

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

غلامعباس صیاد<sup>۱</sup>، مجید افیونی<sup>۲</sup> و سید فرهاد موسوی<sup>۳</sup>

## چکیده

مشکلات مربوط به آلودگی خاک و منابع آب زیرزمینی به وسیله فلزات سنگین در دهه اخیر افزایش یافته است. یکی از مسائلی که اخیراً جلب توجه کرده است، امکان آبتجویی 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 خاطر ایجاد خلل و فرج در خاک و ترشح اسیدهای آلی) و در نتیجه ایجاد جریان ترجیحی می تواند 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 سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر) دست نخورده خاک (Typic haplocalcids) و در گلخانه صورت گرفت. به ده سانتی متری بالایی خاک نیمی از ستون‌ها، به عنوان تیمار آلوده، ۱۹/۵ کیلوگرم در هکتار کادمیم، ۷۵۰ کیلوگرم در هکتار مس، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سرب و ۱۴۰۰ 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 ۱۰ سانتی متری 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، ۱/۵ و ۱/۵ برابر تیمار آلوده آیش افزایش (معنی دار در سطح ۵ درصد) یافت. غلظت محلول کادمیم، مس و روی نیز در تیمار کشت شده در مقایسه با آیش به ترتیب ۲/۴، ۱/۲ و ۱/۱ برابر افزایش داشت. غلظت سرب تفاوت معنی داری در دو تیمار آلوده 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 و ۲/۷ برابر افزایش داشت. به عنوان نتیجه‌گیری کلی می توان 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 بر حسب 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

## مقدمه

سوراخ‌های ایجاد شده توسط ریشه‌ها و کرم‌ها) اغلب توده خاک را دور می‌زنند (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 (VBB0) (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 VBB0 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 و ۵۰

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 می‌باشد (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 و ۲۲). 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 و املاح 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،

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

### مواد و روش ها

مطالعه در ستون‌های خاک دست نخورده و در لوله‌های پلی اتیلنی با قطر ۲۲/۵ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان صورت گرفت. ستون‌های خاک از مزرعه‌ای واقع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی کیوتراآباد در ۴۰ کیلومتری شرق اصفهان تهیه گردید.

برای تعیین خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌های دست خورده نیز از مزرعه مذکور از عمق‌های ۲۰ سانتی متری 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 سانتی متر و ارتفاع ۵ سانتی متر (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 از تبخیر) 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 سانتی متر بخش بالایی نیمی از ستون‌ها (۶ عدد)، ۱۹/۵ کیلوگرم در هکتار کادمیم (با استفاده از محلول کلرور کادمیم)، ۷۵ کیلوگرم در هکتار مس (با محلول کلرور مس)، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سرب (با محلول نترات سرب) و ۱۴۰۰ کیلوگرم در هکتار روی

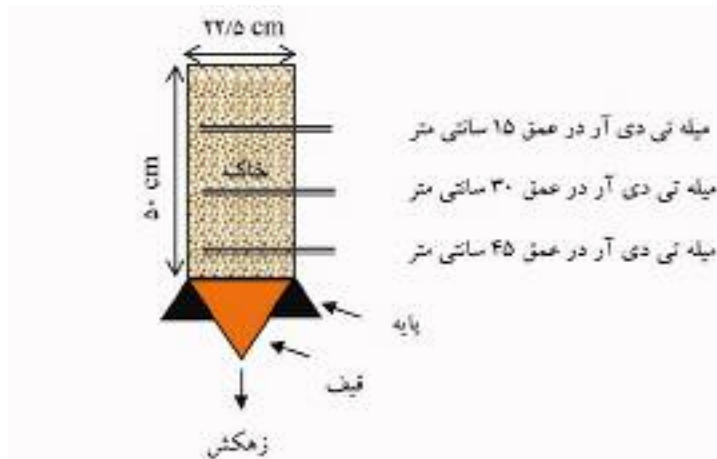
میلی گرم در کیلوگرم کمتر بود ولی در برخی نقاط افزایش قابل ملاحظه‌ای داشتند.

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، چغندر قند 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 ۳-۴ 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 و ۱۷). 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.



