



تأثیر ترکیبات فسفات بر کاهش قابلیت فراهمی سرب در گیاه اسفناج کشت شده در یک خاک آهکی

طیبه ایمانی^۱، *مجتبی بارانی مطلق^۲، عبدالامیر بستانی^۳ و فرهاد خرمالی^۴

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،
^۲استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ^۳استادیار گروه علوم خاک،
^۴دانشگاه شاهد تهران، ^۵استاد گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۳/۱۲

چکیده

به منظور کاهش قابلیت فراهمی سرب در گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) با استفاده از ترکیبات فسفات (دی آمونیوم فسفات، سوپرفسفات تریپل و نسبت ۱:۱ اسید فسفریک و سنگ فسفات)، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی انجام و پس از ۱۰۰ روز جزء بندی سرب به وسیله روش عصاره گیری دنباله ای مطالعه شد. نتایج عصاره گیری دنباله ای نشان داد مواد فسفاتی در تغییر شکل سرب از اجزا غیرباقی مانده (محلول، تبدلی، کربناتی، پیوند یافته با اکسیدهای آهن و منگنز و سرب موجود در بخش ماده آلی) به باقی مانده مؤثر بودند. نتایج نشان داد که مقدار سرب قابل دسترس (DTPA) در خاک های تیمار شده کاهش یافت هر چند بیشترین کاهش در مقدار سرب قابل استخراج با DTPA در نسبت مولی ۹ تیمار دی آمونیوم فسفات مشاهده گردید. نتایج آزمایش های گلخانه ای هم نشان داد در بخش هوایی گیاه اسفناج بیشترین سرب در تیمار سنگ فسفات و کمترین در تیمار دی آمونیوم فسفات بود. در تیمار دی آمونیوم فسفات غلظت سرب در بخش هوایی اسفناج ۷۲ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. این نتایج بیانگر آن است که مواد اصلاح کننده فسفاتی به ویژه دی آمونیوم فسفات می تواند زیست فراهمی سرب را کاهش و پایداری زئوشیمیایی آن را افزایش دهد و بنابراین دارای پتانسیل اصلاح درجا خاک های آلوده به سرب می باشد.

واژه های کلیدی: غیر متحرک کردن در جای سرب، فسفر، کانی پیرومورفیت، عصاره گیری دنباله ای

* مسئول مکاتبه: mbarani2002@yahoo.com

مقدمه

پیش‌بینی تحرک و قابلیت استفاده زیستی سرب در اکوسیستم بدون توجه به گونه‌های شیمیایی آن امکان‌پذیر نمی‌باشد (میرتزکی و فرناندز-سیرلی، ۲۰۰۸). ما و رائو (۱۹۹۷) بیان کردند که تعیین رفتار فلزات سنگین و توانایی تحرک دوباره آن‌ها در محیط تنها از طریق تعیین مقدار کل فلزات سنگین کافی نبوده و جزءبندی شیمیایی امری ضروری است. فلزاتی مثل سرب دارای جزء قابل‌استفاده یا غیرباقی‌مانده می‌باشد که شامل: جزءهای محلول در آب، پیوندیافته با کربنات‌ها، قابل‌تبادل، متصل به اکسیدهای آهن- منگنز و پیوندیافته با ماده آلی و جزء باقی‌مانده هستند (میرتزکی و فرناندز-سیرلی، ۲۰۰۸). استفاده از ترکیبات اصلاح‌کننده فسفاتی مختلف باعث تغییر شکل سرب از جزء با قابلیت استفاده زیاد یعنی تبدلی، پیوندیافته با کربنات‌ها، اکسیدهای آهن و منگنز و مواد آلی به جزء با قابلیت استفاده کم یا جزء باقی‌مانده می‌شود (سائو و همکاران، ۲۰۰۲؛ سائو و همکاران، ۲۰۰۳؛ چن و همکاران، ۲۰۰۳؛ چن و همکاران، ۲۰۰۷؛ ملامد و همکاران، ۲۰۰۳). اسچکل و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند که به‌علت آن‌که رسوب پیرومورفیت (کانی فسفات-سرب) سریع می‌باشد در طول عصاره‌گیری دنباله‌ای، فسفر موجود در خاک‌هایی که روی آن‌ها عمل اصلاح انجام شده، همراه با انتشار سرب، حل شده و کانی پیرومورفیت که یک کانی ثانویه است، تشکیل می‌شود. پیرومورفیت حتی در pH پایین نیز بسیار پایدار بوده و در سیستم گوارش انسان زیاد حل نمی‌شود (میرتزکی و فرناندز-سیرلی، ۲۰۰۸). حاصل‌ضرب‌های حلالیت پیرومورفیت بسیار پایین است و به‌ترتیب $10^{-71/8}$ ، $10^{-76/8}$ ، $10^{-78/1}$ و $10^{-84/4}$ برای فلورو، هیدروکسیل، برومو و کلرو پیرومورفیت‌هاست (میرتزکی و فرناندز-سیرلی، ۲۰۰۸). انحلال‌پذیری کلروپیرومورفیت چندین برابر کم‌تر از هیدروکسی، برومو، فلوروپیرومورفیت می‌باشد. به‌علت وجود کلراید در طبیعت، کلروپیرومورفیت شکل غالب پیرومورفیت است (ریان و همکاران، ۲۰۰۱). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کلروپیرومورفیت مثل آنتروپی پایین، باعث پایداری آن و تحمل شرایط محیطی می‌شود که باعث تثبیت سرب از طریق فسفر و مکانیسم‌های اصلاحی می‌شود (اسچکل و ریان، ۲۰۰۲).

