تأثیر گلرنگ و کاربرد مس، کادمیم، روی و سرب بر تحرک این چهار عنصر در یک خاک آهکی

غلامعباس صیاد[۱]، مجید افیونی[۲] و سید فرهاد موسوی [۳]

چکیده

مشکلات مربوط به آلودگی خاک و منابع آب زیرزمینی به وسیله فلزات سنگین در دهه اخیر افزایش یافته است. یکی از مسایلی که اخیراً جلب توجه کرده است، امکان آبشویی فلزات سنگین از طریق مسیرهای جریان ترجیحی و اسیدهای آلی محلول در خاک می باشد. به همین دلیل نقش پوشش گیاهی از طریق تأثیر فیزیکی و شیمیایی ریشه (به خاطرایجاد خلل و فرج در خاک و ترشح اسیدهای آلی) و در نتیجه ایجاد جریان ترجیحی می‌تواند مهم باشد. مطالعه حاضر به منظور بررسی امکان حرکت برخی فلزات سنگین در یک خاک آهکی و در حضور گیاه (گلرنگ) انجام شد. آزمایش با استفاده از ۱۲ ستون (با قطر ۲۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر) دست نخورده خاک (Typic haplocalcids) و در گلخانه صورت گرفت. به ده سانتی‌متری بالایی خاک نیمی از ستون‌ها، به عنوان تیمارآلوده، ۱۹/۵ کیلوگرم در هکتار کادمیم،۷۵۰ کیلوگرم در هکتار مس،۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سرب و۱۴۰۰ کیلوگرم در هکتار روی اضافه گشته و به خوبی مخلوط گشت. پس از دو هفته، در نیمی از ستون‌های تیمارهای آلوده و غیرآلوده، گلرنگ (رقم کوسه) با تراکم ۲۰ بذر در متر مربع کشت شد. پس از برداشت گیاهان، میزان محلول و قابل عصاره‌گیری با DTPA فلزات در مقطع‌های ۱۰سانتی‌متری ستون‌های خاک تعیین گردید. میزان غلظت فلزات در زهکش خروجی از ستون‌ها در طول فصل کشت نیز اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد در عمق‌های بیشتر از عمق اختلاط، میانگین غلظت کادمیم، مس و روی قابل عصاره‌گیری با DTPA در تیمار آلوده کشت شده به ترتیب ۳/۳، ۱/۵و ۱/۵ برابر تیمار آلوده آیش افزایش (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) یافت. غلظت محلول کادمیم، مس و روی نیز در تیمار کشت شده در مقایسه با آیش به ترتیب ۲/۴، ۱/۲و ۱/۱ برابر افزایش داشت. غلظت سرب تفاوت معنی‌داری در دو تیمارآلوده کشت شده و آیش نداشت. میزان جذب فلزات به وسیله گلرنگ نیز افزایش یافت که بیشترین افزایش مربوط به کادمیم و روی و کمترین مربوط به سرب بود. میزان غلظت کادمیم، مس، سرب و روی در زهکش خروجی ستون‌های آلوده کشت شده در مقایسه با ستون‌های غیرآلوده کشت شده به ترتیب ۳۲، ۲/۵، ۶ و۲/۷ برابر افزایش داشت. به عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت اگرچه با افزایش غلظت فلزات در سطح خاک، میزان جذب گلرنگ افزایش یافت ولی حضور گلرنگ باعث افزایش غلظت محلول و نیز حرکت فلزات مورد مطالعه در خاک گردید. ترتیب عناصر برحسب سرعت حرکت در خاک به صورت Cd>Zn>Cu>Pb بود.

واژه‌های کلیدی: گلرنگ، فلزات سنگین، انتقال املاح، ستون‌های دست نخورده

۱. دانشجوی سابق دکتری خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان و در حال حاضر استادیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. استاد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. استاد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]

مقدمه

مسایل مرتبط با آلودگی فلزات سنگین در دهه اخیر افزایش یافته است (۱۶). از آنجایی که خاک عنصر کلیدی در کنترل سرنوشت فلزات سنگین در محیط زیست است، فهم فرایند انتقال فلزات سنگین در خاک‌ها مهم می باشد (۱۲). در این ارتباط، امکان حرکت فلزات سنگین به سمت اعماق خاک از طریق آبشویی برای چندین دهه بررسی شده است . بسیاری از محققان نتیجه گرفته‌اند که امکان کمی در این ارتباط وجود داشته و احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی از این طریق اندک می‌باشد (۷، ۲۰، ۲۶ و ۳۲). آزمایش‌های اخیر نشان می‌دهند که پتانسیل حرکت فلزات به طرف عمق خاک هنوز وجود داشته و باید مطالعات بیشتری روی آن صورت گیرد (۲۳ و ۲۴). در حقیقت بیشتر آزمایش‌هایی که منکر حرکت فلزات سنگین به طرف عمق خاک شده‌اند، عدم افزایش قابل ملاحظه در غلظت فلزات مذکور در لایه‌های زیرین خاک را به عنوان دلیل عدم حرکت فلزات ذکر کرده‌اند و در اکثر این آزمایش‌ها نتوانسته‌اند موازنه جرمی مناسبی بین میزان فلزات کاربردی و فلزات تعیین شده در خاک به دست آورند (۳، ۷ و۲۲). بنابراین در بیشتر این آزمایش‌ها نقش جریان ترجیحی (Preferential flow)، اسیدهای آلی محلول (Soluble organic acids) و ذرات کلوئیدی معدنی (Inorganic colloids) در نظر گرفته نشده است. نقش عوامل مذکور در افزایش حرکت فلزات سنگین (که به طور طبیعی متحرک در نظر گرفته نمی‌شوند) توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است (۵ و ۲۳). نکته دیگر این است که مطالعات کمی وجود دارد که مستقیماً غلظت فلزات سنگین را در آب زهکش خروجی یا آب‌های زیرزمینی تعیین کرده باشند. مطالعاتی که در این زمینه قبلاً انجام شده، غلظت اکثر فلزات سنگین را کمتر از حد تشخیص دستگاه گزارش کرده‌اند (۲۲). جریان ترجیحی می‌تواند حرکت آب واملاح را در پروفیل خاک تسریع نماید. آب و نمک‌ها از طریق حرکت در مسیرهای جریان ترجیحی در خاک (شامل ترک‌های خاک، شکاف‌های حاصل از انبساط و انقباض خاک، سوراخ‌های ایجاد شده توسط ریشه‌ها و کرم‌ها) اغلب توده خاک را دور می زنند (۷ و ۲۲).

