مجله مهندسی بهداشت محیط، تابستان ۱۳۹۹، سال ۷، شماره ٤ :٤٢٧-٤٤٢

کارآیی ترکیبات کلات‌کننده با نرخ تجزیه‌پذیری زیستی متفاوت در بهبود عملکرد گیاه‌پالایی خاک آلوده به کادمیوم توسط گونه‌های زینتی تاج‌خروس (*Amaranthus caudatus*) و گل جعفری (*Tagetes patula*)

نسترن عاقلان[۱]، سهیل سبحان اردکانی[۲*]، مهرداد چراغی[۲]، بهاره لرستانی[۲]، هاجر مریخ پور[۳]

[۱] دانشجوی دکترای تخصصی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

[۲] دکترای تخصصی علوم محیط‌زیست، دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

[۳] دکترای تخصصی علوم خاک، استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه سیدجمال الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۲/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۲۵

چکیده

زمینه و هدف: امروزه از آن‌جا که روند فزاینده آلودگی محیط‌زیست و بویژه خاک سلامت زیستمندان را تهدید می‌کند، انواع روش‌های پالایش خاک از جمله گیاه‌پالایی برای پالایش آلاینده‌های آلی، غیرآلی و هسته‌ای از محل‌های آلوده مورد توجه قرار گرفته‌اند. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی کارآیی عوامل کلات‌کننده زیست تجزیه‌پذیر در بهبود عملکرد گیاه‌پالایی خاک آلوده به کادمیوم توسط گونه‌های زینتی تاج‌خروس و گل جعفری در سال ۱۳۹۷ انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش توصیفی، پس از آلوده کردن خاک با ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم و تیمار آن با محلول‌های ۲/۵۰، ۲/۰۰ و ۲/۵۰ میلی‌مول در کیلوگرم EDTA، اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک بعنوان عامل کلات‌کننده، نسبت به کشت و آبیاری گیاهچه گیاهان در گلدان‌های حاوی خاک آلوده طی ٦٠ روز اقدام شد. پس از برداشت و هضم اسیدی نمونه‌های خاک تحت کشت، ریشه و شاخساره گیاهان از تیمارهای شاهد و آزمایشی، محتوی کادمیوم در آن‌ها توسط دستگاه طیف‌سنج نشری پلاسمای جفت‌شده القایی تعیین شد.

یافته‌ها: بیشینه میانگین غلظت کادمیوم در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره تاج‌خروس با ۱/۸۷، ٤/٥٠ و ۱/۸۹ به‌ترتیب مربوط به تیمارهای اسید سالیسیلیک، EDTA و اسید سالیسیلیک و در گل جعفری نیز با ۱/۸٦، ۱/۱۸ و ۳/۱۰ به‌ترتیب مربوط به تیمارهای فاقد کلات، اسید سیتریک و اسید سالیسیلیک بوده است. از طرفی بر اساس مقادیر فاکتورهای انتقال و انباشت زیستی نتیجه گرفته شد که گونه‌های تاج‌خروس و گل جعفری به‌ترتیب از قابلیت تثبیت و استخراج گیاهی برخوردار بودند.

نتیجه‌گیری: اسیدهای آلی همچون اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک از طریق سازوکارهایی مانند اثرات شبه هورمونی، آزادسازی و انحلال فسفات، افزایش تحرک کادمیوم و برخی فعالیت‌های آنزیمی، دگرگونی میکروساختاری و کاهش ظرفیت نگه‌داری فلزات توسط ذرات رس، نقش مهمی در الکتروکینتیک پالایش خاک دارند. لذا، با توجه به اثر مطلوب اسیدهای آلی بعنوان عوامل کلات-کننده در ارتقای کارایی گیاه‌پالایی گونه‌های فرا انباشتگر، استفاده از آن‌ها در فرآیند آلودگی‌زدایی خاک توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: تاج‌خروس، گل جعفری، کادمیوم، اصلاح محیط‌زیست، عوامل کلات‌کننده

*** نویسنده مسئول**: دکترای تخصصی علوم محیط‌زیست، دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران
ایمیل: s_sobhan@iauh.ac.ir -شماره تماس: ۰۸۱۳۴۴۸۱۶۶۳

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

مقدمه

امروزه خاک بعنوان بخش مهمی از زیست‌کره بدلیل رشد فزاینده شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی، معدنی و کشاورزی بطور عمده تحت تأثیر انواع آلاینده‌ها و بویژه فلزات سنگین، ترکیبات آلی دیرپا و سموم شیمیایی قرار گرفته و با افت کیفی مواجه شده است[۱-۳]. در این خصوص، آلودگی محیط‌زیست و بویژه خاک با فلزات سنگین بدلیل عدم تجزیه زیستی، پایداری و نیم‌عمر طولانی، سمیت و قابلیت انباشت و جایگزینی این عناصر در بدن با سایر عناصر ضروری، ضمن این‌که سلامت زیستمندان و محیط‌زیست را با خطر مواجه می‌کند، یک تهدید جدی برای ایمنی غذایی و بهداشت عمومی نیز محسوب شده[۴-۶] و پالایش آلودگی محیط به این عناصر از طریق سازوکارهای مدیریت درجا (In-situ) و دگرجا (Ex-situ) یعنی استفاده از روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی را ضروری کرده است[۷]. از این‌رو، پیش‌گیری از انباشت و انتقال زیستی و همچنین حذف فلزات سنگین در زنجیرهای غذایی توسط راهبردهای مؤثر، ارزان قیمت، سازگار و دوستدار محیط‌زیست همچون زیست‌پالایی (Bioremediation) و بویژه گیاه‌پالایی (Phytoremediation) توسط گیاهان فرا انباشتگر (Hyperaccumulator) که به حفظ ویژگی‌های طبیعی خاک و پایداری محیط‌زیست کمک می‌کند، بسیار مهم و حیاتی است[۴،۸،۹].

فن‌آوری گیاه‌پالایی شامل چهار گروه عمده یعنی گیاه استخراجی (Phytoextraction)، گیاه تبخیری (Phytovolatilization) و تصفیه ریشه‌ای (Rhizofiltration) به منظور جذب آلاینده‌ها و گیاه تثبیتی (Phytostabilization) برای غیرمتحرک‌سازی یا کاهش قابلیت جذب آلاینده‌های خاک بوسیله ریشه‌های گیاهان یا باکتری‌ها و قارچ‌های همزیست با آن‌ها است[۴]. در این میان، گیاه استخراجی مناسب‌ترین روش آلودگی‌زدایی درجا در زمینه پالایش خاک‌های آلوده به‌شمار می‌رود که گیاهان فرا انباشتگر مورد استفاده در آن باید قادر باشند دست‌کم ۱٪ از کل فلز موجود در خاک را در زیست‌توده هوایی قابل برداشت خود، انباشت کنند[۱۰،۱۱]. در این خصوص باید توجه داشت که جذب فلزات، انباشت و توزیع آن‌ها در گیاهان، معیارهای مهمی برای انتخاب یک گونه با تحمل و کارآیی عملکرد بالا در گیاه‌پالایی است. همچنین، توانایی انتقال بالا نیز یک ویژگی مهم برای گیاه است تا بعنوان فرا انباشتگر یا بیش‌اندوز فلزات سنگین شناخته شود[۱۲،۱۳].

تاکنون قابلیت فرا انباشتگری فلزات سنگین توسط حدود ۴۰۰ گونه گیاهی شناسایی شده است که بیش‌تر این گونه‌ها از آن‌جا که تحت تاثیر عوامل محدودکننده از جمله شرایط آب و هوایی، نرخ رشد آهسته و طولانی، سیستم ریشه‌ای سطحی و تولید به نسبت پایین زیست‌توده قرار داشته‌اند، از کارایی قابل توجه برای آلودگی‌زدایی خاک برخوردار نبوده‌اند. این در حالی است که استفاده از گیاهان زینتی بعنوان گونه‌های با ارزش از لحاظ اقتصادی و بوم‌شناختی؛ بدلیل 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 می‌تواند از مزیت‌های بسیاری برخوردار بوده و این گیاهان را از سایر گیاهان غیرزینتی فرا انباشتگر متمایز کند[۱۲-۱۷]. از بین گونه‌های زینتی، تاج‌خروس (*Amaranthus caudatus*) از خانواده Amaranthaceae تحمل بالایی نسبت به شوری و قالبیت قابل قبولی در جذب فلزات سنگین دارد. ارقام دارای رشد سریع این گونه، که جثه نسبتاً بزرگ و زیست‌توده بالایی نیز تولید می‌کنند، تا ارتفاع دو متر رشد کرده و به منظور استفاده در فرآیند گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مناسب هستند[۱۸]. مقادیر بالای فاکتورهای انباشت و انتقال از ساقه‌ها، برگ‌ها و گل‌آذین‌های گونه *A. caudatus* نشان داده است که این گیاه می‌تواند بعنوان یک گیاه فرا انباشتگر در جذب کادمیوم از خاک آلوده نواحی شهری مورد استفاده قرار

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

گیـرد[۱۳]. گونـه گـل جعفـری (*Tagetes patula*) از خـانواده Asteraceae نیز بر اساس نتایج پـژوهش‌هـا مـی‌توانـد ضـمن حفظ رشد طبیعی خود مقادیر قابل توجهی از فلـزات سـنگین همچون سرب، کادمیوم، کروم و سـایر عناصـر را در صـورت تیمار با مقادیر اضافی این فلزات در خود ذخیره کنـد[۱۲]. نتـایج پژوهش‌ها بیـان‌گـر آن اسـت کـه ایـن گیـاه زینتـی بـویژه در باطله‌های معدنی از توان بالایی برای گیاه‌پالایی خاک آلوده بـه کادمیوم برخوردار بوده است و در صورت همزیستی بـا قـارچ آربوسـکولار–میکـوریـزا (*Arbuscular mycorrhiza*)، بـدلیل انتقال بیش‌تر عناصری همچون فسفر، مقادیر بیش‌تـری از فلـز کادمیوم را می‌تواند در بخش ریشه‌ای خود تجمع دهد[۱۲،۱۷].

