

بررسی تأثیر انرژی حرارتی، آهک و فسفات در غیرپویاسازی کادمیوم خاک آلوده

صفیه حسن زاد*^۱، حسین پیرخراتی^۲، بهنام دولتی^۳، خلیل فرهادی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی دانشگاه ارومیه

h.pirkharrati@urmia.ac.ir

۲. استادیار گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم دانشگاه ارومیه

b.dovlati@urmia.ac.ir

۳. استادیار گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

khalil.farhadi@yahoo.com

۴. استاد گروه شیمی دانشکده شیمی دانشگاه ارومیه

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۹

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۷/۱۸

چکیده

حلالیت و پایداری عناصر سنگین در خاک نقش مهمی در نقل و انتقال آن به آب‌های زیرزمینی و گیاهان دارد و می‌تواند برای سلامت انسان تهدیدی جدی باشد. این تحقیق به منظور بررسی تغییرات زمانی میزان تثبیت کادمیوم در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین تحت تأثیر انرژی حرارتی، آهک (CaCO_3) و کود فسفات (به‌منزله منبع فسفات) انجام شد. خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی رس به روش استاندارد انجام شد. به منظور بررسی تثبیت کادمیوم، محلول آهک در سطوح صفر و ۵ درصد، محلول کود فسفات در سطوح صفر و ۲/۵ درصد تهیه و با خاک مخلوط شد. سپس، نمونه‌ها در دمای ۲۵، ۴۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. پس از خنک‌شدن نمونه‌ها عصاره‌گیری در فاصله زمانی ۷، ۳۰ و ۶۰ روز با نسبت ۱:۱۰ خاک به آب تهیه و تعیین غلظت شد. نتایج نشان داد خاک مورد مطالعه سبک بافت، اسیدی و کاملاً شور است. همچنین، کانی‌های حاکم در نمونه به ترتیب کائولینیت، ایلیت و اسمکتیت تعیین شدند. تجزیه واریانس نشان داد آثار مستقل حرارت و تیمار در فاصله زمانی ۷، ۳۰ و ۶۰ روز معنی‌دار ($P < 0.001$) شدند، اما آثار متقابل فاکتورها با گذشت زمان معنی‌دار نشدند. دمای ۴۰، ۶۰ و ۷۰ بیشترین تأثیر در رهاسازی کادمیوم را داشت. نتایج نشان داد که افزایش حرارت سبب تغییر جهت اثر فسفات در تثبیت کادمیوم و افزایش حلالیت و انتقال آن در خاک می‌شود. همچنین، با گذشت زمان و برقراری تعادل نسبی، تثبیت کادمیوم نیز افزایش یافت. نتایج حاصل نشان داد کاربرد آهک در خاک‌های اسیدی و شور به منظور تثبیت کادمیوم توصیه نمی‌شود و بهتر است منابع فسفات به کار روند.

کلیدواژه

آهک، حرارت، خاک آلوده، غیرپویاسازی کادمیوم، فسفات.

۱. سرآغاز

سالیانه حدود ۲۵۰۰۰ تن کادمیوم وارد محیط‌زیست می‌شود که حدود نیمی از آن از طریق هوازدگی سنگ‌هاست (Kabata-Pendias, 2000). منابع طبیعی انتشار کادمیوم عمدتاً شامل سنگ‌های رسوبی، سنگ فسفات‌های دریایی، آتشفشان‌های فعال، معادن و بسترهای سنگی حاوی آن‌ها، دریاچه‌ها و آتش‌سوزی جنگل‌هاست. منابع انسانی آلودگی کادمیوم شامل انتشار از صنایع

کادمیوم از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود که از راه‌های مختلف، منابع آب و خاک را آلوده می‌کند (Bradl, 2005). پالایش خاک‌ها و آب‌های آلوده به این عنصر، از مهم‌ترین سیاست‌های زیست‌محیطی در کشورهای صنعتی است. این نگرانی در کشورهای در حال توسعه نیز وجود دارد (Sparks, 2003). به طور طبیعی

رسوب فلزات سنگین به صورت کربنات فلزی می‌شود و قابلیت جابه‌جایی برخی از فلزات در خاک‌های آلوده را کاهش می‌دهد (Lee, et al., 2004). همچنین، افزودن مواد قلیایی با افزایش pH و افزایش جذب فلزات به وسیله بخش‌های مختلف خاک حلالیت فلزات سنگین را کاهش می‌دهد (Mcbride, et al., 1997; Puschenritter, et al., 2005). در ضمن از کربنات کلسیم به‌منزله جاذب نیز در تصفیه آب‌های آلوده استفاده می‌شود (مهدوی‌مزده، ۱۳۹۰). حرارت نیز از فاکتورهای مهم در تثبیت عناصر است. حرارت سبب از بین رفتن آب هیدراته اطراف کاتیون می‌شود و انتقال آن‌ها به فضاهای خالی بخش رس خاک را تسهیل می‌کند (Dixon and Weed, 1995).

