نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و یکم، شماره پنجم، ۱۳۹۳
http://jwsc.gau.ac.ir

اثرات کودهای شیمیایی و آلی بر تثبیت سرب و کادمیوم در خاک‌های آلوده

*قاسم رحیمی[۱]، هفترانی دودانگه[۲]، صفر معروفی[۳] و منصور غلامی[۴]

[۱]استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه بوعلی‌سینا، [۲]دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه بوعلی‌سینا، [۳]استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی‌سینا، [۴]استاد گروه مهندسی باغبانی، دانشگاه بوعلی‌سینا

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۱۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۷/۳

چکیده

تثبیت فلزات سنگین توسط کودهای فسفره و ماده آلی از روش‌های اصلاح خاک‌های آلوده به‌شمار می‌رود. به همین منظور کاربرد کودهای فسفاته و کمپوت زباله شهری بر تحرک سرب و کادمیوم و جذب آن‌ها به‌وسیله گیاه در یک خاک لومی آلوده به فلزات سنگین بررسی شد. این آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی با تیمارهایی شامل کود دی‌آمونیوم فسفات (۷۵ میلی‌گرم P_2O_5 در کیلوگرم)، سوپرفسفات‌تریپل (۷۵ میلی‌گرم P_2O_5 در کیلوگرم) و کود کمپوست به‌دست آمده از زباله‌های شهری (۲ درصد) در مقایسه با کنترل و در ۳ تکرار اجرا شد. نتایج نشان داد که کودهای فسفاته و کود کمپوست باعث کاهش سرب زیست‌فراهم نسبت به شاهد گردید و جذب سرب و کادمیوم به‌وسیله اندام هوایی گلایول در اثر کاربرد کودهای فسفاته نسبت به شاهد کاهش چشمگیری یافت ولی کود کمپوست روی غلظت سرب و کادمیوم در اندام هوایی گلایول تأثیر چشمگیری نداشت. همچنین بخش محلول و تبادلی سرب و کادمیوم در اثر استفاده از کودهای فسفاته نسبت به شاهد کاهش پیدا کرد ولی کود کمپوست روی این بخش از سرب و کادمیوم تأثیری نداشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از کودهای شیمیایی شامل فسفر در زمین‌های کشاورزی، ممکن است از ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی جلوگیری کنند.

واژه‌های کلیدی: کودهای فسفره، کود کمپوست، سرب، کادمیوم، گلایول

* مسئول مکاتبه: ghasemr@gmail.com

مقدمه

فعالیت‌های بی‌رویه بشر در دهه‌های اخیر منجر به تجمع فلزات سنگین در خاک شده است که اثرات منفی و زیان‌بار آن بر سلامت انسان و سایر موجودات به‌عنوان تهدید جدی زیست‌محیطی محسوب می‌شود. از آن جمله فعالیت صنعتی و معدنی باعث آلوده شدن منابع آب و خاک به فلزهای سنگین شده است (بیلینگ و همکاران، ۲۰۰۸). فلزات سنگین به آسانی در خاک سطحی تجمع می‌یابند، مشکلاتی در ارتباط با محیط زیست به‌وجود می‌آورند (جلالی و محرمی، ۲۰۰۷) و تجمع این فلزها در خاک و سپس ورودشان به زنجیره غذایی، سلامت انسان را به خطر انداخته است (بیلینگ و همکاران، ۲۰۰۸). خاک‌ها در اثر فعالیت کشاورزی، استفاده از لجن فاضلاب و مواد صنعتی و شهری به این فلزات آلوده شده‌اند (جلالی و محرمی، ۲۰۰۷).

فلزات سنگین از مسیرهای گوناگونی وارد زنجیره غذایی انسان‌ها می‌شوند. گیویان‌راد و همکاران (۲۰۱۱) اعلام کردند که از فاضلاب سطحی شهر تهران برای آبیاری زمین‌های کشاورزی جنوب تهران استفاده می‌شود و میزان سرب و کادمیوم در تره کشت شده در این زمین‌ها از مقدار مجاز برای مصرف انسان براساس استاندارد اتحادیه اروپا بیش‌تر است. برخی از چاه‌های تامین‌کننده آب شرب در نزدیکی کارخانه روی و سرب زنجان بر مبنای مقایسه استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، شرایط کیفی غیرقابل‌قبولی از نظر سرب و کادمیوم دارند (محمدیان و همکاران، ۲۰۱۰). در مزارع سبزی‌کاری شهر شاهرود میزان غلظت کروم، کادمیوم و سرب در سبزیجات بیش‌تر از محدوده استاندارد ارایه شده توسط FAO/WHO است (ناظمی و همکاران، ۲۰۱۰). ملکوتیان و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که میانگین سرب در نمونه‌های برنج هندی وارداتی پرفروش در ایران کمی بیش‌تر از رهنمود FAO/WHO می‌باشد. اثرات کادمیوم در انسان شامل شکسته شدن اکسیدهای فسفر، تداخل در فعالیت آنزیم‌ها و همچنین توانایی واکنش با اسیدنوکلئیک و بروز سرطان می‌باشد (گیویان‌راد و همکاران، ۲۰۱۱). کم‌خونی، افزایش فشار خون، آسیب به کلیه، سقط جنین و اختلالات سیستم عصبی از عوارض ناشی از افزایش غلظت سرب در بدن انسان است (پرووت و دعایی، ۲۰۰۶).

بنابراین برای جلوگیری از خطرات فلزهای سنگین، اصلاح این خاک‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. در میان روش‌های مرسوم برای اصلاح خاک‌ها، روش‌های اصلاح شیمیایی نسبت به سایر روش‌ها مفیدتر و ارزان‌تر به‌نظر می‌رسند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۱). مطالعات گوناگونی نشان دادند که استفاده از

فسفات و مواد آلی باعث تثبیت فلزات سنگین می‌شوند. مهم‌ترین منبع فسفر برای تثبیت فلزات، کانی‌های شامل فسفات مانند آپاتیت طبیعی و سنتز شده و هیدروکسی آپاتیت و فسفات محلول مانند نمک‌های فسفاته و اسید فسفریک هستند. به محض حل شدن فسفر، فلزات محلول در خاک با فسفر واکنش داده و فسفات‌های فلزی با حلپذیری پایین تشکیل می‌شود و در نهایت در شرایط گوناگون زیست‌محیطی پایداری ژئوشیمیایی فلزات افزایش می‌یابد (کائو و همکاران، ۲۰۰۳). فسفات سرب و پیرومورفیت، شکل پایدار سرب در خاک است (بیلینگ و همکاران، ۲۰۰۸). ما و همکاران (۱۹۹۷) و هتیراچی و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که استفاده از سنگ فسفات و سوپرفسفات ساده باعث تشکیل پیرومورفیت و کاهش چشمگیر سرب زیست فراهم گردید. پژوهشگران دیگری گزارش کردند که افزودن سنگ فسفات و سوپرفسفات‌تریپل باعث کاهش جذب کادمیوم و روی به‌وسیله اندام هوایی گیاهان گردید (چن و همکاران، ۲۰۰۷). تئودوراتوس و همکاران (۲۰۰۲) بیان کردند که فسفر باعث تثبیت سرب و کادمیوم گردید ولی تحرک روی را اندکی افزایش داد. در پژوهشی، مک‌گاون (۲۰۰۰) دریافت که آپاتیت پیامد چشمگیری روی کاهش آزادسازی کادمیوم و روی ندارد. گونه آلوده‌کننده و نوع فسفر استفاده شده با حلپذیری متفاوت تأثیر متفاوتی روی تثبیت فلزات دارند.

