Journal of Natural Environment*, 76 (1), 15-28. DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2022.342717.2432

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2022.342717.2432

محیط زیست طبیعی
شاپای الکترونیکی: ۷۸۱۷-۲۴۲۳
Homepage: https://jne.ut.ac.ir/
انتشارات دانشگاه تهران

بررسی توان گیاه‌پالایی گونه‌های مرتعی *Dactylis glomerata*، *Festuca ovina* و *Medicago sativa* به عناصرسرب و کادمیم

محمدرضا طاطیان[۱]✉ | رضا تمرتاش[۲] | حسین آقاجان تبار عالی[۳] | آیلین فرجی[۴]

۱. نویسنده مسئول، گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: m.tatian@sanru.ac.ir
۲. گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: r.tamartash@sanru.ac.ir
۳. گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: hoali@sanru.ac.ir
۴. گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: a.faraji@stu.sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

کلیدواژه‌ها:
سرب،
ضریب تحریک زیستی،
فاکتور انتقال،
فلزات سنگین،
کادمیم.

چکیده

عناصر با پتانسیل سمیت، شامل دو دسته عناصر ضروری و غیر ضروری هستند که در بوم سم‌شناسی قابل توجه هستند. این عناصر پایداری بالایی دارند و توانایی ایجاد سمیت در موجودات زنده را دارند. گیاه‌پالایی به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین و کارآمدترین روش برای جذب این عناصر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از مطالعه، بررسی میزان توانایی گونه‌های مختلف علوفه‌ای نسبت به جذب عناصر سرب و کادمیم و آگاهی از میزان سازگاری و مقاومت هر یک در مقابل آلودگی‌ها، مقایسه‌ای بین گونه‌ها با شرایط زیستی متفاوت می‌باشد. این مطالعه در محیط گلخانه طی ۳ ماه انجام شد و گونه‌های *Dactylis glomerata*، *Festuca ovina* و *Medicago sativa* در نظر گرفته شدند. برای عصاره‌گیری و اندازه‌گیری عناصر با پتانسیل سمیت (سرب و کادمیم) از روش عصاره‌گیری خاکستر خشک و دستگاه جذب اتمی استفاده شد. به‌منظور مقایسهٔ آماری داده‌ها از آزمون تجزیه واریانس چندطرفه در قالب مدل عمومی خطی استفاده و برای مقایسهٔ چندگانه میانگین، از آزمون دانکن استفاده گردید. نتایج نشان داد که گونه *D. glomerata* با افزایش غلظت سرب (۲۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کادمیم (۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌ترتیب حدود ۸۴ و ۸۶ درصد غلظت آن‌ها در اندام هوایی و ریشه افزایش یافته است. میزان جذب ریشهٔ گونهٔ *M. sativa* با افزایش غلظت سرب بیشتر شد در نتیجه *M. sativa* دارای قابلیت جذب دو فلز کادمیم و سرب می باشد. در گونهٔ *F. ovina* با افزایش غلظت سرب میزان جذب توسط ریشه و اندام هوایی به‌ترتیب ۷۰ و ۵۸ درصد و برای کادمیم به‌ترتیب ۷۹ و ۷۳ درصد برآورد شد. به‌طور کلی، در گونه‌های مورد مطالعه کارآیی گیاه پالایی نسبت به سرب در اندام هوایی بیشتر از ریشه بود ولی در مورد کادمیم ریشهٔ دو گونهٔ *D. glomerata* و *F. ovina* کارایی گیاه‌پالایی بیشتری نسبت به اندام هوایی داشتند.

استناد: طاطیان، محمدرضا؛ تمرتاش، رضا؛ آقاجان تبار عالی، علی؛ و فرجی، آیلین (۱۴۰۲). بررسی توان گیاه‌پالایی گونه‌های مرتعی *Dactylis glomerata*، *Festuca ovina* و *Medicago sativa* به عناصرسرب و کادمیم. *محیط زیست طبیعی*، ۷۶ (۱)، ۲۸-۱۵.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2022.342717.2432

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

عناصر با پتانسیل سمیت (که در منابع با نام فلزات سنگین ذکر می‌شوند) یک دسته از انواع آلاینده‌های مهم در اکوسیستم‌های طبیعی هستند، و سمیت آن‌ها به یک نگرانی جدی در مباحث محیط زیستی تبدیل شده است (Zhang *et al*., 2017a; Armand *et al*., 2019). برای مثال تنها در گیاهان، عناصر با پتانسیل سمیت می‌توانند فعالیت‌های فیزیولوژیکی مانند انتقال آب، جذب عناصر اساسی و فتوسنتز را تحت تأثیر قرار داده و منجر به بروز اختلالات فیزیولوژیکی شود. در همین راستا تحقیقات نشان داده است که آلودگی گیاهان به عناصر با پتانسیل سمیت اثراتی از جمله کاهش تنفس میتوکندری، توقف رشد گیاهان و تولید مثل را به‌دنبال خواهد داشت (Zhang *et al*., 2017b). علاوه بر این، گیاهان به‌عنوان حلقهٔ اول زنجیرهٔ غذایی در اکوسیستم، می‌توانند عناصر با پتانسیل سمیت را از طریق زنجیرهٔ غذایی انتقال داده و صدمات جدی به سلامت انسان وارد کنند (Guerra Sierra *et al*., 2021; Gavrilescu, 2022). منابع اصلی عناصر با پتانسیل سمیت فعالیت‌های انسانی از قبیل بهره‌برداری از معادن، استفاده از کودهای شیمیایی، سموم دفع آفات، احتراق زغال سنگ، زباله‌های پزشکی و احتراق سوخت‌های فسیلی است (Zhang *et al*., 2017b). عناصر با پتانسیل سمیت به گروهی از عناصر هستند که دارای وزن مخصوص بیش از ۶ گرم بر متر مکعب و یا جرم اتمی بیشتر از ۵۰ می‌باشد (Akova, 2018). در بین عناصر با پتانسیل سمیت، کادمیم و سرب به‌عنوان دو مورد از مهمترین آلاینده های غیرآلی پایدار شناخته می‌شوند که حتی در غلظت‌های کم سمیت شدید برای گیاهان، حیوانات و انسان‌ها تولید می‌کنند (Shahid *et al*, 2012). در سال‌های اخیر از روش‌های مختلف بوم‌شناختی، فیزیکی و شیمیایی برای اصلاح خاک‌های آلوده به عناصر با پتانسیل سمیت استفاده شده است. از جمله این روش‌ها خاک‌برداری، دفن زباله، تصفیهٔ حرارتی، شستشو و بازسازی الکتریکی که بسیار پرهزینه و عوارض جانبی منفی بر خصوصیات خاک ایجاد کرده‌اند، که علاوه بر هزینهٔ زیاد، این روش‌ها می‌توانند باعث آلودگی ثانویه شوند (Ali *et al*., 2013; Glick, 2010). در میان روش‌های موجود، گیاهان به‌علت استفاده از آب، خاک و هوا در تغییر شرایط بوم‌شناختی مشارکت مهمی دارند و می‌توان از آن‌ها برای پاک‌سازی بوم‌سازگان‌های آلوده به انواع آلاینده‌ها استفاده نمود که اقتصادی بودن و سازگاری گیاهان با محیط زیست ازجمله مزایای استفاده از آن‌ها است. استفاده از گیاهان برای کاهش آلودگی (گیاه‌پالایی) یک تکنولوژی با هزینهٔ کم و ساده است که از گیاهانی مانند گیاهان علوفه‌ای، گونه‌های چوبی و بوته‌ها به‌منظور خروج، نگهداری و بی اثرکردن آلاینده‌های محیط زیستی مانند فلزات سنگین در خاک استفاده می‌کند (Zoufan *et al*., 2013). گیاه‌پالایی به‌عنوان یکی از روش‌های زیست‌پالایی است که در دهه‌های اخیر به‌دلیل سادگی، ارزان بودن و همچنین امکان بهره‌گیری در سطح وسیع، مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این مزایا گیاه‌پالایی همچنین می‌تواند با تغییر در خصوصیات خاک، اثر بخشی و باروری خاک را حفظ کرده و در نتیجه وضعیت خاک آلوده به عناصر با پتانسیل سمیت را بهبود بخشد (Ebrahimi *et al*., 2014; Zhang *et al*., 2018). در این روش گیاهان زنده به‌عنوان پمپ‌های پایهٔ خورشیدی عمل کرده و فلزات خاصی را از محیط استخراج و در بافت‌های خود انباشت می‌کنند. ریشهٔ گیاهان با افزایش مقدار و انواع جمعیت میکروبی در ناحیهٔ ریزوسفر (خاک اطراف ریشه) و یا در میکوریزا (همزیستی قارچ و ریشهٔ گیاه) باعث افزایش تجزیهٔ زیستی آلاینده در خاک می‌شود (Dhir, 2013). بنابراین شناسایی گیاهان مقاوم و دارای خصوصیات برتر در پالایش از جمله موارد مهم و ضروری در گیاه‌پالایی عناصر با پتانسیل سمیت می‌باشد. گیاهانی که توانایی انباشت بیش از حد آستانهٔ (بیش از ۰/۱ درصد) عناصر با پتانسیل سمیتی از قبیل مس، کبالت، کروم، نیکل و سرب را در اندام‌های خود دارند؛ به‌عنوان گیاه بیش اندوز[1] شناخته می‌شوند (Reeves *et al*., 1995; Soleimani *et al*., 2009; Ebrahimi and Madrid, 2014). غلظت عناصر با پتانسیل سمیت در گیاهان با توجه به نوع و رقم گیاه متفاوت است به‌طوری‌که جذب این عنصر، به‌وسیلهٔ گیاهان تحت تأثیر نوع و مرحلهٔ رشد گیاه، نوع خاک، نوع فلز و سایر فاکتورهای محیطی می‌باشد (Cobb *et al*., 2000). میانگین غلظت جهانی کادمیم و سرب در خاک به‌ترتیب ۰/۳۵ و ۲۰ قسمت در میلیون (Bowen, 1979) و براساس در استاندارد فائو برای آب آبیاری به‌ترتیب ۰/۰۱ و ۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد (FAO, 1984). برای تعیین کارائی پالایش عناصر با پتانسیل سمیت در گیاه از برخی شاخص‌ها نیز استفاده

