

تاثیر کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر MGDA و EDDS بر استخراج گیاهی کروم توسط وتیور گراس در خاک‌های آلوده به کرومات

مهدی احمدیان^{۱*}، احمد گلچین^۲، پریسا علمداری^۳، قاسم اسدیان^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳)

چکیده

استفاده تلفیقی از کلات‌های شیمیایی در کنار کاشت گیاهان بیش‌انباشتگر، به عنوان یک روش مؤثر در افزایش کارایی استخراج فلزات سنگین و کمک به اصلاح خاک‌های آلوده، متداول است. وتیور به عنوان یک گیاه مقاوم به تنش شوری، خشکی و غلظت بالای فلزات سنگین شناخته شده است. اخیراً استفاده از کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر در پالایش خاک از فلزات سنگین مد نظر پژوهشگران قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف کلات‌های زیست-تخریب‌پذیر اتیلن دی آمین دی سوکسینیک اسید (EDDS) و متیل گلیسین دی استیک اسید (MGDA) در چهار سطح (۰، ۱، ۲ و ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک) بر افزایش میزان استخراج کروم ۶ ظرفیتی در چهار سطح آلودگی خاک (۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) توسط گونه وتیور (*Chrysopogon zizanioides* L.) انجام شد. استفاده از کلات MGDA با غلظت ۴ میلی‌مول در غلظت‌های ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، به ترتیب نسبت جذب کروم ریشه را ۱/۶۲، ۲/۱، ۲/۴۸ و ۲/۵ برابر و در کلات EDDS به ترتیب ۱/۵، ۲/۷، ۲/۲۵ و ۲/۹ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین استفاده از کلات MGDA با غلظت ۴ میلی‌مول، به ترتیب نسبت کروم شاخسار را ۳/۰۸، ۳/۷۳، ۳/۲۳ و ۲/۳۳ برابر و در کلات EDDS، به ترتیب ۲/۵۲، ۴/۹۷، ۳/۴۹ و ۵/۵ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. اثر سطوح غلظت کروم خاک و همچنین غلظت کلات‌ها بر زیست‌توده و خصوصیات رویشی ریشه و شاخسار کاهشی بود، اما کلات EDDS موجب افزایش قطر بوته شد. جمع‌بندی نتایج حاصل از بررسی شاخصه‌های زیستی BCF و TF نشان داد گیاه وتیور توانمندی خاصی در پالایش خاک‌های آلوده به کروم ۶ ظرفیتی دارد و کلات EDDS با غلظت ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک، سبب تشدید جذب کروم به خصوص در ریشه و افزایش انتقال آن به شاخسار گیاه وتیور می‌شود. لذا، این ترکیب به عنوان یک کلات زیست‌تخریب‌پذیر مناسب در افزایش بازده تثبیت زیستی وتیور در خاک‌های آلوده به کرومات معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، استخراج گیاهی کروم، کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر، وتیور گراس

احمدیان، م.، گلچین، ا.، علمداری، پ.، اسدیان، ق. ۱۴۰۰. تاثیر کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر MGDA و EDDS بر استخراج گیاهی کروم توسط وتیور گراس در خاک‌های آلوده به کرومات خاک، تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۹، شماره ۳، صفحه: ۱-۱۸.

۱- دانشجوی دکتری علوم خاک، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. (مکاتبه کننده)

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۴- استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

* پست الکترونیک: Mahdi.Ahmadian@znu.ac.ir

مقدمه

آلودگی خاک به فلزات سنگین، یکی از مشکلات اکولوژیکی بسیار جدی در سراسر جهان به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه است (Safari Sinegani & Jafari Monsef, 2017). اگرچه فلزات سنگین عناصر طبیعی به حساب می‌آیند، اما در نتیجه فعالیت‌های مخرب و بهره‌برداری لجام‌گسیخته انسان از طبیعت، مقادیر فراوانی از آن‌ها در محیط‌زیست تجمع می‌یابند که سلامت انسان و محیط‌زیست را با تهدید مواجه می‌سازند (Roy-Chowdhury et al., 2018). فلزات سنگین در غلظت‌های فراتر از مقادیر آستانه‌ای، اثرات نامطلوبی بر سلامت موجودات زنده بر جای می‌گذارند و عملکرد طبیعی موجودات زنده را مختل می‌کنند (Abbaszadeh et al., 2018). تاکنون روش‌های مختلفی برای پالایش محیط‌های آلوده به فلزات سنگین با استفاده از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی ابداع شده است (Ali et al., 2013). اما هیچ‌یک از این روش‌ها راه حل دائمی برای پالایش محیط‌های آلوده نبوده و اغلب ممکن است بیش از یک روش برای بهینه‌سازی پالایش لازم باشد (Sparks, 2003).

در بین روش‌های اصلاحی مورد استفاده جهت پالایش محیط‌های آلوده به فلزات سنگین، فناوری زیست‌پالایی^۱ به دلیل هزینه نسبتاً کم و سهولت اجرا، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این فن‌آوری، برداشت یا تجزیه زیستی آلودگی، از طریق جانداران مختلف (نظیر باکتری، قارچ، جلبک، گیاه و غیره) به پاک‌سازی محیط‌زیست می‌انجامد (Khodaverdiloo & Hamzenejad Taghliabad, 2014). در این میان، توجه ویژه‌ای به استفاده از گیاهان برای حذف فلزات سنگین از محیط‌های آلوده شده که به گیاه‌پالایی معروف است (Zoya et al., 2016). پیشرفت‌های انجام شده در این فناوری، افق تازه‌ای را فراروی چشم بشر گشوده است. به طوری که از آن به‌عنوان یک روش امیدبخش برای اصلاح خاک‌های آلوده یاد می‌کنند که می‌تواند فلزات سنگین را از خاک و یا انواع محیط‌های آلوده جذب کرده و آلودگی را از محیط بزداید (Roy-Chowdhury et al., 2018). گونه گیاهی وتیور یک گونه غیر مهاجم است که در ابتدا از سوی بانک جهانی جهت حفاظت آب و خاک معرفی

شد. ولی امروزه جایگاه ویژه‌ای در اصلاح و احیاء اراضی، بهسازی اراضی شور و خاک‌های آلوده به فلزات سنگین دارد (Ghosh et al., 2015; Banerjee et al., 2016; Singh, et al., 2016).

یک راهبرد اصولی برای بالا بردن کارایی گیاه‌پالایی در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، افزایش مقدار فراهمی عنصر مورد نظر با استفاده از کلات‌های شیمیایی در خاک است. کلات‌کننده‌های معمول به دلیل ماندگاری و پایداری بیش از حد در خاک، تهدیدکننده هستند. بنابراین، استفاده بیش از اندازه آن‌ها می‌تواند باعث افزایش خطر انتقال فلزات سنگین به آب‌های زیرزمینی از طریق شستشو توسط آب آبیاری و یا آب باران شود و این سیستم‌ها را با عواقب جدی زیست-محیطی روبرو سازد. اخیراً ایده استفاده از کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر بجای کلات‌های معمول شکل گرفته است که این ترکیبات در طی زمان، تخریب و تجزیه می‌شوند. استفاده از این ترکیبات در فن‌آوری گیاه‌پالایی ضمن جلوگیری از گسترش آلودگی فلزات سنگین به منابع آب و خاک، از یکسو منجر به اصلاح اراضی آلوده به عناصر سنگین از طریق گیاه‌پالایی می‌شود و از سوی دیگر به دلیل تخریب و تجزیه این ترکیبات در طی زمان به توسعه پایدار محیط‌زیست و حفاظت از منابع آب و خاک کمک می‌نماید. ژائو و همکاران (Zhao et al., 2016) با بررسی اثر کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر EDDS و NTA بر میزان کارایی گونه سرخس (*Athyrium wardii*) در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب، نتیجه گرفتند که گونه سرخس، توانمندی خاصی در پالایش خاک‌های آلوده به سرب دارد و تیمار NTA با تشدید رشد گیاه سبب افزایش غلظت سرب ریشه گردید و این ترکیب به‌عنوان یک کلات شیمیایی مناسب برای افزایش جذب سرب گیاه سرخس معرفی شد.

آتین‌تی و همکاران (Attinti et al., 2017) در یک آزمایش گلخانه‌ای با بررسی تأثیر کلات EDDS بر افزایش استخراج گیاهی سرب و کادمیوم توسط وتیور و فستوکا، کاربرد کلات EDDS را بر افزایش حلالیت سرب و کادمیوم در خاک، مثبت گزارش کردند. نتایج تجزیه بافت گیاهی حاکی از افزایش جذب کادمیوم در نتیجه کاربرد کلات EDDS در ریشه وتیور بود. این کلات انتقال سرب

در کیلوگرم خاک) توزین و پس از انحلال در ۱۰۰۰ میلی-لیتر آب (میزان رطوبت مورد نیاز تا رسیدن به حد ظرفیت زراعی)، به کمک مه‌پاش سولار^۱ به نمونه‌های خاک اسپری و کاملاً مخلوط گردید (Lan et al, 2013). به-منظور ایجاد مشابهت بین شرایط آلودگی مصنوعی و شرایط طبیعی، گلدان‌ها به مدت دو ماه در شرایط انکوباسیون در دمای 25 ± 5 درجه سانتی‌گراد، چرخه‌های متناوب تر و خشک شدن را در حدود رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) تا نقطه پژمردگی (WP) طی کردند (Vigliotta et al, 2016; Zhao et al., 2016). سپس کلوخه‌های خاک ایجاد شده هر گلدان مجدداً نرم گردید و در اواخر بهار، نشاءهای یکنواخت و تقریباً همسان گیاه وتیور در آن کاشته شد. به منظور کاهش تنش‌های محیطی ناشی از انتقال نشاءهای وتیورگراس از محیط قبلی به محیط جدید و همچنین ارتباط بهتر ریشه با خاک آلوده به کروم و ایجاد سازگاری بیشتر با شرایط محیطی، گیاهان در یک دوره یک ماهه بدون اعمال کلات‌های شیمیایی و تنها با کنترل وضعیت رطوبت، دما و نور نگهداری شدند.

افزودن کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر و تجزیه شیمیایی نمونه‌های گیاه

کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر MGDA و EDDS به ترتیب ساخت کمپانی‌های تی‌سی‌آی ژاپن^۲ و سیگما آلدریج^۳ از شرکت‌های معتبر تأمین کننده این مواد تهیه گردید و به تفکیک با غلظت‌های (۱، ۲ و ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک) آماده‌سازی و در سه نوبت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز بعد از پایان دوره سازگاری، از طریق اختلاط با آب دیونیزه به داخل گلدان‌ها تزریق شدند. گیاهان در این مرحله به مدت ۱۲۰ روز در گلخانه در دمای 30 ± 5 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و تأمین شرایط نور طبیعی و رطوبت مورد نیاز آنها از طریق آبیاری هم‌زمان و یکنواخت گلدان‌ها در بازه‌های رطوبتی حد ظرفیت زراعی (FC) تا ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (۱/۲FC) از طریق توزین و محاسبه رطوبت موجود صورت گرفت.

