

اثر مواد آلی و زمان انکوباسیون بر شکل‌های شیمیایی کادمیم (Cd) در یک خاک آهکی

رحیم محمدزاده کرکوق^{۱*}، مصطفی چرم^۲، عبدالامیر معزی^۲، مجتبی نوروزی مصیر^۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۷

تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۳۱

۱- دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: r.mohammadzadeh.k@gmail.com

چکیده

در این مطالعه اثر دو نوع ماده آلی شامل کود گاوی و کمپوست بقایای باگاس نیشکر بر روی شکل‌های شیمیایی کادمیم خاک در طول سه دوره زمانی روز مورد بررسی قرار گرفت. نمونه خاک با اسپری کردن محلول نمک کادمیم به سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رسیده و پس از گذشت ۹۰ روز، مقادیر ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار از مواد آلی مذکور به خاک اضافه گردید. سپس در زمان‌های ۱، ۳۰ و ۶۰ روز پس از اضافه کردن مواد آلی، برخی ویژگی‌های شیمیایی و نیز شکل‌های شیمیایی کادمیم در نمونه‌های خاک بر اساس روش عصاره‌گیری دنباله‌ای تسیر تعیین شدند. نتایج نشان داد که بیشترین شکل کادمیم در همه تیمارها به شکل کربناتی اختصاص داشت و بر اثر استفاده از هر دو نوع ماده آلی و به‌ویژه کود گاوی، مقدار کادمیم متصل به مواد آلی و نیز کادمیم محلول و تبادل‌ی به دلیل افزایش مقدار کربن آلی کل (TOC) و محلول (DOC) به‌طور معناداری ($p < 0.05$) افزایش یافت و مقدار کادمیم متصل به کربنات‌ها به‌ویژه در خاک تیمار شده با ۵۰ تن در هکتار کود گاوی به‌طور معناداری ($p < 0.05$) کاهش یافت. از طرف دیگر در همه نمونه‌های خاک، اثر گذشت زمان تنها بر مقدار کادمیم متصل به مواد آلی و کربنات‌ها معنادار شد. افزودن هر دو نوع ماده آلی و به‌ویژه کود گاوی باعث کاهش معنادار ($p < 0.05$) درصد فاکتور تحرک کادمیم از ۵۷/۶ درصد در تیمار شاهد به ۴۳/۹ و ۴۰/۸ درصد به‌ترتیب در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ تن کود گاوی و ۴۹/۶ و ۴۶/۹ درصد در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار کمپوست باگاس شد. در نهایت چنین نتیجه‌گیری شد که افزودن کودهای دامی و بقایای گیاهی پوسیده شده به خاک باعث کاهش اجزاء با زیست‌فراهمی بالای کادمیم، به‌ویژه اجزاء کربناتی، نسبت به سایر شکل‌های شیمیایی این فلز و متعاقباً کاهش تحرک کادمیم در خاک شدند.

واژه‌های کلیدی: انکوباسیون، جزءبندی، زمان، کادمیم، مواد آلی

Effects of Organic Amendments and Incubation Time on Cadmium (Cd) Chemical Fractions in a Calcareous Soil

R Mohammadzadeh Karkaragh^{1*}, M Chorom², AA Moezzi², M Norouzi Masir³

Received: 2016.07.28

Accepted: 2017.06.21

¹- Ph.D Student, Dep. of Soil Sci., Faculty of Agric., Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

²-Assoc. Prof., Dep. of Soil Sci., Faculty of Agric., Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

³-Assist. Prof., Dep. of Soil Sci., Faculty of Agric., Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

*Corresponding Author, Email: r.mohammadzadeh.k@gmail.com

Abstract

Effects of two organic amendments, cow manure and bagasse compost of sugarcane, on the chemical fractions of cadmium in soil were investigated at three incubation times in the present study. Soil sample was polluted with 50 mg kg⁻¹ of cadmium by spraying the cadmium salt and after 90 days 25 and 50 tons ha⁻¹ of the organic amendments were added to the soil. Some of the soil chemical properties and contents of chemical fractions of cadmium were determined by sequential extraction method of Tessier after 1, 30 and 60 days from the date of adding the organic amendments. The most fraction of cadmium in the all of the treatments was observed in the carbonate- fraction and the soluble and exchangeable- and organic matter- fractions of cadmium were significantly ($p < 0.05$) increased by use of the both amendments especially by cow manure, due to increase of the total (TOC) and dissolved (DOC) organic carbon, also the content of the carbonate- fraction of cadmium was decreased especially in the soil treated with 50 tons ha⁻¹ manure, significantly ($p < 0.05$). On the other hand, the effect of incubation time was significant only on organic matter- and carbonate- fractions of cadmium. Adding the both amendments led to a significant ($p < 0.05$) decrease of cadmium mobility factor from 57.6% in the control to 43.9% and 40.8% in the 25 and 50 tons ha⁻¹ of manure and also to 49.6% and 46.9% in the 25 and 50 tons ha⁻¹ of bagasse compost treatments, respectively. Finally, it was deduced that adding the decayed manure and plant residues to the soil led to decrease the cadmium fractions with higher bioavailability, specially carbonate fraction, related to the other chemical fractions of the metal and also decrease the cadmium mobility in soil.

Keywords: Cadmium, Fractionation, Incubation, Organic matter, Time

مقدمه

سنگین و اجزای آلی و معدنی خاک تأثیر قابل توجهی بر روی تحرک و متعاقباً زیست فراهمی و سمیت این عناصر بر جانداران می‌گذارد (آنتونیادیس و همکاران ۲۰۰۷). تحقیقات بسیار زیادی در رابطه با کاهش آلودگی فلزات سنگین در خاک با استفاده از مواد آلی نظیر کودهای حیوانی و بقایای گیاهی برای تثبیت این آلاینده‌ها انجام شده است (خدیوی بروجنی و همکاران ۱۳۸۶، حسینیان

فلزات سنگین آلاینده‌های سمی هستند که در نتیجه فعالیت‌های مختلفی نظیر فعالیت‌های صنعتی، معدن‌کاری و کشاورزی وارد محیط زیست می‌شوند. رفتار فلزات سنگین در خاک و میزان خطری که برای انسان و سایر جانداران ایجاد می‌کنند به شکل و اجزای شیمیایی این فلزات در خاک بستگی دارد. پیوند بین فلزات

شکل‌های شیمیایی یا جزءبندی فلزات در خاک می‌گذارند. جزءبندی عبارت است از تعیین شکل‌های شیمیایی یک عنصر در فاز جامد خاک. جزءبندی فلزات سنگین در خاک به دو شکل مستقیم (روش‌های دستگاهی) که معمولاً نیاز به دستگاه‌های پیشرفته و هزینه بالایی دارد، و غیر مستقیم (عصاره‌گیری تک‌مرحله‌ای و عصاره‌گیری دنباله‌ای) انجام می‌گیرد. مطالعات متعددی نشان می‌دهد که استفاده مطلق از یک عصاره‌گیر تک مرحله‌ای جهت اندازه‌گیری قابلیت زیست‌فراهمی فلز حاوی اطلاعات کامل و دقیق نمی‌باشد (والکر و همکاران ۲۰۰۳). اما فرآیند عصاره‌گیری متوالی عبارت است از استفاده از یک سری ترکیبات عصاره‌گیر مانند برخی نمک‌ها و برخی از اسیدها که قدرت آنها در مراحل متوالی برای خارج کردن فلز از مکان‌هایی که به شکل محکم‌تر به سطوح پیوند شده‌اند، افزایش پیدا می‌کند. امروزه به دلیل فقدان یک روش قابل اعتماد جهانی، عصاره‌گیری دنباله‌ای به شکل قابل توجهی برای ارزیابی مقادیر شکل‌های قابل دسترس فلز برای گیاه مورد استفاده قرار گرفته است (آنستروم و پارکر ۱۹۹۹).