بررسی مطالعات صورت‌گرفته نشان داد که اکثر این تحقیقات در زمینه تأثیر توأم انرژی حرارتی و فسفات روی میزان تثبیت فلزات سنگین در خاک‌ها و رسوبات باطله به منظور استفاده مجدد از آن‌ها در حکم مصالح ساختمانی بوده است (Janes, 2001; Axe, 2007; Dalton, 2004). بخش دیگری از این مطالعات نیز مربوط به استفاده از نتایج این تحقیقات برای دفع فضولات هسته‌ای است (چرم و جعفری، ۱۳۸۲). یکی دیگر از روش‌های تثبیت عناصر نیز تثبیت عنصر در محل بومی خود است. این روش در خاک‌های باطله معدنی اهمیت زیادی دارد و انتقال عناصر به آب‌های زیرزمینی، گیاهان و زنجیره غذایی انسان‌ها محدود و تحت کنترل خواهد بود. این تحقیق برای بررسی اثر سنگ آهک، کود فسفات و انرژی حرارتی در غیر پویاسازی فلز سنگین Cd در بازه زمانی معین در خاک آلوده معدنی انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه، از خاک آلوده به عناصر سنگین حاصل از فراوری شرکت سرب و روی منطقه انگوران زنجان برداشت و پس از خشک کردن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

مصرف‌کننده محصولات حاوی کادمیوم، مانند باطری‌های نیکل-کادمیوم، پلاستیک، سرامیک، شیشه، رنگ، میناکاری که در تولید آن‌ها از رنگ‌های حاوی کادمیوم استفاده می‌شود، تثبیت‌کننده‌های کادمیومی استفاده‌شده در فرایند تولید محصولات پلی وینیل کلراید (PVC)، محصولات آهنی و غیرآهنی با روکش‌های کادمیومی، آلیاژهای کادمیومی و محصولات الکترونیکی، سوزاندن زباله‌های شهری و غیره است (Kabata-Pendias, 2000).

افزایش قابلیت دسترسی و تحرک فلزات سنگین در خاک سبب نشت و نفوذ آن‌ها به داخل آب‌های زیرزمینی و ورود انواع آلاینده‌های سمی به داخل زنجیره غذایی خواهد شد. به همین علت محققان محیط‌زیست در جستجوی یافتن روش‌هایی برای تثبیت و مهار فلزات سنگین در خاک‌اند. به تازگی در دنیا از ترکیبات شیمیایی مختلف مانند آهک، فسفات و کربنات کلسیم (Kabata-Misra and Lee, et al., 2009; Pendias, 2006) مواد زاید بیولوژیک همچون کودهای آلی حیوانی و گیاهی (Misra and Chaturvedi, 2007; Lee, et al., 2004) سرباره‌های فلزی و خاکستر تولیدی از کوره‌های ذوب فلزات (Kabata-Pendias, 2006) و ریزه‌های حاصل از فراوری چوب در صنایع چوب و کاغذ (Lee, et al., 2009) به منظور تثبیت فلزات سنگین مختلف در خاک استفاده می‌شود.

از آنجا که یون فسفات با کاتیون‌هایی مثل Pb و Cd کمپلکس پایداری را تشکیل می‌دهند، لذا سبب کاهش حلالیت و تحرک‌پذیری عناصر می‌شوند. برای مثال، سوپر فسفات تریپل از جمله کودهای فسفوری است که حلالیت مناسبی در آب دارد و واکنش‌پذیری فسفر با عناصر سنگین را افزایش می‌دهد و به تشکیل کمپلکس‌های پایدار منجر خواهد شد. همچنین، افزایش اسیدیته (pH) و حلالیت فلزات، واکنش‌پذیری عناصر با فسفر را افزایش و سبب رسوب کاتیون-فسفات می‌شود (Han and Kingery, 2001).

همچنین، کاربرد آهک یا سنگ آهک (CaCO_3) سبب

$$q = \frac{C_e \times V_1}{M_s}$$

که در آن q مقدار Cd ($mgkg^{-1}$) واجذب شده، C_e (mgL^{-1}) غلظت کادمیوم، V حجم محلول و M_s جرم خاک خشک بر حسب گرم است. آنالیز داده‌ها نظیر تجزیه واریانس و مقایسه میانگین با استفاده از نرم‌افزار SPSS و MSTAT C انجام و نمودارها با استفاده از Excel رسم شدند.

۳. نتایج

برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و مقدار کل Cd نمونه خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. با استناد به نتایج، خاک مورد نظر اسیدی و دارای شوری زیادی ناشی از املاح Zn ، Cd و Pb بود. زیاده‌املاح قدرت یونی خاک را افزایش و فرایندهای جذب و واجذب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، به علت نبود کربنات در خاک (۰ درصد)، احتمالاً این املاح به صورت سولفات Zn ، Cd و Pb موجودند. نمونه حاوی ۲۳ درصد رس است و جزء خاک‌های سبک‌بافت محسوب می‌شود. مقدار جذب و نگهداری عناصر در خاک‌های سبک‌بافت به علت ظرفیت تبادل پایین کم است، اما واجذب بیشتری از خود نشان می‌دهد. این امر توأم با پایین بودن pH می‌تواند به لحاظ آلودگی مشکل‌ساز باشد. مقادیر کل Cd ناشی از پس‌ماندهای استخراج برابر با ۲۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و بیانگر شدت آلودگی خاک است. بر اساس استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست امریکا، حد مجاز Cd در خاک برابر با ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (Singh and Narwall, 1999). بنابراین، غلظت این عنصر در خاک مورد مطالعه بیش از حد استاندارد و به‌منزله خاک آلوده مطرح است.