روش‌های عصاره‌گیری دنباله‌ای در خاک برای شناسایی تحرک و قابلیت استفاده زیستی سرب و یا کارایی و راندمان تثبیت در جای سرب به‌طور وسیع استفاده می‌شوند (برتی و کانینگ‌هام، ۱۹۹۷؛ چن و همکاران، ۲۰۰۷؛ میرتزکی و فرناندز-سیرلی، ۲۰۰۸). سائو و همکاران (۲۰۰۲) و ملامد و همکاران (۲۰۰۳) کاهش در بخش سرب پیوندیافته با کربنات‌ها و اکسیدهای آهن و منگنز را به‌ترتیب به‌میزان

۴۰ و ۱۰ درصد گزارش نمودند در حالی که بخش باقی مانده تا ۶۰ درصد افزایش یافت. در حقیقت سرب موجود در بخش باقی مانده با گذشت زمان افزایش یافته و باعث تبدیل سرب خاک به فرم پایدارتر می شود (سائو و همکاران، ۲۰۰۲؛ اسچکل و ریان، ۲۰۰۲). گیسون و فارمر (۱۹۸۶) گزارش دادند که افزایش سرب در بخش باقی مانده ناشی از تشکیل کانی پیرومورفیت است. ما و رائو (۱۹۹۷) گزارش کردند که ۹۹/۹ درصد سرب پیرومورفیت در بخش باقی مانده تجمع می یابد.

چنگ و هسو (۲۰۰۲) بیان کردند که تشکیل کانی پیرومورفیت نه تنها باعث کاهش تحرک سرب در خاک بلکه باعث کاهش قابلیت استفاده زیستی سرب در گیاه و سیستم گوارشی انسان می گردد. رووبی و همکاران (۱۹۹۴) نشان دادند که سطوح کافی و مناسب فسفات خاک مسئول تشکیل کمپلکس های نامحلول و کاهش قابلیت دسترسی سرب برای گیاهان است. چن و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر ترکیبات اصلاح کننده فسفری مختلف همچون هیدروکسی آپاتیت طبیعی، سنگ فسفات، سوپرفسفات تریپل، دی آمونیوم فسفات را در خاک آلوده بررسی کرده و نتیجه گرفتند که کاهش سرب در گیاهان به علت تشکیل کانی پیرومورفیت در خاک می باشد. بروون و همکاران (۲۰۰۵) با مقایسه تعدادی از مواد اصلاح کننده خاک مانند سنگ فسفات، سوپرفسفات تریپل و اسیدفسفریک دریافتند که کاربرد فسفر به شکل سوپرفسفات تریپل و اسیدفسفریک مؤثرترین مواد اصلاحی مورد ارزیابی بودند. افزودن فسفر به طور قابل ملاحظه ای سرب محلول، قابل دسترس گیاه و نیز غلظت سرب در بافت گیاه را کاهش داد.

پژوهش های زیادی در رابطه با ارزیابی کارایی فسفات به منظور اصلاح درجای خاک های آلوده صورت گرفته است (هیتیاراچی و همکاران، ۲۰۰۱؛ ما و همکاران، ۱۹۹۵؛ یانگ و همکاران، ۲۰۰۱؛ باستا و همکاران، ۲۰۰۱؛ پارک و همکاران، ۲۰۱۱؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ لی و همکاران، ۲۰۱۳؛ هی و همکاران، ۲۰۱۳). ولی با این وجود بیش تر مطالعات انجام گرفته در pH های به نسبت خنثی تا اسیدی بوده و مطالعات اندکی در ارتباط با تثبیت فسفات در خاک های آهکی و pH های قلیایی صورت گرفته است (عباس پور و گلچین، ۲۰۱۱). از سوی دیگر بنا به عقیده ملامد و همکاران (۲۰۰۳) کارایی منابع مختلف فسفر برای تثبیت درجای سرب بسته به شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک بسیار متفاوت می باشد. از این رو، هدف از این پژوهش تأثیر کاربرد ترکیبات فسفاتی مختلف برای کاهش حلالیت و قابلیت فراهمی گیاهی سرب در یک خاک آهکی آلوده بود.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و تجزیه‌های شیمیایی: نمونه‌گیری مرکب خاک از عمق ۵-۰ سانتی‌متری از حاشیه بزرگراه آزادگان تهران انجام و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از جمله بافت به روش هیدرومتری (جی و بودر، ۱۹۸۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی (چاپمن، ۱۹۶۵)، کرن آلی (آلیسون، ۱۹۶۵)، کرنات کلسیم معادل (آلیسون و مودیه، ۱۹۶۵)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک و pH خاک در عصاره ۲ به یک آب به خاک تعیین گردید (جدول ۱). سرب کل با استفاده از محلول تیزاب سلطانی (اسیدکلریدریک و اسیدنیتریک با نسبت ۳ به ۱) و اسیدفلوریدریک تعیین شد (هوسنر، ۱۹۹۶).

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک مورد مطالعه.

استاندارد	سرب کل	CEC	کرنات کلسیم	کرن آلی	EC	pH(1:2)	بافت خاک
USEPA (میلی‌گرم)	(میلی‌گرم)	(cmolc/kg)	معادل (درصد)	(درصد)	(دسی‌زیمنس بر متر)		
۴۰۰	۶۶۲	۱۴	۱۳	۰/۶۸	۰/۹۵	۷/۱	لوم رسی شنی

تثبیت درجای سرب^۱ در اثر کاربرد مواد فسفاتی: به منظور بررسی تثبیت درجای سرب، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با ۳ تکرار به اجرا درآمد. تیمارها منابع مختلف فسفر به‌عنوان تثبیت‌کننده‌های سرب (دی‌آمونوم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل، نسبت ۱:۱ سنگ فسفات + اسیدفسفریک) و نسبت‌های مولی صفر، ۹،۶،۳ فسفر به سرب (P/Pb) بودند. یک نمونه خاک به‌عنوان نمونه خاک شاهد در نظر گرفته شد. نظر به این‌که برای تشکیل کانی پیرومورفیت ($Pb_5(PO_4)_3Cl$) علاوه بر فسفر و سرب، یون کلرید نیز باید در محیط حضور داشته باشد به این منظور به‌میزان لازم از پتاسیم کلرید به تمامی نمونه‌ها اضافه شد. پس از اعمال تیمارها، نمونه‌های خاک تیمار شده به‌مدت ۱۰۰ روز به‌منظور رسیدن به تعادل در شرایط رطوبتی ظرفیت مزرعه (FC) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. در طول این دوره، نمونه‌ها ۲ بار در هفته توزین و کاهش احتمالی رطوبت آن‌ها با آب مقطر جبران گردید. در پایان دوره انکوباسیون، سرب قابل دسترس گیاه با استفاده از روش لیندزی و نورول (۱۹۷۸) تعیین شد. همچنین، تثبیت درجای سرب از طریق اندازه‌گیری میزان سرب

1- In Situ Stabilization

در جزءهای مختلف به روش عصاره‌گیری دنباله‌ای تسیر و همکاران (۱۹۷۹) و مقایسه مقادیر با تیمار شاهد مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲).