از آنجا که خاک یک محیط پویا می‌باشد، هرگونه تغییر در شرایط محیطی از جمله تغییر مقدار و نوع مواد آلی و نیز گذشت زمان و تجزیه مواد آلی توسط ریزجانداران می‌تواند سبب تغییر در شکل‌های شیمیایی فلزات و در نهایت منجر به تغییر رفتار آنها در خاک گردد. لذا هدف از انجام این مطالعه بررسی تغییرات زمانی شکل‌ها و اجزای شیمیایی فلزات سنگین (کادمیم) در خاک تأثیر مواد آلی با منشأ کود حیوانی و بقایای گیاهی با استفاده از عصاره‌گیری متوالی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک و مواد آلی

این مطالعه به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار شامل دو نوع ماده آلی (کمپوست باگاس نیشکر: B و کود گاوی: M) با دو سطح (۲۵ و ۵۰ تن در هکتار) و سه زمان انکوباسیون مواد آلی (۱ روز، ۳۰ روز و ۶۰ روز) و یک تیمار شاهد (بدون

رستمی و همکاران ۱۳۹۲، آبوت و همکاران ۲۰۰۱، تسیر ۱۹۷۹). اثر مواد آلی بر تثبیت و جذب یا آزادسازی و اجذب فلزات سنگین در خاک بسیار پیچیده است و به نوع ماده آلی، میزان پوسیدگی و تجزیه ماده آلی، ترکیب ماده آلی، نوع و مقدار فلز سنگین، pH خاک و بسیاری عوامل دیگر بستگی دارد (والکر و همکاران ۲۰۰۳). مواد آلی با درجه پوسیدگی بالا می‌توانند زیست‌فراهمی و تحرک فلزات سنگین را در خاک‌های آلوده به این فلزات از طریق واکنش‌های جذب سطحی کاهش دهند (شومن ۱۹۹۹)؛ در حالی که مواد آلی با مقدار کربن آلی محلول بیشتر و حاوی اسیدهای آلی با وزن کم نظیر کودهای دامی تازه و لجن فاضلاب باعث ورود بیشتر فلزات به فاز محلول خاک و در نتیجه افزایش زیست‌فراهمی فلزات می‌شوند. از طرف دیگر مواد آلی در طول زمان دستخوش تجزیه به وسیله ریزجانداران خاک شده و بنابراین ویژگی‌های این مواد در خاک دائماً در حال تغییر و تکامل می‌باشد (ریحانی‌تبار و همکاران ۱۳۸۵، ناگونوما و همکاران ۱۹۹۳). بکت و همکاران (۱۹۷۹) با ارائه نظریه بمب زمانی^۱ به افزایش قابلیت جذب فلزات سنگین بعد از تجزیه کودهای آلی در خاک اشاره نموده و بیان کردند که بعد از تجزیه ترکیبات آلی، روند آزادسازی فلزات سنگین، روندی شبیه به افزودن نمک معدنی فلزات به خاک را طی می‌کند. کوری و همکاران (۱۹۸۷) اشاره داشتند که ویژگی‌های جذبی فلزات سنگین در کودهای آلی زمانی که وارد خاک می‌شوند، بیشتر تحت تأثیر بخش معدنی این ترکیبات قرار می‌گیرد. ابراهیمی (۱۳۸۰) عنوان کرد که اثر باقی‌مانده تیمارهای مختلف کود آلی بر غلظت قابل جذب عناصر سرب، کادمیم و کبالت در خاک، با افزایش مقدار وزنی کود، روندی افزایشی داشت ولی این تغییرات نسبت به شاهد اختلاف معناداری نشان نداد که احتمالاً با گذشت زمان این فلزات سنگین به شکل‌های غیرمحلول رسوب کرده و یا در ساختار کانی-ها و ترکیبات آلی پایدار جذب شده‌اند. بنابراین مواد آلی با منشأ مختلف با توجه به تفاوت در نوع ترکیبات و گروه‌های عاملی و نیز سرعت تجزیه، تأثیر زیادی بر

^۱ - Time bomb

زمانی که pH به حدود ۴ تا ۵ برسد، شسته شد و در نهایت در دمای زیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. برای تعیین مقدار فولویک اسید در نمونه‌ها از روش قلیایی (کارتر و کرکوریچ، ۲۰۰۶) استفاده شد. نسبت هوموسی شدن (HR) و شاخص هوموسی شدن (HI) بصورت زیر محاسبه شدند (امیر و همکاران، ۲۰۰۸):

$$HR = [(HA + FA)/TOC] \times 100$$

$$HI = (HA/TOC) \times 100$$

مواد آلی مورد استفاده در این مطالعه شامل کمپوست باگاس نیشکر و کود گاوی در دو سطح (۲۵ و ۵۰ تن در هکتار) بودند که پس از هواخشک شدن و الک شدن (به منظور افزایش سطح ویژه) و تعیین برخی ویژگی‌های آنها (جدول ۱)، برای اعمال به نمونه‌های خاک آلوده شده به کادمیم آماده گردیدند.

آماده‌سازی تیمارهای آزمایشی

نمونه خاک به‌طور مصنوعی و با اسپری کرن محلول حاوی نمک کلرید کادمیم به سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسانده شد و خاک به مدت ۹۰ روز در آزمایشگاه در دمای $25 \pm 3^\circ\text{C}$ انکوبه شد (شیرزاده و همکاران ۱۳۹۲، دیاز-رایینا و بات ۱۹۹۶). پس از گذشت ۹۰ روز از انکوباسیون خاک با ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیم، ۲/۵ کیلوگرم از خاک در گلدان‌های پلاستیکی ریخته شده و مواد آلی مورد نظر با نسبت‌های ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار به هر گلدان اضافه گردید. تیمارهای مورد استفاده شامل C_0 : خاک شاهد، C_{25B} : خاک تیمار شده با ۲۵ تن در هکتار کمپوست بقایای نیشکر، C_{50B} : خاک تیمار شده با ۵۰ تن در هکتار کمپوست بقایای نیشکر، C_{25M} : خاک تیمار شده با ۲۵ تن در هکتار کود گاوی و C_{50M} : خاک تیمار شده با ۵۰ تن در هکتار کمپوست بقایای نیشکر بودند. در مدت زمان خوابانیدن، پس از تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه با روش وزنی، رطوبت خاک در طول آزمایش در ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه حفظ شد (کلمنته و برنال، ۲۰۰۶).