در فرآیند گیاه‌پالایی، اسـتفاده از ترکیبـاتی بـا نـام عوامـل کلات‌کننـده (Chelating Agents) همچـون EDTA، EDDS، اسـید آسـکوربیک، اسـید تانیـک، اسـید سالیسـیلیک، اسـید سیتریک، اسید مالیک و اسید هیومیک که قابلیت آلودگی‌زدایی خاک‌های آلوده توسط گیاهان را از طریق افزایش اسیدی‌سازی و انحلال‌پذیری عناصر و بـدنبال آن انباشـت فلـزات افـزایش مـی‌دهـد، بسـیار رایـج اسـت[۱۹]. در ایـن خصـوص، عوامـل کلات‌کننده بـا قابلیـت تجزیـه‌پـذیری زیسـتی در مقایسـه بـا ترکیبـات شـیمیایی و مصـنوعی، از مزایـایی همچـون اختصاص‌یافتگی بالا و سمیت پایین‌تر برخوردارند. باید توجه داشت که هرچند استفاده از عوامـل کـلات‌کننـده مصـنوعی و بویژه EDTA می‌تواند با افزایش نرخ جذب یا دسترس‌پـذیری فلزات سنگین در خاک، تولید زیست‌توده توسط گیاه را بطـور معنی‌داری کاهش داده و آثار سمیت برای گیاهان در پی داشته باشد و یا فلزات سنگین را از محیط خاک بطور موقت خـارج کرده و از طریق فرآیند آب‌شویی (روان‌شویی) به بخـش‌هـای دیگری از محیط‌زیسـت وارد کنـد و همچنـین بـه اخـتلال در فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی درون خاک نیز منجر می‌شـود، اما همچنان در مقایسه با سایر کلات‌کننده‌هـای شـیمیایی و یـا زیستی تجزیه‌پـذیر ماننـد EDDS، اسـید سالیسـیلیک و اسـید سیتریک، بعنوان مؤثرترین و پربازده‌ترین عامل افـزایش‌دهنـده نرخ انحلال فلزات سنگین در خاک محسوب مـی‌شـود[۸،۱۳،۲۳-۲۰].

تـاکنـون چنـدین مطالعـه در مـورد بررسـی گیـاه‌پـالایی خاک‌های آلوده به کادمیوم توسـط گیاهـان زینتـی در ایـران و سایر کشورها انجام شده است که از جمله می‌توان به پژوهش حیدری و همکـاران کـه بـا هـدف مطالعـه تـوان گیـاه‌پـالایی سرخارگل (*Vetiver* spp.) در خاک آلـوده بـه کـادمیوم انجـام شد[۲۴]، تحقیق شکری و همکاران که به منظور بررسـی قابلیـت گیاه‌پالایی خاک آلوده به کادمیوم توسـط گـل جعفـری زینتـی انجام شد[۱۷]، تحقیق کی که بـا هـدف بررسـی کـارایی جـذب کادمیوم توسط گونه *A. caudatus* بعنوان یک گیاه زینتی انجام شد[۱۳]، پـژوهش کـی و همکـاران کـه بـه منظـور بررسـی اثـر ترکیبات EDTA و اسید تانیک در گیاه‌پالایی خـاک آلـوده بـه کـادمیوم توسـط گونـه *Althaea rosea Cavan* انجـام شـد[۱۴]، پژوهش کو و همکاران که به منظور بررسی استخراج کـادمیوم از خاک آلوده توسط دو گونه *A. caudatus* و *A. viridis* انجام شد[۱۵]، تحقیق سینهال و همکاران که با هـدف بررسـی قابلیـت گیاه استخراجی کادمیوم در تیمارهـای واجـد EDTA و اسـید سیتریک توسط گونه *T. erecta* انجام شد[۲۵] و پـژوهش لیـو و همکاران که با هدف بررسـی انباشـت کـادمیوم توسـط گونـه ختمی (*Althaea rosea*) بعنوان یک فرا انباشتگر انجام شـد[۲۶]، اشاره کرد.

همان‌طور که اشاره شد گیـاه‌پـالایی بعنـوان یـک فنـاوری نویدبخش در زمینه پالایش آلـودگی خـاک بطـور روز افـزون مورد توجه اسـت. همچنـین بـر خـلاف دیگـر انـواع گیاهـان پالایشگر، گونه‌های زینتی علاوه بر کشت با هدف زیباسازی محیط، در سال‌های اخیر بعنوان عوامل پالایشگر نیز محسـوب می‌شوند. بطوری‌که برخی از گیاهان زینتی نه تنهـا مـی‌تواننـد بخوبی در خاک‌های آلوده رشد کنند، بلکه همچنـین قـادر بـه انباشت فلزات سنگین یا تجزیه آلاینده‌هـای آلـی نیـز هسـتند.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

گرچه تاکنون چندین مطالعه برای بررسی تأثیر عوامل کلات‌کننده با ساختار و ویژگی مشابه در گیاه‌پالایی خاک آلوده به کادمیوم توسط گونه‌های گیاهی زینتی انجام شده است، اما مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تاثیر عوامل کلات‌کننده با ساختار و ویژگی متفاوت (EDTA، اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک) در ارتقای قابلیت گیاه‌پالایی خاک آلوده به کادمیوم توسط گونه‌های زینتی تاج‌خروس و گل جعفری انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش توصیفی، نمونه‌های خاک غیرآلوده از زمین‌های بایر اطراف دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان که بمدت چندین سال زیرکشت نبوده‌اند، برداشت شد[۲۷]. بدین صورت‌که نمونه‌برداری بر اساس دستورالعمل وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا (USDA) به‌روش کاملاً تصادفی از خاک سطحی با عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری توسط بیلچه آلومینیومی انجام و نمونه‌های جمع‌آوری شده درون ظروف پلاستیکی مخصوص، به منظور تعیین برخی از پارامترهای فیزیکوشیمیایی و آلوده‌سازی مصنوعی (دستی) در اسرع وقت به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌های خاک بمدت سه روز در هوای آزاد خشک شده و سپس به منظور جداسازی اجسام خارجی، سنگ و سنگریزه از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند[۲۵،۲۶،۲۸]. پس از آن نسبت به تعیین پارامترهای pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت تبادل یونی، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل و همچنین غلظت کل عنصر کادمیوم در خاک اقدام شد[۲۹]. در مرحله بعد، ابتدا نمونه‌های خاک بصورت مصنوعی در دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم با نمک کلرید کادمیوم ($CdCl_2.2.5H_2O$) 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 بمدت ۱۴ روز در محیط استریل نگهداری شدند[۳۰]. در مرحله بعد، بذر گیاهان زینتی تاج‌خروس و گل جعفری 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 بمدت یک هفته در سینی‌های حاوی خاک آلوده آغشته به عوامل کلات کننده قرار داده شدند[۳۱،۳۲]. پس از طی این مدت، ۱۵ گیاهچه سالم از هر گیاه به گلدان‌هایی با ابعاد ۲۰×۱۵ سانتی‌متر حاوی سه کیلوگرم خاک منتقل و در شرایط دمایی ۲۱ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۰ تا ٪۴۰ نگهداری شدند[۲۵،۲۶،۳۳،۳۴]. همین مراحل برای کشت گیاهان در تیمارهای کنترل (شاهد) یعنی نمونه‌های خاک آلوده به کادمیوم و فاقد عوامل کلات‌کننده انجام شد[۲۵،۳۴]. تیمارهای شاهد و آزمایشی مورد ارزیابی در این مطالعه در جدول ۱ ارایه شده است. در نهایت و پس از طی ۶۰ روز از رشد گیاهان، نسبت به برداشت، شست‌وشو و هوا خشک کردن ریشه و اندام هوایی آن‌ها و انتقال نمونه‌های گیاهی و خاک توسط پاکت‌های کاغذی به آزمایشگاه اقدام شد[۳۴].

