

تغییرات کادمیم قابل دسترس در طی زمان و ارتباط آن با برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شدیداً آهکی

مرضیه حسینی، ابراهیم ادهمی* و حمیدرضا اولیایی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱/۲۹)

چکیده

در میان فلزات سنگین کادمیم دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا سمیت آن برای گیاه تا ۲۰ برابر سایر فلزات سنگین است. پژوهش حاضر به منظور بررسی روند تغییرات کادمیم قابل جذب خاک در طول زمان و ارتباط آن با خصوصیات خاک انجام شد. تیمارها شامل ۱۳ نمونه خاک و دو سطح کادمیم (۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو تکرار بود. در زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز پس از خوابانیدن، کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش سطح کادمیم مصرفی کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA در تمامی خاک‌ها افزایش یافت. کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA در طی زمان کاهش یافت، با این وجود باز هم در پایان آزمایش بخش زیادی از کادمیم اضافه شده به خاک به شکل قابل استفاده باقی ماند. در بین خصوصیات خاک کربنات کلسیم معادل همبستگی منفی معنی‌داری با کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA در بیشتر زمان‌ها و هر دو سطح کادمیم مصرفی نشان داد. میان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA با pH و میزان شن خاک ارتباط منفی معنی‌دار و با کربن آلی خاک ارتباط مثبت و معنی‌داری وجود داشت. همچنین نتایج حاصل از برازش داده‌های قابلیت جذب کادمیم با معادلات سینتیکی نشان داد که معادله تابع نمایی مناسب‌ترین معادله توصیف کننده سینتیک تغییرات قابلیت جذب کادمیم در خاک‌های مورد مطالعه بود.

واژه‌های کلیدی: کادمیم، DTPA، قابلیت دسترسی، خاک

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: eadhami@gmail.com

مقدمه

آلودگی خاک و آب با فلزات سنگین یکی از مشکلات زیست محیطی عمده در جوامع بشری است که علاوه بر کاهش عملکرد و کیفیت محصول، پایداری تولیدات کشاورزی را دچار مخاطره نموده و سلامتی افراد جامعه را نیز به خطر می اندازد. در میان فلزات سنگین کادمیم دارای اهمیت ویژه ای است، زیرا ریشه گیاهان آن را به سهولت جذب می نمایند و سمیت آن برای گیاه تا ۲۰ برابر سایر فلزات سنگین است (۲، ۸ و ۱۰). کادمیم با مقدار معمول ۰/۱ تا ۲ میلی گرم در کیلوگرم خاک متحرک ترین عنصر سنگین در خاک محسوب می شود (۱۱). سمیت و تجمع کادمیم در اندامها از طریق خوردن غذای آلوده نقش مهمی در به مخاطره انداختن سلامتی انسان و حیوان دارد. این عنصر طیف وسیعی از مسمومیت شامل تخریب اعصاب، مسمومیت کبد و کلیه، جنین ناقص الخلقه و آثار جهش زایی را دارد. راههای پیدایش و ورود کادمیم به محیط از طریق ضایعات صنعتی ناشی از فرایندهای آبکاری، تولید پلاستیک، تولید مواد رنگی، تولید آلیاژها و باتری هاست (۴۴). رفتار جذبی کادمیم در خاکهای مختلف متفاوت است و به خصوصیات از قبیل ویژگیهای فیزیکی، کانی شناسی خاکها و ترکیب محلول خاک وابسته است (۲۱). ویژگیهای خاک از قبیل pH (۳۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی (۴۸ و ۲۳)، ماده آلی (۴۷)، بافت خاک (۲۵)، اکسیدهای آهن و آلومینیوم (۴۳)، رقابت با دیگر فلزات در خاک (۱۶) و مدت زمان تماس خاک با فلز (۲۰)، تأثیر مهمی بر رفتار جذبی کادمیم در خاک دارند. حلالیت و فراهمی زیستی عناصر فلزی بلافاصله پس از افزوده شدن به خاک زیاد است و با گذشت زمان و ایجاد تعادل بین فلز و خاک بر اثر واکنشهایی همچون جذب سطحی، تبادل یونی، کلاته شدن، رسوب، اکسایش و احیاء، واکنش با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز و ورود به شبکه کانیها از قابلیت استفاده آنها کاسته شده و از صورت حلالیت زیاد به شکل های کم محلول تر تبدیل می گردد (۱۲ و ۲۷). رنلا و همکاران (۳۹) به منظور مطالعه قابلیت استفاده و توزیع کادمیم در خاک مقادیر مختلفی از این

فلز را به یک خاک آهکی افزودند. آنان مشاهده کردند که در طول دوره خواباندن دسترسی زیستی کادمیم به مقدار زیادی وابسته به مقدار کادمیم اضافه شده به خاک نیست. جداسازی شکل های شیمیایی کادمیم در طول دوره خواباندن ۶۰۰ روزه نشان داد که در تمام سطوح کادمیم مصرفی و مدیریت های زراعی مختلف بخش عمده کادمیم به شکل کربناتی در آمد. این پژوهشگران نتیجه گیری کردند که ظرفیت نگهداری کادمیم در خاک های آهکی به مراتب بیشتر از حدود مجاز توصیه شده به وسیله سازمان های حفاظت محیط زیست است. رجایی و کریمیان (۷) گزارش کردند که در هر دو بافت لوم شنی و لومرسی مورد مطالعه آنان پس از گذشت ۱۶ هفته شکل محلول + تبدلی که شکل های با قابلیت دسترسی زیستی بالای کادمیم هستند به طور معنی داری کاهش یافت و غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن و منگنز که شکل های با حلالیت کمتر کادمیم هستند با گذشت زمان افزایش یافت. همچنین به عقیده آنان بالاتر بودن میزان شکل های محلول + تبدلی و کربناتی در بافت لوم شنی بیانگر قابلیت استفاده بیشتر کادمیم در بافت های سبک تر است. بررسی تأثیر ویژگی های خاک بر کادمیم قابل جذب خاک در ایران نشان داده است که مؤثرترین عامل کنترل کننده حلالیت کادمیم در خاک pH است. همچنین، شوری و غلظت کلر بر حلالیت کادمیم در خاک در مقیاس وسیع مؤثر بوده ولی مقدار رس تأثیری نداشته است (۱۳). اسفندبد و همکاران (۱۸) در ارزیابی اثر خصوصیات خاک بر جذب کادمیم در خاک های شمال ایران مشاهده کردند که pH، CCE و CEC ویژگی های اصلی مؤثر بر نگهداشت کادمیم در خاک های مورد مطالعه آنان هستند. گری و همکاران (۲۰) و کرکهام (۲۶) دریافتند که pH و ماده آلی خاک مهم ترین عوامل کنترل کننده جذب و واجذب (فراهمی) کادمیم در خاک می باشند. مک براید (۳۳) عنوان کرد که اثر ویژگی های خاک از جمله pH بالای خاک، مقدار زیاد رس و خاصیت بافری کربنات کلسیم شرایط مناسبی جهت رسوب و جذب اختصاصی فلزات را فراهم کرده و سبب کاهش قابلیت جذب آنها می گردد. از آنجا که تغییرات قابلیت استفاده

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه های خاک مورد آزمایش

شماره خاک	سری خاک	شن	سیلت	رس (%)	OC	CCE	EC(dS/m)	pH	CEC (cmol ⁺ /kg)
۱	ده نو ۲	۱۹/۷	۴۳/۳	۳۷/۰۴	۲/۴۹	۲۸/۱	۰/۲۱۵	۷/۸۷	۲۶/۶
۲	چنارستان ۲	۱۷/۷	۴۱/۳	۴۱/۰۴	۱/۵۴	۳۴/۴	۰/۱۸۷	۷/۸۷	۲۲/۸
۳	ده نو ۱	۲۵/۷	۳۷/۳	۳۷/۰۴	۱/۹۸	۳۰/۸	۰/۱۹۷	۷/۸۶	۲۳/۹
۴	گنجه ای بزرگ	۱۹/۷	۳۵/۳	۴۵/۰۴	۱/۰۵	۲۵/۶	۰/۱۹۶	۷/۹۰	۲۳/۴
۵	فیروزآباد	۱۹/۷	۴۱/۳	۳۹/۰۴	۲/۰۵	۲۰/۰	۰/۲۰۰	۷/۸۸	۲۸/۳
۶	چنارستان ۱	۲۷/۷	۳۷/۳	۳۵/۰۴	۱/۴۸	۳۱/۴	۰/۲۰۲	۷/۸۷	۲۴/۵
۷	محمودآباد ۲	۳۷/۷	۳۱/۳	۳۱/۰۴	۱/۷۴	۶۳/۴	۰/۲۵۶	۷/۹۷	۲۱/۲
۸	سرآب تاوه	۲۳/۷	۳۳/۳	۴۳/۰۴	۱/۴۶	۲۴/۰	۰/۱۷۲	۷/۸۱	۲۸/۳
۹	سروک	۳۳/۷	۳۳/۳	۳۳/۰۴	۱/۱۳	۵۵/۰	۰/۲۲۴	۷/۹۶	۲۰/۱
۱۰	محمودآباد ۱	۴۹/۷	۲۷/۳	۲۳/۰۴	۱/۷۴	۶۶/۳	۰/۲۱۲	۷/۸۸	۱۸/۵
۱۱	خاک ۱۳	۲۲/۶	۴۲/۷	۳۴/۷۲	۱/۲۸	۲۱/۰	۰/۱۶۴	۸/۰۴	۲۴/۵
۱۲	مختارآباد	۳۵/۷	۳۳/۳	۳۱/۰۴	۱/۴۴	۳۱/۰	۰/۱۸۷	۷/۸۹	۲۲/۸
۱۳	چم خانی	۲۳/۷	۳۹/۳	۳۷/۰۴	۲/۴۷	۴۳/۴	۰/۱۹۵	۷/۹۲	۲۳/۴

