



مقایسه توان گیاه‌پالایی سرب از خاک آلوده توسط وتیور و کلم زینتی

سمیه کاراژیان^۱، *حجت امامی^۲، امیر فتوت^۲ و الهام امیری خوبشان^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، استاد گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد،

^۲دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱

چکیده

سابقه و هدف: آلودگی خاک از مهم‌ترین آلودگی‌های محیط زیست، می‌باشد. سرب یکی از فلزات سنگین و آلاینده‌های مهم زیست‌بوم خشکی است. استفاده از گیاهان برای رفع آلودگی خاک یا گیاه‌پالایی، روشی مقرون به صرفه است. امروزه با توجه به افزایش آلودگی منابع خاک و مشکلات ناشی از آن، شناسایی گیاهان مفید در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. کارایی گیاه وتیور و کلم زینتی در جذب سرب بررسی و مقایسه نشده است، بنابراین این پژوهش با هدف مقایسه میزان گیاه‌پالایی سرب توسط دو گیاه وتیور و کلم زینتی و معرفی گونه برتر در این زمینه انجام شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در شرایط گلخانه به اجرا درآمد. تیمارها شامل دو نوع گیاه وتیور (*Vetiveria zizanioides*) و کلم زینتی (*Brassica oleraceae*) و سه سطح آلودگی خاک به سرب شامل ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از منبع نیترات سرب، در سه تکرار بودند. پس از اندازه‌گیری سرب انباشته شده در خاک به روش DTPA، سرب ریشه و اندام هوایی گیاهان، فاکتور انتقال (انتقال از ریشه به اندام هوایی) و فاکتور تجمع زیستی ریشه (انتقال از خاک به ریشه) نیز اندازه‌گیری شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار JMP و مقایسه میانگین‌ها با روش LSD انجام شد.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد در ریشه و خاک تأثیر نوع گیاه، سطوح آلودگی خاک و اثر متقابل این دو عامل بر میزان انباشت سرب در سطح یک درصد و در اندام هوایی تأثیر نوع گیاه و سطوح آلودگی خاک در سطح پنج درصد و اثر متقابل این دو عامل در سطح یک درصد معنی‌دار بود. بیش‌ترین انباشت سرب در ریشه و اندام هوایی در تیمار وتیور با سطح آلودگی ۲۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک اتفاق افتاد و بیش‌ترین انباشت سرب خاک مربوط به تیمار کلم زینتی با سطح ۵۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک بود. وتیور در مقایسه با کلم زینتی میزان سرب را در ریشه و اندام هوایی خود به‌ترتیب ۳/۵ و ۱/۲ برابر بیش‌تر تجمع نمود و انباشت سرب در ریشه وتیور ۴ برابر اندام هوایی این گیاه و در ریشه کلم زینتی ۱/۵ برابر اندام هوایی آن بود. در تمام سطوح آلودگی، فاکتور انتقال در هر دو گیاه، کم‌تر از یک و فاکتور تجمع زیستی ریشه وتیور از کلم زینتی بیش‌تر بود.

* مسئول مکاتبات: hemami@um.ac.ir

نتیجه‌گیری: با وجود توانایی هر دو گیاه در انباشت سرب در ریشه و اندام هوایی خود، و تیور عملکرد بهتری در جذب سرب و کاهش غلظت سرب خاک داشت بنابراین کاربرد آن برای اهداف گیاه پالایی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، فاکتور انتقال، گیاه پالایی

مقدمه

فلزات سنگین، فلزات و شبه فلزاتی هستند که از نظر محیط زیستی یا زیستی، ماده سمی محسوب می‌شوند (۴۳). این فلزات قابل تجزیه زیستی نبوده و اثرات سمی آن‌ها در بدن موجود زنده مزمن می‌باشد (۶۶). به علت سمیت و قابلیت فلزات برای تجمع در موجودات زنده، آلودگی فلزات سنگین یک مشکل جدی و اساسی است (۷۲) و غلظت بالای آن‌ها اثرات سمی بر گیاهان می‌گذارد (۱۰). افزایش غلظت فلزات سنگین، برای تمامی سلول‌های زنده (چه گیاهی و چه جانوری) خطرناک و سمی است. از طرفی غلظت‌های زیاد این فلزات (بیش‌تر از حد آستانه) باعث ایجاد مشکلاتی در بروز برخی صفات و شاخص‌های گیاهی می‌شود (۴۱). بعضی از فلزات سنگین در غلظت کم، جزو عناصر کم‌مصرف ضروری در گیاهان محسوب می‌شوند؛ اما در غلظت‌های بالا ممکن است باعث اختلال در متابولیسم شده و مانعی برای رشد بیش‌تر گونه‌های گیاهی گردند (۶۸). مکانیزم جذب فلزات از ریشه به این صورت است که گیاهانی که به شدت جذب‌کننده فلزات هستند؛ در اطراف منطقه ریزوسفر خود پروتون‌هایی آزاد می‌کنند که با اسیدی کردن خاک، تحرک یون‌های فلزی را افزایش داده و آن را در دسترس ریشه قرار می‌دهند، اما یون‌ها که باردارند می‌توانند از طریق پروتئین‌های انتقال‌دهنده‌ای که به یون‌های فلزی می‌چسبند آن‌ها را از فضای خارج سلولی به سلول انتقال دهند؛ غشای لیپیدی سلول را پشت سر گذاشته و به سلول وارد نمایند (۳۶). بر خلاف ترکیبات آلی، فلزات نمی‌توانند تخریب شوند

و پاک‌سازی آن‌ها نیاز به تثبیت، کاهش و یا حذف سمیت آن‌ها دارد.

سرب یکی از فلزات سنگین و آلاینده‌های مهم زیست‌بوم خشکی است که علاوه بر فرآیندهای طبیعی از طریق فعالیت‌های انسانی (دود خروجی از اتومبیل‌ها، فعالیت کارخانه‌ها، تولید باتری، مصرف آفت‌کش‌ها و غیره) نیز تولید می‌شود (۵۹). از جمله اثرات منفی سرب بر رشد گیاهان می‌توان به اثر آن در کاهش ارتفاع گیاه، کاهش سطح برگ، کاهش زیست‌توده ریشه و بخش‌های هوایی، کاهش عملکرد و کاهش غلظت کلروفیل اشاره کرد (۶۵). غلظت بحرانی سرب کل در خاک بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش شده است (۳، ۹ و ۲۰).

روش‌های موجود برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین پرهزینه بوده و باعث از بین رفتن ساختمان خاک و غیرفعال شدن خاک از لحاظ زیستی می‌شوند. به همین دلیل در دو دهه اخیر روش‌های بی‌ضرر و اقتصادی با استفاده از گونه‌های گیاهی رایج شده است که به گیاه‌پالایی معروف هستند (۷۵). در گیاه‌پالایی معمولاً گونه‌هایی انتخاب می‌شوند که دارای زیست‌توده بالا و مقاوم به سمیت فلزات سنگین باشند (۷۶). گیاهان از لحاظ جذب و انتقال فلزات سنگین به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول گیاهانی هستند که فلزات سنگین را در بافت‌های خود ذخیره می‌سازند و آثار ناشی از سمیت فلز در این گیاهان زرد شدن، چروکیدگی و پیری زودرس برگ‌ها با توجه به نوع و غلظت فلز در محیط رشد است که به آن‌ها گیاهان شاخص گفته می‌شود. یکی از

سرب بود. هم‌چنین فلز روی حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد، کادمیوم حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد و سرب بسیار کم‌تر (در حداکثر مقدار) حدود ۱۰ درصد به بخش‌های هوایی گیاه انتقال یافتند (۵۸). بالبانوا و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی فاکتور انتقال را برای سرب و کادمیوم بیش‌تر از یک گزارش کردند. آن‌ها هم‌چنین بیان کردند بیش‌ترین مقدار فاکتور تجمع زیستی در بین فلزات سنگین آرسنیک، کادمیوم، مس، نیکل، سرب و روی متعلق به کادمیوم بود (۱۱). ان‌دیدا و مانوهار (۲۰۱۴) با بررسی فاکتور تجمع زیستی و فاکتور انتقال فلزات سنگین در گیاهان *Eichhornia crassipes*, *Vernonia lasiopus*, *Typha domingensis*, *Polygonum salicifolium*, *Cyperus papyrus*, *Colocasia esculenta*, *Rumex bequaertii* و *Ceratophyllum demersum* و *Amaranthus spinosus* گزارش کردند کادمیوم بالاترین فاکتور تجمع زیستی را در بین فلزات سنگین داشت و در سایر فلزات به‌ترتیب مس < سرب < نیکل بود. هم‌چنین سرب کم‌ترین مقدار فاکتور انتقال را در بین سایر فلزات سنگین داشت (۵۵). رضوانی و ظفاریان (۲۰۱۱) فاکتور تجمع زیستی و فاکتور انتقال سرب و کادمیوم را در گیاه *Aeluropus littoralis* بررسی کردند. آن‌ها فاکتور تجمع زیستی سرب را کم‌تر از یک و فاکتور انتقال سرب را بیش‌تر از یک گزارش کردند (۶۳).

یکی از گیاهان مطرح در گیاه پالایی، وتیور با نام علمی *Vetiveria zizanioides* است که ویژگی‌های منحصر به‌فرد مورفولوژیک، فیزیولوژیک و اکولوژیکی داشته و مقاومت بسیار بالایی به شرایط نامتعارف مانند شیرابه‌ها، پساب‌ها، فاضلاب‌ها و هم‌چنین فلزات سنگین دارد (۵۴). وتیور گیاهی از خانواده گندمیان با قدمتی چند هزار ساله است. این گیاه در مناطق مختلف جهان با اسامی مختلفی شناخته می‌شود. در

شاخص‌های شناسایی این گیاهان محاسبه دو عامل فاکتور انتقال (TF^1) و فاکتور تجمع زیستی (BCF^2) است. فاکتور تجمع زیستی به مهم‌ترین ویژگی‌های گیاهی در گیاه‌پالایی مانند جذب فلزات، انتقال آن‌ها به بخش‌های هوایی گیاه و ذخیره‌سازی در زیست‌توده بخش‌های هوایی گیاه اشاره دارد (۴۷). در گیاهان شاخص TF و BCF مساوی یک است (۵۶). در این گیاهان غلظت فلز جذب شده در گیاه بیانگر غلظت فلز در خاک است (۳۴ و ۵۰). دسته دوم گیاهانی هستند که با استفاده از سازوکار تثبیت گیاهی^۳ به‌طور مؤثری از ورود فلز به بخش‌های هوایی خود، علی‌رغم غلظت‌های زیاد فلزات سنگین در خاک، جلوگیری می‌کنند و به گیاهان اجتناب‌کننده معروف هستند. غلظت فلز در اندام‌های هوایی این گیاهان کمی زیاد شده یا ثابت باقی می‌ماند در حالی که ممکن است حاوی مقادیر زیادی از فلزات سنگین در ریشه‌های خود باشند. در گیاهان اجتناب‌کننده TF کوچک‌تر از یک و BCF بزرگ‌تر از یک است (۳۱) و (۴۵). دسته سوم گیاهانی هستند که با استفاده از مکانیسم گیاه جذبی^۴ توانایی جذب و تجمع فلز در آلودگی‌های کم تا زیاد را دارند و به آن‌ها گیاهان انباشت‌گر گفته می‌شود (۳۴ و ۵۰). در این گیاهان BCF و TF بزرگ‌تر از یک است. در واقع غلظت فلز در این گیاهان در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر بیش‌تر از غلظت فلز در سایر گیاهانی است که در خاک‌های آلوده رشد می‌کنند (۷ و ۴۶).

