



## تأثیر کمپوست زباله شهری و لجن فاضلاب بر توزیع فرم‌های مختلف عناصر کادمیوم، سرب و نیکل افزوده شده به دو خاک آهکی

\*امیر فتوت<sup>۱</sup> و اکرم حلاج‌نیا<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، کارشناس ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۱/۴/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۵

### چکیده

در این پژوهش تأثیر دو نوع ماده آلی، کمپوست و لجن فاضلاب در ۲ سطح بر توزیع کادمیوم، سرب و نیکل در دو خاک آهکی بررسی شد. بعد از تیمار نمونه‌های خاک با مواد آلی (صفر و ۲ درصد) عناصر کادمیوم، نیکل و سرب به ترتیب به مقدار ۱۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم از نمک‌های نیتراتی آن‌ها به خاک‌ها افزوده شد. در زمان‌های ۱۲ ساعت، ۲۰ و ۴۰ روز مقدار فلزات در بخش‌های مختلف به وسیله روش عصاره‌گیری متوالی و فرم قابل استخراج فلزات با DTPA اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در طی دوره آزمایش سرب و نیکل به سرعت از فرم تبادلی به بخش‌های پایدارتر منتقل شدند. اما بخش قابل ملاحظه‌ای از کادمیوم در فرم تبادلی باقی ماند. در پایان دوره آزمایش درصد توزیع کادمیوم، نیکل و سرب به ترتیب به صورت کربناتی < اکسیدهای آهن و منگنز < تبادلی، اکسیدهای آهن و منگنز < کربناتی < مواد آلی، کربناتی < اکسیدهای آهن و منگنز < مواد آلی بود. مقدار عناصر در فرم باقی‌مانده تقریباً تغییر نکرد. تأثیر کمپوست و لجن فاضلاب بر توزیع فلزات مورد مطالعه در دو خاک متفاوت بود اما کاربرد مواد آلی به‌طور عمده موجب افزایش فلزات در فرم مواد آلی و شکل قابل استخراج آن‌ها با DTPA گردید.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، خوابانیدن، عصاره‌گیری پی در پی، توزیع

\*مسئول مکاتبه: [afotovat@yahoo.com](mailto:afotovat@yahoo.com)

## مقدمه

امروزه آلودگی با فلزات سنگین پدیده‌ای چشم‌گیر و قابل توجه در زیست‌بوم به‌شمار می‌رود. افزایش فعالیت‌های صنعتی و توجه نکردن به مسایل زیست‌محیطی در بسیاری از مناطق، خاک را به مخزنی از فلزات سنگین تبدیل کرده است که می‌تواند منجر به تجمع زیستی این فلزات در چرخه غذایی شده و از این نظر تهدیدی جدی برای سلامت انسان به‌حساب آیند. بررسی رفتار فلزات سنگین و تشخیص شکل‌های شیمیایی آن‌ها در خاک و توجه به عوامل مؤثر بر توزیع این اشکال می‌تواند در مدیریت استفاده از خاک‌های آلوده و یا پالایش این خاک‌ها مؤثر باشد. عصاره‌گیری پی در پی یکی از بهترین متدهای قابل استفاده برای به‌دست آوردن اطلاعات در مورد رفتار، تثبیت، فراهمی، تحرک و انتقال فلزات سنگین در خاک می‌باشد (ما و راثو، ۱۹۹۷). از عوامل مؤثر بر رفتار فلزات سنگین در خاک می‌توان به اسیدیته خاک، پتانسیل‌های اکسیداسیون و احیا، ظرفیت تبادل کاتیونی و نوع ترکیبات خاک از جمله مواد آلی، نوع و مقدار رس، اکسیدهای آهن و منگنز و مقدار کربنات کلسیم اشاره کرد. امروزه از مواد آلی مانند کودهای دامی و کمپوست در جهت زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین استفاده می‌شود. این مواد علاوه بر افزایش حاصل‌خیزی خاک و در نتیجه تولید زیست‌توده گیاهی بیش‌تر فراهمی فلزات سنگین را در خاک تغییر می‌دهند. برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ترکیبات آلی می‌توانند باعث افزایش حلالیت عناصر سنگین در خاک شود (الماس و همکاران، ۱۹۹۹). از طرف دیگر مواد آلی با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با فلزات سنگین در خاک به نوعی می‌تواند باعث تثبیت آن‌ها در خاک گردد. ترکیبات آلی می‌توانند باعث توزیع دوباره فلزات سنگین و انتقال آن‌ها از فرم‌های محلول و تبدلی به فرم‌های در ارتباط با مواد آلی، کربناته و باقی‌مانده شوند (شومان، ۱۹۹۹). تأثیر مواد آلی بر توزیع فرم‌های عناصر سنگین در خاک به pH وابسته است. در مطالعه بر روی خاک‌های با pH بالا تشکیل کمپلکس‌های آلی - فلزی می‌تواند باعث افزایش حلالیت این فلزات شود (گریگسون و آلووی، ۱۹۸۴). اگرچه در خاک‌های آهکی این تأثیر متفاوت است به‌طوری‌که کاهش تحرک برخی از عناصر مانند روی و سرب در افزایش کودهای دامی و کمپوست در خاک‌های آهکی در برخی پژوهش‌ها گزارش شده است (کلیمنت و همکاران، ۲۰۰۶). این پژوهش به هدف بررسی تأثیر لجن فاضلاب و کمپوست به‌دست آمده از زباله شهری بر انواع فرم‌های عناصر سنگین در دو خاک آهکی آلوده به این عناصر پایه‌ریزی شده است.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش تأثیر افزودن دو نوع ماده آلی (لجن فاضلاب و کمپوست به‌دست آمده از زباله شهری) در ۲ سطح صفر و ۲ درصد بر توزیع عناصر سنگین سرب (صفر و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، کادمیوم (صفر و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نیکل (صفر و ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در سه زمان صفر (۱۲ ساعت)، ۲۰ و ۴۰ روز در دو خاک آهکی از زیر گروه Typic haplocambid ( $S_1$  و  $S_2$ ) در شرایط آزمایشگاهی و در محدوده رطوبتی ظرفیت مزرعه (رطوبت معادل)، به روش عصاره‌گیری پی در پی بررسی شد.

برای انجام آزمایش نمونه‌های خاک بعد از هواخشک کردن از الک ۲ میلی‌متری و نمونه‌های مواد آلی بعد از خشک کردن از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (جی و بادر، ۱۹۸۲)، pH در گل اشباع و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع اندازه‌گیری شد (رادز، ۱۹۸۲). مواد آلی خاک به روش والکلی و بلاک (۱۹۳۴) و مقدار کربنات کلسیم معادل به روش خشی‌سازی با اسید (ریچارد، ۱۹۶۴) تعیین شد. برای تعیین فرم‌های شیمیایی عناصر سرب، نیکل و کادمیوم در خاک از روش عصاره‌گیری پی در پی روش تسیر و همکاران (۱۹۷۹) استفاده گردید. غلظت عناصر مورد آزمایش در عصاره‌ها به‌وسیله دستگاه جذب اتمی<sup>۱</sup> تعیین گردید. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت فاکتوریل و با ۲ تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAT C و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ و برخی خصوصیات مواد آلی مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است. مطابق جدول ۱ تفاوت عمده دو خاک مورد مطالعه درصد رس می‌باشد به‌طوری‌که در خاک ۲ درصد رس تقریباً ۲ برابر خاک ۱ بود. نکته قابل توجه دیگر مقدار بالای نیکل کل در خاک ۲ می‌باشد.