در نهایت، ۳۰ روز پس از آخرین نوبت توزیع کلات‌ها، بوته-های گیاه وتیور آماده برداشت شدند. قبل از برداشت اندام هوایی، ارتفاع میانگین و قطر ساقه اندازه‌گیری شد. پس از

از ریشه به ساقه را ارتقا داد. غلظت کادمیوم در ریشه‌ها و اندام‌های هوایی وتیور نسبت به فستوکا به ترتیب ۳/۶ و ۸/۳ برابر شود. علایم سمیت ویژه به دلیل غلظت بالای سرب در نتیجه اعمال تیمار EDDS در فستوکا ملاحظه گردید هرچند در وتیور چنین چیزی مشاهده نشد. این مطالعه نشان دهنده پتانسیل گیاه‌پالایی مناسب گونه وتیور در نتیجه اعمال تیمار کلات شیمیایی EDDS است و به‌عنوان یک روش پالایش برای خاک‌های آلوده به سرب قابل توصیه است.

قدرت کمپلکس‌کنندگی ترکیبات زیست‌تخریب‌پذیر علاوه بر ترکیب شیمیایی ماده کلات‌کننده، به نوع فلز نیز بستگی دارد. بنابراین، لازم است کارایی آن‌ها در افزایش فراهمی فلزات سنگین خاک مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که اطلاعات زیادی در مورد کارایی این ترکیبات در تشدید گیاه‌پالایی کروم در گیاه وتیور به‌عنوان یک گیاه متحمل به غلظت‌های بالای کروم وجود ندارد، لذا این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کلات‌کننده‌های زیست-تخریب‌پذیر (MGDA) و (EDDS) بر کارایی استخراج گیاهی وتیور گراس در جذب کروم از خاک و تغییرات پدید آمده بر زیست‌توده ساقه و ریشه در شرایط گلخانه و در مقیاس گلدان‌های آلوده‌شده برنامه‌ریزی گردید.

مواد و روش‌ها

آلوده سازی نمونه‌های خاک و کاشت بوته‌های وتیور

در مراحل ابتدایی انجام این پژوهش در اوایل بهار ۹۸، یک نمونه کافی و همگن از خاک سطحی زراعی (حدود ۱۵۰۰ کیلوگرم از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری) از مزرعه تحقیقاتی اکباتان، وابسته به مرکز تحقیقات کشاورزی همدان با مختصات مکانی طول جغرافیایی $32^{\circ}48'11''$ شرقی و عرض جغرافیایی $48^{\circ}34'36''$ شمالی تهیه و پس از عبور از الک ۴ میلی‌متری و اختلاط یکسان با ۳۰ کیلوگرم کود آلی، تعداد ۹۶ نمونه کاملاً یکنواخت خاک در واحدهای ۵ کیلوگرمی توزین و درون گلدان‌های پلاستیکی ریخته شد و آلوده‌سازی آنها صورت گرفت. مقادیر مورد نیاز از نمک دی کرومات پنتاسیم بر اساس نقشه سطوح مختلف آلودگی خاک (۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم

3- Sigma Aldrich

1- Solar Spray pump
2- TC-Japan

(*al.*, 2011). برای تعیین فاکتور تغلیظ زیستی (BCF)، از نسبت غلظت کروم در بخش هوایی گیاه به غلظت کروم کل در خاک استفاده گردید (Yadav & Chandra, 2011) و برای تعیین فاکتور انتقال (TF) از نسبت غلظت کروم در بخش هوایی گیاه به غلظت کروم در بخش ریشه‌ای استفاده شد (Yadav & Chandra, 2011).

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های این پژوهش به صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از اندازه‌گیری و سنجش متغیرهای مورد نظر، بانک اطلاعاتی داده‌ها در محیط نرم‌افزاری Excel 2016 تشکیل گردید. اولین گام برای انجام مقایسه‌های آماری، نرمال و یا عدم نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk مورد بررسی قرار گرفت و برای بررسی همگنی واریانس‌ها از آزمون Levene استفاده شد. تجزیه واریانس داده‌ها (ANOVA) برای بررسی اثرات یک‌جانبه و مقایسه میانگین‌های سطوح فاکتورهای اصلی به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان $P < 0.05$ انجام و آزمون‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ صورت گرفت (IBM, Armonk, NY, USA). ترسیم نمودارها در محیط نرم‌افزاری Excel 2016 صورت گرفت.

نتایج و بحث

بررسی تغییر خصوصیات رویشی گیاه وتیور

تاثیر بر رشد ریشه

بررسی نتایج حاصل از تاثیرپذیری رشد ریشه از سطوح آلودگی کروم خاک نشان داد که افزایش غلظت کروم تا سطح ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) بر روی برخی از خصوصیات رویشی نظیر تراکم و درصد آب ریشه اثرگذار بود و هر چند بر سایر خصوصیات اثر معنی‌داری نداشت، اما سبب کاهش مقدار آنها گردید. بطوری‌که بیشترین کاهش حجم ریشه، وزن تر و وزن خشک به ترتیب به میزان ۱۳/۷، ۱۲/۵ و ۱۷/۸ درصد در تیمار کروم ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده گردید (جدول‌های ۱ و ۲).

قطع اندام هوایی و شستشو با آب مقطر و خشک کردن با حوله، وزن تر اندام هوایی توزین گردید. نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و مجدداً وزن خشک آنها اندازه‌گیری شد. عملیات جداسازی ریشه از خاک و ریشه‌شویی به کمک الک‌های استیل صورت گرفت. به‌منظور حذف و جداسازی ذرات ریز خاک از ریشه، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در محلول کالگون قرار گرفتند و مجدداً شسته شدند. همچنین برای جداسازی کروم از سطح ریشه‌ها و فضاهای آپوپلاستی، از محلول ۰/۱ مولار Na₂-EDTA استفاده شد. بعد از شستشو با آب، عملیات حجم‌سنجی ریشه‌ها انجام شد. شیوه حجم‌سنجی از طریق غوطه‌ور سازی کامل ریشه‌ها در یک استوانه مدرج دو لیتری که تا حجم مشخصی در آن آب ریخته شده و از طریق محاسبه اختلاف حجم آب قبل و بعد از قرار دادن ریشه، حجم ریشه در هر نوبت مورد سنجش قرار گرفت (Okeke *et al.*, 2011). در نهایت، ریشه‌ها دو بار با آب مقطر شسته شدند و بعد از گرفتن آب اضافی آن‌ها با حوله، وزن تر آنها توزین گردید. نمونه‌ها تا تثبیت وزن نهایی در آون قرار گرفتند و وزن خشک آن‌ها نیز توزین شد. اندازه‌گیری کروم موجود در بافت گیاهی به روش مینگورانس و اولیویا (Mingorance and Oliva, 2006) صورت گرفت و به‌منظور اندازه‌گیری میزان کروم موجود در عصاره‌های تهیه شده، از دستگاه جذب اتمی مدل SOLAAR (Thermo Elemental، S Series) استفاده شد.

تجزیه شیمیایی نمونه‌های خاک و محاسبه شاخصه‌های زیستی فلزات سنگین

در مطالعات جذب و انتقال فلزات سنگین و ارزیابی میزان کارائی گیاه پالایی، شاخص‌های فاکتور تغلیظ زیستی^۱ و فاکتور انتقال^۲ از اهمیت فراوانی برخوردارند. بنابراین، به منظور ارزیابی و بررسی میزان توانایی گیاه وتیور در پاکسازی محیط از کروم ۶ ظرفیتی، دو شاخص مذکور محاسبه گردیدند. برای محاسبه فاکتور تغلیظ زیستی نیاز به مقدار کروم کل در خاک است که این پارامتر در سطوح مختلف آلودگی به روش هضم سه اسید (ترکیب اسید نیتریک، اسید فلوئوریدریک و اسید پرکلریک) آماده‌سازی و توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید (fang *et*

اثرات تنشی متفاوتی بر رشد ریشه گیاه دارد (Feng *et al.* 2004).
اثر کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر EDDS و MGDA در سطوح مختلف آلودگی کروم خاک دلالت بر کاهش میزان شاخصه‌های رشد ریشه در گیاه وتیور دارد. به طوری که میانگین وزن خشک ریشه در نتیجه استفاده از کلات‌های EDDS و MGDA به ترتیب ۱۶/۴ و ۱۹/۳ درصد و میانگین وزن تر به ترتیب ۹/۵ و ۱۵/۵ درصد کاهش یافت. همچنین، حجم ریشه در نتیجه استفاده از کلات‌های مذکور به ترتیب به میزان ۱۴/۸ و ۱۲/۶ درصد کاهش یافت. مقایسه اثر نوع کلات بر خصوصیات رشد ریشه حاکی از آن است که کلات MGDA حجم ریشه و وزن تر و خشک بیشتری را در مقایسه با EDDS ایجاد نمود (جدول ۲).

بررسی اثر کاربرد کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر EDDS و MGDA بر شاخصه‌های رشد ریشه گیاه وتیور نشان داد تغییرات زیست‌توده خشک و تر ریشه و حجم ریشه تحت تاثیر کلات MGDA معنی‌دار بود ($p < 0.01$), در حالی که استفاده از کلات EDDS از نظر آماری اثر معنی‌داری بر خصوصیات ذکر شده نسبت به شاهد نداشت (جدول ۱). دلیل اصلی کاهش زیست‌توده و خصوصیات رویشی ریشه وتیور در این شرایط را می‌توان ناشی از ساختار شیمیایی متفاوت کلات‌های EDDS و MGDA دانست که در درجه اول حساسیت و اثرات مختلفی بر رشد سلول‌های ریشه دارند و در درجه دوم تفاوت در میزان کلات‌کنندگی و آزادسازی کروم از فازهای غیرمحلول خاک و انتقال به فاز محلول است که در ادامه سبب بالا رفتن غلظت مقادیر قابل جذب کروم خاک شده و جذب ریشه‌ای متفاوت،

جدول ۱- تجزیه واریانس سطوح آلودگی کروم و کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر در ریشه گیاه وتیور

Table 1. Variance analysis of soil Chromium and biodegradable chelates on vetiver root matter

Source of variation	df	Mean square				
		RV (cm ³)	RD (g cm ⁻¹)	RWW (g pot ⁻¹)	RDW (g pot ⁻¹)	RWC (%)
Chromium _(soil)	3	2579 ^{ns}	0.006 ^{**}	1445 ^{ns}	189 ^{ns}	8.15 ⁺
EDDS	3	4338 ^{ns}	0.001 ^{ns}	4202 ^{ns}	141 ^{ns}	1.35 ^{ns}
Chromium _(soil) ×EDDS	9	228 ^{ns}	0.004 ^{**}	293 ^{ns}	23 ^{ns}	1.66 ^{ns}
Error	32	7311	0.002	6421	384	6.62
Coefficient of variation (%)	-	32.48	5.26	33.54	41.33	3.20
Chromium _(soil)	3	3523 ^{ns}	0.005 ^{ns}	4178 ^{ns}	276 ^{ns}	0.990 ^{ns}
MGDA	3	30951 ^{**}	0.002 ^{ns}	27065 ^{**}	1465 ^{**}	3.521 ^{ns}
Chromium _(soil) ×MGDA	9	1166 ^{ns}	0.005 ⁺	1708 ^{ns}	86 ^{ns}	0.735 ^{ns}
Error	32	7808	0.005	6413	383	5.79
Coefficient of variation (%)	-	31.08	8.13	30.69	38.61	2.97

ns و + و * و ** درصد به ترتیب نشان‌دهنده عدم وجود معنی‌داری، وجود معنی‌داری در سطح‌های ده، پنج و یک درصد در تجزیه واریانس یک طرفه می‌باشد. Significant F-test value was indicated by + ($p < 0.1$), * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), and ns = not significant obtained by one-way ANOVA analysis. RV: Root Volume, RD: Root Density, RWW: Root Wet Weight, RDW: Root Dry Weight, RWC: Root Water Content