پاچورا و همکاران (۲۰۱۶) فراهمی فلزات سنگین در گیاهان را بر اساس فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد فاکتور انتقال برای فلزات روی و کادمیوم بالاتر از

- 1- Translocation factor
- 2- Bio-accumulation factor
- 3- Phytostabilization
- 4- Phytoextraction

ایران نیز بی‌خی‌والا (*Bikhi Wala*) یا خاس (*Khas*) نامیده می‌شود (۴۴). علف وتیور غیر مهاجم بوده و استولون و ریزوم تولید نکرده، بلکه ریشه افشان تولید می‌کند و قابلیت تولید ریزشاخه‌هایی از ریشه اصلی را دارد (۲۷). اسلام و همکاران (۲۰۰۸) در زمینه توسعه روستایی در بنگلادش جهت حفاظت خاک، کنترل شوری اراضی و فلزات سنگین ناشی از صنعتی شدن و پرهیز از روش‌های گران‌قیمت در زمینه کنترل این موارد، گیاه وتیور را پیشنهاد دادند (۲۸). چن و همکاران (۲۰۰۴) بیان داشتند که در شرایط آزمایشگاهی، گیاه وتیور توانایی جذب ۹۸ درصد سرب از کل سرب موجود در خاک، ۵۴ درصد مس، ۴۱ درصد روی و ۸۸ درصد کادمیوم را دارد و بهترین گزینه برای گیاه‌پالایی است (۱۵). در شرایط مزرعه‌ای جذب عناصر توسط گیاه وتیور، گزارش شده است که ریشه این گیاه محل تجمع مقدار زیادی از عناصر سنگین است (۱۵). با توجه به پژوهش‌هایی که بر روی گیاه پالایی گیاه وتیور در ایتالیا انجام شد؛ این گیاه به‌عنوان یک گیاه علفی که قابلیت‌های بالایی برای گیاه‌پالایی دارد پذیرفته شد (۲۴).

کلم زینتی با نام علمی *Brassica oleraceae* از خانواده *Brassicaceae* است (۵). خانواده براسیکاسه یکی از بزرگ‌ترین خانواده های گیاهان دولپه‌ای است که در سراسر جهان و تمام قاره‌ها به‌جز قطب جنوب توزیع شده است (۶). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که خانواده کلم‌ها جزء مهم‌ترین گیاهان برای برداشت و حذف فلزات سنگین از خاک می‌باشند (۲۱ و ۶۲). گیاهان این خانواده محدوده متفاوتی از تنش شوری و عناصر سمی را تحمل می‌کنند (۱۳ و ۴۸). از جمله عناصر سمی که برخی از گیاهان این خانواده قادر به تحمل غلظت‌های بالای آن‌ها هستند می‌توان به کادمیوم، نیکل، سرب، سلنیوم و روی اشاره کرد (۲۵، ۶۱ و ۷۴). عبداللهی و گلچین (۲۰۱۸) توانایی

جذب و انتقال سرب در سه رقم کلم شامل کلم برگ، کلم بروکلی و کلم زینتی را بررسی کرده و بیان داشتند که با توجه به حداقل کاهش عملکرد و سطح برگ کلم زینتی در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک نسبت به تیمار شاهد می‌توان گفت کلم زینتی در مقایسه با دو رقم دیگر مقاومت بیش‌تری به غلظت‌های بالای سرب خاک دارد (۱). مطهری و فرزنامی سپهر (۲۰۱۵) در بررسی نقش اسید سیتریک در جذب کادمیوم از محیط توسط گیاه کلم زینتی گزارش کردند که کلم زینتی حد بردباری مناسبی برای جذب فلزات سنگین از خاک دارد و استفاده از اسید سیتریک باعث کاهش معنی‌دار اثرات منفی ناشی از تجمع کادمیوم در کلم زینتی می‌شود (۵۳). لادن (۲۰۱۰) در بررسی قابلیت پالایش سبز خاک‌های آلوده به آرسنیک توسط دو گیاه پیازچه و کلم زینتی بیان داشت که با توجه به جذب بیش‌تر آرسنیک توسط کلم زینتی این گیاه می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای پالایش سبز خاک‌های آلوده به آرسنیک باشد (۳۵). آقاسی‌فر و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی امکان استفاده از آفتابگردان زینتی و کلم زینتی برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به عنصر مس را بررسی کرده و بیان داشتند که این دو گیاه می‌توانند غلظت‌های غیرمتعارف مس را تحمل نموده و به‌عنوان گیاهانی با کارایی مناسب در فضای سبز اراضی آلوده به مس در معادن مورد استفاده قرار گیرند (۲).

از آن‌جا که گونه‌های مختلف گیاهی واکنش‌های متفاوتی در مقابل آلاینده‌گی عناصر سنگین دارند و با آن‌که پژوهش‌هایی در زمینه کارایی بالای کلم زینتی در جذب فلزات سنگین در ایران انجام شده است، اما کارایی گیاه وتیور و کلم زینتی در جذب سرب بررسی و مقایسه نشده است، بنابراین این پژوهش با هدف مقایسه میزان گیاه پالایی سرب توسط دو گیاه وتیور و کلم زینتی و معرفی گونه برتر در این زمینه انجام شد.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایش: به منظور بررسی و مقایسه میزان انباشت عنصر سرب در دو گیاه وتیور و کلم زیتنی آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل که فاکتور اول، گیاه وتیور و گیاه کلم زیتنی و فاکتور دوم شامل سه غلظت سرب (۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود در سه تکرار انجام شد.

آماده‌سازی تیمارها: تعداد ۱۸ گلدان ۵ کیلویی تهیه شد. پس از نمونه‌برداری از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک واقع در دانشگاه فردوسی مشهد و عبور آن از الک ۴ میلی‌متری، آلوده‌سازی خاک به‌طور مصنوعی از طریق اسپری کردن با استفاده از محلول ساخته شده از نمک نیترات سرب، انجام شد و خاک‌ها به داخل گلدان‌ها منتقل شدند. همچنین برای یکسان‌سازی میزان نیترات در غلظت‌های مختلف سرب، از محلول ساخته شده از نمک نیترات پتاسیم استفاده شد که بعد از آلوده‌سازی به خاک اضافه شد. لازم به ذکر است با توجه به این‌که نمک به‌کار برده شده برای ایجاد آلودگی دارای بنیان نیترات بود، جهت ایجاد دقیق غلظت‌های مورد نیاز از سرب، محاسبات لازم انجام شد و میزان نیترات سرب استفاده شده به گونه‌ای بود که غلظت خالصی از سرب در هر سطح افزوده شود. به‌منظور تثبیت آلودگی و ایجاد تعادل در خاک، گلدان‌های حاوی خاک آلوده به سرب در سه غلظت مذکور، به مدت ۵۰ روز در گلخانه در شرایط کنترل شده با میانگین حداقل و حداکثر دما ۱۸ تا ۲۷، رطوبت نسبی هوا ۷۲ تا ۹۲ درصد و رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداری شدند. در پایان دوره ۵۰ روزه تثبیت آلودگی، تعداد ۹ گیاه وتیور و ۹ گیاه کلم زیتنی تهیه شده و داخل گلدان‌ها کشت شدند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی عمومی خاک: پس از نمونه‌برداری از خاک اولیه برخی از

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی عمومی آن شامل کربن آلی به روش اکسایش تر (۷۲)، نیتروژن کل به روش کجلدال (۱۴)، بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۲)، کربنات کلسیم معادل (۳۹)، رطوبت ظرفیت مزرعه، pH در گل اشباع و EC در عصاره گل اشباع (۶۴) اندازه‌گیری شدند و غلظت عنصر سنگین سرب نیز در خاک با DTPA (۳۸) عصاره‌گیری شد (جدول ۱).

برداشت گیاهان و سنجش سرب: بعد از کاشت گیاهان، گلدان‌ها به مدت ۷۵ روز دیگر در شرایط گلخانه نگهداری شدند. آبیاری هر ۳ روز یک بار و به‌میزان ظرفیت زراعی انجام شد. بعد از طی این دوره ۷۵ روزه، برداشت گیاه انجام شد. گیاهان از طوقه جدا شده و خاک اطراف ریشه از هر گلدان نمونه برداری شده و غلظت سرب خاک با استفاده از روش DTPA عصاره‌گیری و اندازه‌گیری شد (۳۸). عملیات شست و شوی ریشه پس از جداسازی خاک اطراف ریشه انجام شد. نمونه‌های گیاهی به آزمایشگاه منتقل شده و جهت تعیین وزن خشک اندام هوایی و ریشه به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. بعد از تهیه عصاره گیاهی به روش هضم خشک (۳۰)، غلظت سرب توسط دستگاه جذب اتمی Shimadzu مدل AA-670 اندازه‌گیری شد.

فاکتورهای آلودگی: فاکتور انتقال یا میزان انتقال سرب از ریشه به اندام‌های هوایی از نسبت غلظت فلز در برگ به غلظت فلز در ریشه محاسبه گردید و فاکتور تجمع زیستی یا میزان انتقال سرب از خاک به گیاه از نسبت غلظت فلز در ریشه به غلظت کل فلز در خاک به‌دست آمد (۳۷).

تجزیه و تحلیل داده‌ها: پس از اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر، رسم نمودارها با Excel، تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار JMP و مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد با روش LSD انجام شد.

نتایج و بحث

نسبتاً زیاد با ماده آلی کم (کمتر از ۱ درصد) و بافت لوم سیلتی بود.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش قبل از اعمال تیمارها در جدول ۱ ارائه شده است. خاک مورد بررسی دارای آهک

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده قبل از اعمال تیمارها.

Table 1. Some physico-chemical properties of soil before applying the treatments.