در این مطالعه، به منظور تعیین محتوی عنصر کادمیوم در خاک، نمونه‌های همگن شده را با اسید نیتریک غلیظ ٪۶۵، اسید کلریدریک ٪۶۵ و پراکسید هیدروژن ٪۳۰ همگی ساخت کارخانه مرک هضم کرده و سپس نسبت به عصاره‌گیری از نمونه‌ها اقدام شد. بدین صورت‌که ابتدا یک گرم از هر نمونه خاک با ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک در بشر ۱۲۵ میلی‌لیتری مخلوط شد. سپس محلول حاصل تا ۹۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد و پس از آن بمدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه عمل بازروانی (Reflax) انجام شد. پس از سرد شدن محلول، پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک ٪۶۵ به نمونه‌ها افزوده و برای مدت ۳۰ دقیقه عمل رفلکس انجام شد. این فرآیند، یعنی افزودن اسید نیتریک و انجام عمل رفلاکس بمدت ۳۰ دقیقه برای بار دیگر تکرار شد. سپس محلول داخل هر بشر تا رسیدن به حجم پنج

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

میلی‌لیتر حرارت داده شد. پس از سرد شدن نمونه‌ها، مقدار دو میلی‌لیتر آب مقطر و سه میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ٪۳۰ به نمونه‌ها افزوده شد. در مرحله بعد مخلوط‌ها تا زمان انجام واکنش با پراکسید هیدروژن و ته‌نشین شدن محتویات داخل هر بشر حرارت داده شد. پس از سرد شدن نمونه‌ها و افزودن پنج میلی‌لیتر اسید کلریدریک ٪۶۵ و ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر به هریک از آن‌ها، عمل رفلاکس بمدت ۱۵ دقیقه انجام و محتویات داخل هر بشر با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف شد[۳۵،۳۶]. در مرحله بعد، محلول در بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری با آب دوبار تقطیر به حجم رسانده شد. در نهایت پس از ساخت محلول استوک (مادر) و استاندارد نمک عنصر کادمیوم و کالیبره کردن دستگاه طیف‌سنج نشری پلاسمای جفت‌شده القایی (نشر اتمی) Varian مدل ES– 710، محتوی عنصر کادمیوم در نمونه‌های خاک در سه تکرار خوانده شد[۳۷].

بر اساس نتایج اندازه‌گیری سایر ویژگی‌ها، خاک مورد مطالعه دارای بافتی متوسط (لومی)، pH در محدوده ۶/۷–۶/۵، دارای ماده آلی کم، غیر شور و غلظت کل عنصر کادمیوم برابر با ۲۰ میکروگرم در کیلوگرم بود.

از طرفی به منظور تعیین محتوی کادمیوم در اندام‌های گیاهی شامل ریشه و شاخساره، نمونه‌ها ابتدا توسط آب شرب و سپس آب دوبار تقطیر با هدف جداسازی ذرات خاک، شسته شدند. سپس نمونه‌های گیاهی بمدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون از خشک شده و وزن خشک آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم تعیین شد. به منظور عصاره‌گیری گیاهان به‌روش هضم تر، به یک گرم پودر خشک آسیاب شده مربوط به هر بخش از گیاه، بطور مجزا، ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک ٪۶۵ افزوده شد. نمونه‌ها بمدت دو ساعت در حمام آب گرم با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و سپس، ۲/۶ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ٪۲۰ به آن‌ها افزوده شد. بعد از سرد شدن محلول حاوی عصاره نمونه‌ها و عبور آن‌ها از کاغذ صافی واتمن ۴۲، محلول با آب دوبار تقطیر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد و تا زمان تعیین غلظت کادمیوم در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شد. در نهایت پس از ساخت محلول مادر و استاندارد نمک عنصر کادمیوم و کالیبره کردن دستگاه نشر اتمی، محتوی فلز کادمیوم در نمونه‌های گیاهی در سه تکرار خوانده شد[۸،۳۴،۳۶،۳۸]. در نهایت با هدف بررسی کارایی فرآیند گیاه‌پالایی گیاهان زینتی و ارزیابی تاثیر عوامل کلات‌کننده با نرخ‌های تجزیه‌پذیری متفاوت در ارتقای این فرآیند، نسبت به محاسبه شاخص‌های انباشت و انتقال عنصر کادمیوم به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ اقدام شد[۴۰،۸،۳۹].

فاکتور انباشت یا تجمع زیستی (Bioconcentration Factor) بیان‌گر کمیتی است که از نسبت محتوی فلز در ریشه‌های یک گیاه به غلظت همان فلز در خاک برآورد می‌شود (رابطه ۱).

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

در رابطه ۱: BCF بیان‌گر فاکتور انباشت زیستی و C_{Tissue} و C_{Medium} نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده محتوی فلز سنگین در بافت گیاهی (شاخه یا ریشه)؛ و محتوی فلز سنگین در خاک، برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند.

فاکتور انتقال یا ترابری (Translocation Factor) بیان‌گر کمیتی است که از نسبت محتوی یک فلز در اندام هوایی (شاخساره‌ها) به محتوی همان فلز در ریشه‌ها برآورد می‌شود و توانایی گیاه در رساندن هر عنصر به اندام‌های هوایی را نشان می‌دهد (رابطه ۲).

$$TF = C_{Shoot}/C_{Root} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه ۲: TF بیان‌گر فاکتور انتقال، و C_{Shoot} و C_{Root} نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده محتوی فلز سنگین در اندام هوایی و ریشه برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند.

باید توجه داشت که مقادیر $TF > ۱$ و $BCF < ۱$ کارآمدی گیاه در انتقال فلزات از ریشه‌ها به شاخساره‌ها (گیاه استخراجی) را نشان می‌دهد و گیاه به احتمال زیاد، سازو

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

کارهای تحمل را برای روبه‌رو شدن با غلظت‌های بالای فلزات سنگین دارا خواهد بود؛ مقادیر ۱ < TF و ۱ < BCF بیان‌گر قابلیت گیاه به منظور استفاده در فرآیند گیاه استخراجی است. از طرفی مقادیر ۱ > TF و ۱ > BCF بیان‌گر قابلیت گیاه به منظور استفاده در فرآیند گیاه تثبیتی است. همچنین ۱ > TF و ۱ > BCF نشان‌دهنده آن است که غلظت‌های کم‌تری از فلز در گیاه نسبت به خاک وجود دارد و بر پایین بودن درجه جذب فلزات توسط گیاه دلالت دارد[۱۶].

در این مطالعه، به منظور پردازش آماری نتایج از ویرایش ۱۹ نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. به این‌صورت که برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogrov- Smirnov) و به منظور مقایسه بین نمونه‌های خاک واجد عوامل کلات‌کننده EDTA، اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک در تیمارهای فاقد و واجد کشت و همچنین مقایسه بین نمونه‌های ریشه و شاخساره برداشت شده از تیمارهای مختلف از حیث محتوی باقی‌مانده عنصر کادمیوم از آزمون آماری تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) و بدنبال آن آزمون چند دامنه‌ای دانکن (Duncan Multiple Rnge Test) استفاده شد.

یافته‌ها

آمار توصیفی مربوط به میانگین غلظت عنصر کادمیوم در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره گونه‌های تاج خروس و گل جعفری و همچنین مقادیر فاکتورهای انتقال و انباشت به‌ترتیب در جدول ۲ و نمودارهای ۱ و ۲ ارایه شده است.

نتایج نشان داد که بیشینه میانگین غلظت تجمع‌یافته عنصر کادمیوم در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره رشدیافته گونه‌های مورد بررسی، در همه موارد به تیمارهای خاک واجد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده تعلق داشت.

جدول ۱: تیمارهای آزمایشی و شاهد* مورد ارزیابی

تیمار	غلظت نمک کلرید کادمیوم افزوده به خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم)	گونه مورد مطالعه	غلظت عامل کلات کننده افزوده به خاک (میلی مول در کیلوگرم)		
			EDTA	اسید سالیسیلیک	اسید سیتریک
شاهد	۵۰	تاج خروس	–	–	–
	۱۰۰	و	–	–	–
EDTA	۵۰	گل جعفری	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰
	۱۰۰		۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰
اسید سالیسیلیک	۵۰		۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰
	۱۰۰		۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰
اسید سیتریک	۵۰		۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰
	۱۰۰		۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰

* تعداد کل تیمارها برای گونه‌های تاج خروس و گل جعفری ۱۶ عدد و شامل چهار تیمار شاهد، چهار تیمار واجد EDTA، چهار تیمار واجد اسید سالیسیلیک و چهار تیمار واجد اسید سیتریک است.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

از طرفی، بیشینه میانگین غلظت کادمیوم در نمونه‌های خاک زیر کشت و همچنین ریشه و شاخساره گیاه تاج‌خروس با ۱/۸۷±۰/۰۱، ٤/٥٠±۰/۰٦ و ۱/۸۹±۰/۰۱ به‌ترتیب مربوط به تیمارهای اسید سالیسیلیک، EDTA و اسید سالیسیلیک بوده است (جدول ۲). همچنین، بیشینه میانگین غلظت کادمیوم در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره رشدیافته گونه گل جعفری نیز با ۱/۸٦±۰/۰۲، ۱/۱۸±۰/۰٤ و ۳/۱۰±۰/۰۵ به‌ترتیب مربوط به تیمارهای فاقد کلات، اسید سیتریک و اسید سالیسیلیک بوده است (جدول ۲).