جدول ۲- روش عصاره‌گیری دنباله‌ای و مشخصات شکل‌های معدنی سرب (تسیر و همکاران، ۱۹۷۹).

علامت	عصاره‌گیر	شکل معدنی سرب
SS	آب دی‌یونیزه	محلول در آب
EX	نیتрат منیزیم یک مولار (pH=۷)	تبادلی
CA	استات سدیم یک مولار (pH=۵)	پیوندیافته با کربنات‌ها
FM	هیدروکسیل آمین هیدروکلراید ۰/۰۴ مولار (pH=۲)	پیوندیافته با اکسیدهای آهن و منگنز
OM	اسیدنیتریک ۰/۰۲ مولار و آب اکسیژنه ۳۰ درصد (pH=۲) و استات آمونیوم ۳/۲ مولار	پیوندیافته با مواد آلی
RE	HF + HNO ₃ + HCl	باقی مانده

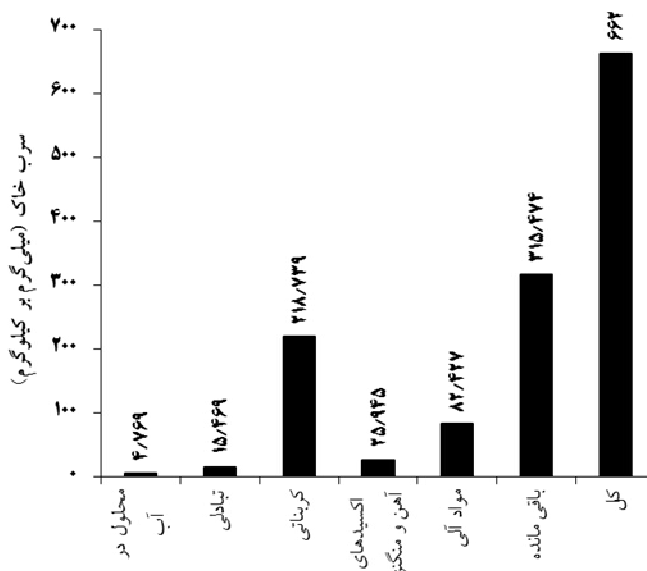
آزمایش گلخانه‌ای: به منظور بررسی میزان پایداری کانی گروه پیرومورفیت در حضور گیاه، آزمایشی فاکتوریل به صورت طرح کاملاً تصادفی در گلخانه با ۳ تیمار دی‌آمونوم فسفات، سوپرفسفات تریپل و نسبت مولی ۱:۱ اسیدفسفریک + سنگ فسفات در نسبت‌های مولی صفر ۹،۶،۳ P/Pb و ۳ تکرار به مدت ۳ ماه، با کشت گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) انجام شد. پس از عبور خاک هوا خشک شده از الک ۴ میلی‌متری، مقدار ۳ کیلوگرم از آن به گلدان‌ها ریخته شد، سپس به هر گلدان عناصر غذایی مورد نیاز براساس آزمون خاک اضافه گردید. آن‌گاه گلدان‌ها به رطوبت مزرعه رسانده شد و ۳ روز بعد نسبت به کاشت بذرها اقدام شد. تعداد ۱۵-۱۰ بذر در هر گلدان در عمق ۲-۱ سانتی‌متری خاک کاشته شد. پس از سبزشدن و گذشت ۲ هفته از کشت بذر، واکاری انجام و تعداد بوته‌ها به ۵ عدد کاهش یافت. علاوه بر این، برای حذف اثرات محیطی در داخل گلخانه، در طول دوره رشد جای گلدان‌ها ۲ بار در هفته به طور تصادفی عوض شد. علاوه بر ازت اضافه شده قبل از کشت، کود اوره به صورت سرک نیز به خاک گلدان‌ها اضافه شد. همچنین آب‌دهی گلدان‌ها براساس تنظیم رطوبت خاک در دامنه F.C با آب مقطر انجام گرفت. ۱۲ هفته پس از کاشت، بخش هوایی گیاهان از خاک جدا شده و با آب مقطر کاملاً شستشو داده و در پاکت کاغذی به مدت ۷۲ ساعت در آون

تهویه‌دار در دمای ۷۰-۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. مقدار سرب موجود در اندام هوایی اندازه‌گیری و با تیمار شاهد مورد مقایسه گرفت. از روش اکسیداسیون تر برای عصاره‌گیری سرب از گیاه استفاده شد. برای اکسیداسیون تر، آمیزه اسیدنیتریک، اسیدپرکلریک و اسیدسولفوریک با نسبت حجمی ۴۰، ۴ و ۱ به‌کار رفت (گوپتا، ۲۰۰۰).

تجزیه و تحلیل داده‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۱ درصد صورت گرفت. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شد.

نتایج و بحث

ارزیابی تثبیت درجای سرب با استفاده از عصاره‌گیری دنباله‌ای: شکل ۱ وضعیت سرب در جزءهای مختلف قبل از اعمال تیمار را نشان می‌دهد. بر این اساس، ترتیب جزءهای مختلف به‌صورت محلول در آب > تبدلی > اکسیدهای آهن و منگنز > پیوندیافته با مواد آلی > کربناتی > باقی‌مانده بود.



شکل ۱- جزءهای مختلف سرب موجود در خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) قبل از اعمال تیمار.

جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب نتایج تجزیه واریانس تبدیل سرب غیرباقی مانده به باقی مانده و مقایسه میانگین مقادیر اجزا سرب در تیمارهای مختلف فسفر در سطوح مختلف (نسبت‌های مولی) را بیان کرده است.