طی چند دهه اخیر برخی پژوهشگران پیشنهاد کردند که برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین از گیاهان استفاده شود. این فناوری که در آن برای رفع آلودگی زیست‌محیطی از گیاهان استفاده می‌شود، در اصطلاح به گیاه‌پالایی معروف است. گیاه‌پالایی فناوری جدیدی است که در آن از گیاهان مقاوم برای حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌های آلی و معدنی استفاده می‌شود (داوری و همایی، ۲۰۱۲). کاشت گیاهان مناسب و توسعه فضای سبز در مناطق آلوده یکی از اقدامات اولیه و مؤثر برای کاهش آلودگی محیط زیست می‌باشد. پوشش گیاهی از طریق جذب فلزات سنگین، جلوگیری از فرسایش بادی، کاستن رواناب و جلوگیری از نفوذ آن‌ها در پروفیل خاک موجب کاهش آلودگی به فلزات سنگین می‌شود (محمدی‌ثانی و همکاران، ۲۰۱۱).

وجود ترکیبات آلی که در خاک نقش مهمی در تغییر شکل فرم‌های فلزات سنگین دارند (فنگ‌پنگ و همکاران، ۲۰۰۹). در خاک حلالیت مواد آلی به‌طور مستقیم تحرک فلزات سنگین را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. کمپلکس یون‌های فلزی با ترکیبات آلی غیرقابل حل، می‌توانند تحرک فلزات سنگین را کاهش دهند. همچنین تشکیل کمپلکس‌های فلزی قابل‌حل با ترکیبات آلی قابل‌حل، می‌تواند تحرک

فلزات را افزایش دهند (آمینا و همکاران، ۱۹۹۹). مواد آلی با توجه به ترکیبات موجود در آن می‌توانند باعث کاهش یا افزایش تحرک فلزات سنگین در خاک شوند. مواد هومیکی موجود در ماده آلی، فلزات را جذب کرده و تشکیل کمپلکس پایدار فلز- مواد هومیکی داده که باعث کاهش تحرک و زیست‌فراهمی فلزات سنگین می‌شود. اسید فولویک موجود در مواد آلی به‌عنوان کلات عمل کرده و حلالیت فلزات را افزایش داده و در نتیجه زیست‌فراهمی فلزات سنگین را زیاد می‌کند (دودانگه و همکاران، ۲۰۱۲). افزودنی‌های آلی به‌علت آثار بهبودبخشی که بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارند، یکی از روش‌های مهم افزایش باروری خاک هستند و این در حالی است که بیش از ٦٠ درصد خاک‌های ایران کم‌تر از ۱ درصد ماده آلی دارند و این نشان‌دهنده نیاز مبرم این خاک‌ها به افزودن ماده آلی است. امروزه به‌دلیل رشد جمعیت و در نتیجه تولید هرچه بیش‌تر مواد زاید، مصرف کودهای آلی مانند کود کمپوست مورد توجه قرار گرفته است (خدیوی‌بروجردی و همکاران، ۲۰۰۷). در پژوهشی لونگ و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که استفاده از کود کمپوست موجب کاهش سرب زیست فراهم نسبت به شاهد گردید. پژوهش‌های کمی درباره تأثیر کودهای فسفره و آلی روی تحرک فلزهای سنگین در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران انجام شده است. محمدی‌ثانی و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که استفاده از کودهای سوپرفسفات‌تریپل باعث کاهش جذب سرب و روی توسط گندم می‌شود. بنابراین با توجه به تأثیر کودهای فسفره روی فلزات سنگین و لزوم استفاده از مواد آلی در خاک‌های ایران، افزایش آگاهی از تأثیر کودهای فسفره و آلی در این خاک‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر کودهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌دست آمده از زباله‌های شهری روی تحرک سرب و کادمیوم در خاک و جذب آن‌ها به‌وسیله گیاه گلایول در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) از اراضی پیرامون معدن سرب و روی آهنگران با کاربری چراگاه در فاصله ٢٦ کیلومتری شهرستان ملایر با میانگین بارندگی سالیانه ٢٦٠ میلی‌متر و ارتفاع ۲۷۰۰ متر از سطح دریا تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌ها هوا خشک و برای انجام آنالیزهای شیمیایی و فیزیکی، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و

شیمیایی خاک مانند بافت خاک بر پایه قانون استوک و به روش هیدرومتری (بایکاس، ۱۹٦۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی بروش استات آمونیم (راول، ۱۹۹٤)، pH خاک در عصاره ۵:۱ خاک بـه آب بـه کمـک دستگاه pH متر دیجیتال مترهم[1] مدل ۸۲۷ (توماس، ۱۹۹٦)، هدایت الکتریکی (EC) خاک در عصاره ۵:۱ خاک به آب و با هدایت‌سـنج الکتریکـی متـرهم مـدل ۷۱۲ (رودس، ۱۹۹٦)، مـواد آلـی بـروش اکسیداسیون تر (والکلی و بلک، ۱۹۳٤) و کربنات‌کلـسیم معـادل خـاک بـروش تیتراسـیون برگـشتی (سیمس، ۱۹۹٦)، فسفر فراهم به روش السن و با استفاده از بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار با کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (السن و سـومر، ۱۹۸۲) و پتاسـیم قابـل‌جـذب بـه روش اسـتات آمـونیم یـک نرمـال عصاره‌گیری شده و به کمک دستگاه فلیم‌فتومتری (راول، ۱۹۹٤) اندازه‌گیری شد. جدول ۱ ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و کمپوست زباله شهری استفاده شده را نشان می‌دهد. این پژوهش در قالـب طرح کاملاً تصادفی با ٤ تیمار (کود دی‌آمونیوم فـسفات بـه‌میـزان ۷۵ میلـی‌گـرم P_2O_5 در کیلـوگرم، سوپرفسفات‌تریپل به‌میزان ۷۵ میلـی‌گـرم P_2O_5 در کیلـوگرم (میرعبـدالباقی، ۲۰۰۵)، کـود کمپوسـت به‌دست آمده از زباله‌های شهری به‌میزان ۲ درصد و شاهد) و در ۳ تکرار انجام شد. برای هر گلدان ۸ کیلوگرم خاک وزن شد و کودها با خاک کاملاً مخلوط شدند و در گلدان ریخته شدند. سـپس در هـر گلدان ۲ عدد پیاز گلایول کاشته شد و گلدان‌ها هر دو روز یک بار آبیاری شدند. بعد از جوانـه زدن و رشد گل‌ها براساس نیاز، وجین انجام شد. پس از گذشت ۵ ماه از کاشـت، گیاهـان برداشـت شـدند. اندازه‌گیری غلظت کل سرب و کادمیوم در خاک به روش اصلاح شده اسپوزیتو و همکاران (۱۹۸۲) با هضم اسیدی انجام شد. مقدار ۲ گرم خاک در ارلن دربدار ریخته شـد و بـه آن ۱۵ میلـی‌لیتـر اسـید نیتریک ٤ نرمال افزوده شد. سپس ارلن‌ها را برای ۱۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در گرمابـه گذاشته شد، پس از گذشت زمان یاد شده نمونه‌ها پالایش شدند. غلظت قابل‌جـذب (زیـست فـراهم) عناصر سنگین در خاک با استفاده از عصاره‌گیر DTPA انجـام شـد (لینـدزی و نـورول، ۱۹۷۸). ایـن محلول شامل DTPA ۰/۰۰۵ مولار و کلرور کلسیم ۰/۰۱ مولار با pH برابر ۷/۳ بود. ۱۰ گرم خاک به همراه ۲۰ میلی‌لیتر محلول عصاره‌گیر، به‌مدت ۲ ساعت توسط تکان‌دهنده برقی تکان داده شدند پس از آن نمونه‌ها به کمک کاغذ صافی واتمن ٤۲ فیلتر شدند و غلظت فلـزات قابـل‌جـذب توسـط دسـتگاه جذب اتمی مدل واریان ۲۲۰ اندازه‌گیری شد.