مورد مطالعه نظیر بافت به روش هیدرومتری (Bouyoue, 1969)، pH در سوسپانسیون ۱:۵ خاک و محلول ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم (Blakmore, 1991)، کربنات کلسیم معادل (CCE)، به روش تیتراسیون (Jakson, 1964)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم نرمال (Chapman, 1965)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع، میزان کادمیوم کل خاک با روش HNO_3 و HCl (EPASW, 1996) نوع و مقدار کانی رسی با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD) در آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشگاه ارومیه اندازه‌گیری شد.

به منظور بررسی فرایند تثبیت عناصر سنگین، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب پایه کاملاً تصادفی با دو تکرار طراحی شد. کود فسفات و آهک زمین‌شناسی ($CaCO_3$) پودر و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. هر یک از تیمارها در دو سطح صفر و ۲/۵ درصد فسفات، صفر و ۵ درصد سنگ آهک و مخلوط سنگ آهک (صفر و ۵ درصد) به علاوه کود فسفات (صفر و ۲/۵ درصد) در ظروف جداگانه و به صورت محلول به ۳۰۰ گرم خاک اضافه و در قالب‌های مخصوص قرار داده شدند. پس از گذشت دو روز در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد از طریق کوره الکتریکی مدل Shimiran F.47 حرارت داده شدند. به منظور تهیه سوسپانسیون، نمونه‌های حرارت‌داده‌شده را پودر کردند و با نسبت ۱:۱۰ خاک تیمار شده با آب مقطر مخلوط شدند. نمونه‌ها در ظروف دربسته و دمای اتاق نگهداری و هر روز ۱۵ دقیقه تکان داده شدند. نمونه‌برداری پس از گذشت ۷، ۳۰ و ۶۰ روز انجام و پس از سانتریفوژ، غلظت Cd در محلول رویی از طریق دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu 6600 اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

کادمیوم کل ($mgkg^{-1}$)	ظرفیت تبادل کاتیونی ($meq100g^{-1}$)	Ph	هدایت الکتریکی (dSm^{-1})	کربنات کلسیم کل		کلاس بافت خاک
				رس	%	
۲۲۵	۱/۸۶	۵/۵	۲۰/۴	۰	۲۳	لوم سیلتی

* میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم، دسی‌زیمنس بر متر

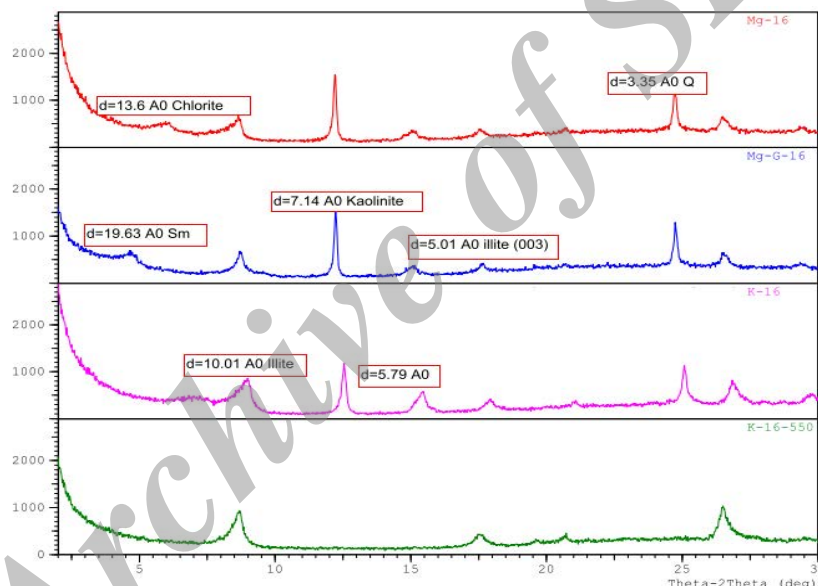
پراش‌های اول، دوم، سوم و چهارم برای انواع کانی‌های رسی و کوارتز در جدول ۲ نشان داده شده است.

پراش اشعه ایکس (XRD) برای خاک مورد نظر بررسی شد. نتایج نشان داد، کانی غالب خاک به ترتیب کائولینیت، ایلیت و اسمکتیت بود (شکل ۱). مشخصات

جدول ۲. مشخصات پراش‌های اول، دوم، سوم و چهارم برای کانی‌های رس و کوارتز (Moore, et al., 1989)

پراش	کلریت	ایلیت	اسمکتیت	کائولینیت	کوارتز
۰۰۱	۱۴/۱۱	۱۰/۰	۱۸/۱	۷/۱۱	۴/۲۵
۰۰۲	۷/۰۷	۴/۹۹	۱۴/۱	۳/۵۵	۳/۳۲
۰۰۳	۴/۷۴	۳/۳۳			
۰۰۴	۳/۵۴				

واحد اعداد بر حسب انگسترم است (A°)