همان‌گونه که جدول ۳ نشان می‌دهد، اختلاف معنی‌داری بین منبع فسفر و نسبت مولی P/Pb در تبدیل سرب غیرباقی مانده به باقی مانده وجود دارد ($P < 0.01$). نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین تبدیل مقادیر جزءهای مختلف سرب در تیمارهای مختلف در سطوح مختلف نشان‌دهنده کاهش سرب در جزءهای غیرباقی مانده و افزایش سرب در جزء باقی مانده است. بیش‌ترین میزان تبدیل سرب به شکل باقی مانده به ترتیب در تیمارهای دی‌آمونیم فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و نسبت ۱:۱ اسیدفسفریک + سنگ فسفات بوده است، هرچه نسبت مولی P/Pb در تیمارهای مختلف بیش‌تر شود، میزان تبدیل سرب از جزءهای غیرباقی مانده به جز باقی مانده بیش‌تر می‌شود. برتی و کونینگهام (۱۹۹۷)، ریان و همکاران (۲۰۰۱) و تانگ و همکاران (۲۰۰۴) کارایی ترکیبات فسفردار مختلف به منظور اصلاح درجای سرب، از طریق تغییر شکل سرب از شکل قابل تبادل، کربناتی، پیوندیافته با اکسید آهن - منگنز، پیوندیافته با ماده آلی به شکل باقی مانده را بررسی کرده و دریافتند که افزایش سرب جزء باقی مانده، نتیجه تشکیل کانی پیرومورفیت است. ما و همکاران (۱۹۹۵) و یانگ و همکاران (۲۰۰۱) نیز تأثیر ترکیبات فسفردار را بر روی تحرک نداشتن سرب در خاک‌های آلوده به تغییر شکل سرب محلول به کانی پیرومورفیت مرتبط دانستند. باستا و مک‌گون (۲۰۰۴) بیان داشتند که منابع فسفاتی محلول پتانسیل بیش‌تری برای تشکیل پیرومورفیت در مقایسه با سنگ فسفات دارند.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس مقادیر تبدیل سرب غیرباقی مانده به باقی مانده در تیمارهای فسفر و سرب.

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات تبدیل جزء غیرباقی مانده به جز باقی مانده
منبع فسفر	۲	۴۹۸۷/۴۸۲۶۴**
نسبت مولی	۳	۱۵۱۳۴/۶۹۱۴۸**
منبع فسفر × نسبت مولی	۶	۱۰۷۲/۳۷۷۲۰**
خطای آزمایش	۲۴	۴/۳۶۸۳۹
ضریب تغییرات		۲/۷۹۵۳۶۰

** معنی دار شدن در سطح ۱ درصد.

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار جلد (۴)، شماره (۲) ۱۳۹۳

جزءهای غیرباقی مانده: پیوندیافته با مواد آلی، پیوندیافته با اکسیدهای آهن و منگنز، پیوندیافته با کربنات‌ها، تبادلی و محلول در آب.

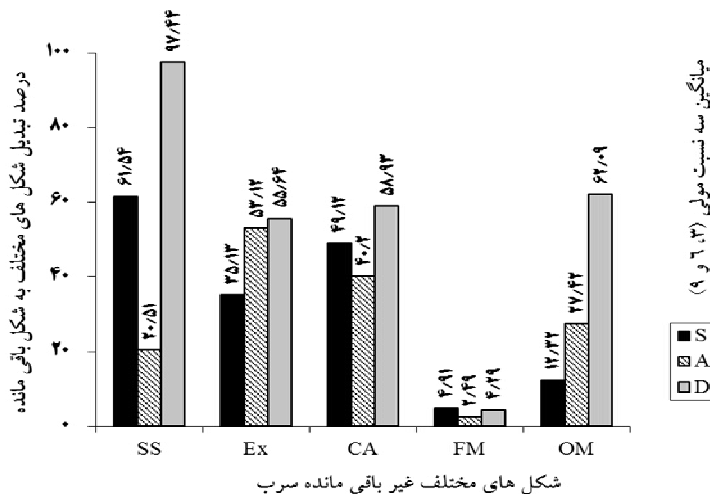
جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین‌های تبدیل مقادیر جزءهای مختلف سرب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمارهای فسفر و سرب به روش LSD.

RE	OM	Fe-Mn	CA	EX	SS	نسبت مولی	منبع فسفر
۴۰۳/۸۴ ^d	۴۷/۹ ^a	۳۲/۶ ^a	۱۶۲/۶۴ ^a	۱۱/۱۲ ^a	۳/۹ ^a	شاهد	
۵۲۳/۲۶ ^c	۱۸/۶۲ ^b	۳۱/۶ ^a	۸۳/۳۸ ^b	۵/۰۴ ^b	۰/۱ ^b	۳	D
۵۳۹/۲۷۵ ^b	۱۶/۹۶ ^b	۳۱/۶ ^a	۶۹/۵۸ ^{bc}	۵/۰۸ ^b	۰/۱ ^b	۶	
۵۵۹/۹۰۵ ^a	۱۸/۸۹ ^b	۳۱ ^a	۴۷/۴۲ ^c	۴/۶۸ ^b	۰/۱ ^b	۹	
۴۰۳/۸۴ ^b	۴۷/۹ ^b	۳۲/۶ ^a	۱۶۲/۶۴ ^a	۱۱/۱۲ ^a	۳/۹ ^a	شاهد	
۴۹۷/۳۸ ^a	۳۹/۹ ^b	۳۳ ^a	۸۳/۵۲ ^b	۷/۳۲ ^b	۲/۳ ^{ab}	۳	S
۴۹۷/۳۸ ^a	۴۵/۷ ^b	۲۶/۴ ^b	۸۴/۷۶ ^b	۷/۱۶ ^b	۱/۶ ^b	۶	
۴۷۷/۵۸ ^a	۶۹/۵ ^a	۲۶/۲ ^b	۷۹/۹۶ ^b	۷/۱۶ ^b	۰/۶ ^b	۹	
۴۰۳/۸۴ ^c	۴۷/۹ ^a	۳۲/۶ ^b	۱۶۲/۶۴ ^a	۱۱/۱۲ ^a	۳/۹ ^c	شاهد	
۴۵۵/۴۲ ^b	۳۸/۳ ^{ab}	۴۶/۶ ^a	۱۰۳/۲ ^b	۵/۶۸ ^b	۱۲/۸ ^b	۳	A
۴۶۵/۷۴ ^b	۳۵/۵ ^{ab}	۳۲/۴ ^b	۱۰۸/۴۴ ^b	۵/۱۲ ^b	۱۶/۳ ^a	۶	
۵۱۲/۱ ^a	۳۰/۵ ^b	۳۱/۳ ^b	۸۰/۱۶ ^b	۴/۸۴ ^b	۳/۱ ^c	۹	

