

گیاه‌پالایی و تخمین زمان بهینه پالایش خاک‌های آلوده به سرب با استفاده از دو گیاه خرفه و تاج‌خروس وحشی

صفورا اسدی کیپورچال و وحیدرضا جلالی

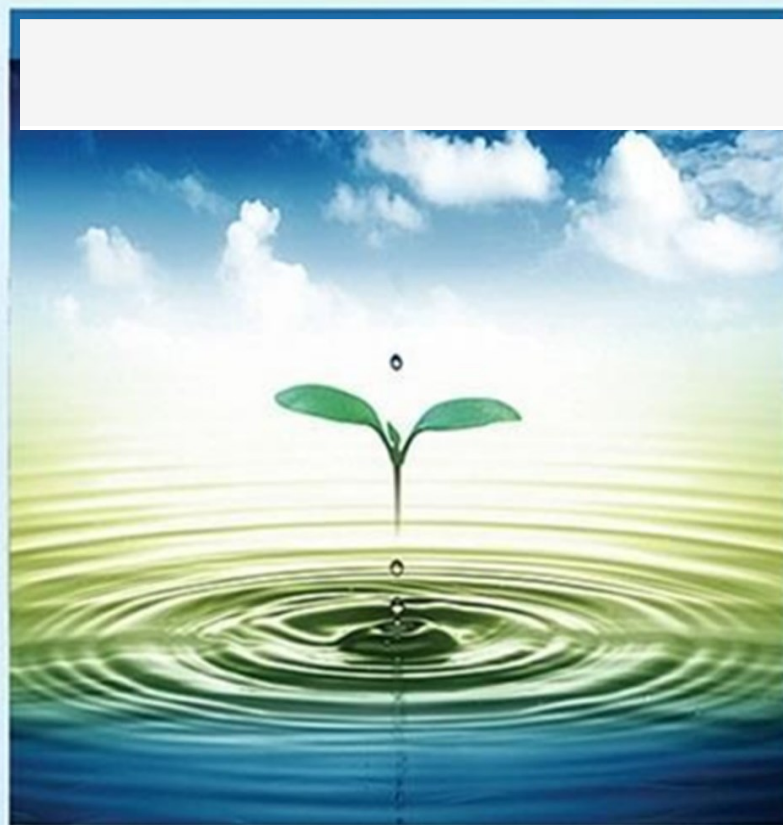
دوره ۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، صفحات ۲۵-۳۷

Vol. 7(1), Spring 2021, 25-37

DOI: 10.22034/jewe.2020.248656.1424

**Phytoremediation and Estimation of Optimal
Clean up Time of Lead Contaminated Soils
Using *Portulaca oleracea* L. and *Amaranthus
retroflexus***

Asadi Kapourchal, S. and Jalali, V.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

اسدی کیپورچال ص. و جلالی و. (۱۴۰۰). گیاه‌پالایی و تخمین زمان بهینه پالایش خاک‌های آلوده به سرب با استفاده از دو گیاه خرفه و تاج‌خروس وحشی. محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۱، صفحات: ۲۵-۳۷.

Citing this paper: Asadi Kapourchal, S. and Jalali, V. (2021). Phytoremediation and estimation of optimal clean up time of lead contaminated soils using *Portulaca oleracea* L. and *Amaranthus retroflexus*. Environ. Water Eng., 7(1), 25-37. DOI: 10.22034/jewe.2020.248656.1424.

مقاله پژوهشی

گیاه پالایی و تخمین زمان بهینه پالایش خاک‌های آلوده به سرب با استفاده از دو گیاه خرفه و تاج‌خروس وحشی

صفورا اسدی کیورچال^{۱*} و وحیدرضا جلالی^۲

^۱استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، مجتمع آموزش عالی شیروان، شیروان، ایران

*نویسنده مسئول: safoorasadi@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۰۷/۲۵]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۰۷/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۶/۲۶]

چکیده

فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌زیست و به‌ویژه منابع خاک و آب هستند. از میان فلزات سنگین، سرب یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های سمی است. استفاده از خاک‌های آلوده به سرب، مستلزم آلودگی‌زدایی و بهسازی آن‌ها است. پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان آلودگی‌زدایی سرب از خاک و تخمین زمان بهینه پالایش با استفاده از گیاهان خرفه و تاج‌خروس وحشی انجام شد. بدین منظور، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۵ تیمار شاهد، ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ mg/kg و سه تکرار اجرا شد. نتایج نشان داد که در هر دو گیاه رابطه‌ای غیرخطی و مثبت بین مقدار سرب تجمع یافته در ریشه و ساقه با غلظت سرب موجود در خاک وجود داشت. بیش‌ترین مقدار سرب تجمع یافته در ریشه خرفه و تاج‌خروس وحشی به‌ترتیب ۱۷۳/۳۹ و ۱۴۹/۷۶ mg/kg و در ساقه آن‌ها نیز به‌ترتیب ۲۰/۰۱ و ۵/۸۲ mg/kg به‌دست آمد. فاکتور انتقال در هر دو گیاه کوچک‌تر از یک بوده (برای گیاه خرفه از ۰/۶۲ تا ۰/۱۲ و برای گیاه تاج‌خروس وحشی از ۰/۱۴ تا ۰/۰۴) و بیانگر انتقال کم‌تر سرب از ریشه به اندام هوایی می‌باشد. با توجه به توانایی گیاهان فوق در جذب مقادیر زیاد سرب از ناحیه رشد ریشه، عملکرد گیاهی بالا و توانایی تجمع سرب در اندام‌های قابل‌برداشت، هر دو گیاه برای پاک‌سازی سرب از اعماق سطحی خاک و تا غلظت‌های چندین برابر غلظت مجاز سرب کارایی بالایی داشتند. لیکن با توجه به زمان پالایش و مقدار زیست‌توده تولیدشده، گیاه تاج‌خروس وحشی از توانایی بیش‌تری برای بهسازی خاک‌های آلوده برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک؛ استخراج گیاهی؛ سرب؛ فاکتور انتقال.

۱- مقدمه

فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌زیست و به‌ویژه منابع خاک و آب هستند. فلزات سنگین گروهی از فلزات و شبه‌فلزات هستند که به‌دلیل غیرقابل تجزیه بودن و آثار زیان‌بار فیزیولوژیک بر جانداران حتی در غلظت‌های کم نیز اهمیت ویژه‌ای در آلودگی محیط‌زیست داشته (Etesami 2018) و کاهش کیفیت خاک را به‌دنبال دارند (Haji Namaki et al. 2017). از میان فلزات سنگین، سرب و کادمیوم از مهم‌ترین آلاینده‌های سمی هستند که از منابع گوناگون به زیست‌بوم، گیاهان و در نهایت به زنجیره غذایی انسان‌ها و حیوانات راه پیدا کرده و خسارت‌های جدی به بار می‌آورند (Jaskulak et al. 2020).