1- Metrohm

فلزات سنگین به ٤ بخش تقسیم شدند که بخش محلول و تبادلی، ترکیبات قابل استفاده زیستی هر فلز بوده، در حالی‌که بخش کربناته بخش فلزات رسوب شده با کربنات‌ها می‌باشد که قابلیت استفاده زیستی ندارد. این بخش به تغییرات pH حساس می‌باشد. فلزهای بخش آلی می‌تواند با ریخت‌های مواد آلی از طریق فرآیندهای کمپلکس شدن و تجمع زیستی همراه باشند و با تجزیه مواد آلی آزاد شوند. این بخش از فلزات با تغییر شرایط، توانایی تحرک دارند. بخش باقی‌مانده بخشی از فلزها هستند که به شکل پیوندهای محکم اکسیدی، رسوب و کمپلکس‌های قوی به‌صورت به‌نسبت پایدار هستند و در شرایط گوناگون تغییرات قابل چشمگیری پیدا نمی‌کنند (فنگ‌پنگ و همکاران، ۲۰۰۹). جزءبندی فلزات سرب و کادمیوم به روش عصاره‌گیری پیاپی اسپوزیتوو همکاران (۱۹۸۲) انجام شد. در این روش چهار جزء محلول و تبادلی، آلی، کربناتی و باقی‌مانده تفکیک شدند. جزء محلول و تبادلی توسط محلول نیترات پتاسیم ۰/۵ مولار، جزء آلی به‌وسیله محلول هیدروکسید سدیم ۰/۵ مولار، جزء کربناتی توسط محلول اتیلن دی‌آمین ترا استیک اسید ۰/۰۵ و جزء باقی‌مانده با محلول اسید نیتریک ٤ نرمال عصاره‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری غلظت سرب و کادمیوم در نمونه‌های گیاهی، ۰/۵ گرم از نمونه خشک گیاهی داخل بالن‌های ۲۵ میلی‌لیتری ریخته شد و ۲ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ به آن افزوده شد و سپس نمونه‌ها روی هیتر برقی برای مدت ٦۰ دقیقه در دمای ٦۵ درجه سانتی‌گراد و پس از آن به‌مدت ٦۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند، در ادامه نمونه‌ها تا رسیدن به دمای اتاق خنک شدند و ۰/۲ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن به آن‌ها افزوده شد، نمونه‌ها برای ۳۰ دقیقه برای کامل شدن واکنش رها شدند. حجم پایانی نمونه‌ها به ۲۵ میلی‌لیتر رسید. غلظت فلزهای سنگین سرب و کادمیوم به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی مدل ۲۲۰ واریان اندازه‌گیری شد (فیگوئروا و همکاران، ۲۰۰۸). برای آنالیز داده‌ها از نرم‌افزار SAS و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن استفاده شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و کمپوست استفاده شده.

پارامتر	واحد	خاک	کمپوست
pH	–	۷/۰۲	٦/۹
هدایت الکتریکی	دسی‌زیمنس بر متر	۰/٦۱	٦/۱
کربن آلی	درصد	۰/٦۲	٤۷/۵
ظرفیت تبادل کاتیونی	Cmol(+)/Kg	۱٦/۱۸	–
فسفر قابل دسترس	میلی‌گرم بر کیلوگرم	۲۵	–
پتاسیم قابل دسترس	"	۱۷٦	۷۰۳
روی (کل)	"	۳۲٤	۳۱۹/۸۷
مس (کل)	"	۸۰	۱٤۵
نیکل (کل)	"	۹۱/۹۸	۳۵/۷۸
کادمیم (کل)	"	۱۰/۱٤	۰
سرب (کل)	"	۷۲۵	۳۰/۸۹
شن	درصد	٤۰	–
سیلت	درصد	٤۰	–
رس	درصد	۲۰	–

نتایج و بحث

تأثیر کودهای شیمیایی و آلی روی pH: کود دی‌آمونیوم فسفات و سوپرفسفات‌تریپل pH را به‌طور معنی‌داری از ۷/۲٦ به‌ترتیب به ۷/۷۱ و ۷/٦۸ افزایش دادند. بنابراین در شرایطی که استفاده از کودهای فسفاته باعث افزایش معنی‌دار pH نسبت به شاهد شد کاربرد کود کمپوست شهری این تأثیر را به‌طور معنی‌داری ایجاد نکرد (جدول ۲). بیلینگ و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که کودهای کلسیم منیزیم فسفات و سنگ فسفات باعث افزایش و سوپرفسفات ساده باعث کاهش pH شد. تاورنچایسایت و پولپراسرت (۲۰۰۹) بیان کردند که استفاده از سنگ فسفات باعث افزایش pH خاک می‌شود. کلمنته و همکاران (۲۰۰٦) بیان کردند که استفاده از کود کمپوست و کود حیوانی باعث کاهش pH شد ولی این کاهش معنی‌دار نبوده است.

جدول ۲- پیامد کاربرد کودهای شیمیایی و آلی روی pH خاک.

تیمار	pH
دی‌آمونیوم فسفات	۷/۷۱[a]
سوپرفسفات‌تریپل	۷/۶۸[a]
کود کمپوست	۷/۳۱[b]
شاهد	۷/۲۶[b]

حروف غیرهمنام نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشد.

تأثیر کودهای شیمیایی و آلی روی زیست‌فراهمی فلزات سنگین: مقدار سرب زیست‌فراهم (قابل دسترس) در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌دست آمده از زباله‌های شهری به‌ترتیب ۵۳/۶۶، ۵۵/۲۵ و ۵۷/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. یافته‌های جدول ۳ نشان می‌دهد که کاربرد کودهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست باعث کاهش چشمگیر سرب زیست‌فراهم در خاک نسبت به شاهد گردید. به‌طورکلی استفاده از کودهای فسفره، زیست‌فراهمی فلزات سنگین را کاهش داد. چنین نتایجی را پژوهشگران دیگری نیز اعلام کردند. ما و همکاران (۱۹۹۷) گزارش کردند که علت کاهش زیست‌فراهمی سرب در خاک پس از افزودن سنگ فسفات و سوپرفسفات، تشکیل کانی پیرومورفیت می‌باشد. بیلینگ و همکاران (۲۰۰۸) مشاهده کردند که در نتیجه اضافه کردن سوپرفسفات‌تریپل، سنگ فسفات و کلسیم منیزیم فسفات، سرب زیست‌فراهم در خاک کاهش یافت. همچنین آنان بیان کردند که تشکیل کانی پیرومورفیت، رسوب فسفات سرب، جذب سطحی و کمپلکس شدن، مجموعه مکانیسم‌های احتمالی غیرمتحرک شدن سرب در خاک در نتیجه افزودن فسفر است و نیز علت رسوب فسفات سرب را افزایش pH بیان کردند که هم‌سو با نتایج به‌دست آمده در این مطالعه می‌باشد. از دلایل کاهش غلظت زیست‌فراهمی فلزات در اثر کاربرد مواد آلی، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و وجود مواد هومیکی می‌باشد (ساتو و همکاران، ۲۰۱۰). در پژوهشی لونگ و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که استفاده از کود کمپوست موجب کاهش سرب زیست‌فراهم نسبت به شاهد گردید.

کم‌ترین میزان کادمیوم زیست‌فراهم در تیمار دی‌آمونیوم فسفات (با میانگین ۰/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود و نیز این مقادیر برای سایر تیمارها به‌ترتیب سوپرفسفات (با میانگین ۰/۶۲)، کود

کمپوست (با میانگین ۰/٦٤) و شاهد (با میانگین ۰/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. نتایج مقایسه میانگین کادمیوم زیست‌فراهم (جدول ۳) نشان داد که کاربرد کودها باعث کاهش کادمیوم زیست‌فراهم نسبت به شاهد گردید هر چند این کاهش چشمگیر نبود. بیلینگ و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی مشاهده کردند که در تیمار کودهای فسفره، غلظت کادمیوم زیست‌فراهم در خاک کاهش یافت. تاورنچایسایت و پولپراسرت (۲۰۰۹) در پژوهشی تأثیر کودهای فسفره را روی حلالیت کادمیوم بررسی کردند و مشاهده کردند که استفاده از کودهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و سنگ فسفات موجب شد که غلظت کادمیوم در زه‌آب نسبت به شاهد کاهش یابد. آنان بیان کردند که حلالیت بیش‌تر این کودها باعث تثبیت بیش‌تر فلزات می‌شود. دهیری و همکاران (۲۰۰۰) علت کاهش غلظت کادمیوم زیست‌فراهم در خاک را، تشکیل رسوب پایدار فسفات کادمیوم دانستند که سبب غیرمتحرک شدن کادمیوم می‌شود. ساتو و همکاران (۲۰۱۰) نیز در مطالعه‌ای تأثیر کودهای شیمیایی، گاوی، مرغی و خوکی را روی حلالیت کادمیوم بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که کادمیوم زیست‌فراهم در تیمار گاوی، خوکی و مرغی برابر بود و کم‌تر از تیمار کودهای شیمیایی بودند. لونگ و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که کاربرد کود کمپوست نسبت به شاهد، باعث کاهش کادمیوم زیست‌فراهم گردید. نتایج هی و ساین (۱۹۹۳) نشان داد که مقدار غلظت کادمیوم در گیاه با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک همبستگی منفی دارد.