[1] Hyperaccumulator

می‌شود. برای مثال با محاسبهٔ ضریب تحریک زیستی (BCF[۲]) و فاکتور انتقال (TF[۳])، می‌توان بهره‌وری گیاهی را اندازه‌گیری کرد. ضریب تحریک زیستی که به‌عنوان نسبت غلظت فلز در ریشه به مقدار فلز در خاک تعریف شده است، می‌تواند برای برآورد کارایی یک گیاه در جذب فلزات از خاک‌ها استفاده شود (Ladislas *et al*. 2012; Mahdavian *et al*. 2017). همچنین گیاه تثبیتی (Phytostabilization) به نگهداری و رسوبات آلوده در محل ریشهٔ گیاهان و همچنین تجمع آلاینده‌های سمی در خاک می‌شود. گیاه استخراجی (Phytoextraction) برای انتقال فلزات از خاک به ریشه و سپس به ساقه‌ها و برگ‌ها و انباشته نمودن آن‌ها در گیاه استفاده می‌شود (Tangahu *et al*., 2015).

امروزه تحقیقات مختلف دنبال شناسایی و معرفی گیاهان مناسب برای جذب و استخراج آلاینده‌ها از آب و خاک هستند و برخی گیاهان توانایی بیشتری برای جذب این آلاینده‌ها دارند (Santos *et al*., 2010). تاکنون تحقیقات زیادی در مورد توانایی جذب عناصر با پتانسیل سمیت توسط گیاهان و میزان مقاومت آن‌ها در برابر آلودگی‌ها انجام شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به مطالعات پتانسیل گیاه‌پالایی گونه‌های مختلف (Habib *et al*., 2017 ؛ Bader *et al*., 2018) و میزان جذب فلزات مختلف از جمله سرب و کادمیم توسط گونه‌های مختلف (Wang et al., 2015; Xoing *et al*., 2018; Zhang *et al*., 2018; Chang *et al*., 2018; Hesami *et al*., 2017; Kofi and Akoto, 2018) اشاره کرد. همچنین در زمینهٔ گیاه‌پالایی گونه‌های مرتعی تحقیقات زیادی صورت گرفته است که می‌توان به مطالعهٔ Parsadost و همکاران (۲۰۰۸) در مورد گونهٔ *Astragalus glaucantus*، Jafarian و همکاران (۲۰۰۸) در مورد *Medicagi sativa*، Daeezadeh و همکاران (۲۰۱۶) با گونهٔ *Dactylis glomerata* ، Jafari و همکاران (۲۰۱۷) در مورد گونهٔ *Bromus tomentalus* و Eskoee و همکاران (۲۰۲۰) با گونه‌های مرتعی *Bromus tecturom*، *Ahaji camelorum* و *Stipa barbata* به توان بالای این گیاهان در جذب عناصر با پتانسیل سمیت تأکید نمودند.

در تحقیق حاضر نیز کارائی گیاه‌پالایی در سه گونهٔ علوفه‌ای مرتعی در ارتباط با جذب سرب و کادمیم مورد بررسی قرار گرفت. گونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق به‌دلیل اینکه علوفه‌ای و خوش‌خوراک هستند مورد استفاده دام می‌باشند همچنین به‌دلیل پراکنش وسیع آن‌ها در مراتع ییلاقی و قشلاقی و از طرفی شرایط رویشی متفاوتی که دارند (Bagheri Shabestari *et al*., 2010; Ghorbani *et al*., 2016) انتخاب شدند. سه گونهٔ مورد بررسی: *Medicago sativa* گونهٔ پهن برگ علفی از خانواده بقولات (Fabaceae)، که با توجه به ارزش علوفه‌ای و کشت در اراضی جلگه‌ای در معرض خطر آلایندگی است (Dehdari *et al*., 2017)، همچنین دو گونهٔ مرتعی از تیرهٔ گندمیان (Poaceae) شامل *Festuca ovina* و *Dactylis glomerata* نیز به‌دلیل ارزش غذایی و با توجه به سابقه حضور در مراتعی که می‌توانند تحت تأثیر آلودگی‌های معدنی از جمله عناصر با پتانسیل سمیت قرار گیرند (Ghasemi *et al*., 2015)، می‌باشند.

با توجه به اهمیت موضوع آلاینده‌های ناشی از عناصر با پتانسیل سمیت و تأثیر آن‌ها بر گونه‌های گیاهی موجود در اکوسیستم‌ها، مطالعهٔ اثرات آن‌ها و چگونگی پاسخ گونه‌های علوفه‌ای به تغییرات ناشی از وارد شدن آن‌ها در خاک و سپس به اندام‌های مختلف گیاهان موجود، اهمیت به‌سزایی دارد. از طرفی، رفع آلاینده‌های موجود با استفاده از روش‌های فیزیکی و شیمیایی، دارای هزینه های گزاف بوده و موجب افزایش تلاش برای دستیابی به روش‌های ارزان‌تر شده است (Ouyang, 2002). بنابراین هدف از تحقیق حاضر، بررسی میزان توانایی گونه‌های مختلف علوفه‌ای نسبت به جذب عناصر سرب و کادمیم و آگاهی از میزان سازگاری و مقاومت هر یک در مقابل آن‌ها، می‌باشد.

روش‌شناسی پژوهش

بذرهای گونه‌های علوفه‌ای *Medicago sativa*، *Festuca ovina* و *Dactylis glomerata* در محیط گلخانه‌ای، به تعداد ۲۰ عدد بذر گیاه در گلدان‌های ده کیلوگرمی با بستری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک همگن (جدول ۱) از اراضی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی جمع‌آوری و در عمق ۱ سانتی‌متری خاک در چهار تکرار و در قالب طرح کاملاً تصادفی

[2]Bio Concentration Factor
[3]Translocation Factor

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک

ردیف	پارامتر	خاک
۱	بافت	لوم رسی
۲	هدایت الکتریکی (ds/m)	۱/۱۸
۳	pH	۷/۵۴
۴	کربن آلی (درصد)	۲/۲۹
۵	آهک (درصد)	۱۷/۸۷

کاشته شد، دو هفته پس از کاشت، مقادیری از سطوح مختلف عناصر سنگین همراه با آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه گردید. دو هفته بعد از جوانه‌زنی، عناصر با پتانسیل سمیت به‌صورت آبیاری و هفته‌ای یکبار در سه هفتهٔ متوالی به خاک اضافه شد. در این آزمایش، تیمارهای سرب در غلظت‌های۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کادمیم در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم قسمت در میلیون بر روی گیاهان مورد مطالعه اعمال شد. به‌منظور اندازه‌گیری غلظت قابل دسترس زیستی در خاک ابتدا ۳۵ گرم خاک الک کرده و با ۷۰ میلی‌لیتر عصاره DTPA مخلوط شد، سپس به مدت دو ساعت در همزن قرار گرفت. سپس عصاره را از کاغذ صافی عبور داده و میزان کادمیم و سرب قابل جذب خاک توسط دستگاه جذب اتمی قرائت شد (Lindsay and Norvel, 1978).

