اثر کادمیم اضافه شده و زمان خواباندن بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در دو گروه بافتی خاک

مجید رجائی و نجفعلی کریمیان[۱]

چکیده

در میان فلزات سنگین آلوده کننده خاک، کادمیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا به راحتی به وسیله ریشه گیاه جذب می‌شود و سمیت آن تا ۲۰ برابر بیشتر از سایر فلزات سنگین است. بنابراین درک عوامل مؤثر بر قابلیت استفاده این فلز و تغییر و تبدیل آن در خاک از اهمیت فراوانی برخوردار است. گرچه در سال‌های اخیر عصاره‌گیری دنباله‌ای به عنوان روشی مناسب در تعیین شکل‌های شیمیایی و قابلیت استفاده بالقوه فلزات در خاک‌های ایران به کار رفته است، اما ظرفیت اجزای مختلف خاک برای نگه‌داری کادمیم و تغییر و تبدیل شکل‌های شیمیایی آن با زمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات زمانی شکل‌های شیمیایی کادمیم و تعیین ظرفیت اجزای مختلف خاک برای نگه‌داری این فلز به یک خاک لوم رسی آهکی [Fine, mixed (calcareous), mesic Typic Calcixerepts] شن خالص کوارتزی افزوده شد و بافت لوم شنی حاصل به همراه خاک اولیه با مقادیر ۰، ۵، ۱۵، ۳۰، و ۶۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک تیمار شدند. نمونه‌های خاک به مدت ۰، ۱، ۲، ۴، ۸، و ۱۶ هفته در رطوبت حدود ظرفیت مزرعه خوابانده شد. در پایان هر زمان با برداشت زیر نمونه شکل‌های شیمیایی کادمیم به روش عصاره‌گیری دنباله‌ای تعیین شد. نتایج نشان داد که به ترتیب در بافت‌های لوم رسی و لوم شنی ۸۲ و ۸۷ درصد از کادمیم به کار رفته به شکل‌های محلول + تبادلی، کربناتی و آلی در می‌آید. در بافت لوم شنی مقدار بیشتری از کادمیم به کار رفته در مقایسه با بافت لوم رسی به شکل محلول + تبادلی و کربناتی در آمد. برای سایر شکل‌ها (به جز شکل اکسید آهن متبلور که در تمامی تیمارها کمتر از حد تشخیص دستگاه جذب اتمی بود) عکس این مطلب درست بود. با افزایش سطوح کادمیم کاربردی تمامی شکل‌های کادمیم در خاک افزایش یافتند اما درصد این افزایش‌ها به ظرفیت اجزای مختلف خاک برای نگه‌داری این فلز بستگی داشت. بیشترین ظرفیت نگه‌داری کادمیم مربوط به بخش کربناتی بود. تأثیر زمان بر تغییر شکل‌های کادمیم معنی‌دار بود، اما در اکثر تیمارها بلافاصله پس از افزودن کادمیم به خاک بیش از ۸۰ درصد این فلز وارد شکل‌های کربناتی و آلی گردید و تا پایان آزمایش این نسبت تقریباً حفظ شد.

واژه‌های کلیدی: شکل‌های شیمیایی کادمیم، عصاره‌گیری دنباله‌ای، خواباندن

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری و استاد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]

مقدمه

امروزه آلودگی محیط زیست و از جمله خاک به عنوان یکی از مباحث بسیار مهم در زندگی بشر مطرح است. این پدیده نه تنها تخریب منابع طبیعی را به دنبال دارد، بلکه روز به روز سبب ایجاد محدودیت بیشتر برای ساکنین زمین می‌شود. فلزات سنگین از جمله منابع آلاینده خاک هستند که در صورت تجمع در خاک و جذب به وسیله گیاه به زنجیره غذایی وارد می‌شوند و مسمومیت‌هایی را در گیاهان و یا افراد تغذیه کننده از آنها ایجاد می‌کنند (۱، ۴، ۶، ۸، ۹، ۱۲، و ۲۶). بنابراین مطالعه رهاسازی و تغییر و تبدیل این فلزات در محیط و تأثیری که بر رشد گیاهان و سایر جانداران دارند، از اهمیت خاصی برخوردار است.

در بین فلزات سنگین، به کادمیم توجه ویژه‌ای شده است، زیرا به راحتی به وسیله ریشه گیاه جذب می‌شود و سمیت آن تا ۲۰ برابر بیشتر از سایر فلزات سنگین است (۲). فراهمی زیستی بالای کادمیم و احتمال ورود آن به زنجیره غذایی، حتی در سطوح پایین آلودگی خاک با این فلز سبب شده است که نیاز بیشتری نسبت به فهم عوامل مؤثر بر قابلیت استفاده این فلز و تغییر و تبدیل آن در خاک احساس شود. به طور کلی قابلیت استفاده کادمیم تحت تأثیر مقدار و منشا کادمیم، pH، مقدار ماده آلی، مقدار و نوع رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، و رقابت سایر عناصر به ویژه روی در خاک می‌باشد (۲، ۸، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۲۳).

در رابطه با تغییر و تبدیل فلزات در خاک و از جمله کادمیم عقیده بر آن است که عناصر فلزی بلافاصله پس از افزوده شدن به خاک، دارای بیشترین حلالیت و فراهمی زیستی می‌باشند. با گذشت زمان و ایجاد تعادل بین فلز و خاک بر اثر واکنش‌هایی همچون جذب سطحی، تبادل، کلاته شدن، رسوب، اکسید و احیا، واکنش با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز، و ورود به شبکه کانی‌ها قابلیت استفاده فلز کاهش یافته و فلزات از شکل‌های با حلالیت زیاد به شکل‌های کم محلول‌تر تبدیل می‌شوند (۱۰، ۱۵، ۱۹، ۲۰، ۲۴، و ۲۶).

لیم و همکاران (۱۹) مشاهده کردند که گرچه افزایش زمان تکان دادن تعلیق خاک تیمار شده با کادمیم از ۱به ۷، ۱۵، ۳۰، ۵۰، و ۶۵ روز تأثیر معنی‌داری بر مقدار جذب سطحی کادمیم نداشت، اما سبب تبدیل شکل‌های فلزی با حلالیت زیاد به شکل‌های کم محلول تر شد. مک لارن و همکاران (۲۴) نشان دادند که گرچه طول زمان تعادل خاک و کادمیم از ۱ تا ۱۶ هفته تأثیری بر جذب سطحی کادمیم نداشت اما مقدار واجذبی این فلز به وسیله محلول نیترات کلسیم ۰/۰۱ مولار را کاهش داد. میزرا و همکاران (۲۵) در تحقیقی که به منظور مطالعه اثر زمان بر قابلیت عصاره‌گیری شش فلز روی، مس، نیکل، کادمیم، سرب و کرم تحت شرایط غرقابی و در چهار خاک مختلف انجام گرفت، با افزودن ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از این فلزات 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. ما و اورن (۲۱) با استفاده از عصاره‌گیری دنباله‌ای تغییر شکل کادمیم افزوده شده (۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به شکل کادمیم کلراید) به یک خاک آهکی را در طول یک آزمایش خواباندن ۶۰ روزه مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با گذشت زمان شکل‌های محلول در آب، قابل تبادل و قابل عصاره‌گیری با EDTA کاهش و مقادیر از دست رفته در شکل‌های متصل به منگنز احیا پذیر، کربناتی، آلی، اکسیدهای آهن و آلومنیوم و تتمه بازیافت شد.