جدول ۳- پیامد کاربرد کودهای شیمیایی و آلی روی زیست‌فراهمی سرب و کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم).

تیمار	سرب		کادمیوم	
	غلظت	درصد کاهش	غلظت	درصد کاهش
دی‌آمونیوم فسفات	۵۳/٦٦[b]	۲٤	۰/۵۸[a]	۳۰
سوپرفسفات‌تریپل	۵۵/۲۵[b]	۲۲	۰/٦۲[a]	۲۵
کود کمپوست	۵۷/۱٦[b]	۱۹	۰/٦٤[a]	۱۹
شاهد	۷۱/۱٦[a]	۰	۰/۸۳[a]	۰

ستون‌های دارای حروف غیرمشابه در سطح ۵ درصد دارای تفاوت معنی‌دار هستند.

تأثیر کودهای شیمیایی و آلی روی جزءبندی سرب و کادمیوم: میزان سرب محلول و تبادلی در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل، کود کمپوست زباله شهری و شاهد به‌ترتیب ۷/۷۵، ۷/۵، ۱۱/۳۷ و ۱۱/۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. از مقایسه میانگین سرب محلول و تبادلی مشاهده شد که کودهای فسفاته منجر به کاهش سرب محلول و تبادلی گردید، در حالی‌که کود کمپوست شهری در کاهش این بخش سرب شرکت نکرد (جدول ٤). میزان سرب آلی به‌طور متوسط در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌ترتیب ۱۲/۷۵، ۱۲/۷۷ و ۱۸/۷۷ و شاهد ۱۲/٦٤ میلی‌گرم برکیلوگرم بود. بخش آلی سرب فقط در اثر کاربرد کود کمپوست افزایش معنی‌دار نشان داد. تیمار کودهای فسفاته پیامد چشمگیری روی سرب آلی نداشتند. میزان متوسط سرب کربناته در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌ترتیب ۲۹۳/۷۵، ۳۱۳/٥٤ و ٤۲۰/۳۱ و شاهد ٤۲٥/٥۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. از جدول مقایسه میانگین جزءبندی سرب این نتیجه به‌دست آمد که کودهای فسفاته نیز روی بخش سرب کربناته پیامد چشمگیری داشتند و باعث کاهش معنی‌دار این بخش نسبت به شاهد شدند. تیمار کود کمپوست نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری نشان نداد. مقدار میانگین سرب باقی‌مانده در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات و کود کمپوست به‌ترتیب ۳۹۲/٥، ۳۸۱/۱۳ و ۲٦۹/۸٥ و شاهد ۲٥٥/۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. استفاده از کودهای فسفاته موجب تغییراتی در بخش باقی‌مانده سرب نسبت به شاهد گردید. بیش‌ترین مقدار سرب باقی‌مانده در تیمار دی‌آمونیوم فسفات دیده شد و اختلاف آن با تیمار کود کمپوست و شاهد معنی‌دار بود. تیمار سوپرفسفات‌تریپل پیامد چشمگیری روی سرب باقی‌مانده داشت و موجب افزایش این بخش شد ولی تفاوت سرب باقی‌مانده در تیمار کود کمپوست و سوپرفسفات‌تریپل معنی‌دار نبود (جدول ٤).

جدول ٤- پیامد کاربرد کودهای متفاوت روی بخش‌بندی سرب (میلی‌گرم بر کیلوگرم).

تیمار	محلول و تبادلی	آلی	کربناته	باقی‌مانده
دی‌آمونیوم فسفات	$۸/۷٥^{b}$	$۱۲/۷٥^{b}$	$۲۹۳/۷٥^{b}$	$۳۹۲/٥^{a}$
سوپرفسفات‌تریپل	$۸/٥^{b}$	$۱۲/۷۷^{b}$	$۳۱۳/٥٤^{b}$	$۳۸۱/۱۳^{ab}$
کودکمپوست	$۱۱/۳۷^{a}$	$۱۸/۷۷^{a}$	$٤۲۰/۳۱^{a}$	$۲٦۹/۸٥^{bc}$
شاهد	$۱۱/۱۲^{a}$	$۱۲/٦٤^{b}$	$٤۲٥/٥۲^{a}$	$۲٥٥/۰۸^{c}$

حروف غیرهم‌نام در هر ستون نشان‌هنده تفاوت معنی‌دار در سطح ٥ درصد می‌باشد.

بنابراین کاربرد ترکیبات مختلف فسفردار باعث تغییر وضعیت سرب از بخش محلـول و تبـادلی و نیز کربناته به بخش‌هایی با بیش‌ترین قدرت اتصال مانند بخش باقی‌مانده شده است. لونگ و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر کود کمپوست را روی بخش‌بندی فلزات سنگین بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از کود کمپوست باعث کاهش بخش محلول و تبادلی و کربناتـه سـرب گردیـد. بـن آچیبـا و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای نشان دادند که استفاده از کود کمپوست زبالـه شـهری باعـث افـزایش سرب، کادمیوم و مس کل گردید. محمدی‌ثانی و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی بیان کردند که کـاربرد سوپرفسفات‌تریپل، بخش تبادلی و کربناته سرب را در مقایسه با شاهد کاهش داد و بخش باقی‌مانده و پیوندیافته با مواد آلی افزایش یافت. در پژوهشی از راکی و همکاران (۲۰۰۳) که از هیدروکسی آپاتیت برای تثبیت سرب استفاده شده بود، کاهش ۳۶ درصدی سرب در بخش کربناته و افزایش ۵۲ درصدی در بخش باقی‌مانده مشاهده شد.

میانگین غلظت کادمیوم بخش محلول و تبادلی در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌ترتیب ۱/۵۱، ۱/٤۹ و ۲/۰۱ و شاهد ۲/۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. جدول مقایسه میانگین بخش‌بندی کادمیوم نشان می‌دهد که کودهای فسفاته در کاهش بخش محلول و تبادلی کادمیوم در خاک شرکت کرده و باعث کاهش این بخش نسبت به شاهد گردیدند. در حالی‌که کـود کمپوسـت تأثیر معنی‌داری روی کادمیوم محلول و تبادلی نسبت به شاهد ایجاد نکرده بود. همچنین تفـاوت بـین کادمیوم در این بخش در کودهای فسفاته و کود کمپوست معنی‌دار نبود (جـدول ۵). تاورنچایـسیت و پولپرایسرت (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای گزارش کردند که کاربرد سنگ فسفات و سوپرفسفات‌تریپل باعـث کاهش بخش محلول و تبادلی کادمیوم در مقایسه با شـاهد گردیدنـد ولـی ایـن تیمارهـا روی بخـش کادمیوم آلی تأثیری نداشتند.

جدول ۵- پیامد کاربرد کودهای شیمیایی و آلی روی بخش‌بندی کادمیوم.

تیمار	محلول و تبادلی	آلی	کربناته	باقی‌مانده
دی آمونیوم فسفات	۱/۵۱^{b}	۱/۳۵^{b}	۲/۰۳^{a}	٤/۵۱^{a}
سوپرفسفات تریپل	۱/٤۹^{b}	۱/۳۲^{b}	۲/۰۵^{a}	٤/۳۹^{a}
کودکمپوست	۲/۰۱^{ab}	۲/۰۹^{a}	۱/٤٤^{b}	۳/۸۵^{a}
شاهد	۲/۳۱^{a}	۱/٤۲^{b}	۱/٤^{b}	۳/۸۱^{a}

ستون‌های با حروف غیرمشابه در سطح ۵ درصد دارای تفاوت معنی‌دار هستند.

