

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

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

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

► **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. *Journal of Research in Environmental Health*. Autumn 2022; 8(3): 280-299.

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 به خود معطوف کرده است (۱-۵). در بین این تهدیدها، فلزات سنگین بیش‌ترین نقش را در آلودگی محیط‌زیست و همچنین تهدید سلامت انسان به خود اختصاص داده‌اند (۶). آلاینده‌های فلزی، قابل تجزیه شیمیایی و زیستی نبوده و با خصوصیات همچون پایداری، نیم عمر طولانی، سمیت و قابلیت تجمع زیستی و انباشت خود، سلامت، ایمنی و حیات را از راه‌های تنفس و تماس پوستی و یا انتقال در زنجیر غذایی به مخاطره می‌اندازند (۷-۱۱). به دلیل مخاطرات محیط‌زیستی آلودگی با عناصر بالقوه سمی، جستجوی فناوری‌های پالایش مناسب و مقرون به صرفه به منظور حذف یا کاهش آلاینده‌ها از محیط‌زیست، ضروری است (۱۲، ۱۳). بنابراین، پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در نواحی شهری، به عنوان 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 به طور معمول پرهزینه بوده و اغلب اثرات مخرب برجای می‌گذارند (۵، ۱۴، ۱۵)، به عنوان گزینه برتر و نویدبخش اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به شمار می‌رود (۵، ۶، ۱۶). در واقع، گیاه‌پالایی به عنوان یک فناوری سبز، بیان‌گر استفاده از گونه‌های فرا انباشتگر به منظور 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، به صورت درجا^۱ استفاده می‌شود و از این رو، به هیچ اقدام حفاری، انتقال و دفع خاک نیاز ندارد و هدف اصلی آن، حفظ، ذخیره‌سازی و حتی بهبود بخشی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک است (۵، ۱۸). علاوه بر این، این فناوری از هر دو جنبه اقتصادی به سبب هزینه‌های بسیار پایین‌تر از سایر روش‌ها و بوم‌شناختی به دلیل

ارزش محیط‌زیستی آن، دارای مزیت است. پیش‌فرض این روش، یافتن گونه فرا انباشتگر با توانایی بالا در انباشت فلزات همراه با تولید زیاده بالا است که از قابلیت قابل قبول در جذب آلاینده‌ها برخوردار باشد (۱۹).

سایر روش‌های پالایش همچون تثبیت بیرون‌جا^۲، استخراج بخار^۳، پمپ و تصفیه^۴ و واجذب حرارتی^۵، بسیار پرهزینه بوده و از نظر مصرف انرژی مقرون به صرفه نیستند (۱۳). به علاوه، ممکن است در برخی روش‌های تصفیه، به واسطه استفاده از مواد شیمیایی خطرناک، بوم‌سازگان‌ها با تهدیدهای بیش‌تری مواجه شوند (۱۳، ۲۰). از این رو، استفاده از فناوری‌های پایدار پالایش محیط‌زیست همچون گیاه‌پالایی که به عنوان 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 به صرفه است که نیاز به سرمایه بالا در زمینه تجهیزات را از بین می‌برد و از آنجایی که انرژی را به طور مستقیم از نور خورشید تأمین می‌کند، به عنوان فناوری خورشیدی^۶ شناخته می‌شود. از سوی دیگر، می‌توان به اهمیت اقتصادی این فناوری از طریق معدنی‌سازی گیاهی^۷ یا گیاه استخراجی^۸ اشاره کرد؛ به طوری که در استخراج گیاهی، آلاینده‌ها به طور مستقیم پس از جمع‌آوری و انتقال از ریشه‌ها به بافت‌های هوایی گیاه، قابل برداشت خواهند بود (۱۳).

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

2. Ex-situ Stabilization

3. Soil-vapor Extraction

4. Pump and Treat

5. Thermal Desorption

6. Solar-powered

7. Phytomining

8. Phytoextraction

1. In situ

آن در شرایط اسیدی قابل توجه 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 به دلیل تحرک بالای کروم تبادلی است و پیامد آن، دسترسی زیستی آن در بوم‌سازگان است (۲۹).

به عنوان 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 این رو، 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 سمی 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 به عنوان یک عنصر سمی بالقوه، در زمره آلاینده‌های فلزی موجود در خاک‌های شهری به خصوص کلان‌شهرها محسوب می‌شود که فعالیت‌های معدنی و صنایع دباغی و جواهرسازی، از مهم‌ترین منابع ورود این عنصر به خاک است (۶، ۱۳). با وجود این که مس یک عنصر ضروری برای فرآیندهای زیستی به‌شمار می‌رود، جذب مقادیر زیاد آن می‌تواند اثرات سمی 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

ظرفیتی، یک عنصر کم‌مصرف ضروری است، کروم ۶ ظرفیتی، غیرضروری و یک عنصر سمی 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 سمی 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، سمیت گیاهی ایجاد می‌کند. گیاهان، سمیت 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 تحرک بخشی 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

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 سمیت 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 حالی که 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^۱ 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^۲ 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^۳ از خانواده *Asteraceae* نیز با تحمل مقادیر قابل توجهی از فلزات سنگین سمی و حفظ رشد طبیعی خود در خاک‌های آلوده، مقادیر اضافی این فلزات را می‌تواند در خود ذخیره کند (۴۲).