شکل ۱. پراش‌نگاری خاک مورد مطالعه (Q: کوارتز، Sm: اسمکتیت)

گرفته است، اما در هر دو حالت معنی‌دار نیستند (شکل ۲). اثر تیمارها روی واجذب کادمیوم در دماهای مختلف در شکل‌های ۳-۵ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که تیمار فسفات-آهک در همه دماها برای دوره زمانی سوم سبب کاهش واجذب کادمیوم نسبت به بقیه تیمارها شده است. تیمار آهک علاوه بر کاهش‌ندادن واجذب در دماهای بالاتر سبب افزایش واجذب کادمیوم نیز شده است. البته تأثیر تمامی تیمارها در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در واجذب روند کاهشی داشته است. نتایج حاصل از مقایسه میانگین تیمارها نشان داد بیشترین

اثر تیمارها نسبت به واجذب کادمیوم آنالیز آماری شدند. تجزیه واریانس نشان داد که اثر فاکتور اصلی درجه حرارت، تیمار و اثر متقابل آن‌ها (هفته اول) در میزان رهاسازی کادمیوم خاک در سطح احتمال یک دهم درصد معنی‌دار بود. آثار متقابل با گذشت زمان معنی‌دار نشدند (جدول ۳). نتایج نشان داد رهاسازی کادمیوم تابع تغییرات دمایی بوده و در تمامی تیمارهای مورد مطالعه با افزایش درجه حرارت رهاسازی کادمیوم افزایش یافته است. البته افزایش درجه حرارت تا ۶۰۰ درجه معنی‌دار بوده و در دمای بیش از ۶۰۰ درجه کاهش رهاسازی یا تثبیت صورت

بیشترین مقدار واجذب مربوط به تیمار آهک و دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین واجذب مربوط به تیمار فسفات-آهک در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است و از نظر آماری معنی‌دارند. اثر سایر تیمارها نسبت به شاهد تقریباً معنی‌دار نبوده‌اند (شکل ۸). مقایسه میانگین آثار متقابل بین تیمار و حرارت در سه دوره زمانی نشان داد که واجذب کادمیوم در کلیه تیمارها با گذشت زمان کاهش یافته است (شکل ۹).

واجذب کادمیوم در شش دمای مورد بررسی برای دوره زمانی اول مربوط به تیمار فسفات و دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده و کمترین واجذب نیز مربوط به شاهد و دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۶). همچنین، در دوره زمانی دوم بیشترین واجذب کادمیوم مربوط به تیمار آهک و دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین واجذب نیز مربوط به تیمار فسفات-آهک و دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است (شکل ۷). در دوره زمانی سوم نیز

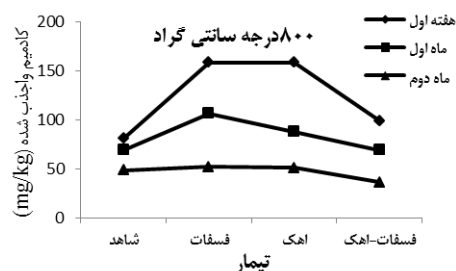
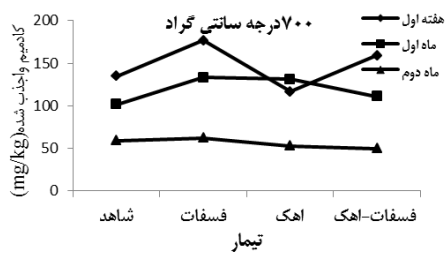
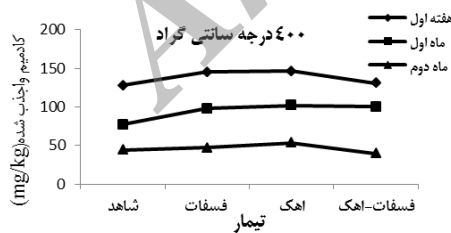
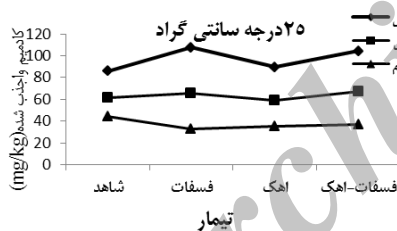
جدول ۳. تجزیه واریانس اثر درجه حرارت و تیمار در تحرک پذیری کادمیوم

میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر
روز ۶۰	روز ۳۰	روز ۷		
***۷/۷۴۹	***۳/۷۲۹۲	***۲/۴۴۶۳	۵	حرارت
***۵/۳۴۵	*۸/۱۰۱۵	***۳/۲۷۸۸	۳	تیمار
ns۹/۷۲	ns۲/۴۱۴	***۹/۹۳۴	۱۵	حرارت*تیمار
۷/۳۸	۵/۲۲۲	۹/۱۱۶	۲۴	خطا
۱۳	۱۶	۸/۵		ضریب تغییرات (%)