هشت هفته پس از جوانه‌زنی، گیاهان به‌طور کامل از خاک خارج و به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس نمونه‌ها به دو بخش هوایی و زیرزمینی تفکیک شدند نمونه‌های ریشهٔ گیاهان برای حذف ذرات خاک با آب مقطر شستشو داده شد. سپس نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس داخل آون قرار داده شد. بعد از خشک شدن نمونه‌ها آسیاب شد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند (Bonanno and Giudice, 2010).

اندازه‌گیری عناصر با پتانسیل سمیت: برای اندازه‌گیری مقدار عناصر سرب و کادمیم از روش عصاره‌گیری خاکستر خشک استفاده شد. بدین‌ترتیب که میزان ۲ گرم از هر نمونه از اندام‌های هوایی و زیرزمینی به‌طور جداگانه درون بوته‌های چینی قرار گرفت و نمونه‌ها در کورهٔ الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ ساعت قرار گرفت و سپس به آن ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال به نمونه‌ها اضافه و روی اجاق برقی گرم شدند. نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن شمارهٔ ۴۲، به درون بالن ژوژه‌های ۵۰ میلی‌لیتری صاف شده و سپس غلظت عناصر با پتانسیل سنگین در عصاره تهیه‌شده اندازه‌گیری شد (Baker and Amacher, 1982). برای اندازه‌گیری غلظت قابل دسترس زیستی، فلزات کادمیم و سرب نمونه‌های خاک به روش عصاره‌گیری با DTPA (Lindsay and Norvel, 1978) توسط دستگاه جذب اتمی صورت گرفت.

ارزیابی کارایی گیاهان مورد بررسی در پالایش عناصر با پتانسیل سمیت: برای ارزیابی توانمندی یک گیاه و معرفی آن برای پالایش آلودگی، بعد از مشخص کردن مقدار عناصر با پتانسیل سمیت قابل استخراج در نمونه‌های گیاهی و خاک، شاخص‌های TF (فاکتور انتقال، نسبت غلظت فلز در اندام‌های هوایی گیاه به غلظت فلز در ریشه)، BCF (فاکتور تجمع زیستی در ریشه، نسبت غلظت فلز در ریشه به غلظت فلز در خاک)، BAC[۴] (فاکتور تجمع زیستی در اندام هوایی، نسبت غلظت فلز در اندام‌های هوایی گیاه به غلظت فلز در خاک) اندازه‌گیری شد و براساس این شاخص‌ها، گونهٔ مناسب برای پالایش خاک‌های آلوده معرفی شدند چرا که پتانسیل گیاه‌پالایی یک گونه با استفاده از فاکتور انتقال (TF)، فاکتور تجمع زیستی در ریشه (BCF) و فاکتور تجمع زیستی در اندام هوایی (BAC) محاسبه می‌شود (Fontem lom *et al*., 2014). گیاهانی که مقدار شاخص‌های TF و BAC در آن‌ها بزرگتر از یک باشد، برای فرآیند گیاه استخراجی مناسب هستند. گیاهانی که در آن‌ها مقدار TF کمتر از یک و مقدار BCF بیشتر از یک باشد، برای فرآیند گیاه تثبیتی مناسب هستند (Cheraghi *et al*., 2011).

تجزیه و تحلیل آماری: جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف–اسمیرنوف و همگنی واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون لون مورد بررسی قرار گرفت. سپس به‌منظور مقایسهٔ آماری داده‌ها از آزمون تجزیه واریانس چندطرفه (ANOVA) در قالب مدل عمومی خطی (GLM) استفاده و برای مقایسهٔ چندگانه میانگین، از آزمون دانکن استفاده شد.

[4]Biological Accumulation Coefficient

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس در قالب مدل خطی عمومی (GLM) برای بررسی تأثیرات متغیرهای مستقل گونه، غلظت، اندام مورد بررسی و اثرات متقابل روی متغیر وابسته غلظت فلزات اندازه‌گیری شده در گیاه برای دو عنصر سرب و کادمیم

منبع تغییرات	کادمیم			سرب		
	MS	F	*P*	MS	F	*P*
گونه	۷۲۷۳/۲۰۲	۴۸/۷۹۹	۰/۰۰۰	۶۵۰۰۱/۰۸۳	۳۵/۲۹	۰/۰۰۰
غلظت	۱۸۸۰۹/۹۰۵	۱۲۶/۷۴	۰/۰۰۰	۱۹۰۳۶۲/۲۴۰	۱۰۳/۳۶۰	۰/۰۰۰
اندام	۲۱۷۱۴/۸	۲۴/۵۶	۰/۰۰۰	۲۲۲۶۳۲/۲۱۲	۱۲۶/۳۱۱	۰/۰۰۰
گونه*غلظت	۱۰۲۸/۹۷	۶/۹	۰/۰۰۰	۱۹۹۲۴/۵۱۸	۱۰/۸۱۸	۰/۰۰۰
گونه*اندام	۱۰۸۹/۲۴۴	۷/۳۰۸	۰/۰۰۱	۲۰۹۷۵/۱۲۰	۱۱/۳۸	۰/۰۰۰
غلظت*اندام	۷۸۴/۲۸۸	۵/۲۶	۰/۰۰۲	۳۲۸۶۶/۲۶۰	۱۷/۸۴	۰/۰۰۰
گونه*غلظت*اندام	۴۶۳/۲۶	۲/۹۲	۰/۰۱	۲۷۱۱۹/۲۹۴	۱۴/۷۲۵	۰/۰۰۰
ضریب تبیین مدل (R^2)	۰/۸۵			۰/۸۹		

MS، F و P به‌ترتیب عبارتند از میانگین مربعات خطا، مقدار آمارهٔ فیشر و سطح معنی‌داری.

آنالیزها در نرم‌افزار SPSS (نسخهٔ ۱۶) انجام شد. در نهایت ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel (نسخهٔ ۲۰۱۶) صورت گرفت.