عوامل شلات‌کننده^۴ 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^۵ بر آبشویی کروم توسط گونه نی معمولی^۶ 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

2. *Amaranthus caudatus*3. *Tagetes patula*

4. Chelating Agents

5. Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA)

6. *Phragmites australis*

1. Ornamental Plants

یا زیستی تجزیه پذیر مانند اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک، به عنوان مؤثرترین و پربازده ترین عامل افزایش دهنده نرخ انحلال فلزات سنگین در خاک محسوب می شود (۴۷-۴۹).

EDTA به عنوان نوعی عامل شلات کننده می تواند از ۶ مکان به یک یون فلزی متصل و با تشکیل کمپلکس های پایدار، سبب شود که فلزات از سطح ذرات ماتریکس جذب شده و نرخ مهاجرت یون های فلزی افزایش یابد (۴۳، ۵۰). از طرفی، آب گریزی کمپلکس های EDTA با فلزات در خاک منجر می شود که غالباً ترکیبات آب دوست از مسیر آپوپلاستی^۳ عبور کرده و مقاومت کمتری در مقابل ورود فلزات به یاخته ایجاد شود (۵۱). همچنین، ثابت شده است که EDTA می تواند موانع فیزیولوژیکی ریشه که کنترل کننده جذب فلزات سنگین هستند را تخریب کرده و به انباشت مقادیر بیش تر از توان گیاه بالایی از فلزات منجر شود (۵۲). این فعالیت ها، سازوکار دفاعی بر علیه سمیت فلزات سنگین است و در پی آن رشد گیاه کاهش می یابد (۴۷، ۵۳). به علاوه، در چندین مطالعه ثابت شده است که کاربرد اسید سیتریک در محیط های آلوده به فلزات سنگین، به طور معنی داری رشد گیاهان را بهبود بخشیده است (۲۱، ۴۸). در واقع، کاربرد اسید سیتریک به افزایش وزن تر ریشه و شاخساره گیاهان منجر می شود؛ در حالی که، کاربرد EDTA به طور معنی دار وزن تر ریشه را در خاک آلوده به فلزات سنگین کاهش خواهد داد (۵۴). علاوه بر موارد فوق، می توان اذعان داشت که EDTA با افزایش هدایت الکتریکی^۴ 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 ریشه ها و سپس سرشاخه ها وارد شده و بنابراین، فلزات را نیز همراه با خود بخش های هوایی گیاه انتقال داده و در بهبود جذب و انتقال فلزات نقش ایفا می کند (۳۲، ۵۵).

همان طور که اشاره شد، فلزات سنگین از مهم ترین ترکیبات آلاینده معدنی هستند که به زنجیرهای غذایی وارد شده و به دلیل

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

عوامل شلات کننده را می توان در دو دسته آمینو پلی کربوکسیلیک اسیدها (APCAs)^۱ و اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم (LMWOAS)^۲ دسته بندی کرد. EDTA، نوعی APCAs مصنوعی است که به طور گسترده در محیط زیست و مصارف پزشکی همچون حذف سرب از بدن انسان استفاده می شود. از آن جا که، عامل EDTA و کمپلکس های فلز-EDTA دارای تجزیه پذیری زیستی اندک و پایداری محیط زیستی بالایی هستند، می توانند خطر آب شویی را به میزان قابل ملاحظه ای افزایش دهند. لذا، EDTA، کمپلکس آنیونی است که به جذب فلزات و تشکیل کمپلکس های آنیونی کمک می کند (۴۳). اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم همچون اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک نیز از دیگر انواع عوامل شلات کننده هستند که نقش مهمی در انحلال فلزات سنگین ایفا می کنند (۴۳). این عوامل شلات کننده، قابلیت آلودگی زدایی خاک های آلوده توسط گیاهان را از طریق کاهش pH، افزایش اسیدیته، انحلال پذیری و به دنبال آن انباشت فلزات افزایش داده (۴۶) و علاوه بر تجزیه پذیری زیستی، از مزایایی همچون اختصاص یافتگی بالا و سمیت پایین تر برخوردارند. باید توجه داشت که گرچه استفاده از عوامل شلات کننده مصنوعی و به ویژه EDTA می تواند با افزایش نرخ جذب یا دسترس پذیری فلزات سنگین در خاک، تولید زیست توده توسط گیاه را به طور معنی داری کاهش داده و آثار سمیت برای گیاهان در پی داشته باشد، اما همچنان در مقایسه با سایر شلات کننده های شیمیایی و