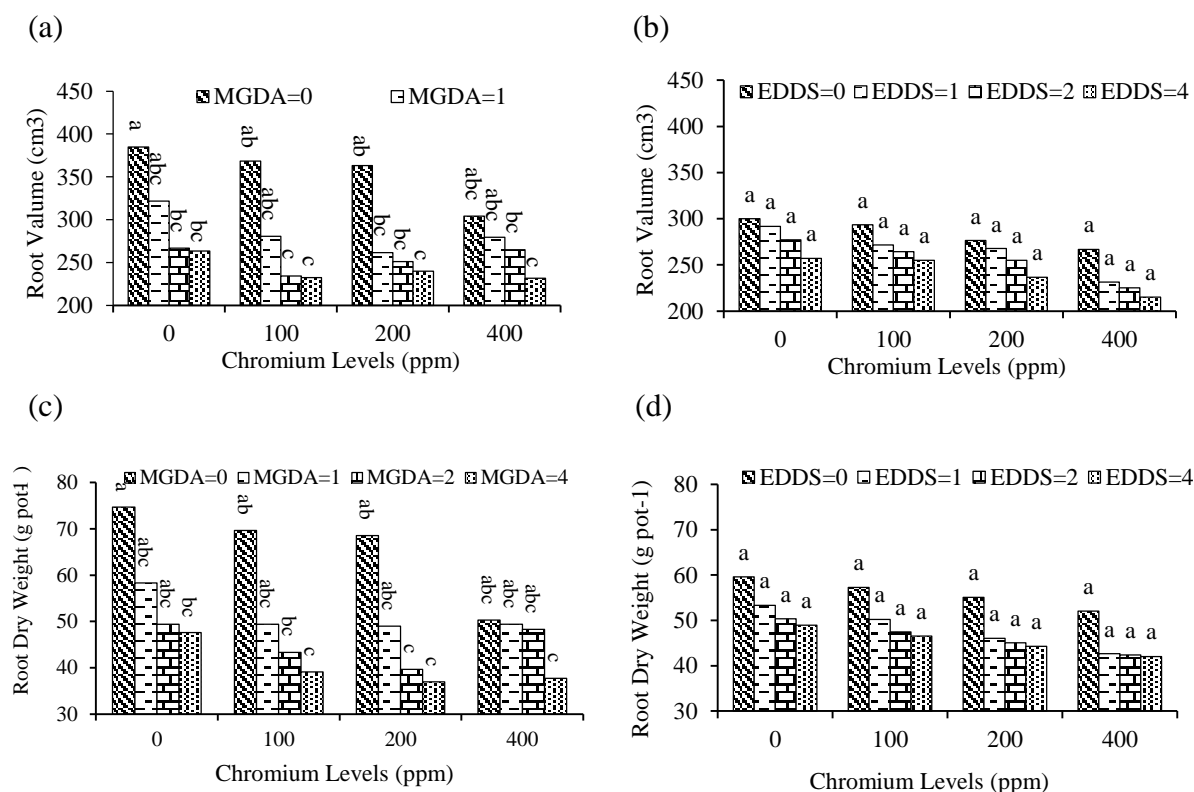
ایجاد محدودیت توسعه ریشه‌های مؤین می‌گردد. همچنین، در این شرایط تجمع کروم و تنش اکسیداتیو حاصله منجر به مسمومیت سلول‌های ریشه و برهم خوردن تعادل جذب عناصر غذایی و در نهایت محدودیت رشد ریشه می‌شود (Samantary, 2002; Mallick *et al.*, 2010).

در نتیجه بالا رفتن سطوح کروم در خاک و افزایش غلظت کلات‌های EDDS و MGDA کاهش وزن خشک و حجم ریشه پدید آمد (شکل ۱). اثر غلظت کلات‌ها (بین ۱ تا ۴ میلی‌مول) بر کاهش شاخصه‌های رشد ریشه، ناشی از افزایش قابلیت دسترسی و زیست‌فراهمی بیشتر کروم خاک است که منجر به کاهش تعداد ریشه‌های ثانویه و

جدول ۲- مقایسه میانگین اثرات ساده نوع کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر در سطوح غلظت کروم بر خصوصیات رشد ریشه گیاه وتیور
Table 2. Main effects of biodegradable chelates and soil Chromium on root matter of vetiver grass

Source of variation	Soil Chromium and MGDA mg/Kg _(soil)				Soil Chromium and EDDS mg/Kg _(soil)			
	0	100	200	400	0	100	200	400
Root Volume (cm ³)	309 ^a	278 ^a	278 ^a	270 ^a	274.9 ^a	274.3 ^a	259.0 ^a	234.3 ^a
Root Density (g cm ⁻³)	0.91 ^a	0.95 ^a	0.90 ^a	0.90 ^a	0.88 ^{bc}	0.89 ^{bc}	0.91 ^{ab}	0.93 ^a
Root Wet Weight (g pot ⁻¹)	284 ^a	264 ^a	253 ^a	240 ^a	252 ^a	242 ^a	232 ^a	228 ^a
Root Dry Weight (g pot ⁻¹)	57 ^a	50 ^{ab}	48 ^b	46 ^b	53.0 ^a	47.2 ^a	44.9 ^a	44.3 ^a
Water Content (%)	80 ^a	81 ^a	80 ^a	80 ^a	79 ^b	80 ^{ab}	80 ^{ab}	81 ^a
Root Chromium (mg kg ⁻¹ root dry)	5.86 ^d	13.89 ^c	19.26 ^b	45.45 ^a	3.0 ^d	15.0 ^c	22 ^b	46 ^a

- حروف انگلیسی غیرمشابه نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار تیمارها در سطح معنی‌دار پنج درصد بر اساس مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون توکی می‌باشد.
- Different letters within rows indicate significant differences according to Tukey's multiple range



شکل ۱- تغییر شاخصه‌های رشد ریشه تحت تأثیر غلظت کلات‌های MGDA و EDDS به تفکیک سطوح آلودگی کروم در وتیور
Figure 1. Variation of root growth parameters affected by MGDA and EDDS levels in soil chromium on vetiver

که این امر به نوبه خود منجر به کاهش تقسیم سلولی و کاهش طول ریشه می‌شود. برخی از محققان حتی بر هم خوردن چرخه سلولی و فرآیندهای آنزیمی تحت سمیت کروم را گزارش کرده‌اند (Sundaramoorthy *et al.*, 2010).

پژوهش‌های انجام شده توسط سایر پژوهشگران نشان داد افزایش غلظت کروم شش ظرفیتی Cr(VI) خاک در ذرت باعث کاهش طول ریشه و تعداد ریشه‌های موئین گردید و ظاهر قهوه‌ای رنگ پدید آورد (Mallick *et al.*, 2010). کاهش طول ریشه به دلیل مسمومیت حاصل از کروم می‌تواند ناشی از کاهش تقسیم سلولی در ریشه باشد. در واقع Cr(VI) سبب اختلال در جذب آب و مواد غذایی شده

اندام هوایی اثرگذار بود. اثر استفاده از کلات‌های زیست-تخریب‌پذیر بر شاخصه‌های طول، قطر، وزن تر و وزن خشک شاخسار نیز معنی‌دار شد ($p < 0.01$)، اما اثرات ترکیبی این عوامل بر خصوصیات رویشی شاخسار معنی-داری نبود (جدول ۳).

تأثیر بر رشد شاخسار وتیور
نتایج حاصل از تأثیر سطوح آلودگی کروم خاک بر رشد شاخسار نشان داد که افزایش میزان کروم تا سطح ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) بر خصوصیات رویشی نظیر طول، وزن تر و وزن خشک

جدول ۳- تجزیه واریانس سطوح آلودگی کروم و کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر در اندام هوایی گیاه وتیور
Table 3. Variance analysis of soil Chromium and biodegradable chelates on vetiver shoot matter

Source of variation	df	Mean square				
		SL (cm)	SD (cm)	SWW (g pot ⁻¹)	SDW (g pot ⁻¹)	SWC (%)
Chromium _(soil)	3	811**	1.22 ^{ns}	2626*	500*	33.66 ^{ns}
EDDS	3	445*	6.53**	20.21 ⁺	282 ⁺	3.66 ^{ns}
Chromium _(soil) ×EDDS	9	61 ^{ns}	0.24 ^{ns}	151 ^{ns}	14 ^{ns}	5.77 ^{ns}
Error	32	114	2.01	1685	256	92.58
Coefficient of variation (%)	-	10.58	13.83	26.02	30.54	14.27
Chromium _(soil)	3	1249**	1.24 ^{ns}	4764**	674**	262**
MGDA	3	566**	1.6 ^{ns}	4284**	616**	41 ^{ns}
Chromium _(soil) ×MGDA	9	56 ^{ns}	2.7 ^{ns}	535 ^{ns}	62 ^{ns}	52 ^{ns}
Error	32	93.8	3.23	949	166	56
Coefficient of variation (%)	-	9.41	18.56	20.79	26.14	10.93

ns و * و ** درصد به ترتیب نشان‌دهنده عدم وجود معنی‌داری، وجود معنی‌داری در سطح‌های ده، پنج و یک درصد در تجزیه واریانس یک طرفه می‌باشد. Significant F-test value was indicated by ⁺($p < 0.1$), *($p < 0.05$), **($p < 0.01$), and ns= not significant obtained by one-way ANOVA analysis. SL: Shoot Length, SD: Shoot Diameter, SWW: Shoot Wet Weight, SDW: Shoot Dry Weight, SWC: Shoot Water Content

سبب بالا رفتن غلظت مقادیر جذب کروم خاک و در نتیجه اثرات تنشی مهار کننده آن بر رشد اندام هوایی می‌شود (Feng *et al.* 2004). مسمومیت ناشی از فلزات سنگین در اندام‌های هوایی گیاهان ممکن است به دلیل مسمومیت با کلات و یا سمیت ناشی از افزایش غلظت فلزات سنگین پس از افزودن کلات باشد (Lee and Sung, 2014; Luo *et al.*, 2015). نتایج حاصله حاکی از کاهش رشد اندام‌های هوایی وتیور در نتیجه استفاده از کلات-های EDDS و MGDA است، به طوری که میانگین وزن خشک اندام هوایی در نتیجه استفاده از کلات‌های ذکر شده به ترتیب ۲۸/۱ و ۳۰/۳ درصد کاهش یافت. همچنین، کاهش طول اندام هوایی در نتیجه استفاده از کلات‌های مذکور به ترتیب به میزان ۲۲/۷ و ۱۴/۵ درصد مشاهده گردید (جدول ۴).

