Journal of Research in Environmental Health

Volume 8, Issue 3, Autumn 2022

Phytoremediation potential of Amaranthus caudatus and Tagetes patula in cleanup of contaminated soil

# A Comparative study on evaluation of efficiency of EDTA, citric acid and salicylic acid chelating agents in phytoremediation enhancing of two ornamental plant species for elimination of Cr(III) and Cu(II) from contaminated soils

**Nastaran Aghelan**
PhD. Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

**Soheil Sobhanardakani**
* Professor, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran; E-mail: s_sobhan@iauh.ac.ir

**Mehrdad Cheraghi**
Associate Professor, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

**Bahareh Lorestani**
Associate Professor, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

Received: 2022/04/19
Accepted:2022/07/06

**Document Type:** Research article

## ABSTRACT

**Background and Purpose:** Phytoremediation is a new technology for remediation of contaminated soils, this study was conducted to evaluation of efficiency of EDTA, citric acid and salicylic acid chelating agents in phytoremediation enhancing of Amaranthus caudatus and Tagetes patula for elimination of Cr(III) and Cu(II) from contaminated soils in 2018.

**Material and Methods:** After soil pots contaminating by 50 and 100 (mg/kg) K2Cr2O7 and 200 and 400 (mg/kg) CuSO4 salts, and 2.5 (mmol/kg) of EDTA and citric acid (CA) and 2.0 (mmol/kg) of salicylic acid (SA) solution treating, the cultured seedlings were harvested after 60 days. Then, after seedlings digestion, Cr and Cu contents were determined using ICP-OES

**Results:** Based on the results obtained, the maximum contents of Cr (mg/kg) in cultivated soil, root and stem samples of A. caudatus were 2.40, 5.18 and 1.86 were found in the SA, EDTA and EDTA treatments, respectively and in T. patula with 2.74, 6.00 and 1.30 were found to be in the SA, EDTA and EDTA treatments, respectively. Also, the maximum contents of Cu (mg/kg) in cultivated soil, root and stem samples of A. caudatus with 6.74, 3.77 and 3.34 were found to be in the SA, SA and EDTA treatments, respectively and in T. patula with 6.65, 3.45 and 9.50 were found to be in the SA, EDTA and EDTA treatments, respectively. On the other hand, translocation (TF) and bioconcentration (BCF) factors of A. caudatus both were greater than 1 in soils with 100 mg/kg added K2Cr2O7 containing CA, which indicates that this species can be known as hyperaccumulator of Cr

**Conclusion:** In conclusion, concerning to the considerable role of organic acids in soil refining electrokinetic and phytoremediation efficiency enhancing, using of these soil amendment agents is recommended to cleanup of contaminated soil with heavy metals

**Keywords:** Electrokinetic, Soil amendment, Ornamental plants, Heavy metal, Phytoremediation

▶ **Citation:** Aghelan N, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B. A Comparative study on evaluation of efficiency of EDTA, citric acid and salicylic acid chelating agents in phytoremediation enhancing of two ornamental plant species for elimination of Cr(III) and Cu(II) from contaminated soils. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Autumn 2022; 8(3): 280-299.

عنوان مکرر: قابلیت گیاه‌پالایی گونه‌های تاج‌خروس و گل‌جعفری در پاکسازی خاک آلوده

# مقایسه اثربخشی عوامل شلات‌کننده EDTA، اسید سیتریک و اسید سالیسیلیک در ارتقای کارایی گیاه‌پالایی دو گونه گیاهی زینتی در حذف عناصر کروم (III) و مس (II) از خاک‌های آلوده

**نسترن عاقلان**
دانش‌آموخته دکتری تخصصی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

**سهیل سبحان اردکانی**
* استاد، گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. (نویسنده مسئول):
s_sobhan@iauh.ac.ir

**مهرداد چراغی**
دانشیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

**بهاره لرستانی**
دانشیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۱/۰۱/۳۰
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۴/۱۵
**نوع مقاله:** پژوهشی

## چکیده

**زمینه و هدف:** با توجه به این‌که گیاه‌پالایی، فناوری نوین پالایش خاک آلوده است، این پژوهش با هدف بررسی برخی اصلاح‌کننده‌ها با نرخ تجزیه‌پذیری زیستی متفاوت در بهبود کارایی گیاه‌پالایی خاک آلوده به کروم و مس توسط گونه‌های زینتی تاج‌خروس و گل‌جعفری انجام شد.
**مواد و روش‌ها:** با آلوده‌سازی خاک توسط نمک‌های دی‌کرومات پتاسیم ۵۰ و ۱۰۰ و سولفات مس ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و تیمار با محلول ۲/۵۰ میلی‌مول در کیلوگرم اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA) و اسید سیتریک (CA) و ۲/۰۰ میلی‌مول در کیلوگرم اسید سالیسیلیک (SA)، نسبت به کشت گیاهچه‌ها و برداشت آن‌ها بعد از ۶۰ روز اقدام شد. پس از هضم اسیدی گیاهچه‌ها، محتوی عناصر کروم و مس در آن‌ها به‌روش طیف‌سنج نشری پلاسمای جفت شده القایی خوانده شدند.
**یافته‌ها:** بیشینه غلظت کروم در خاک کشت شده، ریشه و شاخساره تاج‌خروس با ۲/۴۰، ۵/۱۸ و ۱/۸۶ و در گل‌جعفری با ۲/۷۴، ۶/۰۰ و ۱/۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب مربوط به تیمارهای SA، EDTA و EDTA و در مورد مس در خاک کشت شده، ریشه و شاخساره تاج‌خروس با ۶/۷۴، ۳/۷۷ و ۳/۳۴ به‌ترتیب مربوط به SA، SA و EDTA و در گل‌جعفری نیز با ۶/۶۵، ۳/۴۵ و ۹/۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب مربوط به تیمارهای SA، EDTA و EDTA بود. از طرفی، تاج‌خروس با فاکتورهای انتقال و تجمع‌زیستی بزرگ‌تر از ۱ در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده واجد CA، فرا انباشتگر کروم بود.
**نتیجه‌گیری:** با توجه به نقش مهم اسیدهای آلی در الکتروکینتیک پالایش خاک و بهبود کارایی گیاه‌پالایی، استفاده از این عوامل اصلاح‌کننده برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین توصیه می‌شود.

**کلید واژه‌ها:** اصلاح‌کننده خاک، الکتروکینتیک، فلز سنگین، گیاهان زینتی، گیاه‌پالایی

◀ **استناد:** عاقلان ن، سبحان اردکانی س، چراغی م، لرستانی ب. مقایسه اثربخشی عوامل شلات‌کننده EDTA، اسید سیتریک و اسید سالیسیلیک در ارتقای کارایی گیاه‌پالایی دو گونه گیاهی زینتی در حذف عناصر کروم (III) و مس (II) از خاک‌های آلوده. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*. پاییز ۱۴۰۱؛۸(۳): ۲۸۰-۲۹۹.

## مقدمه

رشد سریع شهرنشینی و صنعتی شدن و توسعه فعالیت‌های معدنی و کشاورزی که با آلودگی و تخریب محیط‌زیست همراه است، تهدیدهای قابل ملاحظه‌ای را متوجه سلامت محیط و انسان کرده و امروزه توجه زیادی را به‌خود معطوف کرده است (۱-۵). در بین این تهدیدها، فلزات سنگین بیش‌ترین نقش را در آلودگی محیط‌زیست و همچنین تهدید سلامت انسان به‌خود اختصاص داده‌اند (۶). آلاینده‌های فلزی، قابل تجزیه شیمیایی و زیستی نبوده و با خصوصیاتی همچون پایداری، نیم‌عمر طولانی، سمّیت و قابلیت تجمع زیستی و انباشت خود، سلامت، ایمنی و حیات را از راه‌های تنفس و تماس پوستی و یا انتقال در زنجیر غذایی به‌مخاطره می‌اندازند (۷-۱۱). به‌دلیل مخاطرات محیط‌زیستی آلودگی با عناصر بالقوه سمی، جستجوی فناوری‌های پالایش مناسب و مقرون به‌صرفه به‌منظور حذف یا کاهش آلاینده‌ها از محیط‌زیست، ضروری است (۱۲، ۱۳). بنابراین، پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در نواحی شهری، به‌عنوان یک مشکل عمده مطرح است که می‌بایست راه‌کاری برای حل آن اندیشیده شود (۶، ۸).

گیاه‌پالایی، در مقایسه با روش‌های شیمیایی و فیزیکی متداول که به‌طور معمول پرهزینه بوده و اغلب اثرات مخرب برجای می‌گذارند (۵، ۱۴، ۱۵)، به‌عنوان گزینه برتر و نویدبخش اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به‌شمار می‌رود (۵، ۶، ۱۶). در واقع، گیاه‌پالایی به‌عنوان یک فناوری سبز، بیان‌گر استفاده از گونه‌های فرا انباشتگر به‌منظور استخراج آلاینده‌های غیرقابل تجزیه از خاک و یا آب آلوده و انتقال آن‌ها به محیط نسبتاً قابل مدیریت در سطح زمین است (۶، ۱۷). این شیوه اصلاح، به‌صورت درجا[1] استفاده می‌شود و از این‌رو، به هیچ اقدام حفاری، انتقال و دفع خاک نیاز ندارد و هدف اصلی آن، حفظ، ذخیره‌سازی و حتی بهبودبخشی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک است (۵، ۱۸). علاوه بر این، این فناوری از هر دو جنبه اقتصادی به‌سبب هزینه‌های بسیار پایین‌تر از سایر روش‌ها و بوم‌شناختی به‌دلیل ارزش محیط‌زیستی آن، دارای مزیت است. پیش‌فرض این روش، یافتن گونه فرا انباشتگر با توانایی بالا در انباشت فلزات همراه با تولید زیتوده بالا است که از قابلیت قابل قبول در جذب آلاینده‌ها برخوردار باشد (۱۹).

سایر روش‌های پالایش همچون تثبیت بیرون‌جا[2]، استخراج بخار[3]، پمپ و تصفیه[4] و واجذب حرارتی[5]، بسیار پرهزینه بوده و از نظر مصرف انرژی مقرون به‌صرفه نیستند (۱۳). به‌علاوه، ممکن است در برخی روش‌های تصفیه، به‌واسطه استفاده از مواد شیمیایی خطرناک، بوم‌سازگان‌ها با تهدیدهای بیش‌تری مواجه شوند (۱۳، ۲۰). از این‌رو، استفاده از فناوری‌های پایدار پالایش محیط‌زیست همچون گیاه‌پالایی که به‌عنوان یک تکنیک اصلاحی درجا، از قابلیت بالقوه برخی گیاهان در انباشته‌سازی آلاینده‌های آلی و فلزات سمی از آب، خاک و هوا استفاده می‌شود، ضرورت دارد (۱۳، ۲۱). همچنین، گیاه‌پالایی در مقایسه با سایر شیوه‌های اصلاحی، یک روش مقرون به‌صرفه است که نیاز به سرمایه بالا در زمینه تجهیزات را از بین می‌برد و از آن‌جایی که انرژی را به‌طور مستقیم از نور خورشید تأمین می‌کند، به‌عنوان فناوری خورشیدی[6] شناخته می‌شود. از سوی دیگر، می‌توان به اهمیت اقتصادی این فناوری از طریق معدنی‌سازی گیاهی[7] یا گیاه استخراجی[8] اشاره کرد؛ به‌طوری‌که در استخراج گیاهی، آلاینده‌ها به‌طور مستقیم پس از جمع‌آوری و انتقال از ریشه‌ها به بافت‌های هوایی گیاه، قابل برداشت خواهند بود (۱۳).