3. Apoplastic

4. Electrical Conductivity (EC)

1. Aminopolycarboxylic Acids

2. Low-Molecular Weight Organic Acids

برخورداری از نیمه عمر طولانی، سمیت، 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 به دلیل تحمل و انباشت فلزات سنگین و عدم حضور در زنجیرهای غذایی، می‌توانند در کاهش آلودگی محیط زیست به‌ویژه خاک مناطق شهری مؤثر واقع شوند. از این رو، 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 به مدت چندین سال زیر کشت نبوده‌اند، برداشت شد؛ بدین‌صورت که نمونه‌برداری بر اساس دستورالعمل وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا (USDA)^۱ به‌روش کاملاً تصادفی از خاک سطحی با عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری توسط بیلچه چوبی انجام و نمونه‌های جمع‌آوری شده درون ظروف پلاستیکی مخصوص، به‌منظور تعیین برخی پارامترهای فیزیکوشیمیایی و آلوده‌سازی مصنوعی^۲ در اسرع وقت به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌های خاک به مدت 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 pH متر 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٪ مرکب 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^۳ و غلظت‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از نمک سولفات مس^۴ 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 به مدت 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 منابع طبیعی 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 شلات‌کننده قرار داده شدند (۱۸). پس از طی این مدت، ۱۵ گیاهچه سالم از هر گیاه به گلدان‌هایی با ابعاد ۱۵×۲۰ 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).

3. $K_2Cr_2O_7$
4. $CuSO_4$

1. United States Department of Agriculture
2. Artificially

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

در رابطه ۱:

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

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

در رابطه ۲:

TF نشان‌دهنده فاکتور انتقال و $C_{\text{Aerial tissues}}$ و C_{Roots} (میلی گرم در کیلوگرم) نیز به ترتیب 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 به منظور 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 به دنبال آن از آزمون تعقیبی دانکن استفاده شد.

جدول ۱. تیمارهای شاهد و آزمایشی*

تیمار	غلظت نمک دی‌کرومات پتاسیم افزوده به خاک (میلی گرم در کیلوگرم)	غلظت نمک سولفات مس افزوده به خاک (میلی گرم در کیلوگرم)	غلظت عامل شلات کننده افزوده به خاک (میلی مول در کیلوگرم)	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.

از طرفی، به منظور 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 به مدت ۱۲۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۶۵ درجه سلسیوس قرار داده شده و سپس، ۲/۶ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن 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، با هدف بررسی کارایی فرآیند گیاه‌پالایی گیاهان زینتی و آریزایی تأثیر عوامل شلات‌کننده با نرخ‌های تجزیه‌پذیری متفاوت در ارتقای این فرآیند، نسبت به محاسبه شاخص‌های تجمع‌زیستی و انتقال عناصر کروم و مس به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ اقدام شد (۶۶-۶۸).

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 به ترتیب برابر با $0.01 \pm 1/12$ و 0.06 ± 0.083 میلی گرم 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 گل جعفری به ترتیب در جداول ۲ و ۳ و مقادیر فاکتورهای انتقال و تجمع زیستی به ترتیب در نمودارهای ۱ تا ۳ آورده شده است.

بر اساس نتایج، بیشینه میانگین غلظت تجمع یافته عنصر کروم در نمونه‌های شاخساره رشد یافته گونه‌های مورد بررسی در همه موارد و نمونه‌های خاک زیر کشت و ریشه‌های گونه گل جعفری، به تیمارهای واجد ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده تعلق داشت، این در حالی است که بیشینه میانگین غلظت تجمع یافته عنصر کروم در نمونه‌های خاک زیر کشت و ریشه‌های گونه تاج خروس در تیمار واجد اسید سیتریک، به تیمارهای واجد ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده تعلق داشت. از طرفی، بیشینه میانگین غلظت کروم در نمونه‌های خاک زیر کشت و همچنین ریشه و شاخساره گیاه تاج خروس با ۲/۴۰، ۵/۱۸ و ۱/۸۶ به ترتیب مربوط به تیمارهای اسید سالیسیلیک، EDTA و EDTA بود (جدول ۲). همچنین، بیشینه میانگین غلظت کروم در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره رشد یافته گونه گل جعفری نیز با ۲/۷۴، ۶/۰۰ و ۱/۳۰ به ترتیب مربوط به تیمارهای تیمارهای اسید سالیسیلیک، EDTA و EDTA بود (جدول ۲).