اثر اختصاصی نوع کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر EDDS و MGDA بر شاخصه‌های رشد شاخسار گیاه وتیور نشان-دهنده معنی‌دار بودن تغییرات وزن تر و خشک اندام هوایی و طول شاخسار تحت تأثیر کلات MGDA بود ($p < 0.01$) در حالی که استفاده از کلات EDDS تأثیر کمتری بر کاهش خصوصیات ذکر شده داشت و در عوض بر افزایش قطر یقه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای ایجاد کرد ($p < 0.01$) که این امر در بحث گیاه‌پالایی و حفاظت خاک اهمیت فراوانی دارد (جدول ۳). کاهش زیست‌توده و تغییر خصوصیات رویشی شاخسار وتیور در خاک‌های آلوده به کروم تحت تأثیر نوع کلات‌های مورد استفاده را می‌توان ناشی از ساختار شیمیایی متفاوت کلات‌های EDDS و MGDA دانست که موجب تفاوت در کلات‌کنندگی و آزادسازی کروم از فازهای غیرمحلول به فاز محلول خاک شده و

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات ساده غلظت کروم و کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر بر خصوصیات رشد شاخسار گیاه وتیور
Table 4. Main effects of soil Chromium and biodegradable chelates on shoot matter of vetiver grass

Source of variation	MGDA and Soil Chromium mg/Kg _(soil)				EDDS and Soil Chromium mg/Kg _(soil)			
	0	100	200	400	0	100	200	400
Shoot Length (cm)	115 ^a	106 ^b	95 ^c	93 ^c	112 ^a	98 ^b	97 ^b	94 ^b
Shoot Diameter (cm pot ⁻¹)	9.36 ^a	9.84 ^a	10.05 ^a	9.47 ^a	10.17 ^a	10.09 ^a	10.0 ^a	10.71 ^a
Shoot WET Weight (g pot ⁻¹)	178 ^a	138.5 ^b	138.3 ^b	137.7 ^b	179 ^a	154 ^b	152 ^b	144 ^b
Shoot Dry Weight (g pot ⁻¹)	60 ^a	44 ^b	46 ^b	45 ^b	61.76 ^a	50.96 ^b	50.24 ^b	46.87 ^b
Water Content (%)	65 ^b	66 ^b	67 ^b	75 ^a	65.7 ^a	67.4 ^a	68.7 ^a	69.9 ^a
Shoot Chromium (mg kg ⁻¹ Shoot)	1.79 ^b	1.81 ^b	2.01 ^{ab}	2.65 ^a	1.29 ^c	2.50 ^{bc}	2.6 ^b	2.8 ^a

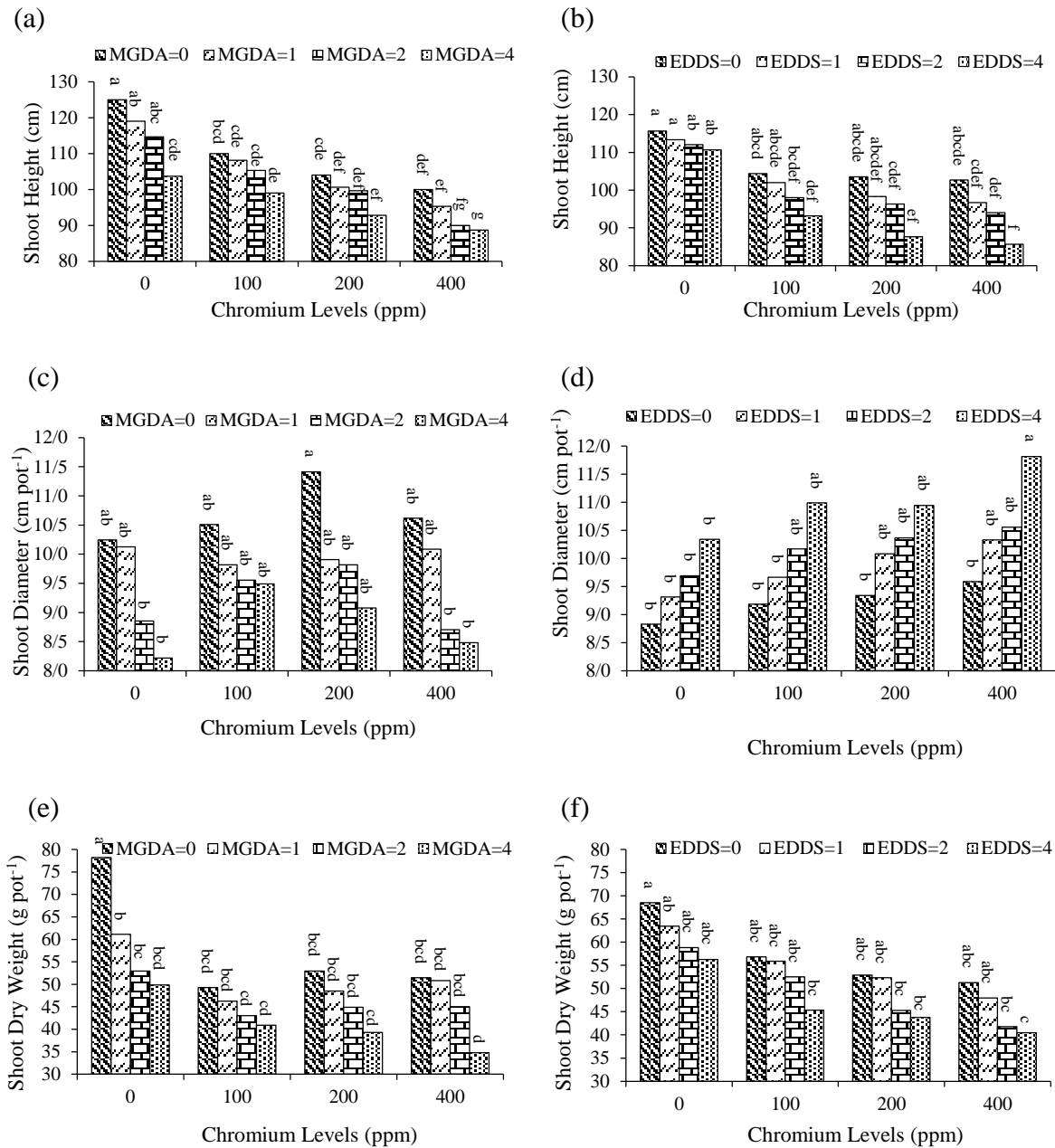
حروف انگلیسی غیرمشابه روی اعداد نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار تیمارها در سطح معنی‌داری پنج درصد بر اساس مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون توکی می‌باشد. Different letters within rows indicate significant differences according to Tukey's multiple range tests.

کاهش می‌دهد. نتایج تحقیقات انجام شده نشان داد در بین ۳۲ گونه گیاهی مورد بررسی، سمیت کروم شش ظرفیتی Cr (VI) تا سطح ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بر رشد ساقه در ۹۴ درصد از گونه‌ها تأثیر نامطلوبی داشته است (Lukina et al. 2016).

بسیاری از پژوهشگران به کاهش زیست‌توده گیاهان در نتیجه استفاده از کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر در محیط‌های آلوده به عناصر سنگین اشاره نموده‌اند، از جمله سوتار و همکاران (Suthar et al. 2014) افزایش قابل توجه غلظت فلزات محلول خاک نظیر کادمیوم، کروم و سرب را در نتیجه افزودن کلات EDDS گزارش کردند ($p < 0.05$) و دلیل اصلی بالا رفتن غلظت این مواد در اندام‌های گیاهی را تشکیل لیگاند فلزات و شبه فلزات با کلات‌ها و آزادسازی این عناصر از برخی از فازهای غیرمحلول و انتقال آنها به فاز محلول در خاک ذکر نمودند که منجر به زیست‌فراهمی هر چه بیشتر آنها در خاک و تغلیظ زیستی این عناصر در ریشه و اندام‌های هوایی می‌گردد. در نتیجه این امر، تنش ناشی از بالا رفتن غلظت فلزات سنگین و تمرکز آنها در اندام‌های گیاه حاصل می‌شود که در نهایت موجب کاهش زیست‌توده گیاه می‌شود (Suthar et al., 2014).

با افزایش غلظت کروم خاک تا سطح ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در محیط ریشه از ارتفاع شاخسار کاسته شد (شکل ۲). این امر ناشی از جذب بیشتر کروم و تنش اکسیداتیو حاصله، مسمومیت‌های حاصله از محدودیت رشد ریشه و بر هم خوردن تعادل جذب آب و عناصر غذایی است. همچنین در نتیجه اضافه شدن هر دو کلات EDSS و MGDA ارتفاع ساقه کاهش یافت که دلیل آن خاصیت کلات‌کنندگی این ترکیبات و انتقال هر چه بیشتر کروم از ریشه به اندام‌های هوایی است. مقایسه تأثیر نوع و غلظت کلات‌های مورد استفاده بر شاخص قطر ساقه حاکی از آن است که کلات EDDS سبب افزایش قطر طوقه در گیاه وتیور گردید، در حالیکه کلات MGDA سبب کاهش قطر طوقه و افزایش ارتفاع ساقه شد (شکل‌های ۲a تا ۲d). در نتیجه بالا رفتن سطوح کروم در خاک و همچنین افزایش غلظت کلات‌های EDSS و MGDA، کاهش وزن خشک شاخسار پدید آمد (شکل‌های ۲e و ۲f).

استفاده از کلات‌های ذکر شده با افزایش قابلیت فراهمی و انحلال کروم، سبب انتقال هر چه بیشتر این عنصر از اندام‌های زیرزمینی به بخش‌های هوایی می‌گردد. بنابراین، کاهش رشد اندام هوایی و ارتفاع ساقه از یک طرف می‌تواند ناشی از محدودیت رشد و توسعه ریشه در نتیجه حضور کروم باشد که منجر به کاهش انتقال آب و مواد غذایی از اندام‌های زیرزمینی به بخش‌های فوقانی می‌شود و از طرف دیگر افزایش انتقال و بالا رفتن غلظت کروم در ساقه و برگ‌ها موجب آسیب مستقیم به بافت‌های حساس گیاهی نظیر مریستم انتهایی و اختلال در فرآیندهایی نظیر فتوسنتز می‌شود که ارتفاع گیاه را



شکل ۲- تغییر شاخصه‌های رشد شاخسار تحت تأثیر غلظت کلات‌های MGDA و EDDS به تفکیک سطوح آلودگی کروم در گیاه وتیور

Figure 2. Variation of shoot growth parameters affected by MGDA and EDDS levels in soil chromium on vetiver grass

خاک، بطور قابل ملاحظه‌ای در ریشه افزایش یافته است. همچنین، اثر استفاده از کلات‌های زیست‌تخریب پذیر EDDS و MGDA بر میزان جذب و تمرکز کروم در ریشه گیاه وتیور معنی‌دار بود ($p < 0.01$) و اثرات ترکیبی این عوامل نیز بر جذب و تمرکز کروم در ریشه گیاه وتیور معنی‌دار گردید (جدول ۵).