کروم کاربردهای گسترده‌ای در انواع فرآیندهای صنعتی همچون الکترولیز فلزات، چاپ، رنگرزی، دباغی و فلزکاری دارد. دفع نامناسب پساب‌ها از این صنایع، منجر به آلودگی محیط‌زیست توسط این فلز می‌شود. با وجود این‌که کروم سه

1. In situ

2. Ex-situ Stabilization
3. Soil-vapor Extraction
4. Pump and Treat
5. Thermal Desorption
6. Solar-powered
7. Phytomining
8. Phytoextraction

ظرفیتی، یک عنصر کم‌مصرف ضروری است، کروم ۶ ظرفیتی، غیرضروری و یک عنصر سمّی برای جانوران است و ممکن است منجر به بروز درماتیت، سرطان ریه، آسیب به کلیه، اختلالات گوارشی و تحریک دستگاه تنفس و چشم‌ها شود (۲۲-۲۴). کروم، یک فلز سنگین بالقوه سمّی است که هیچ عملکرد ضروری در سوخت‌وساز گیاهان ندارد. رفتار کروم در خاک، انتقال آن از خاک به گیاه و انباشت آن در بخش‌های مختلف گیاه بسته به شکل‌های شیمیایی آن، نوع گیاه و ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک، متفاوت است. کروم، هیچ‌گونه ناقل اختصاصی برای جذب توسط گیاه ندارد و به‌طور عمده از طریق کانال‌ها و مسیرهای اختصاصی و غیراختصاصی یون‌های ضروری وارد گیاه می‌شود. این عنصر به‌طور عمده در بافت‌های ریشه گیاه تجمع یافته و انتقال بسیار محدودی به شاخساره‌ها دارد. کروم در گیاهان از طرفی موجب بروز اثرات مضر در فرآیندهای فیزیولوژیکی، ریخت‌شناختی و زیست-شیمیایی شده و از سویی با دخالت در رشد و فتوسنتز گیاه و جذب مواد غذایی توسط آن، از طریق افزایش تولید اکسیژن غیرفعال، پراکسیداسیون چربی‌ها و تغییر در فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، سمّیت گیاهی ایجاد می‌کند. گیاهان، سمّیت کروم را از طریق سازوکارهای دفاعی مختلف همچون کمپلکس‌سازی با لیگاندهای آلی، استقرار درون واکوئل‌ها و تغییر فعالیت‌های آنتی‌اکسیداتیو تحمل می‌کنند (۲۵). کروم در ریشه‌ها و شاخساره‌های گیاهان به‌واسطه احیای کروم ۶ ظرفیتی در یاخته‌های قشر ریشه‌ها، بیش‌تر به شکل کروم سه ظرفیتی یافت می‌شود و لذا، غلظت‌های بالاتر کروم سه ظرفیتی در بافت‌های گیاهی را می‌توان با این موضوع مرتبط دانست (۲۶).

آلودگی خاک به کروم انسان‌ساخت، یک مشکل جهانی است (۲۷). افزودن عوامل بهبود دهنده‌ای همچون اسید سیتریک از طریق تحرک‌بخشی یا غیرمتحرک‌سازی کروم در خاک بر جزءبندی کروم در خاک تأثیر می‌گذارد؛ اما مطالعات محدودی در زمینه تأثیر pH در این زمینه متمرکز بوده‌اند (۲۸، ۲۹). جذب شیمیایی محدود کروم سه ظرفیتی با حفظ و نگه‌داری مقادیر اندک آن در شرایط اسیدی قابل توجیه است. مطالعات مختلف واکنش کروم با گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل موجود در خاک در این شرایط را تأیید کرده‌اند. در این خصوص باید توجه داشت که خطر بالای کروم سه ظرفیتی در مراحل ابتدایی ورود به خاک‌های اسیدی به‌دلیل تحرک بالای کروم تبادلی است و پیامد آن، دسترسی زیستی آن در بوم‌سازگان است (۲۹).

به‌عنوان سازوکار اصلی تحمل کروم، کروم ۶ ظرفیتی به‌ویژه در شرایط اسیدی و یا در محیط‌هایی که منابع آماده الکترون همچون کربن و آهن دو ظرفیتی فراهم است، در یاخته‌ها به کروم سه ظرفیتی احیاء شده و به آسانی در یاخته‌های قشر ریشه‌ها ذخیره و نگهداری می‌شود. این موضوع می‌تواند غلظت بالاتر کروم سه ظرفیتی در مقایسه با کروم ۶ ظرفیتی در بافت‌های گیاهی را توجیه کند (۱۹، ۲۶، ۳۰، ۳۱). از این‌رو، می‌توان به نقش مهم احیای کروم ۶ ظرفیتی به کروم سه ظرفیتی که از طریق جذب سطحی و ترسیب کروم، به غیرمتحرک‌سازی شیمیایی و همچنین کاهش قابلیت فراهمی زیستی کروم سه ظرفیتی منجر می‌شود، اشاره کرد (۳۱). لذا، این فرآیند از احتمال ورود عناصر سمّی همچون کروم ۶ ظرفیتی به اندام‌های هوایی، سیستم فتوسنتزی و زنجیر غذایی ممانعت می‌کند (۳۲). افزایش pH خاک نیز می‌تواند به تغییر در اکسایش کروم سه ظرفیتی به کروم ۶ ظرفیتی و تحرک و جذب بیش‌تر کروم توسط گیاه منجر شود (۳۳، ۳۴).

مس به‌عنوان یک عنصر سمّی بالقوه، در زمره آلاینده‌های فلزی موجود در خاک‌های شهری به‌خصوص کلان‌شهرها محسوب می‌شود که فعالیت‌های معدنی و صنایع دباغی و جواهرسازی، از مهم‌ترین منابع ورود این عنصر به خاک است (۶، ۱۳). با وجود این‌که مس یک عنصر ضروری برای فرآیندهای زیستی به‌شمار می‌رود، جذب مقادیر زیاد آن می‌تواند اثرات سمّی داشته باشد (۱، ۱۳، ۳۵). کمبود این عنصر در خاک با اثر بر رشد و نمو گیاهان، منجر به کاهش محصول می‌شود که این نقیصه باید با کوددهی جبران شود (۲۷). استفاده از کودها و قارچ‌کش‌های با پایه مس نیز می‌تواند به انباشت مقادیر اضافی مس در خاک‌های کشاورزی و

آب‌شویی آن به منابع آب زیرزمینی منجر شود که برای انسان و سایر زیست‌مندان از طریق انتقال توسط زنجیر غذایی و همچنین برای محیط‌زیست ایجاد مخاطره می‌کند (۲۷، ۳۶). مس با منشأ طبیعی از نظر سمّیت و انتقال، از نوع انسان‌ساخت آن متفاوت عمل می‌کند؛ زیرا از طریق تشکیل کمپلکس‌های غیرمحلول با مواد آلی و اجزای معدنی خاک، تحرک نسبتاً کمی دارد و محدود به عمق چندین سانتی‌متری خاک سطحی است، در حالی‌که کودهای شیمیایی، محتوی مس محلول با تحرک بالا هستند و می‌تواند به اعماق پروفیل خاک مهاجرت کنند. البته تأثیر این فرآیند به ظرفیت جذب خاک مرتبط بوده و خاک‌های غنی از مواد آلی مقادیر بیش‌تری از مس را تثبیت کنند (۲۷).

ثابت شده است که تبدیل انواع مس به یکدیگر بسیار آهسته صورت می‌گیرد؛ به‌طوری‌که مس می‌تواند برای مدت زمان طولانی در خاک فعال باشد و در نتیجه با آب‌شویی و تغییر مکان به لایه‌های عمیق‌تر خاک و آب‌های زیرزمینی نفوذ کند (۲۷، ۳۷). انحلال مس با تشکیل انواع متحرک آن مرتبط است که به عوامل بسیاری در خاک همچون pH، قابلیت اکسایش و احیاء، مقدار و نوع مواد آلی، بافت خاک، دما و رطوبت بستگی دارد. همان‌طور که اشاره شد، تحرک بالای مس در خاک، ویژگی مرتبط با کربن آلی محلول است. تأثیر این فرآیند به ظرفیت جذب خاک بستگی داشته و خاک‌های غنی از مواد آلی قادرند مقادیر بیش‌تری از این عنصر را تثبیت کند (۲۷).

امروزه، گیاهان زینتی[1] به‌عنوان یک گزینه مهم مطرح هستند که می‌توانند به‌طور همزمان در اصلاح و زیباسازی محیط‌های آلوده نقش داشته باشند (۵، ۶). از این‌رو، گیاهان زینتی به‌دلیل فراوانی، شاخ و برگ انبوه، زیباسازی محیط، قدرت بقا و پایداری، رشد سریع و از همه مهم‌تر، برخورداری از اندام‌های غیرخوراکی ذخیره‌ای با قابلیت انباشت آلاینده‌ها در مقایسه با گیاهان غیرزینتی فرا انباشتگر، برای اصلاح محیط‌زیست اهمیت عملیاتی قابل توجهی دارند (۵، ۶، ۳۸-۴۰). تاکنون، از تعدادی گیاه زینتی به‌منظور اصلاح خاک‌های آلوده نواحی شهری استفاده شده است (۶، ۲۱). در این میان، گونه زینتی تاج‌خروس[2] از خانواده Amaranthaceae تحمل بالا و مناسبی نسبت به شوری و جذب فلزات سنگین دارد. ارقام دارای رشد سریع این گونه، با جثه نسبتاً بزرگ و تولید زیست‌توده بالا، تا ارتفاع ۲ متر رشد کرده و برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مناسب هستند (۴۱). گونه گل‌جعفری[3] از خانواده Asteraceae نیز با تحمل مقادیر قابل توجهی از فلزات سنگین سمّی و حفظ رشد طبیعی خود در خاک‌های آلوده، مقادیر اضافی این فلزات را می‌تواند در خود ذخیره کند (۴۲).

عوامل شلات‌کننده[4] به‌صورت محلول‌های الکترولیتی به‌منظور افزایش تحرک فلزات استفاده می‌شوند و در واقع، لیگاندهایی هستند که توانایی پیوند با اتم‌ها یا یون‌های فلزی مرکزی در دست‌کم دو مکان از کمپلکس‌های شلات را داشته و به‌دلیل ساختار مولکولی ویژه خود می‌توانند چندین پیوند با یون فلزی ساده تشکیل دهند (۴۳).

تاکنون چندین مطالعه در مورد بررسی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به عناصر کروم و مس توسط گیاهان زینتی در ایران و سایر کشورها انجام شده است، که از جمله می‌توان به پژوهشی که با هدف بررسی اثربخشی اتیلن دی آمین تترا استیک اسید[5] بر آب‌شویی کروم توسط گونه نی معمولی[6] انجام شد (۳۲)، تحقیقی که با هدف بررسی اثربخشی اسید سالیسیلیک بر قابلیت گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به مس توسط گیاه همیشه بهار انجام شد (۳۹)، پژوهشی که به‌منظور بررسی اثربخشی اسید سالیسیلیک بر قابلیت گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به مس توسط گونه گل‌جعفری گونه انجام شد (۴۴)، پژوهشی که با هدف بررسی کارایی گیاه‌پالایی گونه Sesbania sesban در خاک آلوده به کروم انجام شد (۴)، تحقیقی که به منظور مطالعه گیاه استخراجی خاک آلوده

1. Ornamental Plants

2. Amaranthus caudatus
3. Tagetes patula
4. Chelating Agents
5. Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA)
6. Phragmites australis

به کروم توسط گونه بامبو موسو انجام شد (۱۹)، پژوهشی که با هدف بررسی قابلیت گیاه‌پالایی جذب مس توسط گونه بامبو فیلیپینی انجام شد (۱۳)، تحقیقی که به‌منظور بررسی الگوهای رشد و ویژگی‌های انباشت مس توسط سه گونه زینتی در شرایط کشت هیدروپونیک انجام شد (۶) و پژوهشی که به‌منظور بررسی کارایی گیاه‌پالایی آب آلوده به برخی فلزات سنگین از جمله کروم توسط گونه‌های Tagetes patula، Bassica scoparia و Portulaca grandiflora انجام شد (۴۵)، اشاره کرد.