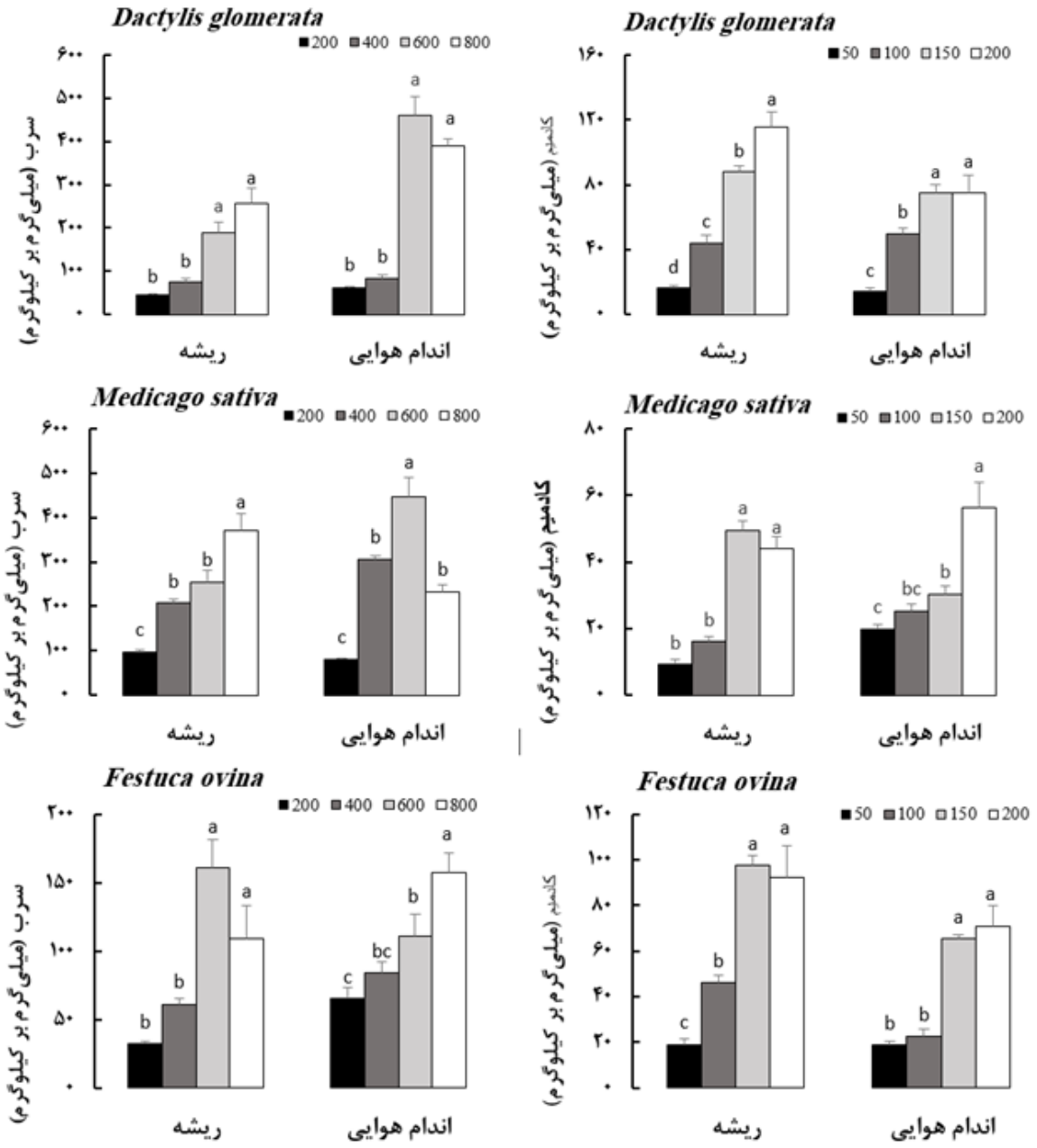
یافته‌های پژوهش

براساس نتایج، متغیرهای مستقل شامل گونه، غلظت و اندام در هر دو عنصر سرب و کادمیم دارای اختلاف معنی‌داری هستند ($P<۰/۰۵$، جدول ۲). همچنین تفاوت معنی‌داری در اثرات متقابل بین گونه، اندام و غلظت در هر دو عنصر کادمیم و سرب مشاهده می شود ($P<۰/۰۵$). به‌عبارت دیگر، غلظت عناصر اندازه‌گیری شده (سرب و کادمیم) به صورت معنی‌دار در گونه‌های مختلف، اندام‌های مختلف و همچنین غلظت‌های مختلف متفاوت است. معنی‌دار بودن اثرات متقابل نیز نشان می‌دهد که تغییرات غلظت عناصر در گیاهان مستقل نبوده و تحت تأثیر غلظت و اندام گیاهی متفاوت است (جدول ۲).

نتایج مقایسهٔ میانگین نشان داد که در گونهٔ *D. glomerata* با افزایش غلظت سرب در محیط، افزایش معنی‌داری در غلظت آن در اندام‌های مختلف گیاه مشاهده شد ($P<۰/۰۵$) به‌طوری که با افزایش غلظت سرب بیشترین جذب آن در اندام هوایی (۴۶۰/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در مقایسه با ریشه برآورد شد. در حالی‌که در عنصر کادمیم روند متفاوتی مشاهده شد به‌طوری‌که ریشهٔ این گونه بیشترین مقدار جذب کادمیم را با افزایش غلظت این عنصر از ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به اندام روزمینی (۱۱۸/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) داشته است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت سرب از ۲۰۰ به ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم حدود ۸۴ درصد سرب در اندام هوایی بوده است. همچنین افزایش غلظت کادمیم از ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم موجب افزایش ۸۶ درصدی آن در ریشه شده است.

در گونهٔ *M. sativa* با افزایش غلظت از ۲۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم جذب سرب در ریشه بیشتر شده است به گونه‌ای که در غلظت ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ریشه یونجه توانست به جذب حدود ۳۷۲/۴۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم، بیشترین مقدار سرب را جذب کند اما در غلظت ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب ۳۰۶/۵ و ۴۴۷/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به جذب سرب در اندام هوایی بوده است. همچنین بیشترین میزان جذب کادمیم مربوط به غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در اندام هوایی این گونه با مقدار ۵۶/۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده است اما ریشهٔ یونجه بیشترین مقدار جذب کادمیم را در غلظت ۱۵۰داشت (۴۹/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و با افزایش غلظت کادمیم به ۲۰۰، غلظت کادمیم در ریشه حدود (۱۱درصد) نسبت به غلظت ۱۵۰ کاهش یافت. افزایش غلظت از ۲۰۰ به ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم موجب افزایش غلظت سرب در ریشه به میزان ۵۳، ۶۱ و ۷۳ درصد شد.

در نهایت، در گونهٔ *F. ovina* با افزایش غلظت سرب، جذب در اندام هوایی افزایش داشت اما در ریشه ابتدا افزایش و سپس کاهش نشان داد. بیشترین جذب سرب در ریشهٔ گونهٔ *F. ovina* مربوط به غلظت ۶۰۰ با ۱۶۱/۳۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. به‌عبارتی در غلظت ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم میزان جذب ریشه بیشتر از اندام هوایی است. همچنین مقدار کادمیم در تمام غلظت‌ها



شکل ۱. نمودار تغییرات سرب و کادمیم با غلظت‌های مختلف در ریشه و اندام هوایی گونه‌های مورد مطالعه (حروف مشترک بر روی ستون‌ها بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد و حروف غیرمشترک بر روی ستون‌ها بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد)

(۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در ریشهٔ گونهٔ *Festuca ovina* بیشتر از اندام هوایی آن بوده است. با افزایش غلظت سرب از ۴۰۰ به ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم میزان جذب توسط ریشه و اندام هوایی به‌ترتیب ۷۰ و ۵۸ درصد و برای کادمیم به‌ترتیب ۷۹ و ۷۳ درصد بود (شکل ۱).

شاخص‌های ارزیابی گیاه‌پالایی سه گونهٔ مورد مطالعه: نتایج مربوط به شاخص‌های ارزیابی گیاه‌پالایی در جدول ۳ به‌صورت تک تک غلظت‌ها آورده شده است. نتایج نشان داد که در فلز سرب، گونهٔ *D. glomerata* در تمام غلظت‌ها دارای شاخص TF بزرگتر از یک بوده‌اند. اما در مورد گونهٔ *F. ovina* درغلظت ۶۰۰ میلی‌گرم در گرم کمتر از یک بود و در گونهٔ *M. sativa* دو غلظت ۲۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم در گرم TF کمتر از یک دارند. در مورد شاخص BCF هر سه گونه در غلظت ۸۰۰ میلی‌گرم در گرم کمتر از یک هستند و در گونهٔ *F. ovina* فقط غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در گرم بیشتر از یک می‌باشد و در شاخص BAC گونه‌های

جدول ۳. مقادیر شاخص‌های ارزیابی گیاه پالایی گونه‌های مورد مطالعه

		غلظت (میلی‌گرم در گرم)	TF	BCF	BAC
سرب	*Dactylis glomerata*	۲۰۰	۱/۳۷	۲/۶	۳/۵۹
		۴۰۰	۱/۱۴	۱/۰۴	۱/۱۹
		۶۰۰	۲/۴۴	۱/۱۷	۲/۸۷
		۸۰۰	۱/۵۲	۰/۶۸	۱/۰۴
	Medicago sativa	۲۰۰	۰/۸۳	۹/۶۹	۵/۶
		۴۰۰	۱/۴۷	۲/۷۶	۴/۰۸
		۶۰۰	۱/۷۵	۱/۶۶	۲/۹۲
		۸۰۰	۰/۶۲	۰/۹	۰/۵۶
	Festuca ovina	۲۰۰	۲	۱/۹۱	۳/۸۴
		۴۰۰	۱/۳۷	۰/۹۳	۱/۲۹
		۶۰۰	۰/۶۸	۰/۸۸	۰/۶
		۸۰۰	۱/۴۴	۰/۲۴	۰/۳۴
کادمیم	*Dactylis glomerata*	۵۰	۰/۸۷	۹	۷/۸۳
		۱۰۰	۱/۱۲	۱۲/۷۲	۱۴/۳۷
		۱۵۰	۰/۸۵	۱۱/۱۹	۹/۵۳
		۲۰۰	۰/۶۴	۵/۶	۳/۶۲
	Medicago sativa	۵۰	۲/۱۸	۳/۵۹	۷/۸۷
		۱۰۰	۱/۵۸	۳/۳۳	۵/۳
		۱۵۰	۰/۶۱	۵/۴۹	۳/۳۷
		۲۰۰	۱/۲۸	۳/۰۰	۳/۸۶
	Festuca ovina	۵۰	۰/۹۹	۷/۵۸	۷/۵۱
		۱۰۰	۰/۴۹	۹/۸	۴/۸۳
		۱۵۰	۰/۶۷	۱۰/۶۶	۷/۱۶
		۲۰۰	۰/۷۶	۴/۳۶	۳/۳۴