رفتار فلزات سنگین در خاک به ظرفیت اجزای مختلف خاک برای جذب و نگه‌داری این عناصر بستگی دارد. نگارندگان معتقدند که مقادیر بالای آهک در خاک‌های ایران در جذب و تثبیت فلزات نقشی کلیدی بازی می‌کند و به دنبال ورود فلزات به این خاک‌ها، به سرعت از مقدار قابل استفاده آنها کاسته می‌شود و با گذشت زمان شکل‌های محلول به شکل‌های با حلالیت کمتر تبدیل شوند. رنلا و همکاران (۲۷) به منظور مطالعه قابلیت استفاده و توزیع کادمیم در خاک،

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]

مقادیر ۰، ۳، ۱۰ و ۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم (به شکل سولفات کادمیم) را به یک خاک آهکی دارای پیشینه مدیریتی متفاوت افزودند. جداسازی شکل‌های شیمیایی کادمیم به وسیله دو روش عصاره‌گیری دنباله‌ای و در طول دوره خواباندن ۶۰۰ روزه نشان داد که مصرف کادمیم سبب افزایش تمام شکل‌های شیمیایی کادمیم از همان ابتدای آزمایش شد و در تمام سطوح کادمیم مصرفی و مدیریت‌های زراعی مختلف بخش عمده کادمیم به شکل کربناتی درآمد. این پژوهشگران نتیجه‌گیری کردند که ظرفیت نگه‌داری کادمیم در خاک‌های آهکی به مراتب بیشتر از حدود مجاز توصیه شده توسط سازمان‌های حفاظت محیط زیست می‌باشد.

گرچه در سال‌های اخیر در خاک‌های ایران از عصاره‌گیری دنباله‌ای جهت تعیین شکل‌های شیمیایی فلزات و از جمله کادمیم استفاده شده است (۱، ۳، ۵، و ۳۲). اما ظرفیت اجزای مختلف این خاک‌ها برای جذب و نگه‌داری کادمیم و تغییر و تبدیل شکل‌های شیمیایی این فلز با گذشت زمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در تحقیق حاضر سعی شد تا با استفاده از عصاره‌گیری دنباله‌ای و سطوح بالای کادمیم مقدار تغییر و تبدیل کادمیم در طول زمان و ظرفیت خاک برای تثبیت این فلز در یک آزمایش خواباندن بررسی شود. هم چنین تأثیر بافت خاک بر سرنوشت کادمیم به کار رفته با افزودن شن به یک بافت لوم رسی و تبدیل آن به بافت لوم شنی مورد مطالعه قرار گرفت .

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر از دو گروه بافتی استفاده شد. برای گروه بافتی اول، نمونه‌ای از خاک لوم رسی آهکی [Fine, mixed (calcareous), mesic Typic Calcixerpts] ایستگاه زراعی تحقیقات دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری جمع آوری شد و پس از خشک کردن در هوا و عبور از الک دو میلی متری در آزمایش به کار رفت. جهت تهیه گروه بافتی دوم، با افزودن شن کوارتزی خالص به میزان ۱:۱ به خاک مذکور خاکی با گروه بافتی لوم شنی تهیه شد. نمونه‌هایی از هر خاک به آزمایشگاه منتقل و بعضی از ویژگی‌های این خاک‌ها همچون بافت به روش هیدرومتر (۱۱)، پ- هاش در خمیر اشباع، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (۷)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جایگزینی کاتیون‌ها با استات سدیم (۱۳)، و کربن آلی به روش واکی بلاک (۱۶) اندازه گیری شد (جدول ۲).

به منظور بررسی تغییرات زمانی شکل‌های شیمیایی کادمیم، آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی انجام شد. فاکتورها شامل دو گروه بافتی، پنج سطح کادمیم (۰، ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به صورت سولفات کادمیم) و شش زمان خواباندن (۰،۱، ۲، ۴، ۸، و ۱۶ هفته) بود. مقدار ۲۰۰ گرم از هر خاک به ظروف پلاستیکی منتقل و در سه تکرار در دمای آزمایشگاه (۲±۲۵ درجه سانتی‌گراد) خوابانده شد. نمونه‌های خاک با ورقه‌های پارافیلم دارای منافذ عبور هوا پوشانده شدند تا با وجود تبادل هوا، از تبخیر سریع آب آنها جلوگیری شود. مقدار رطوبت نمونه‌ها هر سه روز یکبار با آب مقطر به حدود ظرفیت مزرعه رسانده شد و خاک‌ها هر ۱۵ روز یکبار قبل از آبیاری به خوبی مخلوط شدند. نمونه‌های خاک در زمان‌های مذکور برداشت و شکل‌های شیمیایی کادمیم با روش عصاره‌گیری دنباله‌ای سینگ و همکاران (۲۹) جداسازی و به وسیله دستگاه جذب اتمی شیماتزو مدل ۶۷۰- AA اندازه‌گیری شد. در این روش در هر زمان خواباندن زیر نمونه‌های خاک به وزن ۵ گرم برداشت و پس از انتقال به لوله سانتریفوژ پلاستیکی مقدار ۲۰ میلی لیتر نیترات منیزیم یک مولار به آنها اضافه شد. بلافاصله پس از افزودن عصاره‌گیر، تعلیق خاک به مدت ۲ ساعت تکان داده شد و پس از اتمام زمان مذکور نمونه‌ها سانتریفوژ شدند. در نهایت جدا سازی محلول زلال روئی و صاف کردن آن با کاغذ صافی و اتمن ۴۲ انجام شد و عصاره‌های به دست آمده جهت اندازه‌گیری کادمیم به کار رفتند. برای سایر مراحل مقدار عصاره‌گیر لازم هرمرحله به خاک باقی‌مانده از مرحله قبل اضافه شد. نمونه‌ها به مدت لازم

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]

جدول ۱. خلاصه‌ای از روش عصاره‌گیری دنباله‌ای ارائه شده به وسیله سینگ و همکاران (۱۹۲۸) برای تعیین شکل‌های شیمیایی فلزات در خاک‌های آهکی

شکل شیمیایی کادمیم	علامت	مدت تکان دادن (ساعت)	ترکیب عصاره‌گیر	نسبت خاک به عصاره‌گیر
محلول + تبادلی	Ex+Sol	۲	1M $Mg(NO_3)_2$	۵:۲۰
کربناتی	Car	۵	1M NaOAc(pH=5 CH_3COOH)	۵:۲۰
آلی	Om*	۰/۵	0.7M NaOCl (pH=8.5)	۵:۱۰
متصل به اکسیدهای منگنز	MnOx	۰/۵	0.1M $NH_2OH.HCl$ (pH=2 HNO_3)	۵:۵۰
متصل به اکسیدهای آهن بی شکل	AFeOx	۰/۵	0.25M $NH_2OH.HCl$ + 0.25M HCl	۵:۵۰
متصل به اکسیدهای آهن متبلور	CFeOx	۰/۵	0.2M $(NH_4)_2C_2O_4$ + 0.2M $H_2C_2O_4$ + 0.1 $MC_6H_8O_6$	۵:۵۰

* : دو بار عصاره‌گیری

جدول ۲. بعضی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش

ویژگی	خاک	
	بافت لوم رسی	بافت سبک لوم شنی
شن (درصد)	۲۷	۶۲
سیلت (درصد)	۳۹	۲۲
رس (درصد)	۳۴	۱۶
کادمیم کل (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	۱/۱	۰/۶۲
ماده آلی (درصد)	۱/۵۸	۰/۸۱
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۳۳	۱۷
پ- هاش (خمیر اشباع)	۷/۵۷	۷/۶۰
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بار در کیلوگرم خاک)	۲۴	۱۴