پوشش گیاهی یک نقش دو طرفه دارد. از طرفی می‌تواند باعث کاهش حرکت فلزات سنگین از طریق جذب آنها به سطح ریشه‌ها یا داخل گیاه، کاهش حرکت آب در خاک با جذب بیشتر آب و تحریک جذب میکروبی فلزات در اطراف ریشه‌ها شود. از طرف دیگر، می‌تواند افزایش حرکت فلزات از طریق ترشح اسیدهای آلی محلول به وسیله ریشه‌ها، تحریک فعالیت میکروبی و ترشح اسیدهایی از این میکروب‌ها و یا ترشح برخی اسیدها از تجزیه مواد آلی را باعث گردد. در حقیقت یک راه حرکت فلزات سنگین به طرف عمق خاک، کمپلکس شدن این فلزات با اسیدهای آلی محلول مذکور است (۵، ۲۴ و ۲۷). دانش حرکت فلزات سنگین اصولاً براساس ستون‌های خاک دست خورده است که به نظر نمی‌رسد تحت این شرایط هیچ‌کدام از این فلزات متحرک باشند (مگر در خاک‌های خیلی اسیدی و درشت بافت).

به علت وجود منابع مختلف آلودگی‌های صنعتی، کشاورزی و شهری، غلظت فلزات سنگین در خاک‌های منطقه اصفهان افزایش یافته و این خاک‌ها بسته به محل دارای درجات مختلف آلودگی به فلزات سنگین هستند (۱). امینی و همکاران (۱) با نمونه‌گیری از ۲۵۵ نمونه خاک منطقه اصفهان دریافتند که میانگین غلظت کل کادمیم، مس، سرب و روی به ترتیب ۱/۷۳، ۱۶/۷۴، ۲۵/۶ و ۴/۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود. ایشان با مقایسه میانگین‌های فوق و استانداردهای دفتر محیط زیست، جنگل و منظر زمین فدرال سوئیس(VBBo) (۱۰) دریافتند که غلظت کل کادمیم حدود ۹۵ درصد از خاک‌های اصفهان از حد بحرانی ۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک تعیین شده به وسیله VBBo بیشتر است. میزان غلظت کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA (۰/۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) در بیشتر از ۸۰ درصد نقاط نزدیک به حد بحرانی ۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. در مطالعه ایشان مشخص شد اگرچه غلظت کل مس، روی و سرب در بیشتر مناطق از حدود بحرانی ۵۰ ، ۲۰۰ و۵۰

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]

میلی‌گرم در کیلوگرم کمتر بود ولی در برخی نقاط افزایش قابل ملاحظه‌ای داشتند.

گلرنگ یکی از گیاهان زراعی و با اهمیت در تأمین روغن خوراکی با کیفیت عالی می‌باشد (۱۳). با توجه به توان خوب این گیاه در توسعه ریشه مستقیم (Taproot) خود در اعماق خاک، به شرایط خشکی و شوری تا حد زیادی مقاوم‌تر از گیاهان دیگر نظیر گندم، گوجه فرنگی، چغندرقند و پنبه می‌باشد (۲). شرایط آب و هوایی خشک اصفهان و نیز ویژگی‌های گلرنگ باعث شده که در مناطق مختلف اصفهان، به خصوص خاک‌های دارای مشکلات شوری، کم‌آبی و آلودگی نظیر مناطق شرق اصفهان، کشت آن با استقبال کشاورزان مواجه گردد. با توجه به افزایش سطح زیر کشت گلرنگ در سال‌های اخیر و نیز کمی عمق آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه که در حدود ۴-۳ متر می‌باشد، بررسی تأثیر کشت گلرنگ بر جذب و نیز انتقال فلزات سنگین در خاک مذکور حائز اهمیت می‌باشد.

بررسی منابع نشان می‌دهد که حرکت فلزات سنگین در خاک هنوز به خوبی شناخته نشده و نقش جریان ترجیحی و مواد آلی محلول در این انتقال کاملاً مشخص نمی‌باشد. بیشتر مطالعات صورت گرفته در مورد نقش گیاه، به اثرات فیزیکی حضور ریشه گیاه بر انتقال نمک‌های خنثی (مثل کلراید) توجه کرده‌اند (۶ و۱۷). این موضوع که فلزات سنگین از طریق کمپلکس‌های آلی و نیز از طریق جریان ترجیحی حرکت می‌نمایند، نسبتاً جدید است و نیاز به بررسی بیشتری دارد که از طریق ستون‌های دست نخورده خاک و اندازه‌گیری غلظت فلزات در خاک تحت کشت گیاه و آب زهکش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به طور کلی اهداف مطالعه شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. بررسی تأثیر حضور گیاه (گلرنگ) بر غلظت‌های محلول و قابل عصاره‌گیری با DTPA برخی از فلزات سنگین (سرب، کادمیم، روی و مس) در ستون‌های دست نخورده یک خاک آهکی و نیز غلظت آنها در زهکش خروجی.

۲. تعیین میزان جذب فلزات سنگین مورد مطالعه به وسیله گیاه در شرایط آلودگی خاک به این عناصر.

مواد و روش‌ها

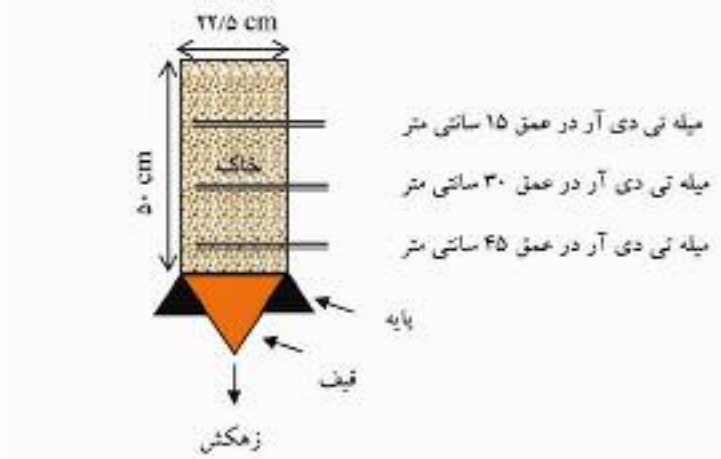
مطالعه در ستون‌های خاک دست نخورده و در لوله‌های پلی‌اتیلنی با قطر۲۲/۵سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان صورت گرفت. ستون‌های خاک از مزرعه‌ای واقع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی کبوترآباد در ۴۰ کیلومتری شرق اصفهان تهیه گردید.

برای تعیین خواص فیزیکی وشیمیایی خاک، نمونه‌های دست خورده نیز از مزرعه مذکور از عمق‌های۲۰ سانتی‌متری با سه تکرار از هر عمق برداشت گردید. در این نمونه‌ها، pH در گل اشباع (۱۹)، قابلیت هدایت الکتریکی خاک با دستگاه هدایت‌سنج (۱۹)، مواد آلی با روش اکسیداسیون تر(۳۱)، ظرفیت تبادل کاتیونی با روش استات سدیم (۲۸)، میزان کل فلزات با استفاده از اسید نیتریک ۴ مولار (۲۹)، درصد شن، سیلت و رس با استفاده از روش هیدرومتر (۱۱) و چگالی ظاهری با استفاده از نمونه‌های دست نخورده با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر (۴) تعیین گردید.