در هر ستون برای هر تیمار حروف مشابه بدون تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

ترکیبات مختلف فسفردار شامل: D: دی‌آمونیم فسفات، S: سوپرفسفات‌تریپل، A: نسبت ۱:۱ اسیدفسفریک و سنگ فسفات. جزءهای مختلف سرب در خاک به ترتیب: RE: بخش باقی مانده، OM: پیوندیافته با مواد آلی، FM: پیوندیافته با اکسیدهای آهن و منگنز، CA: پیوندیافته با کربنات‌ها، EX: تبادلی و SS: محلول در آب.

شکل ۲ درصد تبدیل شکل‌های مختلف سرب به سرب باقی مانده را نشان می‌دهد. جزء محلول بیش‌ترین درصد تبدیل و پس از آن به‌طور متوسط جزء کربناتی، تبادلی، پیوندیافته با مواد آلی و در نهایت کم‌ترین درصد تبدیل مربوط به جزء پیوندیافته با اکسیدهای آهن و منگنز می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که در تمام جزءها، تیمار دی‌آمونیم فسفات بیش‌ترین راندمان را در تبدیل جزء غیرباقی مانده به باقی مانده داراست. ملامد و همکاران (۲۰۰۳) و سائو و همکاران (۲۰۰۲) نیز گزارش دادند که سرب در جزء پیوندیافته با کربنات‌ها تا ۴۰ درصد، اکسید آهن و منگنز تا ۱۰ درصد کاهش یافته و بخش باقی مانده تا ۶۰ درصد افزایش یافته است.



شکل ۲- درصد تبدیل شکل های مختلف سرب در تیمارهای مختلف به سرب باقی مانده D: دی آمونیوم فسفات، A نسبت ۱:۱ اسیدفسفریک و سنگ آپاتیت، S: سوپرفسفات ترپیل. جزءهای مختلف غیرباقی مانده سرب در خاک به ترتیب: OM: پیوندیافته با مواد آلی، FM: پیوندیافته با اکسیدهای آهن و منگنز، CA: پیوندیافته با کربنات ها، EX: تبادل و SS: محلول در آب.

اثر تیمارهای مختلف فسفر بر غلظت سرب قابل استخراج با DTPA: نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین ها بین مقدار سرب قابل دسترس (قابل استخراج با DTPA) در خاک شاهد و خاک های تیمار شده نشان دهنده کاهش در میزان سرب قابل دسترس در خاک های تیمار شده با اصلاح کننده های فسفاتی است (جدول ۵)؛ که بیانگر مؤثر بودن هر سه ماده اصلاحی است. هر چند بیشترین کاهش در مقدار سرب قابل استخراج با DTPA در نسبت مولی ۹ تیمار دی آمونیوم فسفات مشاهده گردید. کومپینه و همکاران (۲۰۰۸) بیان داشتند که اصلاح کننده های فسفاتی اضافه شده به خاک های آلوده تحرک سرب را از طریق تبادل یونی و رسوب کانی هایی از نوع پیرومورفیت ($[Pb_6(PO_4)_3X]$) که $X=OH, F, B, Cl$ کاهش می دهد. کانی های نوتشکیل حلالیت و قابلیت دسترسی زیستی خیلی پایینی دارند و هم چنان که به وسیله آرنیچ و همکاران (۲۰۰۳) نشان داده شده است برای گیاهان قابل دسترس نیستند. بروون و همکاران (۲۰۰۵) با مقایسه تعدادی از مواد اصلاح کننده خاک مانند سنگ فسفات،

سوپرفسفات تریپل و اسیدفسفریک دریافتند که کاربرد فسفر به شکل سوپرفسفات تریپل و اسیدفسفریک مؤثرترین مواد اصلاحی مورد ارزیابی بودند. افزودن فسفر به طور قابل ملاحظه‌ای سرب محلول، قابل دسترس گیاه و نیز سرب قابل استخراج با NH_4NO_3 و همچنین غلظت سرب در بافت گیاه را کاهش داد. چن و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی تأثیر ترکیبات فسفاتی مختلف مثل سوپرفسفات تریپل و دی‌آمونیم فسفات نتیجه گرفتند که این ترکیبات باعث کاهش سرب قابل استفاده گیاه از طریق تشکیل کانی پیرومورفیت در ریشه گیاه می‌شود. چن و همکاران (۲۰۰۷) دریافتند تشکیل کانی پیرومورفیت نه تنها باعث کاهش تحرک سرب در خاک بلکه باعث کاهش سرب قابل استفاده گیاه نیز می‌شود.

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های مقادیر سرب قابل دسترس برای گیاه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمارهای مختلف به روش $\text{LSD} (P < 0.01)$.

تیمار	شاهد	نسبت مولی ۳	نسبت مولی ۶	نسبت مولی ۹
دی‌آمونیم فسفات	۱۲/۲۵۵ ^a	۸/۳۷۲ ^a	۴/۷۳۰ ^c	۴/۲۳۵ ^a
سوپرفسفات تریپل	۱۲/۲۵۵ ^a	۷/۱۸۰ ^b	۶/۷۴۷ ^b	۵/۱۶۵ ^a
نسبت ۱:۱ اسیدفسفریک + سنگ فسفات	۱۲/۲۵۵ ^a	۵/۶۶۵ ^c	۸/۴۷۰ ^a	۶/۵۰۰ ^a

در هر ستون حروف مشابه بدون تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