واحد (Unit)	مقدار (Value)	ویژگی‌های خاک (Soil properties)
-	7.65	pH
dSm ⁻¹	1.21	ECe
%	0.72	کربن آلی (Organic carbon)
mgkg ⁻¹	406	نیترژن کل (Total nitrogen)
mgkg ⁻¹	0.961	غلظت سرب قابل دسترس (Available lead concentration)
%	19.53	کربنات کلسیم معادل (Equivalent calcium carbonate)
-	لوم سیلتی (Silt loam)	بافت (Texture)
%	34	شن (Sand)
%	56	سیلت (Silt)
%	10	رس (Clay)
% (w/w)	20	رطوبت ظرفیت مزرعه (Moisture content of field capacity)

به‌جز میزان سرب انباشته شده در اندام هوایی که در سطح پنج درصد معنی‌دار بود، بر سایر ویژگی‌ها در سطح یک درصد معنی‌دار بود. علاوه‌براین اثر متقابل نوع گیاه و سطوح آلودگی سرب بر میزان سرب انباشته شده در ریشه و اندام هوایی، فاکتور تجمع زیستی ریشه و وزن خشک توده گیاهی در سطح یک درصد و بر فاکتور انتقال و سرب انباشته شده در خاک در سطح پنج درصد معنی‌دار بود.

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر میزان سرب انباشته شده در خاک، ریشه و اندام هوایی را نشان می‌دهد که بر اساس آن تأثیر نوع گیاه بر میزان سرب انباشته شده در ریشه، فاکتور انتقال، فاکتور تجمع زیستی ریشه و وزن خشک توده گیاهی در سطح یک درصد و بر میزان سرب انباشته شده در اندام هوایی و غلظت سرب خاک در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. همچنین تأثیر سطوح آلودگی سرب

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس غلظت سرب، نوع گیاه و اثر متقابل آنها بر برخی ویژگی‌های مورد مطالعه.

Table 2. Result of analysis of variance for lead concentration, plant type and their interaction on some studied properties.

میانگین مربعات Mean Square							منابع تغییرات Source of variation
وزن خشک گیاهان Dry weight of plants (g)	فاکتور تجمع زیستی ریشه Bio-accumulation factor in root	فاکتور انتقال Translocation factor	سرب قابل دسترس خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم) Available lead in soil (mg kg ⁻¹)	سرب اندام هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم) Lead in shoots (mg kg ⁻¹)	سرب ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم) Lead in root (mg kg ⁻¹)	درجه آزادی Df	
423.50**	9.33**	0.21**	1216.03*	382.44*	92045.14**	1	گیاه Plant
22.77**	7.58**	0.30**	98399.43**	241.54*	81986.68**	2	سطوح آلودگی Pollution rate
35.16**	4.74**	0.13*	519.32*	385.62**	73769.58**	2	گیاه × سطوح آلودگی Plant × Pollution rate
2.61	0.40	0.022	826.01	55.09	1093.79	12	خطا Error

***، ** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم معنی‌دار.

* and ** are significant at 5 and 1% probability levels and ^{ns} not significant, respectively.

جدول‌های ۳ و ۴ اثر نوع گیاه و سطوح آلودگی خاک را بر فاکتور انتقال، فاکتور تجمع زیستی ریشه و میزان سرب انباشته شده در ریشه، اندام هوایی و خاک را نشان می‌دهند.

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع گیاه بر برخی صفات مورد مطالعه.

Table 3. Comparison of means for effect of plant type on some studied properties.

وزن خشک گیاهان (گرم در گلدان) Dry weight of plants (g/pot)	فاکتور تجمع زیستی ریشه Bio-accumulation factor in root	فاکتور انتقال Translocation factor	سرب قابل دسترس خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم) Available lead in soil (mgkg ⁻¹)	سرب اندام هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم) Lead in shoots (mgkg ⁻¹)	سرب ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم) Lead in root (mgkg ⁻¹)	نوع گیاه Plant type
13.41 ^b	0.83 ^b	0.71 ^a	149.45 ^a	38.33 ^b	55.19 ^b	کلم زیتنی Brasica
23.11 ^a	2.27 ^a	0.49 ^b	133.01 ^a	47.55 ^a	198.21 ^a	وتیور Vetiver

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک در هر ستون دارند، از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means with same letters in each column are not significant at P<0.05.

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های تأثیر سطوح مختلف آلودگی بر برخی صفات مورد مطالعه.

Table 4. Comparison of means for effect of different pollution rate on some studied properties.

وزن خشک گیاهان (گرم در گلدان) Dry weight of plants (g/pot)	فاکتور تجمع زیستی ریشه Bio-accumulation factor in root	فاکتور انتقال Translocation factor	سرب قابل دسترس خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم) Available lead in soil (mgkg ⁻¹)	سرب اندام هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم) Lead in shoots (mgkg ⁻¹)	سرب ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم) Lead in root (mgkg ⁻¹)	سطوح آلودگی (میلی‌گرم در کیلوگرم) Pollution rate (mgkg ⁻¹)
19.72 ^a	2.18 ^a	0.82 ^a	24.43 ^c	40.03 ^b	51.86 ^b	50
19.03 ^a	2.23 ^a	0.37 ^b	121.11 ^b	50.22 ^a	261.40 ^a	250
16.05 ^b	0.26 ^b	0.62 ^c	278.17 ^a	38.57 ^b	66.85 ^b	500

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک در هر ستون دارند، از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means with same letters in each column are not significant at $P < 0.05$.

تفاوت معنی‌داری نشان داد و کم‌ترین میزان انباشت سرب در ریشه کلم زیتتی در غلظت ۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم مشاهده شد. غلظت سرب ریشه کلم در هر سه سطح سرب تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (شکل ۱). با توجه به وزن خشک گیاه کلم زیتتی می‌توان دریافت که با افزایش غلظت سرب تفاوت معنی‌داری در وزن خشک گیاه و در نتیجه دسترسی ریشه به سرب ایجاد نشده است (شکل ۳) و به همین علت با افزایش سرب خاک انباشت سرب در گیاه تغییر معنی‌داری نداشته است؛ در حالی‌که انباشت سرب در ریشه و تیور در سطوح ۲۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم نسبت به تمامی سطوح سرب در ریشه کلم زیتتی و تیور معنی‌دار بود. بررسی داده‌های وزن خشک گیاه (شکل ۳) نشان داد که با افزایش غلظت سرب خاک وزن خشک گیاه کاهش یافته است و به‌نظر می‌رسد در غلظت بالا (۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) کاهش رشد ریشه مانع از جذب بیش‌تر سرب شده است، در حالی‌که در سطح ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک با افزایش غلظت سرب در خاک اگرچه وزن خشک گیاه و تیور نسبت به سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک کاهش یافته است، اما چون غلظت سرب در سطح ۲۵۰ میلی‌گرم

انباشت سرب در ریشه گیاه: تأثیر نوع گیاه، سطوح آلودگی خاک و اثر متقابل این دو بر میزان انباشت سرب در ریشه گیاه، در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها در بررسی اثر نوع گیاه بر انباشت سرب ریشه نشان داد که بیش‌ترین میزان انباشت سرب ریشه ۱۹۸/۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که در ریشه گیاه و تیور مشاهده شد و با تیمار کلم زیتتی تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۳). به‌طور کلی انباشت سرب در ریشه و تیور ۳/۵ برابر ریشه کلم زیتتی بود. از لحاظ سطوح آلودگی، بیش‌ترین میزان جذب توسط ریشه گیاهان در سطح دوم سرب یعنی غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم اتفاق افتاد که میزان آن ۲۶۱/۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود و با سطوح دیگر تفاوت معنی‌داری داشت و کم‌ترین میزان جذب مربوط به سطح اول یعنی ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب بود که با سطح دوم یعنی غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تفاوت معنی‌داری داشت، اما با سطح سوم یعنی غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۴). مقایسه اثر متقابل نوع گیاه و سطوح آلودگی بیانگر بیش‌ترین میزان انباشت سرب در ریشه گیاه و تیور در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب بود که با سایر تیمارها

۴ برابر و در کلم زیتنی حدود ۱/۵ برابر اندام هوایی سرب را انباشته کردند. این امر نشان‌دهنده توانایی قابل‌توجه بخش ریشه در ذخیره و انباشت سرب و مقاومت گیاه در انتقال سرب از ریشه به اندام‌های هوایی است. مشابه با نتایج این پژوهش، چن و همکاران (۲۰۰۴) در خاکی با pH نسبتاً مشابه خاک مورد آزمایش ما دریافتند که در شرایط آزمایشگاهی، گیاه وتیور توانایی جذب ۹۸ درصد سرب از کل سرب موجود در خاک را دارد و بهترین گزینه برای گیاه‌پالایی است (۱۵). یانگ و کین (۱۹۹۳) نیز گزارش کردند که در شرایط مزرعه‌ای، ریشه گیاه وتیور با جذب عناصر محل تجمع مقدار زیادی از عناصر سنگین است (۷۷). سینها و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند با افزایش غلظت سرب خاک از ۰/۱ به ۱ میلی‌مولار (از منبع نیترات سرب)، عملکرد و اندازه سر کلم کاهش و غلظت سرب و روی در بخش‌های مختلف کلم افزایش یافت؛ در حالی‌که غلظت فسفر، آهن، منگنز و مس کاهش یافت. همچنین غلظت بیش‌تر سرب در ریشه کلم را نسبت به شاخساره گزارش کردند. آن‌ها دلیل این امر را رقابت مستقیم بین سرب و سایر عناصر ضروری برای مکان‌های جذب مشابه بیان کردند (۶۷). توانایی ذخیره سرب در ریشه بعضی از گیاهان دیگر مثل کلزا، جو و ذرت نیز گزارش شده است. به‌عنوان مثال سلطانی و همکاران (۲۰۰۶) نتیجه گرفتند گیاه کلزا از خانواده *Brassicaceae* قادر است حدود ۱۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم وزن خشک را در اندام هوایی انباشته کند و میزان انباشت سرب در ریشه‌ها حدود ۱۰ برابر بخش هوایی آن بود (۶۹). پارتا و همکاران (۲۰۰۴) نیز با بررسی گیاهان جو و ذرت دریافتند که سرب در قسمت‌های بیرونی ریشه و به‌عبارت دیگر در پارانشیم‌های پوستی جذب شده و لایه آندودرم مانند سپری مانع ورود سرب به منطقه استوانه مرکزی

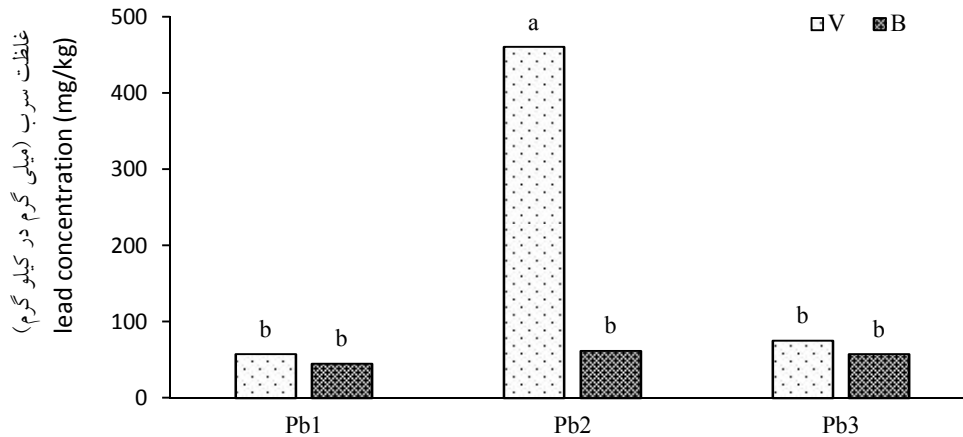
بر کیلوگرم خاک بسیار بیش‌تر از ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است مقدار جذب سرب در مقایسه با دو تیمار دیگر افزایش یافته است در نتیجه بیش‌ترین انباشت سرب در این تیمار انجام شده است.