CCE: کربنات کلسیم معادل؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ EC: قابلیت هدایت الکتریکی؛ OC: کربن آلی

اکسیداسیون مرطوب (۳۵)، pH گل اشباع به وسیله الکتروود شیشه‌ای و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع به وسیله هدایت سنج اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

به منظور بررسی تغییرات فراهمی کادمیم در طول زمان، آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی دو عاملی با ۱۳ نمونه خاک و دو سطح کادمیم (۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) با دو تکرار انجام شد. سطوح کادمیم به صورت نمک نیترات کادمیم به ۲۰۰ گرم از نمونه خاک‌ها افزوده شد و پس از رسیدن رطوبت به حد مناسب نمونه‌ها به خوبی مخلوط شده و به ظروف پلاستیکی درب دار مناسب که دارای منافذ کافی برای برقراری تهویه بودند انتقال یافت. نمونه‌ها در دمای آزمایشگاه و رطوبت ۲۰ درصد وزنی خوابانده شدند. رطوبت نمونه‌ها به روش توزین هر ۵ روز یک بار تنظیم گردید. در زمان‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز از نمونه‌های مرطوب حدود ۱۰ گرم برداشته شد و مقدار کادمیم قابل استفاده آن به روش DTPA (۲۸) عصاره‌گیری شد. غلظت کادمیم عصاره‌ها

کادمیم در طول زمان و اثر خصوصیات مختلف خاک بر فراهمی این عنصر در خاک‌های شدیداً آهکی ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است این پژوهش به منظور بررسی روند تغییرات کادمیم قابل جذب در طول زمان و ارتباط آن با خصوصیات خاک انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق بر روی ۱۳ نمونه خاک آهکی با خصوصیات مختلف فیزیکی شیمیایی از افق سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر) از اطراف شهر یاسوج انجام شد. مقدار کافی از خاک‌های مورد مطالعه جمع‌آوری شد و پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری به آزمایشگاه منتقل شد. خصوصیات شیمیایی خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۹)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش جانشین کاتیون‌ها با استات آمونیوم (۱۴)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی‌سازی با هیدروکلریدریک اسید (۲۹)، ماده آلی (OM) به روش

جدول ۲. شکل خطی معادلات سینتیکی استفاده شده

شماره	نام معادله	شکل خطی معادله	توضیحات و اختصارات
۱	مرتبه صفر	$q_t = q_0 - k_1 t$	در این معادلات q_t و q_0 به ترتیب میزان کادمیم قابل جذب (mg/kg) در زمان مشخص و زمان صفر است.
۲	مرتبه اول	$\ln q_t = \ln q_0 - k_1 t$	
۳	الووچ ساده	$q_t = 1/\beta_s \ln \alpha_s \beta_s + 1/\beta_s \ln t$	t : زمان بر حسب day
۴	تابع نمایی	$\ln q_t = \ln a + b \ln t$	k_1 : آهنگ معادله مرتبه اول (day^{-1}) α_s : آهنگ اولیه تثبیت کادمیم ($\text{mg Cd kg}^{-1} \text{day}^{-1}$) β_s : ثابت معادله الووچ ساده (mg Cd kg^{-1}) ⁻¹
۵	پخشیدگی پارابولیک	$q_t = q_0 + k_p t^{1/5}$	a : آهنگ تابع نمایی ^b ($\text{mg Cd kg}^{-1} \text{day}^{-1}$) b : ثابت تابع نمایی k_p : آهنگ تابع پخشیدگی (mg Cd kg^{-1}) ^{1/5}

تیمار ۲۵ میلی گرم در کیلوگرم رسید و در سایر زمان‌ها نیز همین روند مشاهده گردید.

با گذشت زمان میزان کادمیم قابل عصاره‌گیری در تمامی نمونه‌ها و در هر دو سطح کادمیم کاهش یافت. پس از ۵ روز خوابانیدن به‌طور میانگین در سطوح ۱۲/۵ و ۲۵ میلی گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، به ترتیب ۸/۰۱ و ۱۵/۱ میلی گرم بر کیلوگرم (۶۴ و ۶۰ درصد) از کادمیم اضافه شده به خاک به شکل قابل جذب بازیابی شد. با گذشت زمان مقدار کادمیم کمتری عصاره‌گیری شد و این مقادیر در روز ۱۰ به ترتیب به ۶/۷۰ و ۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم کاهش یافت، روند کاهشی در سایر زمان‌ها نیز ادامه یافت، اما همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از ۱۰ روز مقادیر کادمیم بازیابی شده تغییرات چندانی نداشت و با شیب ملایم‌تری کاهش یافت. به طوری که در سطح ۱۲/۵ میلی گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک در زمان‌های ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز به‌طور میانگین به ترتیب ۶/۴۱، ۶/۳۴، ۶/۲۱ و ۵/۸۸ میلی گرم بر کیلوگرم از کادمیم اضافه شده به خاک به شکل قابل جذب بازیابی شد، که نشان می‌دهد در آغاز خوابانیدن و تا زمان ۱۰ روز، کادمیم با سرعت بالایی در خاک تثبیت شده و قابلیت جذب آن کاهش می‌یابد، اما با گذشت زمان از سرعت تثبیت کادمیم کاسته شده است، در سطح ۲۵

با دستگاه جذب اتمی هیتاچی مدل ZCAST 2300 اندازه‌گیری شد. هم‌زمان رطوبت وزنی نمونه‌ها با خشک نمودن جرم مشخصی (۵ گرم) از نمونه در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد. تمام محاسبات براساس رطوبت جرمی نمونه‌ها تصحیح شد.

مطالعات آماری شامل ضرایب همبستگی خطی و رگرسیون چند متغیره با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. همچنین نتایج به دست آمده از عصاره‌گیری کادمیم قابل جذب به روش DTPA با معادلات مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی و معادله الووچ ساده برای بررسی سینتیک تغییرات قابلیت جذب کادمیم برآزش داده شد جدول (۲) و ضرایب مربوطه توسط نرم‌افزار Excel محاسبه شد.

بحث و نتایج

اثر زمان و خصوصیات خاک بر قابلیت جذب کادمیم با افزایش غلظت کادمیم از ۱۲/۵ به ۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم در خاک میزان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA افزایش یافت (جدول ۳). در زمان ۵ روز به‌طور میانگین غلظت کادمیم قابل عصاره‌گیری از ۸/۰۱ میلی گرم در کیلوگرم در تیمار ۱۲/۵ میلی گرم در کیلوگرم خاک به ۱۵/۰۵ میلی گرم در کیلوگرم در

جدول ۳. مقدار کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA در طول زمان در خاک‌های تیمار شده با دو سطح ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک

کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)						منطقه	شماره خاک
روز ۹۰	روز ۶۰	روز ۳۰	روز ۲۰	روز ۱۰	روز ۵		
۱۲/۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک							
۶/۴۴	۶/۷۲	۷/۳۱	۶/۸۹	۷/۴۴	۸/۸۹	ده نو کشاورزی	۱
۵/۸۶	۶/۳۶	۶/۵۲	۶/۷۶	۷/۲۰	۹/۲۰	چنارستان کشاورزی	۲
۶/۴۴	۶/۵۳	۶/۶۶	۶/۶۳	۸/۸۶	۹/۳۰	ده نو بایر	۳
۶/۲۳	۶/۵۸	۶/۴۰	۶/۴۴	۶/۶۹	۷/۶۸	گنجه ای بزرگ	۴
۵/۸۳	۶/۴۷	۶/۱۳	۶/۸۲	۷/۴۳	۸/۰۲	فیروزآباد	۵
۶/۲۲	۶/۲۱	۶/۲۴	۵/۸۸	۶/۶۰	۷/۷۹	چنارستان بایر	۶
۵/۲۷	۵/۷۷	۶/۲۵	۶/۱۱	۵/۲۹	۶/۸۳	محمودآباد کشاورزی	۷
۶/۱۴	۶/۰۹	۶/۷۳	۷/۰۵	۶/۸۸	۸/۴۲	سرآب تاوه	۸
۵/۱۴	۵/۹۱	۵/۹۱	۵/۷۹	۶/۲۱	۷/۰۱	سروک	۹
۵/۱۵	۵/۶۲	۵/۵۶	۵/۵۸	۵/۵۹	۷/۱۲	محمودآباد بایر	۱۰
۵/۸۰	۵/۹۷	۶/۱۱	۶/۳۲	۶/۲۹	۸/۲۰	خاک ۱۳	۱۱
۵/۹۹	۶/۳۲	۶/۳۳	۶/۷۳	۶/۵۴	۷/۳۹	مختارآباد	۱۲
۵/۹۰	۶/۱۳	۶/۲۹	۶/۳۱	۶/۱۰	۸/۳۴	چم‌خانی	۱۳
۵/۱۴-۶/۴۴	۵/۶۲-۶/۷۲	۵/۵۶-۷/۳۱	۵/۵۸-۷/۰۵	۵/۲۹-۸/۸۶	۶/۸۳-۹/۳۰	محدوده	
۰/۴۳۰±۵/۸۸	۰/۳۱۸±۶/۲۱	۰/۴۰۶±۶/۳۴	۰/۴۴۲±۶/۴۱	۰/۸۷۹±۶/۷۰	۰/۷۷۹±۸/۰۱	میانگین ± انحراف معیار	
۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک							
۱۲/۶	۱۳/۱	۱۳/۰	۱۳/۷	۱۵/۴	۱۷/۰	ده نو کشاورزی	۱
۱۱/۳	۱۲/۱	۱۲/۵	۱۲/۶	۱۳/۵	۱۶/۱	چنارستان کشاورزی	۲
۱۲/۹	۱۲/۸	۱۲/۴	۱۴/۹	۱۵/۶	۱۶/۵	ده نو بایر	۳
۱۰/۹	۱۱/۹	۱۱/۹	۱۲/۸	۱۲/۱	۱۶/۰	گنجه ای بزرگ	۴
۱۰/۵	۱۲/۶	۱۲/۷	۱۲/۹	۱۳/۸	۱۶/۳	فیروزآباد	۵
۱۰/۴	۱۱/۷	۱۲/۱	۱۱/۷	۱۳/۰	۱۵/۳	چنارستان بایر	۶
۹/۲۱	۹/۹۴	۱۰/۰	۱۰/۱	۱۰/۶	۱۳/۵	محمودآباد کشاورزی	۷
۱۰/۵	۱۲/۴	۱۲/۳	۱۲/۵	۱۲/۰	۱۵/۳	سرآب تاوه	۸
۹/۰۵	۱۰/۱	۱۰/۵	۱۰/۲	۱۰/۷	۱۲/۹	سروک	۹
۸/۹۹	۱۰/۲	۱۰/۱	۱۰/۰	۱۱/۰	۱۳/۳	محمودآباد بایر	۱۰
۹/۹۴	۱۱/۵	۱۲/۳	۱۱/۳	۱۳/۳	۱۳/۹	خاک ۱۳	۱۱
۱۰/۷	۱۲/۳	۱۲/۵	۱۲/۰	۱۲/۶	۱۴/۸	مختارآباد	۱۲
۱۰/۸	۱۱/۵	۱۲/۰	۱۲/۲	۱۳/۷	۱۴/۶	چم‌خانی	۱۳
۹-۱۲/۹	۹/۹-۱۳/۱	۱۰-۱۳	۱۰-۱۴/۹	۱۰/۶-۱۵/۶	۱۲/۹-۱۷	محدوده	
۱/۱۵±۱۰/۶	۰/۹۳±۱۱/۸	۰/۹۵۹±۱۱/۹	۱/۳۹±۱۲/۱	۱/۵۰±۱۳	۱/۲۹±۱۵/۱	میانگین ± انحراف معیار	

گذشت زمان این فلزات را از شکل‌های محلول به شکل‌هایی با انحلال پذیری کمتر تبدیل می‌کنند. آنان عقیده دارند که در مورد نقش زمان بر قابلیت دسترسی و رفتار فلزات سنگین در خاک باید با توجه به ظرفیت اجزای مختلف خاک نظر داده شود.

ضرایب همبستگی میان میزان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA با خصوصیات خاک جدول (۴) نشان داد که در زمان‌های مختلف خصوصیات کنترل کننده فراهمی کادمیم در خاک‌های مورد مطالعه متفاوت بودند. در تمامی زمان‌های مورد مطالعه و در هر دو سطح کادمیم، میان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA و میزان کربنات کلسیم معادل (CCE) همبستگی منفی معنی‌داری وجود داشت که بیانگر کاهش قابلیت دسترسی فلز با افزایش مقدار کربنات کلسیم خاک است، همچنین این خصوصیت در سطح ۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک وارد رگرسون چند متغیره شد و در تمام زمان‌ها ارتباط منفی معنی‌داری میان میزان کربنات کلسیم معادل و کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA مشاهده شد (جدول ۵). همبستگی منفی قابلیت جذب روی و کربنات کلسیم معادل خاک توسط دیگر پژوهشگران نیز گزارش شده است (۲۲ و ۶). از سوی دیگر کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA پس از ۵، ۳۰ و ۶۰ روز خوابانیدن بیشترین همبستگی را در سطح ۱۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم با شن ($P < 0/01$) داشت، که نشان می‌دهد با افزایش مقدار شن خاک مقدار کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA کاهش می‌یابد. این ارتباط میان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA با شن و کربنات کلسیم معادل می‌تواند نتیجه ارتباط قوی کربنات کلسیم معادل و شن باشد. همبستگی کربنات کلسیم معادل و شن در تحقیق حاضر ($R^2 = 0/80$) با ($P < 0/01$) بود که نشان می‌دهد این دو خصوصیت خاک ارتباط مستقیمی با یکدیگر دارند. سینگ و نایار (۴۱) گزارش کردند که مقدار کربنات کلسیم خاک‌ها، یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده جذب سطحی فلز می‌باشد. کلسیت پیوند قوی و محکمی با یون‌های فلزات سنگین ایجاد می‌کند. آنها عقیده دارند که

میلی‌گرم بر کیلوگرم نیز اتفاق مشابه‌ای رخ داد. این داده‌ها به‌صورت واضح کاهش شیب تثبیت کادمیم را در زمان‌های پس از ۱۰ روز نشان می‌دهد. پس از ۹۰ روز در تیمارهای ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، همچنان به‌صورت میانگین ۴۷ و ۴۲/۴ درصد از کادمیم به شکل قابل عصاره‌گیری با DTPA وجود داشت که نشان می‌دهد حتی با گذشت ۳ ماه از آغاز خوابانیدن هنوز قابلیت جذب کادمیم در خاک بسیار بالا است و زمان زیادی برای تثبیت این فلز در خاک لازم است. لو و همکاران (۳۰) در آزمایشی با افزودن فلزات سنگین مس، روی، سرب و کادمیم از منبع نمک نیترات این فلزات به چند خاک مختلف، تغییر شکل‌های این عناصر را با روش عصاره‌گیری متوالی در خاک بررسی کردند. نتایج نشان داد که پس از سه ساعت از شروع خوابانیدن در هر سه خاک مورد مطالعه شکل تبدلی فلزات غالب بود و افزایش در دیگر شکل‌ها (کربناتی، آلی و متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم) به‌جز شکل باقی‌مانده قابل مشاهده بود. از ۳ ساعت تا ۸ هفته از زمان خوابانیدن شکل تبدلی فلزات کاهش یافت و شکل‌های متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم و آلی فلزات افزایش یافت، اما در مورد کادمیم کاهش معنی‌داری در شکل تبدلی مشاهده نشد که نشان می‌دهد بخش اعظمی از کادمیم اضافه شده به خاک به شکل متحرک باقی می‌ماند و زمان زیادی لازم است تا کادمیم در خاک تثبیت شود. میسرا و همکاران (۳۴) در مطالعه اثر زمان بر قابلیت عصاره‌گیری شش فلز روی، مس، نیکل، کادمیم، سرب و کروم تحت شرایط غرقابی و در چهار خاک مختلف، با افزودن ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از این فلزات به خاک و عصاره‌گیری آنها با DTPA طی یک دوره خواباندن ۱۲۰ روزه، مشاهده کردند که گرچه قابلیت عصاره‌گیری فلزات به ماهیت فلز و ویژگی‌های خاک بستگی داشت اما با افزایش زمان خواباندن از مقدار فلزات قابل عصاره‌گیری کاسته شد.