افزودن کود در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر مقادیر مختلف مواد آلی با منشاء گیاهی و حیوانی و گذشت زمان بر جزءبندی شیمیایی کادمیم و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک، نمونه‌برداری از خاک غیر آلوده به کادمیم از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران انجام شد. خاک نمونه‌برداری شده بعد از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی متری عبور داده شد و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن شامل بافت خاک به روش هیدرومتری (گی و بادر، ۱۹۸۶)، pH و EC به ترتیب در گل و عصاره گل اشباع، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات سدیم در $pH=8/2$ (چاپمن ۱۹۶۵)، کربنات کلسیم به روش تیتراسیون (آلیسون و مودیه، ۱۹۶۵)، نیتروژن کل به روش کلدال (گوپتا، ۱۹۹۹)، کربن آلی خاک (TOC) به روش والکی-بلک (نلسون و سامرز ۱۹۸۲) اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری کربن آلی محلول (DOC^c) از عصاره دو به یک خاک استفاده شد (کوره و همکاران ۱۹۹۹). سوسپانسیون در دمای اتاق به مدت دو ساعت تکان داده و سپس پنج دقیقه سانتریفیوژ شده و محلول صاف رویی با استفاده از کاغذ صافی قطر ۰/۴۵ میکرومتر جدا شد. مقدار کربن آلی با روش والکی-بلک برآورد شد.

اسید هیومیک (HA) و اسید فولویک (FA) در نمونه خاک با روش اشنایتزر (۱۹۸۲) استخراج و اندازه‌گیری شدند. برای این منظور نمونه خاک در لوله پلی اتیلنی با نسبت ۱۰:۱ (مایع/جامد) با NaOH نیم مولار مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت با دور rpm ۱۵۰ شیک شد. به منظور جداسازی فاز محلول از فاز رسوب، نمونه با دور rpm ۳۰۰۰ شیک شد. سپس به منظور جداسازی HA از FA، pH محلول بالای با HCl ۶ مولار به کمتر از ۲ رسانده شد تا اسید هومیک رسوب کرده و از فولویک اسید جداسازی شود. اسید هومیک جداسازی شده با HCl/HF ۰/۳ و ۰/۱ مولار خالص سازی و با آب مقطر تا

³ Humification rate

⁴ Humification index

¹ Total organic carbon

² Dissolved organic carbon

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و مواد آلی مورد مطالعه.

کمیوست باگاس	کود گاوی	خاک	
-	-	۴۷	شن (%)
-	-	۳۱	سیلت (%)
-	-	۲۲	رس (%)
-	-	Loam	بافت
-	-	۴۳/۹	کربنات کلسیم (%)
-	-	۱۱/۸	CEC (cmol _c kg ⁻¹)
۴/۷	۶/۸	۱/۸	EC (dS m ⁻¹)
۷/۶۹	۷/۸۸	۷/۴۲	pH
۴۹/۳	۳۰/۱	۰/۶۹	کربن آلی کل (%)
۳/۹۰	۵/۵۹	۰/۲۱	کربن آلی محلول (mg kg ⁻¹)
۰/۷۹	۱/۶۴	۰/۰۳	N (%)
۶۱/۱۴	۱۸/۳۵	۲۳/۴	C/N
۴/۱	۲/۹	۰/۱۵	فولویک اسید (%)
۱/۸	۲/۲	۰/۰۳	هومیک اسید (%)
۳/۶۵	۷/۳۱	۴/۳۴	شاخص هوموسی شدن (HI)
۱۲/۰	۱۶/۹	۲۶/۰۸	نسبت هوموسی شدن (HR)
< ۰/۰۵	< ۰/۰۵	< ۰/۰۵	کادمیم (mg kg ⁻¹)

جدول ۲- مراحل تعیین اجزای شیمیایی کادمیم در نمونه‌های خاک به روش تسیر و همکاران (۱۹۷۹).

مرحله	جزء شیمیایی کادمیم	روش عصاره‌گیری
F ₁	شکل محلول و تبدلی	۱ گرم از نمونه خاک به مدت ۱ ساعت با ۸ میلی‌لیتر محلول کلرید منیزیم ۱ مولار در pH = ۸ و دمای ۲۵ °C شیک شد.
F ₂	شکل کربناتی	خاک باقی‌مانده از مرحله اول به مدت ۵ ساعت با ۸ میلی‌لیتر محلول استات سدیم ۱ مولار در pH = ۵ و دمای ۲۵ °C شیک شد.
F ₃	شکل اکسیدهای آهن و منگنز	خاک باقی‌مانده از مرحله دوم به مدت ۲ ساعت با ۲۰ میلی‌لیتر محلول هیدروکسید آمین هیدروکلراید ۰/۰۴ مولار تهیه شده در اسید استیک ۲۵ درصد در pH = ۲ و دمای ۹۶ °C شیک شد.
F ₄	شکل مواد آلی	الف- خاک باقی‌مانده از مرحله سوم به مدت ۲ ساعت شیک شد. ب- ۳ میلی‌لیتر محلول آب اکسیژنه ۳۰ درصد در دمای ۲۵ °C به مدت ۳ ساعت شیک شد. ج- ۵ میلی‌لیتر استات آمونیوم ۳/۲ مولار در دمای ۲۵ °C به مدت ۳۰ دقیقه شیک شد.
F ₅	شکل باقی‌مانده (بدون سانتیفریوژ).	۷/۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۱۲ مولار + ۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۱۶ مولار در دمای ۲۵ °C به مدت ۱۶ ساعت نگهداری، سپس به مدت ۲ ساعت تبخیر و تقطیر ملایم و در نهایت سرد و صاف شد.

تعیین اجزای شیمیایی کادمیم در تیمارها به وسیله روش تسیر در زمان‌های مختلف

پس از اضافه کردن و مخلوط نمودن مواد آلی با خاک، از هر تیمار در زمان‌های مختلف (۲۴ ساعت، ۳۰ روز و ۶۰ روز) ۱ گرم از نمونه خاک برداشته شده و جزءبندی شیمیایی کادمیم در خاک با استفاده از روش عصاره‌گیری دنباله‌ای تسیر (۱۹۷۹) با اندکی تغییرات و در مراحل زیر (جدول ۲) انجام شد و مقادیر کادمیم استخراج شده از هر مرحله با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری (مدل GBC SavantAA) شدند:

همچنین به منظور بررسی تغییرات زمانی ویژگی‌های خاک تحت تأثیر مواد آلی و تأثیر این تغییرات بر روی اجزاء شیمیایی کادمیم، مقدار برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل EC، pH، CEC، TOC و DOC در تیمارهای مورد مطالعه نیز در زمان‌های مورد اشاره اندازه‌گیری شدند.

محاسبه فاکتور تحرک (MF) و درصد بازیابی (PR)

شاخص تحرک کادمیم در خاک که بعنوان فاکتور تحرک تعریف می‌شود به روش سالبو و همکاران (۱۹۹۸) محاسبه شد:

$$MF = (F_1 + F_2) / (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5) \times 100$$

همچنین درصد بازیابی (PR) که نسبت مجموع کادمیم استخراج شده در مراحل مختلف عصاره‌گیری به مقدار کل کادمیم اضافه شده به خاک (۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) می‌باشد نیز محاسبه شد.