بررسی جذب و انتقال کروم در وتیور

غلظت کروم در ریشه

نتایج حاصل از بررسی تاثیرپذیری میزان جذب و تمرکز کروم در ریشه گیاه وتیور بعد از مجاورت در سطوح مختلف آلودگی کروم در خاک نشان داد که این صفت به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) تابع میزان کروم خاک بوده و در اثر افزایش سطح کروم تا ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم

جدول ۵- تجزیه واریانس سطوح آلودگی کروم خاک و کلات‌های زیست تخریب‌پذیر بر نسبت‌های رویشی ساقه و ریشه و غلظت کروم

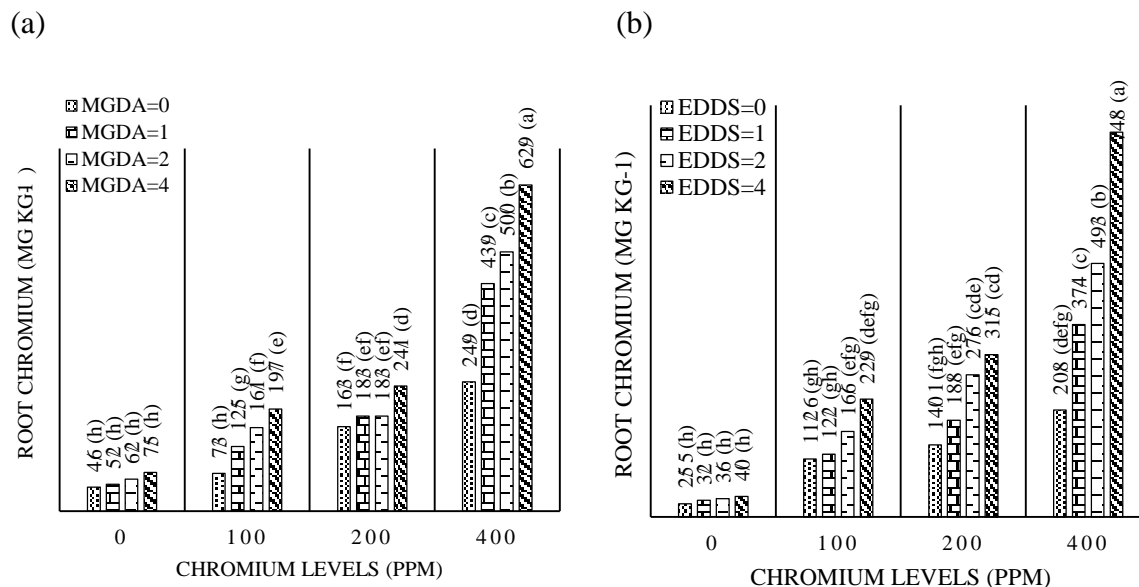
Table 5. Variance analysis of soil Chromium and biodegradable chelates on Shoot & Root matter

Source of variation	df	S/RW Ratio	S/RD Ratio	SCr (ppm)	RCr (ppm)	TF shoot _(Cr) /root _(Cr)	BCF root _(Cr) /soil _(Cr)
Chromium _(soil)	3	0.027 ^{ns}	0.048 ^{ns}	5.36 ^{**}	4016 ^{**}	0.007 ^{**}	0.06 ^{**}
EDDS	3	0.017 ^{ns}	0.085 ^{ns}	14.35 ^{**}	894 ^{**}	0.002 ^{**}	0.01 ^{**}
Chromium _(soil) ×EDDS	9	0.013 ^{ns}	0.066 ^{ns}	1.58 ^{**}	235 ^{**}	0.005 ^{**}	0.04 ^{**}
Error	32	0.06	0.156	0.42	85.52	0.011	0.02
Coefficient of variation (%)	-	35.73	33.76	28.74	41.62	76.0	50.26
Chromium _(soil)	3	0.021 ^{ns}	0.078 ^{ns}	1.94 ^{**}	3521 ^{**}	0.007 ^{**}	0.05 ^{**}
MGDA	3	0.003 ^{ns}	0.006 ^{ns}	15.39 ^{**}	481 ^{**}	0.003 ^{**}	0.02 ^{**}
Chromium _(soil) ×MGDA	9	0.018 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.72 ^{ns}	130 ^{**}	0.008 [*]	0.05 [*]
Error	32	0.028	0.11	1.28	5.43	0.008	0.05
Coefficient of variation (%)	-	28.27	32.84	54.77	11.03	74.71	60.13

ns و * و ** درصد به ترتیب نشان‌دهنده عدم وجود معنی‌داری، وجود معنی‌داری در سطح‌های ده، پنج و یک درصد در تجزیه واریانس یک طرفه می‌باشد. Significant F-test value was indicated by * (p<0.1), ** (p<0.05), and ns= not significant obtained by one-way ANOVA analysis. S/RW: Shoot/Root Wet Ratio, S/RD: Shoot/Root Dry Ratio, SCr: Shoot Chromium, RCr: Root Chromium, TF: Translocation Factor, BCF: Bioconcentration Factor

در نتیجه استفاده از تیمار ۴ میلی‌مول در کیلوگرم کلات EDDS به تفکیک سطوح آلودگی کروم خاک از ۰ تا ۴۰۰ ppm، بالاترین غلظت‌های کروم جذب شده در ریشه به ترتیب ۴/۰، ۲۲/۹، ۳۱/۵ و ۷۴/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاه بود. استفاده از غلیظ‌ترین سطح کلات EDDS یعنی ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک در محیط آلوده به کروم با غلظت‌های ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ ppm، سبب جذب و تمرکز به ترتیب ۱/۵، ۲/۷، ۲/۲۵ و ۲/۹ برابر کروم نسبت به شرایط عدم استفاده از کلات گردید (شکل ۳b). از مقایسه این دو کلات زیست‌تخریب‌پذیر می‌توان چنین استنباط کرد که بیشترین تجمع کروم در ریشه گیاه وتیور در نتیجه استفاده از کلات EDDS حاصل شده است و میزان جذب و تمرکز کروم در این شرایط بالاتر بوده است. نتایج تحقیقات انجام شده نشان داد عملیات بهسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در نتیجه استفاده از کلات‌ها نه تنها باعث افزایش زیست-فراهمی این عناصر می‌شود، بلکه روند جذب آنها را از خاک به ریشه بسته به نوع فلز، گیاه و میزان غلظت کلات بهبود می‌بخشد (Nowack et al. 2006).

تجزیه بافت گیاهی حاکی از افزایش جذب کروم در نتیجه کاربرد هر دو کلات EDDS و MGDA در ریشه وتیور است. افزایش غلظت کلات‌ها سبب افزایش جذب کروم توسط ریشه شد به طوری که در خصوص کلات MGDA و EDDS با افزایش غلظت کلات‌ها از ۱ تا ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک، میانگین مقادیر به ترتیب از ۱۳/۲۸ به ۲۸/۵۵ و ۱۳ به ۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک افزایش یافت. حداکثر میزان جذب کروم توسط ریشه در سطح آلودگی ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و در نتیجه استفاده از هر دو کلات با غلظت ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک حاصل شد که میزان استخراج کروم از خاک و جذب آن در ریشه توسط کلات EDDS از MGDA بیشتر بود. استفاده از تیمار ۴ میلی‌مول در کیلوگرم از کلات MGDA به تفکیک سطوح آلودگی کروم خاک از ۰ تا ۴۰۰ ppm سبب استخراج، جذب و تمرکز به ترتیب ۷/۵، ۱۹/۷، ۲۴/۱ و ۶۲/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاه شد. کاربرد غلیظ‌ترین سطح کلات MGDA یعنی ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک در محیط آلوده به کروم با غلظت‌های ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ ppm به ترتیب سبب جذب و تمرکز ۱/۲۶، ۲/۰، ۱/۴۸ و ۲/۵ برابر کروم نسبت به شرایط عدم استفاده از کلات گردید (شکل ۳a).



شکل ۳- میزان کروم جذب شده در ریشه تحت تأثیر غلظت و نوع کلات‌ها به تفکیک سطوح آلودگی کروم در گیاه وتیور

Figure 3. Variation of root Chromium concentration affected by biodegradable chelates and soil chromium levels on vetiver grass

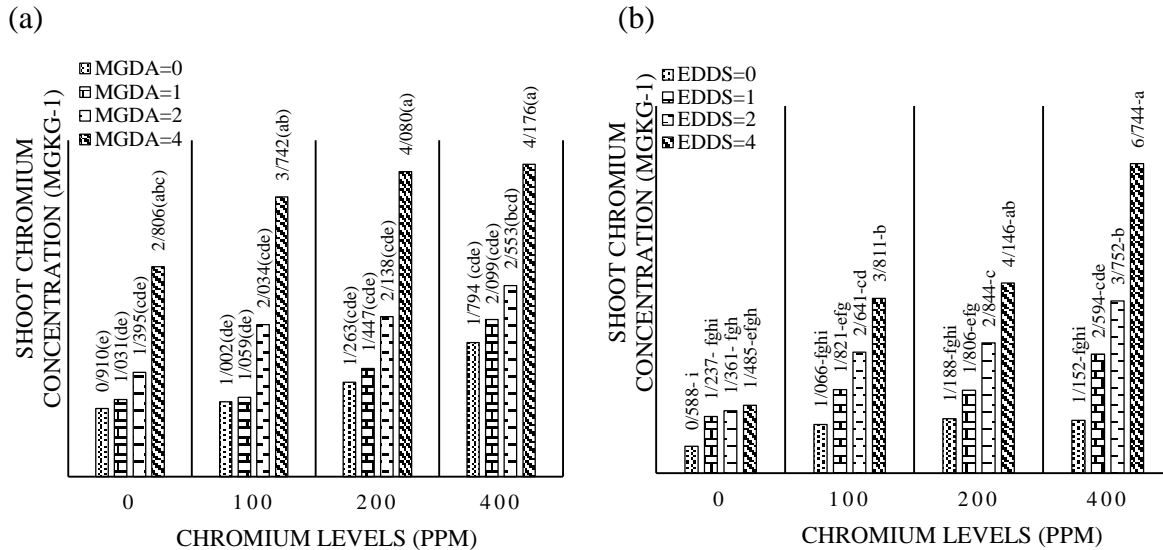
سطح غلظت هر دو کلات، میزان انتقال و تمرکز کروم در شاخسار افزایش یافت ($p < 0/01$). اثرات ترکیبی این عوامل یعنی اثر کروم خاک و اعمال کلات‌ها در کلات EDDS بر جذب و تمرکز کروم در شاخسار گیاه وتیور معنی‌دار گردید ($p < 0/01$), اما در خصوص کلات MGDA، معنی‌دار نبود (جدول ۵).

تجزیه بافت گیاهی حاکی از تأثیرپذیری غلظت کروم شاخسار از کاربرد هر دو کلات EDDS و MGDA است. همچنین، افزایش غلظت کلات‌ها، سبب افزایش غلظت کروم شاخسار گردید. به طوری که میانگین میزان کروم جذب شده در کلات MGDA تا ۳ برابر و در تیمار EDDS تا ۳/۶ برابر افزایش نشان داد که این امر بیانگر تأثیر بیشتر کلات EDDS در مقایسه با MGDA است. افزایش سطح غلظت کلات‌های ذکر شده از ۱ تا ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک، سبب انتقال بیشتر کروم از ریشه به شاخسار گردید و حداکثر مقادیر در سطح آلودگی ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و در نتیجه استفاده از تیمار ۴ میلی‌مول از هر دو کلات حاصل شد. میانگین مقادیر کروم شاخسار در این شرایط برای کلات MGDA و EDDS به ترتیب از ۱/۲۰ به ۳/۷۰ و از ۰/۹۹ به ۳/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه افزایش یافت که به ترتیب حاکی از افزایش ۳۰۸ و ۳۵۸ درصدی غلظت کروم شاخسار در نتیجه استفاده از این دو کلات است (شکل ۴).