برای انتقال ستون‌های دست نخورده از مزرعه به گلخانه، انتهای هرستون به وسیله توری آلومینیومی با مش ریز بسته شده و سپس دو سرستون توسط پلاستیک سیاه و گونی (برای جلوگیری ازتبخیر) بسته شد. پس از انتقال ستون‌ها به گلخانه، ستون‌ها بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی روی چهارپایه‌های فلزی قرار داده شدند. برای جمع آوری زه آب، در زیر هر ستون، یک زیرگلدانی با یک قیف پلاستیکی متصل به آن قرار داده شد (شکل ۱). در مرحله بعد، ۱۰ سانتی‌متر بخش بالایی نیمی از ستون‌ها (۶ عدد)، ۱۹/۵کیلوگرم در هکتار کادمیم (با استفاده از محلول کلرور کادمیم)، ۷۵۰ کیلوگرم در هکتار مس (با محلول کلرور مس)،۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سرب (با محلول نیترات سرب) و۱۴۰۰ کیلوگرم در هکتار روی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]



شکل ۱. مقطع ستون خاک

(با محلول کلرید روی) محلول پاشی شده و به خوبی مخلوط گشت. میزان فلزات سنگین کاربردی فوق معادل ۵۰ درصد حداکثر مجاز تجمع فلزات سنگین در خاک به توصیه EPA آمریکا (۳۰) می‌باشد .خاک سطحی ۶ ستون دیگر فقط به خوبی مخلوط گشت که تیمار شاهد را تشکیل دادند. پس از دو هفته، در نیمی از ستون‌های تیمارهای آلوده و غیرآلوده (۳ عدد)، گلرنگ رقم کوسه با تراکم ۲۰ بذر در متر مربع کشت شد. به طور کلی تیمارهای مورد مطالعه عبارت بودند از:

تیمارآلوده به فلزات سنگین و کشت شده با گلرنگ (Contaminated Safflower = CS)

تیمار غیرآلوده کشت شده با گلرنگ (Uncontaminated Safflower = US)

تیمارآلوده آیش (Contaminated Fallow = CF)

تیمار غیرآلوده آیش (Uncontaminated Fallow = UF)

در طی این دوهفته، ستون‌ها با آب (با قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۵دسی زیمنس بر متر) آبیاری شدند. کود دهی بر طبق آزمون خاک صورت گرفت به طوری که ۶۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به صورت اوره و ۴۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم به صورت نیترات پتاسیم به خاک اضافه گردید. نتایج تجزیه خاک نشان داد که نیازی به کوددهی فسفر نیست. آبیاری با استفاده از استوانه مدرج صورت گرفت. مقدار آب آبیاری با استفاده از اطلاعات منحنی رطوبتی خاک (۱۵) و نیز اندازه‌گیری‌های TDR (Time Domain Reflectometry) و با فرض آبیاری پس از ۶۵ درصد مصرف آب قابل استفاده گیاه تعیین شد. رطوبت خاک به وسیله TDR در عمق‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر قرائت گردید. آب خروجی از ستون طی ۱ تا ۲ روز پس از آبیاری تا زمان قطع آب جمع آوری شده و پس از تعیین حجم آن (برای موازنه آبی)، یک نمونه ۵۰ میلی‌لیتری برای تعیین فلزات سنگین به آزمایشگاه ارسال گردید. در انتهای هر مرحله نمونه برداری، ظرف جمع‌آوری زه آب با ۳۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۳ نرمال شسته شده و عصاره حاصل برای تعیین فلزات سنگین (که احتمالاً در ظرف رسوب کرده باشند) به آزمایشگاه منتقل شد. گیاهان پس از ۷۴ روز از کاشت در انتهای مرحله گرده افشانی برداشت شده و پس از هضم با اسید نیتریک ۶۵ درصد، میزان فلزات در اندام‌های گیاهی با دستگاه Graphite Furnace (Varian Spectra 300-400) تعیین گردید. پس از برداشت گیاهان، نمونه برداری از عمق‌های مختلف۵۰ – ۰ سانتی‌متر و به مقاطع ۱۰ سانتی‌متری (۱۰–۰، ۲۰–۱۰، ۳۰–۲۰ ، ۴۰–۳۰ و۵۰–۴۰ سانتی‌متر) صورت گرفت. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن خرد شده و از الک ۲ میلی‌متری گذرانده شدند. با استفاده از روش سلطانپور (۲۵) غلظت فلزات قابل عصاره‌گیری با DTPA تعیین گردید. برای تعیین غلظت فلزات محلول نیز از عصاره اشباع خاک استفاده شد. میزان فلزات سنگین موجود در نمونه‌های زه آب،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مورد مطالعه (انحراف معیار ± میانگین)

عمق (متر)	۰_۰/۲۵	۰/۲۵_۰/۴۵	۰/۴۵_۰/۶۰
pH	۷/۶۰ ±۰/۰۵	۷/۷۰±۰/۱۰	۷/۸۰±۰/۰۵
قابلیت هدایت الکتریکی (EC) (دسی زیمنس بر متر)	۹/۸۰ ±۱/۶۴	۷/۸۰±۱/۹۹	۵/۹۰±۲/۲۵
ماده آلی (گرم در کیلوگرم خاک)	۵/۰۰ ±۰/۳۰	۳/۰۰±۰/۸۰	۴/۰۰±۰/۳۰
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بار در کیلوگرم خاک)	۱۳/۸۰ ±۰/۷۱	۱۴/۶۰±۰/۴۷	۱۴/۳۰±۰/۸۰
ازت کل (درصد)	۰/۰۴ ±۰/۰۱	۰/۰۴±۰/۰۱	۰/۰۳±۰/۰۱
فسفر (میلی گرم در کیلوگرم خاک)	۲۵/۱۰ ±۳/۱۰	۲۰/۰۰±۳/۲۰	۱۸/۰۰±۲/۳۰
پتاسیم (میلی گرم در کیلوگرم خاک)	۲۳۰/۱۰ ±۱۰/۰۰	۱۹۵/۵۰±۱۵/۱۰	۱۸۰/۳۰±۱۵/۰۰
غلظت کل کادمیم (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	۱/۶۰ ±۰/۵۲	۱/۷۰±۰/۳۴	۱/۶۰±۰/۵۰
غلظت کل مس (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	۳۱/۰۰ ±۱/۹۷	۲۹/۵۰±۱/۶۶	۲۸/۱۰±۱/۵۶
غلظت کل روی (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	۶۴/۳۰ ±۵/۵۱	۶۲/۱۰±۵/۰۵	۵۷/۳۰±۳/۲۰
غلظت کل سرب (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	۱۹/۳۰ ±۱/۵۱	۱۹/۱۰±۱/۹۱	۱۴/۱۰±۲/۱۲
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۳۷/۲۰ ±۱/۶۸	۳۵/۹۰±۰/۵۰	۳۶/۲۰±۱/۴۲
کلرمحلول (گرم در لیتر عصاره اشباع)	۴/۲ ±۱/۲۱	۳/۲۱±۰/۵۲	۲/۲۰±۰/۶۰
شن (گرم در کیلوگرم خاک)	۱۷۹/۰۰ ±۱۵/۲۰	۱۷۱/۰۰±۱۱/۲۰	۱۸۲/۰۰±۵/۱۰
سیلت (گرم در کیلوگرم خاک)	۴۳۲/۰۰ ±۲۱/۲۰	۴۲۴/۰۰±۱۲/۱۰	۴۳۳/۰۰±۲۲/۰۰
رس (گرم در کیلوگرم خاک)	۳۹۰/۰۰ ±۲۳/۰۰	۴۰۵/۰۰±۳۱/۰۰	۳۸۴/۰۰±۱۲/۰۰
چگالی ظاهری (مگاگرم در متر مکعب)	۱/۳۲ ±۰/۱۵	۱/۴۳±۰/۰۹	۱/۴۵±۰/۰۴