طرح آزمایشی و آزمون‌های آماری

این مطالعه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد و برای بررسی تغییرات شکل‌های شیمیایی کادمیم در تیمارهای مختلف و زمان‌های خوابانیدن متفاوت و نیز تغییرات برخی از پارامترهای شیمیایی خاک و رابطه آنها با تغییرات شکل‌های شیمیایی کادمیم، داده‌های به دست آمده از آزمایشات با استفاده از نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شده و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

اثر مقادیر مختلف مواد آلی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک در زمان‌های خوابانیدن مختلف

نتایج تجزیه واریانس برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و نیز شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهند که تأثیر مواد آلی بر مقادیر pH، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، کل کربن آلی (TOC)، کربن آلی محلول (DOC) و شکل‌های شیمیایی محلول و تبادل (S&Exc-) و مواد آلی (-OM) کادمیم در خاک در سطح ۱٪ و بر شکل‌های شیمیایی کربناتی (-Car) و باقی‌مانده (-Res) در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده و بر شکل شیمیایی اکسیدهای آهن و منگنز (-Fe&Mn Ox) معنی‌دار نمی‌باشد. همچنین اثر زمان تنها بر روی مقدار کربن آلی کل (TOC) و شکل شیمیایی متصل به مواد آلی کادمیم (-OM) در سطح ۵٪ معنی‌دار می‌باشد و اثر متقابل بین مواد آلی و زمان در همه متغیرهای مورد مطالعه (به استثنای فرم شیمیایی اکسیدهای آهن و منگنز که در سطح ۵٪ معنی‌دار می‌باشد) در سطح ۱٪ معنی‌دار است.

در جدول ۴ مقادیر pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، مقدار کربن آلی کل و مقدار کربن آلی محلول خاک پس از افزودن مقادیر مختلف کود گاوی و کمپوست باگاس نیشکر در زمان‌های خوابانیدن مختلف ارائه شده است. مقایسه مقادیر pH در بین تیمارها نشان می‌دهد که کود گاوی باعث افزایش بیشتر pH خاک شده است. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار pH در تیمارهای دریافت کننده کود گاوی با گذشت زمان با افزایش نسبی مواجه شده است در حالی که در سایر تیمارها مقدار pH با گذشت زمان تفاوت معناداری نمی‌کند.

در رابطه با تأثیر مقادیر مختلف کود گاوی و کمپوست بقایای گیاهی بر روی مقادیر CEC، TOC و DOC خاک مورد مطالعه می‌توان مشاهده نمود که مقدار افزایش CEC و کربن آلی محلول در تیمارهای کود گاوی بیشتر از کمپوست بقایای نیشکر و مقدار کربن آلی (TOC) حاصل از کمپوست باگاس بیشتر از کود گاوی بود ($p < 0.05$). با بررسی مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی

² Percentage of Recovery

¹ Mobility Factor

افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی تیمارهای ۲۵ و ۵۰ تن کود دامی نسبت به ۲۵ و ۵۰ تن کمپوست بقایای نیشکر می‌شود. همچنین با گذشت زمان مقدار کربن آلی در همه تیمارهای دریافت کننده کودهای آلی به‌طور نسبی کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به افزایش فعالیت و تنفس میکروبی در نتیجه افزایش مواد آلی خاک و متعاقباً تجزیه مواد آلی توسط ریزجانداران در طول زمان و آزادسازی کربن به‌صورت CO₂ نسبت داد (آنستروم و پارکر ۱۹۹۹). همچنین علیرغم اینکه کود گاوی مقدار فولویک اسید کمتری از کمپوست بقایای نیشکر دارد (جدول ۱)، اما باعث افزایش بیشتر مقدار DOC تیمارها شده است ($p < 0.05$) که احتمالاً به دلیل pH بالاتر آن می‌باشد که باعث کاهش جذب مواد آلی توسط اکسیدهای آهن و منگنز و سایر سطوح کلوئیدی خاک نظیر کانی‌های رسی و افزایش مواد آلی محلول می‌شود (کلپیز و همکاران ۲۰۰۰). در همه تیمارهای دریافت کننده مواد آلی، با گذشت زمان مقدار کربن آلی محلول نیز افزایش می‌یابد که به دلیل تجزیه بخش سهل‌التجزیه مواد آلی و تبدیل آنها به بخش محلول می‌باشد (ژو و وونگ ۲۰۰۱).

در تیمارهای مختلف مشاهده می‌شود که افزودن مقادیر ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار کود گاوی باعث افزایش مقدار CEC از ۱۱/۸ cmol_c kg⁻¹ در تیمار شاهد به ترتیب به ۱۳/۹ و ۱۵/۶ و افزودن مقادیر ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار کمپوست بقایای نیشکر باعث افزایش مقدار CEC به ترتیب به ۱۳/۴ و ۱۳/۹ cmol_c kg⁻¹ شده است که نشان دهنده تأثیر بیشتر کود گاوی بر روی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود شاخص هوموسی شدن و نسبت هوموسی شدن در کود گاوی بیشتر از کمپوست باگاس نیشکر می‌باشد که نشان دهنده درجه تجزیه و هوموسی شدن بیشتر و متعاقباً فعالیت شیمیایی بیشتر مواد آلی موجود در کود دامی می‌باشد. به‌طور کلی هر چه درجه هوموسی شدن یا تجزیه مواد آلی شدیدتر باشد آنها دارای CEC بیشتری خواهند بود (لوپز و همکاران ۱۹۷۷، آیتکن و همکاران، ۱۹۹۰). در واقع علیرغم اینکه کمپوست بقایای نیشکر نسبت به کود گاوی دارای مقدار کربن و نیز نسبت کربن به نیتروژن بیشتری می‌باشد (جدول ۱)، اما ماده آلی موجود در کود گاوی از نظر شیمیایی فعالتر می‌باشد و همین امر باعث

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر ماده آلی و زمان بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک.

میانگین مربعات						DOC	TOC	CEC	pH	درجه آزادی	منابع تغییرات
- Res (mg kg ⁻¹)	-OM (mg kg ⁻¹)	-Fe&Mn Ox (mg kg ⁻¹)	-Car (mg kg ⁻¹)	-S&Exc (mg kg ⁻¹)							
۲/۶۱۳*	۸/۱۰۳**	۰/۰۹۸ ^{NS}	۴/۵۰۴*	۰/۲۵۱**	۰/۰۳۳**	۵/۳۵**	۵/۹۷**	۰/۰۳۹**	۴	ماده آلی	
۰/۷۵۳ ^{NS}	۰/۸۱۶*	۰/۰۸۲ ^{NS}	۳/۴۹۵ ^{NS}	۰/۰۲۵*	۰/۰۰۵ ^{NS}	۰/۷۰۱*	۰/۹۶۸ ^{NS}	۰/۰۱۴ ^{NS}	۲	زمان	
۱/۹۹۳**	۵/۶۷۴**	۰/۰۹۳*	۴/۱۶۸**	۰/۱۷۵**	۰/۰۲۴**	۳/۸۰۲**	۴/۳۰۲**	۰/۳۱**	۸	ماده آلی* زمان	
۰/۲۰۹	۰/۰۹۰	۰/۲۱	۰/۶۴۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۵۹	۰/۱۹	۰/۰۰۱		خطا	
						*: معناداری در سطح ۰/۰۵			**: معناداری در سطح ۰/۰۱		
									NS: غیر معنادار		