نتایج گروه بندی آماری تیمارهای آزمایشی مربوط به گونه تاج خروس از حیث محتوی کروم تجمع یافته در نمونه‌های خاک، ریشه و شاخساره نشان داد که در تیمارهای خاک واجد ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده، بین شلات EDTA و اسید سالیسیلیک از نظر میانگین مقادیر تجمع یافته

کروم در خاک در سطح معنی داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی دار وجود نداشت، در حالی که در نمونه‌های خاک واجد ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده، بین همه تیمارهای واجد شلات (آزمایشی) در سطح معنی داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی داری مشاهده شد (جدول ۲). علاوه بر این، از حیث میانگین مقادیر کروم تجمع یافته در نمونه‌های ریشه و شاخساره رشد یافته در خاک‌های واجد ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده، بین همه تیمارهای آزمایشی در سطح معنی داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی دار مشاهده شد.

نتایج گروه بندی آماری تیمارها برای گونه گل جعفری نیز نشان داد که بین نمونه‌های خاک زیر کشت و همچنین ریشه و شاخساره رشد یافته در خاک‌های واجد ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده، از حیث میانگین مقادیر کروم تجمع یافته اختلاف آماری معنی دار در سطح معنی داری ۰/۰۵ وجود داشت (جدول ۲).

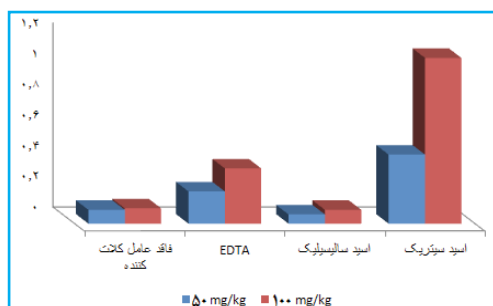
بیشینه مقدار فاکتور انتقال عنصر کروم در گونه تاج خروس برابر با ۱/۰۸ مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده به خاک واجد شلات اسید سیتریک بود (نمودار ۱ الف). از طرفی، مقادیر فاکتور تجمع زیستی این عنصر در همه تیمارهای آزمایشی بزرگ تر از ۱ و بیشینه آن برابر با ۲/۵۸ مربوط به تیمار ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده به خاک واجد عامل شلات کننده EDTA بود (نمودار ۱ ب). همچنین، مقادیر فاکتور انتقال عنصر کروم در گونه گل جعفری در تیمارهای واجد عامل شلات کننده اسید سالیسیلیک بزرگ تر از ۱ و بیشینه آن با ۱/۲۷ مربوط به تیمار ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده به خاک واجد اسید سالیسیلیک بود. از طرفی، بیشینه فاکتور تجمع زیستی این عنصر برابر با ۲/۷۸ مربوط به تیمار کروم ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده به خاک واجد عامل شلات کننده EDTA بود (نمودار ۱ ج و د).

جدول ۲. میانگین غلظت تجمع یافته عنصر کروم* در نمونه های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره گونه های مورد مطالعه بر حسب میلی گرم در کیلو گرم به تفکیک نمونه شاهد و تیمارهای آزمایشی

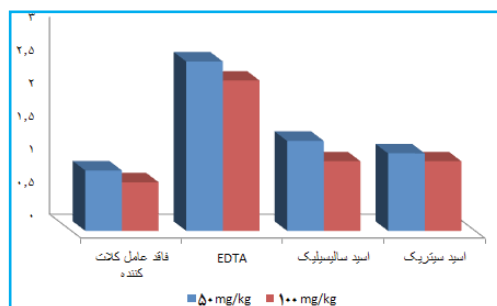
محیط یا اندام	غلظت نمک دی کرومات پتاسیم افزوده به خاک (میلی گرم در کیلو گرم)	شاهد	EDTA	اسید سالیسیلیک	اسید سیتریک
تیمارهای زیر کشت گونه تاج خروس					
خاک	۵۰	۱b/۶۲*	۱c/۸۳	۱c/۸۳	۱a/۴۳
	۱۰۰	۲b/۲۱	۲c/۲۶	۲d/۴۰	۱a/۱۵
ریشه	۵۰	۱a/۴۹	۴d/۷۳	۲c/۵۱	۱b/۶۹
	۱۰۰	۱b/۶۳	۵d/۱۸	۲c/۵۴	۱a/۲۲
شاخساره	۵۰	۰a/۱۳۰	۰d/۹۷۰	۰b/۱۶۰	۰c/۷۶۰
	۱۰۰	۰a/۱۷۰	۱d/۸۶	۰b/۲۲۰	۱c/۳۲
تیمارهای زیر کشت گونه گل جعفری					
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.