نمونه‌های محلول و قابل عصاره‌گیری با DTPA با استفاده از دستگاه ICP (Inductively Coupled Plasma) اندازه‌گیری گردید.

نتایج و بحث

الف) خواص فیزیکی و شیمیایی خاک

نتایج برخی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ آمده است. همان‌طورکه در جدول دیده می‌شود خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی سیلتی و ظرفیت تبادل کاتیونی و نیز pH زیاد است که ویژگی‌های مذکور باعث کاهش حلالیت و در نتیجه آبشویی فلزات سنگین در خاک می‌گردند (۸). مقدار نسبتاً زیاد آهک نیز ظرفیت بافری زیادی به خاک داده است (۲۱). از طرف دیگر مقدار زیاد آنیون کلرید در این خاک امکان تشکیل آنیون‌های محلول و حرکت فلزات مذکور را فراهم می‌کند (۱۴).

ب) آبیاری و زهکشی

طی ۸۶ روز مطالعه در مجموع ۵۸۹ میلی‌متر آبیاری صورت گرفت و حدود ۳۵ درصد از این مقدار به صورت زه‌آب خارج

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

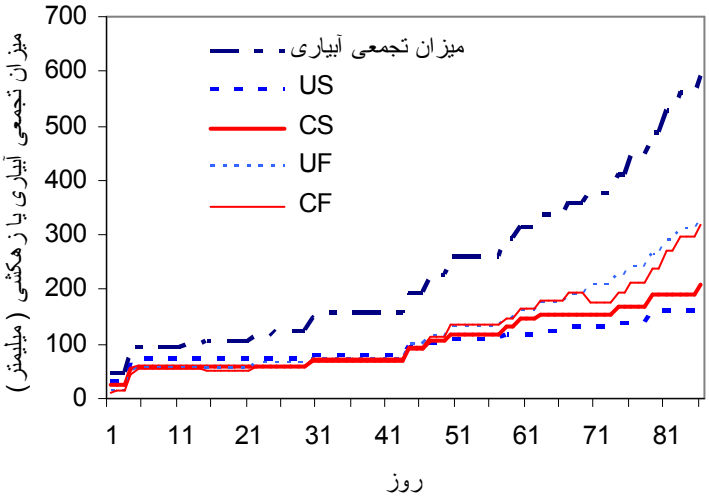
[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]

جدول ۲. موازنه آبی برای تیمارهای مختلف [۱]

تیمار	تغییر در ذخیره رطوبتی خاک	تبخیر یا تبخیروتعرق	حجم زهکشی	درصد زه آب
		میلی‌متر		
ستون آلوده کشت شده	-۹[c]	۳۶۷[b]	۲۱۲[b]	۳۶
ستون آلوده نشده کشت شده	-۱۷[d]	۳۹۱[a]	۱۸۰[b]	۳۱
ستون آلوده آیش	۵[b]	۲۷۵[c]	۳۱۷[a]	۵۴
ستون آلوده نشده آیش	۱۰[a]	۲۷۳[c]	۳۲۵[a]	۵۵

۱. میزان آبیاری در دوره آزمایش ۵۸۹ میلی‌متر بود.

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح احتمال ۵٪ بر طبق آزمون LSD دارای اختلاف معنی‌دار هستند.



شکل ۲. مقایسه میزان حجم زه آب خروجی از تیمارهای مختلف. تیمارها در صفحه ۵۸ توضیح داده شده‌اند.

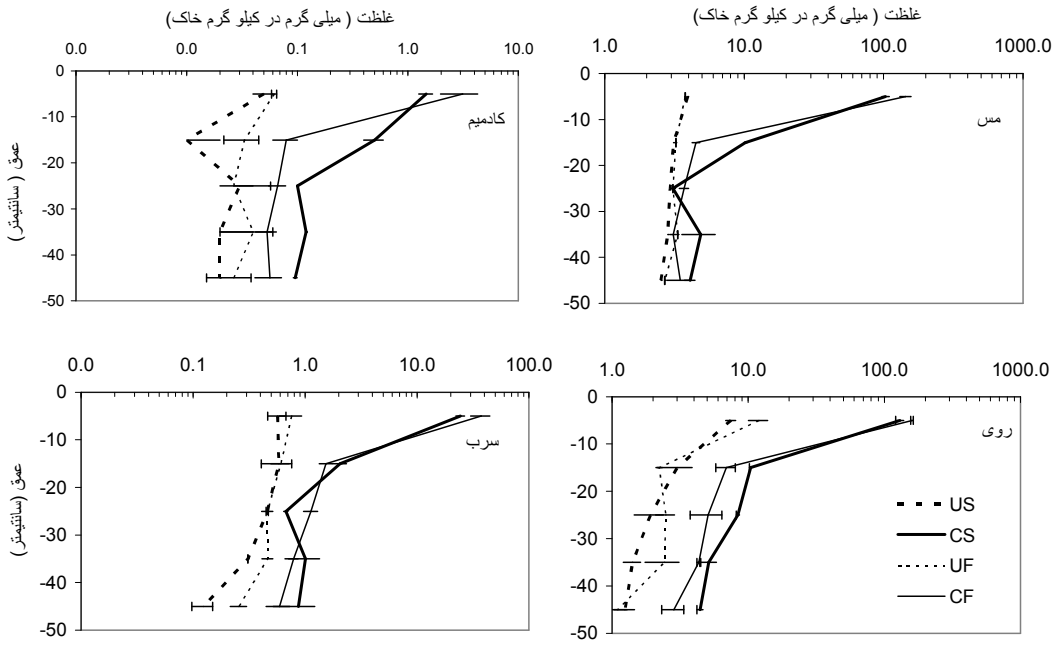
گردید (جدول ۲). میزان تلف شدن آب در تیمار آلوده نشده کشت شده از طریق تبخیر و تعرق ۲/۲ برابر میزان آبشویی بود در حالی که این نسبت برای تیمار آلوده کشت شده ۱/۷ برابر بود. میزان تبخیر و تعرق گلرنگ در تیمار آلوده در مقایسه با تیمار غیرآلوده حدود ۶ درصد کاهش داشت. نتایج ذکر شده نشان‌دهنده تأثیر نسبتاً کم فلزات سنگین بر جذب آب به وسیله گلرنگ می‌باشد (شکل ۲). میزان خروج آب در تیمارهای بدون گیاه از طریق تبخیر، کمتر از میزان زهکشی بود. به طور متوسط در تیمارهای آلوده و غیرآلوده تیمارآیش، میزان تبخیر حدود ۰/۸ میزان زهکشی بود بدون این که اختلاف معنی‌داری (در سطح ۹۵ درصد) بین تیمارهای آلوده و غیرآلوده باشد (جدول ۲).