میانگین غلظت کادمیوم در بخش آلی در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌ترتیب ۱/۳۵، ۱/۳۲ و ۲/۰۹ و شاهد ۱/٤۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. همانند سرب، کودهای فسفاته روی بخش آلی کادمیوم تأثیر چشمگیری نداشتند و این بخش از کادمیوم فقط در اثر استفاده از کود کمپوست افزایش معنی‌دار پیدا کرد. بخش کربناته کادمیوم در اثر استفاده تیمارها نیز تغییر کرد. کادمیوم کربناته در تیمار دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌ترتیب ۲/۰۳، ۲/۰۵ و ۱/٤٤ و شاهد ۱/٤ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. استفاده از کودهای فسفاته باعث شد که این بخش نسبت به شاهد به‌طور چشمگیری افزایش یابد ولی کود کمپوست نسبت به شاهد تغییر معنی‌داری روی غلظت کادمیوم در این بخش صورت نداد. لونگ و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعات خود تأثیر کود کمپوست را روی بخش‌بندی کادمیوم بررسی کردند و علت کاهش بخش تبادلی و کربناته کادمیوم را استفاده از کود کمپوست بیان کردند. در این پژوهش تیمارهای گوناگون تأثیر معنی‌داری روی بخش باقی‌مانده کادمیوم نداشتند. یافته‌های محمدی‌ثانی و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که کاربرد سوپرفسفات‌تریپل بر بخش محلول و تبادلی کادمیوم تأثیر معنی‌داری نداشت ولی بخش پیوندیافته با کربنات را کاهش داد. از طرفی بخش باقی‌مانده و ماده آلی را افزایش داد. همچنین نتایج آزمایش‌های زونیتزر و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که افزودن فسفات هیدروژن پتاسیم بر توزیع کادمیوم در بخش‌های مختلف، پیامد گوناگونی داشت و باعث کاهش معنی‌دار بخش تبادلی کادمیوم و افزایش بخش کربناته و پیوندیافته با مواد آلی شد. مک‌براید (۱۹۹٤) بیان کرد که کاربرد دی‌آمونیوم فسفات، حلالیت کانی‌های کادمیوم را از کانی به‌نسبت کم محلول کربنات کادمیوم به فسفات کادمیوم با حلالیت کم تبدیل می‌کند. همچنین این کود، حلالیت کانی‌های سرب را از کانی به‌نسبت محلول سولفات سرب به هیدروکسی پیرومورفیت با حلالیت کم تبدیل می‌کند.

تأثیر کودهای شیمیایی و آلی روی جذب سرب و کادمیوم به‌وسیله گلایول: میزان سرب جذب شده توسط بخش هوایی گلایول در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات و سوپرفسفات‌تریپل با میانگین ۵۲/۳۳ و ٥٤/١٦ میلی‌گرم بر کیلوگرم کم‌ترین مقدار بود و در تیمار کود کمپوست و شاهد به‌ترتیب با میانگین ۸۷/١٦ و ۹۳/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیش‌ترین مقدار بودند. یافته‌های جدول ٦ نشان می‌دهد که استفاده از کودهای فسفاته موجب کاهش جذب سرب به‌وسیله بخش هوایی گلایول نسبت به شاهد گردید. اگرچه استفاده از کود کمپوست باعث کاهش جذب سرب به‌وسیله اندام هوایی گیاه نسبت به شاهد گردید، ولی این کاهش در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود. روند به‌دست آمده از این

نتایج هم‌سو با نتایج تأثیر کودهای فسفاته روی سرب زیست‌فراهم و بخش محلول و تبادلی سرب می‌باشد. بدیهی است که کاهش بخش محلول و تبادلی و زیست‌فراهم سرب موجب کاهش جذب آن به‌وسیله اندام هوایی گلایول می‌شود. بیلینگ و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر سنگ فسفات، سوپرفسفات و کلسیم منیزیم فسفات را روی جذب سرب به‌وسیله کلم بررسی کردند و دریافتند که در مقایسه با شاهد، افزودن هر سه کود باعث کاهش معنی‌دار غلظت سرب در اندام هوایی کلم گردید. آنان فسفات کلسیم سرب را روی دیواره سلولی ریشه گیاه مشاهده کردند و آن را علت کاهش انتقال سرب از ریشه به بخش هوایی گیاه گزارش کردند. کائو و همکاران (۲۰۰۲) علت کاهش جذب سرب به‌وسیله نوعی گراس در اثر استفاده از فسفر را، رسوب فسفات سرب روی سطح ریشه گیاه اعلام کردند. در مطالعه‌ای دیگر توسط لونگ و همکاران (۲۰۱۱) علت کاهش جذب سرب به‌وسیله کلزا نسبت به شاهد را، استفاده از کود کمپوست بیان کردند. محمدی‌ثانی و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی گزارش کردند که غلظت سرب در بخش هوایی گندم با کاربرد سوپرفسفات‌تریپل ۵/۲ برابر کم‌تر از شاهد بود که نشان‌دهنده تأثیر مثبت فسفر در کاهش غلظت سرب در بخش هوایی گیاه می‌باشد. همین‌طور در پژوهش دیگری، چلوپکا و همکاران (۱۹۹٦) بیان کردند که استفاده از فسفات کلسیم به‌عنوان اصلاح‌کننده، نتیجه کاهش ۷ برابری غلظت سرب در بخش هوایی گندم را نشان داد. براون و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهشی نشان دادند که سوپرفسفات‌تریپل و اسید فسفریک بیش‌ترین کارایی را در کاهش سرب به شکل محلول در آب و غلظت آن در بافت گیاهی در مقایسه با سنگ فسفات و اصلاح‌کننده‌های آلی داشتند.

جدول ٦- غلظت سرب و کادمیوم در برگ‌های گلایول و شاخص برداشت سرب و کادمیوم.

تیمار	سرب		کادمیوم		شاخص برداشت (میلی‌گرم در گلدان)	
	غلظت در گیاه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	درصد کاهش	غلظت در گیاه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	درصد کاهش	سرب	کادمیوم
دی‌آمونیوم فسفات	۵۲/۳۳^{b}	٤٤	۳/۳۵^{b}	٤۳	۰/۳^{b}	۰/۰۱۹^{ab}
سوپرفسفات‌تریپل	۵٤/۱٦^{b}	٤۲	۳/۳۱^{b}	٤٤	۰/۲۹^{b}	۰/۰۱۸^{b}
کود کمپوست	۸۷/۱٦^{a}	۷	٤/۱٦^{ab}	۲۹	۰/٤۸^{a}	۰/۰۲۲^{ab}
شاهد	۹۳/۸۳^{a}	۰	۵/۹۳^{a}	۰	۰/٤۵^{ab}	۰/۰۲۸^{a}

ستون‌های با حروف غیرمشابه در سطح ۵ درصد دارای تفاوت معنی‌دار هستند.