تکان داده شدند و پس از سانتریفوژ و صاف کردن جهت اندازه‌گیری کادمیم به کار رفتند. قبل از قرائت نمونه‌ها توسط دستگاه جذب اتمی محلول‌های استاندارد برای هر یک از شکل‌های کادمیم در عصاره‌گیر مربوط به آن شکل ساخته شد تا تأثیر ماده زمینه به حداقل برسد. خلاصه مراحل عصاره‌گیری و ترکیب هر عصاره‌گیر در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که شکل تتمه از تفاضل غلظت کادمیم کل عصاره‌گیری شده با مخلوط سه اسید (۳۱) و مجموع سایر شکل‌ها به دست آمد. تجزیه آماری داده‌ها به وسیله برنامه کامپیوتری Mstastc انجام و با استفاده از آزمون F مورد تجزیه

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]

جدول ۳. اثر اصلی بافت‌های مورد آزمایش بر شکل‌های شیمیایی کادمیم

خاک	شکل‌های شیمیایی (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)						
	Ex + Sol	Car	Om	MnOx	AFeOx	CFeOx	Res
لوم رسی	۰/۵۴ [b]	۱۲/۸۱ [b]	۶/۶۸ [a]	۰/۶۳ [a]	۰/۷۹ [a]	nd	۱/۵۱ [a]
لوم شنی	۰/۷۷ [a]	۱۵/۱۲ [a]	۴/۶۳ [b]	۰/۴۱ [b]	۰/۳۹ [b]	nd	۱/۲۶ [b]

اعدادی که در هر ستون دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن فاقد تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.
nd: غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص دستگاه جذب اتمی یعنی کمتر از ۰/۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)
Res: شکل تتمه کادمیم. برای تعریف علائم اختصاری سایر شکل‌ها به جدول ۱ مراجعه شود.

واریانس قرار گرفت. میانگین‌های مربوط به اثرهای اصلی هر یک از عامل‌ها و بر همکنش آنها استخراج و با آزمون دانکن مقایسه شدند. رسم نمودار توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیم با برنامه کامپیوتری Excel انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به تجزیه فیزیکی و شیمیایی بافت‌های مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. خاک لوم رسی خاکی غیر آلوده با بافت سنگین، ماده آلی متوسط، کربنات کلسیم بالا و پ–هاش قلیایی می‌باشد. افزودن شن کوارتزی سبب سبک شدن بافت و کاهش در کادمیم کل، ماده آلی و کربنات کلسیم این خاک شد ولی در مقدار پ– هاش تغییری ایجاد نکرد. نتایج مربوط به اثر اصلی بافت بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در جدول ۳ ارائه شده است. تأثیر بافت بر این شکل‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. میانگین داده‌ها نشان داد که شکل‌های شیمیایی آلی، اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن بی شکل و تتمه در بافت لوم رسی بیشتر از بافت لوم شنی و به ترتیب ۶/۶۸، ۰/۶۳، ۰/۷۹، و ۱/۵۱ در برابر ۴/۶۳، ۰/۴۱، ۰/۳۹، و ۱/۲۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود. در مقابل در بافت لوم شنی شکل محلول + تبادلی و شکل کربناتی بیشتر از بافت لوم رسی و به ترتیب ۰/۷۷ و ۱۵/۱۲ در برابر ۰/۵۴ و ۱۲/۸۱ بود. در هر دو خاک بخش قابل توجهی از کادمیم توسط سه عصاره‌گیر اول استخراج شد که به طور میانگین برای بافت لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ۸۲ و ۸۷ درصد از مجموع کل شکل‌ها بود. چنین داده‌هایی بیانگر فراهمی زیستی بالای کادمیم در خاک می‌باشد. زیرا این شکل‌ها نسبت به سایر شکل‌ها با عصاره‌گیرهای ضعیف تری که چندان هم اسیدی نیستند استخراج می‌شوند. نکته مهم دیگر این بود که از میان شکل‌های بالا جزء کربناتی شکل غالب را تشکیل می‌داد که باز با توجه به آهکی بودن خاک‌های مورد آزمایش امری دور از انتظار نبود. اسپوزیتو (۳۰) گزارش کرد که در خاک‌های قلیایی مناطق خشک تیمار شده با مواد لجن فاضلاب بخش عمده کادمیم در شکل کربناتی یافت می‌شود. هم‌چنین اسلان و همکاران (۲۹) پس از جداسازی شکل‌های شیمیایی کادمیم، روی، نیکل، مس، و سرب در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب، مشاهده کردند که تقریباً تمام کادمیم به وسیله سه عصاره‌گیر به نسبت ضعیف اول خارج می‌شد. این پژوهشگران حضور کادمیم در شکل‌هایی که به راحتی قابل عصاره‌گیری بودند را ناشی از قابلیت استفاده بیشتر کادمیم در خاک نسبت به سایر فلزات مورد مطالعه عنوان کردند. هم چنین بالاتر بودن شکل محلول + تبادلی و شکل کربناتی در بافت لوم شنی نیز بازتابی از قابلیت استفاده زیستی بیشتر کادمیم در خاک‌های بافت سبک است که به وسیله پژوهشگران دیگری هم گزارش شده است (۸، ۱۲، ۱۴، ۱۷، ۲۲، و ۲۵). میانگین کمتر شکل‌های آلی، اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن بی شکل و تتمه در بافت لوم شنی را می‌توان به رقیق شدن این اجزای بر اثر افزودن شن

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]

جهت تهیه گروه بافتی سبک نسبت داد. لازم به ذکر است که در هر دو خاک و برای همه تیمارها غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای آهن متبلور (کریستالی) ناچیز و کمتر از حد تشخیص دستگاه جذب اتمی (۰/۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. این امر حاکی از تمایل کم کادمیم برای ورود به چنین شکلی در خاک‌ها و در شرایط آزمایش حاضر بود.

داده‌های مربوط به آثار اصلی و بر همکنش زمان و سطوح کادمیم در دو بافت مورد آزمایش در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. در هر دو بافت و در تمام زمان‌ها با افزایش سطوح کادمیم تمام شکل‌های شیمیایی کادمیم به طور معنی‌داری افزایش یافتند. افزایش تمام شکل‌های شیمیایی کادمیم در همان ابتدای آزمایش بیانگر دست‌یابی سریع به تعادل و رسوب کادمیم به شکل فازهای معدنی می‌باشد. این امر ظرفیت زیاد خاک‌های مورد مطالعه را برای جذب و نگه‌داری کادمیم نشان می‌دهد. در پژوهشی که توسط رنلا و همکاران (۲۷) انجام گرفت، جدا سازی شکل‌های شیمیایی کادمیم در یک آزمایش خواباندن ۶۰۰ روزه نشان داد که در همان ابتدای آزمایش (روز اول) کاربرد مقادیر ۳ و ۱۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک (به شکل سولفات کادمیم) سبب توزیع یکنواخت این فلز در بین اجزای مختلف خاک شد. در زمان مذکور کاربرد ۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک سبب رسوب کادمیم و تشکیل فازهای معدنی شد که این امر با افزایش در شکل تتمه همراه بود.