اثر تیمارهای مختلف فسفر بر غلظت سرب در اندام هوایی اسفناج: نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس مقادیر غلظت سرب گیاه در تیمارها و نسبت‌های مولی مختلف و نیز نتایج به‌دست آمده از مقایسه میانگین از طریق آزمون LSD برای تیمارها و نسبت‌های مولی مختلف در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. میزان غلظت سرب در اندام هوایی اسفناج در تیمارهای مختلف و نسبت‌های مولی مختلف در سطح ۱ درصد با هم تفاوت معنی‌دار دارند (جدول ۶). همچنین نتایج به‌دست آمده از مقایسه میانگین‌ها (جدول ۷) نشان داد که میزان غلظت سرب در اندام هوایی اسفناج در تیمار نسبت ۱:۱ اسیدفسفریک و سنگ آپاتیت بیش‌ترین مقدار و در تیمار دی‌آمونیم فسفات کم‌ترین مقدار می‌باشد که علت آن را می‌توان به دلیل تشکیل کانی پیرومورفیت در خاک دانست. از طرفی هرچه نسبت مولی P/Pb بیش‌تر شود، میزان تشکیل کانی پیرومورفیت و در نتیجه تثبیت سرب بیش‌تر شده و میزان سرب کم‌تری جذب بافت‌های گیاهی می‌شود (جدول ۷). این نتایج با نتایج به‌دست آمده از ارزیابی تثبیت درجا از

طریق عصاره‌گیری دنباله‌ای که در آن دی‌آمونیم فسفات حداکثر و تیمار سوپرفسفات‌تریپل حداقل تأثیر در میزان تبدیل سرب غیرباقی‌مانده به سرب باقی‌مانده داشت، مطابقت کامل دارد. تانگ و همکاران (۲۰۰۴) نیز با مطالعه تأثیر استفاده از سوپرفسفات‌تریپل و اسیدفسفریک بر رشد گیاه، کاهش غلظت سرب در بافت گیاهی و در نتیجه کاهش قابلیت استفاده زیستی سرب را گزارش کردند. چن و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر فسفر اصلاحی مختلف مثل هیدروکسی آپاتیت، سنگ فسفات، سوپرفسفات‌تریپل و دی‌آمونیم فسفات در خاک‌های آلوده از طریق کاهش قابلیت استفاده زیستی سرب را بررسی و نشان دادند که فسفر اصلاحی باعث کاهش سرب موجود در گیاهان از طریق تشکیل کانی پیرومورفیت در ریشه و خاک می‌شود. نتایج مطالعات میرتزکی و فرناندز-سیرلی (۲۰۰۸) نشان داد که واکنش سرب در خاک‌های آلوده با منابع مختلف فسفر باعث تغییر شکل سرب از فرم‌های ناپایدار شیمیایی به فرم‌های رسوبی و در نتیجه تشکیل کانی پیرومورفیت می‌شود که این واکنش باعث کاهش قابلیت استفاده و سمیت زیستی از طریق رشد حداکثری گیاه و کاهش غلظت سرب در بافت گیاهی می‌شود. چنگ و هسو (۲۰۰۲) بیان کردند که تشکیل کانی پیرومورفیت نه تنها باعث کاهش تحرک سرب در خاک بلکه باعث کاهش قابلیت استفاده زیستی سرب در گیاه و سیستم گوارشی انسان می‌گردد. روبری و همکاران (۱۹۹۴) نیز نشان دادند که سطوح کافی و مناسب فسفات خاک مسئول تشکیل کمپلکس‌های نامحلول و کاهش قابلیت دسترسی سرب برای گیاهان است. زو و همکاران (۲۰۰۴) اثر سه ترکیب هیدروکسی آپاتیت، سنگ فسفات، سوپرفسفات ساده و دو ترکیب هیدروکسی آپاتیت و سوپرفسفات ساده در خاک‌های آهکی آلوده به سرب را بررسی کرده و نشان دادند که هیدروکسی آپاتیت باعث تغییر شکل سرب از جزء غیرباقی‌مانده به جزء باقی‌مانده و کاهش قابلیت استفاده زیستی سرب در خاک و سرب تجمع‌یافته در گیاه می‌شود. البته تأثیر کاهش قابلیت استفاده زیستی سرب به کمک سنگ فسفات به دلیل آهکی بودن خاک‌های مورد مطالعه کم‌تر بود. هتیاراچچی و پیرزینسکی (۲۰۰۲) از ترکیبات فسفردار محلول مانند سوپرفسفات‌تریپل و نیز سنگ فسفات برای تثبیت شیمیایی درجا سرب در خاک‌های آلوده را مطالعه و گزارش کردند که افزودن ترکیبات فسفردار باعث کاهش معنی‌دار قابلیت استفاده زیستی سرب شده است. با افزایش در میزان سوپرفسفات‌تریپل، میزان سرب در بافت گیاهان کاهش معنی‌دار داشته، ولی با افزایش سنگ فسفات تغییری ایجاد نشده است.

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار جلد (۴)، شماره (۲) ۱۳۹۳

جدول ۶- تجزیه واریانس مقادیر غلظت سرب در اندام هوایی اسفناج در تیمارهای مختلف فسفر.

میانگین مربعات		
منابع تغییرات	درجه آزادی	اندام هوایی اسفناج
منبع فسفر	۲	۷۴۶/۲۵۲**
نسبت مولی	۳	۲۱۲۴/۰۸۵**
منبع فسفر × نسبت مولی	۶	۵۳۱/۴۷۴**
خطای آزمایش	۲۴	۵/۴۶۸
ضریب تغییرات		۷/۲۴۸

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های مقادیر غلظت سرب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در نسبت‌های مولی مختلف در اندام هوایی اسفناج به روش LSD ($P < 0.01$).