جدول ٤. کارآیی گیاه‌پالایی اندام‌های گونه‌های مورد مطالعه در غلظت‌های مختلف کادمیم و سرب

گونه	ساختار	کادمیم			سرب			
		۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰
D. glomerata	اندام هوایی	٪۱۱	٪۲۰/۵	٪۱۳/۵	٪۵	٪۵	٪۱/۵	٪۴	٪۲/۹
	ریشه	٪۱۲/۵	٪۱۸/۵	٪۱۵/۵	٪۸	٪۳/۵	٪۱	٪۱/۵	٪۰/۹۵
M. sativa	اندام هوایی	٪۱۱	٪۷/۵	٪۴/۵	٪۶	٪۸	٪۵/۵	٪۴	٪۰/۸
	ریشه	٪۵	٪۴/۵	٪۷/۵	٪۴	٪۹/۵	٪۳/۵	٪۲	٪۱
F. ovina	اندام هوایی	٪۱۱	%۶/۵	٪۱۰	٪۴/۵	٪۵	٪۱/۸	٪۰/۳۵	٪۰/۴۵
	ریشه	٪۱۰/۵	٪۱۴	٪۱۵	٪۶	٪۲/۵	٪۱/۳	٪۱/۲۵	٪۰/۳

F. ovina و *M. sativa* در غلظت ۸۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در گرم مقدار کمتر از یک و سایر گونه‌ها مقادیر بالاتر از یک داشتند. در مورد فلز کادمیم، شاخص TF در گونهٔ *M. sativa*، تمام غلظت‌ها به‌جز ۱۵۰ میلی‌گرم در گرم بزرگتر از یک، در گونهٔ *D. glomerata* فقط در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در گرم شاخص TF بزرگتر از یک و در مورد گونهٔ *F. ovina* شاخص TF در هیچ کدام از غلظت‌ها بزرگتر از یک نبود و در مورد شاخص‌های BCF و BAC، ۳ گونه مقادیر بزرگ‌تر از یک را به خود اختصاص دادند (جدول ۳).

کارایی گیاه‌پالایی سه گونهٔ مورد مطالعه: کارایی گیاه‌پالایی گونهٔ *D. glomerata* در مورد سرب در اندام هوایی بیشتر از ریشه بود اما در مورد کادمیم در تمام غلظت‌ها به‌جز ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ریشه بیشتر از اندام هوایی کارآیی داشته است. در گونهٔ *M. sativa* در غلظت‌های مختلف سرب به‌جز ۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، کارایی گیاه‌پالایی اندام هوایی بیشتر

بود. در مورد کادمیم نیز در تمام غلظت‌ها به‌جز ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، اندام هوایی کارایی گیاه‌پالایی بیشـــتری نســـبت به ریشه داشته است. همچنین ریشهٔ گونهٔ *F. ovina* کارایی گیاه‌پالایی بالاتری در غلظت‌های مختلف کادمیم به‌جز ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دارد. درمورد ســرب کارایی گیاه‌پالایی اندام هوایی در ســه غلظت ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بیشــتر از ریشه بوده است (جدول ۴).

بحث

در دهه‌های اخیر به‌دلیل رشد جمعیت و افزایش نیازهای بشر، توسعهٔ طرح‌های انسان‌ساخت موجب افزایش و تشدید آلوده شدن خاک‌ها به‌وسیلهٔ عناصر شده است، به‌همین دلیل ساختار خاک برای رشد و توسعهٔ گیاهان مسموم و خطرناک می‌شود و ممکن است تنوع زیستی خاک را مختل سازد (Jiang et *al*., 2013). آلودگی خاک به عناصر یکی از مهم‌ترین مسائل جهان محسوب می‌شود (Assareh *et al*., 2008) که موجب صرف هزینهٔ بالایی برای پاک‌سازی و از بین بردن آن‌ها می‌شود. بنابراین گیاه‌پالایی به‌عنوان یکی از به صرفه‌ترین و مهم‌ترین روش‌های زیستی پایدار جهت مقابله با اثرات روز افزون آلاینده‌ها از جمله عناصر می‌باشد که به‌دلیل قابلیت فراوان برخی از گونه‌ها در جذب انتخابی عناصر و ترکیبات آلوده‌کننده آن‌ها، امکان پاک‌سازی محیط‌های آلوده را فراهم کرده است (Gosh *et al*., 2005).

نتایج این تحقیق نشان داد که گونه‌های علوفه‌ای شامل *Dactylis glomerata*، *Medicago sativa* و *Festuca ovina* دارای توانایی متفاوتی نسب به جذب دو عنصر با پتانسیل سمیت سرب و کادمیم هستند. این تفاوت جدای از سه گونهٔ مورد بررسی، در اندام‌های مختلف نیز یکسان نبود. این تفاوت بیانگر توانایی متفاوت گیاهان مختلف در جذب عناصر سنگین و ذخیرهٔ آن در ریشه است. بنابراین در راستای انتخاب گونهٔ مناسب برای گیاه‌پالایی، مقایسهٔ گونه‌های مختلف در شرایط متفاوت و تحت تنش عناصر مختلف ضروری است. بر اساس نتایج، ریشهٔ گونهٔ *D. glomerata* بیشترین جذب‌کنندهٔ کادمیم بود. مقادیر موجود نشان-دهندهٔ پتانسیل این گونه برای تجمع کادمیم در اندام‌های زیرزمینی است. به‌طور کلی در نتیجه جذب فلزات در ریشه، آسیب ناشی از تجمع فلزات در بافت‌های فتوسنتزکننده کاهش می‌یابد (Karpiscak *et al*., 2001). به‌عبارت دیگر، برخی از گیاهان قادرند تا برای مقابله با اثرات نامطلوب انباشت عناصر سنگین در اندام‌های فتوسنتز کننده از قبیل برگ، از طریق انتقال فعال، این عناصر را به ریشه منتقل کرده و اثرات نامطلوب آن‌ها را کاهش دهند. بنابراین، ریشه‌های گیاهان می‌توانند به‌عنوان انباشتگرهای عناصر با پتانسیل سمیت مطرح شوند و توانایی آن‌ها به‌منظور سم‌زدایی پیشنهاد شده است (Bonanno and Lo Giudice, 2010). با توجه به اینکه بیشترین مقدار جذب کادمیم در گونهٔ *D. glomerata* مشاهده شد بنابراین در صورتی که هدف تأمین علوفه مورد نیاز دام باشد، در مناطق با آلودگی عنصر کادمیم (در غلظت‌های گفته شده در این مطالعه)، این گونه به‌دلیل ذخیرهٔ کادمیم در ریشه علاوه بر تولید زی‌توده روزمینی سالم‌تر، کمتر از سایر گیاهان دچار کاهش میزان فتوسنتز خواهد شد. در مورد غلظت‌های مختلف عنصر سرب، ریشهٔ گیاه *M. sativa* قادر بود تا بیش از دو گونهٔ دیگر سرب را در ریشه‌های خود ذخیره کند. براساس نتایج، وقتی غلظت سرب بالا رفت و به ۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید ریشهٔ گیاهان سرب بیشتری را جذب کردند. قابلیت جذب بالای سرب توسط یونجه در مطالعهٔ Mohebi (۲۰۱۲) نیز مورد تأیید قرار گرفته است. Xoing و همکاران (۲۰۱۸) در چین مطالعه‌ای تحت عنوان *M. sativa* افزایش‌دهنده پالایش گیاهی کادمیم و روی به‌وسیلهٔ *Ricinus communis* در خاک‌های آلوده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که یونجه تأثیر زیادی بر زی‌توده و ارتفاع *R. communis* دارد.