عوامل شلات‌کننده را می‌توان در دو دسته آمینو پلی کربوکسیلیک اسیدها (APCAs)[1] و اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم (LMWOAS)[2] دسته‌بندی کرد. EDTA، نوعی APCAs مصنوعی است که به‌طور گسترده در محیط‌زیست و مصارف پزشکی همچون حذف سرب از بدن انسان استفاده می‌شود. از آن‌جا که، عامل EDTA و کمپلکس‌های فلز- EDTA دارای تجزیه‌پذیری زیستی اندک و پایداری محیط‌زیستی بالایی هستند، می‌توانند خطر آب‌شویی را به‌میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش دهند. لذا، EDTA، کمپلکس آنیونی است که به جذب فلزات و تشکیل کمپلکس‌های آنیونی کمک می‌کند (۴۳). اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم همچون اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک نیز از دیگر انواع عوامل شلات‌کننده هستند که نقش مهمی در انحلال فلزات سنگین ایفا می‌کنند (۴۳). این عوامل شلات‌کننده، قابلیت آلودگی‌زدایی خاک‌های آلوده توسط گیاهان را از طریق کاهش pH، افزایش اسیدیته، انحلال‌پذیری و به‌دنبال آن انباشت فلزات افزایش داده (۴۶) و علاوه بر تجزیه‌پذیری زیستی، از مزایایی همچون اختصاص‌یافتگی بالا و سمّیت پایین‌تر برخوردارند. باید توجه داشت که گرچه استفاده از عوامل شلات‌کننده مصنوعی و به‌ویژه EDTA می‌تواند با افزایش نرخ جذب یا دسترس‌پذیری فلزات سنگین در خاک، تولید زیست‌توده توسط گیاه را به‌طور معنی‌داری کاهش داده و آثار سمّیت برای گیاهان در پی داشته باشد، اما همچنان در مقایسه با سایر شلات‌کننده‌های شیمیایی و یا زیستی تجزیه‌پذیر مانند اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک، به‌عنوان مؤثرترین و پربازده‌ترین عامل افزایش‌دهنده نرخ انحلال فلزات سنگین در خاک محسوب می‌شود (۴۷-۴۹).

EDTA به‌عنوان نوعی عامل شلات‌کننده می‌تواند از ۶ مکان به یک یون فلزی متصل و با تشکیل کمپلکس‌های پایدار، سبب شود که فلزات از سطح ذرات ماتریکس جذب شده و نرخ مهاجرت یون‌های فلزی افزایش یابد (۴۳، ۵۰). از طرفی، آب‌گریزی کمپلکس‌های EDTA با فلزات در خاک منجر می‌شود که غالباً ترکیبات آب‌دوست از مسیر آپوپلاستی[3] عبور کرده و مقاومت کم‌تری در مقابل ورود فلزات به یاخته ایجاد شود (۵۱). همچنین، ثابت شده است که EDTA می‌تواند موانع فیزیولوژیکی ریشه که کنترل کننده جذب فلزات سنگین هستند را تخریب کرده و به انباشت مقادیر بیش‌تر از توان گیاه بالایی از فلزات منجر شود (۵۲). این فعالیت‌ها، سازوکار دفاعی بر علیه سمیت فلزات سنگین است و در پی آن رشد گیاه کاهش می‌یابد (۴۷، ۵۳). به‌علاوه، در چندین مطالعه ثابت شده است که کاربرد اسید سیتریک در محیط‌های آلوده به فلزات سنگین، به‌طور معنی‌داری رشد گیاهان را بهبود بخشیده است (۲۱، ۴۸). در واقع، کاربرد اسید سیتریک به افزایش وزن تر ریشه و شاخساره گیاهان منجر می‌شود؛ در حالی‌که، کاربرد EDTA به‌طور معنی‌دار وزن تر ریشه را در خاک آلوده به فلزات سنگین کاهش خواهد داد (۵۴). علاوه بر موارد فوق، می‌توان اذعان داشت که EDTA با افزایش هدایت الکتریکی[4] و مقدار فلزات در دسترس و کاهش ملایم pH تا حدود اسید ضعیف (pH=۶/۸)، در افزایش جذب فلزات سنگین نقش دارد. در واقع EDTA با تشکیل کمپلکس با فلزات به ریشه‌ها و سپس سرشاخه‌ها وارد شده و بنابراین، فلزات را نیز همراه با خود بخش‌های هوایی گیاه انتقال داده و در بهبود جذب و انتقال فلزات نقش ایفا می‌کند (۳۲، ۵۵).

همان‌طور که اشاره شد، فلزات سنگین از مهم‌ترین ترکیبات آلاینده معدنی هستند که به زنجیرهای غذایی وارد شده و به‌دلیل

1. Aminopolycarboxylic Acids
2. Low-Molecular Weight Organic Acids
3. Apoplastic
4. Electrical Conductivity (EC)

برخورداری از نیمه‌عمر طولانی، سمّیت، پایداری در محیط و قابلیت تجمع و انباشت زیستی، مخاطرات بیش‌تری در مقایسه با آلاینده‌های آلی ایجاد می‌کنند. از سویی، گیاهان زینتی گونه‌هایی هستند که از نظر اقتصادی و زیباسازی محیط، مفید هستند و به‌دلیل تحمل و انباشت فلزات سنگین و عدم حضور در زنجیرهای غذایی، می‌توانند در کاهش آلودگی محیط‌زیست به‌ویژه خاک مناطق شهری مؤثر واقع شوند. از این‌رو، گرچه تاکنون چندین مطالعه برای بررسی تأثیر عوامل شلات‌کننده مختلف در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به کروم و مس توسط گونه‌های گیاهی زینتی انجام شده است، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی اثربخشی EDTA، اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک به‌عنوان عوامل شلات‌کننده با ساختار و ویژگی متفاوت در ارتقای کارایی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به کروم و مس توسط گونه‌های زینتی تاج‌خروس و گل‌جعفری انجام شد.

## روش کار

### نمونه‌برداری از خاک، آماده‌سازی نمونه‌ها و تعیین پارامترهای فیزیکوشیمیایی آن‌ها

در این پژوهش توصیفی، نمونه‌های خاک غیرآلوده از زمین‌های بایر اطراف دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان که به‌مدت چندین سال زیر کشت نبوده‌اند، برداشت شد؛ بدین‌صورت که نمونه‌برداری بر اساس دستورالعمل وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا (USDA)[1] به‌روش کاملاً تصادفی از خاک سطحی با عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری توسط بیلچه چوبی انجام و نمونه‌های جمع‌آوری شده درون ظروف پلاستیکی مخصوص، به‌منظور تعیین برخی پارامترهای فیزیکوشیمیایی و آلوده‌سازی مصنوعی[2] در اسرع وقت به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌های خاک به‌مدت ۳ روز در هوای آزاد خشک شده و سپس به‌منظور جداسازی اجسام خارجی، سنگ و سنگ‌ریزه از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند (۱۸، ۵۵). پس از آن، نسبت به تعیین بافت خاک به‌روش هیدرومتر (۵۶)، پارامترهای pH با استفاده از pHمتر Jenway مدل ۳۵۲۰ (۵۷)، ظرفیت تبادل کاتیونی به‌روش غیرمستقیم توابع انتقالی خاک (۵۸)، ماده آلی خاک نیز به‌روش تیتراسیون اکسایش-کاهش (۵۶) و همچنین غلظت کل عناصر کروم و مس در خاک پس از هضم اسیدی نمونه‌ها با اسید نیتریک غلیظ ۶۵٪، اسید کلریدریک ۶۵٪ و پراکسید هیدروژن ۳۰٪ مرک به‌روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت‌شده القایی توسط دستگاه نشر اتمی Varian مدل ES-710 (۵۹-۶۱) اقدام شد.

### کشت گیاهان و تعیین محتوی عناصر در آن‌ها

بدین‌منظور، ابتدا نمونه‌های خاک به‌صورت مصنوعی به‌ترتیب با غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از نمک دی‌کرومات پتاسیم[3] و غلظت‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از نمک سولفات مس[4] آلوده شدند و سپس محلول‌هایی با غلظت ۲/۵۰ میلی‌مول در کیلوگرم از EDTA و اسید سیتریک و ۲/۰۰ میلی‌مول در کیلوگرم از اسید سالیسیلیک را به خاک افزوده و نمونه‌ها به‌مدت ۱۴ روز در محیط استریل نگهداری شدند (۳۲). پس از آن، بذر گیاهان زینتی تاج‌خروس و گل‌جعفری که از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان همدان تهیه شده بودند، ابتدا با محلول هیپوکلریت سدیم در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان استریل شده و سپس برای مدت یک هفته در سینی‌های حاوی خاک آلوده آغشته به عوامل شلات کننده قرار داده شدند (۱۸). پس از طی این مدت، ۱۵ گیاهچه سالم از هر گیاه به گلدان‌هایی با ابعاد ۲۰×۱۵ سانتی‌متر حاوی ۳ کیلوگرم خاک منتقل و در شرایط دمایی ۲۱-۲۶ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۰-۳۰٪ نگهداری شدند (۶۲-۶۴). همین مراحل برای کشت گیاهان در تیمارهای کنترل (شاهد) یعنی نمونه‌های خاک آلوده به کروم و مس فاقد عوامل شلات‌کننده انجام شد (۶۴). تیمارهای شاهد و آزمایشی مورد ارزیابی در این مطالعه در جدول ۱ آورده شده‌اند. در نهایت و پس از طی ۶۰ روز از کاشت بذور، نسبت به برداشت، شست‌وشو و هوا خشک کردن ریشه و اندام هوایی گیاهان و انتقال نمونه‌های گیاهی و خاک توسط پاکت‌های کاغذی به آزمایشگاه اقدام شد (۶۴).

1. United States Department of Agriculture
2. Artificially
3. $K_2Cr_2O_7$
4. $CusO_4$

از طرفی، به‌منظور تعیین محتوی کروم و مس در اندام‌های گیاهی شامل ریشه و شاخساره، نمونه‌ها با هدف جداسازی ذرات خاک، شسته شدند. سپس، نمونه‌های گیاهی طی ۳ شبانه‌روز در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون خشک شده و وزن خشک آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم تعیین شد. پس از آن، برای عصاره‌گیری گیاهان، به یک گرم پودر خشک آسیاب شده از هر بخش گیاهی، ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ افزوده شد. نمونه‌ها به‌مدت ۱۲۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۶۵ درجه سلسیوس قرار داده شده و سپس، ۲/۶ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن[1] ۲۰٪ به آن‌ها افزوده شد. بعد از سرد شدن محلول و عبور عصاره نمونه‌ها از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲، محلول با آب دوبار تقطیر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد و تا زمان تعیین غلظت کروم و مس در دمای ۴ درجه سلسیوس نگه‌داری شد. در نهایت، پس از ساخت محلول مادر و استاندارد نمک عناصر کروم و مس، محتوی عناصر در نمونه‌های گیاهی در ۳ تکرار توسط دستگاه ICP کالیبره خوانده شد (۵۷، ۶۴، ۶۵).

### محاسبه شاخص‌های تجمع‌زیستی و انتقال عناصر

همچنین، باهدف بررسی کارایی فرآیند گیاه‌پالایی گیاهان زینتی و ارزیابی تأثیر عوامل شلات‌کننده با نرخ‌های تجزیه‌پذیری متفاوت در ارتقای این فرآیند، نسبت به‌محاسبه شاخص‌های تجمع‌زیستی و انتقال عناصر کروم و مس به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ اقدام شد (۶۶-۶۸).

$$BCF = C_{Tissue}/C_{Medium} \quad (۱)$$

در رابطه ۱:

BCF نشان‌دهنده فاکتور تجمع‌زیستی و $C_{Tissue}$ و $C_{Medium}$ (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز به‌ترتیب محتوی فلز سنگین در بافت گیاهی (شاخه یا ریشه) و محتوی فلز سنگین در خاک را نشان می‌دهند.

$$TF = C_{Aerial\ tissues} / C_{Roots} \quad (۲)$$

در رابطه ۲:

TF نشان‌دهنده فاکتور انتقال و $C_{Aerial\ tissues}$ و $C_{Roots}$ (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده محتوی عنصر در اندام هوایی و ریشه هستند.

مقادیر TF> ۱ و BCF< ۱ بیان‌گر قابلیت گیاه استخراجی گونه مورد مطالعه؛ و از طرفی، مقادیر TF< ۱ و BCF>۱ قابلیت گیاه به‌منظور استفاده در فرآیند گیاه تثبیتی را نشان می‌دهد (۳۹).

### پردازش آماری نتایج

در این مطالعه، تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، ورژن ۱۹ انجام شد. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون شاپیرو-ویلک، برای مقایسه تیمارهای فاقد و واجد کشت در نمونه‌های خاک حاوی عوامل شلات‌کننده و همچنین مقایسه بین نمونه‌های ریشه و شاخساره از حیث تجمع عناصر کروم و مس از آزمون آماری تحلیل واریانس یک‌طرفه و به‌دنبال آن از آزمون تعقیبی دانکن استفاده شد.