ns، غیرمعنادار

***، معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ درصد

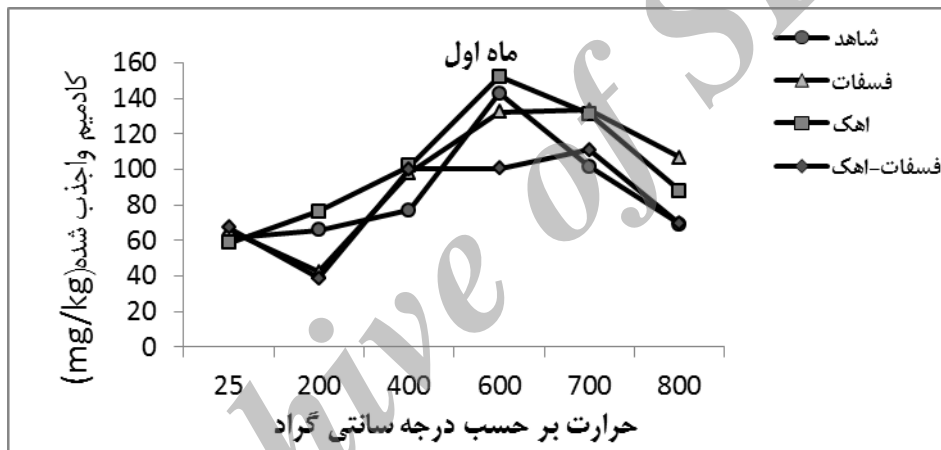
***، معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ درصد



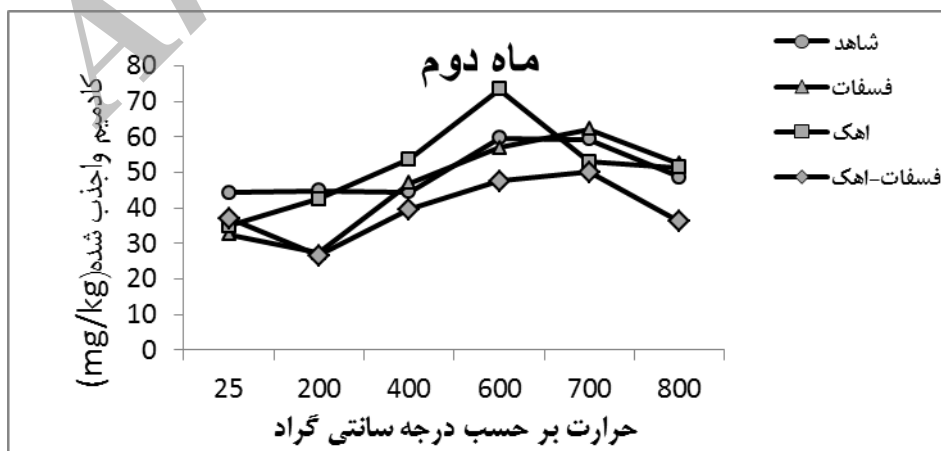
شکل ۲. تأثیر اصلی درجه حرارت و تیمار در میزان واجذب کادمیوم در واحد زمان



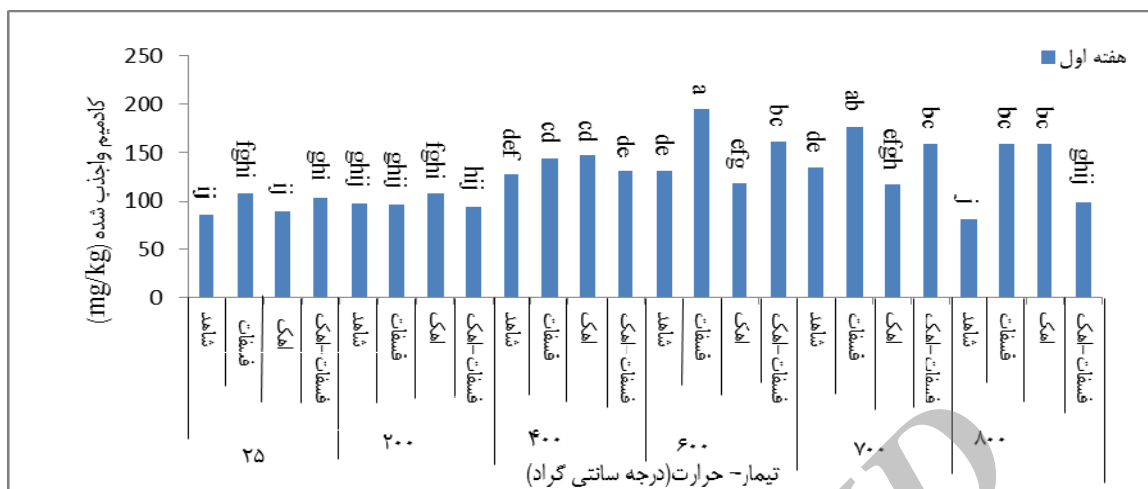
شکل ۳. تأثیر اصلی تیمارها در دماهای مختلف در دوره زمانی اول