اثر بخشی کلات EDDS بر زیست‌فراهمی نیکل توسط یوه و همکاران (Yuh *et al.*, 2017) نشان داد تیمار ترکیبی جیبرلین و کلات EDDS تأثیر قابل توجهی بر گیاه‌پالایی نیکل در خاک آلوده به سرب و نیکل داشت. به طوری که متوسط غلظت نیکل در آفتابگردان حدود دو برابر بیشتر از تیمار شاهد بود. همچنین اثر بخشی کلات EDDS در حلالیت سرب و کادمیوم خاک و افزایش تغلیظ گیاهی توسط وتیور و فستوکا توسط آتین‌تی و همکاران (Attinti *et al.*, 2017) حاکی از افزایش جذب کادمیوم در نتیجه کاربرد کلات EDDS در ریشه وتیور است.

غلظت کروم در شاخسار

بررسی نتایج حاصل از تأثیرپذیری میزان غلظت کروم شاخسار از سطوح مختلف آلودگی کروم خاک که به دنبال انتقال و تمرکز آن از ریشه به شاخسار گیاه وتیور پدید می‌آید، نشان داد این صفت به طور معنی‌داری افزایش یافته و تابعی از میزان غلظت کروم خاک است ($p < 0/01$). این شاخص با افزایش سطح کروم خاک، بطور قابل ملاحظه‌ای در شاخسار افزایش یافت و بالاترین انتقال و تمرکز آن در سطح کروم ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک حاصل شد. همچنین، اثر استفاده از کلات‌های زیست-تخریب‌پذیر EDDS و MGDA بر میزان غلظت کروم در شاخسار گیاه وتیور معنی‌دار بود. به طوری که با افزایش



شکل ۴- میزان کروم جذب شده در شاخسار تحت تأثیر غلظت و نوع کلات‌ها به تفکیک سطوح آلودگی کروم در گیاه وتیور
Figure 4. Variation of shoot Chromium concentration affected by biodegradable chelates and soil chromium levels on vetiver grass

نتیجه افزایش کلات EDDS، میزان انتقال سرب از ریشه به ساقه وتیور افزایش یافت و میانگین غلظت سرب در اندام هوایی از ۵۳ به ۲۰۳ درصد و در ریشه از ۷۳ به ۸۴ درصد افزایش یافت. همچنین، استفاده از این کلات باعث شد غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی وتیور نسبت به فستوکا ۸/۳ برابر شود. نتایج پژوهش انجام شده توسط یین و همکاران (Yin *et al.*, 2015) نشان داد به دلیل قرارگرفتن فلزات سنگین در بافت‌های اسفنجی بیرون سلول و همچنین ترسیب آنها در واکوئل‌های مزوفیل درون سلول، مواد کلات‌کننده می‌توانند از طریق مسیرهای آپوپلاست و سیمپلاست میزان انتقال فلزات سنگین از اندام‌های زیرزمینی به قسمت فوقانی را تسهیل کنند.

بررسی شاخصه های زیستی

فاکتور تغلیظ زیستی ریشه (BCF)

چنان‌که ذکر شد، فاکتور تغلیظ زیستی ریشه عبارتست از نسبت غلظت کروم ریشه در گیاه نسبت به غلظت کروم در خاک که بیانگر میزان کروم جذب شده توسط ریشه از محیط آلوده به کروم شش ظرفیتی می‌باشد. از آنجا که میزان فراهمی کروم در خاک‌های آلوده به کرومات در مقایسه با مقدار کل کروم خاک ناچیز است، از این‌رو، فاکتور تغلیظ زیستی نیز در تمامی تیمارها برای ریشه گیاه وتیور کمتر از یک بود. نتایج حاصل از بررسی

استفاده از تیمار ۴ میلی‌مول کلات MGDA در سطوح کروم ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ ppm به ترتیب سبب جذب و تمرکز ۰/۰۸، ۳/۷۳، ۳/۲۳ و ۲/۳۳ برابر کروم نسبت به شرایط عدم استفاده از کلات گردید (شکل ۴a). در شرایط مشابه، تیمار ۴ میلی‌مول کلات EDDS میزان انتقال و تمرکز کروم در شاخسار به ترتیب ۲/۵۲، ۴/۹۷، ۲/۴۹ و ۵/۵ برابر نسبت به شرایط عدم استفاده از کلات می‌باشد (شکل ۴b) این مقایسه بیانگر برتری کلات EDDS نسبت به کلات MGDA در انتقال هر چه بیشتر کروم از ریشه به اندام هوایی گیاه است. دلیل افزایش غلظت کروم اندام هوایی ممکن است به‌واسطه حذف Ca^{2+} و Fe^{2+} و سایر کاتیون‌های دو ظرفیتی غشاء پلاسمایی و تخریب موانع فیزیولوژیکی ریشه‌ها باشد. به‌طوری‌که فلزات کلات شده که به درون ریشه‌ها وارد شده‌اند، به میزان بیشتری به شاخه‌ها منتقل می‌گردد (Luo *et al.*, 2005; Lan *et al.*, 2013).

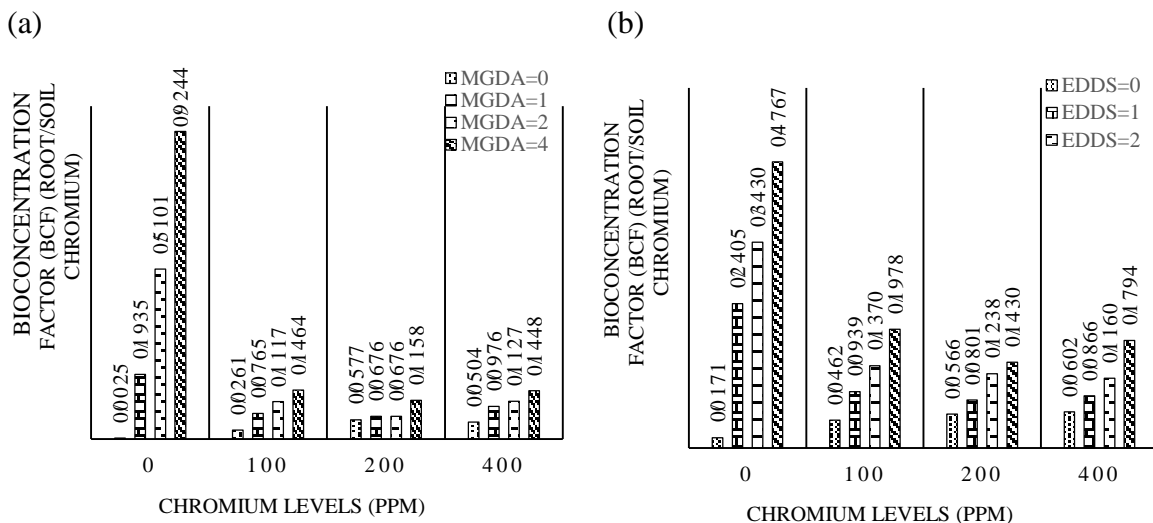
این نتایج با گزارشات قبلی که حاکی از تأثیر عوامل کلات‌کننده بر جذب و انتقال عناصر سنگین از ریشه وتیور به ساقه است، مطابقت دارد (Glinska *et al.*, 2014; Freitas *et al.*, 2013; Zhivotovsky *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2011). نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده توسط آتین‌تی و همکاران (Attinti *et al.*, 2017) نیز نشان‌دهنده نقش مؤثر کلات EDDS در انتقال فلزات سنگین از ریشه به شاخسار وتیور است. به‌طوری‌که در

افزایش یافت. علت افزایش این نسبت چنان که ذکر شد به دلیل افزایش خاصیت چنگاله‌کنندگی کلات‌هاست که موجب افزایش جذب کروم از خاک و تمرکز بیشتر آن در ریشه و تیور می‌شود (شکل‌های ۵a و ۵b).

مقایسه تغییرات فاکتور تغلیظ زیستی در خصوص کلات EDDS نشان داد بیشترین تغییرات مربوط به استفاده از تیمار ۴ میلی‌مول در کیلوگرم از این کلات است. به طوری که در سطوح آلودگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ ppm به ترتیب این فاکتور ۰/۱۹۷، ۰/۱۴۳ و ۰/۱۷۹ می‌باشد که نسبت به تیمار شاهد (عدم استفاده از کلات) به ترتیب ۳۲۸، ۱۵۲ و ۱۹۸ درصد افزایش داشت. تغییرات فاکتور تغلیظ زیستی در خصوص کلات MGDA نیز حاکی از آن است که بیشترین تغییرات حاصله مربوط به استفاده از تیمار ۴ میلی‌مول در کیلوگرم است. به طوری که در سطوح آلودگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ ppm به ترتیب این فاکتور ۰/۱۴۶، ۰/۱۱۶ و ۰/۱۴۹ می‌باشد که نسبت به تیمار شاهد (عدم استفاده از کلات) به ترتیب ۴۶۱، ۱۰۱ و ۱۸۷ درصد افزایش نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر فاکتور تغلیظ زیستی ریشه حاکی از برتری کلات EDDS در مقایسه با کلات MGDA است به این ترتیب بالاترین مقادیر مشاهده شده شاخص BCF مربوط به کلات EDDS است و تیمار ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک بیشترین میزان اثرگذاری را بر شاخص BCF در سطوح تیمار ۱۰۰ و ۴۰۰ ppm داشت (شکل ۵).

تأثیرپذیری فاکتور تغلیظ زیستی در سطوح مختلف آلودگی کروم خاک نشان داد این شاخص به طور معنی‌داری تابع میزان کروم خاک است و در نتیجه افزایش سطح کروم خاک تا سطح ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، این فاکتور افزایش می‌یابد. این امر بدلیل جذب بیشتر کروم در ریشه در مقایسه با انتقال آن به شاخسار می‌باشد ($p < 0/01$). اثر استفاده از نوع و غلظت کلات‌های زیست-تخریب پذیر EDDS و MGDA بر جذب کروم توسط ریشه از خاک نیز معنی‌دار بود و این فاکتور در هر یک از سطوح آلودگی کروم خاک، در نتیجه افزایش غلظت کلات‌ها از ۱ تا ۴ میلی‌مول افزایش یافت ($p < 0/01$). اثرات ترکیبی این عوامل یعنی تلفیق اثرات سطوح آلودگی کروم خاک و اعمال سطوح مختلف کلات‌ها بر فاکتور تغلیظ زیستی کروم توسط ریشه گیاه و تیور نیز معنی‌دار ($p < 0/01$) بود (جدول ۵).