حلالیت و تحرک سرب با کاهش pH افزایش می‌یابد. سرب، کم‌تحرک‌ترین فلز سنگین در خاک به‌ویژه در شرایط کاهشی یا قلیایی است. استفاده فراوان از فلز سرب در صنعت، اضافه کردن آن به سوخت‌های فسیلی، استفاده در صنعت سفالگری به‌صورت لعاب نمونه‌هایی از کاربردهای این فلز است (Yanqun et al. 2004). مصرف دیگر آن به‌صورت تتراتیل و تترامتیل در بنزین برای افزایش کارایی بنزین است (Al-Chalabi and Hawker 2000). ورود سرب به بدن از راه‌های مختلفی از جمله تنفس هوای آلوده و خوردن و نوشیدن غذا و آب آلوده انجام می‌گیرد و عواقب خطرناکی را به دنبال خواهند داشت که از آن جمله می‌توان به جلوگیری از تولید هم^۱ در خون و آسیب‌های ذهنی به‌ویژه در کودکان اشاره کرد (Asadi Kapourchal et al. 2009).

بروز سرطان‌ها، سکت‌های قلبی و مغزی، افزایش مشکلات کلیوی، اختلالات روحی و روانی، افسردگی‌ها، اختلالات ژنتیکی، تولید نوزادان ناقص، رفتارهای تهاجمی، کاهش بهره‌مندی، عدم تمرکز فکری نیز از پیامدهای آلودگی محیط‌زیست به فلزات سنگین می‌باشند (Zorrig et al. 2010).

Heme

2010). بنابراین افزایش آگاهی از خطر عناصر سنگین، اصلاح خاک‌های آلوده به این فلزات را ضروری می‌سازد. روش‌های فیزیکی و شیمیایی گوناگونی برای مقابله با آلودگی عناصر سنگین در خاک وجود دارد (Thawornchaisit and Polprasert 2009; Glick 2003).

پالایش گیاهی روشی پایدار، درجا و سازگار با محیط‌زیست است که گیاه با برداشت و یا تجزیه ترکیبات آلاینده در ریشه‌گاه، جذب انتخابی فلزات و تجمع در بافت خویش و یا فرارفت آلاینده به نیوار، موجب کاهش غلظت آلاینده در خاک می‌شود (Cameselle and Gouveia 2019; Parseh et al. 2018). در این روش، برای آلودگی‌زدایی خاک، از گیاهان بیش‌اندوز با توان بسیار بالای جذب و انباشت فلزات سنگین استفاده می‌شود. گیاهان پس از کشت در مناطق آلوده و رشد مناسب، به مخزنی زنده از عناصر سنگین تبدیل می‌شوند. این روش، یک فرآیند پالایش غیرمستقیم و درازمدت است که نیازمند هزینه بالا و دانش فنی پیچیده‌ای نیست. از مزایای این روش، ارزان بودن و نداشتن اثرات جانبی زیست‌محیطی است. بقایای این گیاهان بیش‌اندوز که به عناصر سنگین آلوده‌شده‌اند، توسط روش‌هایی مانند خشک‌کردن و خاکستر کردن نابود می‌شوند. بدیهی است فلزات موجود در آن‌ها با استفاده از روش‌هایی همچون گازی کردن، استخراج با اسید، هضم غیر هوازی و یا استخراج روغن گیاهی قابل استحصال و بازیافت است (Schnoor 1997; Salt et al. 1998).

انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار در درجه و مقدار برداشت فلزات در خاک‌های آلوده است. مقدار فلزات برداشت‌شده به مقدار زیست‌توده برداشت‌شده و غلظت فلز در زیست‌توده برداشت‌شده بستگی دارد (Lasat 2000). گیاهان شناخته‌شده با پتانسیل طبیعی برای جذب سرب اغلب به خانواده‌های *Asteraceae*، *Scrophulariaceae*، *Lamiaceae*، *Euphorbiaceae* و *Brassicaceae* تعلق دارد. بیش‌ترین مقدار بیش‌اندوزی

تاج‌خروس وحشی و خرفه و معرفی محدوده کارایی آن‌ها در پالایش خاک‌های آلوده بود.

۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر توان گیاه‌پالایی دو گیاه تاج‌خروس وحشی (*Amaranthus retroflexus*) و خرفه (*Portulaca oleracea* L. در پالایش فلز سنگین سرب از خاک موردبررسی قرار گرفت. این پژوهش به‌صورت کشت گلدانی و در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار شامل شاهد، ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ mg/kg و سه تکرار طراحی شد. با توجه به اینکه حد مجاز سرب در خاک ۱۵۰ mg/kg است (Cariny 1995)، برای بررسی اثر مقدار سرب موجود در خاک بر میزان جذب سرب توسط گیاه دامنه‌ای از غلظت صفر تا چند برابر حد مجاز آن در خاک در نظر گرفته شد. خاک‌ها پس از هوا خشک‌کردن از الک ۲ mm عبور داده شد. از خاک‌هایی که بدین ترتیب الک شده بودند، یک نمونه تهیه و جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی موردنظر استفاده شد. تحلیل‌های آزمایشگاهی انجام‌شده شامل جرم ویژه ظاهری به روش سیلندر، اندازه‌گیری pH گل اشباع با دستگاه pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت سنج (Page et al. 1982)، فراوانی نسبی ذرات شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری (Gee and Bauder 1986)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جایگزینی کاتیون‌ها با سدیم استات (Sumner and Miller 1996) و تعیین مقدار ماده آلی خاک به روش والکلی و بلاک (Walkley and Black 1934) بود.

۲-۱- آماده‌سازی تیمارها

برای رسیدن به سطوح آلودگی موردنظر، نخست، مقدار سرب لازم (از منبع نیترات سرب) برای آلوده‌سازی جرم مشخصی از خاک محاسبه و به نمونه‌های خاک اضافه شد. بدین‌صورت که ابتدا مقدار خاک لازم برای هر یک از تیمارها و تکرارها تهیه و سپس مقدار آلاینده موردنظر به‌آرامی و به‌صورت اسپری به خاک اضافه شد. طی فرآیند مه پاشی، خاک‌ها

سرب در خردل هندی (*Brassica juncea*) ذکرشده است. این گونه‌ها سرب را فقط از طریق ریشه جذب نمی‌کنند، بلکه همچنین توانایی انتقال سرب از ریشه‌ها به جوانه‌ها را هم دارند، که ویژگی مهمی برای استخراج گیاهی کارا است (Henry 2000).

نتایج پژوهش Asadi Kapourchal et al. (2009) نشان داد که گیاه تربچه با رشد سریع و تولید زیست‌توده بالا برای پالایش خاک‌های سطحی آلوده به سرب مناسب است. (Alipour et al. 2015) با استفاده از گیاه سلمه‌تره نشان دادند که گیاه‌پالایی روش مناسبی برای کاهش آلودگی سرب در خاک است. (Arabi et al. 2017) در پژوهشی تأثیر کاربرد کلات‌های مختلف بر گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به کادمیوم بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که HEDTA نسبت به سایر کلات‌های به‌کاررفته در استخراج گیاهی کادمیوم از خاک آلوده مؤثرتر بود. (Dodangeh et al. 2018) با استفاده از گیاهان زینتی اقدام به حذف عناصر سنگین در خاک‌های آلوده کردند. در سال‌های اخیر استفاده از گیاه‌پالایی برای کاهش آلودگی عناصر سنگین موردتوجه پژوهشگران زیادی قرارگرفته است (Steliga and Kluk 2020; Eisazadeh et al. 2019; Sarwar et al. 2017; Mahar et al. 2016; Mohammadipour and Asadi 2012).