به‌نظر می‌رسد گیاه وتیور از لحاظ انباشت سرب در ریشه، در مقایسه با کلم زیتنی عملکرد بسیار بهتری دارد؛ به‌طوری‌که در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب خاک، انباشت سرب در ریشه وتیور حدود ۷/۵ برابر کلم زیتنی است. در واقع با افزایش غلظت سرب خاک از ۵۰ به ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، جذب توسط ریشه وتیور افزایش یافته، اما همان‌طور که گفته شد مقدار جذب سرب توسط کلم زیتنی تغییری نداشته است. گونه‌های مختلف گیاهی واکنش‌های متفاوتی در برابر عناصر سنگین دارند، در گیاه وتیور با افزایش غلظت سرب در خاک، میزان جذب و انباشت سرب در ریشه گیاه افزایش نشان داد، ولی روند افزایش خطی نبوده و در غلظت بالاتر میزان جذب کاهش یافت. در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب در خاک، در مقایسه با غلظت ۲۵۰ کاهش انباشت سرب در ریشه‌ها در هر دو گیاه مشاهده شد که احتمالاً به‌دلیل افزایش بیش از حد غلظت، سمیت ایجاد شده مانع از جذب بیش‌تر سرب شده است. مسمومیت با سرب بازدارنده رشد ریشه است و کاهش توسعه سیستم ریشه‌ای به محدود شدن رشد بخش هوایی هم منتهی می‌شود. کاهش رشد ریشه و بخش هوایی تحت تنش سرب می‌تواند به‌دلیل تجمع زیاد سرب در ریشه، لیگنینی شدن دیواره تحت‌تأثیر فلز سنگین (۴)، تأثیر مستقیم فلز سنگین بر هسته سلولی (۱۹) و برهم‌کنش فلزات سنگین با گروه‌های سولفیدریل غشا سلول‌ها و غیرفعال کردن آن‌ها (۳۳) باشد.

به‌طورکلی انباشت سرب ریشه بیش‌تر از اندام هوایی بود؛ به‌طوری‌که ریشه‌ها در گیاه وتیور حدود

آسان برای انتقال مواد می‌باشد به قسمت‌های هوایی گیاه انتقال یابد (۶۰).

می‌گردد. عدم ورود سرب به منطقه استوانه مرکزی بدین معنی است که سرب به منطقه آوندهای چوب وارد نشده و قادر نیست از طریق آوندها که مسیری



شکل ۱- اثر متقابل نوع گیاه و سطوح مختلف سرب بر میزان انباشت سرب در ریشه (V: وتیور و B: کلم زیتنی).

Figure 1. Interaction effect of plant type and different level of lead on lead concentration of roots (V: vetiver, B: Brasica).

احتمالاً به علت افزایش بیش از حد غلظت سرب، حالت سمیت پیدا کرده و مانع جذب بیش‌تر توسط گیاه و انتقال به اندام هوایی شده است. سطوح ۵۰ و ۵۰۰ از نظر میانگین انباشت سرب در اندام هوایی گیاه با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۴).

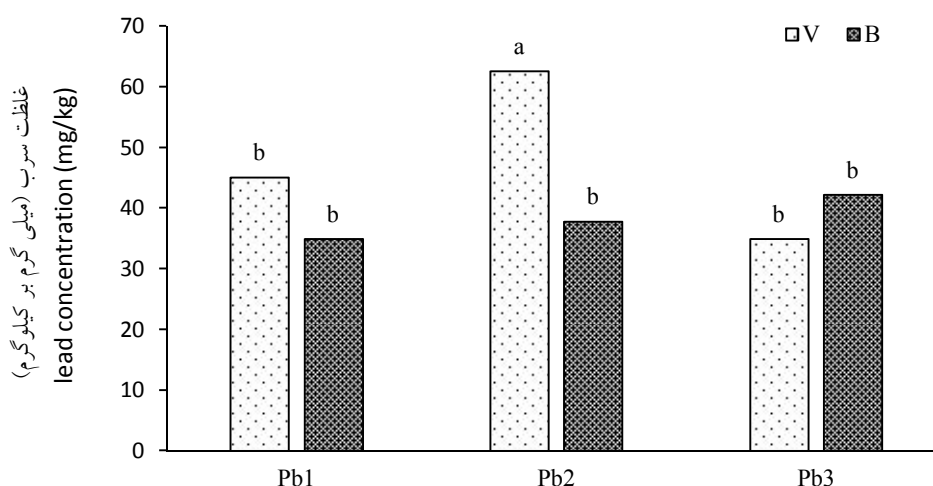
مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع گیاه و سطوح آلودگی بیانگر بیش‌ترین میزان انباشت سرب در اندام هوایی در سطح ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب در گیاه وتیور بود که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان داد و کم‌ترین میزان مربوط به گیاه وتیور در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک بود. مقدار سرب در اندام هوایی هر دو گیاه در سطوح کم (۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و زیاد (۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) سرب تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند، اما در سطح متوسط سرب (۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) مقدار سرب در اندام هوایی گیاه وتیور

انباشت سرب در اندام هوایی گیاه: تأثیر نوع گیاه و سطوح آلودگی خاک بر میزان انباشت سرب در اندام هوایی گیاه در سطح پنج درصد و اثر متقابل این دو در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها در بررسی اثر نوع گیاه بر انباشت سرب در اندام هوایی نشان داد بیش‌ترین انباشت سرب در اندام هوایی ۴۷/۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که در تیمار وتیور مشاهده شده و با تیمار کلم تفاوت معنی‌داری نشان داد و انباشت سرب در اندام هوایی وتیور حدود ۱/۲ برابر سرب تجمع‌یافته در اندام هوایی کلم زیتنی بود (جدول ۳). از لحاظ سطوح آلودگی، بیش‌ترین انباشت سرب در اندام هوایی گیاهان نیز در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب مشاهده شد که با سطوح ۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک تفاوت معنی‌داری داشت و کم‌ترین میزان در سطح ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شده است که

در غلظت‌های بالای فلزات در خاک است (۲۲). مهاجر و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی روی یک سری از محصولات کشاورزی بدین نتیجه رسیدند که عنصر سرب در گیاه گل کلم از خانواده براسیکاسه به‌ترتیب در ریشه بیش‌تر از برگ و در برگ بیش‌تر از سر کلم تجمع می‌یابد و کم‌ترین مقدار این عنصر در بخش خوراکی کلم وارد می‌شود (۵۲). در پژوهشی بر روی سه رقم کلم پیچ، بالاترین غلظت سرب جذب شده در بخش هوایی به‌ترتیب ۳۴/۶، ۳۸/۳ و ۴۰ نانوگرم بر گرم وزن خشک گزارش گردید (۱۷). اسما و همکاران (۲۰۱۲) بیش‌ترین غلظت سرب در کلم زیتنی را ۷۲/۴۸ میکروگرم بر گرم وزن خشک گزارش کردند (۵۷). در پژوهش دیگری که با هدف بررسی تأثیر فعالیت‌های مدرن صنعتی بر میزان عناصر سنگین موجود در محصولات کشاورزی در لهستان انجام شد، غلظت سرب در کلم بروکلی، کلم پیچ، گل‌کلم، کلم سفید، کلم قرمز و کلم چینی به‌ترتیب ۰/۵، ۰/۳، ۰/۳۴، ۰/۲۸، ۰/۶ و ۰/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه گزارش شد که بیش از غلظت مجاز سرب در گیاه کلم بود (۱۸). چراتی آرائی و خانلریان خطیری (۲۰۰۸) در بررسی تأثیر سرب بر روی دو رقم کلزا نشان دادند که انباشتگی یون سرب در ریشه و اندام هوایی هر دو رقم نسبت به شاهد با افزایش غلظت سرب محلول غذایی افزایش معنی‌داری یافت، ولی مقدار یون سرب در اندام هوایی هر دو رقم بسیار کمتر از ریشه بود (۱۶). تفاوت زیاد بین غلظت سرب در ریشه و برگ بیانگر محدودیت در انتقال داخلی فلزات از ریشه به‌سمت برگ‌های سبز می‌باشد (۳۲). این مسأله به‌ویژه در مورد سرب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا مشخص شده است که این عنصر عمدتاً در ریشه‌ها تجمع می‌یابد (۲۳). گلچین و همکاران (۲۰۱۶) نیز میزان انتقال سرب به اندام‌های مختلف گیاهی را بسته به نوع و گونه گیاهی متفاوت ذکر کرده‌اند (۲۶).

به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از کلم زیتنی بود و در مجموع بین سطوح مختلف سرب در گیاه کلم زیتنی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و سطح ۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک در گیاه وتیور نیز تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. به‌علت محدودیت رشد ریشه و اندام هوایی و کاهش عملکرد ناشی از سمیت به‌ویژه در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک، توان جذب گیاهان به‌ویژه وتیور در این غلظت کاهش یافته است. در مجموع، در هر سه سطح آلودگی سرب، مقدار انباشت سرب در اندام هوایی، روندی تقریباً مشابه با مقدار سرب ریشه (شکل ۱) و فاکتور انتقال (انتقال از ریشه به اندام هوایی، شکل ۵) داشت. به‌طورکلی در بررسی و مقایسه ارقام مربوط به سرب در اندام هوایی و ریشه گیاهان، انباشت بیش‌تر سرب در ریشه هر دو گیاه مشهود است که ناشی از توانایی کم انتقال سرب به اندام هوایی در این گیاهان است (شکل ۲). اگرچه مقدار سرب انباشته شده در ریشه گیاهان بالاست و فاکتور انتقال کم است، اما با مقایسه شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود که به‌جز تیمار وتیور در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک، در سایر تیمارها مقدار سرب اندام هوایی تقریباً مشابه با ریشه است. به‌عبارت دیگر بخش قابل‌توجهی در اندام‌های هوایی انباشته شده است بنابراین استفاده از این گیاهان در گیاه‌پالایی توصیه می‌شود.