جدول ۴- اثر انواع و مقادیر مختلف مواد آلی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک در تیمارهای مختلف.*

تیمار	زمان خواباندن (day)	pH	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	TOC (g kg ⁻¹)	DOC (mg kg ⁻¹)
C ₀	۱	۷/۴۲ ± ۰/۰۷ ^d	۱۱/۸ ± ۰/۸ ⁱ	۳/۳۶ ± ۰/۰۸ ^k	۰/۲۱ ± ۰/۰۵ ^d
	۳۰	۷/۴۷ ± ۰/۰۷ ^d	۱۱/۶ ± ۰/۵ ⁱ	۳/۳۴ ± ۰/۰۶ ^k	۰/۲۴ ± ۰/۰۷ ^d
	۶۰	۷/۴۵ ± ۰/۰۶ ^d	۱۱/۸ ± ۰/۴ ⁱ	۳/۳۷ ± ۰/۰۴ ^k	۰/۲۲ ± ۰/۰۴ ^d
C _{M25}	۱	۷/۵۴ ± ۰/۰۵ ^{cd}	۱۴/۳ ± ۱/۱ ^{bc}	۵/۰۷ ± ۰/۱۳ ^g	۰/۳۱ ± ۰/۰۴ ^d
	۳۰	۷/۶۵ ± ۰/۰۴ ^{bc}	۱۳/۹ ± ۰/۹ ^{cf}	۴/۳۸ ± ۰/۱۱ ⁱ	۰/۳۶ ± ۰/۰۷ ^d

۰/۳۸ ± ۰/۰۶ ^d	۴/۱۳ ± ۰/۱۵ ⁱ	۱۳/۶ ± ۰/۶ ^{fg}	۷/۵۹ ± ۰/۱۴ ^c	۶۰	C _{B25}
۰/۲۶ ± ۰/۰۵ ^d	۵/۴۳ ± ۰/۱۳ ^f	۱۳/۶ ± ۰/۶ ^{fg}	۷/۵۱ ± ۰/۰۶ ^{cd}	۱	
۰/۲۹ ± ۰/۰۷ ^d	۴/۹۱ ± ۰/۱۷ ^h	۱۳/۴ ± ۰/۶ ^{gh}	۷/۵۷ ± ۰/۱۱ ^c	۳۰	
۰/۳۴ ± ۰/۰۹ ^d	۴/۶۴ ± ۰/۱۶ ^g	۱۳/۱ ± ۱/۲ ^{hi}	۷/۵۶ ± ۰/۰۷ ^c	۶۰	C _{M50}
۰/۴۳ ± ۰/۰۱۲ ^d	۶/۵۵ ± ۰/۲۳ ^c	۱۶/۷ ± ۱/۴ ^a	۷/۶۵ ± ۰/۰۹ ^{bc}	۱	
۰/۵۷ ± ۰/۰۱۵ ^d	۵/۸۴ ± ۰/۳ ^c	۱۵/۶ ± ۱/۳ ^b	۷/۸۱ ± ۰/۱۹ ^a	۳۰	
۰/۵۳ ± ۰/۰۱۳ ^d	۵/۲۹ ± ۰/۱۵ ^f	۱۴/۴ ± ۰/۹ ^{cd}	۷/۷۸ ± ۰/۱۱ ^a	۶۰	C _{B50}
۰/۳۴ ± ۰/۰۰۸ ^d	۷/۲۱ ± ۰/۳۴ ^a	۱۴/۸ ± ۱/۱ ^c	۷/۵۸ ± ۰/۰۹ ^c	۱	
۰/۳۶ ± ۰/۰۱ ^d	۶/۹۳ ± ۰/۲۹ ^b	۱۴/۵ ± ۰/۸ ^{cd}	۷/۷۰ ± ۰/۱۳ ^{ab}	۳۰	
۰/۴۲ ± ۰/۰۱۴ ^d	۶/۴۷ ± ۰/۲۲ ^d	۱۳/۹ ± ۰/۶ ^{cf}	۷/۷۲ ± ۰/۱۴ ^{ab}	۶۰	

* میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون دانکن ($\alpha = 5\%$) تفاوت معناداری ندارند.

اثر نوع و مقدار مواد آلی بر شکل‌های شیمیایی کادمیم در خاک

مقادیر میانگین شکل‌های مختلف شیمیایی کادمیم در تیمارهای مختلف پس از گذشت ۱، ۳۰ و ۶۰ روز از خوابانیدن با تیمارهای مورد بررسی در جدول ۵ نشان داده شده است. فراوانترین جزء شیمیایی کادمیم در خاک مورد مطالعه، به جزء کربناتی (بیش از ۳۰ درصد) اختصاص دارد که دلیل آن را می‌توان به فراوانی کربنات کلسیم فعال در خاک مورد مطالعه (۴۳/۹ درصد) نسبت داد. پس از شکل کربناتی، بیشترین فراوانی کادمیم در خاک به ترتیب به شکل‌های باقی‌مانده (حدود ۱۵ درصد)، شکل اکسیدهای آهن و منگنز (حدود ۱۰ درصد)، شکل محلول و کربناتی (۶ درصد) و نهایتاً شکل ترکیب شده با مواد آلی (حدود ۱ درصد) اختصاص دارد. رجایی و کریمیان (۱۳۸۶) و حسینیان رستمی و همکاران (۱۳۹۲) نیز مشاهده کردند که در خاک‌های ایران که حاوی بخش زیادی کربنات کلسیم معادل می‌باشد، فراوانترین جزء شیمیایی فلزات سنگین کادمیم و سرب در بخش کربناتی مشاهده می‌شود و سایر اجزاء شیمیایی این فلزات بسته به ویژگی‌های خاک نظیر بافت، مقدار مواد آلی و مقدار اکسیدهای آهن و منگنز در رده‌های بعدی قرار دارند. با افزودن مقادیر ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار کود گاوی و کمپوست بقایای نیشکر مشاهده می‌شود که مقدار کادمیم محلول در همه تیمارها به‌ویژه تیمار دریافت کننده ۵۰ تن در هکتار کود گاوی نسبت به تیمار شاهد به‌طور معناداری افزایش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به انحلال