1- AA-670, Shimadzu

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار جلد (۳)، شماره (۲) ۱۳۹۲

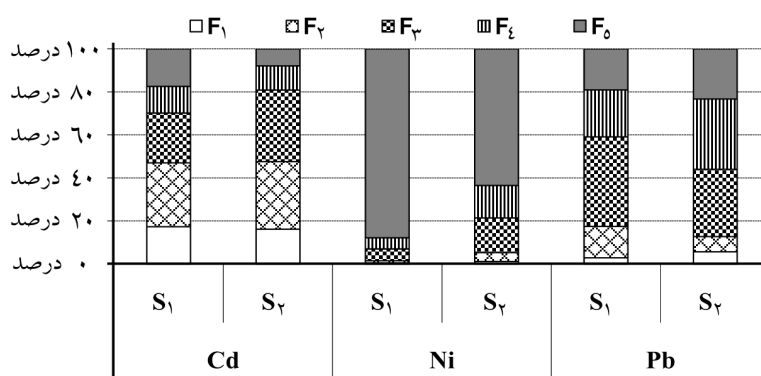
جدول ۱- برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه.

C	CaCO <sub>3</sub>	Ni	Pb	Cd	Sand	Silt	Clay	EC	pH	
(درصد)	(درصد)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(دسی‌زیمنس بر متر)		
۰/۷۵	۱۲/۲	۱۴۲/۴	۱۸/۴	۱/۷	۴۶/۴	۳۵/۶	۱۸	۲/۰	۷/۹	خاک ۱
۰/۹۰	۱۸/۱	۴۴۱/۵	۲۳/۸	۲/۶	۲۴/۶	۴۱/۴	۳۴	۳/۸	۷/۳	خاک ۲

جدول ۲- برخی خصوصیات شیمیایی مواد آلی مورد استفاده.

خاکستر	C	Ni	Pb	Cd	EC <sub>(۱:۵)</sub>	pH <sub>(۱:۵)</sub>	
(درصد)	(درصد)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(میلی گرم بر کیلوگرم)	(دسی‌زیمنس بر متر)		
۸۶/۸	۳/۶	۱۴۳	۵۹/۸	۱/۹	۲/۵	۷/۰	لجن فاضلاب
۷۶/۴	۷/۲	۱۵۴	۱۰۰/۹	۱/۸	۶/۹	۷/۱	کمپوست

از آنجایی که افزودن کمپوست و لجن فاضلاب تأثیر معنی‌داری بر توزیع عناصر نیکل، سرب و کادمیوم بومی خاک‌های مورد مطالعه در زمان‌های صفر، ۲۰ و ۴۰ روز نداشت نتایج مربوط به سطح صفر عناصر در تیمارهای کمپوست و لجن فاضلاب آورده نشده است. نتیجه مشابه در تأثیر نداشتن کمپوست و کودهای حیوانی بر افزایش فراهمی عناصر سنگین در خاک‌های آهکی به‌وسیله کلیمنت و همکاران (۲۰۰۶) نیز گزارش شده است. در مطالعه این پژوهش گران مواد آلی نه تنها موجب افزایش فراهمی عناصر روی و سرب نشد بلکه حتی با تولید ترکیبات کم‌محلول‌تر مانند فسفات‌های این عناصر در نتیجه تجزیه مواد آلی موجب افزایش شکل‌های باثبات‌تر گردید.



شکل ۱- درصد توزیع کادمیوم، سرب و نیکل بومی در فرم‌های مختلف در دو خاک مورد مطالعه.

شکل ۱ توزیع عناصر مورد مطالعه را در فرم‌های محلول و تبادلی ( $F_1$ )، کربناتی ( $F_2$ )، جذب شده  $1$  ( $S_1$ ) و  $2$  ( $S_2$ ) را نشان می‌دهد. براساس شکل ۱، بخش عمده کادمیوم بومی هر دو خاک در فرم‌های تبادلی، کربناتی و اکسیدهای آهن و منگنز قرار داشت. در مورد نیکل سهم فرم باقی‌مانده حداکثر بود که با نتایج ما و راتو (۱۹۹۷) در خاک‌های با pH بالاتر از ۷ و آچی و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. در مورد سرب به‌ترتیب فرم‌های اکسیدهای آهن و منگنز، مواد آلی و باقی‌مانده دارای اهمیت بودند. بزرگ بودن فرم‌های تبادلی و آلی به‌ترتیب در مورد عناصر کادمیوم و سرب در این دو خاک با مشاهده‌های شومان (۱۹۹۸) تطابق دارد در حالی که رجایی و همکاران (۲۰۰۶) سهم کادمیوم را در فرم تبادلی خاک آهکی مورد مطالعه خود ناچیز گزارش کردند.

**کادمیوم:** در هر دو خاک افزودن مواد آلی تأثیر معنی‌داری بر مقدار و تغییرات کادمیوم در فرم تبادلی داشت (جدول ۳). در خاک ۱ در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ روز و در خاک ۲ در زمان ۴۰ روز مقدار کادمیوم در این فرم در تیمار کمپوست و لجن فاضلاب نسبت به تیمار بدون ماده آلی افزایش یافت. به‌عبارت دیگر افزودن مواد آلی موجب افزایش فراهمی کادمیوم در طی زمان گردید. که این مسأله می‌تواند از نظر زیست‌محیطی دارای اهمیت باشد. در خاک ۱ با گذشت زمان مقدار کادمیوم در این فرم در همه تیمارها کاهش پیدا کرد در حالی که در خاک ۲ در تیمارهای مواد آلی تفاوت معنی‌داری در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ روز مشاهده نشد. تأثیر نوع ترکیب آلی بر مقدار کادمیوم در فرم‌های تبادلی و کربناتی معنی‌دار نبود. مواد آلی تازه مانند کودهای دامی با ترکیبات آلی محلول فراوان می‌توانند فراهمی عناصر را در زمان کوتاهی بعد از اضافه کردن افزایش دهند (الماس و همکاران، ۱۹۹۹؛ کلیمنت و همکاران، ۲۰۰۶). حال آن‌که مواد آلی مانند کمپوست یا پیت با دارا بودن مواد هومیکی و پایدارتر می‌توانند فراهمی عناصر سنگین را با جذب و تشکیل کمپلکس کاهش دهند (شومان، ۱۹۹۹). مهارا و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که مواد آلی با وزن مولکولی کم‌تر نقش مؤثرتری در کمپلکس کردن کادمیوم داشتند.

در خاک ۱ افزودن مواد آلی موجب کاهش مقدار کادمیوم در فرم کربناتی نسبت به خاک بدون ماده آلی در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ روز گردید در حالی که در خاک ۲ این تأثیر تنها در زمان ۴۰ روز مشاهده شد (جدول ۳). در هر دو خاک مقدر کادمیوم در فرم کربناتی تا زمان ۲۰ روز افزایش و سپس کاهش یافت که می‌تواند نشان‌دهنده توزیع دوباره کادمیوم از این فرم باشد. به‌طوری‌که در هر دو خاک