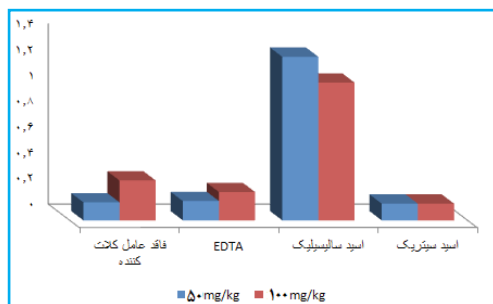
** حروف غیر مشترک (c, b, a و ...) در هر ردیف، بیان گر وجود تفاوت آماری معنی دار میانگین غلظت عنصر کروم بین تیمارهای فاقد یا واجد عوامل شلات کننده مختلف در نمونه های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره رشد یافته گونه های تاج خروس و گل جعفری بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس یک طرفه است ($p < 0.05$).



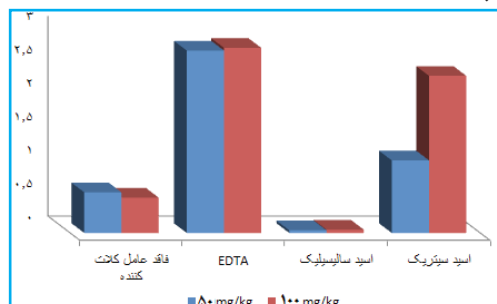
الف



ب



ج



د

نمودار ۱. الف) مقادیر فاکتور انتقال و (ب) فاکتور تجمع زیستی عنصر کروم در گونه تاج خروس؛ (ج) مقادیر فاکتور انتقال و (د) فاکتور تجمع زیستی عنصر کروم در گونه گل جعفری

بر اساس نتایج، بیشینه میانگین غلظت تجمع یافته عنصر مس در نمونه های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره هر دو گونه مورد مطالعه، در همه موارد به تیمارهای خاک واجد ۴Z۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده تعلق داشت. از طرفی، بیشینه میانگین غلظت مس در نمونه های خاک زیر کشت و همچنین ریشه و شاخساره گیاه تاج خروس با ۶/۷۴، ۳/۷۷ و ۳/۳۴ به ترتیب به تیمارهای اسید سالیسیلیک، اسید سالیسیلیک و EDTA مربوط بود (جدول ۳). به علاوه، بیشینه میانگین غلظت مس در نمونه های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره رشد یافته گونه گل جعفری نیز با ۶/۶۵، ۳/۴۵ و ۹/۵۰ به ترتیب در تیمارهای اسید سالیسیلیک، EDTA و EDTA مشاهده شد (جدول ۳).

نتایج گروه بندی آماری تیمارهای آزمایشی مربوط به گونه تاج خروس از حیث میانگین محتوی مس تجمع یافته در نمونه های خاک، ریشه و شاخساره نشان داد که برای نمونه های

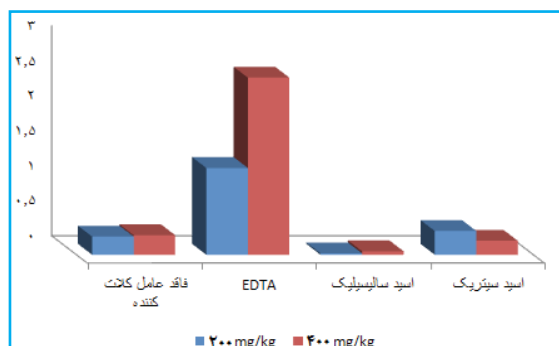
خاک زیر کشت واجد ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده و همچنین نمونه های ریشه و شاخساره، بین همه تیمارها در سطح معنی داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی دار وجود داشت (جدول ۳)، در حالی که، برای گونه گل جعفری، در نمونه های خاک زیر کشت واجد ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس بین همه تیمارهای آزمایشی از نظر میانگین مقادیر تجمع یافته مس اختلاف آماری معنی دار در سطح معنی داری ۰/۰۵ مشاهده شد. علاوه بر این، در نمونه های ریشه رشد یافته در هر دو نمونه های خاک واجد ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس و همچنین شاخساره رشد یافته در نمونه خاک واجد ۴۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس، از حیث میانگین مقادیر تجمع یافته مس بین تیمارهای اسید اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک در سطح معنی داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی دار وجود نداشت (جدول ۳).

جدول ۳. میانگین غلظت تجمع یافته عنصر مس* در نمونه های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره گونه های مورد مطالعه برحسب میلی گرم در کیلوگرم به تفکیک نمونه شاهد و تیمارهای آزمایشی