مواد آلی بر اثر افزایش pH (ریحانی تبار و همکاران ۱۳۸۵، ناگونوما و همکاران ۱۹۹۳)، افزایش کربن آلی محلول (جدول ۴) و نیز افزایش مقدار اسیدهای آلی نسبت داد که باعث وا جذب یا رهاسازی کادمیم جذب شده توسط بخش‌های معدنی خاک نظیر بخش کربناتی یا اکسیدهای آهن و رس شده و این کادمیم رها شده را وارد فاز محلول و تبادل و یا فاز مواد آلی می‌کنند (نجفی و جلالی ۲۰۱۵). همچنین در همه تیمارها بخصوص تیمارهای دریافت کننده کود گاوی، مقدار کادمیم کربناتی با افزودن مواد آلی کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به قابلیت جذب بیشتر کادمیم توسط مواد آلی اضافه شده به خاک نسبت داد. خورانا و کانزال (۲۰۱۲)، کلمنته و برنال (۲۰۰۶) و آسنسیو و همکاران (۲۰۱۳) نیز در مطالعات خود مشاهده نمودند که با افزودن مواد آلی به خاک، میزان فلزات سنگین بخش کربناتی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر مقدار کادمیم ترکیب شده با اکسیدهای آهن و منگنز بر اثر افزودن مواد آلی هرچند به‌طور غیرمعنی - داری افزایش یافته است، اما مقدار کادمیم مرتبط با اجزاء آلی به‌طور معنی‌داری افزایش یافته و مقدار کادمیم باقی‌مانده نیز افزایش می‌یابد. کلمنته و برنال (۲۰۰۶) با بررسی اثرات دو ماده آلی شامل کود حیوانی تازه و کمپوست تجزیه شده بر روی جزء بندی شیمیایی فلزات منگنز، روی، مس و سرب در خاک‌های آهکی مشاهده نمودند که با افزودن کود حیوانی تازه که حاوی مقادیر زیادی کربن محلول، فولویک اسید و اسیدهای آلی محلول می‌باشد مقدار فلزات مورد مطالعه به‌ویژه مس در فاز محلول

هومیک اسید بالا نسبت دادند. در جدول ۶، مقادیر ضرایب همبستگی بین پارامترهای شیمیایی مطالعه شده در تیمارهای مختلف و اجزاء شیمیایی کادمیم در خاک نیز ارائه شده‌اند که نشان دهنده تأثیرات معنادار تغییرات pH، CEC، TOC و DOC بر روی مقادیر اجزاء شیمیایی کادمیم در تیمارهای مختلف مواد آلی می‌باشند.

افزایش یافت که علت آن را به تشکیل کلات بین این فلزات و مواد آلی محلول نسبت دادند در حالیکه تیمار ماده آلی تجزیه شده باعث افزایش معنادار مقدار فلزات در فاز ماده آلی خاک و کاهش اجزاء کربناتی و محلول و تبادل‌ی فلزات در خاک شد که دلیل آن را به جذب فلزات سنگین مورد مطالعه توسط مواد آلی تجزیه شده و پایدار با درصد

جدول ۵- مقایسه میانگین شکل‌های شیمیایی کادمیم و فاکتور تحرک و درصد بازیابی در تیمارهای مختلف مواد آلی و زمان‌های خوابانیدن متفاوت (S&Exc: محلول و تبادل‌ی؛ Car: کربناتی؛ Fe&Mn Ox: اکسیدهای آهن و منگنز؛ OM: مواد آلی؛ Res: باقی‌مانده).

تیمار	زمان خوابانیدن (day)	-S&Exc (mg kg ⁻¹)	-Car (mg kg ⁻¹)	-Fe&Mn Ox (mg kg ⁻¹)	-OM (mg kg ⁻¹)	-Res (mg kg ⁻¹)	فاکتور تحرک (%)	درصد بازیابی (%)
C ₀	۱	۳/۲۴ ^{gh}	۱۵/۹۶ ^a	۵/۶۶ ^a	۰/۵۳ ^f	۸/۲۷ ^c	۵۷/۰۴ ^a	۶۷/۳۳ ^b
	۳۰	۳/۱۷ ^h	۱۶/۳۴ ^a	۵/۷۱ ^a	۰/۴۹ ^f	۸/۱۹ ^c	۵۷/۵۵ ^a	۶۷/۸ ^b
	۶۰	۳/۳۵ ^{gh}	۱۶/۱۹ ^a	۵/۵۶ ^a	۰/۵۲ ^f	۸/۳۳ ^c	۵۷/۶۱ ^a	۶۷/۸۴ ^b
CM ₂₅	۱	۳/۶۸ ^{de}	۱۵/۱۹ ^{ab}	۵/۶۹ ^a	۲/۵۵ ^d	۹/۹۴ ^b	۵۰/۹۳ ^{bc}	۷۴/۱ ^a
	۳۰	۳/۷۳ ^{cd}	۱۳/۸۶ ^b	۵/۹۲ ^a	۳/۸۱ ^b	۱۰/۴۶ ^{ab}	۴۶/۵۶ ^c	۷۵/۵۶ ^a
	۶۰	۳/۸۵ ^{bc}	۱۲/۴۱ ^{bc}	۶/۰۱ ^a	۳/۹۳ ^b	۱۰/۸۳ ^{ab}	۴۳/۹۱ ^d	۷۴/۰۶ ^a
CB ₂₅	۱	۳/۴۵ ^{fg}	۱۵/۴۹ ^a	۵/۵۹ ^a	۱/۷۳ ^e	۹/۸۶ ^b	۵۲/۴۴ ^b	۷۲/۲۴ ^{ab}
	۳۰	۳/۵۲ ^{fg}	۱۴/۸۸ ^b	۵/۷۲ ^a	۲/۳۸ ^d	۹/۹۶ ^b	۵۰/۴۷ ^b	۷۲/۹۳ ^{ab}
	۶۰	۳/۵۹ ^{ef}	۱۴/۱۳ ^b	۵/۷۴ ^a	۲/۱۹ ^{de}	۱۰/۰۶ ^{ab}	۴۹/۶۲ ^{bc}	۷۱/۴۲ ^b
CM ₅₀	۱	۳/۹۴ ^{ab}	۱۴/۹۲ ^b	۵/۷۱ ^a	۴/۱۸ ^b	۹/۳۴ ^{bc}	۴۹/۴۸ ^{bc}	۷۶/۲۴ ^a
	۳۰	۴/۰۳ ^{ab}	۱۲/۲۹ ^{bc}	۶/۱۹ ^a	۵/۲۸ ^a	۱۱/۴۳ ^a	۴۱/۶۳ ^d	۷۸/۴۳ ^a
	۶۰	۴/۱۴ ^a	۱۱/۳۷ ^c	۶/۳۸ ^a	۴/۹۷ ^a	۱۱/۱۱ ^a	۴۰/۸۵ ^d	۷۵/۹۴ ^a
CB ₅₀	۱	۳/۶۱ ^{ef}	۱۴/۸ ^{ab}	۵/۶۷ ^a	۳/۱۸ ^c	۹/۶۷ ^b	۴۹/۸۵ ^{bc}	۷۳/۸۶ ^{ab}
	۳۰	۳/۶۵ ^{de}	۱۴/۷۲ ^{ab}	۵/۷۷ ^a	۳/۸۹ ^b	۱۰/۳ ^{ab}	۴۷/۹۳ ^c	۷۶/۶۶ ^a
	۶۰	۳/۶۷ ^{de}	۱۳/۹ ^b	۵/۸۳ ^a	۳/۸۲ ^b	۱۰/۲۱ ^{ab}	۴۶/۹۴ ^c	۷۴/۸۶ ^a

* میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون دانکن ($\alpha = 5\%$) تفاوت معناداری ندارند.