میانگین غلظت کادمیوم در تیمار دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌ترتیب ۳/۳۵، ۳/۳۱ و ٤/١٦ و در شاهد ۵/۹۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. هر چند استفاده از کودهای فسفاته و کود کمپوست روی غلظت کادمیوم زیست‌فراهم پیامد چشمگیری نداشتند، ولی این تیمارها روی جذب کادمیوم به‌وسیله بخش هوایی گل گلایل تأثیر معنی‌داری داشتند. از یافته‌های جدول ٦ مشاهده می‌گردد که کودهای فسفاته باعث کاهش چشمگیر جذب کادمیوم به‌وسیله بخش هوایی گلایول گردید و استفاده از کود کمپوست باعث کاهش غلظت کادمیوم در بخش هوایی گلایول گردید ولی این کاهش معنی‌دار نبود. همچنین تفاوت بین غلظت کادمیوم در برگ‌های گلایول در تیمار کودهای فسفاته و کود کمپوست معنی‌دار نبود. نتایج بیلینگ و همکاران (۲۰۰۸) نشان داد که استفاده از کودهای فسفاته باعث شد که جذب کادمیوم به‌وسیله بخش هوایی گیاه کاهش یابد. آنان گزارش کردند که افزودن فسفر ممکن است از طریق چندین مکانیسم مانند جذب و کمپلکس سطحی، رسوب و تبادل یونی باعث کاهش جذب کادمیوم به‌وسیله گیاه شود. همچنین بیان کردند که هیچ‌گونه کانی فسفات کادمیوم در خاک در اثر افزودن فسفر، تشکیل نمی‌شود. ساتو و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای دریافتند که کاربرد کودهای خوکی، گاوی و مرغی باعث کاهش جذب کادمیوم به‌وسیله اسفناج گردید ولی کودهای شیمیایی تأثیری روی جذب آن نداشتند. مطالعه‌ای که لونگ و همکاران (۲۰۱۱) انجام دادند، نشان دادند که استفاده از کود کمپوست، دلیل کاهش جذب کادمیوم به‌وسیله گیاه می‌باشد. حقیقی و کافی (۲۰۱۰) اثر اسید هومیک را روی کادمیوم بررسی کردند و نشان دادند که اسیدهومیک باعث کاهش جذب کادمیوم توسط گیاه شده و در نتیجه باعث کاهش اثرات سمی آن بر تغییرات فیزیولوژیکی وزن کاهو شد. رحیمی و رونقی (۲۰۱۲) در مطالعه خود بیان داشتند که افزودن فسفر به‌طور معنی‌داری باعث کاهش غلظت کادمیوم در گیاه اسفناج گردید. ساچاوان و همکاران (۲۰۰۲) مطالعه‌ای مشابه انجام دادند و نتایج آن‌ها نشان داد که در همه سطوح کادمیوم مصرفی، افزودن ترکیبات فسفر سبب کاهش سمیت کادمیوم در گیاه سویا گردید.

پیامد کودهای شیمیایی و آلی روی شاخص برداشت فلزهای سنگین: شاخص برداشت هر فلز از حاصل‌ضرب غلظت آن فلز در وزن خشک اندام هوایی گیاه به‌دست می‌آید. نتایج مقایسه میانگین شاخص برداشت فلزات در جدول ٦ آورده شده است. میانگین شاخص برداشت سرب در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌ترتیب ۰/۳، ۰/۲۹ و ۰/۸٤ و شاهد ۰/٤۵

میلی‌گرم سرب بر گلدان مشاهده شد. مقایسه میانگین شاخص برداشت سرب نشان داد که شاخص برداشت این فلز در کود کمپوست بیش‌تر از بقیه تیمارها بود. هر چند کودهای فسفره باعث افزایش وزن خشک گیاه شدند، ولی این تیمارها باعث کاهش غلظت سرب در شاخصاره گیاه شد و بنابراین باعث کاهش معنی‌دار شاخص برداشت سرب شدند. از داده‌های جدول ٦، مشخص شد که فقط تیمار سوپرفسفات‌تریپل با میانگین ۰/۰۱۸ میلی‌گرم در گلدان به گونه چشمگیری نسبت به شاهد با متوسط ۰/۰۲۸ میلی‌گرم کادمیوم در گلدان باعث کاهش شاخص برداشت کادمیوم شد. دو تیمار دی‌آمونیوم فسفات و کود کمپوست به‌ترتیب با میانگین ۰/۰۱۹ و ۰/۰۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم با تیمار سوپرفسفات تفاوت معنی‌داری نداشتند.

تأثیر کودهای شیمیایی و آلی بر شاخص جنبش فلزهای سنگین: شاخص تحرک یکی از شاخص‌های بررسی میزان تحرک فلزات در خاک می‌باشد و هرچه این شاخص کم‌تر باشد، نشان‌دهنده تحرک و زیست‌فراهمی کم‌تر فلز در خاک و در نتیجه نشان‌دهنده کاهش جذب فلز به‌وسیله گیاه می‌باشد. شاخص تحرک فلزات از فرمول زیر محاسبه می‌شود (بنات و همکاران، ۲۰۰۳؛ گائو و ژو، ۲۰۰۵):

$$MI = \sum_{i=1}^{n} \frac{F_i / T_i}{n}$$

که در آن، F: مقدار غلظت فلز در بخش محلول و تبادلی، T: غلظت کل فلز و n: تعداد نمونه‌های خاک در هر تیمار را نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به مقایسه میانگین شاخص تحرک فلزهای گوناگون در جدول ۷ آمده است. شاخص تحرک سرب به‌طور متوسط در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌ترتیب ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۱ و ۰/۰۱۵ و در شاهد ۰/۰۱۵ می‌باشد. نتایج جدول ۷ نشان داد که کودهای فسفاته نسبت به شاهد، به‌دلیل کاهش سرب محلول و تبادلی، باعث کاهش این شاخص شد ولی چون کود کمپوست روی سرب محلول و تبادلی تأثیر نداشت، بنابراین تأثیر چشمگیری نیز بر شاخص سرب نداشت. این یافته‌ها نشان‌دهنده پیامد مثبت فسفر در کاهش جذب سرب به‌وسیله گیاه می‌باشد.

میانگین شاخص تحرک کادمیوم در تیمارهای دی‌آمونیوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و کود کمپوست به‌ترتیب ۰/۱٤۹، ۰/۱٤۷ و ۰/۱۹۹ و در شاهد نیز ۰/۲۲۸ بود. داده‌های جدول ۷ نشان داد که

فسفر به‌طور معنی‌داری باعث کاهش شاخص تحرک کادمیوم در خاک نسبت به شاهد شد در حالی‌که کود کمپوست با هیچ‌کدام از تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان نداد. این یافته‌ها هم‌سو با نتایج به‌دست آمده از تأثیر تیمارها روی بخش تبادلی و محلول کادمیوم بود. پژوهش‌های کمی درباره تأثیر کودهای شیمیایی و آلی روی شاخص تحرک فلزات سنگین در خاک انجام شده است. لی و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که کاربرد کودهای فسفره و اوره نسبت به شاهد باعث کاهش و نیز استفاده از کودهای کلرید پتاسیم و کلرید آمونیوم باعث افزایش شاخص تحرک مس و نیکل شد.

جدول ۷- شاخص تحرک و شاخص گردآوری سرب و کادمیوم.

تیمار	شاخص تحرک		شاخص گردآوری	
	سرب	کادمیوم	سرب	کادمیوم
دی‌آمونیوم فسفات	۰/۰۱۲^{b}	۰/۱٤۹^{b}	۰/۰۷۲^{b}	۰/۳۳^{b}
سوپرفسفات‌تریپل	۰/۰۱۱^{b}	۰/۱٤۷^{b}	۰/۰۷٤^{b}	۰/۳۲^{b}
کود کمپوست	۰/۰۱۵^{a}	۰/۱۹۹^{ab}	۰/۱۲^{a}	۰/٤۱^{ab}
شاهد	۰/۰۱۵^{a}	۰/۲۲۸^{a}	۰/۱۲۹^{a}	۰/۵۸^{a}

ستون‌های با حروف غیرمشابه، در سطح ۵ درصد دارای تفاوت معنی‌دار هستند.

تأثیر کودهای شیمیایی و آلی روی شاخص گردآوری: شاخص گردآوری از نسبت فلز در اندام هوایی گیاه به غلظت کل فلز در خاک به‌کار رفته به‌دست می‌آید. این شاخص، توان و کارایی گیاهان و تیمارها را در پالایش فلزها از خاک نشان می‌دهد (طهماسبیان‌قهقرخی، ۲۰۱۲). جدول ۷ مقایسه میانگین شاخص گردآوری سرب و کادمیوم را نشان می‌دهد. از نتایج مقایسه میانگین این شاخص پیداست که فسفر باعث کاهش چشمگیر شاخص گردآوری سرب نسبت به شاهد شد ولی کود کمپوست تأثیر چشمگیری روی این شاخص نداشت. روند تغییرات این شاخص همانند تغییرات غلظت سرب در اندام هوایی گیاه بود. مقایسه میانگین شاخص گردآوری کادمیوم نشان داد که فسفر باعث کاهش معنی‌دار این شاخص نسبت به شاهد گردید ولی کود کمپوست تأثیر معنی‌داری روی آن نداشت.