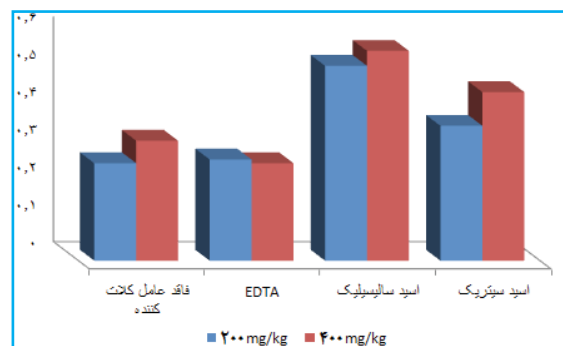
محیط یا اندام	غلظت نمک سولفات مس افزوده به خاک (میلی گرم در کیلوگرم)	تیمار		
		شاهد	EDTA	اسید سالیسیلیک اسید سیتریک
تیمارهای زیر کشت گونه تاج خروس				
خاک	۲۰۰	۳c/۹۳**	۲a/۴۸	۴d/۰۱
	۴۰۰	۶b/۵۱	۵a/۰۰	۶d/۷۴
ریشه	۲۰۰	۱b/۰۴	۰a/۶۷۰	۲d/۰۸
	۴۰۰	۲b/۳۸	۱a/۳۲	۳c/۷۷
شاخساره	۲۰۰	۰b/۲۷۰	۰d/۸۳۰	۰a/۰۹۰
	۴۰۰	۰b/۶۰۰	۳c/۳۴	۰a/۲۰۰
تیمارهای زیر کشت گونه گل جعفری				
خاک	۲۰۰	۳b/۱۵	۲a/۹۹	۴d/۲۶
	۴۰۰	۵b/۲۹	۴a/۵۸	۶d/۶۵
ریشه	۲۰۰	۱b/۲۲	۱c/۵۰	۰a/۱۵۰
	۴۰۰	۲b/۹۴	۳c/۴۵	۰a/۸۳۰
شاخساره	۲۰۰	۰a/۱۷۰	۳d/۲۶	۰b/۲۱۰
	۴۰۰	۰a/۱۷۰	۹b/۵۰	۰a/۴۴۰

* اعداد مربوط به میانگین غلظت ۳ تکرار است.

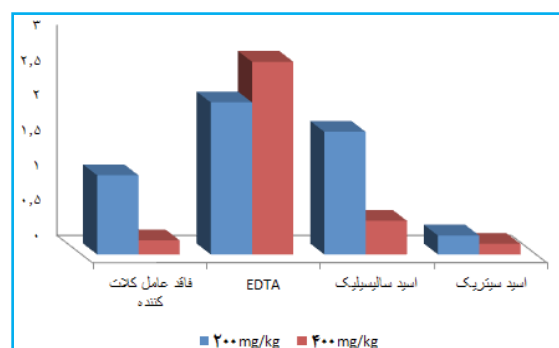
** حروف غیر مشترک (a, b, c, ...) در هر ردیف، بیانگر وجود تفاوت آماری معنی دار میانگین غلظت عنصر مس بین تیمارهای فاقد یا واجد عوامل شلات کننده مختلف در نمونه های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره رشد یافته گونه های تاج خروس و گل جعفری بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس یک طرفه است ($P < 0/05$).



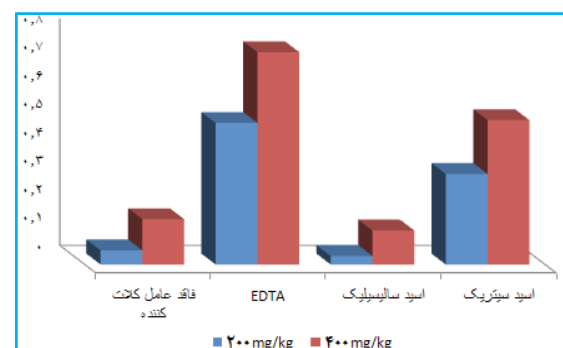
الف



ب



ج



د

نمودار ۲. الف) مقادیر فاکتور انتقال و (ب) فاکتور تجمع زیستی عنصر مس در گونه تاج خروس؛ (ج) مقادیر فاکتور انتقال و (د) فاکتور تجمع زیستی عنصر مس در گونه گل جعفری

دی کرومات پتاسیم افزوده، برابر با $1/0.8$ مربوط به تیمار اسید سیتریک بود (نمودار ۱ الف)). از طرفی، مقادیر فاکتور تجمع زیستی این عنصر در همه تیمارهای آزمایشی بزرگتر از ۱ و بیشینه آن مربوط به گیاهان کشت شده در خاک حاوی ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده، با $2/58$ و $2/29$ هر دو مربوط به تیمار واجد شلات EDTA بود (نمودار ۱ ب)). همچنین، مقدار فاکتور تجمع زیستی در گیاه کشت شده در خاک حاوی ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده، برای تیمار واجد شلات اسید سالیسیلیک برابر با $1/37$ بود (نمودار ۱ ب)). از این رو، گونه تاج خروس کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده در حضور عامل شلات کننده اسید سیتریک فراتر از شلاتگر عنصر کروم محسوب می شود. در تأیید نتایج حاصل، سینها و همکاران (۵۵)، کیو و همکاران (۳۳)، کو و همکاران (۳۸)، ابراهیمی (۳۲) و فو