جدول ۶- ضرایب همبستگی (r) برای روابط بین ویژگی‌های شیمیایی خاک و اجزاء شیمیایی کادمیم در خاک.

ضرایب همبستگی (r)				
DOC	TOC	CEC	pH	
۰/۹۱۱**	۰/۴۴۷*	۰/۸۴.**	۰/۳۹۱*	محلول و تبادل‌ی
-۰/۶۷۴**	-۰/۴۰۴*	-۰/۵۵۷**	-۰/۲۴۵ ^{ns}	کربناتی
۰/۰۷۳ ^{ns}	۰/۰۸۸ ^{ns}	-۰/۲۱۴**	۰/۷۳۲**	اکسید آهن و منگنز
۰/۸۳۸**	۰/۶۷۱**	۰/۶۹۸**	۰/۸۹۶**	مواد آلی
۰/۶۱۴**	۰/۴۹۰*	۰/۴۳۷*	۰/۷۹۸**	باقی‌مانده
**: معناداری در سطح ۰/۰۱			ns: غیر معنادار	
			*: معناداری در سطح ۰/۰۵	

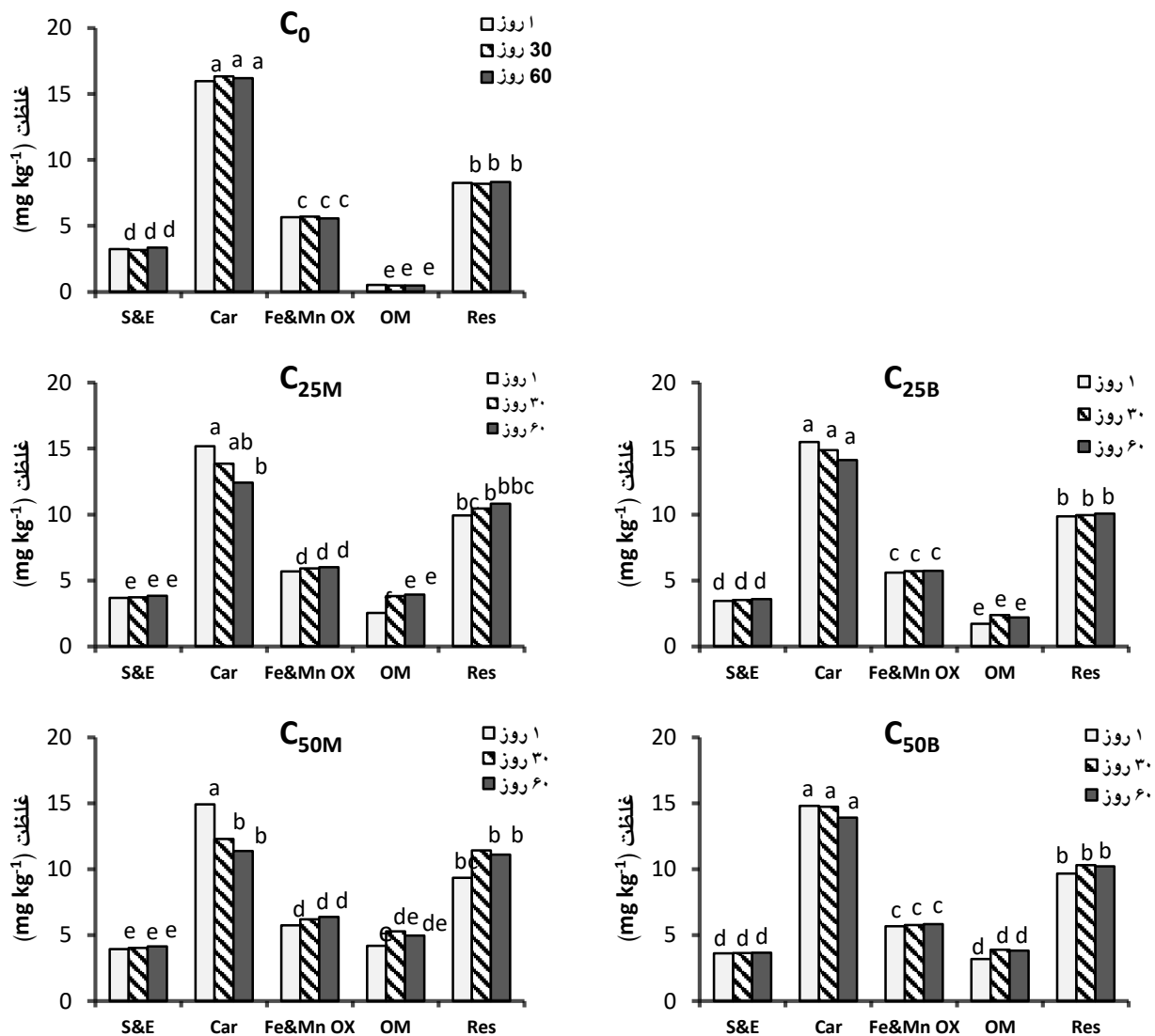
تأثیر زمان خوابانیدن بر اجزاء شیمیایی کادمیم در تیمارهای مختلف

در شکل ۱، تغییرات شکل‌های شیمیایی کادمیم خاک در طول زمان برای تیمارهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل و نیز نتایج ارائه شده در جدول ۵ مشاهده می‌شود که زمان تنها بر روی جزء پیوندیافته کادمیم با مواد آلی تأثیر معناداری گذاشته است و باعث افزایش اجزای آلی کادمیم در زمان‌های خوابانیدن ۳۰ و ۶۰ روز نسبت به زمان خوابانیدن ۱ روز شده است. در سایر موارد هرچند که زمان تأثیر معناداری بر اجزای مختلف کادمیم نداشته است اما می‌توان روندی منظم در افزایش مقدار کادمیم محلول و تبدالی و نیز در کاهش بخش کربناتی بر اثر تجزیه مواد آلی بر اثر فعالیت ریزجانداران خاک و متعاقباً افزایش مقدار مواد آلی محلول و تجزیه کربنات کلسیم (کلمنته و همکاران ۲۰۰۶) مشاهده کرد. محققان علت کاهش بخش کربناتی و محلول و تبدالی فلزات را به برقراری پیوندهای قوی فلزات از طریق فرایندهای جذب سطحی، رسوب و تشکیل کمپلکس با مواد آلی دانستند (راسکین و انسلی ۲۰۰۲). همچنین مقدار جزء شیمیایی باقی‌مانده نیز با افزایش زمان خوابانیدن به‌طور نسبی افزایش یافته است که یکی از دلایل احتمالی آن را می‌توان به تشکیل ارگانومینرال‌ها و در نتیجه جذب مقدار بیشتری از کادمیم نسبت به زمان خوابانیدن اولیه نسبت داد (مینکینا و همکاران ۲۰۰۶).