در پژوهشی که توسط دیندارلو و همکاران (۲۰۱۶) بر روی گیاه وتیور انجام شد در اثر آبیاری گیاه وتیور با پساب بیمارستانی بیش‌ترین میزان تجمع فلزات سرب، مس، روی و نیکل در ریشه گیاه مشاهده شد و مقادیر خیلی کمی از عناصر در قسمت شاخه و برگ گیاه وتیور تجمع یافته بود. تجمع بیش‌تر فلزات مس، سرب، نیکل و روی در ریشه نسبت به اندام هوایی نشان‌دهنده مکانیسم تحمل گیاه

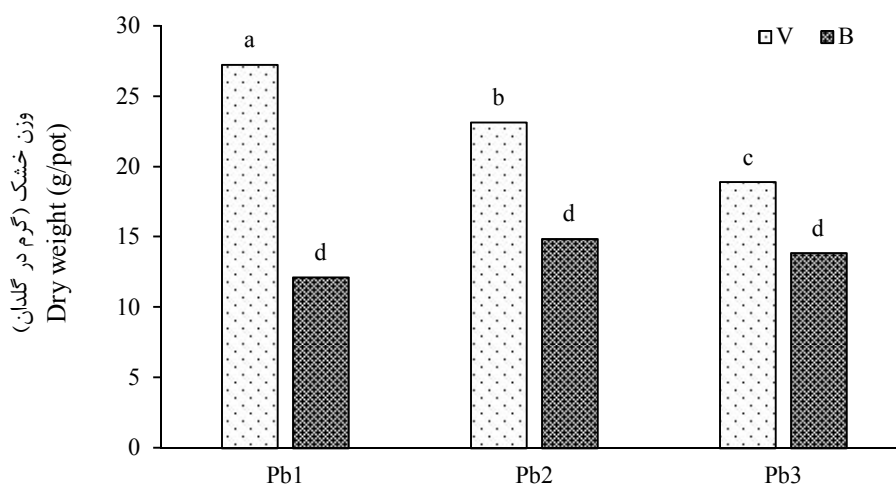


شکل ۲- اثر متقابل نوع گیاه و سطوح مختلف سرب بر میزان انباشت سرب در اندام هوایی (V: وتیور و B: کلم زیتنی).

Figure 2. Interaction effect of plant type and different level of lead on lead concentration of shoots (V: vetiver, B: Brasica).

وزن خشک توده گیاهی نشان داد در هر سه سطح آلودگی عملکرد گیاه وتیور به طور معنی داری بیش تر از گیاه کلم زیتنی بود و به طور کلی سطوح آلودگی سرب تأثیر معنی داری بر وزن خشک گیاه کلم زیتنی نداشتند (شکل ۳). با توجه به این نتایج به نظر می رسد مقادیر سرب اعمال شده تأثیری بر عملکرد گیاه کلم زیتنی ندارند، اما باعث کاهش عملکرد گیاه وتیور می شود. با این حال باید به این نکته توجه شود که با وجود کاهش عملکرد گیاه وتیور با افزایش میزان آلودگی سرب، اما حتی در بالاترین سطح آلودگی، عملکرد گیاه وتیور بیشتر از گیاه کلم زیتنی (در هر سه سطح آلودگی) است که اهمیت زیادی در گیاه پالایی دارد.

وزن خشک توده گیاهی: تأثیر نوع گیاه، سطوح آلودگی و اثر متقابل این دو بر وزن خشک توده گیاهی (اندام هوایی و ریشه) در سطح یک درصد معنی دار شد (جدول ۲). بیش ترین و کم ترین میزان وزن خشک توده گیاه وتیور به ترتیب در غلظت ۵۰ و ۵۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم سرب مشاهده شد و وزن خشک گیاه وتیور در هر دو سطح ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم سرب در مقایسه با ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم به طور معنی داری کاهش نشان دادند. کاهش وزن خشک در سومین سطح آلودگی احتمالاً به علت بروز آثار سمیت و کاهش رشد گیاه در این سطح است (جدول ۴). هم چنین مقایسه میانگین ها در بررسی اثر متقابل نوع گیاه و سطوح آلودگی بر



شکل ۳- اثر متقابل نوع گیاه و سطوح مختلف سرب بر وزن خشک توده گیاهی (V: وتیور و B: کلم زیتی).

Figure 3. Interaction effect of plant type and different level of lead on dry weight of plants (V: vetiver, B: Brasica).

کلی در هر سه سطح سرب، مقدار سرب انباشته شده در خاک با وجود عدم تفاوت معنی دار در حضور گیاه وتیور کم تر از کلم زیتی بود که به دلیل جذب بیش تر سرب توسط گیاه وتیور است. (شکل ۴). گیاه وتیور در تمام سطوح آلودگی موفق به کاهش ۵۴ درصدی میزان سرب خاک و کلم زیتی میزان سرب خاک را در سطوح ۵۰ و ۲۵۰ میلی گرم در کیلوگرم، ۵۰ درصد و در سطح ۵۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، ۴۱ درصد کاهش داد. بنابراین وتیور در تمام سطوح آلودگی با عملکردی ثابت در مقایسه با کلم زیتی تأثیر بیشتری در کاهش سرب خاک داشت، اما کلم زیتی در سطح ۵۰۰ در مقایسه با سطوح ۵۰ و ۲۵۰ کاهش عملکرد ۱۱ درصدی در کاهش سرب خاک نشان داد. به طور کلی در سطح سوم آلودگی سرب، مقدار سرب باقی مانده در خاک زیاد است که به دلیل سمیت احتمالی ایجاد شده توسط سرب برای گیاه، جذب آن کاهش یافته است. با این حال با توجه به رشد گیاه حتی در این شرایط می توان انتظار داشت که با کشت مکرر گیاهان مورد بررسی در این پژوهش به ویژه وتیور آلودگی سرب در خاک را کاهش داد. در واقع تأثیر

انباشت سرب در خاک: تأثیر سطوح آلودگی بر انباشت سرب در خاک در سطح یک درصد و تأثیر نوع گیاه و اثر متقابل این دو نیز بر ویژگی ذکر شده در سطح پنج درصد معنی دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین ها در بررسی اثر نوع گیاه بر انباشت سرب در خاک نشان داد که بیش ترین میزان سرب خاک مربوط به تیمار کلم زیتی بود که با تیمار وتیور تفاوت معنی داری نشان نداد (جدول ۳).

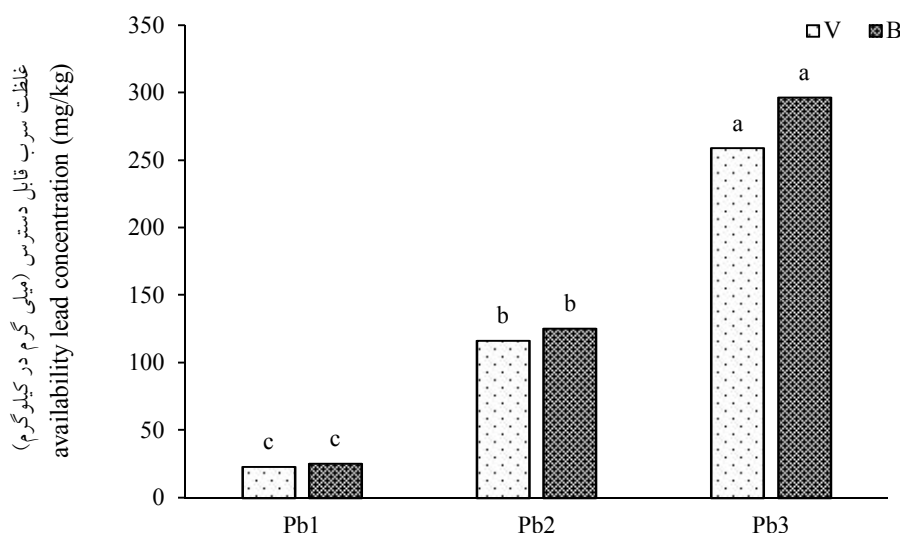
مقایسه میانگین اثر متقابل نشان داد که بیش ترین میزان سرب خاک مربوط به تیمار کلم زیتی در سطح ۵۰۰ میلی گرم در کیلوگرم سرب بود که با تیمار وتیور در همین سطح تفاوت معنی داری نشان نداد، ولی با سایر تیمارها تفاوت معنی داری داشت و کم ترین غلظت سرب مربوط به تیمار وتیور در سطح ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم سرب بود که با تیمار کلم زیتی در این سطح آلودگی تفاوت معنی داری نداشت، اما با سایر تیمارها تفاوت معنی داری نشان داد. مشابه با دو سطح قبلی در سطح ۲۵۰ میلی گرم سرب در کیلوگرم خاک، انباشت سرب در خاک در حضور وتیور و کلم زیتی با یکدیگر تفاوت معنی داری نداشتند. به طور

سرب کل خاک است که به علت عدم زمان کافی برای تثبیت کامل آلودگی، در دسترس گیاه قرار نگرفته و در اندازه گیری سرب قابل دسترس نیز مشاهده نشده است.

در دومین سطح آلودگی نیز، میزان جذب سرب توسط گیاهان در مقایسه با سطح اول آلودگی، در هر دو گیاه به ویژه وتیور افزایش یافت. افزایش جذب با افزایش غلظت یونها پدیده ای طبیعی است با وجود این افزایش انتظار می رفت میزان سرب انباشت شده در خاک دچار کاهش شود اما شاهد افزایش غلظت سرب قابل دسترس خاک در این سطح بودیم.

وتیور در کاهش آلودگی خاک به عناصر سمی و سنگین به دلیل توسعه سیستم ریشه و جذب این عناصر از خاک است. به عنوان مثال منصوریان و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که کاشت گیاه وتیور میزان سیانید خاک را از ۱۴/۳۷ به ۷/۰۵ میلی گرم در کیلوگرم (بیش از ۵۰ درصد) کاهش داد (۴۲).

با توجه به این که گیاهان در سومین سطح آلودگی میزان سرب کمی را جذب کردند، انتظار می رود میزان سرب خاک در این غلظت بیش از میزان اندازه گیری شده باشد. در واقع سرب اندازه گیری شده در خاک، سرب قابل دسترس می باشد و احتمالاً بقیه سرب که نه جذب گیاه شده و نه در خاک مشاهده شده بخشی از



شکل ۴- اثر متقابل نوع گیاه و سطوح مختلف سرب خاک بر میزان انباشت سرب در خاک (V: وتیور و B: کلم زینتی).