مقدار کادمیوم در فرم اکسیدهای آهن در زمان ۴۰ روز به طور مشخص افزایش پیدا کرد. می توان گفت کربنات‌ها در زمان‌های اولیه نقش مهمی را در جذب کادمیوم از محلول خاک داشته‌اند و بعد از زمان ۲۰ روز اکسیدهای آهن مؤثرتر بودند. در خاک ۱ مقدار کادمیوم در فرم مواد آلی در زمان ۲۰ روز افزایش معنی‌داری نسبت به زمان صفر پیدا کرد ولی در زمان ۴۰ روز نسبت به زمان ۲۰ روز کاهش پیدا کرد. در حالی‌که در خاک ۲ تا زمان ۴۰ روز افزایش مقدار کادمیوم در این فرم ادامه داشت. در خاک ۱ در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ روز و در خاک ۲ در زمان ۴۰ روز افزودن مواد آلی موجب افزایش کادمیوم در فرم مواد آلی گردید. شومان و همکاران (۲۰۰۲) نشان دادند که ترکیبات آلی مانند کمپوست موجب توزیع کادمیوم از شکل‌های محلول و تبادل به فرم مواد آلی و در نتیجه کاهش فراهمی آن برای گیاه می‌شود. این در حالی است که برخی مطالعات نشان می‌دهد که ترکیبات آلی مختلف تأثیر متفاوتی بر توزیع عناصر در خاک دارند (شومان، ۱۹۹۸). آنتونی آدیس و آلوی (۲۰۰۲) نشان دادند که ترکیبات آلی محلول ناشی از کاربرد لجن فاضلاب فراهمی کادمیوم، روی و نیکل و در نتیجه جذب آن توسط گیاه را افزایش داد. مقدار کادمیوم در فرم باقی‌مانده تنها در خاک ۱ و در زمان ۴۰ روز در تیمار بودن ماده آلی افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). در مطالعه رجایی و همکاران (۲۰۰۶) نشان داده شد که ۸۸-۸۲ درصد کادمیوم افزوده شده در طی ۱۶ هفته خوابانیدن در شکل‌های محلول و تبدلی، کربناتی و مواد آلی با غالبیت شکل کربناتی موجود بود. مفتون و همکاران (۲۰۰۲) در مطالعه عوامل مؤثر بر جذب کادمیوم در ۲۰ خاک آهکی نشان دادند که مقدار جذب کادمیوم با مقدار رس و کربنات‌ها همبستگی داشت. در خاک ۱ افزودن مواد آلی موجب افزایش کادمیوم قابل استخراج با DTPA در زمان صفر گردید. در هر دو خاک در زمان ۲۰ روز مقدار کادمیوم قابل استخراج با DTPA در تیمارهای مواد آلی کاهش پیدا کرد. در مطالعه کاراکا (۲۰۰۴) نشان داده شد که مواد آلی مختلف تأثیر متفاوتی بر کادمیوم قابل استخراج با DTPA داشتند. ونگ و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که مواد آلی محلول از لجن فاضلاب موجب افزایش فراهمی روی و کادمیوم گردید. در افزودن مواد آلی محلول از لجن فاضلاب جلوگیری از جذب عناصر در خاک‌های اسیدی کم‌تر از خاک‌های آهکی و در خاک‌های با بافت درشت کم‌تر از خاک‌های با بافت ریز بود. مقدار جذب عناصر برعکس این روند بود. خاک‌های دارای رس بیش‌تر ظرفیت بیش‌تری در جذب به‌ویژه در خاک‌های با pH بالا داشتند در خاک‌های با pH کم به‌دلیل رقابت کاتیون هیدروژن با فلزات جذب کاهش یافت.

جدول ۳- توزیع کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در فرم‌های مختلف در دو خاک ۱ و ۲ در زمان‌های صفر، ۲۰ و ۴۰ روز.

DTPA	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	زمان	Cd
۵/۵ <sup>b</sup>	۰/۳۹ <sup>c</sup>	۰/۳۲ <sup>d</sup>	۲/۰ <sup>e</sup>	۴/۵ <sup>c</sup>	۴/۶ <sup>a</sup>	۰	
۵/۳ <sup>b</sup>	۰/۵۰ <sup>bc</sup>	۰/۵۳ <sup>b</sup>	۲/۱ <sup>e</sup>	۵/۸ <sup>a</sup>	۲/۷ <sup>c</sup>	۲۰	خاک ۱ بدون ماده آلی
۴/۳ <sup>d</sup>	۰/۷۱ <sup>a</sup>	۰/۴۴ <sup>c</sup>	۳/۵ <sup>c</sup>	۵/۱ <sup>b</sup>	۲/۰ <sup>d</sup>	۴۰	
۶/۲ <sup>a</sup>	۰/۴۹ <sup>bc</sup>	۰/۳۱ <sup>d</sup>	۲/۲ <sup>d</sup>	۴/۳ <sup>c</sup>	۴/۴ <sup>a</sup>	۰	
۴/۶ <sup>cd</sup>	۰/۵۱ <sup>b</sup>	۰/۵۸ <sup>b</sup>	۲/۳ <sup>d</sup>	۴/۹ <sup>b</sup>	۳/۵ <sup>b</sup>	۲۰	خاک ۱ + کمپوست
۴/۳ <sup>d</sup>	۰/۵۶ <sup>b</sup>	۰/۴۸ <sup>c</sup>	۴/۰ <sup>b</sup>	۳/۹ <sup>d</sup>	۲/۷ <sup>c</sup>	۴۰	
۶/۳ <sup>a</sup>	۰/۴۹ <sup>bc</sup>	۰/۳۳ <sup>d</sup>	۲/۱ <sup>e</sup>	۴/۳ <sup>c</sup>	۴/۵ <sup>a</sup>	۰	
۵/۱ <sup>bc</sup>	۰/۴۸ <sup>bc</sup>	۰/۶۶ <sup>a</sup>	۲/۱ <sup>e</sup>	۴/۹ <sup>b</sup>	۳/۶ <sup>b</sup>	۲۰	خاک ۱ + لجن
۴/۶ <sup>d</sup>	۰/۵۶ <sup>b</sup>	۰/۶۰ <sup>ab</sup>	۴/۲ <sup>a</sup>	۳/۸ <sup>d</sup>	۲/۶ <sup>c</sup>	۴۰	
۷/۸ <sup>a</sup>	۰/۴۶ <sup>a</sup>	۰/۴۷ <sup>c</sup>	۱/۹ <sup>b</sup>	۴/۱ <sup>c</sup>	۵/۴ <sup>a</sup>	۰	
۶/۷ <sup>b</sup>	۰/۴۷ <sup>a</sup>	۰/۵۳ <sup>bc</sup>	۲/۰ <sup>b</sup>	۵/۶ <sup>a</sup>	۳/۹ <sup>b</sup>	۲۰	خاک ۲ بدون ماده آلی
۶/۲ <sup>bc</sup>	۰/۴۸ <sup>a</sup>	۰/۵۳ <sup>bc</sup>	۲/۷ <sup>a</sup>	۴/۵ <sup>b</sup>	۲/۰ <sup>c</sup>	۴۰	
۷/۸ <sup>a</sup>	۰/۴۶ <sup>a</sup>	۰/۴۹ <sup>c</sup>	۱/۸ <sup>b</sup>	۳/۹ <sup>d</sup>	۵/۶ <sup>a</sup>	۰	
۵/۹ <sup>c</sup>	۰/۴۶ <sup>a</sup>	۰/۴۹ <sup>c</sup>	۲/۰ <sup>b</sup>	۵/۸ <sup>a</sup>	۳/۶ <sup>b</sup>	۲۰	خاک ۲ + کمپوست
۶/۴ <sup>bc</sup>	۰/۴۷ <sup>a</sup>	۰/۵۹ <sup>b</sup>	۳/۰ <sup>a</sup>	۴/۲ <sup>c</sup>	۴/۱ <sup>b</sup>	۴۰	
۷/۶ <sup>a</sup>	۰/۴۶ <sup>a</sup>	۰/۵۵ <sup>bc</sup>	۱/۸ <sup>b</sup>	۳/۸ <sup>d</sup>	۵/۶ <sup>a</sup>	۰	
۶/۱ <sup>c</sup>	۰/۴۷ <sup>a</sup>	۰/۵۲ <sup>bc</sup>	۱/۹ <sup>b</sup>	۵/۷ <sup>a</sup>	۴/۱ <sup>b</sup>	۲۰	خاک ۲ + لجن
۶/۳ <sup>bc</sup>	۰/۴۸ <sup>a</sup>	۰/۷۰ <sup>a</sup>	۲/۹ <sup>a</sup>	۴/۲ <sup>c</sup>	۴/۴ <sup>b</sup>	۴۰	