روانبخش و همکاران (۹) گزارش کردند که در شرایط آهکی خاک‌های مورد مطالعه آنها فاز جامد و کربنات کلسیم در جذب و تثبیت فلزات سنگین نقش اصلی را بازی می‌کنند و با

جدول ۴. ضرایب همبستگی میان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA در دو سطح ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک با خصوصیات خاک

CEC (cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	pH	EC(dS/m)	CCE		رس (%)	سیلت	شن	زمان‌های عصاره‌گیری کادمیم با DTPA
			OC	OC				
۱۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم								
۰/۵۵۱ ^{ns}	-۰/۴ ^{ns}	-۰/۵۱۶ ^{ns}	-۰/۶۰۲*	۰/۴۵۱ ^{ns}	۰/۵۷۰*	۰/۷۰۳**	-۰/۷۲۱**	۵ روز
۰/۵۵ ^{ns}	-۰/۵۰۲ ^{ns}	-۰/۳۵۵ ^{ns}	-۰/۶۴۰*	۰/۲۵۳ ^{ns}	۰/۵۱۵ ^{ns}	۰/۵۱۳ ^{ns}	-۰/۵۸۷*	۱۰ روز
۰/۷۸۷**	-۰/۴۳۹ ^{ns}	-۰/۴۵۵ ^{ns}	-۰/۷۳۵**	۰/۲۶۱ ^{ns}	۰/۶۷۷*	۰/۵۱۷ ^{ns}	-۰/۶۸۹**	۲۰ روز
۰/۶۲۸*	-۰/۴۱۷ ^{ns}	-۰/۱۳۴ ^{ns}	-۰/۵۳۱ ^{ns}	۰/۳۹۲ ^{ns}	۰/۵۸۶*	۰/۵۱۸ ^{ns}	-۰/۶۳۴*	۳۰ روز
۰/۶۰۹*	-۰/۴۲۸ ^{ns}	-۰/۲۶۴ ^{ns}	-۰/۷۳۳**	۰/۲۶۷ ^{ns}	۰/۶۷۰*	۰/۶۳۴*	-۰/۷۴۷**	۶۰ روز
۰/۶۹۲**	-۰/۴۹۱ ^{ns}	-۰/۴۷۸ ^{ns}	-۰/۷۹۴**	۰/۲۴۷ ^{ns}	۰/۶۴۱*	۰/۵۵۱ ^{ns}	-۰/۶۸۵**	۹۰ روز
۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم								
۰/۷۰۱**	-۰/۶۰۳*	-۰/۲۹۷ ^{ns}	-۰/۷۲۲**	۰/۳۷۱ ^{ns}	۰/۶۷۹*	۰/۶۰۶*	-۰/۷۳۷**	۵ روز
۰/۶۱۱*	-۰/۳۱۸ ^{ns}	-۰/۴۱۵ ^{ns}	-۰/۶۹۲**	۰/۵۴۴ ^{ns}	۰/۴۶۸ ^{ns}	۰/۷۶۶**	-۰/۶۹۰**	۱۰ روز
۰/۶۴۶*	-۰/۵۲۸ ^{ns}	-۰/۳۹۸ ^{ns}	-۰/۷۱۷**	۰/۳۸۷ ^{ns}	۰/۶۴۱*	۰/۵۷۵*	-۰/۶۹۸**	۲۰ روز
۰/۷۹۰**	-۰/۳۶۶ ^{ns}	-۰/۶۶۳*	-۰/۹۰۹**	۰/۲۸ ^{ns}	۰/۶۱۹*	۰/۷۷۷**	-۰/۷۹۰**	۳۰ روز
۰/۷۸۱**	-۰/۵۳۳ ^{ns}	-۰/۵۳ ^{ns}	-۰/۸۵۱**	۰/۲۹۷ ^{ns}	۰/۶۳۹*	۰/۶۵۴*	-۰/۷۳۷**	۶۰ روز
۰/۵۱ ^{ns}	-۰/۴۶۷ ^{ns}	-۰/۲۸۴ ^{ns}	-۰/۵۸۷*	۰/۴۷۶ ^{ns}	۰/۵۱۱ ^{ns}	۰/۵۸۹*	-۰/۶۲۵*	۹۰ روز

*، ** : به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد و ns: غیر معنی‌دار

جدول ۵. معادلات رگرسیون چند متغیره میان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA در سطح ۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم

در زمان‌های مختلف و برخی خصوصیات خاک

DTPA-Cd _(۵روز) = ۱۷/۹۶۶ - ۰/۱۰۶ sand	R ^۲ = ۰/۵۴*
DTPA-Cd _(۱۰روز) = ۱۰۹/۷۸۱ - ۰/۰۹۶ sand - ۱۱/۶۵۵ pH	R ^۲ = ۰/۸۰**
DTPA-Cd _(۲۰روز) = ۳/۹۳۷ + ۰/۲۴۶ silt	R ^۲ = ۰/۵۹**
DTPA-Cd _(۳۰روز) = ۸۸/۳۹۰ + ۰/۲۶۰ silt - ۱۰/۷۵۴ pH	R ^۲ = ۰/۷۵**
DTPA-Cd _(۴۰روز) = ۱۴/۴۷۲ - ۰/۰۶۶ CCE	R ^۲ = ۰/۵۱**
DTPA-Cd _(۲۰روز) = ۱۲/۳۶۸ - ۰/۰۶۷ CCE + ۱/۲۷۳ OC	R ^۲ = ۰/۶۸*
DTPA-Cd _(۳۰روز) = ۱۳/۹۸۶ - ۰/۰۵۸ CCE	R ^۲ = ۰/۸۳**
DTPA-Cd _(۳۰روز) = ۱۲/۹۸۶ - ۰/۰۵۸ CCE + ۰/۶۵۸ OC	R ^۲ = ۰/۹۲**
DTPA-Cd _(۶۰روز) = ۱۳/۶۶۸ - ۰/۰۵۲ CCE	R ^۲ = ۰/۷۲**
DTPA-Cd _(۶۰روز) = ۵۹/۳۵۴ - ۰/۰۴۷ CCE - ۵/۸۰۵ pH	R ^۲ = ۰/۸۴**
DTPA-Cd _(۶۰روز) = ۶۹/۳۹۵ - ۰/۰۳۱ CCE - ۷/۵ pH + ۰/۰۷۲ silt	R ^۲ = ۰/۹۰**

*، ** : به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

در pH > 7/8 احتمال تشکیل رسوب پایدار اکتاویت وجود دارد. مقدار بیشتری کادمیم و با نیروی جذب بیشتر، نسبت به خاک‌هایی که مقادیر پایین‌تر کربنات کلسیم معادل دارند، در

واقع با افزایش کربنات کلسیم از میزان قابل دسترس این فلزات کاسته می‌شود.

پس از ۲۰ روز در سطح ۱۲/۵ میلی گرم کادمیم بر کیلوگرم همبستگی مثبت معنی داری میان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) قابل مشاهده بود، در واقع با افزایش CEC ظرفیت خاک برای نگهداری کادمیم کاهش یافت. درحالی‌که با توجه به این مطلب که در CEC‌های بالاتر مکان‌های تبدلی روی مینرال‌های خاک برای نگهداری کادمیم بیشتر است، این انتظار وجود داشت که با افزایش CEC میزان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA (به اصطلاح قابلیت دسترسی کادمیم) کاهش یابد. رجایی و همکاران (۳۷) مشاهده کردند که از کادمیم اضافه شده به خاک ۸۲ درصد آن در خاک لومرسی و ۸۸ درصد در خاک لوم شنی به سه شکل کادمیم تبدلی، کربناتی و آلی تبدیل شد که بیانگر قابلیت دسترسی بالای کادمیم در هر دو بافت سبک و سنگین است. به عقیده آنان حضور غلظت‌های بالاتر کادمیم در دو شکل تبدلی و کربناتی در خاک لوم‌شنی بیانگر قابلیت استفاده بالاتر کادمیم در خاک‌های سبک بافت‌تر است. قابلیت دسترسی پایین‌تر در خاک لومرسی به دلیل CEC بالاتر آن نسبت به خاک لوم‌شنی است. ما و اورن (۳۱) در مطالعه خود مشاهده کردند که جذب سرب و کادمیم وابسته به pH است. همچنین آنها عنوان کردند که Cd(II) کاتیونی با پوسته بسته است (مدار ظرفیت آن کامل است -d⁺) بنابراین در واکنش‌های کمپلکس درون‌کرولی شرکت نکرده و با به اشتراک گذاشتن الکترون در واکنش‌ها شرکت می‌کند. بنابراین جذب کادمیم باید بیش از جذب سرب با افزایش CEC (ظرفیت تبادل کاتیونی) افزایش یابد. درحالی‌که کبیریا و همکاران (۲۴) پویایی عناصر کادمیم و سرب را در برخی خاک‌های بنگلادش بررسی کردند و مشاهده کردند که بین میزان رس و کادمیم و سرب کل و قابل عصاره‌گیری با استات آمونیوم یک نرمال و اسیدکلریدریک ۰/۱ نرمال ارتباط معنی داری وجود ندارد. اما بین کادمیم کل و قابل عصاره‌گیری با عصاره‌گیرهای مورد آزمایش و pH خاک ارتباط معکوسی