Figure 4. Interaction effect of plant type and different level of lead on lead concentration of soil (V: vetiver, B: Brasica).

(۷۱، ۴۹، ۵۵، ۷۰ و ۵۸). پژوهشگران راه های متعددی را برای محدود کردن انتقال سرب از ریشه به اندام های هوایی بیان کرده اند که می توان به جلوگیری از تحرک سرب از طریق پکتین های دارای بار منفی در دیواره سلولی (۸)، رسوب کردن سرب در فضاهای بین سلولی به صورت نمک های نامحلول سرب (۵۱)،

فاکتور تجمع زیستی و فاکتور انتقال: فاکتور انتقال (انتقال از ریشه به اندام هوایی) سرب برای هر دو گیاه وتیور و کلم زینتی در تمام سطوح آلودگی کم تر از یک بود. گیاهان معدودی قادر به انتقال سرب از ریشه به بخش های هوایی خود هستند و به طور عمده سرب را در سلول های ریشه ذخیره می کنند

BCF بین دو گیاه مورد بررسی، می‌توان گفت گیاه وتیور با تجمع بیش‌تر سرب در ریشه، برای گیاه پالایی مطلوب‌تر است.

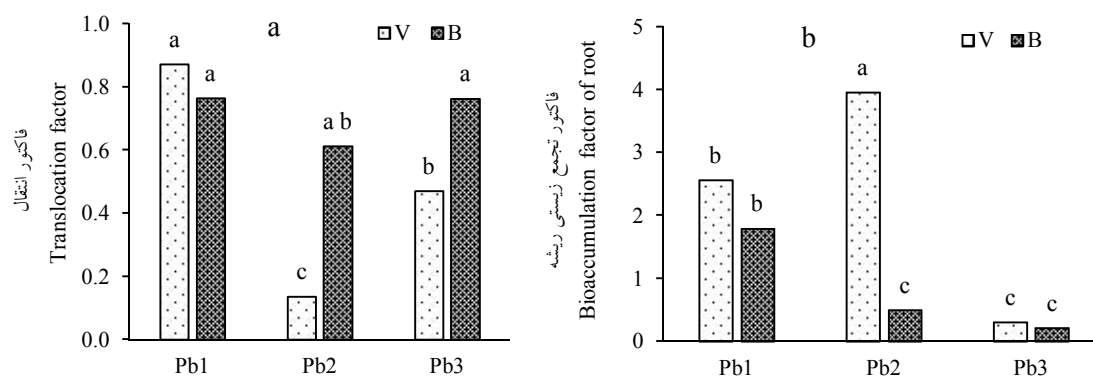
تأثیر نوع گیاه و سطوح آلودگی بر فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی ریشه در سطح یک درصد و اثر متقابل دو عامل نوع گیاه و سطوح آلودگی بر فاکتور انتقال در سطح پنج درصد و بر فاکتور تجمع زیستی ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). در بررسی اثر نوع گیاه مشاهده شد که فاکتور انتقال گیاه کلم زینتی بیش‌تر از وتیور بوده و تفاوت معنی‌داری با آن نشان داد و فاکتور تجمع زیستی ریشه وتیور بیش‌تر از کلم زینتی بود و با آن تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۳). بیش‌تر بودن فاکتور انتقال در کلم زینتی و فاکتور تجمع زیستی ریشه در وتیور نشان دهنده تمایل بیش‌تر وتیور به انباشت سرب در ریشه خود است که بیش‌تر بودن سرب انباشته شده در ریشه وتیور نیز خود تأییدی بر این امر است. اگرچه فاکتور انتقال در گیاه کلم زینتی بیش‌تر از وتیور است اما در مجموع مقدار سرب جذب‌شده توسط وتیور هم در ریشه و هم در اندام هوایی بیش‌تر از کلم زینتی است. بنابراین با توجه به عملکرد بهتر گیاه وتیور در حذف سرب از خاک به‌ویژه در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، به‌نظر می‌رسد این گیاه برای پالایش غلظت‌های بالای آلودگی مناسب‌تر باشد. از طرف دیگر وتیور بخش اعظم سرب جذب‌شده را در ریشه خود انباشته کرد که تا عمق زیادی در خاک نفوذ می‌کند، بنابراین توصیه می‌شود در مناطقی که عمق آلودگی خاک با عناصر سنگین مثل سرب زیاد است از گیاهان دارای ریشه عمیق‌تر مانند وتیور استفاده شود. در بررسی اثر سطوح آلودگی، بیش‌ترین میزان فاکتور انتقال در کم‌ترین سطح آلودگی یعنی ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و کم‌ترین میزان آن در سطح ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و بین تمام سطوح

تجمع سرب در غشای پلاسمایی (۲۹) و دفع سرب از طریق پروتئین‌های انتقال‌دهنده سلول‌های پوست ریشه به بیرون از سلول (۴۰) اشاره نمود.

فاکتور تجمع ریشه (انتقال از خاک به ریشه) در گیاه کلم زینتی در اولین سطح آلودگی یعنی غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب خاک بیش‌تر از یک بود و در سایر سطوح از یک کم‌تر شد که نشان‌دهنده تجمع بیش‌تر سرب در ریشه گیاه در غلظت‌های کم سرب است و با افزایش غلظت سرب خاک کاهش فاکتور تجمع زیستی ریشه گیاه کلم زینتی مشاهده شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کلم زینتی سرب را در سطوح کم آلودگی به خوبی جذب کرده و در ریشه خود انباشته می‌کند، اما در غلظت‌های متوسط و زیاد (۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب خاک) در مقایسه با غلظت کم (۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب خاک) کارایی این گیاه برای جذب کاهش می‌یابد. فاکتور تجمع زیستی ریشه وتیور در غلظت‌های ۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب خاک بیش‌تر از یک بود و تنها در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب خاک کم‌تر از یک شد. در سطوح کم و متوسط آلودگی، انتقال سرب از خاک به ریشه به خوبی صورت گرفته است، زیرا با افزایش غلظت سرب خاک، فاکتور تجمع زیستی ریشه افزایش یافته است و بیش‌ترین میزان فاکتور تجمع زیستی در غلظت متوسط سرب به‌دست آمد و با افزایش غلظت سرب خاک به ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، به‌علت ایجاد سمیت گیاه قادر به جذب سرب بیش‌تر نبوده و در نتیجه فاکتور تجمع زیستی ریشه در این غلظت به‌شدت کاهش یافته است. به‌طور کلی کم‌تر از یک بودن TF در هر دو گیاه نشان‌دهنده محدودیت توانایی انتقال سرب از ریشه به اندام هوایی این گیاهان و تجمع بیش‌تر سرب جذب‌شده از خاک در ریشه هر دو گیاه می‌باشد. از طرفی با مقایسه

۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب که با تیمارهای ۵۰۰ و تیور و ۲۵۰ کلم زیتنی تفاوت معنی‌داری نشان نداد. با وجود بیش‌تر بودن فاکتور تجمع زیستی ریشه و تیور از کلم زیتنی در سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب، بین آن‌ها تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۵-b). روند تغییرات فاکتور انتقال با افزایش سطح آلودگی در هر دو گیاه مشابه بوده و در ابتدا به‌صورت کاهش و سپس افزایشی بود. گیاهان در غلظت کم، سرب زیادی به اندام هوایی منتقل کرده و با افزایش غلظت از ۵۰ به ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، ضمن انباشت بیش‌تر سرب در ریشه، فاکتور انتقال در تیور ۸۴ درصد و در کلم زیتنی ۲۰ درصد کاهش یافت. در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌علت کاهش جذب ناشی از سمیت ایجاد شده، درمقایسه با غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، با افزایش انتقال سرب به اندام هوایی، فاکتور انتقال در تیور ۷۱ درصد و در کلم زیتنی ۲۰ درصد افزایش یافت. روند تغییرات فاکتور تجمع زیستی ریشه در گیاه و تیور با افزایش سطح آلودگی معکوس فاکتور انتقال در این گیاه است اما در کلم زیتنی یک روند کاهشی ممتد مشاهده شد. بدین‌صورت که با افزایش سطح آلودگی از ۵۰ به ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب، فاکتور تجمع زیستی ریشه در تیور، به‌دلیل کاهش فاکتور انتقال، ۳۵ درصد افزایش و در گیاه کلم زیتنی به‌دلیل افزایش فاکتور انتقال، ۷۲ درصد کاهش یافت. در سطح ۵۰۰ در مقایسه با سطح ۲۵۰ به‌دلیل افزایش فاکتور انتقال، فاکتور تجمع زیستی در تیور ۹۲ و در کلم زیتنی ۵۹ کاهش نشان داد (شکل ۵).

تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. بیش‌ترین میزان فاکتور تجمع زیستی ریشه مربوط به سطح ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب بود که با وجود بیش‌تر بودن آن از سطح ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تفاوت معنی‌داری با آن نداشت، ولی با سطح ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم که کم‌ترین فاکتور تجمع زیستی ریشه را داشت تفاوت معنی‌داری نشان داد. با افزایش سطح آلودگی از ۵۰ به ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، به دنبال افزایش جذب سرب و انباشت بیش‌تر آن در ریشه و اندام هوایی افزایش ۲ درصدی فاکتور تجمع زیستی ریشه و در نتیجه کاهش ۵۵ درصدی فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی مشاهده شد. با افزایش بیش‌تر آلودگی خاک و رسیدن به سطح ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌علت کاهش جذب ناشی از سمیت ایجاد شده در مقایسه با سطح ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، فاکتور انتقال ۴۰ درصد افزایش و فاکتور تجمع زیستی ۸۸ درصد کاهش یافت (جدول ۴). در بررسی اثر متقابل بیش‌ترین میزان فاکتور انتقال مربوط به تیمار و تیور سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب بود که با کلم زیتنی در سطوح ۵۰۰ و ۵۰ تفاوت معنی‌داری نشان نداد و کم‌ترین مربوط به تیمار و تیور در سطح ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب بود که با سایر سطوح تفاوت معنی‌داری نشان داد. تیمار کلم زیتنی در سطح ۲۵۰، تنها با تیمار و تیور در همین سطح تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۵-a). در بررسی اثر متقابل، بیش‌ترین میزان فاکتور تجمع زیستی ریشه مربوط به تیمار و تیور در سطح ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب بود که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها نشان داد و کم‌ترین میزان مربوط به تیمار کلم زیتنی در سطح



شکل ۵- اثر متقابل نوع گیاه و سطوح مختلف سرب خاک بر فاکتور انتقال (a) و فاکتور تجمع زیستی ریشه (b) و (V: وتیور و B: کلم زیستی).
Figure 5. Interaction effect of plant type and different level of lead on translocation factor of lead and bio-accumulation factor of root (V: vetiver, B: Brasica).