مقدار کادمیوم قابل استخراج با DTPA در تیمار بدون ماده آلی در زمان صفر و ۴۰ روز در خاک ۱ به ترتیب معادل ۵۴/۵ و ۴۲/۶ و در خاک ۲ برابر ۷۳/۳ و ۵۷/۷ درصد کادمیوم افزوده شده بود. این در حالی است که درصد رس، مواد آلی و درصد کربنات کلسیم در خاک ۲ بیش‌تر از خاک ۱ بود (جدول ۱). مقایسه مقادیر کادمیوم در دو خاک در فرم‌های مختلف نشان می‌دهد که در ابتدای دوره، نقش سطوح تبدیلی در جذب کادمیوم در خاک ۲ بیش‌تر از خاک ۱ بوده که می‌تواند ناشی از درصد رس و مواد آلی بیش‌تر این خاک باشد. نکته قابل‌توجه این‌که مقدار کادمیوم در فرم‌های اکسیدهای آهن و منگنز و کربناتی در خاک ۱ در تمام طول آزمایش بیش‌تر از خاک ۲ بود. در پایان دوره آزمایش سهم فرم‌های کربناتی و اکسیدهای آهن و منگنز از مقدار کل کادمیوم افزوده شده در خاک ۱ به ترتیب

۴۵/۶ و ۳۱/۵ درصد و در خاک ۲ به ترتیب ۳۷ و ۱۸/۷ درصد بود، که می‌تواند نشان‌دهنده نقش اکسیدهای آهن و منگنز در جذب کادمیوم و احتمالاً تأثیر آن بر کاهش کادمیوم قابل استخراج با DTPA باشد. در طول دوره آزمایش سهم فرم‌های مواد آلی و باقی‌مانده در جذب کادمیوم ناچیز بود و قسمت عمده کادمیوم افزوده شده به خاک‌ها در سه فرم تبدالی، کربناتی و اکسیدهای آهن و منگنز قرار داشت. در هر دو خاک در ابتدای دوره آزمایش درصد توزیع کادمیوم در این سه فرم به صورت تبدالی < کربناتی > اکسیدهای آهن و منگنز و در پایان دوره آزمایش به صورت کربناتی < اکسیدهای آهن و منگنز > تبدالی بود. به عبارت دیگر کربنات‌ها نقش مهمی در جذب کادمیوم در خاک‌های مورد مطالعه داشتند. مطالعات نشان می‌دهد که کلسیت تمایل زیادی به جذب کادمیوم دارد و کادمیوم بر روی سطوح کلسیت می‌تواند به راحتی جایگزین کلسیم شده و تشکیل رسوب کربنات کادمیوم را دهد (آلووی و جکسون، ۱۹۹۱). نکته قابل توجه دیگر این‌که در پایان دوره آزمایش هم‌چنان سهم فرم تبدالی قابل ملاحظه بود که نشان می‌دهد که کادمیوم به کندی به شکل‌های غیرفراهم تبدیل می‌گردد (جدول ۳). غالب بودن مقدار کادمیوم در فرم تبدالی در دیگر مطالعات نیز گزارش شده است (تانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ کاشم و همکاران، ۲۰۱۱). اعتقاد بر این است که احتمالاً کادمیوم در فاز تبدالی به صورت درون‌کره‌ای جذب می‌شود که این نوع جذب از انتقال کادمیوم از فرم تبدالی به سایر فرم‌ها جلوگیری می‌کند (نایدو و همکاران، ۱۹۹۴). نتایج لو و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه بررسی توزیع عناصر مس، روی، سرب و کادمیوم در طی ۸ هفته نشان داد که در مورد عناصر مورد مطالعه سرعت انتقال شکل تبدالی به شکل‌های پایدارتر به ترتیب به صورت  $Pb > Cu > Zn > Cd$  بود به طوری که در طول آزمایش بخش قابل توجهی از کادمیوم در این فرم باقی ماند. در این مطالعه خاک دارای ماده آلی بیش‌تر دارای مقدار بیش‌تری از فلزات در فرم مواد آلی بود. جلالی و خانلاری (۲۰۰۸) در مطالعه سرعت انتقال عناصر مس، روی، سرب و کادمیوم در تعدادی از خاک‌های آهکی نشان داد که سرعت انتقال به صورت  $Cu > Zn > Pb > Cd$  بود و توزیع کادمیوم صورت کربناتی < اکسیدهای منگنز > تبدالی < مواد آلی > اکسیدهای آهن < باقی‌مانده بود.

**نیکل:** نتایج نشان داد که مقدار نیکل با گذشت زمان در فرم تبدالی کاهش پیدا کرد (جدول ۴). در خاک ۱ کاهش نیکل تبدالی در زمان ۲۰ روز نسبت به زمان صفر و در خاک ۲ در همه زمان‌ها معنی‌دار بود. تفاوت معنی‌دار بین نوع ترکیب آلی و تأثیر آن بر مقدار نیکل در این فرم تنها در خاک ۱ در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ روز مشاهده شد به طوری که کمپوست تأثیر بیش‌تری بر افزایش مقدار نیکل در این



فرم داشت. برخی مطالعات نشان می‌دهند که در خاک‌های با pH بالا تشکیل کمپلکس‌های آلی-فلزی محلول می‌تواند موجب افزایش حلالیت فلزات شود (گریکسون و آلوی، ۱۹۸۴). اگرچه تغییرات pH و تولید نمک‌های معدنی به‌دست آمده از تجزیه مانند فسفات‌ها نیز می‌توانند فراهمی عناصر را تحت تأثیر قرار دهند (والتر و کوئاس، ۱۹۹۹). در هر دو خاک مقدار نیکل در فرم کربناتی تنها در زمان ۴۰ روز کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرد. این نتایج نشان می‌دهد که کربنات‌ها نقش مهمی را در جذب نیکل در شروع دوره آزمایش داشته‌اند اما با گذشت زمان نیکل از فرم کربناتی می‌تواند به سایر بخش‌ها توزیع شود. به‌طوری‌که افزایش مقدار نیکل در فرم اکسیدهای آهن و منگنز می‌تواند تأییدکننده این مطلب باشد. بر خلاف تأثیر نداشتن مواد آلی بر مقدار نیکل در فرم کربناتی در خاک ۱ افزودن کمپوست و لجن فاضلاب موجب کاهش معنی‌دار مقدار آن در زمان‌های صفر و ۲۰ روز در خاک ۲ گردید. در خاک ۱ افزودن مواد آلی موجب افزایش مقدار نیکل در فرم اکسیدهای آهن و منگنز در زمان ۴۰ روز گردید. از این جهت تأثیر لجن فاضلاب بیش‌تر از کمپوست بود. در حالی‌که در خاک ۲ مقدار نیکل با افزایش مواد آلی در این فرم کاهش پیدا کرد. تأثیر مواد آلی بر مقدار نیکل در فرم مواد آلی در خاک ۱ در زمان ۲۰ روز و در خاک ۲ در زمان ۴۰ روز بیش‌ترین مقدار بود. این تغییر تحت تأثیر نوع ماده آلی نبود. افزایش مقدار نیکل در فرم باقی‌مانده تنها در خاک ۱ در تیمار بدون ماده آلی در زمان ۴۰ روز از نظر آماری معنی‌دار بود. به‌عبارت دیگر به‌نظر می‌رسد در این خاک افزودن مواد آلی موجب کند شدن سرعت تبدیل شکل‌های فراهم‌تر نیکل به شکل‌های پایدارتر آن گردیده است. افزودن مواد آلی در زمان ۴۰ روز در خاک ۱ موجب افزایش و در خاک ۲ موجب کاهش نیکل در فرم اکسیدهای آهن و منگنز نسبت به تیمار بدون ماده آلی گردید. در هر دو خاک در همه تیمارها نیکل قابل استخراج با DTPA در ابتدای دوره آزمایش از زمان ۲۰-۰ روز کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان داد در حالی‌که تغییرات مقدار آن در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ روز تنها در تیمار بدون ماده آلی معنی‌دار بود. افزودن مواد آلی به خاک موجب افزایش نیکل قابل استخراج با DTPA نسبت به تیمار بدون ماده آلی در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ روز در خاک ۱ و در زمان ۴۰ روز در خاک ۲ گردید. به‌عبارت دیگر مواد آلی موجب شد که نیکل به‌مدت بیش‌تری به‌صورت فراهم باقی بماند. در خاک ۱ تأثیر کمپوست در افزایش فراهمی نیکل بیش‌تر از لجن فاضلاب بود. در پژوهش آنتونیادیس و آلوی (۲۰۰۲) نشان داده شده که در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب، کربن آلی محلول موجب افزایش فراهمی عنصر نیکل گردید. در پژوهش کاراکا (۲۰۰۴) نیز افزایش نیکل قابل استخراج با DTPA در نتیجه افزودن مواد آلی به خاک گزارش شده است.