با توجه به رشد روزافزون جمعیت افزایش تولید محصولات کشاورزی جهت تأمین نیاز غذایی بشر امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر بوده که این افزایش تولید نیازمند استفاده بهینه از منابع آب و خاک و آلودگی‌زدایی این منابع است. نظر به این‌که گیاه‌پالایی روشی پایدار، ارزان و سازگار با محیط‌زیست است، هدف از انجام این پژوهش بررسی وضعیت جذب، فاکتور انتقال (TF)^۱ و مدت‌زمان لازم برای پاک‌سازی خاک آلوده به سرب با استفاده از دو گیاه

Translocation Factor

محیط‌زیست و مهندسی آب

دوره ۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰



به روش اکسیداسیون تر با نسبت حجمی ۴۰، ۴ و ۱ از مخلوط نیتریک اسید، پرکلریک اسید و سولفوریک اسید عصاره‌گیری شد (Gupta 2000).

۳-۲- پارامترهای مورد بررسی

به‌منظور بررسی قابلیت پالایش گیاهان مورد مطالعه و دستیابی به مناسب‌ترین تیمار برای گیاه‌پالایی، پارامترهای مقدار جذب، فاکتور انتقال، فاکتور تجمع زیستی (BCF) و زمان پالایش محاسبه شد. مقدار جذب کل عنصر معیار مناسبی جهت ارزیابی جذب عناصر از خاک محسوب می‌شود و حاصل ضرب غلظت فلز در وزن ماده خشک اندام هوایی است. TF فلز و BCF با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد (Zhang et al. 2010). زمان لازم برای پالایش گیاهی سرب نیز با استفاده از فرمول ارائه‌شده توسط Schnoor (1997) به‌دست آمد. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS (نسخه ۲۲) انجام و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح ۵٪ صورت پذیرفت. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ استفاده شد. در نهایت امکان پالایش گیاهی خاک‌های آلوده به مقادیر مختلف سرب با استفاده از گیاهان مورد مطالعه و محدوده کارایی آن‌ها تعیین شد.

$$TF = C_{shoot}/C_{root} \quad (1)$$

$$BCF = C_{shoot}/C_{Soil} \quad (2)$$

که، C_{shoot} ، C_{root} و C_{Soil} به‌ترتیب مقدار انباشت فلز در شاخساره، مقدار انباشت فلز در ریشه گیاه و مقدار اولیه سرب خاک است.

۳- یافته‌ها و بحث

خاک‌های حاشیه بزرگراه‌ها بر اثر تردد خودروهای مختلف، دارای مقادیر قابل‌توجهی سرب می‌باشند که عمده‌تاً در عمق ۵ تا ۱۰ cm آن‌ها نهشته شده است. گیاهان مذکور از آن نظر انتخاب شدند که دارای رشد سریع، سیستم ریشه‌ای وسیع و تولید زیست‌توده بالا بوده و در صورت اثبات توانایی آن‌ها در برداشت مقادیر قابل‌توجهی از سرب موجود در خاک، می‌توانند به‌عنوان گیاهی بیش‌اندوز برای بهسازی خاک‌های آلوده به سرب معرفی شوند.

به‌آرامی به‌هم زده شدند تا حداکثر اختلاط لازم بین خاک و آلاینده فراهم شود. سپس خاک‌ها با توجه به جرم ویژه ظاهری $1/334 \text{ g/cm}^3$ در گلدان‌های ۷ kg با ارتفاع ۲۰ cm ریخته شد. به‌منظور نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی، نمونه‌ها در فضای باز در زیر شلتر و نه در گلخانه نگهداری شدند تا گیاه در شرایط طبیعی‌تری رشد کند. در ته گلدان‌ها نیز سوراخ‌هایی تعبیه شد تا امکان زهکشی فراهم گردد. به‌منظور حفظ بیلان جرمی آب و آلاینده، آب خروجی از زهکش‌ها مجدداً از بالا به نمونه‌های خاک اضافه شد. خاک‌های آلوده در شرایط رطوبت ظرفیت زراعی قرار داده شدند و به‌مدت ۵۰ به‌منظور انجام برهمکنش‌های آلاینده و خاک رها شدند تا تعادل لازم بین خاک و آلاینده فراهم شود.

سپس کاشت بذرها در گلدان‌های مربوط به تیمارهای طراحی‌شده به‌صورت متراکم و به تعداد ۳۰ بوته در m^2 انجام شد. با توجه به اینکه گلدان‌هایی به قطر ۲۰ cm برای کاشت در نظر گرفته‌شده بود بدین ترتیب سطح هر گلدان cm^2 ۳۱۴ بوده و تراکم کشت برای هر گلدان ۱ بوته بود. لیکن ابتدا، در هر گلدان تعداد ۳ بذر کاشته شد تا در مراحل بعدی عمل تنک کردن انجام پذیرد. آبیاری تیمارهای مورد آزمایش نیز به‌گونه‌ای انجام شد که هیچ نوع تنش آبی رخ نداده و رطوبت در حد ظرفیت زراعی حفظ شود.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

با توجه به این‌که دوره رشد هر گیاه متفاوت بوده، پس از طی دوره رشد گیاهان مورد آزمایش، نمونه‌های گیاهی برداشت و جداسازی بخش هوایی از ریشه انجام و وزن تر نمونه‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و به‌مدت ۴۸ h در دمای $^{\circ}C$ ۷۰ در کوره خشک شدند (Khodaverdiloo and Homaei 2008). وزن خشک نمونه‌ها نیز مجدداً با استفاده از ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها پس از خشک شدن با استفاده از آسیاب برقی با محفظه استیل، آسیاب شده و تا زمان عصاره‌گیری در ظروف پلاستیکی نگهداری شدند.