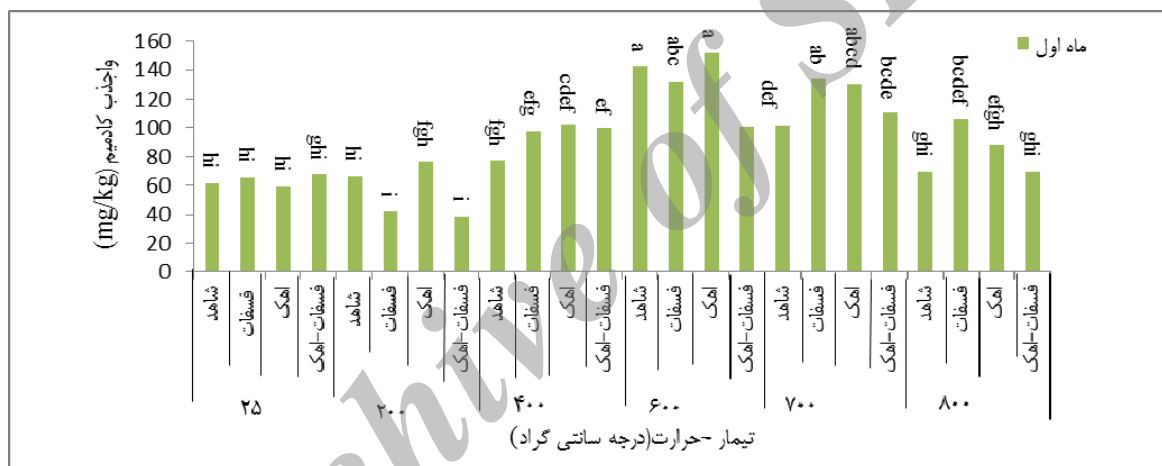
شکل ۴. تأثیر اصلی تیمارها در دماهای مختلف در دوره زمانی دوم



شکل ۵. تأثیر اصلی تیمارها در دماهای مختلف در دوره زمانی سوم



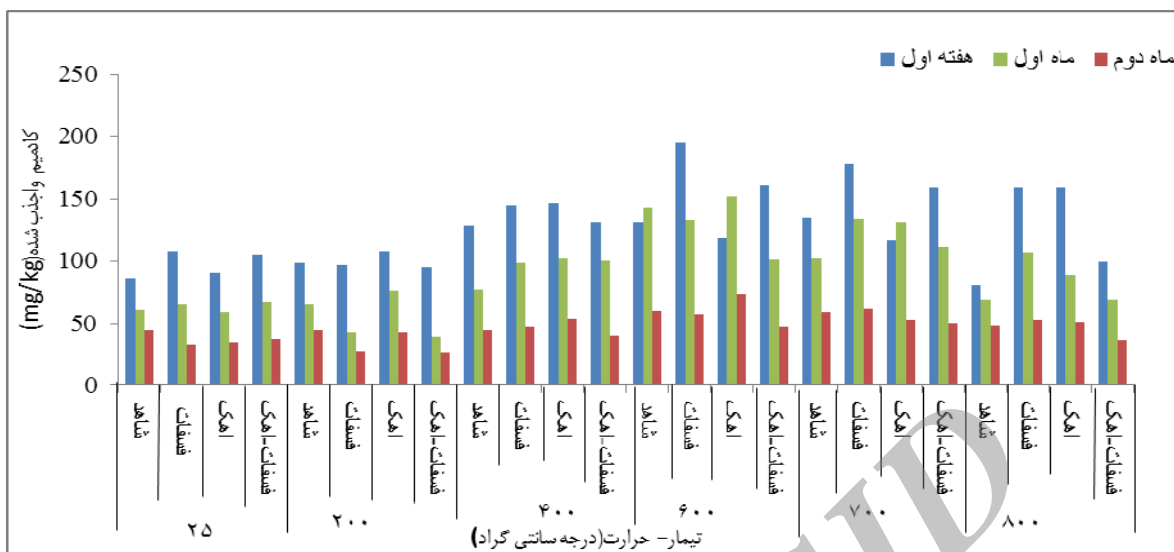
شکل ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار و حرارت در واجذب کادمیوم در دوره زمانی اول (حروف مشترک نشان دهنده غیرمعنی داری است)



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارها و حرارت در واجذب کادمیوم در دوره زمانی دوم (حروف مشترک نشان دهنده غیرمعنی داری است)



شکل ۸. مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار و حرارت در واجذب کادمیوم در دوره زمانی دوم (حروف مشترک نشان دهنده غیرمعنی داری است)



شکل ۹. مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار و حرارت در واجذب کادمیوم در سه دوره زمانی

۴. بحث و نتیجه گیری

۴.۱. اثر درجه حرارت در رهاسازی کادمیوم

به نظر می‌رسد رفتار حرارت در ساختار کانی‌های رسی متفاوت است و سبب تغییر ساختاری کانی‌ها می‌شود. فسفات اضافه شده در سطوح زیاد سبب تغییر جهت تأثیر فاکتور حرارت شده است. گریم و همکاران (1940) نشان دادند تأثیر دماهای مختلف بر خواص فیزیکی کانی‌های رسی از قبیل شاخص خمیری و تخریب نهایی کانی‌ها نسبت به هم متفاوت‌اند. برای مثال، این خواص در ایلیت با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ثابت است و بیشتر از آن سبب تغییر نسبی در ساختار ایلیت می‌شود. همچنین، افزایش دما به بیش از ۲۰۰ درجه سبب از دست دادن آب ساختاری و تخریب شبکه از ۷۰۰ درجه شروع و تخریب نهایی در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کامل می‌شود. در صورتی که تخریب نهایی برای مونت موریلونیت از ۶۰۰ درجه شروع و در ۸۰۰ درجه کامل می‌شود. البته این امر به مقدار کانی‌های خاک نیز بستگی دارد. کلاس بافت خاک با افزایش درجه حرارت تغییر می‌یابد. برای مثال، میزان ماسه در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش و میزان رس و سیلت کاهش می‌یابد (Parlak, 2011). همچنین، ساختار کریستالی کلوئیدهای رسی در دمای بیش از ۴۰۰ درجه