خود حفظ و نگهداری کنند. اسفند بد (۱) به نقل از مفتون (۳۲) و رام‌چاندان و سوزا (۳۸) عنوان کرد که رسوب اکتاویت (CdCO₃) بر روی کربنات‌ها در خاک‌هایی با pH بالا و یا آهکی و قلیایی، می‌تواند توجیه مناسبی در مورد افزایش جذب کادمیم به‌وسیله این خاک‌ها باشد. روانبخش و همکاران (۹) در بررسی اثر بافت بر فراهمی نیکل و کادمیم مشاهده کردند در همه زمان‌ها در خاک لوم‌شنی غلظت نیکل نسبت به خاک رسی بیشتر بود (P<۰/۰۵). به عقیده آنان افزایش کربن آلی محلول بر واکنش‌های شیمیایی کادمیم و نیکل در سیستم خاک اثر می‌گذارد و این به دلیل آن است که ترکیبات فلز ماده آلی در انحلال‌پذیری فلزات نقش کلیدی بازی می‌کنند و این اثر در خاک لوم‌شنی (جایی که فاز جامد اهمیت کمتری دارد و برای جذب فلزات به نسبت بافت رسی رقابت کمتری می‌کند) واضح‌تر است. در مورد کادمیم روند عکس مشاهده شد به این ترتیب که در تمام زمان‌ها مقدار کادمیم در خاک رسی بیشتر از خاک لوم‌شنی بود. آنان تفاوت رفتار این دو عنصر را به غلظت پایین کادمیم در محلول خاک نسبت دادند. به این معنی که در غلظت‌های کم کادمیم، کربن آلی محلول شانس برای رقابت با فاز جامد را ندارد. به عقیده آنان در مورد نتایج کادمیم به نظر می‌رسد که سطوح کادمیم پایین بوده (صفر و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و احتمالاً در صورت استفاده از غلظت‌های بالاتر، اثر بافت و ماده آلی به‌صورت واضح‌تری مشاهده می‌شد.

رجایی و همکاران (۳۷) عنوان کردند از آنجا که در مطالعه آنان بخش عمده کادمیم بلافاصله پس از افزودن فلز به خاک به شکل کربناتی درآمد، احتمالاً کربنات کلسیم نقش اصلی را در نگهداری کادمیم در خاک‌های آهکی مورد مطالعه آنان دارد. روانبخش و همکاران (۹) در بررسی تأثیر لجن فاضلاب و زمان بر فراهمی و توزیع گونه‌های نیکل و کادمیم در محلول خاک‌های آهکی با دو خاک متفاوت به لحاظ درصد کربنات کلسیم مشاهده کردند که در خاک دارای کربنات کلسیم ۴ درصد افزایش معنی داری در کادمیم و نیکل قابل دسترس در مقایسه با خاک دارای ۳۲ درصد کربنات کلسیم وجود دارد. در

وجود دارد. همچنین آنان ارتباط مثبت قوی بین میزان کادمیم و سرب عصاره‌گیری شده با CEC و کربن آلی را گزارش کردند. در سطح ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم نیز نتایج مشابهی به دست آمد (جدول ۴). بررسی رگرسیون چند متغیره میان خصوصیات خاک و میزان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA در سطح ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، نشان داد که در زمان ۵ روز میان میزان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA و میزان شن و pH همبستگی منفی معنی‌داری وجود داشت (جدول ۵). که بیانگر این مطلب است که با افزایش مقدار شن و pH مقدار کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA کاهش می‌یابد. کبیریا و همکاران (۲۴) مشاهده کردند بین کادمیم کل و قابل عصاره‌گیری با استات آمونیوم یک نرمال و اسیدکلریدریک ۰/۱ نرمال و pH خاک ارتباط معکوسی وجود دارد. اسمیت (۴۲) گزارش کرد که رسوب عناصر به صورت هیدروکسیدها و کربنات‌های نامحلول و کمپلکس‌های آلی، با افزایش pH خاک افزایش می‌یابد. بنابراین، قابلیت دسترسی فلزات سنگین خاک برای گیاهان در pH کم نسبت به pH زیاد بیشتر است. ونگ و همکاران (۴۵) گزارش نمودند که به ازاء هر واحد افزایش pH، از غلظت فلزات سنگینی چون Zn، Ni و Cd در محلول خاک دو واحد کاسته می‌شود. رابرتسون و همکاران (۴۰) علت نشت فلزات در خاک را این گونه بیان کردند که در اثر کاهش pH یون‌های H^+ تولید می‌شود که این یون‌ها با مکان‌های جذب تبادل یون ناشی از رس رقابت می‌کنند که باعث می‌شود فلزات در خاک جذب نشده و در نتیجه نشت یابند. روانبخش و همکاران (۹) به این نتیجه رسیدند که در مورد کادمیم برخلاف نیکل در تمام زمان‌ها مقدار کادمیم در خاک رسی بیشتر از خاک لوم‌شنی بود. به عقیده آنان علت این اختلاف ناشی از غلظت پایین کادمیم در محلول خاک است و احتمالاً در صورت کاربرد مقادیر بیشتر کادمیم (میزان کادمیم در این آزمایش دو سطح صفر و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است) اثر بافت و ماده آلی به صورت واضح‌تری مشاهده می‌شد. در هیچ یک از تیمارهای کادمیم همبستگی معنی‌داری میان

کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA و کربن آلی مشاهده نشد (جدول ۴). اما این خصوصیت در تیمار ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وارد رگرسیون چند متغیره شد و همان‌طور که ملاحظه می‌شود در زمان‌های ۲۰ و ۳۰ روز این خصوصیت همراه با CCE وارد رگرسیون چند متغیره شد و میان میزان کادمیم قابل جذب خاک و کربن آلی ارتباط مستقیم و با CCE ارتباط منفی معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۵). جعفرنژادی و همکاران (۳) اثر ویژگی‌های خاک بر وضعیت غلظت کادمیم در خاک و بذر گندم را مورد ارزیابی قرار دادند و گزارش کردند که ظرفیت تبادل کاتیونی ($R^2=0/77^{**}$) و کربن آلی ($R^2=0/66^{**}$) همبستگی بسیار معنی‌داری ($P<0/01$) و مقدار کادمیم قابل جذب خاک ($R^2=0/57^{**}$) همبستگی معنی‌دار ($P<0/05$) با غلظت کادمیم در بذر گندم داشتند. این موضوع، اهمیت و نقش مواد آلی خاک را بر غلظت و حلالیت کادمیم در خاک نشان می‌دهد. ترکیب کربن آلی با عنصر کادمیم باعث ایجاد ترکیبات محلولی در خاک می‌شود که حتی در مقادیر بالای pH خاک نیز این ترکیبات به صورت محلول وجود دارند (۱۵). بنابراین اگرچه به‌طور کلی میزان کربن آلی خاک‌ها در این مطالعه کم می‌باشد ولی به نظر می‌رسد بر حلالیت کادمیم در خاک اثر دارد. کرکهام (۲۶) گزارش کرد که pH و مواد آلی خاک مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده فراهمی کادمیم می‌باشند. خوشگفتارمنش و همکاران (۵) عنوان کردند با وجود اینکه pH مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده غلظت کادمیم در خاک می‌باشد ولی نتایج بررسی‌های متعدد نشان داده است که نقش شوری در افزایش حلالیت کادمیم، می‌تواند مهم‌تر از pH باشد. ثابت شده است که افزایش شوری، فراهمی فلزات سنگین و جذب آنها توسط محصولات را افزایش می‌دهد (۴۶). درحالی‌که در خاک‌های مورد مطالعه در این آزمایش همبستگی معنی‌داری میان EC و میزان کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA وجود نداشت که این امر می‌تواند به دلیل EC کم (میانگین ۰/۲ دسی‌زیمنس بر متر) این خاک‌ها و نیز محدوده کم تغییرات EC این خاک‌ها باشد.

تثبیت کادمیم جدول (۷) و نتایج بررسی همبستگی میان ضرایب مناسب‌ترین معادلات سینتیکی توصیف‌کننده تثبیت کادمیم با خصوصیات خاک جدول (۸) نشان داد که میان ضریب b معادله تابع نمایی با هیچ یک از خصوصیات خاک همبستگی معنی‌داری وجود نداشت، این ضریب بیانگر سرعت تثبیت کادمیم در خاک است. ضریب a (سرعت اولیه تثبیت کادمیم) این معادله با شن و کربنات کلسیم معادل همبستگی منفی و با کربن آلی همبستگی مثبت معنی‌داری را نشان داد.

اسفندی و همکاران (۱۸) نقش pH و CEC در حفظ و نگهداشت کادمیم در خاک‌های شمال ایران را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که داده‌های جذب سطحی کادمیم، برازش خوبی با معادلات لانگمویر، فرنلچ و ردلیچ-پترسون دارد. ضریب k_f معادله فرنلچ و ضریب b (حداکثر جذب سطحی فلزات) معادله لانگمویر وابسته به pH و CEC (ظرفیت تبادل کاتیونی) است. همچنین ضریب k_d (حداکثر ظرفیت بافری) فرنلچ همبستگی مثبت و معنی‌داری با pH ($R^2=0/52$ و $P \leq 0/001$) و کربنات کلسیم معادل (CEC) ($R^2=0/63$ و $P \leq 0/001$) دارد.