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار جلد (۳)، شماره (۲) ۱۳۹۲

جدول ۴- توزیع نیکل (میلی گرم بر کیلوگرم) در فرم‌های مختلف در دو خاک ۱ و ۲ در زمان‌های صفر، ۲۰ و ۴۰ روز.

DTPA	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	زمان	Ni
۷۴/۵ <sup>b</sup>	۳۹۲/۲ <sup>b</sup>	۴۳/۱ <sup>e</sup>	۱۰۴/۴ <sup>d</sup>	۸۳/۰ <sup>a</sup>	۱۷/۵ <sup>a</sup>	۰	خاک ۱ بدون ماده آلی
۳۵/۸ <sup>e</sup>	۳۹۰/۶ <sup>b</sup>	۶۰/۲ <sup>b</sup>	۱۰۱/۹ <sup>d</sup>	۸۱/۵ <sup>a</sup>	۴/۸ <sup>e</sup>	۲۰	
۳۱/۱ <sup>f</sup>	۴۰۹/۹ <sup>a</sup>	۴۷/۴ <sup>d</sup>	۱۴۱/۹ <sup>c</sup>	۳۹/۵ <sup>d</sup>	۵/۶ <sup>de</sup>	۴۰	
۷۷/۵ <sup>a</sup>	۳۹۶/۹ <sup>b</sup>	۴۴/۳ <sup>de</sup>	۱۰۱/۴ <sup>d</sup>	۷۴/۸ <sup>c</sup>	۱۶/۶ <sup>b</sup>	۰	خاک ۱ + کمپوست
۴۷/۰ <sup>c</sup>	۳۹۰/۶ <sup>b</sup>	۷۰/۰ <sup>a</sup>	۱۰۱/۳ <sup>d</sup>	۷۴/۵ <sup>c</sup>	۶/۳ <sup>cd</sup>	۲۰	
۴۷/۰ <sup>c</sup>	۳۹۰/۶ <sup>b</sup>	۵۵/۵ <sup>c</sup>	۱۵۱/۰ <sup>b</sup>	۴۰/۲ <sup>d</sup>	۶/۶ <sup>c</sup>	۴۰	
۷۸/۵ <sup>a</sup>	۳۸۷/۵ <sup>b</sup>	۴۳/۱ <sup>e</sup>	۱۰۵/۶ <sup>d</sup>	۷۷/۹ <sup>b</sup>	۱۶/۵ <sup>b</sup>	۰	خاک ۱ + لجن
۴۲/۳ <sup>d</sup>	۳۹۲/۱ <sup>b</sup>	۷۰/۵ <sup>a</sup>	۱۰۴/۴ <sup>d</sup>	۷۳/۵ <sup>c</sup>	۵/۴ <sup>e</sup>	۲۰	
۴۱/۴ <sup>d</sup>	۳۸۷/۴ <sup>b</sup>	۴۶/۵ <sup>de</sup>	۱۵۸/۴ <sup>a</sup>	۳۹/۵ <sup>d</sup>	۵/۴ <sup>e</sup>	۴۰	
۹۷/۱ <sup>b</sup>	۱۰۷/۲ <sup>a</sup>	۴۶/۱ <sup>bcd</sup>	۷۷/۱ <sup>e</sup>	۸۴/۳ <sup>a</sup>	۲۳/۷ <sup>a</sup>	۰	خاک ۲ بدون ماده آلی
۵۵/۰ <sup>d</sup>	۱۰۵/۶ <sup>a</sup>	۴۴/۵ <sup>cd</sup>	۱۰۸/۱ <sup>c</sup>	۷۸/۰ <sup>b</sup>	۱۴/۳ <sup>a</sup>	۲۰	
۴۳/۹ <sup>e</sup>	۱۰۵/۶ <sup>a</sup>	۴۶/۵ <sup>bc</sup>	۱۵۱/۹ <sup>a</sup>	۳۸/۸ <sup>c</sup>	۷/۶ <sup>b</sup>	۴۰	
۱۰۱/۸ <sup>a</sup>	۱۰۹/۱ <sup>a</sup>	۴۷/۲ <sup>bc</sup>	۷۶/۸ <sup>e</sup>	۸۱/۰ <sup>b</sup>	۲۳/۹ <sup>a</sup>	۰	خاک ۲ + کمپوست
۶۰/۰ <sup>c</sup>	۱۰۵/۹ <sup>a</sup>	۴۴/۵ <sup>cd</sup>	۱۰۳/۷ <sup>d</sup>	۸۰/۲ <sup>b</sup>	۱۳/۸ <sup>a</sup>	۲۰	
۶۱/۰ <sup>c</sup>	۱۰۵/۹ <sup>a</sup>	۵۶/۵ <sup>a</sup>	۱۴۵/۶ <sup>b</sup>	۳۸/۷ <sup>c</sup>	۷/۱ <sup>b</sup>	۴۰	
۹۷/۱ <sup>b</sup>	۱۱۰/۹ <sup>a</sup>	۴۷/۵ <sup>b</sup>	۷۵/۹ <sup>e</sup>	۸۰/۲ <sup>b</sup>	۲۳/۸ <sup>a</sup>	۰	خاک ۲ + لجن
۶۱/۱ <sup>c</sup>	۱۰۴/۷ <sup>a</sup>	۴۳/۵ <sup>d</sup>	۱۰۴/۸ <sup>d</sup>	۸۰/۱ <sup>b</sup>	۱۴/۷ <sup>a</sup>	۲۰	
۶۲/۵ <sup>c</sup>	۱۰۵/۶ <sup>a</sup>	۵۷/۵ <sup>a</sup>	۱۴۴/۵ <sup>b</sup>	۳۴/۶ <sup>d</sup>	۸/۱ <sup>b</sup>	۴۰	

همانند کادمیوم در تیمار بدون ماده آلی درصد نیکل قابل استخراج با DTPA از مقدار کل نیکل افزوده شده در سه زمان در خاک ۱ کم‌تر از خاک ۲ بود. در مورد نیکل نیز سهم فرم اکسیدهای آهن و منگنز در هر دو خاک قابل توجه بود. در مورد نیکل نیز همانند کادمیوم در ابتدای دوره جذب نیکل به‌وسیله کربنات‌ها قابل زیاد بود و با گذشت زمان با توزیع دوباره نیکل از این فرم سهم اکسیدهای آهن و منگنز افزایش پیدا کرد. بر خلاف کادمیوم سهم فرم تبادل در جذب نیکل در هر دو خاک بسیار کم بود و قسمت عمده نیکل در فرم‌های کربناتی، اکسیدهای آهن و منگنز و مواد آلی قرار گرفت. در خاک ۱ و ۲ در ابتدای دوره آزمایش درصد نیکل در این فرم‌ها به‌ترتیب به‌صورت کربناتی =

اکسیدهای آهن و منگنز < مواد آلی و کربناتی > اکسیدهای آهن و منگنز < مواد آلی و در پایان دوره در هر دو خاک به صورت اکسیدهای آهن و منگنز < کربناتی > مواد آلی بود. در مطالعه آچی و همکاران (۲۰۱۱) توزیع تیکل در خاک‌های مورد مطالعه در فرم‌های باقی‌مانده، اکسیدهای آهن و منگنز و مواد آلی غالب بود.