شکل ۱. مقطع ستون خاک

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 جمع‌آوری 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 مختلف ۵۰ - ۰ سانتی‌متر و به مقاطع ۱۰ سانتی‌متری (۱۰-، ۲۰-، ۳۰-، ۴۰-، ۵۰- سانتی‌متر) صورت گرفت. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن خرد شده و از الک ۲ میلی‌متری گذرانده شدند. با استفاده از روش سلطانیور (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،

(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:

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

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

تیمار آلوده آیش (Contaminated Fallow = CF)

تیمار غیرآلوده آیش (Uncontaminated Fallow = UF)

در طی این دو هفته، ستون‌ها با آب (با قابلیت هدایت الکتریکی ۵/۵ دسی‌زیمنس 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 نترات 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

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مورد مطالعه (انحراف معیار  $\pm$  میانگین)

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

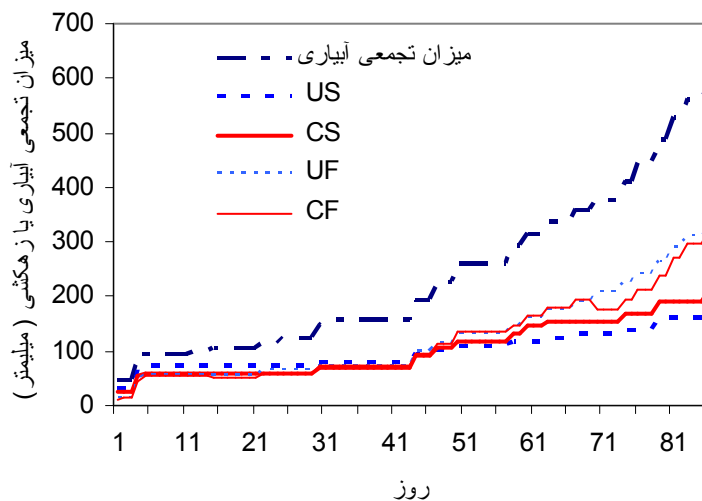
طی ۸۶ روز مطالعه در مجموع ۵۸۹ میلی‌متر آبیاری صورت گرفت و حدود ۳۵ درصد از این مقدار به صورت زه‌آب خارج

جدول ۲. موازنه آبی برای تیمارهای مختلف<sup>۱</sup>

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

۱. میزان آبیاری در دوره آزمایش ۵۸۹ میلی متر بود.

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



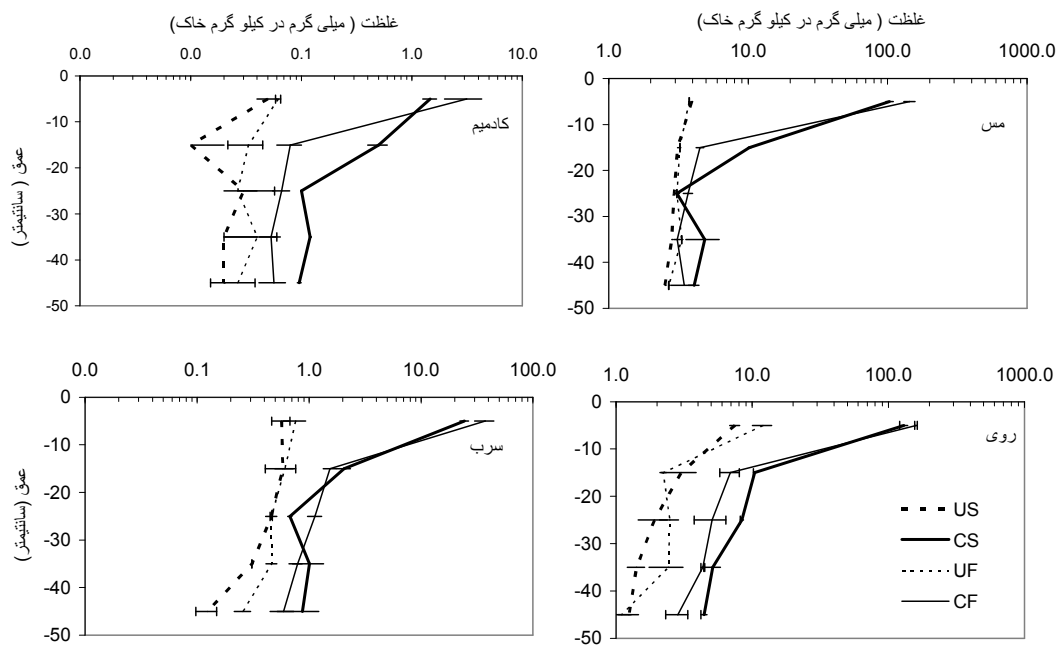
شکل ۲. مقایسه میزان حجم زه آب خروجی از تیمارهای مختلف. تیمارها در صفحه ۵۸ توضیح داده شده‌اند.