از طرفی، بیشینه مقدار فاکتور انتقال عنصر مس در گونه تاج خروس برابر با $2/53$ مربوط به تیمار ۴۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده به خاک واجد شلات EDTA بود (نمودار ۲ الف)). در حالی که، مقادیر فاکتور تجمع زیستی این عنصر در همه موارد، کوچکتر از ۱ بود (نمودار ۲ ب)). همچنین، بیشینه مقدار فاکتور انتقال عنصر مس با $2/75$ در گونه گل جعفری رشد یافته در تیمار ۴۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده به خاک واجد عامل شلات کننده EDTA مشاهده شد (نمودار ۲ ج)). علاوه بر این، مقادیر فاکتور تجمع زیستی 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 تاج خروس کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم

و همکاران (۲۸)، نسبت به کارآمدی عوامل شلات کننده اسید سیتریک و EDTA در جذب عنصر کروم از خاک‌های آلوده و ارتقای انباشت آن به ترتیب در شاخساره‌ها و ریشه‌ها، اذعان داشتند. همچنین، کاهش مقادیر BCF در گیاه کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده در مقایسه با خاک حاوی ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده در تیمار واجد شلات EDTA را احتمالاً می‌توان به جذب بیش‌تر عنصر کروم در حضور این عامل شلات کننده 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 میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات 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 میلی گرم در کیلوگرم دی کرومات پتاسیم افزوده بود (نمودار ۱ د)). از این‌رو، گونه گل‌جعفری را نمی‌توان در حضور عوامل شلات کننده اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک، فرا انباشتگر مناسبی برای عنصر کروم محسوب کرد، این در حالی است که، نتایج پژوهش سینهل 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 شلات کننده زیست تجزیه‌پذیر اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک در زمینه جذب عنصر کروم از خاک‌های آلوده و انباشت آن به ترتیب 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 میلی گرم 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 به ترتیب به گیاهان کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ و ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده واجد شلات اسید سالیسیلیک مربوط بود (نمودار ۲ ب)). از این‌رو، گونه تاج‌خروس را می‌توان در حضور EDTA به عنوان گونه استخراج کننده عنصر مس محسوب کرد. در بررسی ادبیات پژوهش، نتایج پژوهش‌های سینهل 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 شلات کننده EDTA در افزایش فاکتور انتقال گونه‌های واجد قابلیت گیاه‌پالایی عنصر مس بود، در حالی که، به‌طور معمول در تیمارهای واجد سایر عوامل شلات کننده، 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^۱ هستند و نه فرا انباشتگر آن^۲ (۶۸).

در این پژوهش مقادیر فاکتور انتقال عنصر مس در گونه گل‌جعفری کشت شده در خاک حاوی ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده در تیمارهای آزمایشی EDTA و اسید سالیسیلیک و همچنین در نمونه‌های کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی گرم 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 به ترتیب به نمونه‌های

1. Cu-Excluder

2. Cu-Accumulator

یک ترکیب فنولی شبه هورمونی، به طور چشم گیر پاسخ های متابولیکی از جمله میزان تولید کلروفیل و نرخ رشد ریشه ها و شاخساره های گل جعفری را افزایش داده و در شرایط تنش ناشی از رشد در خاک های آلوده به مس، به کاهش سمیت این عنصر از طریق افزایش انحلال آن در محلول خاک و ارتقای انباشت آن در اندام های گیاه منجر می شود (۳۹). کیو و همکاران نیز با بررسی گیاه پالایی گیاه یونجه در حضور اسید سیتریک عنوان داشتند که جزء محلول فلزات سنگین در خاک و مقادیر فاکتور تجمع زیستی این گیاه افزایش و مقادیر فاکتور انتقال برای عناصر کروم و مس به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. این پژوهشگران یافته های مربوط به عنصر مس را با غیرمتحرک سازی و تثبیت این عنصر در جایگاه های تبادل کاتیونی دیواره یاخته های پاراننشیمی آوندهای چوبی ریشه و درون واکوئل های یاخته های ریشه مرتبط دانستند (۳۳). در پژوهش سینها و همکاران نیز استفاده از اسید سیتریک به عنوان عامل شلات کننده، منجر به افزایش انباشت فلز کروم در گونه *T. erecta* در مقایسه با تیمار شاهد شد؛ بدین صورت که، اسید سیتریک به طور معنی دار منجر به افزایش دسترسی و انتقال کروم به شاخساره های گیاه شد. از سوی دیگر این پژوهشگران گزارش کردند که EDTA با تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین در خاک و ایجاد سهولت دسترسی به آن ها، جذب و انتقال عناصر به بخش های هوایی گیاه را تسهیل می کند و افزودن مقادیر به نسبت بالای عوامل شلات کننده EDTA و اسید سیتریک به خاک (۳۰ میلی گرم در کیلوگرم)، علی رغم ایجاد کاهش معنی دار در رشد گل جعفری، قابلیت گیاه را در استخراج گیاهی آلاینده های فلزی خاک بهبود بخشیده است (۵۵).