سرب موجود در نمونه‌های گیاه و خاک عصاره‌گیری و به‌وسیله دستگاه جذب اتمی (Shimadzu AA-670G) اندازه‌گیری شد. غلظت سرب موجود در گیاه

بوده که pH مناسبی برای کشت این گیاهان به شمار می‌آید. بافت خاک نیز Sandy Clay Loam بوده که خاکی نسبتاً سبک بوده، ظرفیت تبادل کاتیونی این خاک Cmolc/kg ۱۴ بوده و ماده آلی نیز حدود ۵۸٪ بود. نتایج تجزیه خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1 Some physical and chemical properties of the experimental soil

CEC (Cmolc/kg)	Pb in soil (mg/kg)	Soil texture	ρ_b (g/cm^3)	EC (dS/m)	OM (%)	pH
14	30	SCL	1.334	1.11	0.58	7.48

مورد مطالعه، شامل اندام هوایی و ریشه، اثر سرب موجود در خاک بر جذب ارزیابی شد. غلظت سرب کل و محلول موجود در خاک برای هر یک از تیمارهای مورد آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- غلظت سرب کل و محلول در تیمارهای مورد آزمایش

Table 2 Total and soluble lead concentrations in the experimental treatments

Treatment	<i>Portulaca oleracea</i> L.			<i>Amaranthus retroflexus</i>		
	Soluble pb (ppm)	Total pb (ppm)	$\frac{\text{Soluble pb}}{\text{Total pb}} \%$	Soluble pb (ppm)	Total pb (ppm)	$\frac{\text{Soluble pb}}{\text{Total pb}} \%$
Control	0.55	28.70	1.92	0.59	25.02	2.36
150	0.58	147.43	0.39	0.63	148.81	0.42
300	0.64	273.80	0.23	0.68	281.11	0.24
600	0.93	531.38	0.18	1.06	570.56	0.19
1200	1.10	1161.11	0.09	1.23	1171.67	0.10

(1997) و (1999) Blaylock et al. در آزمایش‌های مجزای دیگر به دست آمده است.

در پژوهش حاضر، غلظت سرب موجود در نمونه‌های گیاهی خشک شده به روش هضم با مخلوط نیتریک اسید - پرکلریک اسید و سولفوریک اسید استخراج گردید. شکل‌های (۱) و (۲) غلظت سرب تجمع یافته در اندام هوایی و ریشه گیاهان مورد مطالعه را برای تیمارهای مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل‌های (۱) و (۲) مشاهده می‌شود غلظت سرب تجمع یافته در اندام هوایی خرفه بین ۴/۹۸ تا mg/kg و ۲۰/۰۱ و در تاج خروس وحشی بین ۱/۹ تا mg/kg ۵/۸۲ و در ریشه این گیاهان به ترتیب بین ۸/۰۵ تا mg/kg ۱۷۳/۳۹ و ۱۳/۲ تا mg/kg ۱۴۹/۷۶ بوده است. با توجه اینکه بر اساس سازمان بهداشت جهانی غلظت مجاز سرب در گیاه mg/kg ۳ است (Codex Alimentarius Commission، 2001)، مقدار سرب در اندام هوایی خرفه ۱/۶۶ تا ۶/۶۷ برابر

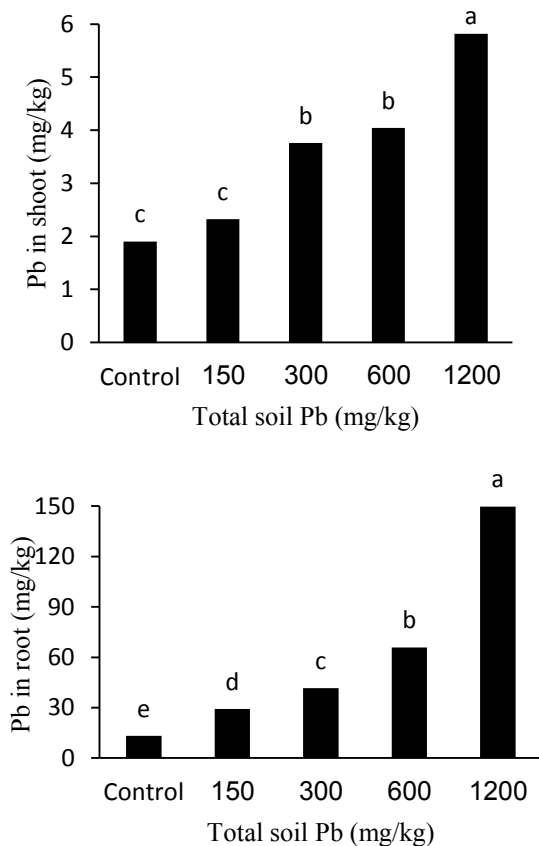
نتایج حاصل از تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که شوری عصاره اشباع خاک مورد استفاده در این آزمایش dS/m ۱/۱۱ بوده که با توجه به اینکه گیاهان مورد مطالعه شورپسند هستند این مقدار شوری برای کشت آن‌ها هیچ‌گونه مشکلی ایجاد نکرده و سبب کاهش عملکرد نیز نشده است. همچنین، pH خاک‌های مورد آزمایش ۷/۴۸

به منظور شناسایی اثرات شکل‌های مختلف سرب موجود در خاک بر جذب آن توسط تاج خروس وحشی و خرفه، مقادیر سرب کل و محلول در خاک اندازه‌گیری شد. سپس، با اندازه‌گیری غلظت سرب انباشته شده در بخش‌های مختلف گیاهان

بدیهی است که از میان انواع شکل‌های سرب موجود در خاک، شکل محلول، قابل دسترس‌ترین شکل سرب بوده و دیگر اشکال سربی (سرب موجود در ترکیبات آلی و سرب قابل تبادل) که قابل دسترس فرض می‌شوند، نقش جایگزین شکل محلول را ایفا می‌نمایند. همچنین لازم به ذکر است که سرعت جایگزینی این اشکال سرب به شرایط حاکم بر واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیک خاک بستگی دارد. نتایج به دست آمده از جدول (۲) بیانگر آن است که سرب محلول تقریباً کم‌تر از ۱٪ درصد از کل سرب موجود در خاک را تشکیل می‌دهد. این نتایج با نتایج به دست آمده توسط (Asadi Kapourchal et al. 2009) نیز مطابقت دارد. از آن‌جا که شکل‌های محلول و قابل تبادل سرب، قابلیت جذب زیستی این عنصر را تعیین می‌کنند، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سرب دارای قابلیت دسترسی زیستی بسیار کمی است که مشابه این نتایج توسط (Alipour et al. 2015)، (Asadi Kapourchal et al. 2009) و (Blaylock et al.



oleracea L. (Different letters show significant differences at $P \leq 0.05$)

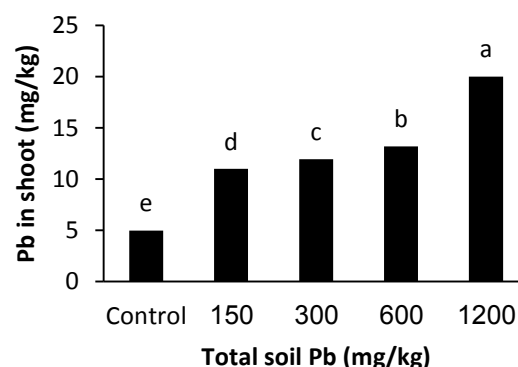


شکل ۲- رابطه مقادیر مختلف سرب خاک و غلظت آن در گیاه تاج خروس وحشی (حروف مختلف نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح احتمال $P < 0.05$ است)

Fig. 2 The relationship between total soil Pb and the lead absorbed by roots and shoots in *Amaranthus retroflexus* (Different letters show significant differences at $P \leq 0.05$)