تیمار	دی‌آمونیم فسفات	سوپرفسفات تریپل	نسبت ۱:۱ اسیدفسفریک + سنگ آپاتیت
شاهد	۵۲/۸۷۸ ^a	۵۲/۸۷۸ ^a	۵۲/۸۷۸ ^a
نسبت مولی ۳	۲۱/۲۱۷ ^b	۳۵/۵۹۰ ^b	۴۴/۱۰۷ ^b
نسبت مولی ۶	۱۴/۲۳۷ ^c	۲۶/۲۱۰ ^c	۳۶/۶۴۰ ^c
نسبت مولی ۹	۷/۲۳۹ ^d	۱۸/۶۷۵ ^d	۲۴/۵۹۰ ^d

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد بیش‌ترین درصد کاهش سرب در بخش هوایی اسفناج در تیمار دی‌آمونیم فسفات بوده است. از طرفی بیش‌ترین درصد کاهش سرب در بخش هوایی اسفناج به ترتیب در نسبت‌های مولی ۶، ۹ و سپس ۳ P/Pb بوده است. لپ‌رچه و همکاران (۱۹۹۷) نیز به‌منظور اصلاح خاک آلوده به سرب از نسبت ۱:۱ اسیدفسفریک و دی‌آمونیم فسفات با نسبت مولی P/Pb=۴ و گیاه چمن استفاده کرده و نتیجه گرفتند که غلظت سرب در اندام هوایی کم‌تر از گیاه شاهد می‌باشد. آنان بیان داشتند که به‌دلیل تشکیل کانی پیرومورفیت، فسفر همراه با سرب در سطح غشا ریشه گیاه تجمع کرده و در نتیجه انتقال سرب از ریشه به اندام هوایی گیاه کاهش می‌یابد و در واقع باعث کاهش حدود ۶۶-۴۱ درصد سرب در شاخه گیاه می‌شود.

جدول ۸- درصد کاهش سرب در بخش هوایی اسفناج در اثر اعمال تیمارهای مختلف فسفر.

تیمارهای فسفر	نسبت مولی ۳	نسبت مولی ۶	نسبت مولی ۹
دی‌آمونیم فسفات	۵۹/۸۷	۷۳/۰۷	۸۶/۳۰
سوپرفسفات تریپل	۳۲/۶۹	۵۰/۴۳	۶۴/۶۸
نسبت ۱:۱ اسیدفسفریک + سنگ فسفات	۱۶/۵۸	۳۰/۷۰	۵۳/۴۹

نتیجه گیری کلی

نتایج نشان داد که در خاک شاهد بیشترین درصد سرب در جزء کربناتی و کمترین در جزء محلول در آب بود. پس از اعمال تیمارهای فسفر (دی‌آمونیم فسفات، سوپرفسفات تریپل، نسبت ۱:۱ سنگ فسفات و اسیدفسفریک) به خاک، نتایج نشان داد اختلاف معنی‌داری بین منابع مختلف فسفر و نسبت مولی‌های متفاوت P/Pb در تبدیل سرب غیرباقی‌مانده به سرب باقی‌مانده وجود دارد. در هر سه نسبت مولی، تیمار دی‌آمونیم فسفات بیشترین راندمان را در تبدیل سرب غیرباقی‌مانده به باقی‌مانده دارا بود. بیشترین راندمان تثبیت درجا سرب در تیمار دی‌آمونیم فسفات و کمترین در نسبت ۱:۱ اسیدفسفریک و سنگ فسفات بود. این امر احتمالاً به دلیل تولید مقدار فسفر محلول خیلی بیش‌تر در ترکیبات فسفاتی محلول مانند دی‌آمونیم فسفات و سوپرفسفات نسبت به سنگ فسفات می‌باشد که شرایط را برای تشکیل کانی پیرومورفیت تسهیل می‌کند. نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها در اندام هوایی اسفناج نیز نشان داد که بیشترین جذب سرب در تیمار سنگ فسفات و کمترین در تیمار دی‌آمونیم فسفات است که بیانگر یافته‌های پیشین بود.

منابع

1. Abbaspour, A., and Golchin, A. 2011. Immobilization of heavy metals in a contaminated soil in Iran using di-ammonium phosphate, vermicompost and zeolite. *Environ Earth Sci.* 63: 935-943.
2. Allison, L.E. 1965. Organic carbon, P 1372-1376. In: Black, C.A., D.D. Evans, L.J. White, L.E. Ensminger and F.E. Clark (eds.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
3. Allison, L.E., and Moodie, C.D. 1965. Carbonate, P 1379-1396. In: Black, C.A., D.D. Evans, L.J. White, L.E. Ensminger and F.E. Clark (eds.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI.

4. Arnich, N., Lanhers, M.C., Laurensot, F., Podor, R., Montiel, A., and Burnel, D. 2003. In vitro and in vivo studies of lead immobilization by synthetic hydroxyapatite. *Environ Pollut.* 124: 139-149.
5. Basta, N.T., Gradwohl, R., Snethen, K.L., and Schroder, J.L. 2001. Chemical Immobilization of lead, zinc, and cadmium in smelter contaminated soils using biosolids and rock phosphate. *J. Environ. Qual.* 30: 1222-1230.
6. Basta, N.T., and McGowen, S.L. 2004. Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil. *Environ Pollut.* 127: 73-82.
7. Berti, W.R., and Cunningham, S.D. 1997. In-place inactivation of Pb in Pb-contaminated soils. *Environ. Sci. Technol.* 31: 1359-1364.
8. Brown, S., Christensen, B., Lombi, E., McLaughlin, M., McGrath, S., Colpaert, J., and Vangronsveld, J. 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.
9. 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.
10. Cao, X., Ma, L.Q., Chen, M., Singh, S.P., and Harris, W.G. 2002. Impacts of phosphate amendments on lead biogeochemistry at a contaminated site. *Environ. Sci. Technol.* 36: 5296-5304.
11. Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity, P 891-901. In: Black, C.A., D.D. Evans, L.J. White, L.E. Ensminger and F.E. Clark (eds.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
12. Chen, M., Ma, L.Q., Singh, S., Cao, R., and Melamed, R. 2003. Field demonstration of in situ immobilization of soil Pb using P amendments. *Adv. Environ. Res.* 8: 93-102.
13. Chen, S., Xu, M., Ma, Y., and Yang, J. 2007. Evaluation of different phosphate amendments on availability of metals in contaminated soil. *Ecotoxicol Environ Saf.* 67: 278-285.
14. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. P 383-411, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Agron. Monog. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
15. Gibson, M.J., and Farmer, J.G. 1986. Multi-step sequential chemical extraction of heavy metal from urban soils. *Environ. Pollut.* 11: 117-135.
16. Gupta, P.K. 2000. *Soil, Plant, Water and fertilizer analysis*. Agrobios, New Delhi, India. 438p.
17. Hea, M., Shi, H., Zhao, H., Yu, Y., and Qu, B. 2013. Immobilization of Pb and Cd in contaminated soil using nanocrystallite hydroxyapatite. *Procedia Environl. Sci.* 18: 657-665.