نتایج گروه‌بندی آماری تیمارهای فاقد کلات و واجد عوامل کلات‌کننده مختلف در نمونه‌های ریشه، شاخساره و خاک زیر کشت گونه تاج‌خروس در تیمارهای خاک واجد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده نشان داد که در نمونه‌های خاک بین کلات EDTA (واجد کمینه غلظت فلز) با سایر تیمارها، در نمونه‌های ریشه رشدیافته در این تیمارها کلات اسید سالیسیلیک (واجد بیشینه غلظت فلز) با سایر تیمارها و در نمونه‌های شاخساره بین همه عوامل کلات‌کننده در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف معنی‌دار آماری وجود داشته است که البته در بین این نمونه‌ها نیز تیمار واجد کلات اسید سالیسیلیک واجد بیشینه غلظت فلز بوده است (جدول ۲). از طرفی در تیمارهای خاک واجد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده نیز نتایج گروه‌بندی آماری نشان داد که در ریشه رشدیافته در این تیمارها بین کلات EDTA (واجد بیشینه غلظت فلز) با سایر تیمارها و در نمونه‌های خاک و شاخساره بین همه عوامل کلات‌کننده در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف معنی‌دار آماری وجود داشته است که البته در بین این نمونه‌ها، تیمار واجد کلات اسید سالیسیلیک واجد بیشینه غلظت فلز بوده است (جدول ۲).

نتایج گروه‌بندی آماری تیمارهای فاقد کلات و واجد عوامل کلات‌کننده مختلف در نمونه‌های ریشه، شاخساره و خاک زیر کشت گونه گل جعفری در تیمارهای خاک واجد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده نشان داد که در نمونه‌های خاک بین تیمار فاقد کلات و واجد اسید سیتریک (با کمینه غلظت فلز) با سایر تیمارها، در نمونه‌های ریشه رشدیافته در این تیمارها کلات‌های اسید سیتریک (واجد بیشینه غلظت فلز) و اسید سالیسیلیک با سایر تیمارها و در نمونه‌های شاخساره بین تیمار واجد کلات اسید سیتریک (با بیشینه غلظت فلز) با سایر تیمارها در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف معنی‌دار آماری وجود داشته است (جدول ۲). همچنین در تیمارهای خاک واجد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده نیز نتایج گروه‌بندی آماری نشان داد که در ریشه رشد یافته در این تیمارها بین کلات اسید سیتریک (واجد بیشینه غلظت فلز) با سایر تیمارها و در نمونه‌های خاک و شاخساره بین همه عوامل کلات‌کننده در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف معنی‌دار آماری وجود داشته است که البته تیمار واجد کلات اسید سیتریک به‌ترتیب در نمونه‌های خاک و شاخساره واجد کمینه و بیشینه غلظت فلز بوده است (جدول ۲).

بیشینه مقدار فاکتور انتقال عنصر کادمیوم در گونه تاج‌خروس مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده به خاک واجد کلات اسید سالیسیلیک بود. از طرفی مقادیر فاکتور انباشت زیستی این عنصر در همه موارد، بزرگ‌تر از یک و بیشینه آن مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده به خاک واجد کلات EDTA بوده است (نمودار ۱الف و ب). همچنین، مقادیر فاکتور انتقال عنصر کادمیوم در گونه گل جعفری در همه تیمارها بزرگ‌تر از یک و بیشینه آن به‌ترتیب مربوط به تیمارهای ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده به خاک واجد عوامل کلات‌کننده EDTA و اسید سالیسیلیک بوده است. از طرفی مقادیر فاکتور انباشت زیستی این عنصر در تیمارهای واجد کلات اسید سیتریک بزرگ‌تر از یک بوده است (نمودار ۲الف و ب).

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

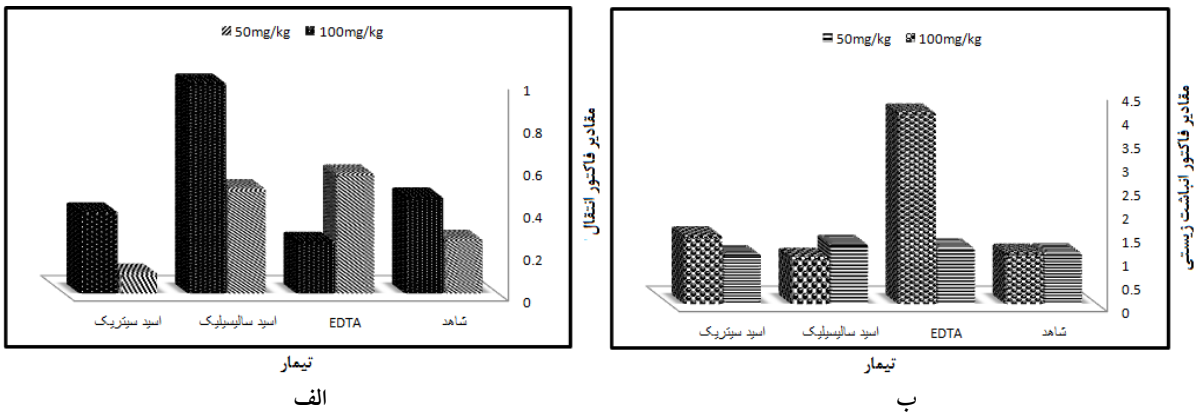
[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

جدول ۲: میانگین غلظت تجمع‌یافته عنصر کادمیوم* در نمونه‌های خاک زیر کشت، ریشه و شاخساره گونه‌های مورد مطالعه بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم به‌تفکیک تیمارهای فاقد یا واجد عوامل کلات‌کننده مختلف

محیط یا اندام	غلظت نمک کلرید کادمیوم افزوده به خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم)	تیمار			
		شاهد	EDTA	اسید سالیسیلیک	اسید سیتریک
تیمارهای زیر کشت گونه تاج‌خروس					
خاک	۵۰	۰/۹۱۰^{b**}	۰/۶۸۰^{a}	۰/۹۱۰^{b}	۰/۹۱۰^{b}
	۱۰۰	۱/۶۴^{b}	۱/۱۰^{a}	۱/۸۷^{d}	۱/۷۵^{c}
ریشه	۵۰	۱/۰۱^{b}	۰/۸۵۰^{a}	۱/۱۷^{c}	۰/۹۱۰^{a}
	۱۰۰	۱/۸۱^{a}	۴/۵۰^{c}	۱/۸۸^{a}	۲/۵۷^{b}
شاخساره	۵۰	۰/۲۶۰^{b}	۰/۴۷۰^{c}	۰/۵۹۰^{d}	۰/۱۰۰^{a}
	۱۰۰	۰/۸۴۰^{a}	۱/۱۳^{c}	۱/۸۹^{d}	۰/۹۹۰^{b}
تیمارهای زیر کشت گونه گل جعفری					
خاک	۵۰	۰/۹۱۰^{c}	۰/۶۲۰^{a}	۰/۸۲۰^{b}	۰/۶۵۰^{a}
	۱۰۰	۱/۸۶^{d}	۱/۵۱^{b}	۱/۷۶^{c}	۱/۱۵^{a}
ریشه	۵۰	۰/۰۸۰^{a}	۰/۱۰۰^{a}	۰/۲۹۰^{b}	۰/۶۸۰^{c}
	۱۰۰	۰/۳۸۰^{a}	۰/۴۱۰^{a}	۰/۴۶۰^{a}	۱/۱۸^{b}
شاخساره	۵۰	۰/۲۳۰^{a}	۱/۰۱^{b}	۲/۱۲^{c}	۱/۰۲^{b}
	۱۰۰	۱/۱۸^{a}	۱/۵۶^{b}	۳/۱۰^{d}	۱/۹۰^{c}

* اعداد مربوط به میانگین غلظت ۳ تکرار است.

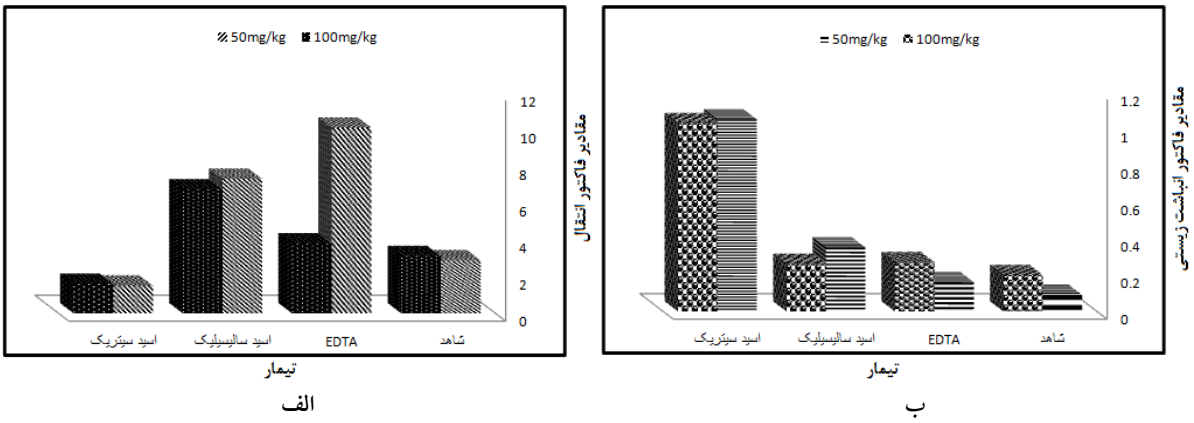
** حروف غیر مشترک (a، b، c و ...) در هر ردیف، بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار آماری میانگین غلظت عنصر کادمیوم بین تیمارهای فاقد یا واجد عوامل کلات‌کننده مختلف در نمونه‌های خاک زیرکشت، ریشه و شاخساره رشدیافته گونه‌های تاج‌خروس و گل جعفری بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس یک طرفه است ($p < ۰/۰۵$).