شکل های (۱) و (۲) نشان می دهد که با افزایش غلظت سرب در ریشه گیاهان از تحرک آن در گیاه کاسته شده و مقدار بیش تری از آن در سلول های ریشه تجمع یافته است. در کلیه گیاهان به علت تغییر سیستم آوندی ریشه به ساقه در محل یقه گیاه، این محل به صورت صافی عمل نموده و موجب تجمع آلاینده ها و کند شدن فرآیند انتقال آن ها به ساقه می شود. نتایج تجزیه واریانس حاصل از ارزیابی ارتباط بین مقادیر مختلف سرب تجمع یافته در ریشه و اندام هوایی خرفه

و در ریشه آن ۲/۶۸ تا ۵۷/۷۹ برابر غلظت مجاز سرب در گیاه بود. برای تاج خروس وحشی نیز مقدار سرب در اندام هوایی ۰/۶۳ تا ۱/۹۴ برابر و در ریشه آن نیز ۴/۴ تا ۴۹/۹۲ برابر غلظت مجاز سرب در گیاه بود. نتایج حاصل از مقایسه میانگین سرب تجمع یافته در ریشه و ساقه خرفه توسط آزمون توکی نشان داد که در سطح ۵٪ بیش ترین میزان جذب سرب در تیمار ۱۲۰۰ mg/kg رخ داد و بین این تیمار با سایر تیمارها اختلاف معنی داری وجود دارد. در مورد گیاه تاج خروس وحشی نیز نتایج حاصل از مقایسه میانگین سرب تجمع یافته در ریشه و ساقه توسط آزمون توکی بیانگر آن است که در سطح ۵٪ بیش ترین میزان جذب سرب در تیمار ۱۲۰۰ mg/kg رخ داده است لیکن تفاوت معنی داری بین میزان تجمع سرب در اندام هوایی در سطوح ۰ و ۱۵۰ و نیز سطوح ۳۰۰ و ۶۰۰ mg/kg وجود نداشت.



شکل ۱- رابطه مقادیر مختلف سرب خاک و غلظت آن در گیاه خرفه (حروف مختلف نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح احتمال $P < 0.05$ است)

Fig. 1 The relationship between total soil Pb and the lead absorbed by roots and shoots in *Portulaca*

و تاج‌خروس وحشی با سرب موجود در خاک به‌ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.

جدول ۳- تجزیه واریانس مقادیر مختلف سرب تجمع یافته در اندام هوایی و ریشه خرفه

Table 3 Statistical analysis of accumulated Pb in *Portulaca oleracea* L. shoot and root

	Plant tissue	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	Shoot	346.43	4	86.61	3352.58	0.000
	Root	53828.90	4	13457.22	58950.52	0.000
Within Groups	Shoot	0.258	10	0.026		
	Root	2.283	10	0.228		
Total	Shoot	346.69	14			
	Root	53831.18	14			

جدول ۴- تجزیه واریانس مقادیر مختلف سرب تجمع یافته در اندام هوایی و ریشه تاج‌خروس وحشی

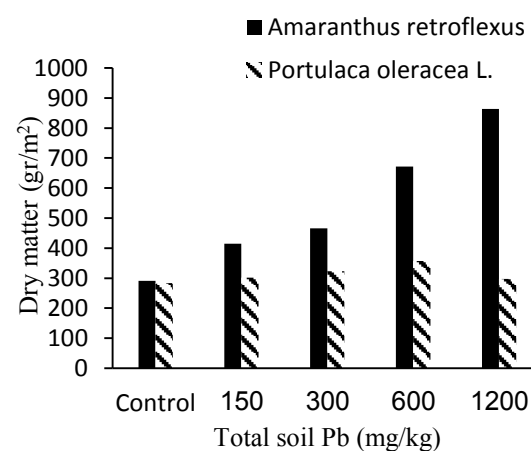
Table 4 Statistical analysis of accumulated Pb in *Amaranthus retroflexus* shoot and root

	Plant tissue	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	Shoot	29.07	4	7.27	148.02	0.000
	Root	34717.83	4	8679.45	38992.44	0.000
Within Groups	Shoot	0.491	10	0.049		
	Root	2.22	10	0.223		
Total	Shoot	29.56	14			
	Root	34720.05	14			

بیش‌اندوزی تریچه برای جذب سرب (Asadi Kapourchal et al. 2009)، سلمه‌تره برای جذب سرب (Alipour et al. 2015) و اسفناج برای جذب کادمیوم (Eisazadeh et al. 2015) همخوانی دارد. با افزایش میزان سرب خاک، میزان ماده خشک تولیدی افزایش یافته و بیش‌ترین میزان ماده خشک برای خرفه و تاج‌خروس وحشی به‌ترتیب در تیمار ۶۰۰ و ۱۲۰۰ mg/kg، حدود ۳۵۰ و ۹۰۰ g/m² به‌دست آمد. این نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است.

۳-۱-۳ BCF، TF و مقدار جذب

مقادیر TF و BCF و مقدار جذب سرب در تیمارهای مختلف برای گیاهان مورد مطالعه در جدول‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش غلظت سرب TF برای هر دو گیاه کاهش یافته به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار آن در تیمار ۱۲۰۰ mg/kg بوده است. همچنین مقدار این فاکتور در هر دو گیاه کوچک‌تر از یک بوده و بیانگر انتقال کم‌تر سرب از ریشه به اندام هوایی می‌باشد. لیکن BCF با افزایش غلظت سرب افزایش یافته است. برای گیاه خرفه دامنه تغییرات TF از ۰/۶۲ در تیمار شاهد تا ۰/۱۲ در تیمار ۱۲۰۰ mg/kg است و دامنه



شکل ۳- مقدار ماده خشک گیاهی در سطوح مختلف آلودگی خاک
Fig. 3 Amount of dry matter in the different levels of contaminated soils

نتایج تجزیه واریانس ارائه شده نشان داد که بین جذب سرب توسط ریشه و اندام هوایی گیاهان مورد مطالعه در سطوح مختلف آلودگی سربی اختلاف معنی‌داری وجود دارد. به‌طوری‌که مقدار سرب تجمع یافته در اندام‌های هوایی کم‌تر از مقدار تجمع یافته آن در ریشه‌ها بوده که این با نتایج به‌دست آمده از برخی پژوهش‌های پیشین مانند توان

میزان جذب سرب در ریشه گیاه بیش از اندام هوایی بوده و با افزایش غلظت سرب در ریشه از تحرک آن در گیاه کاسته شده و به میزان بیش‌تری در سلول‌های ریشه و فضاهای بینابینی ترسیب می‌یابد که علت این امر ناشی از تغییر سیستم آوندی ریشه به ساقه در محل یقه گیاه است که به صورت یک صافی عمل کرده و موجب تجمع سرب و کند شدن فرآیند انتقال به ساقه می‌شود. با توجه به تشکیل کمپلکس، سرب جذب‌شده عمدتاً در ریشه گیاه باقی‌مانده و کمتر به اندام هوایی انتقال می‌یابد. در بررسی انجام‌شده توسط Kumar et al. (1995) میزان سرب موجود در ریشه کلزا ۱۸ برابر مقدار آن در اندام هوایی بود. به عقیده آن‌ها پیوند محکم سرب به خاک و مواد گیاهی تا حدی تحرک کم سرب را در گیاه و خاک توضیح می‌دهد. نتیجه پژوهش انجام‌شده توسط Huang and Cunningham (1996) نیز نشان داد که سرب افزون بر قابلیت زیست‌فراهمی کم، به‌طور ضعیفی از ریشه به اندام هوایی انتقال می‌یابد. Deng et al. (2004) در آزمایشی تجمع کادمیوم، سرب، روی و مس را در ۱۲ گونه گیاهی در چین مطالعه کردند، نتایج آن‌ها بیانگر آن بود که در بین ۴ عنصر مورد مطالعه، فاکتور انتقال برای سرب کم‌ترین و برای کادمیوم بیش‌ترین مقدار بود.