**جدول ۱. تیمارهای شاهد وآزمایشی***

| تیمار | غلظت نمک دی‌کرومات پتاسیم افزوده به خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم) | غلظت نمک سولفات مس افزوده به خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم) | غلظت عامل شلات کننده افزوده به خاک (میلی‌مول در کیلوگرم) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | EDTA | اسید سالیسیلیک | اسید سیتریک |
| شاهد | ۵۰ | ۲۰۰ | – | – | – |
| | ۱۰۰ | ۴۰۰ | – | – | – |
| EDTA | ۵۰ | ۲۰۰ | ۲/۵۰ | ۲/۵۰ | ۲/۵۰ |
| | ۱۰۰ | ۴۰۰ | ۲/۵۰ | ۲/۵۰ | ۲/۵۰ |
| اسید سالیسیلیک | ۵۰ | ۲۰۰ | ۲/۰۰ | ۲/۰۰ | ۲/۰۰ |
| | ۱۰۰ | ۴۰۰ | ۲/۰۰ | ۲/۰۰ | ۲/۰۰ |
| اسید سیتریک | ۵۰ | ۲۰۰ | ۲/۵۰ | ۲/۵۰ | ۲/۵۰ |
| | ۱۰۰ | ۴۰۰ | ۲/۵۰ | ۲/۵۰ | ۲/۵۰ |

* تعداد کل تیمارها برای گونه‌های تاج خروس و گل جعفری ۳۲ عدد و شامل ۸ نمونه شاهد، ۸ تیمار واجد EDTA، ۸ تیمار واجد اسید سالیسیلیک و ۸ تیمار واجد اسید سیتریک بود.

1. $H_2O_2$

## یافته‌ها

بر اساس یافته‌ها، خاک مورد مطالعه دارای بافتی متوسط (لومی)، pH در محدوده ۶/۷-۶/۵، دارای ماده آلی کم، غیرشور و غلظت کل عناصر کروم و مس به‌ترتیب برابر با ۰/۰۱ ±۱/۱۲ و ۰/۰۶±۰/۸۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود.

آماره‌های توصیفی مربوط به میانگین غلظت عناصر کروم و مس در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره گونه‌های تاج خروس و گل‌جعفری به‌ترتیب در جداول ۲ و ۳ و مقادیر فاکتورهای انتقال و تجمع‌زیستی به‌ترتیب در نمودارهای ۱ تا ۳ آورده شده است.

بر اساس نتایج، بیشینه میانگین غلظت تجمع‌یافته عنصر کروم در نمونه‌های شاخساره رشد یافته گونه‌های مورد بررسی در همه موارد و نمونه‌های خاک زیر کشت و ریشه‌های گونه گل‌جعفری، به تیمارهای واجد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده تعلق داشت، این درحالی است که بیشینه میانگین غلظت تجمع‌یافته عنصر کروم در نمونه‌های خاک زیر کشت و ریشه‌های گونه تاج‌خروس در تیمار واجد اسید سیتریک، به تیمارهای واجد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده تعلق داشت. از طرفی، بیشینه میانگین غلظت کروم در نمونه‌های خاک زیر کشت و همچنین ریشه و شاخساره گیاه تاج‌خروس با ۲/۴۰، ۵/۱۸ و ۱/۸۶ به‌ترتیب مربوط به تیمارهای اسید سالیسیلیک، EDTA و EDTA بود (جدول ۲). همچنین، بیشینه میانگین غلظت کروم در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره رشدیافته گونه گل‌جعفری نیز با ۲/۷۴، ۶/۰۰ و ۱/۳۰ به‌ترتیب مربوط به تیمارهای تیمارهای اسید سالیسیلیک، EDTA و EDTA بود (جدول ۲).

نتایج گروه‌بندی آماری تیمارهای آزمایشی مربوط به گونه تاج‌خروس از حیث محتوی کروم تجمع‌یافته در نمونه‌های خاک، ریشه و شاخساره نشان داد که در تیمارهای خاک واجد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده، بین شلات EDTA و اسید سالیسیلیک از نظر میانگین مقادیر تجمع‌یافته کروم در خاک در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی‌دار وجود نداشت، در حالی‌که در نمونه‌های خاک واجد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده، بین همه تیمارهای واجد شلات (آزمایشی) در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۲). علاوه بر این، از حیث میانگین مقادیر کروم تجمع‌یافته در نمونه‌های ریشه و شاخساره رشد یافته در خاک‌های واجد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده، بین همه تیمارهای آزمایشی در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی‌دار مشاهده شد.

نتایج گروه‌بندی آماری تیمارها برای گونه گل‌جعفری نیز نشان داد که بین نمونه‌های خاک زیرکشت و همچنین ریشه و شاخساره رشد یافته در خاک‌های واجد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده، از حیث میانگین مقادیر کروم تجمع‌یافته اختلاف آماری معنی‌دار در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ وجود داشت (جدول ۲).

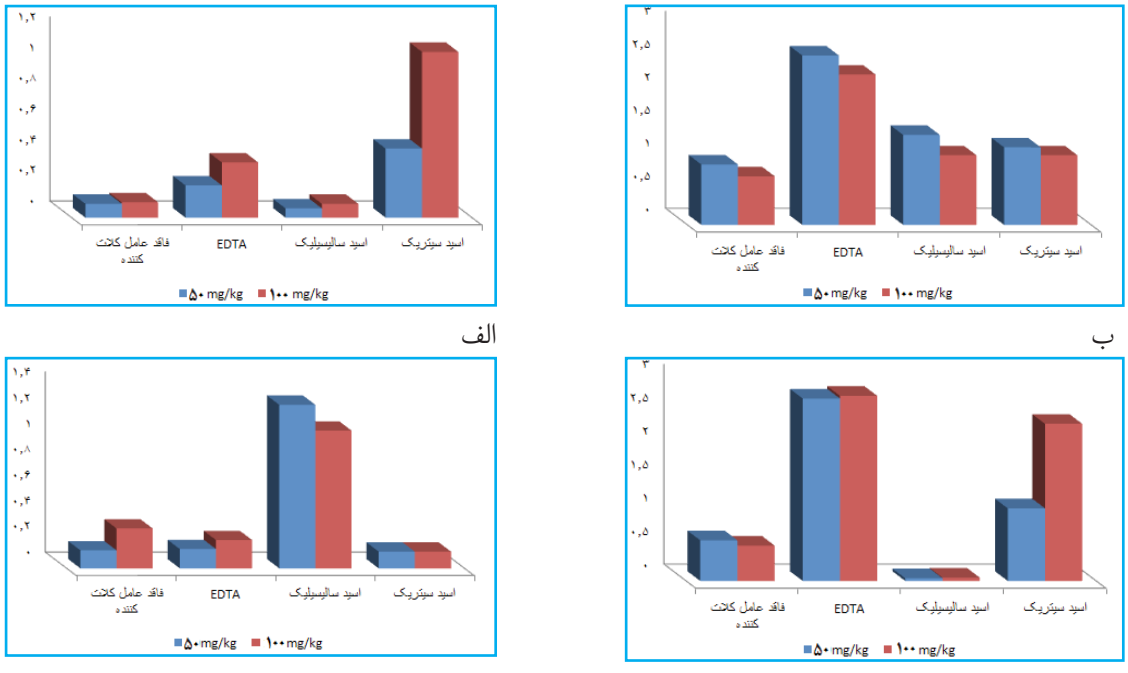
بیشینه مقدار فاکتور انتقال عنصر کروم در گونه تاج‌خروس برابر با ۱/۰۸ مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده به خاک واجد شلات اسید سیتریک بود (نمودار ۱ (الف)). از طرفی، مقادیر فاکتور تجمع‌زیستی این عنصر در همه تیمارهای آزمایشی بزرگ‌تر از ۱ و بیشینه آن برابر با ۲/۵۸ مربوط به تیمار ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده به خاک واجد عامل شلات‌کننده EDTA بود (نمودار ۱ (ب)). همچنین، مقادیر فاکتور انتقال عنصر کروم در گونه گل‌جعفری در تیمارهای واجد عامل شلات‌کننده اسید سالیسیلیک بزرگ‌تر از ۱ و بیشینه آن با ۱/۲۷ مربوط به تیمار ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده به خاک واجد اسید سالیسیلیک بود. از طرفی، بیشینه فاکتور تجمع‌زیستی این عنصر برابر با ۲/۷۸ مربوط به تیمار کروم ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده به خاک واجد عامل شلات‌کننده EDTA بود (نمودار ۱ (ج و د)).

**جدول ۲. میانگین غلظت تجمع‌یافته عنصر کروم* در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره گونه‌های مورد مطالعه برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم به‌تفکیک نمونه شاهد و تیمارهای آزمایشی**

| محیط یا اندام | غلظت نمک دی‌کرومات پتاسیم افزوده به خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم) | تیمار | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | شاهد | EDTA | اسید سالیسیلیک | اسید سیتریک |
| **تیمارهای زیر کشت گونه تاج‌خروس** | | | | | |
| خاک | ۵۰ | ۱b/۶۲** | ۱c/۸۳ | ۱c/۸۳ | ۱a/۴۳ |
| | ۱۰۰ | ۲b/۲۱ | ۲c/۲۶ | ۲d/۴۰ | ۱a/۱۵ |
| ریشه | ۵۰ | ۱a/۴۹ | ۴d/۷۳ | ۲c/۵۱ | ۱b/۶۹ |
| | ۱۰۰ | ۱b/۶۳ | ۵d/۱۸ | ۲c/۵۴ | ۱a/۲۲ |
| شاخساره | ۵۰ | ۰a/۱۳۰ | ۰d/۹۷۰ | ۰b/۱۶۰ | ۰c/۷۶۰ |
| | ۱۰۰ | ۰a/۱۷۰ | ۱d/۸۶ | ۰b/۲۲۰ | ۱c/۳۲ |
| **تیمارهای زیر کشت گونه گل‌جعفری** | | | | | |
| خاک | ۵۰ | ۱b/۷۴ | ۱b/۷۵ | ۲c/۴۷ | ۱a/۷۱ |
| | ۱۰۰ | ۲b/۱۹ | ۲b/۱۶ | ۲c/۷۴ | ۱a/۸۲ |
| ریشه | ۵۰ | ۱b/۰۶ | ۴d/۷۹ | ۰a/۱۱۰ | ۱c/۸۶ |
| | ۱۰۰ | ۱b/۱۶ | ۶d/۰۰ | ۰a/۱۵۰ | ۴c/۳۰ |
| شاخساره | ۵۰ | ۰b/۱۵۰ | ۰d/۷۳۰ | ۰a/۱۴۰ | ۰c/۲۴۰ |
| | ۱۰۰ | ۰b/۳۶۰ | ۱d/۳۰ | ۰a/۱۶۰ | ۰c/۵۵۰ |

* اعداد مربوط به میانگین غلظت ۳ تکرار است.

** حروف غیرمشترک (a,b ، c و ...) در هر ردیف، بیان‌گر وجود تفاوت آماری معنی‌دار میانگین غلظت عنصر کروم بین تیمارهای فاقد یا واجد عوامل شلات‌کننده مختلف در نمونه‌های خاک زیرکشت، ریشه و شاخساره رشد یافته گونه‌های تاج‌خروس و گل‌جعفری بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه است ($p<۰/۰۵$).




الف ب

ج د

**نمودار ۱. الف) مقادیر فاکتور انتقال و (ب) فاکتور تجمع‌زیستی عنصر کروم در گونه تاج خروس؛ (ج) مقادیر فاکتور انتقال و (د) فاکتور تجمع‌زیستی عنصر کروم در گونه گل‌جعفری**

بر اساس نتایج، بیشینه میانگین غلظت تجمع‌یافته عنصر مس در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره هر دو گونه مورد مطالعه، در همه موارد به تیمارهای خاک واجد ۴Z۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده تعلق داشت. از طرفی، بیشینه میانگین غلظت مس در نمونه‌های خاک زیر کشت و همچنین ریشه و شاخساره گیاه تاج‌خروس با ۶/۷۴، ۳/۷۷ و ۳/۳۴ به‌ترتیب به تیمارهای اسید سالیسیلیک، اسید سالیسیلیک و EDTA مربوط بود (جدول ۳). به‌علاوه، بیشینه میانگین غلظت مس در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره رشد یافته گونه گل‌جعفری نیز با ۶/۶۵، ۳/۴۵ و ۹/۵۰ به‌ترتیب در تیمارهای اسید سالیسیلیک، EDTA و EDTA مشاهده شد (جدول ۳).