نمودار ۱: مقادیر فاکتورهای انتقال (الف) و انباشت زیستی (ب) عنصر کادمیوم درگونه تاج‌خروس

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]



نمودار ۲: مقادیر فاکتورهای انتقال (الف) و انباشت زیستی (ب) عنصر کادمیوم درگونه گل جعفری

بحث

برخی روش‌های پالایش خاک مانند شستشوی خاک اثرات نامطلوبی بر فعالیت زیستی، ساختار و بافت خاک و حاصلخیزی آن گذاشته و هزینه‌های بالایی دارد؛ در نتیجه، گیاه‌پالایی بعنوان یک فناوری کم‌هزینه درجا با قابلیت آلودگی‌زدایی موضعی، حفظ فعالیت زیستی و بافت فیزیکی خاک و امکان بازیابی زیستی (Bio- recovery) فلزات مورد توجه است[۱۲،۱۵]. به منظور گیاه استخراجی مؤثر و کارآمد، باید گیاهان قادر به رشد در خاک‌های آلوده باشند، لذا با هدف افزایش کارآیی این فناوری، عوامل کلات‌کننده و اسیدهای آلی همچون EDTA، EDDS، اسید سالیسیلیک، اسید سیتریک و ... را به منظور ارتقای نرخ جذب فلزات سنگین توسط گیاهان می‌توان به خاک افزود. عوامل کلات‌کننده می‌توانند با کاهش pH خاک در افزایش انحلال‌پذیری فلزات در خاک اثر مناسبی داشته باشند. اگرچه EDTA، برای استخراج فلزات از بافت‌های گیاهی کارآمد است؛ اما دوز بهینه آن به منظور تثبیت مناسب گیاهی باید قبل از کاربرد این تکنیک برای هر نوع فلز سنگین مورد بررسی قرار گیرد؛ زیرا افزایش مقدار این کلات‌کننده ممکن است بر افزایش جذب این فلزات اثر معنی‌داری نداشته و حتی میزان آب‌شویی و آلودگی ثانویه آب‌های زیرزمینی را افزایش دهد[۴۰]. لازم بذکر است که بازده استخراج فلزات سنگین به چندین عامل از جمله ویژگی‌های ماتریکس (ساختار سوبسترا، ترکیب شیمیایی، بافت، اندازه ذرات و ...)، ویژگی‌های فلزات، خصوصیات کلات‌کننده (غلظت، قدرت پیوند، انحلال و ...) و شرایط فرآیند (دما، pH، مدت زمان استخراج و ...) بستگی دارد. در بین این عوامل، pH مهم‌ترین پارامتری است که در زیست فراهمی و انتقال فلزات سنگین نقش دارد[۴۱]. در این خصوص باید توجه داشت که مواد معدنی رس، ساختار میکروسکوپی و ماهیت یون‌های قابل جایگزینی آن بر ویژگی‌های جذب سطحی آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین تأثیرگذار است. قرار می‌گیرد[۴۲].

نتایج نشان داد که بیشینه مقدار فاکتور انتقال عنصر کادمیوم در گونه تاج‌خروس، مربوط به تیمار واجد کلات اسید سالیسیلیک واجد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده و برابر با ۱/۰۰ بود (نمودار ۱الف). از طرفی، مقادیر فاکتور انباشت این عنصر در همه تیمارهای زیرکشت این گونه بزرگ‌تر از یک و بیشینه آن در تیمار واجد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده مربوط به تیمار واجد کلات EDTA و برابر با ٤/۰۹ بود (نمودار ۱ب). همچنین، در تیمار واجد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده مربوط به تیمار واجد کلات اسید سالیسیلیک و

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

برابر با ۱/۲۹ بود (نمودار ۱ب). از این‌رو، گونه تاج‌خروس را در تیمار واجد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده و در حضور کلات اسید سالیسیلیک با مقادیر فاکتورهای انتقال و انباشت بزرگ‌تر از یک، می‌توان فرا انباشتگر عنصر کادمیوم محسوب کرد. در این رابطه نتایج پژوهش‌های ژانگ و همکاران[۴۳]، نینگو و همکاران[۱۰]، کی و همکاران[۱۴]، Ko و همکاران[۱۵] و سابیر و همکاران[۲۱]، بیان‌گر کارآمدی گیاه تاج خروس در زمینه جذب عنصر کادمیوم از خاک‌های آلوده و انباشت آن شاخساره‌ها در حضور کلات-کننده‌های مختلف بود که با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت داشتند.

مقادیر فاکتور انتقال عنصر کادمیوم در گونه گل جعفری در همه موارد بزرگ‌تر از یک و بیشینه آن به‌ترتیب در تیمارهای واجد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده حاوی عوامل کلات‌کننده EDTA و اسید سالیسیلیک و در تیمارهای واجد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده حاوی عوامل کلات‌کننده اسید سالیسیلیک و EDTA بود (نمودار ۲الف). این در حالی است که مقادیر فاکتور انباشت عنصر کادمیوم در تیمارهای واجد کلات اسید سیتریک زیرکشت این گونه بزرگ‌تر از یک بود (نمودار ۲ب). از این‌رو، گونه گل جعفری را می‌توان در تیمارهای واجد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده در حضور کلات اسید سیتریک با مقادیر فاکتورهای انتقال و انباشت بزرگ‌تر از یک، فرا انباشتگر عنصر کادمیوم بشمار آورد. در این خصوص نتایج پژوهش گوش و مانکانداا[۳]، رونگ رنگ و بابل[۴۴]، کاتورودی و همکاران[۱۲] و سینهال و همکاران[۲۵]، بیان‌گر کارآمدی گیاه گل جعفری در زمینه جذب عنصر کادمیوم از خاک‌های آلوده و انباشت آن در شاخساره‌ها در حضور عوامل کلات‌کننده مختلف بود که با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت داشت.

در خصوص نتایج پژوهش‌های مشابه انجام یافته بر روی گونه تاج‌خروس می‌توان به نتایج پژوهش نینگو و همکاران (۲۰۱۶) که تاج‌خروس را بعنوان یک گیاه کارآمد با نرخ جذب قابل ملاحظه کادمیوم از خاک‌های آلوده معرفی و عنوان کردند که مقدار فاکتور انتقال کادمیوم نیز بیش‌تر از یک بوده است[۱۰]، اشاره کرد. همچنین نتایج پژوهش کی و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که افزودن کلات EDTA بطور معنی‌داری غلظت عنصر کادمیوم در گونه *A. caudatus* را در مقایسه با تیمار شاهد فاقد کلات در شرایط ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم افزوده به خاک، افزایش داده بود. از طرفی، کاربرد این عامل کلات‌کننده در افزایش انباشت کادمیوم در شاخساره‌های این گونه و در نتیجه گیاه استخراجی آن مؤثر بوده است. از طرفی این پژوهشگران گزارش کردند که مقادیر فاکتور انتقال بزرگ‌تر از یک برای گونه *A. caudatus*، بیان‌گر آن است که محتوی کادمیوم در سرشاخه‌ها همواره بیش‌تر از ریشه‌ها بوده و این گونه از قابلیت معرفی بعنوان یک انباشتگر برخوردار است[۱۴]. دستاورد پژوهش ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) بیان‌گر آن بود که محتوی عنصر کادمیوم در سرشاخه‌های تاج خروس قابل ملاحظه نبوده است؛ اما تولید زیست‌توده بالا توسط این گیاه و همچنین مقادیر فاکتور انتقال بزرگ‌تر از یک، نشان دهنده توانایی قابل توجه این گیاه در جذب کادمیوم است[۴۳]. همچنین، نتایج پژوهش کی (۲۰۱۶) نشان داد که مقادیر فاکتور انباشت محاسبه شده برای گونه *A. caudatus* در شرایط کاربرد EDTA همواره بزرگ‌تر از مقادیر آن برای تیمارهای فاقد کلات بوده است[۱۳]. نتایج پژوهش کو و همکاران (۲۰۱۴) که به منظور بررسی استخراج فلزات سنگین از خاک‌های آلوده توسط گونه تاج‌خروس انجام یافت نشان داد که هرچند محتوی تجمع‌یافته کادمیوم در خاک بطور معنی‌داری کاهش نیافته است، ولی این گیاه بخصوص در زمینه انباشت این عنصر از کارایی قابل قبول برخوردار بوده است[۱۵].