بر همکنش بافت و سطوح کادمیم نیز بر این شکل‌ها معنی دار بود. به عنوان مثال در زمان ۱۶ هفته و در بافت لوم رسی با افزایش سطوح کادمیم از صفر به ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک شکل محلول + تبادلی از کمتر از ۰/۰۵ (حد خطای دستگاه جذب اتمی) به ۱/۲۶ و در بافت لوم شنی از کمتر از ۰/۰۵ به ۱/۷۸ میلی گرم در کیلوگرم خاک رسید که افزایش بیشتری را در بافت لوم شنی نشان می‌دهد. به عبارتی دیگر با افزایش سطوح کادمیم در بافت لوم شنی مقادیر بیشتری از کادمیم در شکل محلول + تبادلی جای می‌گیرد. چنین روندی در مورد شکل کربناتی هم صادق بود. در مورد شکل‌های آلی، اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن بی شکل، و تتمه عکس این مطلب صادق بود. به طوری که با افزایش سطوح کادمیم مقادیر بیشتری از این عنصر در بافت لوم رسی نسبت به بافت لوم شنی وارد این شکل‌ها شد (جدول‌های ۴و ۵).

تا آنجایی که نگارندگان به منابع دسترسی داشته اند، تأثیر سطوح کادمیم بر شکل‌های شیمیایی این عنصر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در شرایط آزمایش حاضر می‌توان تأثیر سطوح کادمیم بر توزیع شکل‌های شیمیایی این عنصر را به ظرفیت متفاوت اجزای خاک برای نگه‌داری کادمیم نسبت داد. به عبارتی دیگر به علت ظرفیت محدود بعضی از اجزای خاک برای نگه‌داری کادمیم، با افزایش سطوح این عنصر کادمیم بیشتر وارد اجزایی می‌شود که ظرفیت بیشتری برای نگه‌داری این عنصر دارند. به طور مثال در بافت لوم رسی، در زمان ۱۶ هفته و در سطح ۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک ۴۵/۷۹ درصد از کادمیم در شکل کربناتی وجود داشت ولی با افزایش سطوح کادمیم به ۱۵، ۳۰، و ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک این مقادیر به ترتیب به ۵۰/۶۳، ۵۶/۵۴، و ۵۸/۷۵ درصد افزایش یافت. اعداد مشابه برای بافت لوم شنی به ترتیب ۵۷/۲۹ در مقابل ۶۵/۴۰، ۶۷/۶۹، و ۷۱/۳۵ بود (شکل‌های ۱ و ۲). چنین رویدادی به علت ظرفیت بیشتر جزء کربنات برای نگه‌داری کادمیم با افزایش سطوح این عنصر می‌باشد، که با توجه به غالب بودن کربنات کلسیم در خاک‌های ایران چندان دور از انتظار نیست. گرچه در صد کربنات کلسیم در بافت لوم رسی بیشتر از بافت لوم شنی بود، اما می‌توان بالاتر بودن درصدهای مذکور را در بافت لوم شنی چنین تو جیه کرد که با کمتر شدن مقدار نسبی سایر اجزای خاک بر اثر افزودن شن و کم شدن ظرفیت سایر اجزای، باز کربنات کلسیم نقش غالب را ایفا کرده و مقدار بیشتری از کادمیم را در خود جای می‌دهد. شکل‌های ۱ و ۲ درصد شکل‌های شیمیایی کادمیم با افزایش سطوح این فلز را در زمان ۱۶ هفته و برای دو بافت مذکور نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در سایر زمان‌ها نیز روند تقریباً مشابهی مشاهده شد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]

جدول ۴. تأثیر زمان و سطوح کادمیم بر شکل‌های شیمیایی این فلز (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) در بافت لوم رسی