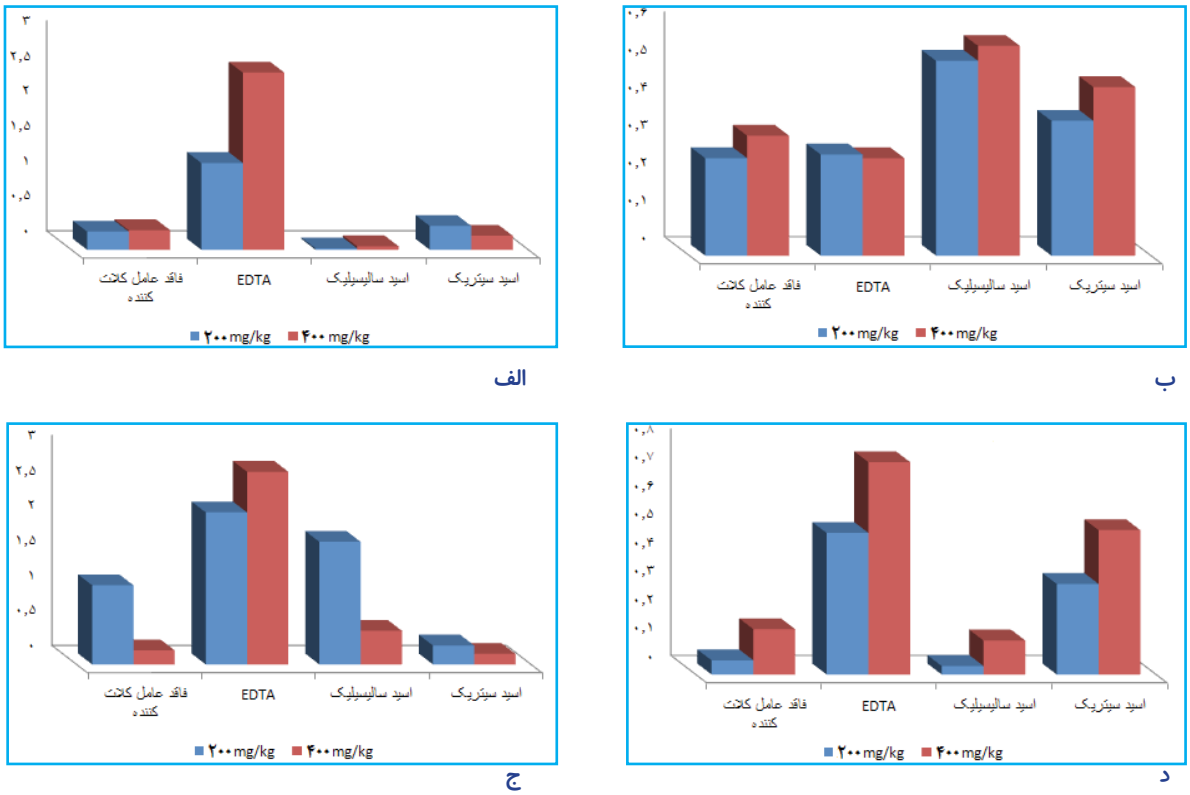
نتایج گروه‌بندی آماری تیمارهای آزمایشی مربوط به گونه تاج‌خروس از حیث میانگین محتوی مس تجمع‌یافته در نمونه‌های خاک، ریشه و شاخساره نشان داد که برای نمونه‌های خاک زیر کشت واجد ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده و همچنین نمونه‌های ریشه و شاخساره، بین همه تیمارها در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی‌دار وجود داشت (جدول ۳)، در حالی‌که، برای گونه گل‌جعفری، در نمونه‌های خاک زیر کشت واجد ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس بین همه تیمارهای آزمایشی از نظر میانگین مقادیر تجمع‌یافته مس اختلاف آماری معنی‌دار در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ مشاهده شد. علاوه بر این، در نمونه‌های ریشه رشد یافته در هر دو نمونه‌های خاک واجد ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس و همچنین شاخساره رشد یافته در نمونه خاک واجد ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس، از حیث میانگین مقادیر تجمع‌یافته مس بین تیمارهای اسید اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی‌دار وجود نداشت (جدول ۳).

**جدول ۳. میانگین غلظت تجمع‌یافته عنصر مس* در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره گونه‌های مورد مطالعه برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم به‌تفکیک نمونه شاهد و تیمارهای آزمایشی**

| محیط یا اندام | غلظت نمک سولفات مس افزوده به خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم) | تیمار | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | شاهد | EDTA | اسید سالیسیلیک | اسید سیتریک |
| تیمارهای زیر کشت گونه تاج‌خروس | | | | | |
| خاک | ۲۰۰ | ۳c/۹۳** | ۲a/۴۸ | ۴d/۰۱ | ۳b/۱۷ |
| | ۴۰۰ | ۶b/۵۱ | ۵a/۰۰ | ۶d/۷۴ | ۶b/۵۵ |
| ریشه | ۲۰۰ | ۱b/۰۴ | ۰a/۶۷۰ | ۲d/۰۸ | ۱b/۱۳ |
| | ۴۰۰ | ۲b/۳۸ | ۱a/۳۲ | ۳c/۷۷ | ۲b/۹۳ |
| شاخساره | ۲۰۰ | ۰b/۲۷۰ | ۰d/۸۳۰ | ۰a/۰۹۰ | ۰c/۳۸۰ |
| | ۴۰۰ | ۰b/۶۰۰ | ۳c/۳۴ | ۰a/۲۰۰ | ۰b/۶۰۰ |
| تیمارهای زیر کشت گونه گل‌جعفری | | | | | |
| خاک | ۲۰۰ | ۳b/۱۵ | ۲a/۹۹ | ۴d/۲۶ | ۳c/۷۸ |
| | ۴۰۰ | ۵b/۲۹ | ۴a/۵۸ | ۶d/۶۵ | ۵c/۸۱ |
| ریشه | ۲۰۰ | ۱b/۲۲ | ۱c/۵۰ | ۰a/۱۲۰ | ۰a/۱۵۰ |
| | ۴۰۰ | ۲b/۹۴ | ۳c/۴۵ | ۰a/۸۳۰ | ۰a/۹۰۰ |
| شاخساره | ۲۰۰ | ۰a/۱۷۰ | ۳d/۲۶ | ۰b/۲۱۰ | ۰c/۳۳۰ |
| | ۴۰۰ | ۰a/۱۷۰ | ۹b/۵۰ | ۰a/۴۰۰ | ۰a/۴۴۰ |

* اعداد مربوط به میانگین غلظت ۳ تکرار است.

** حروف غیر مشترک (a،b ، c و ...) در هر ردیف، بیان‌گر وجود تفاوت آماری معنی‌دار میانگین غلظت عنصر مس بین تیمارهای فاقد یا واجد عوامل شلات‌کننده مختلف در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره رشد یافته گونه‌های تاج‌خروس و گل‌جعفری بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه است ($p<0/05$).




**نمودار ۲. الف) مقادیر فاکتور انتقال و (ب) فاکتور تجمع‌زیستی عنصر مس در گونه تاج خروس؛ (ج) مقادیر فاکتور انتقال و (د) فاکتور تجمع‌زیستی عنصر مس در گونه گل‌جعفری**

از طرفی، بیشینه مقدار فاکتور انتقال عنصر مس در گونه تاج‌خروس برابر با ۲/۵۳ مربوط به تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده به خاک واجد شلات EDTA بود (نمودار ۲ (الف)). در حالی‌که، مقادیر فاکتور تجمع‌زیستی این عنصر در همه موارد، کوچک‌تر از ۱ بود (نمودار ۲ (ب)). همچنین، بیشینه مقدار فاکتور انتقال عنصر مس با ۲/۷۵ در گونه گل‌جعفری رشد یافته در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده به خاک واجد عامل شلات‌کننده EDTA مشاهده شد (نمودار ۲ (ج)). علاوه بر این، مقادیر فاکتور تجمع‌زیستی عنصر مس برای همه تیمارهای آزمایشی کوچک‌تر از ۱ بود (نمودار ۲ (د)).

## بحث

در این پژوهش بیشینه مقدار فاکتور انتقال عنصر کروم در گونه تاج‌خروس کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده، برابر با ۱/۰۸ مربوط به تیمار اسید سیتریک بود (نمودار ۱ (الف)). از طرفی، مقادیر فاکتور تجمع‌زیستی این عنصر در همه تیمارهای آزمایشی بزرگ‌تر از ۱ و بیشینه آن مربوط به گیاهان کشت شده در خاک حاوی ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده، با ۲/۵۸ و ۲/۲۹ هر دو مربوط به تیمار واجد شلات EDTA بود (نمودار ۱ (ب)). همچنین، مقدار فاکتور تجمع‌زیستی در گیاه کشت شده در خاک حاوی ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده، برای تیمار واجد شلات اسید سالیسیلیک برابر با ۱/۳۷ بود (نمودار ۱ (ب)). از این‌رو، گونه تاج‌خروس کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده در حضور عامل شلات‌کننده اسید سیتریک فراانباشتگر عنصر کروم محسوب می‌شود. در تأیید نتایج حاصل، سینهال و همکاران (۵۵)، کیو و همکاران (۳۳)، کو و همکاران (۳۸)، ابراهیمی (۳۲) و فو

و همکاران (۲۸)، نسبت به کارآمدی عوامل شلات‌کننده اسید سیتریک و EDTA در جذب عنصر کروم از خاک‌های آلوده و ارتقای انباشت آن به‌ترتیب در شاخساره‌ها و ریشه‌ها، اذعان داشتند. همچنین، کاهش مقادیر BCF در گیاه کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده در مقایسه با خاک حاوی ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده در تیمار واجد شلات EDTA را احتمالاً می‌توان به جذب بیش‌تر عنصر کروم در حضور این عامل شلات‌کننده که منجر به سمیت گیاهی و کاهش انباشت در ریشه‌ها شده است، مرتبط دانست.

مقادیر فاکتور انتقال عنصر کروم در گونه گل‌جعفری در تیمارهای واجد شلات اسید سالیسیلیک بزرگ‌تر از ۱ و بیشینه آن با ۱/۲۷ به گیاه کشت شده در خاک حاوی ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده مربوط بود. از طرفی، مقادیر این فاکتور در سایر تیمارها کوچک‌تر از ۱ بود (نمودار ۱ (ج)). این در حالی است که مقادیر فاکتور تجمع‌زیستی عنصر کروم در تیمارهای واجد شلات اسید سیتریک بزرگ‌تر از ۱ و بیشینه آن با ۲/۳۶ مربوط به گیاهان کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم دی‌کرومات پتاسیم افزوده بود (نمودار ۱ (د)). از این‌رو، گونه گل‌جعفری را نمی‌توان در حضور عوامل شلات‌کننده اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک، فرا انباشتگر مناسبی برای عنصر کروم محسوب کرد، این در حالی است که، نتایج پژوهش سینهال و همکاران (۵۵)، کیو و همکاران (۳۳)، چوهاری و همکاران (۶۹)، فو و همکاران (۲۸)، چیتراپرابها و ساتیاواتی (۷۰) و گوش و مانچاندا (۴۵)، بیان‌گر کارآمدی عوامل شلات‌کننده زیست تجزیه‌پذیر اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک در زمینه جذب عنصر کروم از خاک‌های آلوده و انباشت آن به‌ترتیب در شاخساره‌ها و ریشه‌ها بود.