سانتی‌گراد ناپدید می‌شود و علت آن احتمالاً تبدیل شدن آن‌ها به ذراتی در اندازه ماسه یا کلسیناسیون آهن و آلومینوسیلیکات‌هاست (Sertsu and Sanchez, 1978; Giovannini, et al., 1988).

۴.۲. تأثیر آهک در رهاسازی کادمیوم

نتایج نشان داد که اثر آهک در واجذب کادمیوم در دماهای مختلف متفاوت و روند یکسانی نداشته است. از عوامل مهم در تثبیت یا رهاسازی عناصر سنگین علاوه بر نقش کانی‌های رسی، میزان pH و EC خاک است. خاک مود مطالعه دارای اسیدیته پایین و شوری زیاد بوده و یکی از شرایط بهینه برای افزایش رهاسازی کادمیوم است. افزایش آهک و فسفات تا حدی موجب خنثی کردن اسیدیته خاک می‌شود و pH خاک را تا حدی افزایش می‌دهد (تثبیت کادمیوم). کلر یکی از شاخص‌های شوری خاک است و سبب افزایش حلالیت کادمیوم می‌شود (Khoshgoftar, et al., 2004). همچنین، فاکتور شوری سبب پراکنش ذرات خاک می‌شود و با اثر حرارت هم‌سو است. روشن‌فکر و همکاران (2008) نشان دادند افزایش شوری سبب کاهش جذب Cd از طریق کربنات کلسیم می‌شود. نتایج حاصله نشان داد افزایش درجه حرارت در رهاسازی کادمیوم

۴.۴. تأثیر زمان در رهاسازی کادمیوم

وجود نوسانات غلظت در هفته اول ناشی از نبود تعادل جذبی در خاک است. با گذشت زمان و نزدیک شدن به نقطه تعادل روند تأثیر تیمارها به وضوح مشخص شده است. با سپری شدن زمان تماس و افزایش آهک و فسفات، رهاسازی کادمیوم کاملاً سیر نزولی داشته و می‌توان گفت فرضیه این تحقیق محقق شده است.

۵. نتیجه نهایی

به طور کلی عواملی مثل فسفات و آهک سبب افزایش pH محلول خاک و کاهش حلالیت و انتقال کادمیوم در خاک‌های به شدت آلوده می‌شوند. این در حالی است که کاربرد آهک در تثبیت کادمیوم برای خاک‌هایی با شوری زیاد مناسب نیست، اما استفاده از کود فسفاته همراه آهک برای خاک‌های اسیدی و شور مناسب تشخیص داده شد. همچنین، حرارت سبب تغییر ساختار کانی‌های رسی و افزایش رهاسازی عناصر می‌شود. از طرف دیگر، افزایش حرارت سبب تغییر جهت اثر فسفات در تثبیت کادمیوم شد.

یادداشت

1. Calcium carbonate equivalent (CCE).

نسبت به تیمارها متفاوت بود. تحقیقات به عمل آمده نشان داد که در اثر افزایش درجه حرارت کربنات خاک به صورت گاز CO₂ خارج و موجب افزایش مقدار واجذب عناصر می‌شود. (Altibans, 1982) این در حالی است که برای فسفات چنین نیست و افزایش حرارت تا ۲۰۰ درجه موجب تثبیت کادمیوم نیز شده است.

۳.۴. تأثیر فسفات در رهاسازی کادمیوم

نتایج نشان داد تثبیت کادمیوم با افزایش مقدار فسفات رابطه مستقیم دارد. بیشترین مقدار تثبیت کادمیوم در تیمار فسفات و فسفات-آهک در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. محققان نشان دادند با افزایش فسفات، Cd به شکل فسفات-کادمیوم رسوب می‌دهد و سبب افزایش تثبیت می‌شود (Thawornchaisit and Polprasert, 2008). تأثیر توأم فسفات و آهک حالت سینرژیسم (Synergism) دارد و سبب افزایش pH خاک می‌شود. به نظر می‌رسد تحت این شرایط افزایش درجه حرارت تأثیر کمی در به هم ریختن ساختار کانی‌های رسی داشته و فرایند تثبیت صورت گرفته است.

منابع

چرم، م. جعفری، س. ۱۳۸۲. تثبیت کبالت و کادمیوم در رس‌های خاک به کمک انرژی حرارتی، مجله علوم و فنون کشاورزی، سال دوم، شماره هفتم، صص ۶۹-۸۲.