نتیجه‌گیری کلی

کودهای فسفاته باعث کاهش سرب زیست‌فراهم (قابل دسترس)، سرب محلول و تبادلی و سرب جذب شده به‌وسیله اندام هوایی گیاه گلایول گردیدند. که دلایل احتمالی آن ممکن است، تشکیل کانی پیرومورفیت، رسوب فسفات سرب، جذب سطحی و کمپلکس شدن سرب و تشکیل فسفات کلسیم سرب روی دیواره سلولی ریشه گیاه باشد. همچنین این کودها باعث کم شدن بخش محلول و تبادلی کادمیوم و نیز غلظت کادمیوم در اندام هوایی گیاه شدند ولی تأثیر معنی‌داری روی کادمیوم زیست‌فراهم نداشتند. مکانیسم‌هایی مانند تشکیل رسوب پایدار فسفات کادمیوم، جذب سطحی، کمپلکس شدن، رسوب و تبادل یونی باعث کاهش تحرک کادمیوم گردید. کودهای فسفره بخش کربناته سرب را کاهش و بخش باقی‌مانده سرب و کربناته کادمیوم را افزایش دادند. کود کمپوست نیز سرب زیست‌فراهم را کاهش و بخش آلی سرب و کادمیوم را افزایش داد. مواد هومیکی موجود در کود کمپوست ممکن است دلیل احتمالی کاهش سرب زیست فراهم باشد. کود کمپوست شامل مواد هومیکی می‌باشد و فلزهای سنگین با مواد آلی غیرمحلول مانند مولکول‌های اسید هومیک و هومین واکنش می‌دهد و این ترکیبات آلی باعث می‌شوند که ظرفیت خاک برای جذب فلزهای سنگین افزایش یابد. مواد هومیکی شامل گروه‌های عاملی هم‌چون هیدروکسید، کینون، هیدروکینون و فنول هستند. بنابراین شاید بتوان گفت که در خاک‌های آلوده، امکان استفاده هم‌زمان کودهای شیمیایی شامل فسفر و مواد آلی وجود دارد تا بلکه بدین نحو بتوان از ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی جلوگیری کرد.

منابع

1.Amina, L.R.S., Mandal, R., Nouri, M.H., Murimboh, J., Chakrabart, C.L., Back, M.H., Gre´goire, D.C., and Schroeder, W.H. 1999. Effect of metal/fulvic acid mole ratios on the binding of Ni (II), Pb (II), Cu (II), Cd (II), and Al (III) by two well-characterized fulvic acids in aqueous model solutions. Anal. Chim. Acta. 402: 211-221.

2.Banat, K.M., Howari, F.M., and Al-Hamada, A.A. 2003. Heavy metal in urban soils of central Jordan: should we worry about their environmental risks? Environ. Res. 97: 258-273.

3.Bauycos, G.J. 1962. Hydrometer methods improved for making particle size of soils. J. Agron. 56: 464-465.

4.BenAchiba, W., Lakhdara, A., Gabtenib, N., Du Laingc, G., Verlooc, M., Boeckxd, P., Van Cleemputd, P., Jedidi, N., and Gallali, T. 2010. Accumulation and fractionation of trace metals in a Tunisian calcareous soil amended with farmyard manure and municipal solid waste compost. J. Hazardous Mater. 176: 99-108.
5.Brown, S., Christensen, B., and Lombi, E. 2005. An inter-laboratory study to test the ability of amendments to reduce the availability of Cd, Pb and Zn in situ. Environ. Pollut. 138: 34-45.
6.Biling, W., Xie, Z., Chen, J., Jiang, J., and Su, Q. 2008. Effects of field application of phosphate fertilizers on the availability and uptake of lead, zinc and cadmium by cabbage in a mining tailing contaminated soil. J. Environ. Sci. 20: 1109-1117.
7.Cao, R.X., Ma, L.Q., Chen, M., Singh, S.P., and Harris, W.G. 2003. Phosphate-induced metal immobilization in a contaminated site. Environ. Pollut. 122: 19-28.
8.Cao, R.X., Ma, Q.Y., Chen, M., Singh, S.P., and Harris, W.G. 2002. Impacts of phosphate amendments on lead biogeochemistry at contaminates site. Environ. Sci. Technol. 24: 5296-5304.
9.Chen, C., Lo, S., Chiueh, P.P., Kuan, W., and Hsieh, C. 2007. The assistance of microwave process in sludge stabilization with sodium sulfide and sodium phosphate. J. Hazardous Mater. 147: 3. 930-937.
10.Chlopecka, A., and Adriano, D.C. 1996. Influence of zeolite, apatite and Fe-oxide on Cd and Pb uptake by crops. Sci. Total Environ. 207: 195-206.
11.Clemente, R., Escolar, A., and Bernal, P. 2006. Heavy metals fractionation and organic matter mineralization in contaminated calcareous soil amended with organic materials. Bioresource Technology. 97: 1894-1901.
12.Davari, M., and Homaee, M. 2012. A New Yield Multiplicative Model for Simultaneous Phytoextraction of Ni and Cd from Contaminated Soils. J. Water Soil. 25: 6. 1332-1343. (In Persian)
13.Deheri, G.S., Brar, M.S., and Malhi, S.S. 2000. Influence of phosphorus application on growth and cadmium uptake of spinach in two cadmium-contaminated soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 170: 495-499.
14.Dodangeh, H., Rahimi, G., Gholami, M., and Marofi, S. 2012. Effect of fertilizer and organic matter on fractionation of Pb. The 6th National Conference and Exhibition on Environmental Engineering.Tehran University. 668p. (In Persian)
15.FengPeng, F., hui Song, Y., Yuan, P., Cui, X., and Qiu, G. 2009. The remediation of heavy metals contaminated sediment. J. Hazardous Mater. 161: 633-640.
16.Figueroa, J., Wrobel, K., Afton, S., Joseph, A., Caruso, J., Corona, J., and Wrobel, K. 2008. Effect of some heavy metals and soil humic substances on the phytochelatin production in wild plants from silver mine areas of Guanajuato, Mexico.Chemosphere. 70: 2084-2091.

17. Givianrad, M.H., Sadeghi, T., Larijani, K., and Hosseini, S.E. 2011. Determination of Cadmium and Lead in Lettuce, Mint and Leek Cultivated in Different Sites of Southern Tehran. Food Technology and Nutrition. 8: 2. 38-44. (In Persian)
18. Guo, G., and Zhou, Q. 2005. Speciation distribution and bioactivity of heavy metals in contaminated phaiozem (In Chinese). Environ Chem. 24: 383-388.
19. Haghighi, M., and Kafee, M. 2010. The effect of humic acid on Cd and NO_3 uptake and variation of Nitrate reductive activity in lettuce. J. Hort. Sci. 24: 1. 53-58. (In Persian)
20. He, Q.B., and Singh, B.R. 1993. Effect of organic matter on the distribution, extractability and uptake of cadmium in soils. Eur. J. Soil Sci. 44: 641-650.
21. Hettiarachchi, G.M., Pierzynski, G.M., and Ransom, M.D. 2001. In situ stabilization of soil lead using phosphorus. J. Environ. Qual. 30: 1214-1221.
22. Jalali, M., and Moharrami, S. 2007. Competitive adsorption of trace elements in calcareous soils of western Iran. Geoderma. 140: 156-163.
23. Khadiviboroujerdi, E., Nourbakhsh, F., Afyuni, M., and Shariatmadari, H. 2007. Chemical forms of Pb, Ni and Cd in Calcareous soil treated with sewage sludge. J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. 1: 40-53. (In Persian)
24. Lindsay, W.L., and Norvel, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, Manganese and Copper. J. Soil Sci. Soc. Am. 42: 421-428.
25. Liu, L.N., Chen, H.S., Cai, P., Liang, W., and Huang, Q.Y. 2009. Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost. J. Hazardous Mater. 163: 563-567.
26. Long, W., Dai-yan, L., and De-Chun1, S. 2011. The Effect of Planting Oilseed Rape and Compost Application on Heavy Metal Forms in Soil and Cd and Pb Uptake in Rice Agricultural. Sciences in China. 10: 2. 267-274.
27. Ma, Q.Y., Choate, A.L., and Rao, G.N. 1997. Effects of incubation and phosphate rock on lead extractability and speciation in contaminated soils. J. Environ. Qual. 26: 801-807.
28. Malakootian, M., Yaghmaeian, K., Meserghani, M., and Mahvi, A.H., and Daneshpajouh, M. 2011. Determination of Pb, Cd, Cr and Ni concentration in Imported IndianRice to Iran. J. Health Environ. 4: 1. 77-84. (In Persian)
29. McBride, M.B. 1994. Environmental chemistry of soils.New York, Oxford University Press, Inc. 231p.
30. McCauley, A., Jones, C., and Jacobsen, J. 2009. Soil pH and Organic Matter.Nutrientmanagement modules8, 4449-8. MontanaState University Extension Service, Bozeman, Montana. Pp: 1-12.
31. McGowen, S.L. 2000. In situ chemical treatments for reducing heavy metal solubility and transport in smelter contaminated soil. Ph.D. Dissertation, Oklahoma State University, Stillwater. 148p.