سطح (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	زمان (هفته)						میانگین
	۰	۱	۲	۴	۸	۱۶	
				محلول + تبادلی			
۰	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
۵	۰/۱۶ ^{k}	۰/۱۶ ^{k}	۰/۱۶ ^{k}	۰/۱۵ ^{k}	۰/۱۴ ^{k}	۰/۰۹ ^{k}	۰/۱۵ ^{D}
۱۵	۰/۴۴ ^{gh}	۰/۴۱ ^{hi}	۰/۳۷ ^{hig}	۰/۲۲ ^{jk}	۰/۲۴ ^{jk}	۰/۲۶ ^{ijk}	۰/۳۲ ^{C}
۳۰	۰/۸۲ ^{e}	۰/۷۰ ^{ef}	۰/۶۸ ^{ef}	۰/۶۸ ^{ef}	۰/۶۲ ^{f}	۰/۵۸ ^{fg}	۰/۶۸ ^{B}
۶۰	۲/۱۱ ^{a}	۱/۶۷ ^{b}	۱/۴۶ ^{c}	۱/۳۵ ^{cd}	۱/۳۰ ^{d}	۱/۲۶ ^{d}	۱/۵۲ ^{A}
میانگین	۰/۷۱ ^{a}	۰/۶۰ ^{bc}	۰/۵۶ ^{c}	۰/۴۸ ^{d}	۰/۴۶ ^{d}	۰/۴۴ ^{d}	
				کربناتی			
۰	۰/۳۰ ^{e}	۰/۲۷ ^{e}	۰/۳۲ ^{e}	۰/۳۱ ^{e}	۰/۳۴ ^{e}	۰/۳۴ ^{e}	۰/۳۱ ^{E}
۵	۲/۷۹ ^{d}	۲/۶۸ ^{d}	۲/۳۹ ^{d}	۲/۳۷ ^{d}	۲/۴۷ ^{d}	۲/۷۳ ^{d}	۲/۵۸ ^{D}
۱۵	۸/۱۵ ^{c}	۸/۱۶ ^{c}	۷/۶۹ ^{c}	۸/۵۲ ^{c}	۸/۰۰ ^{c}	۸/۰۴ ^{c}	۸/۰۹ ^{C}
۳۰	۱۷/۳۰ ^{b}	۱۷/۱۶ ^{b}	۱۷/۵۲ ^{b}	۱۷/۵۰ ^{b}	۱۷/۰۲ ^{b}	۱۷/۵۰ ^{b}	۱۷/۲۷ ^{B}
۶۰	۳۵/۷۷ ^{a}	۳۵/۵۱ ^{a}	۳۵/۵۶ ^{a}	۳۶/۱۶ ^{a}	۳۶/۲۳ ^{a}	۳۵/۸۱ ^{a}	۳۵/۸۲ ^{A}
میانگین	۱۲/۸۴ ^{a}	۱۲/۷۶ ^{a}	۱۲/۶۲ ^{a}	۱۲/۹۷ ^{a}	۱۲/۸۱ ^{a}	۱۲/۸۹ ^{a}	
				آلی			
۰	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
۵	۱/۰۵ ^{g}	۱/۳۲ ^{g}	۱/۶۳ ^{g}	۱/۴۹ ^{g}	۱/۴۵ ^{g}	۱/۵۰ ^{g}	۱/۴۱ ^{D}
۱۵	۴/۳۲ ^{f}	۴/۸۶ ^{f}	۵/۵۹ ^{e}	۴/۵۵ ^{f}	۴/۶۲ ^{f}	۴/۶۴ ^{f}	۴/۷۶ ^{C}
۳۰	۹/۰۹ ^{d}	۹/۱۱ ^{d}	۹/۲۸ ^{d}	۹/۴۳ ^{d}	۹/۲۸ ^{d}	۹/۲۷ ^{d}	۹/۲۴ ^{B}
۶۰	۱۷/۸۳ ^{b}	۱۸/۶۷ ^{a}	۱۸/۸۲ ^{a}	۱۷/۸۵ ^{b}	۱۷/۰۷ ^{c}	۱۷/۶۵ ^{bc}	۱۷/۹۸ ^{A}
میانگین	۶/۴۵ ^{c}	۶/۷۹ ^{ab}	۷/۰۶ ^{a}	۶/۶۶ ^{bc}	۶/۴۸ ^{c}	۶/۶۱ ^{bc}	
				متصل به اکسیدهای منگنز			
۰	۰/۱۸ ^{i}	۰/۱۷ ^{i}	۰/۱۸ ^{i}	۰/۱۶ ^{i}	۰/۱۵ ^{i}	۰/۱۶ i	۰/۱۷ ^{E}
۵	۰/۱۵ ^{i}	۰/۲۶ ^{hi}	۰/۳۴ ^{gh}	۰/۳۸ ^{gh}	۰/۳۸ ^{gh}	۰/۳۸ ^{gh}	۰/۳۲ ^{D}
۱۵	۰/۳۴ ^{gh}	۰/۳۶ ^{gh}	۰/۴۹ ^{fg}	۰/۵۶ ^{ef}	۰/۵۷ ^{ef}	۰/۷۰ ^{e}	۰/۵۰ ^{C}
۳۰	۰/۶۵ ^{e}	۰/۶۶ ^{e}	۰/۶۶ ^{e}	۰/۸۶ ^{d}	۰/۹۴ ^{d}	۱/۱۰ ^{c}	۰/۸۱ ^{B}
۶۰	۱/۵۳ ^{b}	۱/۱۰ ^{c}	۱/۰۸ ^{c}	۱/۱۵ ^{c}	۱/۴۶ ^{b}	۱/۷۲ ^{a}	۱/۳۴ ^{A}
میانگین	۰/۵۷ ^{cd}	۰/۵۱ ^{e}	۰/۵۵ ^{de}	۰/۶۱ ^{c}	۰/۷۰ ^{b}	۰/۸۱ ^{a}	
				متصل به اکسیدهای آهن بی شکل			
۰	۰/۲۵ ^{n}	۰/۳۰ ^{mn}	۰/۲۴ ^{n}	۰/۲۹ ^{mn}	۰/۲۸ ^{mn}	۰/۲۶ ^{n}	۰/۲۶ ^{E}
۵	۰/۴۳ ^{jkl}	۰/۳۸ ^{klm}	۰/۳۲ ^{lmn}	۰/۴۰ ^{klm}	۰/۴۸ ^{ijk}	۰/۳۴ ^{lmn}	۰/۳۹ ^{D}
۱۵	۰/۶۵ ^{h}	۰/۵۶ ^{hi}	۰/۵۴ ^{hij}	۰/۶۴ ^{h}	۰/۶۱ ^{h}	۰/۶۰ ^{h}	۰/۶۰ ^{C}
۳۰	۱/۰۱ ^{ef}	۰/۹۱ ^{fg}	۰/۸۷ ^{g}	۱/۲۸ ^{d}	۱/۱۲ ^{e}	۰/۹۴ ^{fg}	۱/۰۲ ^{B}
۶۰	۱/۷۱ ^{b}	۱/۴۶ ^{c}	۱/۲۳ ^{d}	۱/۹۸ ^{a}	۱/۸۱ ^{b}	۱/۷۲ ^{b}	۱/۶۵ ^{A}
میانگین	۰/۸۱ ^{c}	۰/۷۲ ^{e}	۰/۶۴ ^{f}	۰/۹۲ ^{a}	۰/۸۶ ^{b}	۰/۷۷ ^{d}	
				تتمه			
۰	۰/۱۸ ^{p}	۰/۱۷ ^{p}	۰/۱۴ ^{p}	۰/۱۶ ^{p}	۰/۱۵ ^{p}	۰/۱۵ ^{p}	۰/۱۶ ^{E}
۵	۱/۳۸ $^{j-n}$	۱/۱۵ $^{l-o}$	۱/۱۴ ^{mno}	۱/۱۷ $^{l-o}$	۱/۰۳ ^{no}	۰/۹۳ ^{o}	۱/۱۳ ^{D}
۱۵	۲/۰۵ ^{efg}	۱/۶۱ $^{h-k}$	۱/۳۹ $^{j-n}$	۱/۴۸ $^{j-m}$	۱/۹۰ ^{ghi}	۱/۶۴ ^{hig}	۱/۶۷ ^{C}
۳۰	۲/۰۸ $^{d-g}$	۲/۴۲ $^{b-e}$	۲/۳۵ $^{c-f}$	۱/۲۱ $^{k-o}$	۱/۹۸ ^{fgh}	۱/۵۷ $^{i-l}$	۱/۹۳ ^{B}
۶۰	۲/۳۹ $^{b-e}$	۲/۵۶ ^{bc}	۲/۷۵ ^{abc}	۲/۴۷ ^{bcd}	۳/۰۹ ^{a}	۲/۷۹ ^{ab}	۲/۶۷ ^{A}
میانگین	۱/۶۲ ^{a}	۱/۵۸ ^{a}	۱/۵۵ ^{a}	۱/۲۹ ^{b}	۱/۶۳ ^{a}	۱/۴۱ ^{b}	

میانگین‌هایی که در هر ستون و یا در هر ردیف دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن فاقد تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

nd : غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص دستگاه جذب اتمی یعنی کمتر از ۰/۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]

جدول ۵. تأثیر زمان و سطوح کادمیم بر شکل‌های شیمیایی این فلز (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) در بافت لوم شنی