اسید سیتریک، انحلال فلزات و جذب گیاهی آن ها را از طریق تشکیل کمپلکس های فلز- سیترات محلول افزایش می دهد. به عنوان مثال، مشاهده شده است که با کاربرد مخلوط سدیم هیدروژن فسفات و اسید سیتریک، مقادیر فاکتور تجمع زیستی یونجه و جزء محلول در اسید فلزات سنگین در خاک افزایش یافته است. به طور معمول فسفر می تواند انباشت زیتوده بیش تری را

کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده واجد شلات های EDTA و اسید سیتریک تعلق داشت (نمودار ۲ د). از این رو، گونه گل جعفری را نیز می توان در حضور عوامل شلات کننده EDTA و اسید سالیسیلیک، به عنوان گونه استخراج کننده عنصر مس محسوب کرد. در این خصوص، سینها 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 تجمع زیستی عنصر مس در گونه گل جعفری در حضور عامل شلات کننده اسید سیتریک افزوده به خاک را با غیرمتحرک سازی و تثبیت این عنصر در جایگاه های تبادل کاتیونی دیواره یاخته های پاراننشیمی آوندهای چوبی ریشه و درون واکوئل های یاخته های ریشه مرتبط دانستند. همچنین، با استناد به یافته های این پژوهشگران، مقادیر فاکتور انتقال بزرگ تر از ۱ در نمونه های کشت شده در خاک حاوی ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سولفات مس افزوده واجد EDTA را می توان با تشکیل کمپلکس EDTA- فلز و سهولت دسترسی، جذب و انتقال فلز به بخش های هوایی گونه گل جعفری مرتبط دانست. علاوه بر این، در پژوهشی گزارش شد که گونه گل جعفری از قابلیت قابل توجه انباشت عنصر مس به ویژه در حضور عامل شلات کننده EDTA برخوردار بوده است (۷۲). نتایج پژوهش چیتراپرابها و ساتیاواتی نیز نشان داد که گونه گل جعفری به واسطه انباشت مقادیر بالای عنصر کروم در رایزوباکتورها، از قابلیت انباشت بالای این عنصر در ریشه ها در مقایسه با بخش های هوایی خود برخوردار بوده است (۷۰). این در حالی است که، سومان و همکاران گزارش کردند که بیش تر گونه های مناسب گیاه پالایی مس از قابلیت بالایی در تثبیت و کاهش تحرک و دسترس پذیری زیستی این عنصر برخوردار هستند (۷۱). همچنین، نتایج پژوهش فو و همکاران نشان داد که افزودن مواد به ساز کننده ای همچون اسید سیتریک به خاک از طریق تحرک بخشی یا غیرمتحرک سازی کروم، بر کارایی گیاه پالایی تأثیر داشته است (۲۸). افروشه و همکاران نیز بیان داشتند که اسید سالیسیلیک به عنوان

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^۱ 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 به دلیل اشباع بافت‌های هوایی یا محدودیت‌های شیب یونی باشد. به عبارت دیگر، این روند می‌تواند به دلیل یکسان بودن شیب یونی خاک و گیاه باشد؛ به‌طوری‌که یون‌هایی که به سمت بخش‌های هوایی گیاه حرکت می‌کنند، سبب می‌شوند یون‌های جدیدی به سمت 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، به دلیل 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^۲ یا آمینی^۳ مس به افزایش انحلال این عنصر در خاک‌های آلوده منجر خواهد شد. بنابراین، استفاده از هرگونه مواد آلی در خاک‌های آلوده به دلیل 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 سمیت گیاهی فلزات 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 به دلیل کاهش کلروفیل و زیست‌توده به سبب تنزل میزان جذب آب در بافت‌های گیاهی در اثر سمیت ناشی از این فلزات باشد. انباشت کم‌تر فلزات سنگین در بافت‌های هوایی به دلیل نیاز گیاه به پیش‌گیری از اثرات سمیتی 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

2. Hydroxyl-organic Cu Complexes
3. Amine-Cu Complexes

1. Sequestration

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 تحرک بخشی 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؛ بدین صورت که ایجاد ساختار فلوکولیتی^۲، ظرفیت نگهداری فلزات را توسط ذرات رس کاهش و در نتیجه مسیر جریان انحلال و جذب توسط گیاه را افزایش می‌دهد. از این رو، 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 این رو، 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

(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 محللول این عنصر در گیاهان و انتقال مقادیر قابل ملاحظه‌ای از فلزات به بخش‌های هوایی^۱ قابل برداشت شد. از این رو، 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

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.

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

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 annuus* 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. *Ecotoxicology 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 halophila* 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 Engineering* 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 metal mobilization 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.