دلالت (۱۷) عنوان کرد اگر در مشتق معادله دو ثابت زمان به سمت صفر میل کند، حاصل مشتق برابر حاصل ضرب ab خواهد بود که حاصل ضرب ab و اجذب یک عنصر غذایی را در لحظات اولیه نشان می‌دهد. ضریب ab در جدول (۷) ارائه شده است. میان ضریب ab معادله دوثابت (مقدار کادمیم قابل عصاره‌گیری با $DTPA$ در زمان یک روز) و هیچ یک از خصوصیات خاک ارتباط معنی‌داری مشاهده نشد.

در مورد ضرایب معادله الوویچ همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود ثابت α_s که بیانگر مقدار کادمیم قابل جذب در حالت $\ln t=0$ (زمان یک روز) است با هیچ یک از خصوصیات خاک همبستگی نداشت ولی ضریب β_s (آهنگ کاهش قابلیت جذب کادمیم) به‌وسیله بافت خاک کنترل می‌شود به‌طوری که با افزایش مقدار شن این ضریب کاهش می‌یابد (جدول ۸)، مفتون و همکاران (۳۲) گزارش کردند ضرایب

خانمیرزایی و همکاران (۴) در بررسی رابطه بین شکل‌های شیمیایی کادمیم خاک و غلظت آن در دانه گندم در برخی از خاک‌های استان خوزستان مشاهده کردند که همبستگی مثبت و معنی‌داری میان مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی و کادمیم قابل عصاره‌گیری با $DTPA$ ($R^2=0/65$, $P < 0/01$)، در ۳۲ خاک مورد مطالعه قبل از آبیاری وجود دارد. این در حالی است که پس از شستشوی خاک‌ها با EC بیشتر از 10 dS m^{-1} و کاهش میانگین EC از $16/63$ به $1/52$ دسی‌زیمنس بر متر، همبستگی بین EC و کادمیم قابل عصاره‌گیری به‌میزان قابل توجهی کاهش یافت. این موضوع نشان‌دهنده آن است که همبستگی بین شوری و کادمیم قابل عصاره‌گیری با $DTPA$ در شوری‌های بالا می‌تواند خود را نشان دهد.

سینتیک تغییرات قابلیت جذب کادمیم

نتایج برازش داده‌های قابلیت جذب کادمیم در زمان‌های مورد نظر با معادلات سینتیکی نشان داد که مقادیر کادمیم عصاره‌گیری شده با $DTPA$ با معادلات تابع نمایی با میانگین ضریب تبیین $0/711$ و $0/818$ و خطای استاندارد $0/065$ و $0/057$ به‌ترتیب در غلظت‌های $12/5$ و 25 میلی‌گرم در گیلوگرم کادمیم و معادله الوویچ ساده شده با میانگین ضریب تبیین $0/701$ و $0/808$ و خطای استاندارد $0/461$ و $0/746$ به‌ترتیب در غلظت‌های $12/5$ و 25 میلی‌گرم در گیلوگرم کادمیم، برازش بهتری نسبت به سایر معادلات سینتیکی بررسی شده دارد. که به نظر می‌رسد معادله تابع نمایی با ضریب تبیین بالاتر و خطای استاندارد پایین‌تر برای توصیف تغییرات قابلیت جذب کادمیم مناسب‌تر است (جدول ۶). مفتون و همکاران (۳۲) جذب کادمیم را در ۲۰ خاک آهکی ایران با محدوده وسیعی از خصوصیات خاک بررسی کردند و گزارش کردند که معادلات لانگمویر و فرنلچ به خوبی می‌توانند رفتار جذب سطحی کادمیم را در این خاک‌ها توصیف کنند ولی معادله لانگمویر توصیف بهتری از شرایط منطقه ارائه می‌دهد. مقادیر ثابت‌های سرعت مدل‌های سینتیکی برتر در توصیف

جدول ۶ ضرایب تعیین و خطای استاندارد برآزش داده‌های تغییرات کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA از خاک‌های تیمار شده با دو سطح ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک با معادلات سیتیکی مختلف

مدل سیتیکی	۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک				۱۲/۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک			
	محدوده	میانگین ± انحراف معیار	محدوده	SE	محدوده	میانگین ± انحراف معیار	محدوده	R ^۲
مرتبه صفر	۰/۸۸۷-۱/۳۱۰	۱/۰۹۵±۰/۱۹۱	۰/۴۶۰-۰/۷۵۸	۰/۳۲۴-۱/۰۳۲	۰/۶۲۸±۰/۱۹۱	۰/۲۲۷-۰/۶۶۹	۰/۴۷۷±۰/۱۴۲	
مرتبه یک	۰/۵۵۷-۰/۱۰۵	۰/۰۸۲±۰/۰۱۲	۰/۵۰۴-۰/۷۸۶	۰/۰۴۷-۰/۱۳۱	۰/۰۸۹±۰/۰۲۳	۰/۲۲۱-۰/۶۸۹	۰/۵۰۱±۰/۱۵۴	
پخشیدگی پارابولیک	۰/۵۶۲-۱/۱۲۲	۰/۹۳۷±۰/۱۴۷	۰/۵۶۳-۰/۸۷۱	۰/۲۸۱-۰/۸۶۳	۰/۵۴۴±۰/۱۶۳	۰/۳۰۹-۰/۷۸۸	۰/۵۸۲±۰/۱۵۲	
تابع نمایی	۰/۰۲۲-۰/۰۷۵	۰/۰۵۷±۰/۰۱۴	۰/۶۵۴-۰/۹۶۸	۰/۰۳۴-۰/۰۹۵	۰/۰۶۵±۰/۰۱۹	۰/۲۹۳-۰/۸۸۳	۰/۷۱۱±۰/۱۶۴	
الوینج ساده	۰/۳۱۲-۰/۹۲۴	۰/۸۴۶±۰/۱۴۷	۰/۶۵۱-۰/۹۶۰	۰/۲۳۵-۰/۶۷۴	۰/۴۶۱±۰/۱۳۳	۰/۳۱۴-۰/۸۸۷	۰/۷۰۱±۰/۱۵۵	

جدول ۷. مقادیر ثابت‌های سرعت مدل‌های سینتیکی برتر در توصیف تثبیت کادمیم در خاک‌های مورد مطالعه

الوویج ساده		تابع نمایی			سری خاک	شماره خاک
$\alpha_s \times 10^4$	β_s	a	B	ab		
۱۲/۵ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک						
۱۱۷	-۱/۴۰	۲/۲۸	-۰/۰۹۰	-۰/۲۲۳	ده نو کشاورزی	۱
۳۴۷۰	-۱/۰۲	۲/۳۵	-۰/۱۳۲	-۰/۳۲۱	چنارستان کشاورزی	۲
۴۸۱۴	-۰/۹۳	۲/۴۳	-۰/۱۴۳	-۰/۳۴۰	ده نو بایر	۳
۰/۰۶۱	-۲/۵۷	۲/۰۷	-۰/۰۶۲	-۰/۱۲۲	گنجه‌ای بزرگ	۴
۲۳۴	-۱/۴۰	۲/۲۴	-۰/۱۰۰	-۰/۲۳۱	فیروزآباد	۵
۱/۲۹	-۲/۱۹	۲/۰۷	-۰/۰۷۷	-۰/۱۴۰	چنارستان بایر	۶
۰/۰۰۷	-۳/۲۲	۱/۹۳	-۰/۰۵۰	-۰/۱۰۱	محمودآباد کشاورزی	۷
۱۸۲	-۱/۴۱	۲/۲۴	-۰/۱۰۰	-۰/۲۲۵	سرآب تاوه	۸
۱۵/۰	-۱/۹۸	۲/۰۵	-۰/۰۸۱	-۰/۱۷۵	سروک	۹
۱۹/۹	-۲/۰۱	۲/۰۰	-۰/۰۸۰	-۰/۱۶۴	محمودآباد بایر	۱۰
۱۹۸	-۱/۴۹	۲/۱۶	-۰/۱۰۰	-۰/۲۱۱	خاک ۱۳	۱۱
۰/۱۲۲	-۲/۵۱	۲/۰۷	-۰/۰۶۲	-۰/۱۲۳	مختارآباد	۱۲
۷۶/۶۷	-۱/۶۱	۲/۱۴	-۰/۰۹۱	-۰/۱۹۳	چم‌خانی	۱۳
۲۵ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک						
۴۶۳	-۰/۶۷۰	۲/۹۶	-۰/۱۰۹	-۰/۳۰۲	ده نو کشاورزی	۱
۶۹۰	-۰/۷۰۳	۲/۸۹	-۰/۱۱۴	-۰/۳۱۱	چنارستان کشاورزی	۲
۳۰۳	-۰/۷۰۳	۲/۹۶	-۰/۱۰۰	-۰/۲۹۰	ده نو بایر	۳
۱۰۸۴	-۰/۶۸۲	۲/۸۹	-۰/۱۱۰	-۰/۳۲۵	گنجه‌ای بزرگ	۴
۲۲۲۱	-۰/۶۱۰	۲/۹۵	-۰/۱۲۰	-۰/۳۶۲	فیروزآباد	۵
۹۰۷	-۰/۷۱۴	۲/۸۵	-۰/۱۱۳	-۰/۳۲۲	چنارستان بایر	۶
۸۰۹	-۰/۸۳۳	۲/۶۹	-۰/۱۱۲	-۰/۲۹۰	محمودآباد کشاورزی	۷
۱۸۶	-۰/۸۲۵	۲/۸۳	-۰/۱۰۶	-۰/۲۷۴	سرآب تاوه	۸
۴۲/۱۲	-۱/۰۷	۲/۶۳	-۰/۰۹۱	-۰/۲۲۱	سروک	۹
۷۳۳	-۰/۸۴۰	۲/۷۰	-۰/۱۱۲	-۰/۲۹۰	محمودآباد بایر	۱۰
۲۶۶	-۰/۸۲۲	۲/۸۰	-۰/۱۰۰	-۰/۲۸۲	خاک ۱۳	۱۱
۳۶/۶	-۰/۹۴۵	۲/۷۸	-۰/۰۸۰	-۰/۲۳۳	مختارآباد	۱۲
۲۷۸	-۰/۷۹۲	۲/۸۳	-۰/۱۰۱	-۰/۲۸۱	چم‌خانی	۱۳