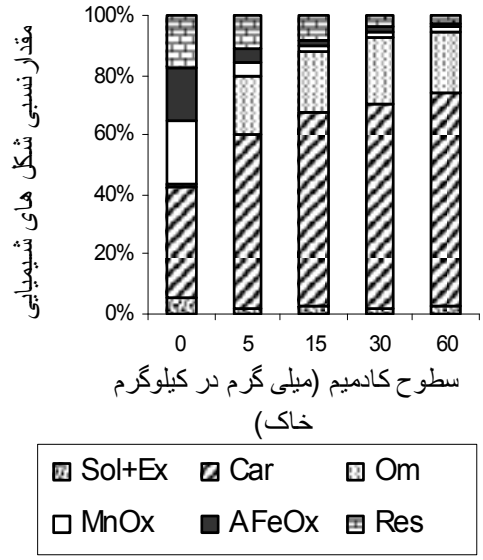
سطح (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	زمان (هفته)						میانگین
	۰	۱	۲	۴	۸	۱۶	
	محلول + تبادلی						
۰	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
۵	۰/۲۲ ^{i}	۰/۲۱ ^{i}	۰/۲۰ ^{i}	۰/۱۷ ^{i}	۰/۱۴ ^{i}	۰/۱۱ ^{i}	۰/۱۷ ^{D}
۱۵	۰/۵۱ ^{h}	۰/۴۲ ^{h}	۰/۴۸ ^{h}	۰/۴۸ ^{h}	۰/۴۵ ^{h}	۰/۴۱ ^{h}	۰/۴۵ ^{C}
۳۰	۱/۱۹ ^{e}	۱/۰۰ ^{f}	۰/۷۲ ^{g}	۰/۷۷ ^{g}	۰/۷۱ ^{g}	۰/۷۱ ^{g}	۰/۸۵ ^{B}
۶۰	۳/۲۵ ^{a}	۲/۸۷ ^{b}	۲/۶۸ ^{c}	۱/۷۸ ^{d}	۱/۷۹ ^{d}	۱/۷۸ ^{d}	۲/۳۶ ^{A}
میانگین	۱/۰۴ ^{a}	۰/۹۱ ^{b}	۰/۸۲ ^{c}	۰/۶۴ ^{de}	۰/۶۲ ^{e}	۰/۶۱ ^{e}	
	کربناتی						
۰	۰/۲۸ ^{j}	۰/۳۰ ^{j}	۰/۲۸ ^{j}	/۲۸ ^{j}	۰/۲۹ ^{j}	۰/۲۱ ^{j}	۰/۸۲ ^{E}
۵	۳/۰۹ ^{i}	۳/۳۱ ^{i}	۳/۳۹ ^{i}	۳/۲۰ ^{i}	۳/۱۲ ^{i}	۳/۲۷ ^{i}	۳/۲۲ ^{D}
۱۵	۹/۹۴ ^{h}	۱۰/۱۹ ^{h}	۱۰/۰۴ ^{h}	۱۱/۱۹^{g}	۱۰/۲۷ ^{h}	۱۰/۱۴ ^{h}	۱۰/۲۹ ^{C}
۳۰	۲۰/۳۷ ^{f}	۲۰/۳۳ ^{f}	۲۱/۱۷ ^{de}	۲۱/۴۵ ^{d}	۲۰/۵۰ ^{ef}	۲۰/۶۷ ^{ef}	۲۰/۷۵ ^{B}
۶۰	۴۰/۷۶ ^{b}	۳۹/۷۳ ^{c}	۳۹/۱۱ ^{c}	۴۰/۸۴ ^{b}	۴۲/۷۱ ^{a}	۴۳/۲۴ ^{a}	۴۱/۰۷ ^{A}
میانگین	۱۴/۸۹ ^{b}	۱۴/۷۷ ^{b}	۱۴/۷۸ ^{b}	۱۵/۳۹ ^{a}	۱۵/۳۸ ^{a}	۱۵/۵۱ ^{a}	
	آلی						
۰	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
۵	۰/۸۱ ^{h}	۰/۸۷ ^{h}	۰/۸۴ ^{h}	۰/۹۷ ^{h}	۱/۰۴ ^{h}	۱/۰۶ ^{h}	۰/۹۳ ^{D}
۱۵	۲/۹۳ ^{fg}	۳/۱۶ ^{f}	۳/۲۰ ^{f}	۲/۴۱ ^{g}	۲/۸۸ ^{fg}	۳/۰۲ ^{f}	۱/۹۵ ^{C}
۳۰	۶/۲۱ ^{de}	۶/۱۲ ^{e}	۶/۱۳ ^{e}	۶/۲۳ ^{de}	۶/۴۵ ^{de}	۶/۷۶ ^{d}	۶/۳۲ ^{B}
۶۰	۱۲/۹۷ ^{b}	۱۳/۷۳ ^{a}	۱۳/۸۵ ^{a}	۱۳/۳۳ ^{ab}	۱۱/۹۰ ^{c}	۱۲/۰۱ ^{c}	۱۲/۹۷ ^{A}
میانگین	۴/۵۹ ^{ab}	۴/۷۸ ^{a}	۴/۸۱ ^{a}	۴/۵۹ ^{ab}	۴/۴۶ ^{b}	۴/۵۹ ^{ab}	
	متصل به اکسیدهای منگنز						
۰	۰/۱۳ ^{jk}	۰/۰۸ ^{k}	۰/۰۸ ^{k}	۰/۱۲ ^{jk}	۰/۱۳ ^{jk}	۰/۱۲ ^{jk}	۰/۱۱. ^{E}
۵	۰/۱۲ ^{jk}	۰/۱۴ ^{jk}	۰/۱۵ ^{ijk}	۰/۲۱ $^{h-k}$	۰/۲۱ $^{h-k}$	۰/۲۷ ^{ghi}	۰/۱۸ ^{D}
۱۵	۰/۲۳ $^{g-j}$	۰/۲۸ ^{ghi}	۰/۳۰ ^{fgh}	۰/۳۲ $^{e-h}$	۰/۳۴ $^{e-h}$	۰/۳۶ ^{efg}	۰/۳۱ ^{C}
۳۰	۰/۴۲ ^{ef}	۰/۴۲ ^{ef}	۰/۴۲ ^{ef}	۰/۴۵ ^{de}	۰/۵۵ ^{d}	۰/۶۸ ^{c}	۰/۴۹ ^{B}
۶۰	۰/۷۳ ^{bc}	۰/۸۱ ^{b}	۱/۰۱ ^{a}	۱/۰۸ ^{a}	۱/۰۹ ^{a}	۱/۰۹ ^{a}	۰/۹۷ ^{A}
میانگین	۰/۳۲ ^{f}	۰/۳۴ ^{ef}	۰/۳۹ ^{de}	۰/۴۴ ^{cd}	۰/۴۶ ^{bc}	۰ /۵۰ ^{ab}	
	متصل به اکسیدهای آهن بی شکل						
۰	۰/۱۳ ^{p}	۰/۱۴ ^{op}	۰/۱۱ ^{p}	۰/۱۳ ^{p}	۰/۱۱ ^{p}	۰/۱۰ ^{p}	۰/۱۲ ^{E}
۵	۰/۱۹ ^{mno}	۰/۱۶ ^{nop}	۰/۱۳ ^{p}	۰/۲۵ ^{jkl}	۰/۲۰ ^{lmn}	۰/۲۷ ^{ijk}	۰/۲۰ ^{D}
۱۵	۰/۲۰ ^{lmn}	۰/۲۴ ^{klm}	۰/۲۷ ^{ijk}	۰/۳۷ ^{gh}	۰/۳۲ ^{hi}	۰/۳۰^{ij}	۰/۲۹ ^{C}
۳۰	۰/۴۴ ^{f}	۰/۳۸ ^{g}	۰/۳۰ ^{ij}	۰/۵۶ ^{e}	۰/۵۶ ^{e}	۰/۵۷ ^{e}	۰/۴۷ ^{B}
۶۰	۰/۶۸ ^{d}	۰/۷۲ ^{d}	۰/۸۶ ^{c}	۰/۹۳ ^{b}	۰/۹۱ ^{b}	۱/۰۶ ^{a}	۰/۸۶ ^{A}
میانگین	۰/۳۳ ^{b}	۰/۳۲ ^{b}	۰/۳۳ ^{b}	۰/۴۵ ^{a}	۰/۴۲ ^{a}	۰/۴۶ ^{a}	
	تتمه						
۰	۰/۱۱ ^{n}	۰/۰۶ ^{n}	۰/۱۰ ^{n}	۰/۰۵ ^{n}	۰/۰۶ ^{n}	۰/۱۰ ^{n}	۰/۰۸ ^{E}
۵	۱/۱۷ ^{ij}	۱/۰۳ ^{jkl}	۱/۰۰ ^{jkl}	۰/۸۳ ^{lm}	۰/۹۲ ^{kl}	۰/۶۴ ^{m}	۰/۹۳ ^{D}
۱۵	۱/۶۶ ^{g}	۱/۳۳ ^{hi}	۱/۲۱ ^{hig}	۰/۸۴ ^{lm}	۱/۳۶ ^{hi}	۱/۲۷ ^{hi}	۱/۲۸ ^{C}
۳۰	۱/۹۸ ^{ef}	۲/۳۷ ^{c}	۱/۹۰ ^{ef}	۱/۱۳ ^{ijk}	۱/۸۳ ^{fg}	۱/۱۵ ^{ij}	۱/۷۳ ^{B}
۶۰	۲/۲۱ ^{cd}	۲/۷۴ ^{b}	۳/۰۹ ^{a}	۲/۳۶ ^{c}	۲/۰۸ ^{de}	۱/۴۳ ^{h}	۲/۳۲ ^{A}
میانگین	۱/۴۳ ^{a}	۱/۵۱ ^{a}	۱/۴۶ ^{a}	۱/۰۴ ^{c}	۱/۲۵ ^{b}	۰/۹۱ ^{c}	