۰/۸ میزان زهکشی بود بدون این که اختلاف معنی داری (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 معنی دار است (۰/۰۵). حداکثر غلظت در زیر عمق اختلاط (۱۰ سانتی‌متر

گردید (جدول ۲). میزان تلف شدن آب در تیمار آلوده نشده کشت شده از طریق تبخیر و تعرق ۲/۲ برابر میزان آبسویی 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 تیمار آیش، میزان تبخیر حدود



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

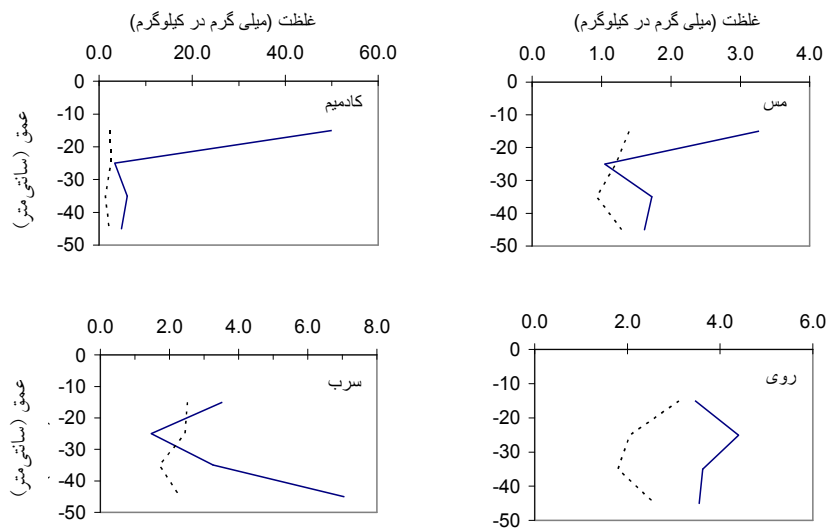
برای مقایسه بهتر، محور افقی بر حسب لگاریتم طبیعی نمایش داده شده است. تیمارها در صفحه ۵۸ توضیح داده شده‌اند.

به طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) بیشتر از غلظت روی در تیمار آیش بود. میزان سرب در تیمار کشت شده تفاوت معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) با تیمار آیش در عمق‌های مختلف بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر 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 ( $p \leq 0.05$ ) بر انتقال 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 کمپلکس‌کنندگی

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 ۱۵ سانتی‌متر) 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 تیمار آلوده کشت شده بیشتر از تیمار آلوده کشت نشده بود. برای عمق‌های بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر، میزان غلظت کادمیم در تیمار کشت شده (به جز عمق ۳۵ سانتی‌متر) به طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) بیشتر از تیمار آیش بود. به همین صورت، میزان مس قابل عصاره‌گیری با DTPA تا عمق ۳۵ سانتی‌متر (به جز عمق ۲۵ سانتی‌متر) به طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) 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 (به جز عمق ۳۵ سانتی‌متر)



شکل ۴. مقایسه غلظت قابل عصاره‌گیری فلزات سنگین با DTPA در اعماق خاک در تیمارهای مختلف با اعداد نرمال شده غلظت‌های فلزات در تیمار آلوده تقسیم بر تیمار غیر آلوده (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 <sup>a</sup>	۳/۴۲ <sup>a</sup>	۳۱/۳۲ <sup>a</sup>	۰/۰۹ <sup>a</sup>
ستون آلوده نشده	۰/۰۵ <sup>b</sup>	۲/۴۷ <sup>b</sup>	۱۵/۵۵ <sup>b</sup>	۰/۰۸ <sup>a</sup>