32. Mirabdelbaghi, M. 2005. Evaluation of the effectof different N, P, levels and two irrigation systems (Drip&Furrow) on quality and quantity of cut rose (Rosahybrida), chrysanthemum (Chrysathemumspp) and Gladiolus (Gladiolus spp) flowers. Iran's Knowledge of Agriculture. 2: 1. 18-31. (In Persian)
33. MohammadiSani, M., Astaraei, A.R., Fotovat, A., Lakzian, M., and Taherri, A. 2011. The Effect of Zeolite and TSP on Speciation of Pb, Zn and Cd in Mine Waste. J. Water Soil. 25: 1. 42-50. (In Persian)
34. MohammadiSani, M., Astaraei, A.R., Fotovat, A., Lakzian, M., and Taherri, A. 2011. Immobilization of lead and by zeolite and TSP in mine waste and its effect on wheat growth. Iran. J. Field Crops Res. 8: 6. 956-964. (In Persian)
35. Mohammadian, M., Nouri, J., Afshari, N., Nassiri, J., and Nourani, M. 2008.Investigation of Heavy Metals Concentrations in the Water Wells Close to Zanjan Zinc and Lead Smelting Plant. Iran. J. Health Environ. 1: 1. 51-56. (In Persian)
36. Nazemi, S., Asgari, A.R., and Raei, M. 2010. Survey the Amount of Heavy Metals in Cultural Vegetables in Suburbs of Shahroud. Iran. J. Health Environ. 3: 2. 195-202. (In Persian)
37. Olsen, S.R., and Sommers, L.E. 1982. Methods of Soil Analysis. Part 2 Chemical and microbiological properties. P 403-430. In: Page, A.L. et al. (Eds.), Phosphorus. ASA and SSSA pub, Madison.
38. Pruvot, C., and Douay, F. 2006. Heavy metals in soil, Crops and Grass as a source of Human Exposure in the Former Mining Areas. J. Soil Sed. 6: 215-220.
39. Rahimi, T., and Ronaghi, A. 2012. Influence of Phosphorus on the Reduction of Cadmium Phytotoxicity in Spinach Grown on a Calcareous Soil. J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water Soil Sci. 16: 59. 75-83. (In Persian)
40. Rocky, X., Cao Lena, Q., Ma, M., Chen, S.P., and Singh, G.H. 2003. Phosphate-induced metal immobilization in a contaminated site. Environmental Pollution. 122: 19-28.
41. Roades, J.D. 1996. Method of soil analysis. Part 3 chemical methods, P 417-436. In: Roades, J.D. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. Madison Wisconsin, USA.
42. Rowell, D.L. 1994. Soil science: methods and application, part 7: Measurement of the composition of soil solution. Longman Scientific and Technical, University of Michigan. 350p.
43. Sajawan, K.S., Paramasivam, S., Richardson, J.P., and Alva, A.K. 2002. Phosphorus alleviation of cadmium phytotoxicity. J. Plant Nutr. 25: 2027-2034.
44. Sato, A., Takeda, H., Oyanagi, W., Nishihara, E., and Murakami, M. 2010. Reduction of cadmium uptake in spinach (*spinasia oleracea* L.) by soil amendment with animal waste compost. J. Hazardous Mater. 173: 705-709.
45. Sims, J.T. 1996. Lime Requirement. P 491-515. In: Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.

46. Sposito, G., Lund, L.J., and Chang, A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: i. fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. J. Soil Sci. Soc. Am. 46: 260-264.
47. Tahmasebianghahgharokhi, I. 2012. The effects of application of some chelating agent and electrical field on phytoremediation of a heavy metal polluted soil. M.Sc. Thesis. Faculty of Agriculture. Bu-Ali Sina University, 147p. (In Persian)
48. Thomas, G.W. 1996. Methods of soil analysis, Part3. Chemical methods, P 475-490. In: Thomas, G.W. Soil pH and soil acidity, Madison, Wisconsin, USA.
49. Thawornchaisit, U., and Polprasert, C. 2009. Evaluation of phosphate fertilizers for the stabilization of cadmium in highly contaminated soils. J. Hazardous Mater. 165: 1109-1113.
50. Theodoratos, L., Papassiopi, N., and Xenidis, A. 2002. Evaluation of monobasic calcium phosphate for the immobilization of heavy metals in contaminated soils from Lavrion. J. Hazardous Mater. 94: 2. 135-146.
51. Walkey, A., and Black, I.A. 1934. An Examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37: 29-38.
52. Yang, J., Mosby, D.E., Casteel, S.W., and Blancher, R.W. 2001. Lead immobilization using phosphoric acid in a smeltercontaminated urban soil. Environ. Sci. Technol. 35: 3553-3559.
53. Zwonitzer, J.C., Pierzynski G.M., and Hettiarachchi, G.M. 2003. Effects of phosphorus additions on lead, cadmium, and zinc bioavailability in a metal-contaminated soil. Water, Air and Soil Pollution. 143: 193-209.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 21(5), 2015
http://jwsc.gau.ac.ir

The effects of chemical and organic manures on stabilization of Lead and Cadmium in polluted soils

***Gh. Rahimi[1], H. Dodangeh[2], S. Marofi[3] and M. Gholami[4]**

[1]Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Bou-Ali Sina University, [2]M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Bou-Ali Sina University, [3]Professor, Dept. of Water Engineering, Bou-Ali Sina University, [4]Professor, Dept. of Horticulture Engineering, Bou-Ali Sina University

Received: 01/01/2013; Accepted: 09/25/2013

Abstract

The application of phosphate fertilizers and organic matter have been known as a stabilization (immobilization) technique to reduce solubility of heavy metals in contaminated soils. In this respect, the application of phosphate fertilizers and municipal solid waste compost on mobility of Pb and Cd and uptake of those metals was studied by plant in a polluted loamy soil. The greenhouse study was performed in complete randomized design with treatments of ammonium phosphate (75 mg P_2O_5/kg), triple superphosphate (75 mg P_2O_5/kg) and municipal solid waste compost (2%) compared with control in three replicates. The results showed that the availability of lead was significantly reduced with increased phosphate fertilizers in comparison with control. The applied various P fertilizers decreased uptake of Cd and Pb significantly whereas compost did not significant effect on aerial part of Gladiola. Unlike compost, the applied P fertilizers decreased soluble and exchangeable Cd and Pb fractions, compared with control. It is therefore concluded that the application of P fertilizers within agricultural fields may prevent entering heavy metals into the food chain.

Keywords: Phosphate fertilizers, Compost, Lead, Cadmium, Gladiola

* Corresponding Author; Email: ghasemr@gmail.com