ج) غلظت فلزات سنگین در پروفیل خاک

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است میزان غلظت فلزات در تیمارهای آلوده بیشتر از غیرآلوده است که این افزایش به خصوص در مورد تیمارهای کشت شده معنی‌دار است ($p \leq ۰/۰۵$). حداکثر غلظت در زیر عمق اختلاط (۱۰ سانتی‌متر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]



شکل ۳. غلظت فلزات سنگین قابل عصاره‌گیری با DTPA در نیمرخ خاک در تیمارهای مختلف.

برای مقایسه بهتر، محور افقی بر حسب لگاریتم طبیعی نمایش داده شده است. تیمارها در صفحه ۵۸ توضیح داده شده‌اند.

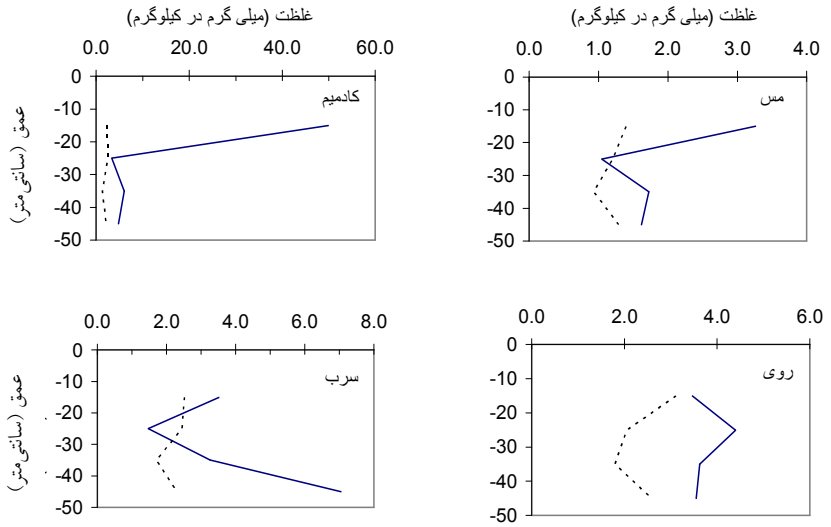
بالایی خاک) مربوط به عنصر روی (با میانگین ۱۰/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک در عمق ۱۵ سانتی‌متر) در تیمار آلوده کشت شده و حداقل آن مربوط به کادمیم (با میانگین ۰/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک در عمق ۱۵سانتی‌متر) در تیمار آلوده آیش بود که با توجه به مقدار کاربرد بیشتر فلز روی در مقایسه با کادمیم، نتایج فوق طبیعی است.

میزان غلظت فلزات سنگین عصاره‌گیری شده با DTPA در پروفیل خاک در تیمارآلوده کشت شده بیشتر از تیمار آلوده کشت نشده بود. برای عمق‌های بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر، میزان غلظت کادمیم در تیمار کشت شده (به‌جز عمق ۳۵ سانتی‌متر) به طور معنی‌داری ($p\leq$ ۰/۰۵) بیشتر از تیمار آیش بود. به همین‌صورت، میزان مس قابل عصاره‌گیری با DTPA تاعمق ۳۵سانتی‌متر (به‌جز عمق ۲۵ سانتی‌متر) به طور معنی‌داری ($p\leq$ ۰/۰۵) در تیمار کشت شده بیشتر از تیمار آیش بود. این مقایسه برای فلز روی نشان داد که در تیمار کشت شده، غلظت روی تا عمق ۴۵ سانتی‌متر (به‌جز عمق ۳۵ سانتی‌متر) به طور معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۵) بیشتر از غلظت روی در تیمار آیش بود. میزان سرب درتیمار کشت شده تفاوت معنی‌داری ($p\leq$ ۰/۰۵) با تیمار آیش در عمق‌های مختلف بیشتر از ۱۰سانتی‌متر نداشت.

برای مقایسه تأثیر گلرنگ بر غلظت‌های فلزات عصاره‌گیری شده با DTPA، غلظت‌های اندازه‌گیری شده در ستون‌های آلوده تقسیم بر غلظت فلزات در خاک غیر آلوده گردید تا داده‌ها نرمال شوند (شکل ۴). اختلاف بین منحنی‌های خط شکسته (تیمارهای بدون کشت) و کامل (تیمارهای کشت شده) نقش گلرنگ را در انتقال فلزات مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور دیده می‌شود، حضور گیاه تأثیر معنی‌داری ($p\leq$ ۰/۰۵) برانتقال فلزات در نیمرخ خاک داشته است به طوری که در بیشتر عمق‌ها، غلظت فلزات در ستون‌های آلوده کشت شده بیشتر از کشت نشده بود. حداکثر غلظت کادمیم ۵۰ برابر غلظت روی و مس و ۱۰ برابر غلظت سرب بود. احتمالاً ترشح مواد آلی از ریشه‌های گلرنگ و نقش کمپلکس کنندگی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]



شکل ۴. مقایسه غلظت قابل عصاره‌گیری فلزات سنگین با DTPA دراعماق خاک در تیمارهای مختلف با اعداد نرمال شده (غلظت‌های فلزات درتیمارآلوده تقسیم بر تیمارغیرآلوده مربوطه). تیمارها در صفحه ۵۸ توضیح داده شده‌اند. منحنی‌های خط شکسته مربوط به تیمارهای بدون کشت و خط کامل مربوط به تیمارهای کشت شده هستند.