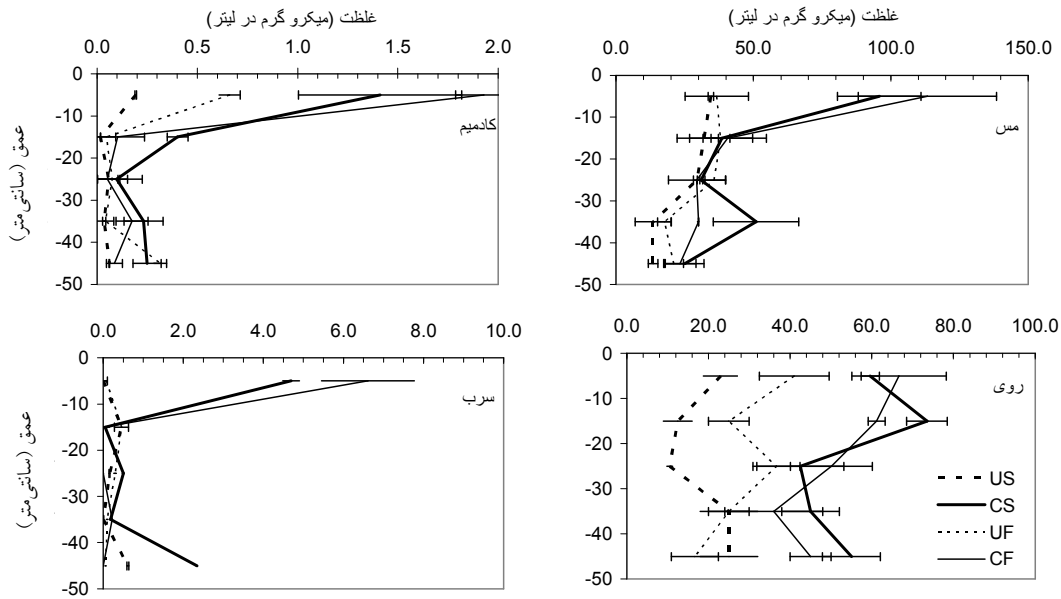
در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح احتمال ۵ درصد بر طبق آزمون LSD دارای اختلاف معنی‌دار هستند.

غلظت محلول فلزات به طور کلی روند مشابه غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA را نشان می‌دهد (شکل ۵) 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).

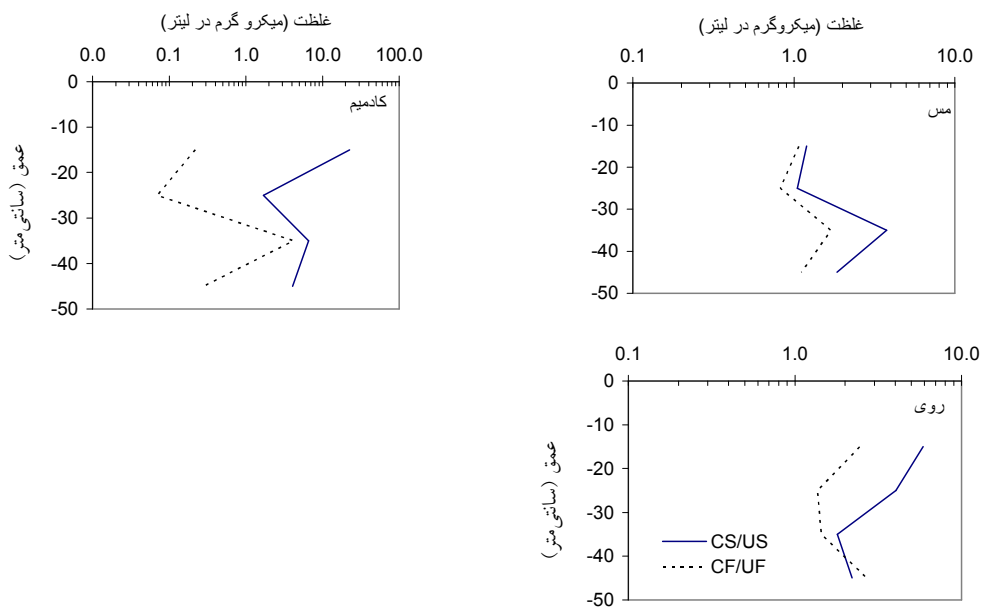
مقایسه نتایج با داده‌های نرمال شده نیز با وضوح بیشتری این اختلاف را نشان می‌دهد (شکل ۶). غلظت محلول نرمال شده کادمیم،

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 میلی‌گرم 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).