در خصوص نتایج پژوهش‌های مشابه انجام یافته بر روی

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

گونه گل جعفری می‌توان به نتایج پـژوهش‌گـوش و مانچانـدا (۲۰۱۹) که نشـان داد نـرخ انباشـت همـه عنصـر کـادمیوم در بـرگ‌هـا و سـاقه‌هـای گونـه *T. patula* در مقایسـه بـا سـایر گونه‌های مورد آزمایش از همه بیش‌تر بوده است، اشاره کرد[۳]. همچنین نتایج پژوهش رونـگ رنـگ و بابـل (۲۰۱٦) کـه بـه منظور بررسی قابلیت حذف کادمیوم از خاک‌های آلوده توسط گل جعفری انجام یافت، نشان داد که این گونه با توان بـالا در حذف کادمیوم می‌تواند به منظور گیاه‌پالایی مورد استفاده قـرار گیرد[٤٤]. نتایج پژوهش کاتورودی و همکاران (۲۰۱٤) نیز نشان داد که مقادیر کوچک‌تر از یک فاکتور انتقـال عنصـر کـادمیوم می‌تواند بیان‌گر انتقال محدود ایـن فلـز درون گیـاه و انباشـت بیش‌تر آن درون ریشه‌ها بعنوان یک راهبرد عمـومی تحمـل و سازگاری گیاه به منظـور مقابلـه در برابـر تـنش‌هـای محیطـی باشد[۱۲]. از طرفی نتایج پـژوهش سـینهال و همکـاران (۲۰۱۰) نشان داد که استفاده از اسید سیتریک بعنوان عامل کلات‌کننـده منجر به افزایش انباشت فلز کادمیوم در گونه *T. erecta* نسبت به تیمار شـاهد شـده اسـت. همچنـین، اسـید سـیتریک بطـور معنی‌داری دسترسی فلزات را در خاک و انباشـت آن‌هـا را در شاخساره‌های این گونه افزایش داده بـود؛ بطـوری‌کـه غلظـت کادمیوم در برگ‌ها و ساقه‌های این گونه بیش‌تر از ریشـه‌هـای آن و احتمالاً بدلیل ماهیت فـرا انباشـتگری آن بـوده اسـت. از دیگر سو این پژوهشگران گزارش کردند که استفاده از EDTA با تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین در خاک و ایجاد سهولت دسترسی به آن‌ها، جذب و انتقال عناصر به بخش‌هـای هـوایی گیاه را تسهیل می‌کند[۲۵].

تحرک اندک فلز کادمیوم، عامل محدودکننده‌ای در انتقـال آن از ریشه‌ها به شاخساره‌ها و نگه‌داری بـیش‌تـر ایـن فلـز در ریشه‌ها نسبت به شاخساره‌ها بعنوان یک راهبرد سمیت‌زدایـی در گیاهان است[۱۳]. از این‌رو، بیشینه تجمع عنصـر کـادمیوم در ریشه‌های گونه تاج‌خروس و نیز بیشینه مقادیر فاکتور انباشـت این عنصر در تیمار واجد ۵۰ میلـی‌گـرم در کیلـوگـرم کلریـد کادمیوم افزوده بـه خـاک زیـر کشـت ایـن گونـه در حضـور EDTA را می‌توان با این راهبردهای بازدارنده مرتبط دانسـت. البته در غلظت‌های بالاتر (۱۰۰ میلی‌گرم در کیلـوگـرم کلریـد کادمیوم افزوده به خاک)، کلات اسید سالیسـیلیک بـا افـزایش فاکتور انباشت این فلز و تجمع بیش‌تر آن در ریشه‌های گونـه تاج‌خروس، به فرا- انباشتگری این گونه در غلظت بـالا منجـر شده است. این موضوع را می‌توان با ویژگی‌های شبه‌هورمونی این اسید آلی[۱٦] و شتاب‌بخشی به ظرفیت‌های پالایش در خاک با افزایش غلظت آلاینده‌ها از طریق یـک سـری واکـنش‌هـای فیزیکی و شیمیایی مرتبط دانست[٤۵].

جداسازی فلزات سنگین در یاخته‌هـای ریشـه‌ای و انتقـال مؤثر آن‌ها به آوندهای چوبی، نقشی مهم و کلیدی در حرکـت و انتقال آن‌ها به بخش‌های هوایی دارد که بـا حضـور عوامـل کلات‌کننده به شیوه‌ای کارآمدتر صورت می‌گیرد. افـزودن EDTA بعنوان عامـل کـلات‌کننـده بـه خـاک سـبب افـزایش تدریجی میزان فاکتور انتقال این عنصر به سبب افـزایش سـهم کادمیوم محلول در گیاهان و انتقال مقادیر قابـل ملاحظـه‌ای از فلزات به بخـش‌هـای هـوایی (Aerial Parts) قابـل برداشـت می‌شود. از این‌رو، افزایش جذب فلزات سـنگین تحـت تـأثیر کاربرد EDTA می‌تواند بدلیل کـاهش pH ناشـی از آن باشـد. لذا، EDTA با افزایش EC و کاهش ملایم pH تا حدود اسـید ضعیف (pH = ٦/۸)، می‌تواند در افزایش جذب فلزات سنگین و همچنین محتوی عناصر در دسـترس تاثیرگـذار باشـد البتـه گـزارش‌هـایی نیـز از اثـرات منفـی EDTA بـر فعالیـت‌هـای میکروبی و آنزیمی در خاک ارایه شده است[٤٦].

عنصـر کـادمیوم در غلظـت‌هـای پـایین، بطـور عمـده در ریشه‌ها باقی می‌ماند؛ امـا، انتقـال آن بـه شاخسـاره‌هـا بعنـوان بخـش‌هـای بیرونـی (Epigenous) در غلظـت‌هـای بـیش‌تـر، معنی‌دار و به گران‌باری (Overloading) و سمیت این فلـز در ریشه‌ها مربوط می‌شود. نتایج پژوهش‌ها نشـان داده اسـت کـه افزایش مقادیر مورد استفاده EDTA، توان جـذب کـادمیوم را

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

بدلیل سمیت گیاهی و کاهش زیست‌توده، کاهش می‌دهد[۱۳،۳۰]. از این‌رو، کلات اسید سالیسیلیک در بهبود کارآیی گیاه استخراجی گونه تاج‌خروس بویژه در غلظت‌های بالای فلز کادمیوم افزوده به خاک، مؤثرتر عمل کرده است.

فاکتور انتقال کوچک‌تر از یک در تیمارهای واجد EDTA و اسید سیتریک حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده به خاک زیرکشت گونه تاج‌خروس (نمودار ۱الف)، نشان‌دهنده تجمع بیش‌تر این عنصر در ریشه‌ها نسبت به سرشاخه‌ها بود. این موضوع را می‌توان به اشباع بافت‌های هوایی یا محدودیت‌های شیب یونی مرتبط دانست. به عبارت دیگر، این روند می‌تواند بدلیل یکسان بودن شیب یونی خاک و گیاه باشد؛ بطوری‌که یون‌هایی که به سمت بخش‌های هوایی گیاه حرکت می‌کنند، سبب می‌شوند که یون‌های جدیدی به سمت ریشه‌ها حرکت کنند. از این‌رو، غلظت‌های بیش‌تری از فلزات در ریشه‌ها حفظ می‌شوند. هرچند در این‌گونه موارد، غلظت‌های کم‌تر فلزات در سرشاخه‌ها می‌تواند به‌سبب تحرک محدود فلزات نیز باشد[۱۵]. همچنین، انباشت قابل ملاحظه کادمیوم در ریشه‌های گل جعفری نسبت به بخش‌های هوایی آن‌را می‌توان با تجمع مقادیر بالای این فلز در رایزوباکترها (Rhizobacteria) مرتبط دانست[۴۷]. از این‌رو، مقادیر بزرگ‌تر از یک فاکتور انباشت این عنصر در حضور اسید سیتریک در گونه گل جعفری (نمودار ۲ب) در تیمارهای واجد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده به خاک را می‌توان با رایزوباکترها و نیز افزایش جذب فسفر ناشی از انحلال یون‌های فسفات و تأثیر آن در رشد و نمو گیاه مرتبط دانست[۴۸]. در واقع، با آزادسازی اسید سیتریک از درون ریشه، pH خاک کاهش یافته و یون‌های سیترات حاصل از آن منجر به آزادسازی یون‌های فسفات از ذرات خاک می‌شود. به بیان دیگر، یون‌های سیترات در زمینه جذب به جایگاه‌های استقرار در ذرات رس خاک رقابتی شدید با یون‌های فسفات داشته و می‌توانند به افزایش انحلال فسفات غیر محلول منجر شوند[۴۹].