غلظت‌های ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک می‌توان گفت این گیاه کارایی جذب سرب بالاتری داشته و می‌تواند برای گیاه‌پالایی گزینه مناسب تری از کلم زیتنی باشد. از طرف دیگر وتیور بخش اعظم سرب جذب‌شده را در ریشه خود انباشته کرد که تا عمق زیادی در خاک نفوذ می‌کند، بنابراین توصیه می‌شود در مناطقی که عمق آلودگی خاک با عناصر سنگین مثل سرب زیاد است از گیاهان دارای ریشه عمیق‌تر مانند وتیور استفاده شود و از آنجایی که به علت عدم شناخت ویژگی‌های منحصر به فرد و مقاومت بالای این گیاه به تنش‌های آلودگی استفاده از آن در ایران رواج کم‌تری دارد انجام پژوهش‌های بیشتر در زمینه کاربرد آن برای اهداف پالایش آلودگی آب و خاک با شرایط متفاوت می‌تواند قابل توصیه باشد.

نتیجه‌گیری

گیاهان با گونه‌های متفاوت در تنش فلزات سنگین نیز، مانند سایر تنش‌ها واکنش‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در مقایسه بین ریشه‌ها و اندام هوایی، انباشت بیشتر سرب در ریشه‌ها مشاهده شد به طوری که گیاه وتیور حدود ۸۰ درصد و کلم زیتنی حدود ۶۰ درصد سرب جذب کرده از خاک را در ریشه خود انباشته کردند و کم‌تر از یک بودن فاکتور انتقال در هر دو گیاه ناشی از تحرک کم و محدودیت توانایی انتقال سرب از ریشه به اندام هوایی در این گیاهان می‌باشد که نشان‌دهنده توانایی تجمع سرب در ریشه هر دو گیاه برای گیاه‌پالایی می‌باشد. در واقع گیاهان کلم زیتنی و وتیور هر دو مقاومت خوبی نسبت به آلودگی خاک به سرب نشان دادند اما با توجه به تجمع بیشتر سرب در ریشه و اندام هوایی گیاه وتیور و مشاهده عملکرد بهتر این گیاه در

منابع

1. Abdollahi, S., and Golchin, A. 2018. Evaluate ability of uptake and translocation of lead in three varieties of *Cabbage*. Iran. J. Soil Water Resour. 49: 1. 145-158. (In Persian)
2. Aghasifar, H., Sarcheshmepour, M., and Safari, V.R. 2011. Study on possibility of using of *Helianthus annuus* and *Brassica oleracea* for Phytoremediation of polluted soil to Cu. The 5th conference & exhibition on Environmental Engineering. Tehran, University Tehran, Faculty of Environment. November 21-22 (In Persian)
3. Alloway, B.J. 1995. Heavy metals in soils. 2nd (ed.), Blackie Academic and professional. London, England. Pp: 38-303.
4. Almeida, A.F., Valle, A.A., Mielke, M.S., Gomes, F.P., and Braz, J. 2007. Tolerance and prospection of phytoremediator woodg species of Cd, Pb, Cu and Cr. Plant Physiology. 19: 83-98.
5. Altagic, J., and Secerov-Fiser, V. 2005. Interspecific hybridization and cytogenetic studies in *ornamental sunflower* breeding. Experimental Agriculture. 45: 93-97.
6. Al-Shehbaz, I.A., Beilstein, M.A., and Kellogg, E.A. 2006. Systematics and phylogeny of the *Brassicaceae* (*Cruciferae*): an overview. Plant Systematic & Evolution. 259: 89-120.
7. Anderson, C., Brooks, R., Chiarucci, A. and Lacoste, C. 1999. Phytomining for nickel, thallium and gold. J. Geochem. Explor. 67: 407-415.
8. Arias, J.A., Peralta-Videa, J.R., Ellzey, J.T., Ren, M., Viveros, M.N., and Gardea-Torresdey, J.L. 2010. Effects of *Glomus deserticola* inoculation on *Prosopis*: enhancing chromium and lead uptake and translocation as confirmed by X-ray mapping, ICP-OES and TEM techniques. Environmental & Experimental Botany. 68: 2. 139-148.
9. Attanayake, C.P., Hettiarachchi, G.M., Harms, A., Presley, D., Martin, S., and Pierzynski, G.M. 2014. Field evaluations on soil plant transfer of lead from an urban garden soil. J. Environ. Qual. 43: 2. 475-87.
10. Baker, A.J.M., and Walker, P.L. 1990. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants, in: heavy metal tolerance in plants - evolutionary aspects. Eds. Shaw, A.J. CRC Press, Boca Raton, FL. Pp: 155-177.
11. Balabanova, B., Stafilov, T., and Bačeva, K. 2015. Bioavailability and bioaccumulation characterization of essential and heavy metals contents in *R. acetosa*, *S. oleracea* and *U. dioica* from copper polluted and referent areas. J. Environ. Health Sci. Engin. 13: 2. 1-13.
12. Bouyoucos, C.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agronomy. 54: 464-465.
13. Boyd, R.S., and Barbour, M.G. 1986. Relative salt tolerance of *Cakile edentula* (*Brassicaceae*) from lacustrine and marine beaches. Amer. J. Bot. 73: 236-241.
14. Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-total. P 1085-1122. In: D.L. Sparks (ed.), Method of soil analysis. Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
15. Chen, Y., Shen, Z., and Li, X. 2004. The use of *Vetiver grass* (*Vetiveria zizanioides*) in the hytoremediation of soils contaminated with heavy metals. Applied Geochemistry. 19: 1553-1565.
16. Cherati Araei, A., and Khanlarian Khatiri, M. 2008. The Effects of Lead on Germination, Protein and Proline Contents and Index of Tolerance in Two Varieties of *Oilseed Rape* (*Brassica napus* L.). J. Environ. Sci. 5: 3. 41-52.
17. Chollet, A.L., and Brock, J.W. 2008. Evaluation of lead content of *Kale* (*Brassica oleracea*) commercially-available in Buncombe County. North Carolina. J. North Carolina Acad. Sci. 124: 1. 23-25.
18. Czech, A., Pawlik, M., and Rusinek, E. 2012. Contents of heavy metals, nitrates and nitrites in Cabbage. Polish J. Environ. Stud. 21: 2. 321-329.

19. Dauda, M.K., Variatha, M.K., Shafaqat, A., Najeeba, U., Jamilb, M., Hayat, Y., Dawooda, M., Khand, M.I., Zaffar, M., Cheemad, S.A., Tonga, X.H., and Zhua, S. 2009. Cadmium-induced ultra-morphological and physiological changes in leaves of two transgenic cotton cultivars and their wild relative. *J. Hazard. Mater.* 168: 614-625.
20. Defoe, P.P., Hettiarachchi, G.M., Benedict, C., and Martin, S. 2014. Safety of gardening on lead and arsenic contaminated brownfields. *J. Environ. Qual.* 43: 6. 2064-2078.
21. Delorme, T.A., Gagliardi, J.V., Aanle, J.S., and Chaney, R.L. 2001. Influence of the zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl and the nonmetal accumulator *Trifolium pratense* L. on soil microbial populations. *Can. J. Microbiol.* 47: 8. 773-776.
22. Dindarlou, A., Hedayat, M., Hosseini, A. 2016. Evaluation of Absorption of Cd, Zn, Pb, Ni, Fe, and Cu present in hospital wastewater by Phytoremediation using *Vetiver grass*. *J. Water Wastewater.* 27: 1. 57-66. (In Persian)
23. Gardea-Torresdey, J.L., Peraha-Videa, J.R., Rosa, G.D.L., and Parsons, J.G. 2005. Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by x-ray absorption spectroscopy. *Coordination Chemistry Reviews*, 24: 1797-1810.24.
24. Giachetti, G., and Sebastiani, L. 2006. Metal accumulation in *Poplar* plant grown with industrial waste. *Chemosphere.* 64: 446-454.
25. Ghaderian, S.M., Hemmat, G.R., Reeves, R.D., and Baker, A.J.M. 2007. Accumulation of lead and zinc by plants colonizing a metal mining area in Central Iran. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 18: 145-150.
26. Golchin, A., Atashnama, K., and Takasi, M. 2006. Investigate lead distribution in different parts of *sunflower* and *Canola* as producer oil plants. Publications Agriculture and Natural resources. Tehran University. Pp: 305-306. (In Persian)
27. Greenfield, J.C. 1989. *Vetiver grass*: The ideal plant for vegetative soil and moisture conservation. ASTAG - The World Bank, Washington DC, USA. 281p.
28. Islam, M.P., Khairul Hassan Bhuiyan, M., and Hossain, Z. 2008. *Vetiver grass* as a potential resource for rural development in Bangladesh. *Agric. Engin. Inter. CIGR J.* 5: X. 1-18.
29. Jiang, W., and Liu, D. 2010. Pb-induced cellular defense system in the root meristematic cells of *Allium sativum* L. *BMC Plant Biology.* 10: 40-40.
30. Jones, J.B. 2001. Laboratory Guide for Conduction Soil Tests and Plant Analysis. U. S: CRC press LLC. 384p.
31. Joonki, Y., Xinde, C., Qixing, Z., and Lena, Q. 2006. Accumulation of Pb, Cu and Zn in native plants growing on a contaminated Fliria site. *Science the Total Environment.* 368: 456-464.
32. Kadukova, J., and Kalogerakis, N. 2007. Lead accumulation from non-saline and saline environment by *Tamarix smyrnesis Bunge*. *Eurp. J. Soil Boil.* 43: 216-223.
33. Khudsar, T., Uzzafar, M., Soh, W.Y., and Iqbal, M. 2000. Morphological and anatomical variations of *Cajanus cajan* (Linn. Huth) raised in cadmium rich soil. *Plant Biology.* 43: 149-157.
34. Kuper, H., Zhao, F., and McGrath, S. 1999. Cellular compartmentation of zinc in leaves of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *J. Plant Physiol.* 119: 305-311.
35. Ladan, Sh. 2010. The study of ability Phytoremediation of Contaminated Soils to Arsenic by *Allium Fistulosum* and *Brassica oleracea*. M. Sc. thesis of soil science. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. (In Persian)
36. Lai, H.Y., Juang, K.W., and Chen, Z.S. 2010. Large-area experiment on uptake of metals by twelve plants growing in soil contaminated with multiple metals. *Inter. J. Phytoremed.* 12: 785-797.