18. Hettiarachchi, G.M., and Pierzynski, G.M. 2002. In situ stabilization of soil lead using phosphorus and manganese oxide: influence of plant growth. *J. Environ. Qual.* 31: 5. 64-72.
19. Hettiarachchi, G., Pierzynski, G., and Ransom, M. 2001. In situ stabilization of soil lead using phosphorus. *J. Environ. Qual.* 30: 1214-1221.
20. Hossner, L.R. 1996. Dissolution for total elemental analysis, P 9-64. In: D.L. Sparks, et al. (eds.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
21. Jiang, G., Liu, Y., Huang, L., Fu, Q., Deng, Y., and Hu, H. 2012. Mechanism of lead immobilization by oxalic acid-activated phosphate rocks. *J. Environ. Sci.* 24: 5. 919-925.
22. Kumpiene, J., Lagerkvist, A., and Maurice, Ch. 2008. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments. *Waste Management.* 28: 215-22.
23. Laperche, V., Logan, T.J., Gaddam, P., and Traina, S.J. 1997. Effect of apatite amendments on plant uptake of lead from contaminated soil. *Environ. Sci. Technol.* 31: 2745-2753.
24. Li, L., Xing, W., Scheckel, K.G., Xiang, G., Jia, H., and Li, H. 2013. Lead retention in a calcareous soil influenced by calcium and phosphate amendments. *J. Hazard Mater.* 262: 250-255.
25. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428.
26. Ma, L.Q., and Rao, G.N. 1997. Effects of phosphate rock on sequential chemical extraction of lead in contaminated soils. *J. Environ. Qual.* 26: 788-794.
27. Ma, Q.Y., Logan, T.J., and Traina, S.J. 1995. Lead immobilization from aqueous solutions and contaminated soils using phosphate rocks. *Environ. Sci. Technol.* 29: 1118-1126.
28. Melamed, R., Cao, X., Chen, M., and Ma, L.Q. 2003. Field assessment of lead immobilization in a contaminated soil after phosphate application. *Sci. Total Environ.* 305: 117-127.
29. Miretzky, P., and Fernandez-Cirelli, A. 2008. Phosphates for Pb immobilization in soils. *Environ. Chem. Lett.* 6: 121-133.
30. Park, J.H., Bolan, N., Megharaj, M., and Naidu, R. 2011. Comparative value of phosphate sources on the immobilization of lead and leaching of lead and phosphorus in lead contaminated soils. *Sci. Total Environ.* 409: 853-860.
31. Ruby, M.V., Davis, A., and Nicholson, A. 1994. In situ formation of lead phosphates in soils as a method to immobilize lead. *Environ. Sci. Technol.* 28: 646-654.
32. Ryan, J.A., Zhang, P., Hesterberg, D., Chou, J., and Sayers, D.E. 2001. Formation of chloropyromorphite in a lead-contaminated soil amended with hydroxyapatite. *Environ. Sci. Technol.* 35: 3798-3803.

33. Scheckel, K., Impellitteri, C., Ryan, J., and McEvoy, T. 2003. Assessment of a sequential extraction procedure for perturbed lead-contaminated samples with and without phosphorus amendments. *Environ. Sci. Technol.* 37: 1892-1898.
34. Scheckel, K., and Ryan, J. 2002. Effects of aging and pH on dissolution kinetics and stability of chloropyromorphite. *Environ. Sci. Technol.* 36: 2198-2204.
35. Tang, X., Zhu, Y., Chen, S., Tang, L., and Chen, X. 2004. Assessment of the effectiveness of different phosphorus fertilizers to remediate Pb contaminated soil using in vitro test. *Environ. Int.* 30: 531-537.
36. Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* 51: 844-851.
37. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1996. Soil screening guidance, user's guidance, EPA 540/R-96/018. Office of Solid and Emergency Response, Washington, DC.
38. Yang, J., Mosby, D.E., Casteel, S.W., and Blancher, R.W. 2001. Lead immobilization using phosphoric acid in a smelter-contaminated urban soil. *Environ. Sci. Technol.* 35: 3553-3559.
39. Zhu, W., Chen, S., and Yang, J. 2004. Effects of soil amendments on lead uptake by two vegetable crops from a lead-contaminated soil from Anhui, China. *Environ. Int.* 30: 351-356.



Effect of phosphate amendments on the reduction of lead phytoavailability for Spinach in a calcareous soil

T. Imani¹, *M. Baranimotlagh², A.A. Bostani³ and F. Khormali⁴

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ²Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ³Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Shahed University, Tehran, ⁴Professor, Dept. of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 03/01/2014; Accepted: 06/02/2014

Abstract

In order to reduce Pb phytoavailability for spinach (*Spinacia oleracea* L.) using P amendment, (DAP, TSP 1:1 ratio acid phosphoric and phosphate rock), a factorial experiment based on completely randomized design was conducted and analyzed 100 days after the P applications using a sequential extraction method. Sequential extraction analysis indicates that P was effective in transforming soil Pb from non-residual fractions (SS, SE, CA, Fe-Mn form and Pb in OM) to a residual fraction. Results revealed that DTPA extractable Pb was reduced in treated soils, however, among these three treatments, DAP at 9 molar ratio of P/Pb was the most effective. Results of greenhouse experiments showed that the amount of lead in aerial parts of spinach had the highest lead in 1:1 ratio of acid phosphoric and phosphat rock and the DAP had the lowest. In DAP treatment, the Pb concentrations in shoots of spinach decreased 72% as compared with the control treatment. The results suggested that P amendments especially DAP can lower the bioavailability and increase the geochemical stability of soil Pb, so it has the potential for in situ remediation in Pb-contaminated soils.

Keywords: In situ immobilization, Phosphorous, Pyromorphite mineral, Sequential extraction

* Corresponding Authors; Email: mbarani2002@yahoo.com