بررسی نسبت میزان کروم ریشه به کروم خاک، حاکی از تأثیرپذیری فاکتور تغلیظ زیستی از کاربرد هر دو کلات EDDS و MGDA بود. اثر کلات‌کنندگی این ترکیبات موجب افزایش میزان زیست‌فراهمی کروم در خاک و در نتیجه افزایش جذب آن در ریشه شد. افزایش غلظت هر دو کلات در سطوح مختلف کروم، سبب افزایش فاکتور تغلیظ زیستی گردید. به طوری که در تمامی سطوح آلودگی کروم خاک در نتیجه افزایش غلظت کلات‌ها از ۱ تا ۴ میلی‌مول، فاکتور تغلیظ زیستی کروم در ریشه و تیور



شکل ۵- تغییرات فاکتور تغلیظ زیستی ریشه تحت تأثیر غلظت و نوع کلات‌ها به تفکیک سطوح آلودگی کروم در گیاه و تیور

Figure 5. Variation of root bioconcentration factor (BCF) affected by biodegradable chelates and soil chromium levels on vetiver grass

فاکتور انتقال (TF)

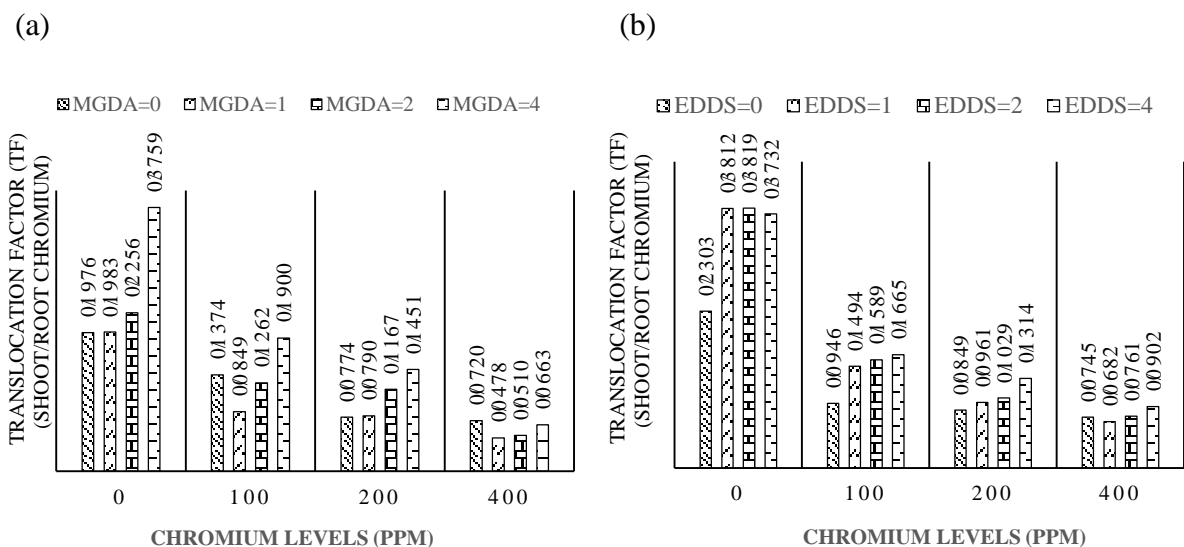
چنان‌که ذکر شد، فاکتور انتقال عبارتست از نسبت غلظت کروم در بخش هوایی به غلظت کروم در بخش ریشه‌ای که بیانگر میزان انتقال کروم از ریشه به شاخسار گیاه وتیور است. برای یک عنصر سنگین مشخص باید مقدار فاکتور انتقال بیش از یک باشد ($TF > 1$) تا گزینه مناسبی برای مقاصد گیاه‌پالایی باشد در غیر این صورت، برای تثبیت زیستی مناسب شناخته می‌شود (Fitz and Wenzel, 2002; Rizzi et al., 2004).

نتایج حاصل از بررسی تاثیرپذیری فاکتور انتقال در سطوح مختلف آلودگی کروم خاک نشان داد این شاخص به‌طور معنی‌داری تابع میزان کروم خاک است و در نتیجه افزایش سطح کروم تا ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و با وجود انتقال بخشی از کروم جذب شده از ریشه به شاخسار، فاکتور انتقال کاهش می‌یابد. این امر بدلیل جذب بیشتر کروم در ریشه در مقایسه با انتقال آن به شاخسار می‌باشد ($p < 0/01$). اثر استفاده از نوع و غلظت کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر EDDS و MGDA بر انتقال کروم از ریشه به شاخسار وتیور نیز معنی‌دار بود و فاکتور انتقال در هر یک از سطوح آلودگی کروم خاک (۰، ۱۰۰، ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) در نتیجه افزایش غلظت کلات‌ها از ۱ تا ۴ میلی‌مول افزایش یافت ($p < 0/01$). اثرات ترکیبی این عوامل یعنی تلفیق اثرات سطوح آلودگی کروم خاک و اعمال سطوح مختلف کلات‌ها نیز بر فاکتور انتقال کروم معنی‌دار ($p < 0/01$) بود (جدول ۵).

مقایسه میزان تجمع کروم در ریشه و ساقه نشان داد در یک سطح مشخص از آلودگی کروم ۶ ظرفیتی در خاک و بدون استفاده از کلات‌های شیمیایی، تمرکز بیشتر کروم در ریشه پدید آمد. به‌همین دلیل، این گیاه در شرایط طبیعی بر اساس فرآیند تغلیظ زیستی به پاکسازی محیط‌های آلوده به کرومات می‌پردازد. این نتایج با یافته‌های بانرجی و همکاران (Banerjee et al., 2016) مبنی بر ذخیره‌سازی عناصر سنگین در ریشه گیاه وتیور و معرفی این گیاه به عنوان استخراج‌گر گیاهی^۱ جهت

تجمع فلزات سنگین هماهنگی دارد. نتایج حاصله همچنین حاکی از آن است که افزایش میزان کروم خاک تا سطح ۴۰۰ ppm و بدون حضور کلات‌کننده‌های EDDS و MGDA سبب کاهش فاکتور انتقال از ۰/۲۵ تا ۰/۷۶۹ می‌شود و این مطلب نشان‌دهنده تمرکز بیشتر کروم در ریشه است. نتایج مطالعات انجام شده قبلی نیز حاکی از آنست که کروم عنصری کم‌تحرک در ریشه گیاه است و در شرایط معمول، به میزان بسیار ناچیزی به اندام‌های هوایی گیاه انتقال می‌یابد. بنابراین، غلظت آن در شاخسار گاهی ۰/۰۱ غلظت ریشه است و بیشترین میزان تراکم و ذخیره‌سازی کروم در ریشه و در دیواره سلولی و سیتوپلاسم آن گزارش شده است (Shanker et al., 2005; Shukla et al., 2007).

تجزیه بافت وتیور حاکی از تاثیرپذیری فاکتور انتقال از هر دو کلات EDDS و MGDA داشت. اثر چنگاله‌کنندگی این ترکیبات، نشان‌دهنده افزایش زیست‌فراهمی کروم خاک و در نتیجه جذب و انتقال کروم در ریشه و شاخسار است. استفاده از تیمار ۴ میلی‌مول کلات EDDS به تفکیک سطوح آلودگی کروم خاک بین ۰ تا ۴۰۰ ppm باعث شد تا فاکتور انتقال به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۱۷، ۰/۱۳ و ۰/۰۹ شود که این امر نشان از بالا رفتن غلظت کروم ریشه و تاثیرپذیری نسبت انتقال از افزایش غلظت کروم در خاک و ریشه است (شکل ۶b). در نتیجه استفاده از کلات MGDA، فاکتور انتقال به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۱۹، ۰/۱۴ و ۰/۰۶ شد (شکل ۶a). افزایش غلظت هر دو کلات سبب افزایش فاکتور انتقال گردید که این امر به‌دلیل افزایش حرکت کروم از ریشه به شاخسار است. به عبارتی اگرچه غلظت کروم ریشه و شاخسار هر دو افزایش یافته‌اند، اما میزان انتقال کروم از ریشه به ساقه نسبتاً قابل ملاحظه است. به نظر می‌رسد ترکیبات کلاته شده با کروم با سهولت بیشتری از ریشه به شاخسار انتقال می‌یابند و به همین دلیل میزان انتقال کروم در چنین شرایطی افزایش یافته است.



شکل ۶- تغییرات فاکتور انتقال تحت تأثیر غلظت و نوع کلات‌ها به تفکیک سطوح آلودگی کروم در گیاه وتیور

Figure 6. Variation of translocation factor (TF) affected by biodegradable chelates and soil chromium levels on vetiver grass

کروم در ریشه و شاخسار گیاه را بهبود می بخشد. با افزایش غلظت کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر MGDA و EDDS تا سطح ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک، روند افزایش کروم در ریشه و ساقه افزایش یافت. برتری کلات EDDS در جذب و انتقال کروم به شاخسار وتیور در شرایط مشابه، نشان‌دهنده کارایی بالاتر آن نسبت به کلات MGDA است. مقادیر بالاتر شاخص تغلیظ زیستی (BCF) در وتیور گراس در تیمارهای EDDS در مقایسه با MGDA نشان داد استفاده از نسل جدید کلات‌کننده‌های زیست‌تخریب‌پذیر در فرآیند تثبیت گیاهی کروم ۶ ظرفیتی می‌تواند یک روش عملی و موفقیت‌آمیز برای افزایش کارایی استخراج کروم از خاک توسط وتیور گراس باشد. کلات EDDS با غلظت ۴ میلی‌مول در کیلوگرم خاک، به عنوان یک ترکیب شیمیایی کارآمد برای افزایش استخراج گیاهی کروم توسط وتیور گراس تأیید گردید. افزایش غلظت کلات EDDS سبب افزایش شاخص انتقال (TF) در وتیور گراس شد که این امر در فرآیند گیاه‌پالایی و انتقال کروم ۶ ظرفیتی به اندام هوایی و شاخسار گیاه وتیور حائز اهمیت است و می‌توان چنین استنباط کرد که استفاده از کلات EDDS تا حدی سبب بهبود کارایی گیاه-پالایی کروم در وتیور شده و این گیاه را تا حدی از یک انباشتگر طبیعی به گیاهی با قابلیت انتقال فلزات سنگین به اندام‌های هوایی تبدیل می‌کند. استفاده از هر دو کلات سبب کاهش شاخص‌های رشد ریشه گردید. اما کلات

نتایج استفاده از کلات‌های زیست‌تخریب‌پذیر EDDS و MGDA نشان داد که این کلات‌ها به انتقال و تمرکز بیشتر کروم از ریشه به شاخسار کمک می‌کنند و این امر اهمیت استفاده از این دو کلات را در انتقال کروم و در مبحث گیاه‌پالایی وتیور نشان می‌دهد. با این حال، از آنجا که در یک سطح مشخص از کروم خاک، هر قدر فاکتور انتقال بزرگتر باشد، نشان‌دهنده میزان انتقال بیشتر کروم از ریشه به شاخسار است. به همین دلیل، نتیجه می‌شود کارایی کلات EDDS نسبت به MGDA در انتقال کروم از ریشه و تمرکز آن در شاخسار بیشتر بوده و استفاده از این کلات، تا حدی فاکتور انتقال کروم در وتیور را افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش، اثربخشی مطلوب کلات‌های شیمیایی زیست‌تخریب‌پذیر MGDA و EDDS را به عنوان ترکیبات سازگار با محیط‌زیست با هدف بهبود پالایش فلز سنگین کروم به کمک گیاه وتیور گراس در خاک‌های آلوده به کرومات اثبات نمود. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که افزودن این کلات‌ها به ریزوسفر خاک آلوده به کروم ۶ ظرفیتی علاوه بر افزایش زیست‌فراهمی کروم در خاک، سبب افزایش کارایی جذب و پالایش کرومات از خاک توسط وتیور شده و انتقال و انباشت

تشکر و قدردانی

این مطالعه با اعطای کمک هزینه فرصت تحقیقاتی شماره ۲۳۱۵۹۱ از سوی وزارت علوم، تحقیقات و فن‌آوری به دانشگاه زنجان و کمک‌های همه جانبه مسئولان محترم دانشگاه زنجان انجام شد که از یکایک این عزیزان قدردانی می‌شود. از حمایت‌های ارزنده مدیریت محترم مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان در میزبانی مطالعه در گلخانه تحقیقاتی کشت بافت و انجام آزمایشات در آزمایشگاه تحقیقاتی بخش خاک و آب کمال تشکر و امتنان را دارد.