مهدوی‌مزده، ع.، اسماعیلیان، آ.، قبادی‌نیا، م.، لیاقت، ع. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی نقش کربنات کلسیم در حذف و انتقال و انتشار کادمیوم، مجله پژوهش آب ایران، سال ششم، شماره دهم، صص ۲۲۱-۲۲۶.

Altinbas, Ü. 1982. A study of the some properties of the raw material used in the ceramic industry at different temperatures. Review of the Faculty of Agriculture, University of Ege 460, 140.

Axe, L., Ndiba, P. 2007. Heavy metal immobilization through phosphate and thermal treatment of dredged sediments. Journal of civil and environmental engineering, New Jersey Institute of Technology, University Heights, Newark, New Jersey 07102.

Bardl, H.B. 2005. Sources and origins of heavy metals .P.1-27. In H.B. Bradle (Ed), Heavy metals in the environment. Interface Science and Technology, Elsevier.

Blakemore, C., Searle, P. L. and Daly, B. K. 1991. Methods of chemical analysis of soils. New Zealand soil Bureau Scientific Report 10 a (Revised) Wellington.

Bouyoue, G.J. 1969. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agro. J. 54:464-465.

Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capability. P 891-901. In CAB Lack et al. (eds) Methods of soil Analysis SSSA.

- Dalton, J. L., Gardner, K. H., Seager, T. P., Weimer, M. L., Spear, J. C. M. Magee, B. J. 2004. Properties of Portland cement made from contaminated sediments. *Resour., Conserv. Recycl.*, 41 (3): 227-241.
- Dixon, J. B., and Weed, S. B. 1995. Minerals in soil environments. Second edition, Soil Sci. SOC. Am, Modison, Wisconsin.
- EPASW-846 Method 3050B.1996. Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, revision 2; U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Giovannini, G., Lucchesi, S. and Giachetti, M. 1988. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil fertility and plant growth. *Soil Sci.* 146: 255-261.
- Grim, R. E., and Bradley, W. F. 1940. Investigation of the effect of heat on the clay minerals illite and montmorillonite. Reprinted from the *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 23, No. 8, pp 242-248.
- Han, F.X., Kingery, W.L., and Selim, H.M. 2001. Accumulation redistribution transports and bio availability of heavy metals in waste amended soil. pp. 145-173.
- Jackson, M.L. 1964. Soil Chemical Analysis (Advanced Course). Dept. Soil Sci., Univ. of Wisconsin, Madison.
- Jones, K. W., Feng, H., Stern, E. A., Lodge, J., Clesceri, N. L. 2001. Dredged material decontamination demonstration for the port of New York/New Jersey. *J. Hazard. Mater* 85 (1-2) 127-143.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. 2006. Trace elements in soils and plants. 5th ed. CRC press, Boca Raton, Florida, 43-5.
- Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. 2000. Trace elements in soils and plants. Third ed. CRC press, Boca Raton, Florida.
- Khoshgoftar, A., Karimian, H., Kalbasi, N., Van Der Zee, M., Parker, S. 2004. Salinity and zinc application effects on phytoavailability of cadmium and zinc. *Soil Science Society of America Journal*. 68(6): 1885-9.
- Lee, S.H., Lee, J.S., hoi, Y.J., Kim, C.J.G. 2009. In situ stabilization of Cadmium, Lead and Zinc contaminated soil using various amendments. *Journal of Chemosphere*, 77 (8), 1069-75.
- Lee, T.M., Lai, H.Y., Chen, Z.S. 2004. Effect of chemical amendments on the concentration of Cadmium and Lead in long-term contaminated soils, *Chemosphere*, 57 (10), 1459-71.
- Mcbride, M., Sauve, S., Hendershot, W. 1997. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *Eur. J. Soil Sci*, 48, 337.
- Misra, V., Chaturvedi, P.K. 2007. Plant uptake bioavailability of heavy metals from the contaminated soil after treatment with humus soil and hydroxyapatite, *Environ Monit Assess*, 133(1-3): 76-196.
- Moore, D.M., and Reynolds, R. C. J. R. 1989. X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press. New York.
- Parlak, M. 2011. Effect of heating on some physical, Chemical and mineralogical aspects of forest soil, *Journal of Bartın Orman Fakültesi*, 19, 143-152.
- Puschenreiter, M., Horako, O., Friesl, W., Hartl, W. 2005. Low-cost agricultural measures to reduce heavy metal transfer in to the food chain- a review. *Plant soil environ*, 51, 1.
- Roshanfekar, A., Kashefipour, S.M., and Jafarzadeh, N. 2008. Numerical modeling of heavy metals for riverine systems using a new approach to the source term in the ADE., *J. of Hydro informatics*, 10.3: 245-2.
- Sertsu, S. M., and Sanchez, P. A. 1978. Effects of heating on some changes in soil properties in relation to an Ethiopian land management practice. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 940-944.
- Singh, B.R., Narwall, R.P. 1999. Plant availability of heavy metals in a sludge treated soil. *Journal of Environ qual*, 3344-9.
- Sparks, D.L. 2003. Environmental soil chemistry. Academic Press.
- Thawornchaisit, U., and Polprasert, C.H. 2008. Evaluation of phosphate fertilizers for the stabilization of cadmium in highly contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*.