سرب: بررسی توزیع سرب نشان داد که سهم سرب در فرم تبادلی بسیار ناچیز بود به عبارت دیگر سرب افزوده شده به خاک بلافاصله به شکل‌های غیرفراهم‌تر تبدیل شده است (جدول ۵). در مطالعه جلالی و خانلاری (۲۰۰۸) نشان داده شد که مقدار سرب در فرم تبادلی در ساعت‌های اولیه بعد از افزوده شدن به خاک به شدت کاهش یافت. در این بین رم کربناتی بیش‌ترین مقدار سرب را شامل می‌شد. در خاک ۱ بر خلاف لجن فاضلاب افزودن کمپوست در زمان‌های صفر و ۲۰ روز موجب افزایش معنی‌دار سرب در فرم تبادلی گردید. افزودن مواد آلی به خاک‌ها موجب کاهش سرب در فرم کربناتی در هر سه زمان گردید. ولی تأثیر نوع ماده آلی در کاهش مقدار سرب در این فرم در دو خاک متفاوت بود. در خاک ۱ لجن فاضلاب و در خاک ۲ کمپوست نقش بیش‌تری در کاهش مقدار سرب در فرم کربناتی داشت. در خاک ۱ در تیمار بدون ماده آلی مقدار سرب در فرم تبادلی تا زمان ۲۰ روز افزایش پیدا کرد اما در زمان ۴۰ روز تغییر معنی‌داری نشان نداد. در خاک ۲ در تیمار بدون ماده آلی و در هر دو خاک در تیمارهای مواد آلی مقدار سرب در این فرم در زمان ۴۰ روز نسبت به زمان ۲۰ کاهش یافت. تغییرات مقدار سرب در فرم اکسیدهای آهن و منگنز در هر دو خاک عکس تغییرات آن در رم کربناتی بود. در خاک ۱ ابتدا کاهش شدید تا زمان ۲۰ روز و سپس تغییرات کم تا زمان ۴۰ روز مشاهده شد. در خاک ۲ مقدار سرب در فرم اکسیدهای آهن و منگنز در زمان ۲۰ روز کاهش معنی‌داری نسبت به زمان صفر نشان داد و در زمان ۴۰ روز به حداکثر مقدار خود در طول دوره آزمایش رسید. در خاک ۱ تأثیر لجن فاضلاب بر مقدار سرب در فرم مواد آلی بیش‌تر از کمپوست بود در حالی که در خاک ۲ تأثیر کمپوست بیش‌تر بود. گرچه در مطالعه لو و همکاران (۲۰۰۵) نشان داده شد که با افزایش مواد آلی مقدار عناصر در این فرم افزایش می‌یابد اما برخی مطالعات هیچ همبستگی بین مقدار مواد آلی و انتقال فلزات به این فرم به دست نیاوردند (هارتر، ۱۹۸۳). مواد آلی با ترکیب و گروه‌های عاملی متفاوت می‌تواند نتایج متفاوت را در خاک‌های مختلف سبب شوند. مقدار سرب در فرم باقی‌مانده با زمان افزایش پیدا کرد و از این جهت بین تیمارهای آزمایش تفاوت معنی‌داری

مشاهده نشد. افزودن مواد آلی در خاک ۱ موجب افزایش و در خاک ۲ موجب کاهش مقدار سرب قابل استخراج با DTPA در زمان‌های صفر و ۲۰ روز نسبت به تیمار بدون ماده آلی گردید. تأثیر ترکیبات آلی مختلف ناشی از تجزیه مواد آلی بر فراهمی عناصر بسته به نوع و مقدار این ترکیبات، نوع خاک و نوع عنصر متفاوت است. مواد آلی محلول ناشی از افزودن ترکیبات آلی به خاک موجب تشکیل کمپلکس‌های آلی فلزات با حلالیت بیش‌تری دارند. تحرک کم‌تر ترکیبات آلی محلول در خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های شنی به تشکیل کمپلکس‌های سه‌گانه فلز- مواد آلی محلول- رس ارتباط داده شده است. ثابت پایداری برای کمپلکس‌های فلزات با اسید فولویک ناشی از لجن فاضلاب در مطالعه بوید و سامرز (۱۹۹۰) به صورت  $Cd < Ni < Pb$  بود. در مطالعه کوئین و همکاران (۲۰۰۴) مقدار واجذب عناصر مس، کادمیوم و سرب تحت تأثیر نوع اسید مورد مطالعه به صورت اسید سیتریک < اسید مالیک < اسید استیک و ثابت پایداری کمپلکس‌های ایجاد شده به صورت مس < کادمیوم < سرب بود. در مطالعه شواب و همکاران (۲۰۰۸) نشان داده شد در حالی که اسید سیتریک انتقال روی و کادمیوم را در ستون خاک افزایش داد تأثیر کمی بر انتقال سرب داشت. به نظر می‌رسد که کمپلکس‌های آلی سرب بعد از تشکیل به‌طور قوی به‌وسیله اجزا خاک جذب می‌شوند (شواب و همکاران، ۲۰۰۵). با توجه به این نظریه احتمالاً مقدار بیش‌تر رس در خاک ۲ با جذب بیش‌تر کمپلکس‌های آلی فراهمی سرب کمپلکس شده با ترکیبات آلی را تحت تأثیر قرار داده است. در مورد سرب نیز همانند نیکل و کادمیوم مقدار سرب قابل استخراج با DTPA در خاک ۱ در تیمار بدون ماده آلی در هر سه زمان نسبت به خاک ۲ کم‌تر بود. سهم فرم کربناتی نسبت به سایر فرم‌ها بیش‌تر بود. با گذشت زمان درصد سرب در فرم اکسیدهای آهن و منگنز در خاک ۱ کاهش ولی در خاک ۲ افزایش یافت. این تغییرات نشان‌دهنده توزیع دوباره سرب بین فرم‌ها به‌ویژه فرم‌های کربناتی و اکسیدهای آهن و منگنز می‌باشد. قسمت عمده سرب در فرم‌های کربناتی، اکسیدهای آهن و منگنز و مواد آلی قرار داشت و سهم فرم‌های باقی‌مانده و تبدلی ناچیز بود. در هر دو خاک در ابتدا و انتهای دوره آزمایش توزیع سرب در این سه فرم به‌صورت کربناتی < اکسیدهای آهن و منگنز < مواد آلی بود. در حالی که در مطالعه جلالی و خانلاری (۲۰۰۸) بخش عمده سرب در فرم اکسیدهای آهن و منگنز اندازه‌گیری شد. نتایج مشابه در برخی مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (نورستروم و جکس، ۱۹۹۸؛ کاشم و همکاران، ۲۰۱۱).

## امیر فتوت و اکرم حلاج‌نیا

جدول ۵- توزیع سرب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در فرم‌های مختلف در دو خاک ۱ و ۲ در زمان‌های صفر، ۲۰ و ۴۰ روز.