با توجه به نتایج مربوط به اندام‌های هوایی، بیشترین جذب‌کنندهٔ سرب در غلظت‌های ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در اندام هوایی گیاه *M. sativa* بوده است. مطالعهٔ Atashnama و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که یونجه استعداد بالایی در جذب و نگهداری عناصر با پتانسیل سمیت در اندام‌های خود به‌خصوص بخش هوایی دارد. همچنین نتایج نشان داد که گونهٔ *D. glomerata* در مجموع بیشترین تجمع سرب را در اندام هوایی خود دارد و مقدار کمتری از این عنصر در ریشهٔ گیاه بعد از آزمایش مشاهده شد. در این راستا Moameri و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای تحت عنوان ارزیابی پتانسیل گیاهان مرتعی برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب و روی در زنجان، به توانایی برخی گونه‌های گندمیان در انتقال سرب از خاک و تجمع آن در اندام‌های هوایی اشاره داشتند. در چین Lei و همکاران (۲۰۱۱) ۳۹ گونهٔ بومی در چهار منطقهٔ آلوده به فلزات کادمیم و سرب را مورد بررسی

قرار دادند و گزارش کردند که برخی گونه‌های گندمیان غلظت قابل ملاحظه‌ای از عناصر فوق را جذب و در ساقه‌های خود ذخیره می‌کنند و توانایی بسیار زیادی در استخراج کادمیم، سرب و مس از خاک‌های آلوده دارند. همچنین در آزمایشی که به‌منظور بررسی قابلیت گیاه‌پالایی عنصر کادمیم در گونه ذرت انجام شد نتایج نشان داد که این گونه نسبت به افزایش کادمیم سازگاری زیادی در مقایسه با گونه‌های تیره افتابگردان و پنیرک دارد (Fatahikiasari, 2007).

در بررسی غلظت کادمیم در اندام‌های مختلف، مقدار غلظت کادمیم در ریشهٔ گونهٔ *F. ovina* به مراتب بیشتر از اندام هوایی بود. یکی از دلایلی که می‌توان برای کاهش انتقال کادمیم به بخش هوایی گیاهان بیان کرد انتقال فلز به اندام هوایی از طریق آوندهای چوبی است که عامل انتقال در این آوندها، شیب هیدرواستاتیک و شیب پتانسیل آب است. بنابراین با کاهش رشد گیاهان در اثر افزایش غلظت کادمیم، میزان تبخیر تعرق کاهش و میزان انتقال در این آوندها نیز کاهش می‌یابد (Kholdbarin and Islamzadeh, 2002). در همین راستا، Garg and Cataria (۲۰۰۹) گزارش دادند که جذب عناصر با پتانسیل سمیت توسط گیاهان تحت تأثیر فلزات خاک در دسترس قرار دارد که این خود به خصوصیات خاک و گیاه بستگی دارد. در این خصوص حضور یک سیستم ریشه‌ای متراکم و افشان که غالباً در گیاهان علفی دیده می‌شود، قابلیت جذب را افزایش می‌دهد (Comesa *et al*., 2006). براساس نتایج، بررسی مقادیر فاکتور تجمع (BCF) بیانگر بیشتر بودن تجمع در ریشه نسبت به اندامی هوایی است. علاوه بر فاکتور تجمع، یکی از فاکتورهای مهم در انتخاب گونه‌های بیش اندوز، فاکتور انتقال است (Yoon *et al*., 2006) و گونه‌های گیاهی که فاکتور انتقال آن‌ها کمتر از یک است، برای عملیات تثبیت آلودگی عناصر با پتانسیل سمیت مورد استفاده قرار می‌گیرند. براساس نتایج حاصل از شاخص‌های BCF و TF گونهٔ *D. glomerata* از طریق فرآیند گیاه استخراجی برای سرب و *M. sativa* برای سرب و کادمیم و گونهٔ *D. glomerata* براساس فرآیند گیاه تثبیتی در جذب کادمیم دارای قابلیت بوده است. Yoon و همکاران (۲۰۰۶)، Yari Moghadam و همکاران (۲۰۱۳) و Tavili و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند گیاهانی که مقدار TF در آن‌ها بیشتر از یک است، برای گیاه استخراجی مناسب هستند. به‌طور کلی این گیاهان نیازمند انتقال عناصر با پتانسیل سمیت به بخش‌های قابل برداشت گیاهان مانند ساقه‌ها هستند در نتیجه پس از آن، برداشت، بازیافت، سوزانده و یا دفن می‌شوند (Abul-kashem *et al*., 2008). در این راستا Chaney (۱۹۸۳) پیشنهاد کرد که برخی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با گیاه‌پالایی پاک‌سازی شوند، سپس گیاهان را برداشت و آن‌ها را در یک "منطقهٔ ایمن" دفع می‌کنند. سرب ممکن است به‌طور طبیعی در گیاهان وجود داشته باشند، ولی هیچ نقش ضروری در متابولیسم آن‌ها ندارد و گیاهانی که بتوانند در حضور غلظت‌های بالای این عنصر در خاک رشد کنند و واکنش منفی از خود بروز ندهند، مقاوم به این فلز هستند. همچنین سرب ممکن است در غلظت‌های بالا یا پایین توسط برخی گیاهان جذب شود (Kabata and Pendias, 2011). در مطالعه‌ای که در پرو تحت عنوان تجمع عناصر با پتانسیل سمیت در گونه‌های بومی جهت تغییر پتانسیل گیاه‌پالایی آن‌ها انجام شد مقدار Cd, Cu, Ni, Pb و Zn در ریشه، ساقه و خاک اندازه‌گیری شد. مقادیر فاکتورهای TF و BAF نشان داد که گونه‌های *Medicago lupulina*، *Pennisetum clandestinum* و *Juncus bufonius* دارای توان گیاه‌پالایی با توجه به انتقال و تحمل عناصر با پتانسیل سمیت سرب، کادمیم، نیکل و زینک می‌باشند (Chang *et al*., 2008). تحقیقات دیگری توسط Shetangiva و همکاران (۲۰۰۸) گزارش شده است که ارزش TF در گونهٔ گیاهی *Avena fatua* در خاک آلوده به کادمیم کمتر از ۱ بود. یکی از راهبردهای گیاهان در مواجه با غلظت زیاد فلزات، دفع است که غلظت فلزات در اندام هوایی گیاه کم نگه داشته می‌شود تا زمانی که غلظت فلزات در خاک به حد بحرانی برسد. گونهٔ *Festuca ovina* به‌عنوان دافع، برای حفظ بخش‌های هوایی از آسیب‌های ناشی از تجمع زیاد کادمیم مانع انتقال این عنصر به ساقه و برگ می‌شود (Gosh *et al*., 2005).

با توجه به اینکه پس از برداشت، آلودگی خاک توسط گیاه کاهش می‌یابد، اما مقدار زیادی زی‌توده خطرناک تولید می‌شود. تولید کمپوست و متراکم کردن دو روشی است که برای مدیریت زی‌توده گیاهان آلوده از سوی بسیاری از محققین پیشنهاد شده است. اما تغییر و تبدیل‌های شیمیایی بهترین روش برای مصرف زی‌تودهٔ تولید شده با گیاه‌پالایی است، در این روش زی‌توده همچون یک منبع انرژی مصرف تجاری دارد. سوزاندن و تولید گاز از روش‌های مهم تولید انرژی گرمایی و الکتریکی است که

می‌توانند از گیاهان آلوده استخراج شوند. بازیافت این انرژی از زی‌توده یا سوزاندن یا تولید گاز می‌تواند ارزش اقتصادی داشته باشد زیرا آن را نمی‌توان همچون علوفه یا کود مصرف کرد (Khosrobaky *et al.*, 2009).

همچنین با توجه به نتایجی که از کارایی گیاه‌پالایی به‌دست آمد می‌توان بیان کرد که کارایی گیاه‌پالایی اندام هوایی سه گونهٔ مورد مطالعه در مورد غلظت‌های مختلف سرب بیشتر از ریشه بود. در تأیید این مورد می‌توان به استخراجی بودن گیاهان (که در نتایج قبل گفته شد) اشاره کرد که مقدار TF آن‌ها بزرگتر از یک بوده است و این نشان می‌دهد که این گونه‌ها فلزات سنگین را به اندام هوایی خود انتقال می‌دهند. در مطالعه‌ای که توسط Moiora و همکاران (۲۰۱۷) بر روی گیاه افسنطین (*Artemisia absinthium*) انجام دادند به این نتیجه رسیدند که تجمع سرب در اندام هوایی بیشتر بوده است و دلیل آن را جذب آلاینده‌ها در هوا اعلام کردند. همچنین Kabata و Pendiaz (۲۰۱۱) محدودهٔ نرمال غلظت سرب را برای گیاهان ۶-۲ میکروگرم بر کیلوگرم بیان کردند. همچنین گزارش کردند گیاهانی که بتوانند در حضور غلظت‌های بالای این عنصر رشد کنند مقاوم به این فلز می‌باشند.