جدول ۳. میزان جذب فلزات سنگین به وسیله گلرنگ (میلی‌گرم در ستون)

تیمار	کادمیم	مس	روی	سرب
ستون آلوده	۰/۶۳ a	۳/۴۲ a	۳۱/۳۲ a	۰/۰۹ a
ستون آلوده نشده	۰/۰۵ b	۲/۴۷ b	۱۵/۵۵ b	۰/۰۸ a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد بر طبق آزمون LSD دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

آنها با فلزات مورد مطالعه و نیز تأثیر مکانیکی (ایجاد خلل و فرج در خاک) ریشه گیاه تا عمق‌های بیشتر خاک می‌تواند در جابه‌جایی فلزات نقش داشته باشد (۱۵).

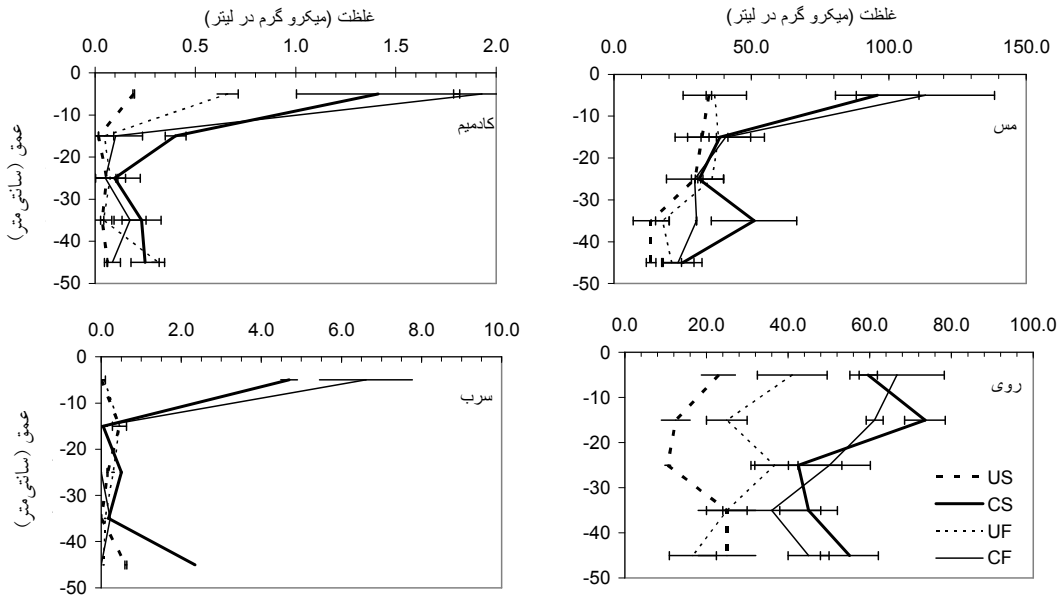
نکته دیگر، ترتیب افزایش غلظت فلزات سنگین می‌باشد. در حالی که در تیمار آلوده آیش، فلز روی حداکثر غلظت را داشت (میانگین ۲/۳۴ میلی گرم در کیلوگرم خاک) ولی در تیمار آلوده کشت شده ترتیب افزایش غلظت عناصر به صورت کادمیم > سرب > روی > مس بود که این نتایج با نتایج کاموبرکو و همکاران (۵) و الیوت و همکاران (۹) هم‌آهنگی دارد، با این تفاوت که غلظت سرب در مقایسه با مس بیشتر شده است که احتمالاً به دلیل جذب بیشتر مس توسط گلرنگ در مقایسه با سرب می‌باشد (جدول ۳).

غلظت محلول فلزات به طورکلی روند مشابه غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA را نشان می دهد (شکل۵) با این تفاوت که میزان سرب محلول در عمق‌های زیر عمق اختلاط به شدت کاهش یافته است. ترتیب حلالیت فلزات بر اساس افزایش غلظت محلول فلزات به صورت کادمیم > روی > مس > سرب بود. غلظت محلول کادمیم، مس و روی در تیمار آلوده کشت شده بیشتر از تیمار آلوده آیش بود. نتایج مذکور به خوبی نقش گلرنگ در افزایش حلالیت چهار فلز به‌جز سرب را نشان می‌دهد و با نتایج مطالعات قبلی مطابقت دارد(۵).

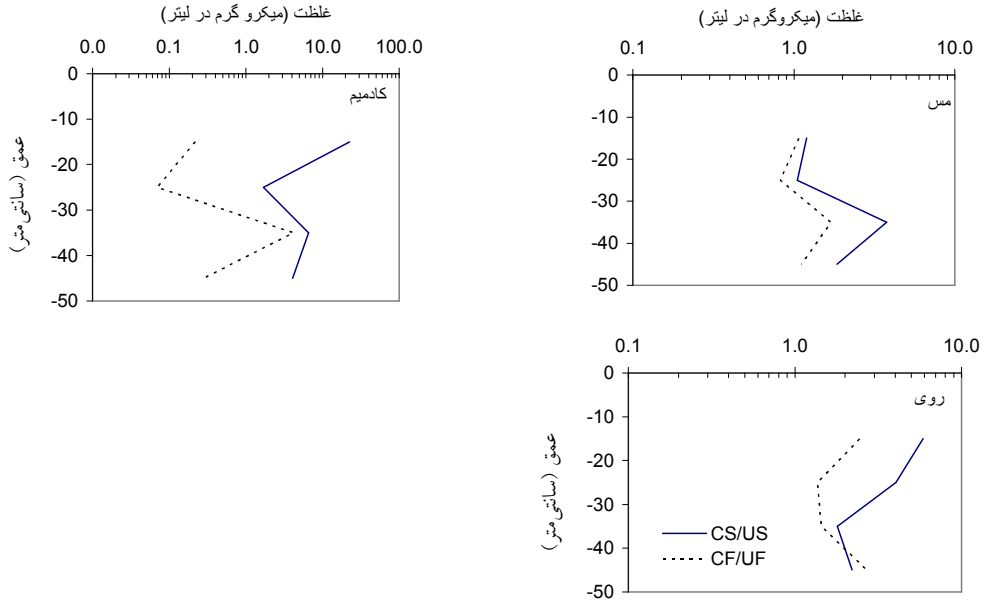
مقایسه نتایج با داده‌های نرمال شده نیز با وضوح بیشتری این اختلاف را نشان می‌دهد (شکل ۶). غلظت محلول نرمال شده کادمیم،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]



شکل ۵. غلظت محلول فلزات سنگین در نیمرخ خاک تیمارهای مختلف. تیمارها درصفحه ۵۸ توضیح داده شده‌اند.



شکل ۶. مقایسه غلظت محلول فلزات سنگین دراعماق خاک درتیمارهای مختلف با اعداد نرمال شده (غلظت‌های فلزات درتیمارآلوده تقسیم بر تیمارغیرآلوده مربوطه).به دلیل وجود غلظت محلول صفر برای سرب در تیمار بدون آلودگی، امکان رسم شکل مربوط به سرب وجود نداشت. تیمارها درصفحه ۵۸ توضیح داده شده‌اند.