همان‌طور که در جدول‌های فوق مشاهده می‌شود مقدار جذب سرب از تیمار شاهد به سمت تیمار ۱۲۰۰ mg/kg روندی افزایشی داشته و دلیل آن افزایش میزان ماده خشک گیاهی است. بنابراین، بیش‌ترین مقدار جذب سرب برای خرفه و تاج‌خروس وحشی در تیمار ۱۲۰۰ mg/kg خاک به-ترتیب برابر با ۱۱۹/۷۴ و ۱۰۰/۴۹ g/ha.yr و کم‌ترین آن برای گیاهان مذکور در تیمار شاهد برابر با ۲۸/۳۷ و ۱۱/۰۷ g/ha.yr به‌دست‌آمده است. هرچند مقدار تجمع سرب در اندام هوایی کمتر از ریشه گیاه است، لیکن مقدار جذب سرب در اندام هوایی در ۱ ha/yr (حاصل‌ضرب غلظت فلز در وزن ماده خشک اندام هوایی) میزان قابل توجهی بود که با نتایج (2007) Zhuang et al. و (2011) Eid در مورد این‌که مقدار بالای زیست‌توده گیاهی ظرفیت نسبتاً پایین تجمع فلز در گیاه را جبران می‌کند و منجر به تجمع مقدار بالای فلزات سنگین در گیاه می‌شود، همخوانی دارد.

۳-۲- زمان پالایش

تغییرات BCF نیز از ۰/۳۱ تا ۱/۲۵ است. برای گیاه تاج‌خروس وحشی نیز دامنه تغییرات TF از ۰/۱۴ در تیمار شاهد تا ۰/۰۴ در تیمار ۱۲۰۰ mg/kg است و دامنه تغییرات BCF نیز از ۰/۱۲ تا ۰/۳۶ است. Yari et al. (2017)، برای گیاه ذرت TF سرب را در یک خاک رسی معادل ۱/۰۵ به‌دست آوردند. Alipour et al. (2015) نیز در پژوهشی فاکتور TF را برای گیاه سلمه‌تره بین ۰/۰۶ تا ۰/۱۲ به‌دست آوردند که بیانگر انتقال کم‌تر سرب از ریشه به اندام هوایی آن بوده است. Yang et al. (2014) دامنه تغییرات TF سرب را از ۰/۰۳۷ تا ۰/۶۶۵ گزارش کردند. همچنین این پژوهشگران نشان دادند که در گیاه *S. alfredii* دامنه تغییرات BCF از ۰/۰۱۴ تا ۰/۴۰۱ بوده و مقدار BCF سرب نسبت به سایر عناصر از جمله کادمیوم بسیار پایین‌تر است. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته عنصر سرب دارای کم‌ترین میزان فاکتور انتقال می‌باشد، زیرا انتقال سرب از ریشه به برگ‌های بالایی به‌سختی صورت می‌گیرد.

جدول ۵- فاکتور انتقال و مقدار جذب سرب در سطوح مختلف آلودگی خاک برای خرفه

Table 7 Lead translocation Factor and absorption in the different levels of contaminated soils for *Portulaca oleracea* L.

Pb absorption (g/ha.yr)	BCF	TF	Treatment
28.37	0.31	0.62	Control
66.80	0.69	0.54	150
77.42	0.75	0.38	300
94.63	0.82	0.25	600
119.74	1.25	0.12	1200

جدول ۶- فاکتور انتقال و مقدار جذب سرب در سطوح مختلف آلودگی خاک برای تاج‌خروس وحشی

Table 8 Lead translocation Factor and absorption in the different levels of contaminated soils for *Amaranthus retroflexus*

Pb absorption (g/ha.yr)	BCF	TF	Treatment
11.07	0.12	0.14	Control
19.22	0.15	0.08	150
35.03	0.24	0.09	300
54.24	0.25	0.06	600
100.49	0.36	0.04	1200

پالایش در این تیمار دیده می‌شود و علت آن را می‌توان بالا بودن میزان ماده خشک تولیدی در این تیمار نسبت به سایر تیمارها دانست. در واقع این تیمار بالاترین میزان عملکرد جذب گیاهی و در نتیجه بالاترین میزان ثابت سرعت جذب را داشته است. با توجه به این که برای هر دو گیاه کم‌ترین زمان پالایش در سطح ۵٪ از آلودگی‌های مختلف سرب به دست آمد، می‌توان نتیجه گرفت این گیاهان برای پالایش خاک‌هایی که آلودگی سربی آن‌ها در حد پایین تا متوسط می‌باشد، نظیر خاک‌های کشاورزی، کارآیی بیشتری می‌توانند داشته باشند و در مقایسه بین دو گیاه نیز گیاه تاج‌خروس وحشی از توانایی بیشتری برخوردار است.

نظر به این که در این پژوهش سطوح آلودگی تا چند برابر غلظت مجاز سرب در خاک در نظر گرفته شد، مسلماً در مقادیر پایین‌تر آلودگی سربی، زمان پالایش گیاهی کاهش چشمگیری خواهد داشت. اگرچه پالایش گیاهی روشی زمان‌بر بوده و برای پاک‌سازی محل آلوده چندین سال زمان لازم است تا غلظت آلاینده به‌طور معنی‌داری کاهش یابد، لیکن این تکنولوژی گیاهی می‌تواند غلظت کل آلاینده را با حداقل قیمت کاهش دهد. از سوی دیگر بسیاری از مناطقی که نیاز به پالایش دارند حداقل در یک بازه زمانی ده ساله آلوده شده‌اند و سال‌ها بلکه ده‌ها سال در شرایط آلودگی که به‌وسیله انسان ایجاد شده است، باقی‌مانده‌اند، بنابراین صرف دو تا سه دهه برای پالایش این مناطق زیاد طولانی به نظر نمی‌آید.