برای عنصر کادمیم ریشهٔ دو گونهٔ *Dactylis glomerata* و *Festuca ovina* کارایی گیاه‌پالایی بیشتری نسبت به اندام هوایی داشتند. به‌طور معمول کادمیم در ریشه‌ها باقی می‌مانند و فقط مقداری از آن به اندام هوایی انتقال می‌یابد (Benavides *et al*., 2005). Ebrahimi و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که بیشتر فلزات در ریشه‌های گیاهان تجمع می‌یابند. همچنین Hansel و همکاران (۲۰۰۱) گزارش کردند که ذخیرهٔ فلزات در ریشه‌ها نشان می‌دهد که برخی گیاهان با دفع داخلی یا خارجی فلزات سازگار هستند و از این طریق مانع انتقال عناصر به اندام‌های هوایی می‌شوند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با توجه به کارآیی گیاه‌پالایی، مشخص شد که در هر سه گونهٔ مورد بررسی کارایی گیاه‌پالایی اندام هوایی در مورد غلظت‌های مختلف سرب بیشتر از ریشه بود ولی برای عنصر کادمیم ریشهٔ دو گونهٔ *D. glomerata* و *F. ovina* کارایی گیاه پالایی بیشتری نسبت به اندام هوایی داشتند. همچنین فاکتور انتقال و میزان جذب و تجمع سرب در گونهٔ علف باغی بیشتر از یونجه بود. در نهایت باید بیان داشت که نتایج به‌دست آمده مربوط به مقایسهٔ بین گونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی است و جهت تعیین قابلیت نهایی گیاه‌پالایی، انجام تحقیقات تکمیلی در خاک و میزان تغییرات عناصر طی چند دوره، ضروری می‌باشد.

References

Abul Kashem, M.D., Singh, B.R., Imamul Huq, S.M., Kawai, Sh., 2008. Cadmium phytoextraction efficiency of arum (*Colocasia antiquorum*), radish (*Raphanus sativus* L.) and water spinach (*Ipomoea aquatica*) grown in hydroponics. Water, Air, & Soil Pollution 192, 273-279.

Akova, D.G., 2018. Heavy metals and their general toxicity on plants. Plant Science Today 5(1), 14-18

Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A., 2013. Phytoremediation of heavy metals- concepts and applications. Chemosphere 91, 869-881.

Armand, N., Tavakoli, M., Armand, R., Yousofnia, H., 2019. Investigating the possibility of refining the land soils around the Beybehan beetroot oil refinery by a herb medicine herb. Journal of Plant Research 2: 14. (In Persian)

Atashnama, K., Golchin, A., Esmaeli, M., 2008. Accumulation of some heavy metals in three forage plants of alfalfa, kelp and sainfoin. Conference on Soil, Environment and Sustainable Development, Karaj, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. 370p. (In Persian)

Bader, N., Alsharif, E., Nassib, M., Alshelmani, N., Alalem, A., 2018. Phytoremediation potential of *Suaeda vera* for some heavy metals in roadside soil Benghazi, Libya. Journal of Green Chemistry 3(1), 1-24.

Bagheri, Shabestari, E.S., Sheidai, M., Assadi, M., Amini, T., 2010. Species relationships in *Festuca Ovina* (Poaceae) of Iran, Gene Conserve 9(38), 247-262.

Benavides, M.P., Susana, M., Gallego Maria, L., 2005. Cadmium toxicity in plants. Toxic Metals in Plants, 17: 21-34.

Bonanno, G., Giudice, R.L., 2010. Heavy metal bioacucumulation by the organs of *Phragmites australis* (Common reed) and their potential use as contamination indicators. Ecological Indicator 10, 639-645

Bowen HJM. 1979. Environmental chemistry of the elements: Academic Press

Chang Kee, J., Gonzales, M., Ponce, O., Ramirez, L., Leon, V., Torres, A., Curpos, M., Lourza-Moru, R., 2018. Accumulation of heavy metals in native Andean plants: potential tools for soil phytoremediation in Ancash (Peru). Environmental Science and Pollution Research 25, 33957-33966.

Chaney, R.L., Reeves, P.G., Ryan, J.A., Simmons, R.W., Welch, R.M., Angle, J.S., 2004. An improve understanding of soils Cd risks to humans and low costs methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks. Biometals 17, 549-553.

Cheraghi, M., Lorestani, B., Khorasani, N., Yousefi, N., Karami, M., 2011. Findings on the phytoextraction and phytostabilization of soils contaminated with heavy metals, Biological Trace Element Research 144(1-3), 1133-1141

Daeezadeh, R., Sori, M., Zandi, A., Moetamedi, J., 2016. Evaluation of potential of *Agropyron intermedium* and *Dactylis glomerata* in phytoremediation of light crude oil contaminated soil under greenhouse conditions. Rangeland and Watershed Management 70(2), 315-331. (In Persian)

Dehdari, C., Khorsandi, J., Shojaee, R., 2017. Investigation of the effects of zeolite application on yield of rangeland species *Cymbopogon olivieri*, *Medicago sativa* and *Medicago scutellata*. Rangeland and watershed management. 70 (2), 364-374. (In Persian)

Ebrahimi, M., Madrid Díaz, F., 2014. Use of Festuca ovina L. in chelate assisted phytoextraction of copper contaminated soils. Jour. Rangeland Science 4(3), 171-181.

Ebrahimi, M., Jafari. M., Savaghebi. G.R., Azarnivand, H., Madrid. F., 2014. Investigation of Heavy Metals Accumulation in Plants Growing in Contaminated Soils (Case Study: Qazvin Province, Iran). Journal of Rangeland Science 4(2), 91-99.

FAO/WHO.1984. List of contaminants and their maximum levels in foods. Codex Alimentarius Commission. Available at http://www.codexalimentarius.org. (Accesed on 10 November 2012).

Fontem lom, A., Ngwa, E.S.A., Chikoye, D., Suh, C.E., 2014. Photeremediation Potential of weeds in heavy metal contaminated siols of the Bassa Industrial zone of Douala, Cameroon. International Journal of Phytoremedation 16, 302-319.

Garg, G., Kataria, S.K., 2009. Phytoremediation potential of *Raphanus sativus*, *Brassica juncea* and *Triticum aestivum* (1) for copper contaminated soil. Proceedings of the 53rd Annual meeting of the international Society for the Systems Sciences Brisbane, Australia.

Gavrilescu, M., 2022. Enhancing phytoremediation of soils polluted with heavy metals. Current Opinion in Biotechnology 74, 21-31.

Ghasemi, R., Tatian, M., Tamartash, R., 2015. Ecological study of *Festuca ovina* rangeland species in summer rangelands of Mazandaran province (Case study: Gaduk rangelands). Conference on Medicinal Plants. (In Persian)

Ghorbani, A., Pournemati, A., Ghasemi, Z., 2017. Comparison of some ecological factors in the distribution of *Dactylis glomerata* and *Thymus kotschyanus* Boiss and Hohen in the south of Ardabil province. Rangeland and Watershed Management 7 (2), 444-458. (In Persian)

Glick, B. R. 2010. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. Biotechnology Advances 28, 365-374.

Guerra Sierra, B., Guerrero, J.M., Sookolski, S., 2021. Phytoremediation of Heavy Metals in Tropical Soils an Overview, Ssustainability13, 1-24.

Habib, R., Heshmati, F., Ebrahimi, C., 2017. Investigation of the role of Megatrium and Bacillus subtilis in increasing phytoremediation of *Agropyron cristatum* and *Achillea millefolium* species in oil-contaminated soils (Case study: Soils around Tehran refinery). Plant Ecosystem Protection 5(15), 134-144. (In Persian)

Hesami, R., Salimi, A., Ghaderian, S.M., 2017. Lead, zinc, and cadmium uptake, accumulation, and phytoremediation by plants growing around Tang-e Douzan lead–zinc mine, Iran. Environmental Science and Pollution Research.

Jafari, M., Moameri, M., Jahantab, A., Zargam, C., 2016. Effect of compost and biochar on phytoremediation ability of *Bromus tomentellus* in greenhouse conditions. Scientific Journal - Rangeland Research 11(2), 146-206. (In Persian)Jiang, J., Wang, J., Liu, S., Lin, C., He, M., Liu, X., 2013. Background, baseline, normalization, and contamination of heavy metals in the Liao River Watershed sediments of China. Journal of Asian Earth Sciences 73, 87-94.