در مطالعه حاضر بیشینه مقادیر فاکتور انتقال عنصر مس در گونه تاج‌خروس با ۲/۵۳ مربوط به گیاه کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده تیمار واجد شلات EDTA بود (نمودار ۲ (الف)). از طرفی، مقادیر فاکتور تجمع‌زیستی این عنصر در همه تیمارهای زیرکشت این گونه کوچک‌تر از ۱ و بیشینه مقادیر آن با ۰/۵۶ و ۰/۵۲ به‌ترتیب به گیاهان کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده واجد شلات اسید سالیسیلیک مربوط بود (نمودار ۲ (ب)). از این‌رو، گونه تاج‌خروس را می‌توان در حضور EDTA به‌عنوان گونه استخراج کننده عنصر مس محسوب کرد. در بررسی ادبیات پژوهش، نتایج پژوهش‌های سینهال و همکاران (۵۵)، کیو و همکاران (۳۳)، کو و همکاران (۳۸)، سومان و همکاران (۷۱)، ناپولی و همکاران (۶۸) و چوآ و همکاران (۱۳)، بیان‌گر کارآمدی عامل شلات‌کننده EDTA در افزایش فاکتور انتقال گونه‌های واجد قابلیت گیاه‌پالایی عنصر مس بود، در حالی‌که، به‌طور معمول در تیمارهای واجد سایر عوامل شلات‌کننده، از آن‌جا که عنصر مس از قابلیت غیرمتحرک‌سازی و تثبیت در جایگاه‌های تبادل کاتیونی دیواره یاخته‌های پارانشیمی آوندهای چوبی ریشه و درون واکوئل‌های یاخته‌های ریشه برخوردار است (۳۳)، مقادیر فاکتور انتقال این عنصر کوچک‌تر از ۱ بود. در واقع، گونه‌های مناسب گیاه‌پالایی عنصر مس، از قابلیت خوبی در زمینه گیاه تثبیتی آن برخوردارند (۷۰) که مبتنی بر کاهش غلظت فلز از طریق کاهش تحرک و دسترسی زیستی آن بوده و به‌طور معمول به سبب ظرفیت پایین جذب این عنصر، گیاهان بازدارنده مس[1] هستند و نه فرا انباشتگر آن[2] (۶۸).

در این پژوهش مقادیر فاکتور انتقال عنصر مس در گونه گل‌جعفری کشت شده در خاک حاوی ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده در تیمارهای آزمایشی EDTA و اسید سالیسیلیک و همچنین در نمونه‌های کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده در تیمار آزمایشی EDTA بزرگ‌تر از ۱ و بیشینه مقادیر آن برابر با ۲/۷۵ بود (نمودار ۲ (ج)). از طرفی، مقادیر فاکتور تجمع‌زیستی این عنصر در همه تیمارهای آزمایشی زیر کشت گونه گل‌جعفری کوچک‌تر از ۱ و بیشینه مقادیر آن با ۰/۷۵ و ۰/۵۱ به‌ترتیب به نمونه‌های

1. Cu-Excluder
2. Cu-Accumulator

کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده واجد شلات‌های EDTA و اسید سیتریک تعلق داشت (نمودار ۲ (د)). از این‌رو، گونه گل‌جعفری را نیز می‌توان در حضور عوامل شلات‌کننده EDTA و اسید سالیسیلیک، به‌عنوان گونه استخراج کننده عنصر مس محسوب کرد. در این خصوص، سینهال و همکاران (۵۵)، کیو و همکاران (۳۳)، سومان و همکاران (۷۱)، چوآ و همکاران (۱۳)، میر و همکاران (۷۲) و ناپولی و همکاران (۶۸)، کاهش فاکتور انتقال و افزایش نسبی فاکتور تجمع‌زیستی عنصر مس در گونه گل‌جعفری در حضور عامل شلات‌کننده اسید سیتریک افزوده به خاک را با غیرمتحرک‌سازی و تثبیت این عنصر در جایگاه‌های تبادل کاتیونی دیواره یاخته‌های پارانشیمی آوندهای چوبی ریشه و درون واکوئل‌های یاخته‌های ریشه مرتبط دانستند. همچنین، با استناد به یافته‌های این پژوهشگران، مقادیر فاکتور انتقال بزرگ‌تر از ۱ در نمونه‌های کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده واجد EDTA را می‌توان با تشکیل کمپلکس EDTA- فلز و سهولت دسترسی، جذب و انتقال فلز به بخش‌های هوایی گونه گل‌جعفری مرتبط دانست. علاوه بر این، در پژوهشی گزارش شد که گونه گل‌جعفری از قابلیت قابل توجه انباشت عنصر مس به‌ویژه در حضور عامل شلات‌کننده EDTA برخوردار بوده است (۷۲). نتایج پژوهش چیتراپرابها و ساتیاواتی نیز نشان داد که گونه گل‌جعفری به‌واسطه انباشت مقادیر بالای عنصر کروم در رایزوباکترها، از قابلیت انباشت بالای این عنصر در ریشه‌ها در مقایسه با بخش‌های هوایی خود برخوردار بوده است (۷۰). این در حالی است که، سومان و همکاران گزارش کردند که بیش‌تر گونه‌های مناسب گیاه‌پالایی مس از قابلیت بالایی در تثبیت و کاهش تحرک و دسترس‌پذیری زیستی این عنصر برخوردار هستند (۷۱). همچنین، نتایج پژوهش فو و همکاران نشان داد که افزودن مواد بهساز کننده‌ای همچون اسید سیتریک به خاک از طریق تحرک‌بخشی یا غیرمتحرک‌سازی کروم، بر کارایی گیاه‌پالایی تأثیر داشته است (۲۸). افروشه و همکاران نیز بیان داشتند که اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک ترکیب فنولی شبه‌هورمونی، به‌طور چشم‌گیر پاسخ‌های متابولیکی از جمله میزان تولید کلروفیل و نرخ رشد ریشه‌ها و شاخساره‌های گل‌جعفری را افزایش داده و در شرایط تنش ناشی از رشد در خاک‌های آلوده به مس، به کاهش سمّیت این عنصر از طریق افزایش انحلال آن در محلول خاک و ارتقای انباشت آن در اندام‌های گیاه منجر می‌شود (۳۹). کیو و همکاران نیز با بررسی گیاه‌پالایی گیاه یونجه در حضور اسید سیتریک عنوان داشتند که جزء محلول فلزات سنگین در خاک و مقادیر فاکتور تجمع‌زیستی این گیاه افزایش و مقادیر فاکتور انتقال برای عناصر کروم و مس به‌ترتیب افزایش و کاهش یافته است. این پژوهشگران یافته‌های مربوط به عنصر مس را با غیرمتحرک‌سازی و تثبیت این عنصر در جایگاه‌های تبادل کاتیونی دیواره یاخته‌های پارانشیمی آوندهای چوبی ریشه و درون واکوئل‌های یاخته‌های ریشه مرتبط دانستند (۳۳). در پژوهش سینهال و همکاران نیز استفاده از اسید سیتریک به‌عنوان عامل شلات‌کننده، منجر به افزایش انباشت فلز کروم در گونه *T. erecta* در مقایسه با تیمار شاهد شد؛ بدین صورت‌که، اسید سیتریک به‌طور معنی‌دار منجر به افزایش دسترسی و انتقال کروم به شاخساره‌های گیاه شد. از سوی دیگر این پژوهشگران گزارش کردند که EDTA با تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین در خاک و ایجاد سهولت دسترسی به آن‌ها، جذب و انتقال عناصر به بخش‌های هوایی گیاه را تسهیل می‌کند و افزودن مقادیر به‌نسبت بالای عوامل شلات‌کننده EDTA و اسید سیتریک به خاک (۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم)، علی‌رغم ایجاد کاهش معنی‌دار در رشد گل‌جعفری، قابلیت گیاه را در استخراج گیاهی آلاینده‌های فلزی خاک بهبود بخشیده است (۵۵).

اسید سیتریک، انحلال فلزات و جذب گیاهی آن‌ها را از طریق تشکیل کمپلکس‌های فلز- سیترات محلول افزایش می‌دهد. به‌عنوان مثال، مشاهده شده است که با کاربرد مخلوط سدیم هیدروژن فسفات و اسید سیتریک، مقادیر فاکتور تجمع‌زیستی یونجه و جزء محلول در اسید فلزات سنگین در خاک افزایش یافته است. به‌طور معمول فسفر می‌تواند انباشت زیتوده بیش‌تری را

در گیاهان سبب شود. همچنین، فسفر یک ماده مغذی مهم است که می‌تواند فلزات سنگین را از طریق دسترسی کم‌تر آن‌ها برای گیاه یا جذب میکروبی، ترسیب[1] دهد. با کاربرد اسید سیتریک در خاک نیز دسترسی زیستی فلزات به‌منظور استخراج، افزایش یافته است که با آزادسازی بیش‌تر یون‌های فسفات خاک در ارتباط است (۳۳). توجه به این نکته ضروری است که با افزودن مخلوط سدیم هیدروژن فسفات و اسید سیتریک به خاک، کاتیون‌های فلزی تمایل به تحرک بیش‌تر داشته و همچنین، با کاهش pH خاک، جایگاه‌های پیوند نیز کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان اذعان داشت که مخلوط سدیم هیدروژن فسفات و اسید سیتریک، قابلیت تحرک فلزات در پروفیل خاک از طریق تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین و به‌تبع آن کارایی گیاه‌پالایی را از طریق افزایش دسترس‌پذیری و فراهمی زیستی فلزات سنگین ارتقاء می‌دهد (۳۳).

مقادیر فاکتور انتقال کوچک‌تر از یک عناصر در حضور عوامل شلات‌کننده، نشان‌دهنده تجمع مقادیر بیش‌تر عناصر در ریشه‌ها نسبت به اندام‌های هوایی است. این امر ممکن است به‌دلیل اشباع بافت‌های هوایی یا محدودیت‌های شیب یونی باشد. به‌عبارت دیگر، این روند می‌تواند به‌دلیل یکسان بودن شیب یونی خاک و گیاه باشد؛ به‌طوری‌که یون‌هایی که به‌سمت بخش‌های هوایی گیاه حرکت می‌کنند، سبب می‌شوند یون‌های جدیدی به‌سمت ریشه‌ها حرکت کنند. از این‌رو، مقادیر بیش‌تری از فلزات در ریشه‌ها حفظ می‌شوند. هرچند در این گونه موارد، غلظت‌های کم‌تر فلزات در سرشاخه‌ها می‌تواند با تحرک محدود فلزات مرتبط باشد (۳۸). برای فاکتور انتقال عنصر مس کوچک‌تر از ۱، باید در نظر داشت که گیاهان جوان‌تر در مقایسه با انواع مسن‌تر، از قابلیت بیش‌تری برای جذب و انباشت فلزات سنگین برخوردارند (۷۳). از این‌رو، فاصله زمانی کشت تا برداشت گیاهان برای ارتقای کارایی فرآیند گیاه‌پالایی می‌بایست به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار مدنظر قرار گیرد.

نتایج پژوهش کاسکه و همکاران نشان داد که همبستگی بالایی بین مقادیر بالای مس و ترکیبات آلی- فلز با وزن مولکولی کم در محلول خاک وجود داشته است (۳۶). همچنین، در بسیاری از پژوهش‌ها، همبستگی معنی‌دار قابل توجه بین میانگین مقادیر مس با محتوی ترکیبات آلی خاک به اثبات رسیده است (۳۶، ۷۴، ۷۵). همان‌طور که اشاره شد، pH خاک، مهم‌ترین عامل مؤثر در انحلال فلزات در خاک‌های آلوده است. فلزات در pH پایین، به‌دلیل آزاد شدن اشکال کاتیونی آن‌ها یا تشکیل کمپلکس‌هایی از آن‌ها با کربن آلی محلول یا DOC موجود در خاک، افزایش انحلال را نشان می‌دهند (۳۶). البته در pHهای بالا و غلظت‌های بالای نیتروژن آمونیومی، تشکیل ترکیبات کمپلکس آلی هیدروکسیلی[2] یا آمینی[3] مس به افزایش انحلال این عنصر در خاک‌های آلوده منجر خواهد شد. بنابراین، استفاده از هرگونه مواد آلی در خاک‌های آلوده به‌دلیل تأثیر در افزایش انحلال فلزات حتی به‌صورت موقت در چند روز اولیه تا رسیدن به ثبات، می‌تواند با مخاطره محیط‌زیستی همراه بوده و باید مورد مطالعه و بررسی دقیق قرار گیرد (۳۶).