مس و روی در تیمار آلوده کشت شده در عمق‌های بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر (با میانگین۵/۷) بیشتر از تیمار آلوده آیش (با میانگین ۲/۶) بود.

د) جذب فلزات به وسیله گلرنگ

جدول ۳ میزان جذب فلزات سنگین به وسیله گلرنگ در دو تیمارآلوده و آلوده نشده را نشان می‌دهد. آلوده کردن سطح خاک

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]

جدول ۴. میزان جذب فلزات سنگین به وسیله گلرنگ (درصد از میزان اولیه کل فلزات)

تیمار	کادمیم	مس	روی	سرب
ستون آلوده	۱/۴۱ a	۰/۴۱ a	۱/۸۵ a	۰/۰۲ a
ستون آلوده نشده	۰/۱۱ b	۰/۲۹ b	۰/۹۲ b	۰/۰۲ a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح احتمال۵ درصد بر طبق آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار هستند.

جدول ۵. میزان فلزات سنگین در زه آب (درصد از میزان اولیه کل فلزات)

تیمار	کادمیم	مس	روی	سرب
ستون آلوده کشت شده	۰/۷۱۲ a	۰/۵۱ a	۲/۱۵ a	۰/۳۳ a
ستون آلوده نشده کشت شده	۰/۰۲ d	۰/۲۱ b	۰/۷۹ c	۰/۰۶ c
ستون آلوده آیش	۰/۴۰ b	۰/۶۲ a	۲/۶۴ a	۰/۳۱ a
ستون آلوده نشده آیش	۰/۱۸ c	۰/۲۳ b	۱/۴۲ b	۰/۲۳ b

در هر ستون، میانگین‌های دارای‌حروف متفاوت در سطح احتمال ۵٪ بر طبق آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار هستند.

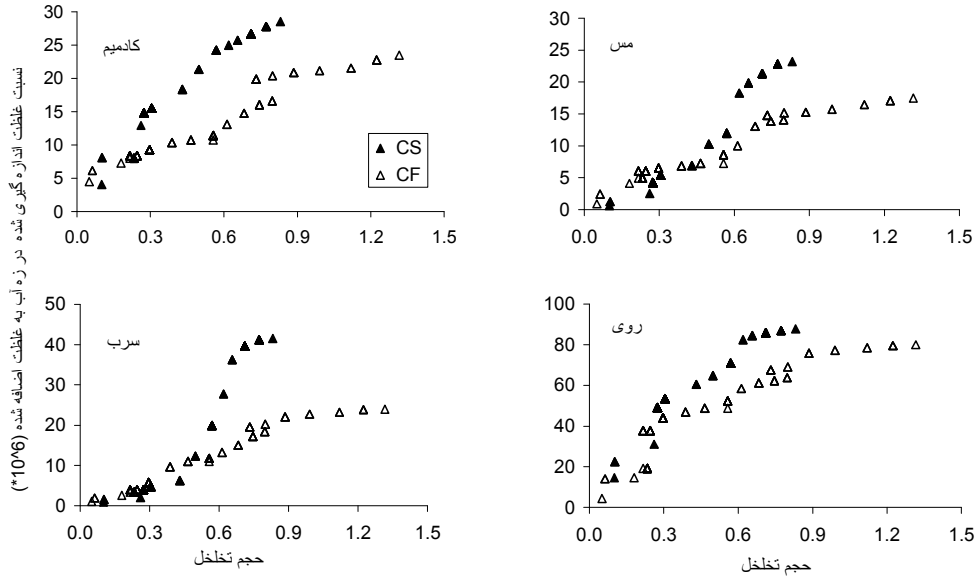
باعث افزایش معنی‌دار ($p\leq ۰/۰۵$) فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی گردید. میزان جذب کادمیم در ستون‌های آلوده در مقایسه با ستون‌های غیرآلوده ۱۲/۵ برابر افزایش داشت. مقادیر افزایش مذکور برای مس، سرب و روی به ترتیب ۱/۴، ۱ و۲ برابر بود. نتایج مذکور با نتایج به دست آمده از مطالعات قبلی مطابقت دارند (۱۸ و ۳۳). با توجه به میزان بیشتر روی در مقایسه با کادمیم در خاک، میزان مطلق جذب روی بیشتراز بقیه فلزات بود. محاسبه درصد جذب فلزات سنگین به وسیله گلرنگ از میزان اولیه فلزات سنگین خاک (جدول ۴) نشان داد که در شرایط آلوده، درصد جذب کادمیم و روی (با میانگین ۱/۵ درصد) به وسیله گیاه بیشتر از مس وسرب می‌باشد.

ه) غلظت فلزات سنگین در زه آب خروجی از ستون‌ها

آلودن خاک سطحی باعث افزایش میزان غلظت فلزات سنگین در زه آب ستون‌ها گردید. جدول ۵ میزان خروج فلزات مورد مطالعه را به صورت درصدی از میزان اولیه فلزات در خاک نشان می‌دهد. غلظت کادمیم، مس، سرب و روی در زه آب خروجی ستون‌های آلوده کشت شده در مقایسه با ستون‌های غیرآلوده کشت شده به ترتیب ۳۲، ۲/۵، ۶ و۲/۷ برابر افزایش یافت. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود میزان فلزات خروجی از ستون‌های آلوده کشت نشده (آیش آلوده) اختلاف معنی‌داری ($p\leq ۰/۰۵$) با ستون‌های کشت شده ندارد که دلیل عمده آن را می‌توان در میزان حجم آب خروجی بیشتر تیمارهای بدون گیاه ذکر کرد (جدول ۲). البته میزان کادمیم در زه آب تیمار آلوده و در حضور گلرنگ بیشتر از تیمار آلوده و بدون گیاه بود که نقش مهم گیاه را در انتقال کادمیم نشان می‌دهد. این نکته تأییدی است برآنچه در بخش عناصر خاک در مورد بیشترین اثر گیاه بر حلالیت این عنصر در بین عناصر مورد مطالعه بیان شد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]



شکل ۷. منحنی رخنه فلزات سنگین برای تیمارهای آلوده شده به فلزات سنگین. تیمارها درصفحه ۵۸ توضیح داده شده‌اند.