Kabata, A., Pendias, H., 2011. Trace metals in soils and plants, CRC Press, Boca Rotan, Fla, USA, 4nd edition. 534 p.

Karpiscak, M.M., Whiteaker, L.R., Artiola, J.F., Foster, K.E., 2001. Nutrient and heavy metal uptake and storage in constructed wetland systems in Arizona. Water Science and Technology 44, 455-462.

Kholdbryn, B., Islamzadeh T., 2002. Mineral nutrition of higher plants. In tow Volumes Shiraz University Press. (In Presian)

Kofi, A., Akoto, R., 2018. Assisted ohytormediation of heavy metal contaminated soil from a mined site with *Typha latifolia* and *Chrysopogon zizanioides*. Ecotoxicology and Environmental Safety pp. 97-104.

Khosrobaky, N., Myrzaaghaei, M., Tavakoli, H., 2009. "Phytoremediation, amethod for purification of wastewater pollution in order to protect the environment and saving water," Scientific Conference of Water Challenge in Qom, the past, present and future, Qom, Iran. (In Persian)

Ladislas, S., El-Mufleh, A., Gérente, C., Chazarenc, F., Andrès, Y., Béchet, B., .2012. Potential of aquatic macrophytes as bioindicators of heavy metal pollution in urban stormwater runoff. Water, Air, & Soil Pollution 223(2), 877–888.

Lei, W., Peishi, Q., Win, M., 2011. Phytoremediation prospects of heavy metals by indigenous plants growing in industrial polluted soils. International Conference on Computer Distributed Control.

Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of DTPA soil test for Zinc, Iron, manganese and copper. Journal of Soil Science Society America 42, 421-428.

Mahdavian, K., Ghaderian, S.M., Torkzadeh-Mahani, M., 2017. Accumulation and phytoremediation of Pb, Zn, and by plants growing on Koshk lead-zinc mining area, Iran. J Soils Sediments 17(5), 1310-1320.

Moameri, M., Jafari, M., Tavili, A., Motasharezadeh, B., Zare Chahouki, M., 2014. Rangeland Plants Potential for phytoremedation of contaminate soils with lead, Zinc, Cadmium and Nickel (Case study: rangelands around national lead & zinc factory, Zanjan, Iran), Journal of Rangeland Scince 2(7), 160-170.

Mohebi, A., 2012. Investigation of the effects of planting corn, alfalfa and sunflower on the growth rate and uptake of elements by dates in a lead-contaminated soil. Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences) 26(2), 327-337. (In Persian)

Rachieru, M.S., Faciu, M.E., Ifrim, I., Stefanescu, I., Kamari, A., Stamate, M., Lazăr., 2017. Heavy metals and Gamma radioactivity bioaccumulation Artemisia absinthium L. grown on a waste dump. Environmental Engineering and Management Journal 16, 859-867.

Norozi Fard, P., Mortazavi, S., Ildromi, A., 2016. Common reed (*Phragmites australis*) as a bio refining and monitoring plant of pollution resulting from heavy metals (case study: Dez river, Dezful, Iran), Journal of Rangeland Science 1(6), 10-23.

Orisakwe, O.E., Nduka, J.K., Amadi, C.N., Dike, D., Obialor, O.O., 2012. Evaluation of potential dietary toxicity of heavy metals of vegetables. Journal of Environmental and Analytical Toxicology 2(3), 50-61.

Oskoee, T., Jafari, M., Javadi, V., Tahmores, M., 2019. Evaluation of phytoremediation ability of rangeland species to soils contaminated with copper and manganese. Iranian Soil and Water Research 2(7), 1056- 1070. (In Persian)

Parsadost, F., Bahrieni nejad, R., Safari, A., Kaboli, M., 2007. Phytoremediation of lead element by rangeland and native plants in contaminated soils of Irankooh region of Isfahan. Research and construction in natural resources 75, 54-63. (In Persian)

Reeves, R.D., Baker, A.J.M., Brooks, R.R., 1995. Abnormal Accumulation of Trace Metals by Plants. Mining Environmental Management (120), 4-8.

Reeves, R. D., 2006.Hyper accumulation of trace elements by plants. In: Morel JL, Echevarria G, Goncharova N, editors. Phytoremediation of Metal-contaminated Soils.NATO Sciences Series 68.Springer, New York. pp. 25-52.

Santos, L.H.M.L.M., Gros, M., Rodriguez-Mozaz, S., Delerue-Matos, C., Pena, A., Barcelo, D., 2013. Contribution of hospital effluents to the load of pharmaceuticals in urban wastewaters: identification of ecologically relevant pharmaceuticals. Science Total Environment (461–462), 302-316

Shahid, M., Arshad, M., Kaemmerer, M., pinelli, E Probst, A., Baque, D., Pradere, P & Dumat, C. 2012. Long-term field metal extraction by Pelargonium: phytoextraction efficiency in relation to plant maturity. Int. J. Phytoremediation 14, 493- 505

Shetangeeva, I., 2008. Uptake of uranium and thorium by native and cultivated plants. Journal of environment activity (1), 32-39.

Soleimani, M., Hajabbasi, M.A., Afyuni, M., Charkhabi, A.H., Shariatmadari, H., 2009. Bioaccumulation of Nickel and Lead by Bermuda Grass (*Cynodon dactylon*) and Tall Fescue (*Festuca arundinacea*) from Two Contaminated Soils. Caspian Journal of Environmental Sciences 7(2), 59-70

Tangahu, B.V., Sheikh Abdullah, S.R., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., Mukhlisin, M., 2015. A review on heavy metals (as, pb, and hg) uptake by plants through phytoremediation. Open Journal of Ecology 5, 375-388.

Tavili, A., Jahantab, E., Jafari, M., Motesharezade, B., Zarghan, N., Saffari Amman, M., 2019. Assessment of TPH and nickel contents associated with tolerant native plants in petroleum-polluted area of Gachsaran, Iran. Arabian Journal of Geosciences 12, 325.

Wang, F. Q., Li, Y. j., Zhang, Q., Qu, J., 2015. Phytoremediation of cadmium, lead and zinc by *Medicago sativa L.* (alfalfa): A study of different period. Bulgarian Chemical Communications Bulgarian Chemical Communications 47, 167-172.

Xoing, P.P., He, C. q., Kokyo, O., Chen, X., Lio, X., Cheng, X., Wu, Ch., Shi, Z., 2018. *Medicago sativa* L. enhances the phytoextraction of cadmium and zinc by *Ricinus communis* L. on contaminated land in situ. Ecological Engineering 116, 61-66.

Yari Moghadam N., Cheraghi, M., Hasani, A.H., Javid, A.H., 2013. Evaluation of heavy metals (Cu, Zn, Pb and Cd) in Hamadan Abshine River. Journal of Health and Development 2(4), 296304. (In Persian)

Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., Ma, L. Q., 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of the Total Environment 368, 456-464.

Zafaranian, F., Rezvani, F., Rajali, M., Ardakani, R., Noormohamadi, S., 2009. The ability of alfalfa (*Medicago sativa*) to harvest heavy metals from the soil. Environmental Science 7(2), 77-90. (In Persian)

Zhang, Q., Li, Y., Phanlavong, P., Wang, Z., Jiao, T., Qiu, H., Peng, Q. 2017a. Highly efficient and rapid fluoride scavenger using an acid/ base tolerant zirconium phosphate nanoflake: behavior and mechanism. Journal. Clean. Prod. 161, 317- 326.

Zhang, Q., Li, Y., Yang, Q., Chen, H., Chen, X., Jiao, T., Peng, Q., 2017b. Distinguished Cr (VI) capture with rapid and superior capability using polydopamine microsphere: behavior and mechanism. Journal Hazardous Materials 342, 732.

Zhang, X.e., Li, M., Yang, H., Li, X., Cui, Z., 2018. Physiological responses of Suaeda glauca and Arabidopsis thaliana in phytoremediation of heavy metals. Journal of Environmental Management 223, 132-139.

Zoufan, P., Saadatkhah, A., Rastegharzadeh, S., 2013. Comparison of potentiality of heavy metals accumulation in the plants surrounding steel industries in the Mahshahr-Bandar Imam road, Ahvaz. Journal of Plant Biology 5(16), 41-56.