جدول ۸. ضرایب همبستگی میان ضرایب معادلات سینتیک تثبیت کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA از خاک‌های تیمار شده با دو سطح ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم با خصوصیات خاک

CEC (cmol ⁺ /Kg)	pH	EC(dS/m)	CCE		رس (%)	سیلت	شن	ضرایب معادلات
			CCE	OC				
۱۲/۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک								
۰/۳۰۳ ^{ns}	۰/۲۸۳ ^{ns}	۰/۴۱۴ ^{ns}	۰/۳۲۷ ^{ns}	۰/۲۹۷ ^{ns}	۰/۳ ^{ns}	۰/۴۹۱ ^{ns}	۰/۴۴۳ ^{ns}	b (تابع نمایی)
۰/۵۵۸*	۰/۴۳۴ ^{ns}	۰/۴۸۶ ^{ns}	۰/۶۰۰*	۰/۳۵۲ ^{ns}	۰/۵۴۰ ^{ns}	۰/۶۳۹*	۰/۶۶۹*	a (تابع نمایی)
۰/۳۳۴ ^{ns}	۰/۳۱۴ ^{ns}	۰/۴۰۸ ^{ns}	۰/۳۶۴ ^{ns}	۰/۳۰۶ ^{ns}	۰/۳۴۳ ^{ns}	۰/۵۰۸ ^{ns}	۰/۴۷۸ ^{ns}	ab (تابع نمایی)
۰/۴۴۹ ^{ns}	۰/۳۲۳ ^{ns}	۰/۵۵۹*	۰/۴۶۷ ^{ns}	۰/۳۵۹ ^{ns}	۰/۳۵۳ ^{ns}	۰/۵۹۷*	۰/۵۳۱ ^{ns}	βs (الوپیچ ساده)
۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۲۷۸ ^{ns}	۰/۱۷۱ ^{ns}	۰/۱۵ ^{ns}	۰/۱۲۳ ^{ns}	۰/۲۳ ^{ns}	۰/۲۴ ^{ns}	۰/۲۶۸ ^{ns}	αs (الوپیچ ساده)
۲۵ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک								
۰/۱۷۶ ^{ns}	۰/۱۳۲ ^{ns}	۰/۱۸۴ ^{ns}	۰/۰۱۰ ^{ns}	۰/۱۶۲ ^{ns}	۰/۲۰۲ ^{ns}	۰/۱۴۳ ^{ns}	۰/۲ ^{ns}	b (تابع نمایی)
۰/۷۲۶**	۰/۴۸۸ ^{ns}	۰/۳۹۵ ^{ns}	۰/۷۶۵**	۰/۴۳۸ ^{ns}	۰/۶۴۲*	۰/۶۹۹**	۰/۷۶۳**	a (تابع نمایی)
۰/۴۳۴ ^{ns}	۰/۲۵۲ ^{ns}	۰/۰۰۷ ^{ns}	۰/۳۴۵ ^{ns}	۰/۲۹۵ ^{ns}	۰/۳۶۶ ^{ns}	۰/۴۰۹ ^{ns}	۰/۴۴۱ ^{ns}	ab (تابع نمایی)
۰/۵۷۳*	۰/۳۹۱ ^{ns}	۰/۱۵۹ ^{ns}	۰/۵۲۶ ^{ns}	۰/۴۳ ^{ns}	۰/۵۰۸ ^{ns}	۰/۵۵۶*	۰/۶۰۵*	βs (الوپیچ ساده)
۰/۳۰۳ ^{ns}	۰/۱۴۵ ^{ns}	۰/۱۷۶ ^{ns}	۰/۱۸۵ ^{ns}	۰/۱۴۲ ^{ns}	۰/۱۹۴ ^{ns}	۰/۱۸۳ ^{ns}	۰/۲۱۶ ^{ns}	αs (الوپیچ ساده)

**,: به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد. ns: غیر معنی‌دار

یافت، اما با این وجود باز هم در پایان آزمایش بخش زیادی از کادمیم اضافه شده به خاک به شکل قابل استفاده باقی ماند که نشان می‌دهد زمان زیادی برای تثبیت کادمیم در خاک لازم است و کادمیم حتی با گذشت زمان همچنان در خاک به صورت قابل دسترس باقی می‌ماند. همچنین مشاهده شد که در هر یک از زمان‌های عصاره‌گیری قابلیت دسترسی زیستی کادمیم تحت تأثیر خصوصیات متفاوتی از خاک قرار می‌گیرد.

جذب معادله لانگمویر همبستگی معنی‌داری با CEC، CCE و میزان رس نشان داد که به عقیده آنان بیانگر این مطلب است که سایت جذب کادمیم در خاک‌های آهکی ایران احتمالاً رس و کربنات کلسیم است.

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA (قابلیت دسترسی زیستی کادمیم) در طول زمان کاهش

منابع مورد استفاده

۱. اسفندی، م. ۱۳۸۷. تعیین هم‌دهماهای جذب کادمیم و پراکندگی آن در خاک‌های استان گلستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان.
۲. ثواقبی، غ. ر. و م. ج. ملکوتی. ۱۳۷۹. اثرات روی و کادمیم بر غلظت عناصر و ترکیب شیمیایی دانه گندم. علوم آب و خاک ۱۲(۹): ۶۴-۷۰.
۳. جعفرنژادی، ع. ر.، م. همایی، غ. ع. صیاد، و م. بای‌بوردی. ۱۳۹۱. ارزیابی ویژگی‌های موثر خاک بر وضعیت غلظت کادمیم در

- خاک و بذر گندم در برخی خاک‌های آهکی استان خوزستان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک ۱۹(۲): ۱۶۳-۱۴۹.
۴. خانمیرزایی، ع.، ک. بازرگان، ع. ا. معزی و ک. شهبازی. ۱۳۹۱. رابطه بین شکل‌های شیمیایی کادمیم خاک و غلظت آن در دانه گندم در برخی خاک‌های استان خوزستان. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) ۲۶(۴): ۳۴۷-۳۵۷.
۵. خوشگفتارمنش، ا. ح.، ح. شریعتمداری و ن. کریمیان. ۱۳۸۲. اثرهای شوری آب آبیاری و کاربرد روی بر حلالیت کادمیم خاک و غلظت آن در گندم. هشتمین کنگره علوم خاک ایران. ۹-۱۲ شهریور، دانشگاه گیلان. ۵۹۹-۵۹۶.
۶. خیرآبادی، ح.، ا. ح. خوشگفتارمنش و ز. خان‌محمدی. ۱۳۹۱. تاثیر برخی ویژگی‌های خاک بر قابلیت دسترسی روی برای ذرت در تعدادی از خاک‌های آهکی استان اصفهان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک) ۱۶(۶۲): ۱-۱۰.
۷. رجائی، م. و ن. کریمیان. ۱۳۸۶. اثر کادمیم اضافه شده و زمان خواباندن بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در دو گروه بافتی خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۱(۱): ۹۷-۱۰۸.
۸. رحیمی، ط. و ع. م. رونقی. ۱۳۹۱. اثر کاربرد فسفر بر کاهش سمیت کادمیم در گیاه اسفناج در یک خاک آهکی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم خاک و آب) ۱۶(۵۹): ۷۵-۸۵.
۹. روانبخش، م. ح.، ا. فتوت، و غ. ح. حق‌نیا. ۱۳۸۸. تأثیر لیجن فاضلاب و زمان بر فراهمی و توزیع گونه‌های نیکل و کادمیم در محلول خاک‌های آهکی. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۳(۱): ۲۴۹-۲۳۹.
۱۰. ملکوتی، م. ج و م. م. طهرانی. ۱۳۸۴. نقش عناصر ریزمغذی‌ها در افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی (عناصر خرد با تأثیر کلان))، دانشگاه تربیت مدرس. تهران.