میانگین‌هایی که در هر ستون و یا در هر ردیف دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن فاقد تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

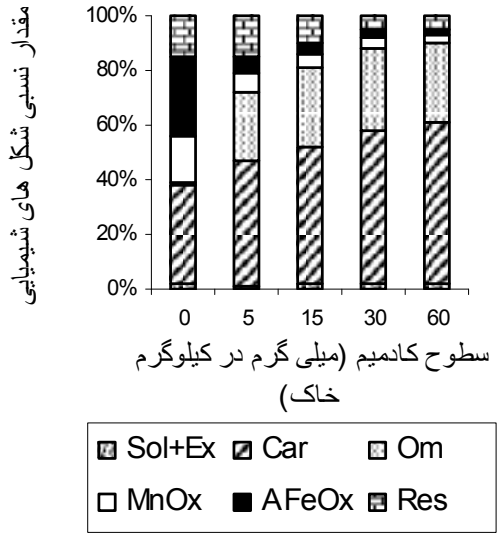
nd : غیر قابل تشخیص (کمتر از حد تشخیص دستگاه جذب اتمی یعنی کمتر از ۰/۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]



شکل ۱. مقدار نسبی شکل‌های شیمیایی کادمیم با افزایش سطوح این فلز در بافت لوم رسی و زمان ۱۶ هفته

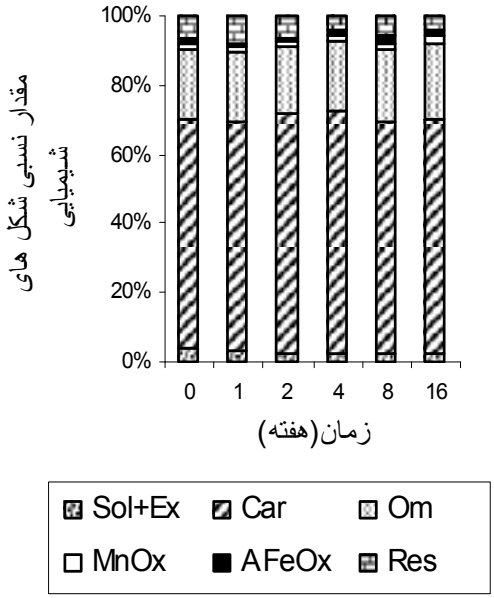


شکل ۲. مقدار نسبی شکل‌های شیمیایی کادمیم با افزایش سطوح این فلز در بافت لوم شنی و زمان ۱۶ هفته

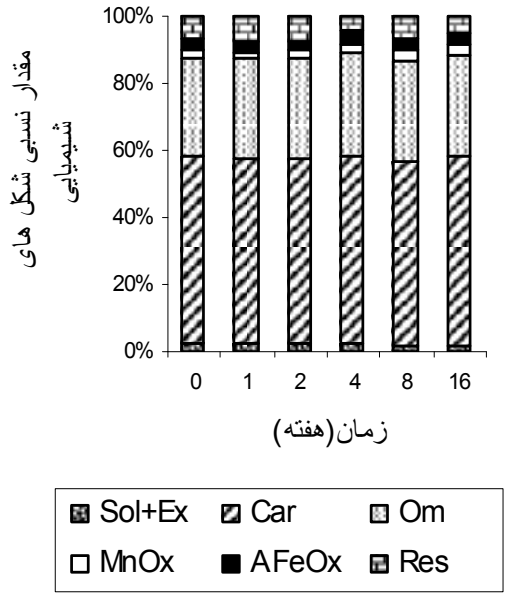
بررسی شکل‌های شیمیایی کادمیم با گذشت زمان نشان دهنده تغییرات معنی داری بود، البته با گذشت زمان بعضی شکل‌ها روند ثابتی را به طور صعودی یا نزولی دنبال می‌کردند و بعضی دیگر دارای نوساناتی بودند. به طور مثال در هر دو بافت و در تمام سطوح پس از گذشت ۱۶ هفته شکل محلول + تبادلی به طور معنی‌داری کاهش یافت و به ترتیب برای بافت‌های لوم رسی و لوم شنی از میانگین ۰/۷۱ و ۱/۰۴ به ۰/۴۴ و ۰/۶۱ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک رسید. در مقابل، در هر دو بافت، غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز با گذشت زمان کاهش یافت. غلظت سایر شکل‌های شیمیایی کادمیم با گذشت زمان نوساناتی داشت و با کمی کاهش و یا کمی افزایش همراه بود (جدول‌های ۴و ۵). کاهش غلظت شکل محلول + تبادلی و افزایش غلظت کادمیم متصل به اکسیدهای منگنز امری دور از انتظار نبود، زیرا تغییر شکل‌های محلول فلزات با گذشت زمان و تبدیل آنها به شکل‌های با حلالیت کمتر توسط پژوهشگران دیگری نیز گزارش شده است (۱۰، ۱۵، ۱۹، ۲۰، ۲۱، و ۲۷). هر چند برای نوسان غلظت سایر شکل‌ها دلیل قانع کننده‌ای وجود نداشت اما شاید بتوان نوسانات سایر شکل‌ها را به پویایی ترکیبات آلی خاک نسبت داد. به عبارتی دیگر تشکیل و تجزیه کمپلکس‌های مواد آلی با فلز می‌تواند در ترکیب و یا رهاسازی فلزات در خاک مؤثر باشد و به نوبه خود بر مقدار نسبی سایر شکل‌ها اثر بگذارد. از طرفی نکته بسیار قابل توجه در مورد تغییر شکل‌های شیمیایی کادمیم با گذشت زمان این بود که قبل از شروع آزمایش انتظار می‌رفت که پس از افزودن کادمیم به خاک مقدار قابل توجهی از این فلز وارد شکل محلول و تبادلی شده و بعد به تدریج از این شکل‌ها جدا شده و وارد سایر اشکال شود، اما بر خلاف انتظار بلافاصله پس از افزودن کادمیم به خاک بخش عمده‌ای از این فلز وارد جزء کربناتی و آلی شد. به طوری که در اکثر تیمارها و در تمامی زمان‌ها به طور متوسط بیش از ۸۰ درصد از کادمیم افزوده شده به خاک وارد شکل‌های کربناتی و آلی شد و تقریبا تا پایان آزمایش نسبت خود را حفظ کرد. به عبارتی دیگر گرچه سایر شکل‌ها با گذشت زمان تغییراتی را نشان می‌دادند ولی این تغییرات با در نظر گرفتن بخش قابل توجهی از کادمیم که وارد شکل کربناتی و آلی شده ناچیز بود. به عنوان مثال شکل‌های ۳ و ۴ درصد شکل‌های شیمیایی کادمیم و تغییرات آنها را با زمان

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]



شکل ۳. مقدار نسبی شکل‌های شیمیایی با گذشت زمان در بافت لوم رسی و در سطح ۳۰ کادمیم