با توجه به نتایج، می‌توان اذعان داشت که سازوکار اثرات سمّیت گیاهی فلزت سنگین به‌طور کامل شناخته نشده است؛ اگرچه به‌نظر می‌رسد که آسیب به دیواره پلاسمایی یاخته‌های ریشه، نخستین اثر آن‌ها است که منجر به فقدان یون‌هایی همچون پتاسیم می‌شود. کاهش رشد و انباشت کلی فلزات سنگین در اندام‌های هوایی می‌تواند به‌دلیل کاهش کلروفیل و زیست‌توده به‌سبب تنزل میزان جذب آب در بافت‌های گیاهی در اثر سمّیت ناشی از این فلزات باشد. انباشت کم‌تر فلزات سنگین در بافت‌های هوایی به‌دلیل نیاز گیاه به پیش‌گیری از اثرات سمّیتی در اجزای فتوسنتزی است و در گیاهان، سازوکارهای درونی و بیرونی ممانعت از انتقال فلزات به بافت‌های هوایی وجود دارد. از سوی دیگر، از آن‌جا که ساقه‌ها به‌طور عمده، از بافت‌های آوندی تشکیل شده‌اند، با داشتن فعالیت‌های سوخت‌وساز کم‌تر، میزان انباشت کم‌تر فلزات در آن‌ها نسبت به برگ‌ها مورد انتظار خواهد بود

1. Sequestration

2. Hydroxyl-o rganic Cu Complexes
3. Amine-Cu Complexes

(۳۲). به‌طور کلی، در حضور غلظت‌های بهینه عوامل شلات‌کننده مناسب مانند EDTA و اسید سیتریک، اثرات نامطلوب فلزات سنگین بر رشد گیاه به‌شدت کاهش یافته و بازدهی فرآیند گیاه استخراجی و انباشت فلزات در اندام‌های هوایی افزایش می‌یابد (۵۵).

علاوه بر این، باید توجه داشت که جداسازی فلزات سنگین در یاخته‌های ریشه‌ای و انتقال مؤثر آن‌ها به آوندهای چوبی، نقش مهم و کلیدی در حرکت و انتقال آن‌ها به بخش‌های هوایی دارد که با حضور عوامل شلات‌کننده به‌شیوه‌ای کارآمدتر صورت می‌گیرد. افزودن EDTA به‌عنوان عامل شلات‌کننده به خاک زیر کشت هر دو گونه مورد مطالعه، سبب افزایش تدریجی میزان فاکتور انتقال عنصر مس به سبب افزایش سهم شکل محلول این عنصر در گیاهان و انتقال مقادیر قابل ملاحظه‌ای از فلزات به بخش‌های هوایی[1] قابل برداشت شد. از این‌رو، افزایش جذب فلزات سنگین تحت تأثیر کاربرد EDTA می‌تواند به‌دلیل کاهش pH ناشی از آن باشد، لذا همان‌طور که اشاره شد، EDTA با افزایش EC و کاهش ملایم pH ، می‌تواند در افزایش جذب فلزات سنگین و همچنین محتوی عناصر در دسترس تأثیرگذار باشد. هرچند، استفاده از این عامل شلات‌کننده می‌تواند با محدودیت‌های محیط‌زیستی از جمله ورود به منابع آب زیرزمینی همراه باشد و از طرفی گزارشاتی نیز از اثرات منفی EDTA بر فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی در خاک ثبت شده است (۷۶).

با استناد به نتایج حاصل، ارتقای گیاه‌پالایی عنصر کروم توسط گونه تاج‌خروس در حضور عامل شلات‌کننده اسید سیتریک را احتمالاً می‌توان با فعالیت رایزوباکترها و نیز افزایش جذب فسفر ناشی از انحلال یون‌های فسفات و تأثیر در رشد و نمو گیاه مرتبط دانست. از آن‌جایی که برخی اسیدهای آلی از جمله اسید سیتریک با منشأ گیاهی یا میکروبی، نقش حیاتی در انحلال فسفات‌ها و آزاد شدن فسفر ایفا می‌کنند، در رشد و نمو گیاه نیز می‌توانند اثر مستقیم داشته باشند (۷۷). برخی ریشه‌ها می‌توانند اسیدهای کربوکسیلیک؛ به‌ویژه اسید سیتریک را درون ریشه‌گاه آزاد سازند که سبب کاهش pH شده و یون‌های سیترات حاصل از آن بر آزادسازی یون‌های فسفات از ذرات خاک اثر متقابل دارد. در واقع یون‌های سیترات، رقابتی شدید با یون‌های فسفات در زمینه جذب به جایگاه‌های استقرار آن‌ها در ذرات رس خاک و افزایش انحلال فسفات غیرمحلول دارند. این در حالی است که ریزموجودات خاک نیز نقش بسیار مهمی در فرآیندهای تحرک‌بخشی فسفر دارند و هر اسید آلی که اشکال غیرآلی فسفر را حل کند یا آنزیم‌هایی که تجزیه منابع آلی فسفر را تسهیل نماید، در این زمینه می‌توانند مؤثر باشند (۷۸).

همچنین، روابط متقابل نژادهای باکتریایی و قارچ‌های مقاوم به فلزات سنگین با گیاهان، می‌تواند به‌عنوان محرک رشد گیاه در شرایط تنش فلزی عمل کنند (۷۹، ۸۰).

ثابت شده است که ویژگی‌های میکروساختاری و آرایش ذرات رس، نقش مهمی در فرآیند الکتروکینتیک پالایش خاک دارد. به‌بیان دیگر، کاهش pH سیستم الکترولیت خاک، اثر معنی‌دار قابل توجهی بر افزایش کارایی استخراج آلاینده دارد؛ بدین‌صورت که ایجاد ساختار فلوکولیتی[2]، ظرفیت نگه‌داری فلزات را توسط ذرات رس کاهش و در نتیجه مسیر جریان انحلال و جذب توسط گیاه را افزایش می‌دهد. از این‌رو، کارایی استخراج آلاینده ارتقاء می‌یابد (۸۱). از طرفی، تحرک اندک فلزات سنگین، عامل محدودکننده‌ای در انتقال آن از ریشه‌ها به شاخساره‌ها و نگه‌داری بیش‌تر این فلز در ریشه‌ها نسبت به شاخساره‌ها به‌عنوان یک راهبرد سمیت‌زدایی در گیاهان است (۸۲). از این‌رو، فاکتور تجمع زیستی بزرگ‌تر از یک عنصر کروم در ریشه‌های گونه تاج‌خروس در همه تیمارهای واجد عامل شلات‌کننده و در ریشه‌های گل‌جعفری در تیمارهای واجد عوامل شلات‌کننده EDTA و اسید سیتریک را می‌توان با این راهبردهای بازدارنده مرتبط دانست.

## نتیجه‌گیری

مقادیر فاکتورهای انتقال و تجمع‌زیستی نشان دادند که گونه‌های تاج‌خروس و گل‌جعفری به‌ترتیب از قابلیت استخراج و تثبیت

1. Aerial Parts

2. Flocculated Structure

گیاهی عنصر کروم در حضور عامل شلات‌کننده اسید سیتریک برخوردار بوده و اسید سالیسیلیک نیز عامل ارتقای نسبی انباشت کروم و مس در ریشه‌های گونه تاج‌خروس بوده است، لذا می‌توان اذعان داشت که اسیدهای آلی احتمالاً از طریق سازوکارهایی مانند کاهش pH سیستم الکترولیت خاک و افزایش فراهمی زیستی و غلظت یون‌های فلزی در محلول خاک، اثرات شبه‌هورمونی، آزادسازی و انحلال فسفات، افزایش تحرک فلزات سنگین و برخی فعالیت‌های آنزیمی، دگرگونی میکروساختاری و کاهش ظرفیت نگهداری فلزات توسط ذرات رس، نقش مهمی در الکتروکینتیک پالایش خاک ایفا کرده‌اند. از این‌رو، با توجه به اثر مطلوب این عوامل شلات‌کننده در ارتقای کارایی گیاه‌پالایی گونه‌های فرا انباشتگر، استفاده از آن‌ها در فرآیند آلودگی‌زدایی خاک توصیه می‌شود.

## ملاحظات اخلاقی

نویسندگان همه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین، هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

## تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از رساله دکتری تخصصی محیط‌زیست مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان با کد ۱۷۱۴۸۴۰۵۰۷۶۱۷۷۷۱۱۶۲۲۹۲۰۴۹ است. بدین‌وسیله از معاونت محترم پژوهش و فن‌آوری دانشگاه برای فراهم کردن امکانات اجرای مطالعه، تشکر و قدردانی می‌شود.

## References

1. Sobhanardakani S. Evaluation of the water quality pollution indices for groundwater resources of Ghahavand plain, Hamadan province, western Iran. Iranian Journal of Toxicology 2016; 10(3):35-40.
2. Shokri Ragheb P, Sobhanardakani S. Analysis of Co, Cr and Mn concentrations in atmospheric dry deposition in Hamadan City. Journal of Hamadan University of Medical Sciences 2016;23(2):149-56 (In Persian).
3. Sobhanardakani, S. Ecological and human health risk assessment of heavy metals content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran. Biological Trace Element Research 2019;187(2):602-10.
4. Amna BUD, Rafique M, Javed MT,et al. Assisted phytoremediation of chromium spiked soils by Sesbania sesban in association with Bacillus xiamenensis PM14: Abiochemical analysis. Plant Physiology and Biochemistry 2020;146:249-58.
5. Awad M, El-Desoky MA, Ghallab A, et al. Ornamental plant efficiency for heavy metals phytoextraction from contaminated soils amended with organic materials. Molecules 2021;26(11):3360.
6. Shao Z, Lu W, Naser J, et al. Growth responses and accumulation characteristics of three ornamentals under copper and lead contamination in a hydroponic culture experiment. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 2019;103:854-59.
7. Liu JN, Zhou QX, Sun T, et al. Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics. Journal of Hazardous Materials 2008a;151:261-67.
8. Li Z, Ma Z, Kuijp T, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. Science of the Total Environment 2014;468-469: 843-53.
9. Rezaei Raja O, Sobhanardakani S, Cheraghi M. Health risk assessment of citrus contaminated with heavy metals in Hamedan City, potential risk of Al and Cu. Environmental Health Engineering and Management Journal 2016;3(3):131-5.
10. Alizamir M, Sobhanardakani S. A comparison of performance of artificial neural networks for prediction of heavy metals concentration in groundwater resources of Toyserkan Plain. Avicenna Journal of Environmental Health Engineering 2017;4(1):e11792.
11. Sobhanardakani, S. Heavy metals health risk assessment through consumption of some foodstuffs marketed in city of Hamedan, Iran. Caspian Journal of Environmental Sciences 2019b 17(2):175-183.
12. Fulekar MH. Phytoremediation of heavy metals by Helianthus annus in aquatic and soil environment. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 2016;5(7):322-404.
13. Chua J, Banua JM, Arcilla I, et al. Phytoremediation potential and copper uptake kinetics of Philippine bamboo species in copper contaminated substrate. Heliyon 2019;5(9):e02440.
14. Mahar A, Wang P, Ali A, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review. Ecotoxicology and Environmental Safety