11. Alloway, B. J. 1990. Cadmium. PP. 100-124. In: Alloway B. J. (Ed.), Heavy Metals in Soils. Halsted, New York.;
12. Agrawal, A. and K. K. Sahu. 2006. Kinetics and isotherm studies of cadmium adsorption on manganese nodule residue. J. Hazard. Mat. 137: 915-942.
13. Amini, M., H. Khademi, M. Afyuni and K. C. Abbaspour. 2005. Variability of available cadmium in relation to soil properties and land use in an arid region in central Iran. Water Air and Soil Poll. 162: 205-218.
14. Bower, C. A., R. F. Reitemeier and M. Fireman. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Sci. 73: 251-261.
15. Camobreco, V. J., B. K. Richards, T. S. Steenhuis, J. H. Peverly and M. B. McBride. 1996. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. Soil Sci. 161: 740-750.
16. Christensen, T. H. 1987. Cadmium soil sorption at low concentrations. V. Evidence of competition by other heavy metals. Water Air Soil Poll. 34: 293-303.
17. Dalal, R. C. 1985. Comparative predication of yield response and phosphorus uptake from soil using anion and cation-anion exchange resins. Soil Sci. 139: 227-231.
18. Esfandbod, M., A. Forghani, E. Adhami and M. Rezaei Rashti. 2011. The role of CEC and pH in Cd retention from soils of north of Iran. J. Soil Sediment Contam. 20(8): 908-920.
19. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle- size analysis. In: A. Klute (Ed.). Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Am. Soc. Agron., Inc. Soil Sci. Am. Madison. Wisconsin.
20. Gray, C. W., R. G. McLaren, A. H. C. Roberts and L. M. Condon. 1998. Sorption and desorption of cadmium from some New Zealand soils: effect of pH and contact time. Aus. J. Soil. Res. 36: 199-216.
21. Gray, C. W., R. G. McLaren, A. H. C. Roberts and L. M. Condon. 1999. Solubility, Sorption and desorption of native and added cadmium in relation to properties of soils in New Zealand. Europ. J. Soil Sci. 50: 127-137.
22. Hafez, I. W., E. A. Abdelhamid, A. M. A. Hamra and R. N. Kamb. 1991. Prediction of available zinc in some calcareous soils of Egypt. Egypt. J. Soil Sci. 31: 291-300.
23. Hanafi, M. M. and J. Sjaola. 1998. Cadmium and zinc in acid tropical soils. I. Soil physical properties effect on their adsorption. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 29: 1919-1931.
24. Kibria, M. G., M. J. Ahmad, M. Islam and K. T. Osman. 2013. Dynamics of cadmium and lead in some soils of Chittagong, Bangladesh. Environ. Sci. Tox. Food Technol. 2(6): 64-71.
25. Kim, N. D. and G. E. Fergusson. 1992. Adsorption of cadmium by an aquent New Zealand soil and its components. Aus. J. Soil. Res. 30: 159-167.
26. Kirkham, M. B. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and

- amendments. *Geoderma* 137: 19-32.
27. Lim, T. T., J. H. Tay and C. I. Thee. 2002. Contamination time effect on lead and cadmium fractionation in a tropical coastal clay. *J. Environ. Qual.* 31: 806-812.
28. Lindsay, W. L. and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428.
29. Loeppert, R. H. and D. L. Suarez 1996. Carbonate and gypsum. *In: D. L. Sparks (Ed.). Methods of Soil Analysis, Part 3. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin.*
30. Lu, A., S. Zhang and X. Shan. 2005. Time effect on fractionation of heavy metals in soils. *Geoderma* 125: 225-234.
31. Ma, Y. B. and N. C. Uren. 1998. Transformation of heavy metals added to soil application of a new sequential extraction procedure. *Geoderma* 84: 157-168.
32. Maftoun, M., F. Rassoili, Z. Ali-Nejad and N. Karimian. 2004. Cadmium sorption behavior in some highly calcareous soils of Iran. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35: 1271-1282.
33. McBride, M. B. 1995. *Environmental Chemistry of Soils.* Oxford Univ. Press. New York.
34. Misra, A. K., V. Sarkunan, M. Das and P. K. Nayar. 1990. Transformation of added heavy metals in soils under flooded condition. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 38: 416-418.
35. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. *In: D. L. Sparks (Ed.), Method of Soil Analysis, Part 3. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin.*
36. Pardo, M. T. 1997. Influence of electrolyte on cadmium interaction with selected andisols and alfisols. *Soil Sci.* 162: 733-740.
37. Rajaie, M., N. Karimian, M. Maftoun, J. Yasrebi and M. T. Assad. 2006. Chemical forms of cadmium in two calcareous soil textural classes as affected by application of cadmium-enriched compost and incubation time. *Geoderma* 136: 533-541.
38. Ramachandran, V. and T. J. D. Souza. 1994. Adsorption of cadmium by Indian soils. *Water Air Soil Poll.* 111: 225-234.
39. Renella, G., P. Adamo, M. R. Bianco, L. Landi, P. Viol ante and P. Manipuri. 2004. Availability and speciation of cadmium added to a calcareous soil under various managements. *Europ. J. Soil Sci.* 55: 123-133.
40. Robertson, W., M. Lutrick and T. Yuan. 1982. Heavy applications of liquid-digested sludge on three Ultisols: I. Effects on soil chemistry. *J. Environ. Qual.* 11: 278-282.
41. Singh, S. P. and V. K. Nayyar. 1993. Adsorption of cadmium on alkaline and calcareous soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 41:270-273.
42. Smith, S. R. 1994. Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge-created soils. I. nickel, copper and zinc uptake and toxicity to ryegrass. *Environ. Pollut.* 85: 321-327.
43. Tiller, K. G., J. Gerth and G. Brummer. 1984. The relative affinities of Cd, Ni and Zn for different soil clay fractions and goethite. *Geoderma* 34: 17-35.
44. Tudoreanu, L. and C. J. C. Phillips. 2004. Modeling cadmium uptake and accumulation in plants. *Adv. Agron.* 84: 121-157.
45. Wang, Q. Y., D. M. Zhou, L. Cang, L. Li and H. Zhu. 2009. Indication of soil heavy metal pollution with earthworms and soil microbial biomass carbon in the vicinity of an abandoned copper mine in Eastern Nanjing, China. *Eur. J. Soil Biol.* 45: 229-234.
46. Weggler-Beaton, K., M. J. McLaughlin and R. D. Graham. 2000. Salinity increases cadmium uptake by wheat and Swiss chard from soil amended with biosolids. *Aus. J. Soil. Res.* 38: 37-45.
47. Yuan, G. and L. M. Lavkulich. 1997. Sorption behavior of copper, zinc and cadmium in response to simulated changes in soil properties. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 28: 571-578.
48. Zachara, J. M., S. C. Smith, C. T. Resch and C. E. Cowan. 1992. Cadmium sorption to soil separates containing layer silicates and iron and aluminum oxides. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 56: 1074-1084.

Changes of Available Cadmium Over time and its Relationship with Soil Properties in Highly Calcareous Soils

M. Hosseini, E. Adhami* and H. R Owliaie¹

(Received: Sept. 24-2016; Accepted: April 18-2017)

Abstract

Cadmium (Cd) is of special importance among heavy metals because its toxicity to the plant is 20 times higher than other heavy metals. The present study was conducted to evaluate the trend of available soil Cd changes over time and its relationship with soil properties. Treatments consisted of 13 soil samples and two Cd rates (12.5 and 25 mg kg⁻¹) as a factorial in a complete randomized design with two replications. DTPA extractable Cd was measured upon 5, 10, 20, 30, 60 and 90 days after adding Cd rates to the soils. The results showed that DTPA extractable Cd was increased as Cd application rates was raised in all soils. DTPA extractable Cd was decreased over time; however, at the end of the experiment, much of the added cadmium to the soil remained in use. Among the soil properties, calcium carbonate showed a significant negative correlation with DTPA extractable Cd in most of the incubation times in both Cd rates. DTPA extractable Cd also showed a significant negative correlation with pH and soil sand and a significant positive correlation with OC. Also, the results of the fitting of cadmium adsorption data with the kinetic equations showed that the exponential function equation was the most suitable kinetics descriptive equation for variations in cadmium adsorption in the studied soils.

Keywords: Cadmium; DTPA; Availability; Calcareous soil.

1. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Yasouj Univ., Yasouj. Iran.

*: Corresponding Author, Email: eadhami @gmail.com