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



شکل ۶. مقایسه غلظت محلول فلزات سنگین در اعماق خاک در تیمارهای مختلف با اعداد نرمال شده

(غلظت‌های فلزات در تیمار آلوده تقسیم بر تیمار غیر آلوده مربوطه). به دلیل وجود غلظت محلول صفر برای سرب در تیمار بدون آلودگی،

امکان رسم شکل مربوط به سرب وجود نداشت. تیمارها در صفحه ۵۸ توضیح داده شده‌اند.

#### د) جذب فلزات به وسیله گلرنگ

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

مس و روی در تیمار آلوده کشت شده در عمق‌های بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر (با میانگین ۵/۷) بیشتر از تیمار آلوده آیش (با میانگین ۲/۶) بود.

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

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

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

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

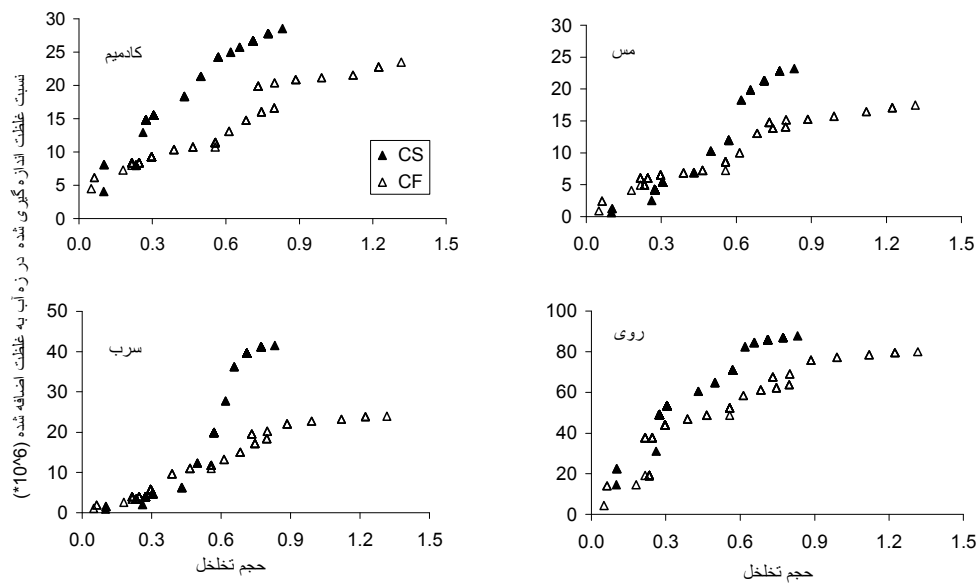
تیمار	کادمیم	مس	روی	سرب
ستون آلوده کشت شده	۰/۷۱۲ <sup>a</sup>	۰/۵۱ <sup>a</sup>	۲/۱۵ <sup>a</sup>	۰/۳۳ <sup>a</sup>
ستون آلوده نشده کشت شده	۰/۰۲ <sup>d</sup>	۰/۲۱ <sup>b</sup>	۰/۷۹ <sup>c</sup>	۰/۰۶ <sup>c</sup>
ستون آلوده آیش	۰/۴۰ <sup>b</sup>	۰/۶۲ <sup>a</sup>	۲/۶۴ <sup>a</sup>	۰/۳۱ <sup>a</sup>
ستون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

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

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 و ۲/۷ برابر افزایش یافت. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود میزان فلزات خروجی از ستون‌های آلوده کشت نشده (آیش آلوده) اختلاف معنی‌داری ( $p \leq 0/05$ ) 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.

باعث افزایش معنی‌دار ( $p \leq 0/05$ ) 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 و ۲ 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 بیشتر از 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 و سرب می‌باشد.

ه) غلظت فلزات سنگین در زه آب خروجی از ستون‌ها  
آلودن خاک سطحی باعث افزایش میزان غلظت فلزات سنگین



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

طور کلی به صورت  $Pb > Cu > Zn > Cd$  می‌باشد.

### نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد در خاک آهکی مورد مطالعه حضور گلرنگ 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.

### 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 کامورکو و همکاران (۵) مطابقت دارد. مطالعات دیگر (۹ و ۲۹) نیز نشان می‌دهند که حرکت نسبی این عناصر به

### 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.*

- 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. VBB0 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. 2<sup>nd</sup> 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. Steenhuis, 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. Steenhuis, 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.

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.