البته مقادیر فاکتور انتقال بزرگ‌تر از یک در تیمارهای واجد اسید سیتریک (نمودار ۲الف) نیز بیان‌گر آن است که این عامل کلات‌کننده دسترسی و انباشت کادمیوم را در سرشاخه‌های این گیاه با داشتن گره‌های فراوان فزونی می‌بخشد[۲۵]. در این خصوص، نتایج پژوهش کور و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که کاربرد اسید سیتریک در خاک، از طریق تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی و افزایش انباشت کادمیوم بطور مؤثر سمیت ناشی از این عنصر را در گونه *Brassica juncea* کاهش داده است[۵۰]. از طرفی خان و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش کردند که تولید ایندول- ۳- استیک اسید (IAA) توسط باکتریای‌ها و قارچ‌های مستقر در ریشه گونه *Solanum nigrum* از دلایل اصلی تحمل کادمیوم و ارتقای توان انباشت این عنصر در گیاه بعنوان گونه‌ای فرا انباشتگر بوده است[۵۱].

نتایج نشان داد که بیشینه غلظت عنصر کادمیوم در شاخساره‌های گونه‌های مورد مطالعه و بویژه به تیمارهای ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلرید کادمیوم افزوده به خاک حاوی اسید سالیسیلیک مربوط بود (جدول ۲). لذا، می‌توان نتیجه گرفت که کلات اسید سالیسیلیک در بهبود گیاه استخراجی خاک‌های آلوده به کادمیوم توسط این دو گونه مؤثر بوده است. از طرفی تیمار حاوی EDTA در مقایسه با تیمار شاهد، بطور معنی‌داری تولید زیست‌توده گیاهان از جمله تاج‌خروس را کاهش داده و این کاهش تولید ماده خشک می‌تواند بدلیل افزایش جذب فلزات سنگین؛ بویژه کادمیوم و مرتبط با افزایش دسترسی آن‌ها در خاک با حضور این عامل کلات‌کننده باشد[۱۳،۲۱]. اثر EDTA به این شکل است که این کلات‌کننده در حالی که بطور مناسبی با فلزات کمپلکس‌هایی را تشکیل می‌دهد، به ریشه‌ها و سپس سرشاخه‌ها وارد می‌شود؛ بنابراین، فلزات را نیز همراه با خود بخش‌های هوایی گیاه انتقال می‌دهد[۲۵]. در واقع، این انتقال بدون راهبرد دفاعی می‌تواند منجر به بروز سمیت و کاهش زیست‌توده گیاه شود که بطور کلی به فرا انباشتگری در حضور این کلات‌کننده

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

شیمیایی منجر نمی‌شود. در این خصوص، بروز اثر سمیت EDTA را می‌توان با کاهش فعالیت آنزیم‌های ACC deaminase و IAA synthesis در حضور عنصر کادمیوم مرتبط دانست[۵۲].

کاهش سمیت برخی فلزات سنگین در حضور اسید سالیسیلیک در گونه گل جعفری را می‌توان به ویژگی فنولی شبه‌هورمونی مشابه تنظیم‌کننده‌های رشد این اسید که پاسخ‌های متابولیکی (میزان کلروفیل، رشد ریشه‌ها و سرشاخه‌های) گل جعفری را بطور چشم‌گیری افزایش می‌دهد و همچنین نقش این اسید در افزایش انحلال عنصر در محلول خاک و ارتقای انباشت آن‌ها در گل جعفری در شرایط تنش ناشی از فلزات سنگین در خاک‌های آلوده در راستای کاهش سمیت فلزات سنگین، مرتبط دانست[۱۶]. همچنین، با توجه به نتایج می‌توان عنوان کرد که گونه *T. patula*، خاک‌های آلوده به کادمیوم را از طریق بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان همچون آسکوربات پراکسیداز (APX)، گلوتاتیون ریداکتاز (GR) و سوپر اکساید دسیموتاز (SOD)؛ بویژه در برگ‌ها، پالایش می‌کند. در حالی‌که، فعالیت این گونه آنزیم‌ها در ریشه‌ها بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد[۵۳]. بطور کلی تجمع بیش‌تر کادمیوم در شاخساره‌های گل جعفری نسبت به ریشه‌ها را می‌توان با ماهیت فرا انباشتگری این گیاه مرتبط دانست[۲۵].

نتیجه‌گیری

با استناد به مقادیر فاکتورهای انتقال و انباشت زیستی نتیجه گرفته شد که گونه‌های تاج‌خروس و گل جعفری به‌ترتیب از قابلیت تثبیت و استخراج گیاهی برخوردار بودند. در این خصوص، می‌توان به نقش اسیدهای آلی یعنی اسید سالیسیلیک و اسید سیتریک که می‌توانند از طریق سازو کارهایی مانند کاهش pH سیستم الکترولیت خاک و افزایش فراهمی زیستی و غلظت یون‌های فلزی در محلول خاک، اثرات شبه هورمونی، آزادسازی و انحلال فسفات، افزایش تحرک کادمیوم و برخی فعالیت‌های آنزیمی، دگرگونی میکروساختاری، کاهش ظرفیت نگه‌داری فلزات توسط ذرات رس و افزایش مسیر جریان انحلال و جذب (Biosorption) توسط گیاه نقش مهمی در الکتروکینتیک پالایش خاک داشته باشند، اشاره کرد. لذا، با توجه به اثر مطلوب اسیدهای آلی بعنوان عوامل کلات‌کننده در ارتقای کارایی گیاه‌پالایی گونه‌های فرا انباشتگر، استفاده از آن‌ها در فرآیند آلودگی‌زدایی خاک توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

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

References

1. Amna AN, Masood S, Mukhtar T, et al. Differential effects of cadmium and chromium on growth, photosynthetic activity, and metal uptake of *Linum usitatissimum* in association with *Glomus intrardices*. Environ Monit Assess 2015; 187: 311.

2. Cui H, Fan Y, Yang J, et al. In situ phytoextraction of copper and cadmium and its biological impacts in acidic soil. Phytoremediation of heavy metals from water of Yamuna river by *Tagetes patula*, *Bassica scoparia*, *Portulaca grandiflora* Chemosphere 2016; 161: 233-41.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

3. Ghosh A, Manchanda N. Phytoremediation of heavy metals from water of Yamuna river by *Tagetes patula*, *Bassica scoparia*, *Portulaca grandiflora*. Asian Plant Res J 2019; 2(2): 1-14.

4. Romeh AA, Khamis MA, Metwally SM. Potential of *Plantago major L.* for phytoremediation of lead-contaminated soil and water. Water Air Soil Pollut 2016; 227: 9.

5. Sobhanardakani S. Heavy metals health risk assessment through consumption of some foodtuffs marketed in city of Hamedan, Iran. Caspian J Environ Sci 2019; 17(2): 175-83.

6. 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. Environ Health Eng Manage J 2016; 3(3): 131-35.

7. Ravankhah N, Mirzaei R, Masoum S. [Evaluation of geoaccumulation index, contamination factor, and principal component analysis for estimating soil contamination]. Iran J Health Environ 2015; 8(3): 345-56 (In Persian).

8. Zhang H, Guo Q, Yang J, et al. Comparison of chelates for enhancing *Ricinus communis L.* phytoremediation of Cd and Pb contaminated soil. Ecotoxicol Environ Safe 2016; 133: 57-62.

9. Kamran MA, Mufti R, Mubariz N, et al. The potential of the flora different regions of Pakistan in phytoremediation: a review. Environ Sci Pollut Res 2014; 21(2): 801-12.

10. Ningyu LI, Bin GUO, Hua LI, et al. Effects of Double Harvesting on heavy metal uptake by six forage species and the potential for phytoextraction in field. Pedosphere 2016; 26(5): 717-24.

11. Naderi MR, Danesh Shahraki A, Naderi R. [Some Methods of Heavy Metals Phytoremediation Efficiency Increasing]. Human Environ 2012; 10(3): 28-38 (In Persian).

12. Chaturvedi N, Ahmed MJ, Dhal NK. Effects of iron ore tailings on growth and physiological activities of *Tagetes patula L.* J Soil Sediment 2014; 14: 721-30.

13. Cay S. Enhancement of cadmium uptake by *Amaranthus caudatus*, an ornamental plant, using tea saponin. Environ Monit Assess 2016; 188: 320-27.

14. 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. Int J Phytoremediat 2015; 17(1-6): 568-74.

15. 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.

16. 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. Int Lett Chem, Physic Astron 2015; 50: 159-68.

17. Shokri Z, Boroomand N, Sarcheshmeh Pour M, et al. [Effects of *Arbuscular mycorrhizal* fungi on cadmium phytoremediation by Marigold (*Tagetes erecta*)]. J Soil Manage Sustain Prod 2016; 6(1): 191-204 (In Persian).

18. Amouei A, Mahvi AH, Naddafi K. [The effect of chemical additives on the uptake and accumulation of Pb and Cd in native plants of north of Iran]. J Mazand Univ Med Sci 2012; 22(86): 116-24 (In Persian).

19. 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. Environ Monit Assess 2014; 186(6): 3957-68.

20. Lan J, Zhang S, Lin H, et al. Efficiency of biodegradable EDDS, NTA and APAM on enhancing the phytoextraction of cadmium by *Siegesbeckia orientalis L.* grown in Cd- contaminatedsoils. Chemosphere 2013; 91(9): 1362-67.

21. 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. Commun Soil Sci Plant Anal 2014; 45(1), 42-52.