37. Li, M.S., Luo, Y.P., and Su, Z.Y. 2007. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China. *Environmental Pollution*. 147: 168-175.
38. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42: 421-428.
39. Loeppert, R.H., and Suarez, D.L. 1996. Carbonate and gypsum, P 437-474. In: D.L. Sparks, Page, A.L., Hemke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., and Sumner, M.E. (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 3 Chemical Methods*. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, USA.
40. Maestri, E., Marmiroli, M., Visioli, G., and Marmiroli, N. 2010. Metal tolerance and hyperaccumulation: costs and trade-offs between traits and environment. *Environmental & Experimental Botany*. 68: 1. 1-13.
41. Malik, R.S., Kala, R., Gupta, S.P., and Dahiya, S.S. 2003. Background level of micronutrients and heavy metals in sewage-irrigated soils and crops in Haryana. *Ind. J. Agric. Sci.* 74: 156-158.
42. Mansoorian, A., Vaziri, A., Zamani, M., and Heidaryan Naeini, F. 2017. Phytoremediation of the soils contaminated with cyanide by *Vetiveria zizanioides*. *Health & Environment*. 10: 3. 411-420. (In Persian)
43. Mathialagan, T., and Viraraghavan, T. 2002. Adsorption of cadmium from aqueous solutions by perlite. *J. Hazard. Matetr.* 94: 291-303.
44. Massimo Maffei, 2002. *Vetiveria*, the Genus *Vetiveria*, Taylors and Francis, 250p.
45. Mcfarlane, G.R., Koller, C.E., and Blomberg, S.P. 2007. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. *Chemosphere*. 69: 1454-1464.
46. McGrath, S., Zhao, F., and Lombi, E. 2002. Phytoremediation of metals, metalloids and radionuclides. *Advances in Agronomy*. 75: 1-56.
47. McGrath, S.P., and Zhao, F.J. 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*. 14: 277-282.
48. Megdiche, W., Ben-Amor, N., and Bebez, A. 2007. Salt tolerance of the annual halophyte *Cakile maritima* as affected by the provenance and the developmental stage. *Acta Physiology Plantarum*. 29: 375-384.
49. Mellem, J.J., Baijnath, H., and Odhav, B. 2009. Translocation and accumulation of Cr, Hg, As, Pb, Cu and Ni by *Amaranthus dubius* (*Amaranthaceae*) from contaminated sites. *J. Environ. Sci. Health*. 44: 568-575.
50. Memon, A., Aktoprakligil, D., Ozdemir, A., and Vertii, A. 2001. Heavy metal accumulation and detoxification mechanisms in plants. *Turk. J. Bot.* 25: 111-121.
51. Meyers, D., Auchterlonie, G.J., Webb, R.I., and Wood, B. 2008. Uptake and localization of lead in the root system of *Brassica juncea*. *Environmental Pollution*. 53: 2. 323-332.
52. Mohajer, R., Salehi, M.H., and Mohammadi, J. 2014. Lead and cadmium concentration in agricultural crops (*lettuce, cabbage, Beetroot and Onion*) of Isfahan Province, Iran. *Iran. J. Health Environ.* 7: 1. 1-10. (In Persian)
53. Motahari, M., and Farzamisepehr, M. 2015. The role of citric acid in the absorption of cadmium from the soil in *brassica oleracea*. The Third National Conference of modern Topic in Agriculture. Saveh. Islamic Azad University-Saveh Branch. December 17.
54. Mousavi, R., Mohseni, M., and Dimiadi, A.A. 2012. Study on use of *vetiver* system for removal water and soil contamination. The first National Conference on Phytoremediation. Kerman. February 16. (In Persian)
55. Ndeda, L.A., and Manohar, S. 2014. Bio Concentration Factor and Translocation Ability of Heavy Metals within Different Habitats of Hydrophytes in Nairobi Dam, Kenya. *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.* 8: 5. 42-45.

56. Olowoyo, J.O., Heerden, E., Fischer, J.L., and Baker, C. 2010. Trace metals in soil and leaves of *Jacaranda mimosifolia* in Tshwane area, South Africa. *Atmospheric Environment*. 44: 1826-1830.
57. Osma, E., Serin, M., Leblebic, Z., and Aksoy, A. 2012. Heavy metals accumulation in some vegetables and soils in Istanbul. *Ekoloji*. 21: 82. 1-8.
58. Pachura, P., Ociepa-Kubicka, A., and Skowron Grabowska, B. 2016. Assessment of the availability of heavy metals to plants based on the translocation index and the bioaccumulation factor. *Desalination & Water Treatment*. 57: 3. 1469-1477.
59. Parsadoost, F., Bahreininejad, B., Safarisanjani, A., and Kaboli, M. 2007. Phytoremediation of lead with native rangeland plants in Irankooch polluted soils. *Pajoohesh & Sazandegi*. 75: 54-63.
60. Parta, M., Bhowmik, N., Bandopadhyay B., and Sharma, A.S. 2004. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environmental & Experimental Botany*. 52: 199-223.
61. Przedpelska, E., and Wierzbicka, M. 2007. *Arabidopsis arenosa* (*Brassicaceae*) from leadzinc waste heap in southern Poland – a plant with high tolerance to heavy metals. *Plant & Soil*. 299: 43-53.
62. Ramos, I., Esteban, E., Lucena, J.J., and Ga'rate, A. 2002. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca sp.* Cd-Mn interaction. *Plant Science*. 162: 761-767.
63. Rezvani, M., and Zaefarian, F. 2011. Bioaccumulation and translocation factors of cadmium and lead in *Aeluropus littoralis*. *Austr. J. Agric. Engin.* 2: 4. 114-119.
64. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. P 417-436. In: D.L. Sparks, Page, A.L., Hemke, P.A., Loepfert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., and Sumner, M.E. (eds.), *Method of soil analysis, part 3 chemical methods*. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, USA.
65. Sharma, P., and Dubey, R.S.H. 2005. Lead toxicity in Plants. *Plant Physiology*. 17: 35-52.
66. Shukla, S.R., and Pai, R.S., 2005. Adsorption of Cu (II), Ni (II) and Zn (II) on modified jute fibers. *Bioresources Technology*. 96: 1430-1438.
67. Sinha, P., Dube, B., Srivastava, P., and Chatterjee, C. 2006. Alteration in uptake and translocation of essential nutrients in *cabbage* by excess lead. *Chemosphere*. 65: 4. 651-656.
68. Sinha, S., Pandey, K., Gupta, A.K., and Bhatt, K. 2005. Accumulation of metals in vegetables and crops grown in the area irrigated with river water. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*. 74: 1. 210-218.
69. Soltani, F., Ghorbanli, M., and Manouchehri-Kalantari, K.H. 2006. Effect of cadmium on photosynthetic pigments, sugars and malonaldehyde content in *Brassica napus* L. *Iran. J. Biol.* 2: 136-145. (In Persian)
70. Tafvizi, M., and Motesarezadeh, B. 2014. Effects of Lead on Iron, Manganese, and Zinc Concentrations in Different Varieties of *Maize (Zea mays)*. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*. 45: 1853-1865.
71. Tiwari, S., Kumari, B., and Singh, S.N. 2008. Evaluation of metal mobility/immobility in fly ash induced by bacterial strains isolated from the rhizospheric zone of *Typha latifolia* growing on fly ash dumps. *Bioresource Technology*. 99: 1305-1310.
72. Usero, J., Morillo, J., and Gracia, I. 2005. Heavy metal concentrations in *molluscs* from the Atlantic coast of southern Spain. *Chemosphere*. 59: 1175-1181.
73. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
74. Warwick, S.I. 2011. *Brassicaceae* in agriculture. In: Schmidt R, Bancroft I (ed.) *Genetics and genomics of the Brassicaceae*. *Plant genetics and genomics: crops and models*, Springer, New York. 9: 33-65.

75. Wenzel, W.W. 2009. Rhizosphere processes and management in plant-assisted bioremediation (phytoremediation) of soils. *Plant & Soil*. 321: 385-408.
76. Yan-de, J., Zhen-Li, H., and Xiao, Y. 2007. Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *J. Zhejiang Univ. Sci. B*. 8: 3. 197-207.
77. Yong, W., and Qian Y.X. 1993. Correlation of lipids, lipoproteins, lipid peroxide products and metals with coronary heart disease. *Chine. Med. Sci. J.* 106: 13. 167-170.



Comparison phytoremediation potential of Pb from contaminated soil by *Vetiveria zizanioides* and *Brassica oleraceae*

S. Garazhian¹, *H. Emami², A. Fotovat² and E. Amiri Khaboushan³

¹M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad,

²Professor, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad,

³Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 08.06.2019; Accepted: 01.01.2020

Abstract

Background and Objectives: Soil contamination is one of the most important pollutants in the environment. Lead (Pb) is one of the heavy metals and important pollutant in arid ecosystem. The use of plants to remove contaminated soil or Phytoremediation is an economical method. Today due to increasing the pollution of soil sources and resultant problems, identification of the resistant plant species against soil pollution is essential. Efficiency of Vetiver and Brassica on Pb uptake has not been studied and compared, therefore, this study was carried out in order to compare the Phytoremediation capacity of Pb by two plants i.e. *Vetiveria zizanioides* and *Brassica oleraceae*, and to identify the better species for this purpose.

Materials and Methods: A completely randomized design with factorial arrangement in greenhouse conditions was carried out. Treatments included two types of plants (*Vetiveria zizanioides* and *Brassica oleraceae*) and three rates of Pb contamination in soil (50, 250 and 500 mg / kg prepared from lead nitrate) in three replicates. After measuring the amount of Pb in soil by DTPA, the concentration of Pb in root and shoot of plants, Translocation factor (translocation from roots to shoots) and Bio-accumulation factor (translocation from soil to roots) were measured, too. Data analysis was performed using JMP software and comparison of means by LSD method.

Results: The results of analysis of variance showed that the effect of plant type, soil contamination rates and their interaction on accumulation content of lead in root and soil were Significant at $P < 0.01$, while the effect of soil contamination rate on the shoots of plant was Significant at $P < 0.05$. The highest accumulation contents of lead in roots and shoots were found in Vetiver plant containing 250 mg / kg of soil pollution rate treatment. Also, the highest amount of Pb accumulation in soil was related to Brassica containing 500 mg/kg of soil treatment. Vetiver in root and shoots accumulated Pb 3.5 and 2.1 times more than Brassica, respectively. In addition, the accumulation content of Pb in the roots of Vetiver was 4 times higher than its shoots, while the concentration of Pb in roots of Brassica was 1.5 times greater than its shoots. Translocation factor in both plants was less than 1, while bio-accumulation factor of Vetiver was greater than that of Brassica in all pollution rates.

Conclusion: Despite the ability of both plants to accumulate lead in their roots and shoots, Vetiver had the better performance in lead uptake from soil and reduced lead amount in soil, so its application is recommended for Phytoremediation purposes.

Keywords: Phytoremediation, Soil contamination, Translocation factor

* Corresponding Author; Email: hemami@um.ac.ir