و) منحنی رخنه فلزات سنگین

شکل ۷ منحنی رخنه فلزات سنگین مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که منحنی‌ها نشان می‌دهند، به ترتیب کادمیم و روی بیشترین تحرک را در خاک داشته‌اند. هم‌چنین کادمیم و روی در حجم تخلخل کمتری (کمتر از ۰/۵) در زه‌آب ظاهر شده‌اند. به علاوه تأثیر گیاه در آبشویی فلزات در مقایسه با آیش با افزایش رشد گیاه بیشتر نمایان می‌گردد. این موضوع به خصوص در مورد سرب و مس با وضوح بیشتری دیده می‌شود. نتایج فوق با نتایج به دست آمده از مطالعه کاموبرکو و همکاران (۵) مطابقت دارد. مطالعات دیگر (۹و۲۹) نیز نشان می دهند که حرکت نسبی این عناصر به طورکلی به صورت Cd > Zn > Cu > Pb می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد در خاک آهکی مورد مطالعه حضورگلرنگ باعث افزایش غلظت قابل عصاره‌گیری فلزات سنگین با DTPA و غلظت محلول آنها در عمق‌های مختلف نیمرخ خاک و در نتیجه افزایش حرکت و انتقال آنها گردید. هم‌چنین غلظت فلزات در زه‌آب خروجی تیمارهای آلوده، به خصوص در حضور گلرنگ، بیشتر بود. میزان جذب این عناصر به وسیله گیاه نیز افزایش یافت. از فلزات مورد مطالعه، کادمیم و روی بیشترین تحرک را نشان دادند.

منابع مورد استفاده

1. Amini, M., H. Khademi, M. Afyuni and K. C. Abbaspour. 2005. Variability of available cadmium in relation to soil properties and land use in an arid region in central Iran. Water, Air, Soil Pollut. 162: 205-218.
2. Bassil, E. S. and S. R. Kaffka. 2002. Response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) to saline soils and irrigation. I. Consumptive water use. Agric. Water Manag. 54: 67-80.
3. Baveye, P., M. B. McBride, D. Bouldin, T. D. Hinsely, S. A. Dahdoh and F. Abdel-Sabour. 1999. Mass balance and distribution of sludge-born trace elements in silt loam soil following long term applications of sewage sludge. The Sci. Total Environ. 227: 13-28.
4. Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. PP. 363-375. *In*: A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]

SSSA, Madison, WI, USA.
5. Camobreco, V. J., B. K. Richards, T. S. Steenhuis, J. H. Peverly and M. McBride. 1996. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. Soil Sci. 161(11): 740-750.
6. Caron, J., O. Banton, D. A. Angers and J. P. Villeneuve. 1996. Preferential bromide transport through a clay loam under alfalfa and corn. Geoderma 69: 175-191.
7. Chang, A. C., J. E. Warneke, A. L. Page and L. J. A. Lund. 1984. Accumulation of heavy metals in sewage sludge treated soils. J. Environ. Qual. 13(1): 87-91.
8. De Matos, A. T., M. P. F. Fontes, L. M. da Costa and M. A. Martinez. 2001. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. Environ. Pollut. 111:429-435.
9. Elliot, H., M. R. Librerati and C. P. Hung. 1986. Competitive adsorption of heavy metals by soil. J. Environ. Qual. 15: 214-219.
10. FOEFL (Swiss Federal Office of Environment, Forest and Landscape). 1998. Commentary on the Ordinance Relating to Pollutants in Soils. VBBo of July 1, Bern.
11. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 383-411. *In*: A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison, WI, USA.
12. Hinz, C. and H. M. Selim. 1994. Transport of Zn and Cd in soils: Experimental evidence and modeling approaches. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1316-1327.
13. Kaffka, R. S. and T. E. Kearney. 1998. Safflower Production in California. University of California, Agricultural and Natural Resources Pub., USA.
14. Khoshgoftar, A. H., H. Shariatmadari, N. Karimian, M. Kalbasi, S. E. A. T. van der Zee and D. R. Parker. 2004. Salinity and zinc application effects on phytoavailability of cadmium and zinc. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 1885-1889.
15. Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. PP. 635-662. *In:* A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
16. McBride, M. B. 1995. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations protective? J. Environ. Qual. 24: 5-18.
17. Meek, B. D., W. R. DeTar, D. Rolph, E. R. Rechel and L. M. Carter. 1990. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no-till cotton cropping system. Soil Sci. Soc. Am. J. 54: 505-508.
18. Merry, R. H., K. G. Tiller, P. C. De Vries and B. Cartwright. 1981. Contamination of wheat crops around a lead-zinc smelter. Environ. Pollut. 2: 37-48.
19. Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeney. 1992. Methods of soil analysis. Part II. Chemical and Mineralogical Properties. 2nd ed., SSSA, Madison, WI, USA.
20. Pais, I. and J. B. Jones. 1997. The handbook of trace elements. St. Lucie Press, Boca Raton, Florida.
21. Plassard, F., T. Winiarski and M. Petit-Ramel. 2000. Retention and distribution of three heavy metals in a carbonated soil: Comparison between batch and unsaturated column studies. J. Contamin. Hydrol. 42: 99-111.
22. Richards, B. K., T. S. Steenhuis, J. H. Peverly and M. B. McBride. 1998. Metal mobility at an old, heavily loaded sludge application site. Environ. Pollut. 99: 365-377.
23. Richards, B. K., T. S. Steenhuise, J. H. Peverly and M. B. McBride. 2000. Effect of sludge-processing mode, soil texture and soil pH on metal mobility in undisturbed soil columns under accelerated loading. Environ. Pollut. 109: 327-346.
24. Schwab, A. P., M. K. Banks and L. E. Erickson. 2002. Fate and transport of heavy metals and radionuclides in soil, The impact of vegetation. Kansas State University, http//www.engg.ksu.edu/HSRC/fate.html/.
25. Soltanpour, P. N. 1991. Determination of nutrient availability and element toxicity by AB-DTPA soil test and ICPS. Adv. Soil Sci. 16: 165-190.
26. Sposito, G., L. J. Lund and A. C. Chang. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in soil phases. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 260-264.
27. Steenhuise, T. S. and M. B. McBride. 2001. Preferential flow and organic enhancement of metals transport to groundwater from land-applied biosolids in the Northeastern U.S. Water Res. Res. Grant Proposal, http:// water.usgs.gov / wrri/98grants /nypreferential.htm.
28. Sumner, M. E. and W. P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. PP 1201-1229. *In*: D. L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
29. Tylor, L. D. and M. B. McBride. 1982. Mobility and extractability of cadmium, copper, nickel and zinc in organic and mineral soil columns. Soil Sci. 134: 198-205.
30. U.S. Environmental Protection Agency. 1993. Clean Water Act. Section 503, Vol. 58, No. 32, USEPA, Washington,DC.
31. Walkley, A. and C. A. Black. 1934. An examination of the Degtareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration. Method Soil Sci. 37: 29-38.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]

32. Williams, D. E., J. Vlamis, A. H. Pukite and J. E Corey. 1987. Metal movement in sludge amended soils: A nine year study. Soil Sci. 143 (2):124-131.
33. Wu, J., W. A. Norvell, D. G. Hopkins and R. M. Welch. 2002. Spatial variability of grain cadmium and soil characteristics in a durum wheat field. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 268-275.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1386.11.1.5.7]