شکل ۴. مقدار نسبی شکل‌های شیمیایی کادمیم با گذشت زمان در بافت لوم شنی و سطح ۳۰ کادمیم

در سطح ۳۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم و برای دو بافت مورد آزمایش نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که سایر سطوح نیز از روند تقریباً مشابهی پیروی می‌کردند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ظرفیت کربنات کلسیم برای نگه‌داری کادمیم در خاک‌های مورد مطالعه بالاست و این خاک‌ها قادرند که مقادیر زیاد این فلز را به سرعت تثبیت کرده و به شکل کربناتی تبدیل کنند. در هر حال تبدیل بخش عمده کادمیم کاربردی به شکل‌های شیمیایی که توسط عصاره‌گیرهای نسبتاً ضعیف عصاره‌گیری می‌شوند و عدم تغییر این شکل‌ها در کوتاه مدت نشان دهنده قابلیت استفاده زیستی بالای کادمیم، به خصوص در خاک‌های سبک بافت می‌باشد. بنابراین در خاک‌هایی که با کادمیم آلوده شده‌اند نیاز به توجه بیشتر به اثرات زیست محیطی این فلز و ورود آن به زنجیره غذایی احساس می‌شود. توصیه می‌شود که در خاک‌های آلوده شده با کادمیم و یا خاک‌هایی که مقادیری از این فلز را به صورت کمپوست یا لجن فاضلاب دریافت می‌کنند، هر ساله سطوح قابل استفاده این فلز اندازه‌گیری و میزان جذب توسط گیاهان کشت شده در این خاک‌ها تعیین شود، تا از ورود این عنصر به زنجیره غذایی و عبور از حدود بحرانی جلوگیری شود.

منابع مورد استفاده

۱. حسینی ، س . م .ط . و ش. حاج رسولی‌ها . ۱۳۷۴ . تعیین فرم‌های شیمیایی غالب عناصر سنگین در خاک اطراف کارخانه ذوب آهن اصفهان و رسوبات تبخیری به روش عصاره‌گیری متوالی. خلاصه مقالات چهارمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، صفحه ۱۶۸-۱۶۹ .

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]

۲. ثواقبی ، غ. ر. و ج. ملکوتی .۱۳۷۹. اثرات روی و کادمیم بر غلظت عناصر و ترکیب شیمیایی دانه گندم. آب وخاک ۱۲ (۹): ۶۴-۶۵.

۳. خدیوی ، ا. ، م. افیونی و ح . شریعتمداری . ۱۳۸۲ . اثرات تجمعی و باقیمانده کود کمپوست بر اشکال شیمیایی فلزات سنگین در یک خاک آهکی . خلاصه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران، رشت، صفحه ۵۹۳- ۵۹۵ .

۴. کریمیان ، ن. ع. (مترجم) .۱۳۷۱. *شیمی خاک*. جلد اول : مبانی. مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

۵. کوچی ، م. و ا. فتوت . ۱۳۸۲. تعیین شکل‌های شیمیایی عناصر سنگین نیکل ، کبالت ، مس و روی در خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب . خلاصه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران، رشت، صفحه ۶۵۶-۶۵۷ .

۶. مجللی ، ح. (مترجم) . ۱۳۶۶. *شیمی خاک*. مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

7. Allison, L. E. and C. D. Moodie. 1965. Carbonate. PP. 1379-1396. *In*: C. A. Black et al. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Monograph No. 9, Agron., Madison, WI.
8. Antoniadis, N. and B. J. Alloway. 2001. Availability of Cd, Ni and Zn to rye grass in sewage sludge treated soils at different temperatures. Water, Air and Soil Pollut. 132:201-204.
9. Basta, N. T., R. Gradwohl, K. L. Snethen and J. L. Schroder. 2001. Chemical immobilization of lead, zinc and cadmium in smelter-contaminated soils using biosolids and rock phosphate. J. Environ. Qual. 30:1222-1230.
10. Bell, P. F., B. R. James and R. L. Chaney. 1991. Heavy metals extractability in long-term sewage sludge and metal salt amended soils. J. Environ. Qual. 20:481-486.
11. Bouyoucos, C. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle-size analysis of soil. Agron. J. 54:406-465.
12. Brallier, S., R. B. Harrison, C. L . Henry and X. Dongsen. 1996. Liming effects on availability of Cd, Cu, Ni and Zn in a soil amended with sewage sludge 16 years previously. Water, Air and Soil Pollut. 86 : 195-206.
13. Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. PP. 891-901. *In*: C. A. Black et al. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Monograph No. 9, Agron., Madison, WI.
14. Haghiri, F. 1974. Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc, and soil temperature. J. Environ. Qual. 3: 180-183.
15. Hooda, P. S. and B. J. Alloway. 1993. Effects of time and temperature on the bioavailability of Cd and Pb from sludge- amended soils. J. Soil Sci. 44:97-110.
16. Jackson, M. L. 1958. Soil Chemical Analysis. Prentice & Hall Inc. Pub., Englewood Cliffs, NJ.
17. Kuo, S. and A. S. Baker. 1980. Sorption of copper, zinc, and cadmium by some acid soils . Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 969-974.
18. Kuo, S., E.J. Jellum and A.S. Baker. 1985. Effect of soil type and sludge application on zinc and cadmium availability to Swiss chard. Soil Sci. 139: 122-130.
19. Lim, T. T., J. H. Tay and C. I. Teh. 2002. Contamination time effect on lead and cadmium fractionation in a tropical coastal clay. J. Environ. Qual. 31: 806-812.
20. Ma, L. Q., L. Angela and G. N. Rao. 1997. Effect of incubation and phosphate rock on lead extractability and speciation in contaminated soils. J. Environ. Qual. 26:801-807.
21. 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.
22. Mahler, R. J., F. T. Bingham, A. L. Page and J. A. Ryan. 1982. Cadmium-enriched sewage sludge application to acid and calcareous soils . J. Environ. Qual. 11: 694-700.
23. McGowen, S. L., N. T. Basta and G. O. Brown. 2001. Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil. J. Environ. Qual. 30:493-500.
24. McLaren, R. G., C. A. Backes, A. W. Rate and R. S. Switt. 1998. Cadmium and cobalt desorption kinetics from soil clays. Effect of sorption period. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:332-337.
25. 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.
26. Petruzzelli, G. 1996. Heavy metals in compost and their effect on soil quality. PP. 213-223. *In*: M. Bertodi et al. (Ed.), The Science of Composting . 1st Ed., part 1, Blakie Academic and Professional, Glasgow, UK.
27. 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.
28. Singh, J. P., S. P. S. Karwasra and M. Singh. 1988. Distribution and forms of copper, iron, manganese, and zinc in calcareous soils of India. Soil Sci. 146:359-366.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]

29. Sloan, J. J., R. H. Dowdy, M. S. Dolan and D. R. Linden. 1997. Long- term effect of biosolids application on heavy metal bioavailability in agricultural soils. J. Environ. Qual. 26: 966-974.
30. Sposito, G., L. J. Lund and A. C. Chang. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in soil phases. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 260-264.
31. Tessier, A., P. G. C. Campbell and M. Bission. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particular trace metals. Anal. Chem. 51:844-851.
32. Yasrebi, J., N. K. Karimian, M. Maftoun, A. Abtahi and A. M. Sameni. 1994. Distribution of zinc forms in highly calcareous soils as influenced by soil physical and chemical properties and application of zinc sulfate. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 25:2133-2145.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1386.11.1.8.5]