2016;126:111-21.
15. Yan L, Li C, Zhang J, et al. Enhanced phytoextraction of lead from artificially contaminated soil by Mirabilis jalapa with chelating agents. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 2017;99:208-12.
16. Shehata SM, Badawy RK, Aboulsoud YIE. Phytoremediation of some heavy metals in contaminated soil. Bulletin of the National Research Centre 2019:43:189.
17. Ranieri, Moustakas K, Barbafieri M, et al. Phytoextraction technologies for mercury- and chromium-contaminated soil: A review. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 2020a;95:317-27.
18. Aghelan N, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Evaluation of chelating agents with different biodegradability rates on the enhanced phytoremediation efficiency of ornamental species (Amaranthus Caudatus and Tagetes Patula) in cadmium contaminated soils. Journal of Environmental Health Engineering 2020;7(4):427-42.
19. Ranieri E, Tursi A, Giuliano S, et al. Phytoextraction from chromium-contaminated soil using Moso Bamboo in Mediterranean conditions. Water, Air, & Soil Pollution 2020b;231(8):408.
20. Ali H, Khan E, Sajad MA. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. Chemosphere 2013;91(7):869-81.
21. Zhao X, Zheng W, Dong D, et al. Temperature effect on fluorescence of PtOEP embedded in sol-gel membrane used in oxygen sensor. Optik- International Journal for Light and Electron Optics 2013;124:6799-6802.
22. Sandana Mala JG, Sujatha D, Rose C. Inducible chromate reductase exhibiting extracellular activity in Bacillus methylotrophicus for chromium bioremediation. Microbiology Research 2017;170: 235-41.
23. Sobhanardakani S. Potential health risk assessment of heavy metals via consumption of caviar of Persian sturgeon. Marine Pollution Bulletin 2017;123(1-2):34-8.
24. Sabet Aghlidi P, Cheraghi M, Lorestani B, et al. Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, case study: South of Iran. Journal of Environmental Health Science and Engineering 2020;18(2):665-76.
25. Shahid M, Shamshad S, Rafiq M, et al. Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. Chemosphere 2017;178:513-33.
26. Vidayanthi V, Choesin D, Iriawati I. Phytoremediation of chromium: distribution and speciation of chromium in Typha angustifolia. International Journal of Plant Biology 2017;8(1):6870.
27. Stanislawska-Glubiak E, Korzeniowska J. Fate of copper in soils from different fertilizer doses in relation to environmental risk assessment. Polish Journal of Environmental Studies 2018;27(4):1735-41.
28. Fu R, Wen D, Xia X, et al. Electrokinetic remediation of chromium (Cr)-contaminated soil with citric acid (CA) and polyaspartic acid (PASP) as electrolytes. Chemical Engineering Journal 2017;316(15):601-08.
29. Xu T, Nan F, Jiang X, et al. Effect of soil pH on the transport, fractionation, and oxidation of chromium (III). Ecotoxicology and Environmental Safety 2020;195:110459.
30. Hsu NH, Wang SL, Lin YC, et al. Reduction of Cr (VI) by crop-residue-derived black carbon. Environmental Science & Technology 2009;43:8801-06.
31. Choppala G, Bolan N, Shnan AK, et al. Concomitant reduction and immobilization of chromium in relation to its bioavailability in soils. Environmental Science and Pollution Research 2015;22: 8969-78.
32. Ebrahimi M. Effect of EDTA treatment method on leaching of Pb and Cr by Phragmites australis (Cav.) Trin. Ex Steudel (common reed). Caspian Journal of Environmental Sciences 2015;13(2):153-66.
33. Qu J, Lou C, Yuan X, et al. The effect of sodium hydrogen phosphate/citric acid mixtures on phytoremediation by alfalfa & metals availability in soil. Soil Science and Plant Nutrition 2011;11(2): 85-95.
34. Pranav K, Chaturvedi CS, Seth VM. Selectivity sequences and sorption capacities of phosphatic clay and humus rich soil towards the heavy metals present in zinc mine tailing. Journal of Hazardous Materials 2007;147:698-705.
35. Mohammadi Roozbahani M, Sobhanardakani S, Karimi H, et al. Natural and anthropogenic source of heavy metals pollution in the soil samples of an industrial complex; a case study. Iranian Journal of Toxicology 2015;9(29):1336-41.
36. Cuske M, Karczewska A, Galka B. Some adverse effects of soil amendment with organic materials- The case of soils polluted by Cu industry phytostabilized with red fescue. International Journal of Phytoremediation 2016;18(8):839.
37. Pietrzak U, Mcphail DC. Copper accumulation, distribution and fractionation in vineyard soils of Victoria, Australia. Geoderma 2004;122(2-4):151-66.
38. Ko CH, Chang FC, Wang YN, et al. Extraction of heavy metals from contaminated soil by two Amaranthus spp. CLEAN- Soil, Air, Water 2014;42(5):635-40.
39. Afrousheh M, Tehranifar A, Shoor M, et al. Phytoremediation potential of copper contaminated soils in Calendula officinalis and effect of salicylic acid on the growth and copper toxicity. International Letters of Chemistry. Physics and Astronomy 2015a;50:159-68.
40. Cay S, Uyanik A, Engin MS, et al. Effect of EDTA and tannic acid on the removal of Cd, Ni, Pb and Cu from artificially contaminated soil by Althea rosea Cavan. International Journal of Phytoremediation 2015;17(1-6):568-74.
41. Amouei A, Naddafi K, Mahvi A. The effect of chemical

additives on the uptake and accumulation of Pb and Cd in native plants of north of Iran. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences 2012;21(86):116-24 (In Persian).
42. Chaturvedi N, Ahmed MJ, Dhal NK. Effects of iron ore tailings on growth and physiological activities of Tagetes patula L. Journal of Soils and Sediments 2014;14:721-30.
43. Song Y, Ammami MT, Benamar A, et al. Effect of EDTA, EDDS, NTA and citric acid on electrokinetic remediation of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn contaminated dredged marine sediment. Environmental Science and Pollution Research 2016;23(11):10577-86.
44. Afrousheh M, Tehranifar A, Shoor M, et al. Salicylic acid alleviates copper toxicity in Tagetes erecta. International Journal of Farming and Allied Sciences 2015b;4(3):232-8.
45. Ghosh A, Manchanda N. Phytoremediation of heavy metals from water of Yamuna river by Tagetes patula, Bassica scoparia, Portulaca grandiflora. Asian Plant Research Journa. 2019;2(2):1-14.
46. Suthar V, Memon KS, Mahmood-ul- Hassan M. EDTA-enhanced phytoremediation of contaminated calcareous soils: heavy metal bioavailability, extractability, and uptake by maize and sesbania. Environmental Monitoring and Assessment 2014;186(6):3957-68.
47. Lingua G, Todeschini V, Grimaldi M, et al. Polyaspartate, a biodegradable chelant that improves the phytoremediation potential of poplar in a highly metal-contaminated agricultural soil. Journal of Environmental Management 2014;132:9-15.
48. Sabir M, Hanafi MM, Zia- Ur- Rehman M, et al. Comparison of low- molecular- weight organic acids and ethylenediaminetetraacetic acid to enhance phytoextraction of heavy metals by maize. Communications in Soil Science and Plant Analysis 2014;45(1):42-52.
49. Hart G, Koether M, McElroy T, et al. Evaluation of chelating agents used in phytoextraction by
switchgrass of lead contaminated soil. Plants 2022;11:1012.
50. Zhang T, Zou H, Ji H, et al. Enhanced electrokinetic remediation of lead-contaminated soil by complexing agents and approaching anodes. Environmental Science and Pollution Research 2014;21: 3126-33.
51. Grecman H, Velikonja-Bolta S, Vodnik D, et al. EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: metal accumulation, leaching and toxicity. Plant and Soil 2001;235(1):105-14.
52. Vassil AD, Kapulnik Y, Raskin I, et al. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian mustard. Plant Physiology 1998;117(2):447-53.
53. Ehsan S, Ali S, Noureen S, et al. Citric acid assisted phytoremediation of cadmium by Brassica napus L. Ecotoxicoly and Environmental Safety 2014;106:164-72.
54. Han Y, Zhang L, Gu J, et al. Citric acid and EDTA on the growth, photosynthetic properties and heavy metal accumulation of Iris halophile Pall. Cultivated in Pb mine tailings. International Biodeterioration and Biodegradation 2018;128:15-21.
55. Sinhal VK, Srivastava A, Singh VP. EDTA and citric acid mediated phytoextraction of Zn, Cu, Pb and Cd through marigold (Tagetes erecta). Journal of Environmental Biology 2010;31(3):255-9.
56. Mohammad Zaheri F, Sobhanardakani S, Lorestani B. Investigation of efficiency of natural zeolite on immobilization/stabilization of Pb and Cd in contaminated soil using the BCR sequential extraction method. Journal of Environmental Health Enginering 2020;8(1):31-49 (In Persian).
57. Davodpour R, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Honeybees (Apis mellifera L.) as a potential bioindicator for detection of toxic and essential elements in the environment (Case study: Markazi Province, Iran). Archives of Environmental Contamination and Toxicology 2019;77(3):344-58.
58. Mohammadi SM, Lorestani B, Sobhan Ardakani S, et al. Source identification and ecological risk assessment of some heavy metals in surface soils collected from the vicinity of Arad-Kouh processing and disposal complex, Tehran, Iran. Environmental Sciences 2021;19 (3):1-22(In Persian).
59. Hazratzadeh Sh, Sobhanardakani S. Assessment of Zn, Pb, Cd, and Cu contamination in surface soils of urban parks in city of Hamedan. Iranian Journal of Soil Research 2018;32(3):399-413 (In Persian).
60. Sobhanardakani S. Assessment of Pb and Ni contamination in the topsoil of ring roads' green spaces in the city of Hamedan. Pollution 2018;4(1):43-51.
61. Hosseini NS, Sobhanardakani S. Evaluation of the impact of traffic volume on pollution and potential ecological risk of Zn, Pb, and Ni in suburban roadside soils in Hamedan, Iran. Iranian Journal of Soil Research 2021;35(2):119-135 (In Persian).
62. Liu JN, Zhou QX, Sun T, et al. Identification and chemical enhancement of two ornamental plants for phytoremediation. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 2008b;80:260-5.
63. Sobhanardakani S, Heydari A, Khorasani NA, et al. Preparation of new biofungicides using antagonistic bacteria and mineral compounds for controlling cotton seedling damping-off disease. Journal of Plant Protection Research 2009;49(1):49-55.
64. Bareen F, Rafiq K, Shafiq M, et al. Uptake and leaching of Cu, Cd, and Cr after EDTA application in sand columns using Sorghum and Pearl Millet. Polish Journal of Environmental Studies 2019;28(4): 2065-77.

65. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Heavy metal concentrations in roadside plants (Achillea wilhelmsii and Cardaria draba) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. Environmental Science and Pollution Research 2020;27(12):13301-14.
66. Abbaszadeh H, Mohammadi Roozbahani M, Sobhanardakani S. Use of Ziziphus spina-christi and Prosopis cineraria leaves as bio-indicators of environmental pollution emitted from industrial areas. Iranian Journal of Health and Environment 2019;12(1):87-100 (In Persian).
67. Lam EJ, Canovas M, Galvez ME, et al. Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. Journal of Geochemical Exploration 2017; 182:210-17.
68. Napoli M, Cecchi S, Grassi C, et al. Phytoextraction of copper from a contaminated soil using arable and vegetable crops. Chemosphere 2019;219:122-9.
69. Choudhury MR, Islam MS, Ahmed ZU, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated Buriganga riverbed sediment by indian mustard and marigold plants. Environmental Progress & Sustainable Energy 2015;35:117-24.
70. Chitraprabha K, Sathyavathi S. Phytoextraction of chromium from electroplating effluent by Tagetes erecta (L.). Sustainable Environment Research 2018;28:128-34.
71. Suman J, Uhlik O, Viktorova J, et al. Phytoextraction of heavy metals: a promising tool for clean-up of polluted environment? Frontiers in Plant Science 2018;9:1476.
72. Mir RA, Ahanger MA, Agarwal RM. Marigold: from mandap to medicine and from ornamentation to remediation. American Journal of Plant Sciences 2019;10:309-38.
73. Ziarati P, Alaedini S. The phytoremediation technique for cleaning up contaminated soil by Amaranthus sp. Journal of Environmental and Analytical Toxicology 2014;4(2):208-11.
74. Karczewska A, Orlow K, Kabala C, et al. Effects of chelating compounds on mobilization and phytoextraction of copper and lead in contaminated soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis 2011;42:1379.
75. Rutkowska B, Szulc W. Speciation of Cu and Zn in soil solution in a long-term fertilization experiment. Soil Science Annual 2014;65(1):25.
76. Neugschwandtner RW, Tlustos P, Komarek M, et al. Chemically enhanced phytoextraction of risk elements from a contaminated agricultural soil using Zea mays and Triticum aestivum: performance and metalmobilization over a three year period. International Journal of Phytoremediation 2012;14(8): 754-71.
77. Kaur R, Yadav P, Sharma A, et al. Castasterone and citric acid treatment restores photosynthetic attributes in Brassica juncea L. under Cd(II) toxicity. Ecotoxicology and Environmental Safety 2017; 145:466-75.
78. Barrow NJ, Debnath A, Sen A. Mechanisms by which citric acid increases phosphate availability. Plant and Soil 2017;423(1-2):1-12.
79. Khan AR, Ullah I, Waqas M, et al. Host plant growth promotion and cadmium detoxification in Solanum nigrum, mediated by endophytic fungi. Ecotoxicology and Environmental Safety 2017;136: 180-8.
80. Lal S, Kumar R, Ahmad S, et al. Exploring the survival tactics and plant growth promising traits of root-associated bacterial strains under Cd and Pb stress: A modeling based approach. Ecotoxicology and Environmental Safety 2019;170:267-77.
81. Goodarzi AR, Mirmomen M. The effect of time and pore fluid characteristics on electrokinetic performance in removing heavy metals from soil. Modares Civil Engineering Journal 2016;16(2):229-41 (In Persian).
82. Cay S. Enhancement of cadmium uptake by Amaranthus caudatus, an ornamental plant, using tea saponin. Environmental Monitoring and Assessment 2016;188:320-7.