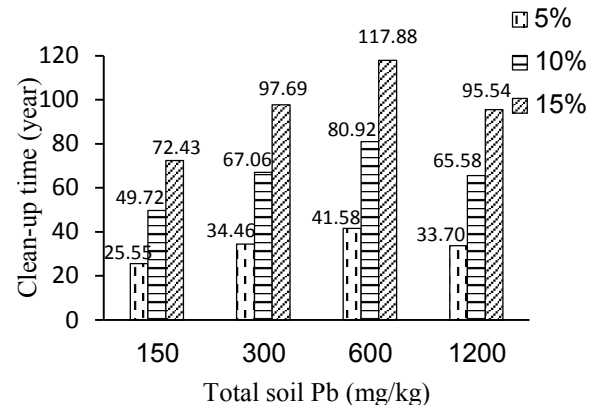
۴- نتیجه‌گیری

امروزه آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیست بوده و پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان آلودگی‌زدایی سرب از خاک و تخمین زمان بهینه پالایش با استفاده از گیاهان خرفه و تاج‌خروس وحشی انجام و نتایج زیر حاصل شد:

۱- با توجه به اینکه آلودگی‌زدایی خاک الزاماً به مفهوم حذف کامل سرب از خاک نیست، پالایش گیاهی به‌تنهایی و بدون بهره‌مندی از روش‌های مکمل می‌تواند برای پالایش خاک به‌کار رود.

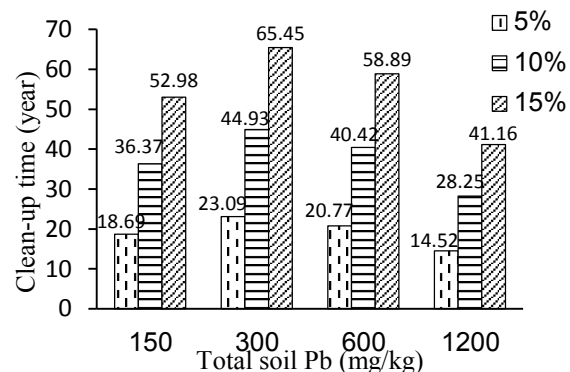
۲- با افزایش غلظت سرب موجود در خاک، مقدار افزایش غلظت سرب در ریشه‌ها به‌مراتب بیش‌تر از اندام‌های هوایی

در این پژوهش زمان لازم برای پالایش سرب به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵٪ از هرکدام از سطوح آلودگی توسط گیاهان خرفه و تاج‌خروس وحشی محاسبه شد که در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است زمان‌های محاسبه‌شده برای پالایش گیاهی سرب، برای اعماق سطحی خاک (عمق ۵ cm) می‌باشد.



شکل ۴- زمان پالایش سرب برای ۵، ۱۰ و ۱۵٪ از سطوح آلودگی خاک با استفاده از خرفه

Fig. 4 The clean-up time for 5, 10 and 15% of contaminated soil levels for *Portulaca oleracea* L.



شکل ۵- زمان پالایش سرب برای ۵، ۱۰ و ۱۵٪ از سطوح آلودگی خاک با استفاده از تاج‌خروس وحشی

Fig. 5 The clean-up time for 5, 10 and 15% of contaminated soil levels for *Amaranthus retroflexus*

نتایج نشان داد برای هر دو گیاه مورد مطالعه رابطه غیرخطی بین زمان پالایش و سطوح مختلف آلودگی سرب وجود داشته و در هر سه سطح (۵، ۱۰ و ۱۵٪) نمودار از روند یکسانی برخوردار است. برای گیاه تاج‌خروس وحشی در تیمار ۱۲۰۰ mg/kg روند افزایشی زمان پالایش به‌هم‌خورده و مدت زمان پالایش کاهش یافته است و کم‌ترین میزان

زیست توده تولیدشده، گیاه تاجخروس وحشی از توانایی بیش تری برخوردار بوده است.

۴- در نهایت چنانچه این گیاهان با هدف استخراج گیاهی سرب به کار روند باید بلافاصله پس از برداشت، همچون زباله های خطرناک اقدام به سوزاندن و دفن آن نمود.

دسترسی به داده ها

داده های استفاده شده (یا تولید شده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

References

- Al-Chalabi A. S. and Hawker D. (2000). Distribution of vehicular lead in roadside soils of major roads of Brisbane, Australia. *Water Air Soil Pollut.*, 118(3-4), 299-310.
- Alipour N., Homaee M., Asadi Kapourchal S. and Mazhari M. (2015). Assessing *Chenopodium album* L. to Tolerate and Phytoextract Lead from Heavy Metal Contaminated Soils. *Environ. Sci.*, 13(1), 105-112 [In Persian].
- Arabi Z., Homaee M., Asadi M. E. and Asadi Kapourchal S. (2017). Cadmium removal from Cd-contaminated soils using some natural and synthetic chelates for enhancing phytoextraction. *Chem. Ecol.*, 33(5), 389-402.
- Asadi Kapourchal, So., Asadi Kapourchal, Sa., Pazira, E. and Homaee, M. (2009). Assessing radish (*raphanus sativus* L.) potential for phytoremediation of Lead-contaminated soils resulting from air pollution. *Soil Plant Environ.*, 55(5), 202-206.
- Blaylock M. J., Elless M. P., Huang J. W. and Dushenkov S. M. (1999). Phytoremediation of lead-contaminated soil at a New Jersey brownfield site. *Remed.*, 9(3), 93-101.
- Blaylock M. J., Salt D. E., Dushenkov S., Zakharova O., Gussman C., Kapulnik Y., Ensley B. D. and Raskin I. (1997). Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil- applied chelating agents. *Environ. Sci. Technol.*, 31, 860-865.
- Cameselle C. and Gouveia S. (2019). Phytoremediation of mixed contaminated soil enhanced with electric current. *J. Hazard. Mater.*, 361, 95-102.
- Cariny T. (1995). The re-use of contaminated land. John Wiley and Sons Ltd. Pub., USA.
- Codex Alimentarius Commission. (2001). Food additives and contaminants. ALINORM 01/12A (p. 1-289). Geneva: Joint FAO/WHO Food Standards Programme.
- Deng H., Ye Z. H. and Wong M. H. (2004). Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wet land plant species thriving in critical contaminated sites in China. *Environ. Pollut.*, 132(1), 29-40.
- Dodangeh H., Rahimi G., Fallah M. and Ebrahimi E. (2018). Investigation of heavy metal uptake by three types of ornamental plants as affected by application of organic and chemical fertilizers in contaminated soils. *Environ. Earth Sci.*, 77(12), 473.
- Eid M. A. (2011). Halophytic plants for phytoremediation of heavy metals contaminated soil. *Am. J. Sci.*, 7(8), 377-382.
- Eisazadeh Lazarjan S., Asadi Kapourchal S. and Homaee M. (2015). Phytoextraction and estimating optimal time for remediation of Cd-contaminated soils by Spinach. *Agroecol.*, 6(4), 916-926 [In Persian].
- Eisazadeh Lazarjan S., Kapourchal S. A., Homaee M., Noorhosseini S. A. and Damalas C. A. (2019). Chive (*Allium*