22. 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. J Environ Manage 2014; 132: 9-15.

23. Callahan DL, Baker AJ, Kolev SD, et al. Metalionligands in hy- peraccumulating plants. J Biol Inorg Chem 2006; 11: 2-12.

24. Heidari S, Fotouhi Ghazvini R, Zavareh M, et al. [Investigation of physiological response and phytoremediation ability of *Echinacea purpurea* in cadmium contaminated soil]. Iran J Hortic Sci Technol 2018; 19(2): 127-42 (In Persian).

25. Sinhal VK, Srivastava A, Singh VP. EDTA and citric acid mediated phytoextraction of Zn, Cu, Pb and Cd through marigold (*Tagetes erecta*). J Environ Biol 2010; 31(3): 255-59.

26. Liu JN, Zhou QX, Wang S, et al. Cadmium tolerance and accumulation of *Althaea rosea Cav.* and its potential as a hyperaccumulator under chemical enhancement. Environ Monit Assess 2009; 149: 419-27.

27. Towolawi AT, Arowolo TA, Bada BS, et al. Phytoextraction assessment of green Amaranth (*Amaranthus viridis Linn.*) Grown on soil amended with sewage sludge. Ife J Sci 2017; 19(1): 133-40.

28. United States Department of Agriculture (USDA). Field Book for Describing and Sampling Soils, version 3.0. National soil survey center, Natural Resources

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

Conservation Service, 2012, 300 p.

29. Carter MR, Gregorich EG. Soil sampling and methods of analysis, (2nd ed), CRC Press Boca Raton; 2008: FL, 1204p.

30. Ebrahimi M. Effect of EDTA treatment method on leaching of Pb and Cr by *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steudel (common reed). Caspian J Env Sci 2015a; 13(2):153-66.

31. 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. J Plant Prot Res 2009; 49(1): 49-55.

32. Bardiya-Bhurat K, Sharma S, Mishra Y, et al. *Tagetes erecta* (marigold), a phytoremediant for Niand Pb-contaminated area: a hydroponic analysis and factors involved. Rendiconti Lincei 2017; 28(4): 673-78.

33. Liu JN, Zhou QX, Sun T, et al. Identification and chemical enhancement of two ornamental plants for phytoremediation. Bull Environ Contam Toxicol 2008; 80: 260-65.

34. Bareen F, Rafiq Kh, Shafiq M, et al. Uptake and leaching of Cu, Cd, and Cr after EDTA application in sand columns using Sorghum and Pearl Millet. Pol J Environ Stud 2019; 28(4): 2065-77.

35. Sobhanardakani S, Jamshidi K. Assessment of metals (Co, Ni and Zn) content in the sediments of Mighan Wetland using geo-accumulation index. Iran J Toxicol 2015; 9(30): 1386-90.

36. 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). Arch Environ Contam Toxicol 2019; 77(3): 344-58.

37. Di Bonito M, Breward N, Crout NMJ, et al. Overview of selected soil pore water extraction methods for the determination of potentially toxic elements in contaminated soils: Operational and technical aspects. Environ Geochem 2008; 213-49.

38. 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. Environ Sci Pollut Res 2020; 27(12): 13301-14.

39. 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]. Iran J Health Environ 2019; 12(1): 87-100 (In Persian).

40. Almaroai YA, Usman ARA, Ahmad M, et al. Effect of synthetic chelators and low-molecular-weight, organic acids on chromium, copper and arsenic uptake and translocation in Maize (*Zea mays L.*). Soil Sci 2012; 177:655-63.

41. Ebrahimi M. Effect of EDTA and DTPA on phytoremediation of Pb-Zn contaminated soils by *Eucalyptus camaldulensis Dehnh* and effect on treatment time. Desert 2015b; 19(1): 65-73.

42. Ouhadi VR, Yong RN, Bayesteh H, et al. Influence of potential determining ions on the microstructural performance and contaminant adsorption of a homoionic illitic clay. Water Air Soil Pollut 2007; 181: 77-93.

43. Zhang, X, Yang H, Cui Z. Evaluation and analysis of soil migration and distribution characteristics of heavy metals in iron tailings. J Clean Prod 2018; 172: 475-80.

44. Rungruang N, Babel S. Cadmium removal potential from contaminated soil by *Tagetes erecta L.* and *Panicum maximum*: influence of soil pH. Soil Sediment Contam 2016; 25:133-50.

45. Goodarzi AR, Mirmomen M. [The effect of time and pore fluid characteristics on electrokinetic performance in removing heavy metals from soil]. Modares Civil Eng J 2016; 8(3): 229-41 (In Persian).

46. 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. Int J Phytoremediat 2012; 14(8): 754-71.

47. Chitraprabha K, Sathyavathi S. Phytoextraction of chromium from electroplating effluent by *Tagetes erecta (L.)*. Sustain Environ Res 2018; 28: 128-34.

48. Kaur C, Selvakumar G, Ganeshamurthy AN. Organic Acids in the Rhizosphere: Their Role in Phosphate Dissolution. Springer, 2016; pp 165-77.

49. Barrow NJ, Debnath A, Sen A. Mechanisms by which citric acid increases phosphate availability. Plant Soil 2017; 423(1-2): 1-12.

50. Kaur R, Yadav P, Sharma A, et al. Castasterone and citric acid treatment restores photosynthetic attributes in *Brassica juncea* L. under Cd(II) toxicity. Ecotoxicol Environ Safe 2017; 145: 466-75.

51. Khan AR, Ullah I, Waqas M, et al. Host plant growth promotion and cadmium detoxification in *Solanum nigrum*, mediated by endophytic fungi. Ecotoxicol Environ Safe 2017; (136): 180-88.

52. Mendoza-Hernandez JC, Perea-Velez YS, Arriola-Morales J, et al. Assessing the effects of heavy metals in ACC deaminase and IAA production on plant growth-promoting bacteria. Microbiol Res 2016; 188-189: 53-61.

53. Liu YT, Chen ZS, Hong CY. Cadmium- Induced physiological response and antioxidant enzyme changes in novel cadmium accumulator *Tagetes patula*. J Hazard Mater 2011; 189: 724-31.

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]

Journal of Environmental Health Engineering, August 2020; Vol. 7, No. 4: 427-442

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

Nastaran Aghelan[1], Soheil Sobhanardakani[2*], Mehrdad Cheraghi[2], Bahareh Lorestani[2], Hajar Merrikhpour[3]

1. PhD. Candidate in Environmental Sciences, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran
2. Ph.D. in Environmental Science, Associate Professor in Environmental Sciences, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran
3. Ph.D. in Soil Science, Assistant Professor in Soil Sciences, Department of Agriculture, Sayyed Jamaleddin Asadabadi University, Asadabad, Iran

E-mail: s_sobhan@iauh.ac.ir

Received: 6 May 2020 ; Accepted: 15 August 2020

ABSTRACT

Background & Objective: Nowadays, since increasing environmental pollution particularly soil contamination can cause adverse health effects, kind of methods such as phytoremediation techniques are commonly used to remediate organic, inorganic and nuclear pollutants from contaminated sites. Therefore, this study was conducted to assess of chelating agents with different biodegradability rates on the enhanced phytoremediation efficiency of *Amaranthus caudatus* and *Tagetes patula* as ornamental species in cadmium contaminated soils in 2018.

Materials & Methods: In pot experiments, the soil specimens were moderately artificially contaminated by cadmium chloride (50 and 100 mg/kg). Then 2.5 mmol/kg of EDTA, 2.0 mmol/kg of salicylic acid (SA) and 2.5 mmol/kg of citric acid (CA) solution were added to the contaminated soils to study the influence of these chelating agents on phytoremediation efficiency by studied ornamental plants. Finally, after acid digestion of cultivated soil, roots and stems of *A. caudatus* and *T. patula*, the Cd content was determined using ICP-OES.

Results: The results showed that after 60 days of pots irrigation, the maximum mean content of Cd (mg/kg) in cultivated soil, root and stem samples of *A. caudatus* with 1.87, 4.50 and 1.89 were found in the SA, EDTA and SA treatments, respectively. Moreover, the maximum mean content of Cd in cultivated soil, root and stem samples of *T. patula* with 1.86, 1.18 and 3.10 were found in the control, CA and SA treatments, respectively. Also, the values of translocation and bioconcentration factors indicate that *A. patula* can be considered to be potential plant species for phytostabilization and phytoextraction of cadmium, respectively.

Conclusion: The results reported in this study show that the organic acids such as SA and CA have considerable role in soil refining electrokinetic or enhance of soil electrokinetic bioremediation through mechanisms resembling hormonelike effects, phosphate release and dissolution, enhancing of cadmium mobility and some enzymatic activities, microstructural variations and retention capacity decreasing of clay particles. Therefore, due to the desirable effects of organic acids as chelate agents to enhancing phytoremediation efficiency of hyperaccumulator species use of these compounds in the cleanup of contaminated soil is recommended.

Keywords: *Amaranthus caudatus*, *Tagetes patula*, Cadmium, Environmental remediation, Chelating agents

[Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2025-10-14]

[DOI: 10.29252/jehe.7.4.427]