MGDA در مقایسه با EDDS، ممانعت کمتری در کاهش شاخصه‌های رشد نظیر حجم و چگالی ریشه، ارتفاع ساقه، زیست‌توده ساقه و ریشه ایجاد نمود. نکته بسیار جالب مهم در خصوص استفاده از کلات EDDS، افزایش قطر ساقه و ضخامت بیشتر طوقه در نتیجه افزایش میزان غلظت کلات مذکور است. هر چند، در چنین شرایطی ارتفاع ساقه کاهش می‌یابد، اما این یافته در مباحث حفاظت خاک و گیاه‌پالایی به کمک وتیور دارای اهمیت فراوان است.

References

- Abbaszadeh F., Jalali V.R., and Jafari A. 2018. Investigating the source of some heavy metals using cluster and factor analysis techniques in soils of Hormoz Island. *Applied Soil Research*, 6(1): 13-24. (In Persian)
- Ali H., Khan E., and Sajad M.A. 2013. Phytoremediation of heavy metals - concepts and applications. *Chemosphere Elsevier publisher*. 91: 869-881.
- Attinti R., Barrett K., Datta R. & Sarkar D. 2017. Ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) enhances phytoextraction of lead by vetiver grass from contaminated residential soils in a panel study in the field. *Environmental Pollution*, 225: 524-533. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.088>
- Banerjee R., Goswami P., Pathak K., and Mukherjee A. 2016. Vetiver grass: an environment clean-up tool for heavy metal contaminated iron ore mine-soil. *Ecological Engineering*, 90: 25-34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.027>.
- Feng M. J., Shen R. F., Nagao S., & Tanimoto F. 2004. Aluminum targets elongating cell wall by reducing cell wall extensibility in wheat roots. *Plant Physiology*, 5: 583-589.
- Fitz W.J., Wenzel W.W. 2002. Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. *J. Biotechnol.* 99: 259-278.
- Freitas E.W., Nascimento C.W., Souza A., Silva F.B. 2013. Citric acid-assisted phytoextraction of Pb: a field experiment. *Chemosphere*, 92: 213-217.
- Glinska S., Michlewsak S., Gapinska M., Seliger P., Bartosiewicz R. 2014. The effect of EDTA and EDDS on lead uptake and localization in hydroponically grown *Pisum sativum* L. *Acta Physiol. Plant.* 36: 399-408.
- Ghosh M., Paul J., Jana A., De A., and Mukherjee A. 2015. Use of the grass, *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash for detoxification and phytoremediation of soils contaminated with fly ash from thermal power plants. *Ecol. Eng.*, 74: 258-265.
- Khodaverdiloo H., and Hamzenejad Taghliabad R. 2014. Phytoavailability and potential transfer of Pb from a salt-affected soil to *Atriplex verucifera*, *Salicornia europaea* and *Chenopodium album*. *Chemistry and Ecology*, 30(3): 216-226.
- Lee J., Sung K., 2014. Effects of chelates on soil microbial properties, plant growth and heavy metal accumulation in plants. *Ecol. Eng.* 73: 386-394.
- Lan J., Zhang S., Lin H., Li T., Xu X., Li Y., Jia Y., and Gong G. 2013. Efficiency of biodegradable EDDS, NTA and APAM on enhancing the phytoextraction of cadmium by *Siegesbeckia orientalis* L. grown in Cd-contaminated soils. *Chemosphere*, 91(9):1362-1367.
- Luo C., Shen Z., Li X. 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere*, 59: 1-11.
- Luo C.L., Wang S.R., Wang Y., Yang R.X., Zhang G., Shen Z.G. 2015. Effects of EDDS and plant-growth-promoting bacteria on plant uptake of trace metals and PCBs from e-waste contaminated soil. *J. Hazard. Mater.* 286: 379-385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.116>.

- Mallick S., Sinam G., Mishra R.K., Sinha S. 2010. Interactive effects of Cr and Fe treatments on plants growth, nutrition and oxidative status in *Zea mays* L. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 73: 987-995.
- Mingorance M.D., Oliva S.R. 2006. Heavy Metals Content in N. Oleander leaves as Urban Pollution Assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119: 57-68.
- Nowack B., Schulin R., & Robinson B. H. 2006. Critical assessment of chelant-enhanced metal phytoextraction. *Environmental Science & Technology*, 40: 5225-5232.
- Okeke P.N., Okeke F.N. and Akande S.F. 2011. *Senior Secondary Physics*. Current Edition. p. 94. Macmillan Nigeria Publishers Limited, Lagos and Ibadan. ISBN 0-333-37571-8
- Rizzi L., Petruzzelli G., Poggio G., Guidi G.V. 2004. Soil physical changes and plant availability of Zn and Pb in a treatability test of phytostabilization. *Chemospher*, 57: 1039-1046.
- Roy-Chowdhury A., Datta R., and Sarkar D. 2018. Chapter 3.10 – Heavy Metal Pollution and Remediation. *Green Chemistry*, 359-373. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00015-7>
- Safari Sinangani A.A., and Jafari Monsef M. 2017. Effect of cadmium pollution on soil organic carbon particle size fractions in Hamadan and Lahigan soils treated with wheat straw. *Applied Soil Research*, 5(1): 1-12. (In Persian)
- Samantary S. 2002. Biochemical responses of Cr-tolerant and Cr-sensitive mung bean cultivars grown on varying levels of chromium. *Chemosphere*, 47: 1065-1072.
- Shanker A.K., Cervantes C., Loza-Tavera H., Avudainayagam S. 2005. Chromium toxicity in plants. *Environ. Int.* 31: 739-753.
- Shukla O., Dubey S., Rai U. 2007. Preferential accumulation of cadmium and chromium: toxicity in *Bacopa monnieri* L. under mixed metal treatments. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 78: 252-257.
- Singh S., Fulzele D. P. & Kaushik, C.P. 2016. Potential of *Vetiveria zizanioides* L. Nash for phytoremediation of plutonium (²³⁹Pu): Chelate assisted uptake and translocation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 132: 140-144. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.05.006>.
- Sparks D.L. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, San Diego, CA, 352 p.
- Suthar S., Sajwan P., Kumar K. 2014. Vermiremediation of heavy metals in wastewater sludge from paper and pulp industry using earthworm *Eisenia fetida*. *Ecotox. Environ. Safety*, 109: 177-184.
- Vigliotta G., Matrella S., Ciatelli A., Guarino F., and Castiglione S. 2016. Effects of heavy metals and chelants on phytoremediation capacity and on rhizobacterial communities of maize. *Journal of Environmental Management*, 179(1): 93-102.
- Yuh T.Y., Yuan C.S., and Lin Y.C. 2017. Biostimulator and biodegradable chelator to pytoextract stubborn soil Pb and Ni. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71: 174-188. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.12.002>
- Zhao L., Li T., Yu H., Zhang X., and Zheng Z. 2016. Effects of [S, S]-ethylenediaminedisuccinic acid and nitrilotriacetic acid on the efficiency of Pb phytostabilization by *Athyrium wardii* (Hook.) grown in Pb-contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 182(1): 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.042>.
- Zheng L.J., Liu X.M., Lutz-Meindl U., Peer T. 2011. Effects of lead and EDTA assisted lead on biomass, lead uptake and mineral nutrients in *Lespedeza cninensis* and *Lespedeza davidii*. *Water Air Soil Pollut.* 14: 57-68.
- Zhivitovsky O.P., Kuzovkina Y.A., Schulthess C.P., Morris T., Pettinelli D. 2013. Lead uptake and translocation by willows in pot and field experiments. *Int. J. Phytoremediation* 8: 731-749.
- Zoya, G. Iftikhar, H. Bhatti, M. Minullah, N. Sharma, I. Kazi, A. & Ahmad. P. 2016. Phytoextraction. *Plant Metal Interaction*, pages 385-409.

Effect of Biodegradable Chelates MGDA and EDDS on Phytoextraction of Chromium by Vetiver Grass in Chromate Contaminated Soils

Mahdi Ahmadian^{1*}, Ahmad Golchin², Parisa Alamdari³, Ghasem Asadian⁴

(Received: December 2020 Accepted: January 2020)

Abstract

The combined use of chemical chelates along with the planting of hyperaccumulator plants has been suggested as an effective method to increasing the extraction efficiency of heavy metals and helping to improve contaminated soils. Vetiver is known as a resistant plant to salinity, drought and high concentrations of heavy metals. Recently, the use of biodegradable chelates in soil refining from heavy metals has been considered by researchers. This study was designed to investigate the effect of different levels of biodegradable chelates Ethylenediamine-N,N'-disuccinic acid (EDDS) and methylglycinediacetic acid (MGDA) on increasing the adsorption of Cr(IV) by Vetiver grass. Chelates concentration were defined at four levels (0, 1, 2, 4 mmol/Kg soil) and soil chromium contamination at four levels of potassium dichromate (0, 100, 200, 400 ppm). The results showed that the vegetative growth characteristic decreased with increasing soil chromium and chelates concentration. The use of 4 Mmol of MGDA on soil chromium concentrations (0, 100, 200 and 400 ppm) increased the chromium ratio in root by 1.26, 2.0, 1.48 and 2.5 times and this ratio in treatments of EDDS were 1.5, 2.7, 2.25 and 2.9 times more than the control treatment, respectively. Also, the use of 4 Mmol of MGDA in shoots increased the chromium ratio by 2.8, 3.7, 4.1 and 4.2 times and in EDDS were 1.5, 3.8, 4.1 and 6.7 times more than the control. Increasing chelates concentration from 1 to 4 Mmol in all soil chromium levels increased the ratio of shoot/root chromium and showed higher performance of EDDS than MGDA. The effect of soil chromium levels and chelate concentrations on biomass and vegetative characteristics of roots and shoots was decreasing, but EDDS increased plant diameter. The results of bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF) showed that Vetiver have a special ability in phytoextraction of soils contaminated with hexavalent chromium. The treatment of EDDS at 4 Mmol intensifies the absorption of chromium, especially in the roots and to some extent increases its transfer to the shoot of vetiver grass. Therefore, this compound is introduced as a suitable biodegradable chelate to increase phytoextraction efficiency by vetiver in chromate-contaminated soils.

Keywords: Soil contamination; Chromium bioaccumulation; (*Chrysopogon zizanioides*); MGDA; EDDS.

Ahmadian M., Golchin A., Alamdari P. and Asadian G. 2021. Effect of biodegradable chelates MGDA and EDDS on phytoextraction of Chromium by Vetiver grass in Chromate contaminated soils. *Applied Soil Research*, 9(3): 1-18.

1. Ph.D. Student of Soil Science, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Iran

2. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Iran

3. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Iran

4. Professor Research, Hamedan agriculture and natural resources center, Areeo, Iran

*Corresponding Author Email: mahdi.ahmadian@znu.ac.ir