- shoenoprasum* L.) response as a phytoextraction plant in cadmium-contaminated soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26(1), 152-160.
- Etesami H. (2018). Bacterial mediated alleviation of heavy metal stress and decreased accumulation of metals in plant tissues: mechanisms and future prospects. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 147, 175-191.
- Gee G. W. and Bauder J. W. (1986). Particle size analysis. In: Klute A (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, Agron, 2nd (Ed.), Madison, WI, pp 404-408.
- Glick B. R. (2003). Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnol. Adv.*, 21(5), 383-393.
- Gupta P. K. (2000). *Soil, Plant, Water and Fertilizer Analysis*. Agrobios, New Dehli, India.
- Haji Namaki S., Emami H., Bazobandi A., Fotovat A. and Haghnia G. (2017). Predicting lead concentration of soil using readily available properties based on artificial neural network model. *J. Environ. Water Eng.*, 3(3), 214 – 224 [In Persian].
- Henry J. R. (2000). An overview of the phytoremediation of lead and mercury. U.S. environmental protection agency office of solid waste and emergency response technology innovation office. Washington, D.C.
- Huang J. W. and Cunningham S. D. (1996). Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New Phytol.*, 145, 75-84.
- Jaskulak M., Grobelak A. and Vandenbulcke F. (2020). Modelling assisted phytoremediation of soils contaminated with heavy metals—main opportunities, limitations, decision making and future prospects. *Chemosphere*, 249, 126196.
- Khodaverdiloo H. and Homae M. (2008). Modeling phytoremediation of soils polluted with cadmium and lead. *science and technology of agriculture and natural resources. Water Soil Sci. J.*, 11 (42), 417-426 [In Persian].
- Kumar P. N., Dushenkov V., Motto H. and Raskin I. (1995). Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.*, 29(5), 1232-1238.
- Lasat M. M. (2000). Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. *J. Hazard. Subst. Res.*, 2(5), 1-25.
- Mahar A., Wang P., Ali A., Awasthi M. K., Lahori A. H., Wang Q., Li R. and Zhang Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 126, 111-121.
- Mohammadipour F. and Asadi Kapourchal S. (2012). Assessing land cress potential for phytoextraction of cadmium from Cd contaminated soils. *J. Water Soil Resour. Conserv.*, 2(2), 25-35 [In Persian].
- Page A. L., Miller R. H. and Keeney D. R. (1982). *Methods of soil analysis; 2. Chemical and microbiological properties*, 2. Aufl. 1184 S. American Soc. Agronomy (Publ.), Madison, Wisconsin, USA.
- Parseh I., Teiri H., Hajizadeh Y. and Ebrahimpour K. (2018). Phytoremediation of benzene vapors from indoor air by *Schefflera arboricola* and *Spathiphyllum wallisii* plants. *Atmos. Pollut. Res.*, 9(6), 1083-1087.
- Salt D. E., Smith R. D. and Raskin I. (1998). Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Molecul. Biol.*, 49, 643-668.
- Schnoor J. L. (1997). Phytoremediation. GWRTAC (Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center) Technology Evaluation Report TE-98-01. P.150.
- Sarwar N., Imran M., Shaheen M. R., Ishaque W., Kamran M. A., Matloob A. and Hussain S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710-721.
- Steliga T. and Kluk D. (2020). Application of *Festuca arundinacea* in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 194, 110409.

- Sumner M. E. and Miller W. P. (1996). Cations exchange capacity and Exchange Coefficients. In: Sparks, D.L., (Eds), Methods of soil Analysis, Part 3-chemical Methods. Agronomy Monograph, vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, PP 1201-1230.
- Thawornchaisit U. and Polprasert C. (2009). Evaluation of phosphate fertilizers for the stabilization of cadmium in highly contaminated soils. J. Hazard. Mater., 165(1-3), 1109-1113.
- Walkly A. and Black J. A. (1934). An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. Soil Sci., 37, 29-38.
- Yang W., Li H., Zhang T., Sen L. and Ni W. (2014). Classification and identification of metal-accumulating plant species by cluster analysis. Environ. Sci. Pollut. Res., 21(18), 10626-10637.
- Yanqun Z., Yuan L., Schwartz C., Langlade L. and Fan L. (2004). Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China. Environ. Int., 30(4), 567-576.
- Yari M., Rahimi G., Ebrahimi E., Sadeghi S., Fallah M. and Ghesmatpoor E. (2017). Effect of Three Types of Organic Fertilizers on the Heavy Metals Transfer Factor and Maize Biomass. Waste Biomass Valori., 8(8), 2681-2691.
- Zhang X., Zhanga S., Xua X., Li T., Gong G., Jia Y., Li Y. and Deng L. (2010). Tolerance and accumulation characteristics of cadmium in *Amaranthus hybridus* L. J. Hazard. Mater., 180, 303-308.
- Zhuang P., Yang Q.W., Wang H.B. and Shu W.S. (2007). Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field. Water Air Soil Pollut., 184, 235-2.
- Zorrig W., Rouached A., Shahzad Z., Abdelly C., Davidian J.C. and Berthomieu P. (2010). Identification of three relationships linking cadmium accumulation to cadmium tolerance and zinc and citrate accumulation in lettuce. J. Plant Physiol., 167(15), 1239-1247.

Research Paper

Phytoremediation and Estimation of Optimal Clean up Time of Lead Contaminated Soils using *Portulaca oleracea* L. and *Amaranthus retroflexus***Safoora Asadi Kapourchal^{1*} and Vahidreza Jalali²**¹Assist. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran²Assoc. Professor, Higher Education Complex of Shrivvan, Shirvan, Iran*Corresponding author: safooraasadi@guilan.ac.ir

Received: September 16, 2020

Revised: October 14, 2020

Accepted: October 16, 2020

Abstract

Heavy metals are one of the most important environmental contaminants, particularly in soil and water sources. Among heavy metals, lead is one of the most challenging toxic contaminants. Using lead-contaminated soils requires their decontamination and improvement. The objective of this study was to investigate the possibility of lead decontamination from soil and to estimate the optimal clean up time using *Portulaca oleracea* L. and *Amaranthus retroflexus*. For this purpose, a completely randomized design with five treatments of 30 (standard), 150, 300, 600 and 1200 mg/kg each with three replicates was performed. The results indicated that for both plants a non-linear positive relation exists between the lead concentrations in soil and that accumulated in plant roots and shoots. The highest extracted lead which was accumulated in roots of *Portulaca oleracea* L. and *Amaranthus retroflexus* were 173.39 and 149.76 mg/kg, and in their shoots were 20.01 and 5.82 mg/kg, respectively. Translocation factor was obtained from 0.62 to 0.12 for *Portulaca oleracea* L. and from 0.14 to 0.04 for *Amaranthus retroflexus*. The translocation factor in both plants was obtained to be less than one, indicating poor lead transfer from root to the shoot. Due to the ability of the above plants to absorb large amounts of lead from the root zone, high plant yield and the ability to accumulate lead in harvestable organs, both plants were highly effective for remediation of lead from soil surface up to concentrations several times of the allowable lead concentration. However, due to the clean-up time and the amount of biomass produced, the *Amaranthus retroflexus* had a better ability to remediate contaminated soils.

Keywords: Lead; Phytoextraction; Soil Contamination; Translocation Factor.