DTPA	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	زمان	Pb
۱۹۱/۶ <sup>c</sup>	۱۰/۶ <sup>c</sup>	۷۶/۲ <sup>d</sup>	۱۴۱/۶ <sup>a</sup>	۱۸۶/۰ <sup>e</sup>	۴/۵ <sup>b</sup>	۰	
۱۲۸/۹ <sup>e</sup>	۱۳/۱ <sup>b</sup>	۴۶/۷ <sup>e</sup>	۹۵/۲ <sup>c</sup>	۲۵۶/۷ <sup>a</sup>	۲/۵ <sup>de</sup>	۲۰	خاک ۱ بدون ماده آلی
۱۳۱/۴ <sup>e</sup>	۲۱/۹ <sup>a</sup>	۴۵/۵ <sup>e</sup>	۹۶/۵ <sup>c</sup>	۲۵۹/۵ <sup>a</sup>	۲/۷ <sup>cde</sup>	۴۰	
۲۳۰/۳ <sup>a</sup>	۱۰/۲ <sup>c</sup>	۸۳/۸ <sup>c</sup>	۱۳۶/۵ <sup>b</sup>	۱۸۲/۱ <sup>ef</sup>	۶/۳ <sup>a</sup>	۰	
۱۶۵/۰ <sup>d</sup>	۱۵/۱ <sup>b</sup>	۷۴/۴ <sup>d</sup>	۸۱/۵ <sup>d</sup>	۲۴۳/۱ <sup>b</sup>	۳/۶ <sup>c</sup>	۲۰	خاک ۱ + کمپوست
۱۳۸/۰ <sup>e</sup>	۱۹/۶ <sup>a</sup>	۸۷/۵ <sup>bc</sup>	۹۳/۵ <sup>c</sup>	۲۱۹/۸ <sup>c</sup>	۲/۳ <sup>e</sup>	۴۰	
۲۱۳/۵ <sup>b</sup>	۱۰/۵ <sup>c</sup>	۹۰/۳ <sup>b</sup>	۱۳۹/۸ <sup>ab</sup>	۱۷۶/۳ <sup>f</sup>	۵/۲ <sup>b</sup>	۰	
۱۶۲/۷ <sup>d</sup>	۱۵/۹ <sup>b</sup>	۸۶/۹ <sup>bc</sup>	۸۵/۵ <sup>d</sup>	۲۲۰/۴ <sup>c</sup>	۳/۳ <sup>cd</sup>	۲۰	خاک ۱ + لجن
۱۳۸/۵ <sup>e</sup>	۲۲/۵ <sup>a</sup>	۱۰۷/۵ <sup>a</sup>	۸۴/۰ <sup>d</sup>	۲۰۹/۶ <sup>d</sup>	۳/۳ <sup>cd</sup>	۴۰	
۲۶۷/۰ <sup>a</sup>	۹/۴ <sup>c</sup>	۶۴/۵ <sup>e</sup>	۹۴/۵ <sup>b</sup>	۲۴۷/۵ <sup>c</sup>	۶/۶ <sup>b</sup>	۰	
۲۳۰/۵ <sup>c</sup>	۱۰/۹ <sup>bc</sup>	۴۲/۷ <sup>g</sup>	۴۲/۰ <sup>d</sup>	۳۰۷/۵ <sup>a</sup>	۶/۹ <sup>a</sup>	۲۰	خاک ۲ بدون ماده آلی
۲۰۴/۱ <sup>d</sup>	۱۵/۸ <sup>a</sup>	۷۴/۳ <sup>d</sup>	۱۳۳/۲ <sup>a</sup>	۱۹۲/۲ <sup>f</sup>	۷/۰ <sup>a</sup>	۴۰	
۲۵۰/۰ <sup>b</sup>	۹/۶ <sup>bc</sup>	۹۷/۵ <sup>a</sup>	۹۶/۸ <sup>b</sup>	۲۰۷/۷ <sup>e</sup>	۵/۹ <sup>be</sup>	۰	
۲۰۱/۰ <sup>d</sup>	۱۱/۴ <sup>bc</sup>	۵۷/۹ <sup>f</sup>	۶۲/۷ <sup>c</sup>	۲۸۰/۰ <sup>b</sup>	۶/۴ <sup>bc</sup>	۲۰	خاک ۲ + کمپوست
۱۹۸/۰ <sup>d</sup>	۱۷/۸ <sup>a</sup>	۸۳/۰ <sup>bc</sup>	۱۳۵/۳ <sup>a</sup>	۱۷۷/۵ <sup>h</sup>	۶/۱ <sup>cde</sup>	۴۰	
۲۴۷/۵ <sup>b</sup>	۹/۷ <sup>bc</sup>	۸۶/۰ <sup>b</sup>	۹۶/۵ <sup>b</sup>	۲۲۴/۰ <sup>d</sup>	۵/۸ <sup>e</sup>	۰	
۲۰۶/۵ <sup>d</sup>	۱۱/۷ <sup>b</sup>	۵۷/۷ <sup>f</sup>	۵۰/۴ <sup>c</sup>	۲۸۲/۵ <sup>b</sup>	۶/۰ <sup>cde</sup>	۲۰	خاک ۲ + لجن
۲۰۱/۰ <sup>d</sup>	۱۷/۳ <sup>a</sup>	۷۹/۶ <sup>c</sup>	۱۳۳/۰ <sup>a</sup>	۱۸۵/۱ <sup>g</sup>	۶/۲ <sup>bcd</sup>	۴۰	

## نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج به‌دست آمده از رفتار سه عنصر افزوده شده به خاک‌های مورد مطالعه در طول زمان نشان داد که درصد بالایی از کادمیوم در طول زمان با DTPA قابل استخراج بود و سپس به‌ترتیب سرب و نیکل قرار داشت. از این جهت ریسک آلودگی کادمیوم بیش‌تر از دو عنصر دیگر می‌باشد. فراهمی یا شکل قابل استخراج با DTPA در مورد هر سه عنصر در خاک ۱ کم‌تر از خاک ۲ بود با توجه به این‌که مقدار رس، مواد آلی و کربنات کلسیم در خاک ۲ بیش‌تر از خاک ۱ بود با این‌حال بالاتر بودن مقدار عناصر مورد مطالعه در فرم اکسیدهای آهن و منگنز در خاک ۱ نسبت به خاک ۲ نشان می‌دهد که این فرم نقش مهمی را در کاهش فراهمی این عناصر در خاک‌های مورد مطالعه داشته

است. نتایج نشان داد که اگرچه بخش عمده کادمیوم در پایان دوره آزمایش در فرم کربناتی قابل اندازه‌گیری بود اما هم‌چنان مقدار آن در فرم تبادل ملاحظه بود. مواد آلی تأثیر چندانی بر جذب کادمیوم در این فرم نداشتند. بخش عمده نیکل در فرم اکسیدهای آهن و منگنز اندازه‌گیری شد و سپس به ترتیب اهمیت فرم‌های کربناتی و مواد آلی قرار داشتند. سهم فرم کربناتی در جذب سرب در هر سه زمان مورد آزمایش حداکثر بود و اکسیدهای آهن و منگنز و مواد آلی در درجه بعد قرار داشتند. در مورد هر سه عنصر و هر دو خاک در مجموع افزودن کمپوست و لجن فاضلاب موجب افزایش مقدار این عناصر در فرم تبادل و کاهش آن‌ها در فرم کربناتی گردید. به عبارت دیگر مواد آلی افزوده شده موجب افزایش عناصر کادمیوم، نیکل و سرب در شکل‌های فراهم‌تر شد که این تأثیر در خاک با بافت سبک بیش‌تر از خاک با بافت سنگین بود. تأثیر نوع ترکیب آلی بر مقدار عناصر مورد مطالعه در فرم‌های مختلف و فرم قابل استخراج آن‌ها با DTPA در دو خاک متفاوت بود.

### سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد برای تامین هزینه انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌نمایم.

### منابع

1. Achi, M.M., Uzairu, A., Gimba, C.E., and Okunola, O.J. 2011. Chemical fractionation of heavy metals in soils around the vicinity of automobile mechanic workshops in Kaduna Metropolis, Nigeria. *J. Environ. Chem. Toxicol.* 3: 184-194.
2. Alloway, B.J., and Jackson, A.P. 1991. The behaviour of heavy metals in sewage sludge amended soils. *Sci. Total Environ.* 100: 151-176.
3. Almas, A., Singh, B.R., and Salbu, B. 1999. Mobility of cadmium-109 and zinc-65 in soil influenced by equilibration time, temperature, and organic matter. *J. Environ. Qual.* 28: 1742-1750.
4. Antoniadis, V., and Alloway, B.J. 2002. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils. *Environ. Poll.* 117: 515-521.
5. Boyd, S.A., and Sommers, L.E. 1990. Humic and Fulvic acid fractions from sewage sludges and sludges amended soils. P 203-220, In: Mac Carthy, P., Clapp, C.E., Malcolm, R.L., and Bloom, P.R. (eds.), *Humic Substances in Soil and Crop Sciences: Selected Reading*. ASA, Madison, WI.

6. Clemente, R., Escolar, A., and Berna, M.P. 2006. Heavy metals fractionation and organic matter mineralization in contaminated calcareous soil amended with organic materials. *Biol. Tech.* 97: 1894-1901.
7. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1982, Hydrometer Method. P 383-314, In: Klute, A. (ed), *Methods of Soil Analysis: Physical Properties*, Part 1, second ed. Agron Monogr, No 9, Madison WI: ASA and SSSA.
8. Gregson, S.K., and Alloway, B.J. 1984. Gel permeation chromatography studies on the speciation of lead in solutions of heavily polluted soils. *J. Soil. Sci.* 35: 55-61.
9. Harter, R.D. 1983. Effect of soil pH on adsorption of lead, copper, zinc, and nickel. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 47-51.
10. Jalali, M., and Khanlari, Z.V. 2008. Effect of aging process on the fractionation of heavy metals in some calcareous soils of Iran. *Geoderma.* 143: 26-40.
11. Karaca, A. 2004. Effect of organic wastes on the extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in soil. *Geoderma.* 122: 297-303.
12. Kashem, M.A., Singh, B.R., Huq, S.M.I., and Kawai, S. 2011. Fractionation and mobility of cadmium, lead and zinc in some contaminated and non-contaminated soils of Japan. *J. Soil Sci. Environ. Manage.* 3: 241-249.
13. Lu, A., Zhang, S., and Shan, X. 2005. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils. *Geoderma.* 125: 225-234.
14. Ma, Q.L., and Rao, N.G. 1997. Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel and zinc in contaminated soils. *J. Environ. Qua.* 26: 259-264.
15. Maftoun, M., Karimian, N., and Moshiri, F. 2002. Sorption characteristics of copper (II) in selected calcareous soils of Iran in relation to soil properties. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 2279-2289.
16. Mahara, Y., Kubota, T., Wakayama, R., Nakano-Ohta, T., and Nakamura, T. 2007. Effects of molecular weight of natural organic matter on cadmium mobility in soil environments and its carbon isotope characteristics. *Sci. Total Environ.* 387: 220-227.
17. Naidu, R., Bolan, N.S., Kookana, R.S., and Tiller, K.G. 1994. Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils. *Eur. J. Soil Sci.* 45: 419-429.
18. Norrstrom, A.C., and Jacks, G. 1998. Concentration and fractionation of heavy metals in roadside soils receiving de-icing salts. *Sci. Total Environ.* 218: 161-174.
19. Qin, F., Shan, X., and Wei, B. 2004. Effects of low-molecular-weight organic acids and residence time on desorption of Cu, Cd and Pb from soils. *Chemosphere.* 57: 253-263.
20. Rajaie, M., Karimian, N., Maftoun, M., Yasrebi, M., and Assad, M.T. 2006. Chemical forms of cadmium in two calcareous soil textural classes as affected by application of cadmium-enriched compost and incubation time. *Geoderma.* 136: 533-541.

21. Rhoades, J.D. 1982. Soluble salts. P 167-179, In: Page, A.L. (ed), Methods of Soil Analysis: Chemical and microbiological properties, Part 2. 2nd Ed. Agron. Monogr. No.9, ASA and SSSA, Madison WI.
22. Richards, L.A. 1969. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook No: 60.
23. Schwab, A.P., He, Y.H., and Banks, M.K. 2005. The influence of organic ligands on the retention of lead in soil. Chemosphere. 61: 856-866.
24. Schwab, A.P., Zhu, D.S., and Banks, M.K. 2008. Influence of organic acids on the transport of heavy metals in soil. Chemosphere. 72: 986-994.
25. Shuman, L.M. 1998. Effect of organic waste amendments on cadmium and lead in soil fractions of two soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 29: 2939-2952.
26. Shuman, L.M. 1999. Organic waste amendments effect on zinc fractions of two soils. J. Environ.Qual. 28: 1442-1447.
27. Shuman, L.M., Dudka, S., and Das, K. 2002. Cadmium forms and plant availability in compost-amended soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 33: 737-748.
28. Tang, X.Y., Zhu, Y.G., Cui, Y.S., Duan, J., and Tang, L. 2006. The effect of ageing on the bioaccessibility and fractionation of cadmium in some typical soils of China. Environ. Int. 32: 682-689.
29. Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metals. Anal. Chem. 51: 844-851.
30. 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. J. Soil Sci. 34: 29-38.
31. Walter, I., and Cuevas, G. 1999. Chemical fractionation of heavy metals in a soil amended with repeated sewage sludge application. Sci. Total Environ. 226: 113-119.
32. Wong, J.W.C., Li, K.L., Zhou, L.X., and Selvam, A. 2007. The sorption of Cd and Zn by different soils in the presence of dissolved organic matter from sludge. Geoderma. 137: 310-317.





## **The effect of compost and sewage sludge applications on the distribution of cadmium, lead and nickel in two calcareous soils**

**\*A. Fotovat<sup>1</sup> and A. Halajnia<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad,

<sup>2</sup>M.Sc., Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 07/21/2012; Accepted: 02/23/2013

### **Abstract**

The effects of two different organic matters including compost and sewage sludge on the distribution of Cd, Pb and Ni in different fractions of two calcareous soils were investigated. The soil samples were treated with two levels of each organic material (0 and 2%). Heavy metals were added to soils at the rate of 10 mg kg<sup>-1</sup> of Cd, 200 mg kg<sup>-1</sup> of Ni and 400 mg kg<sup>-1</sup> of Pb as nitrate salt. The samples were incubated for 12h, 20 and 40 days. After each incubation time, metals were fractionated by sequential extraction and analyzed for DTPA extractable form. Results showed that Pb and Ni were rapidly transformed from exchangeable to more stable fractions during the incubation intervals. In contrast, the amount of Cd in exchangeable fraction changed slightly and the considerable portion of Cd remained in this fraction. At the end of the experiment, the distribution percentage of Cd, Ni and Pb followed the order of carbonate>Fe-Mn oxide>exchangeable, Fe-Mn oxide>carbonate>organic matter, carbonate>Fe-Mn oxide>organic matter, respectively. There were almost no changes for the metals in the residual fraction. The effects of compost and sewage sludge on the distribution of studied metals in two soils were different. However, application of organic matter mainly resulted in the increased organic matter fraction and DTPA extractable forms of metals.

**Keywords:** Heavy metals, Incubation, Sequential extraction, Distribution

---

\* Corresponding Authors; Email: [afotovat@yahoo.com](mailto:afotovat@yahoo.com)