فاکتور تحرک و درصد بازیابی کادمیم

در جدول ۵، علاوه بر مقادیر شکل‌های شیمیایی کادمیم در تیمارهای مختلف، مقادیر فاکتور تحرک و درصد بازیابی کادمیم برای تیمارهای مختلف نیز ارائه شده است. همانطور که قبلاً گفته شد فاکتور تحرک پارامتری است که نسبت اجزاء با قابلیت انحلال بالا (محلول و تبدالی + کربناتی) به اجزاء با قابلیت انحلال کم کادمیم (اکسیدهای آهن و منگنز + جزء آلی + جزء باقی-مانده) را نشان می‌دهد. افزودن مواد آلی باعث کاهش معنادار مقدار فاکتور تحرک نسبت به تیمار شاهد شده است. در مطالعه پیش رو، افزودن هر دو نوع ماده آلی، و

به‌ویژه کود گاوی که دارای مقادیر بیشتری مواد آلی با پایداری بیشتر (شاخص هموسی شدن ۷/۳) می‌باشد، باعث ایجاد برهمکنش‌ها و کمپلکس‌های بین مواد آلی اضافه شده و کادمیم و متعاقباً افزایش معنادار اجزای با قابلیت انحلال کمتر شده است طوری که مقدار فاکتور تحرک کادمیم از ۵۷/۶ درصد در تیمار شاهد پس از گذشت ۶۰ روز تیمار با ۲۵ و ۵۰ تن کود گاوی به ترتیب به ۴۳/۹ و ۴۰/۸ درصد و ۴۹/۶ و ۴۶/۹ درصد در خاک-های تیمار شده با ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار کمپوست باگاس نیشکر رسیده است. کرمی و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش نمودند که تیمار کردن خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با مواد آلی نظیر بیوپچار که قابلیت جذب و کمپلکس کردن بالایی دارند، باعث کاهش قابل توجه مقدار تحرک و زیست‌فراهمی فلزات سنگین در خاک می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با گذشت زمان میزان فاکتور تحرک کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به تجزیه و معدنی شدن مواد آلی سهل‌التجزیه نظیر کربوهیدرات‌ها و اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم توسط ریزجانداران و آزاد شدن کادمیم کیلیت شده با این مواد و اضافه شدن این کادمیم به اجزاء پایدار مواد آلی نسبت داد (کلمنته و برنال ۲۰۰۶).



شکل ۱- تغییرات شکل‌های شیمیایی کادمیم (S&E: محلول و تبادلی؛ Car: کربناتی؛ F&Mn OX: اکسیدهای آهن و منگنز؛ OM: مواد آلی؛ Res: باقی‌مانده) در زمان‌های خوابانیدن مختلف برای تیمارهای C₀: شاهد، C_{25B}: خاک تیمار شده با ۲۵ تن در هکتار کمپوست بقایای نیشکر، C_{50B}: خاک تیمار شده با ۵۰ تن در هکتار کمپوست بقایای نیشکر، C_{25M}: خاک تیمار شده با ۲۵ تن در هکتار کود گاوی و C_{50M}: خاک تیمار شده با ۵۰ تن در هکتار کمپوست بقایای نیشکر.

توسط کانی‌های غیرمتبلور یا آمورف با قدرت بسیار زیادی جذب می‌شوند (مک براید ۱۹۹۴، اسپارکس، ۱۹۹۵) و این امر باعث کاهش توانایی محلول‌عصاره‌گیر در استخراج فلزات جذب شده توسط این کانی‌ها می‌شود. افزایش میزان درصد بازدهی در تیمارهایی که مواد آلی دریافت کرده‌اند نسبت به تیمار شاهد را می‌توان به تأثیر جزئی مواد آلی بر کادمیم جذب شده بر روی کانی‌های رسی و یا تشکیل ارگانومینرال‌ها نسبت داد که باعث آزاد شدن نسبی کادمیم از برخی از گروه‌های عاملی رس‌ها و

از طرف دیگر، همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقدار درصد بازیابی در همه تیمارهای مورد مطالعه به جز تیمار شاهد (که حدود ۶۷ درصد می‌باشد) بیش از ۷۰ درصد می‌باشد که نشان دهنده توانایی بالای روش عصاره‌گیری چند مرحله‌ای انتخاب شده (روش تسیر، ۱۹۷۹) جهت استخراج اجزاء شیمیایی مختلف کادمیم در تیمارهای مورد مطالعه می‌باشد. عمده کادمیم غیرقابل استخراج در خاک می‌تواند به بخش باقی‌مانده نسبت داده شود که در این بخش فلزات سنگین معمولاً

مواجه شدند در حالی که مواد آلی تأثیر معناداری بر روی مقادیر شکل‌های شیمیایی محلول و تبادل و اکسیدهای آهن و منگنز یا تنمه نداشتند. همچنین گذشت زمان تنها بر روی جزء پیوندیافته کادمیم با مواد آلی تأثیر معناداری گذاشته است و باعث افزایش اجزاء آلی کادمیم در زمان‌های خوابانیدن ۳۰ و ۶۰ روز نسبت به زمان خوابانیدن ۱ روز شده است. هر دو نوع ماده آلی و به‌ویژه تیمار ۵۰ تن در هکتار کود گاوی، باعث کاهش فاکتور تحرک و به‌عبارت دیگر کاهش مقادیر شکل‌های با زیست‌فراهمی بیشتر (مجموع شکل‌های محلول و تبادل و کربناتی) نسبت به شکل‌های با قابلیت زیست‌فراهمی کمتر (مجموع شکل‌های اکسید آهن و منگنز، آلی و باقی-مانده) و در نتیجه تثبیت بیشتر کادمیم در خاک شدند.

کانی‌های آمورف و اضافه شدن آنها به سایر اجزای قابل استخراج توسط عصاره‌گیرهای معمول می‌شود (آسنسیو و همکاران ۲۰۱۳).

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه بیشترین شکل‌های شیمیایی کادمیم در تیمار شاهد شامل شکل‌های کربناتی، باقی‌مانده و اکسیدهای آهن و منگنز بودند و شکل‌های محلول و تبادل و مواد آلی بخش اندکی از کادمیم اضافه شده به خاک را در بر می‌گرفتند. بر اثر مصرف مقادیر ۲۵ و ۵۰ تن کود گاوی و کمپوست باگاس نیشکر و متعاقباً افزایش میزان کربن آلی محلول (DOC) و کربن آلی کل (TOC)، مقدار شکل کربناتی با کاهش معنادار و مقدار شکل‌های آلی و جزء باقی‌مانده به‌ویژه در تیمارهای ۵۰ تن در هکتار کود گاوی با افزایش معناداری

منابع مورد استفاده

- Abbott DE, Essington ME, Mullen MD and Ammons JT, 2001. Fly ash and lime-stabilized biosolid mixtures in mine spoil reclamation: simulated weathering. *Journal of Environmental Quality* 30(2):608-616.
- Ahnstrom ZS and Parker DR, 1999. Development and assessment of a sequential extraction procedure for the fractionation of soil cadmium. *Journal of Soil Science Society of America* 63:1650-1658.
- Aitken RL, Moody PW and McKinley PG, 1990. Lime requirements of acidic Queensland soils. I. Relationships between soil properties and pH buffer capacity. *Australian Journal of Soil Research* 28, 695-701.
- Allison LE, and Moodie CD, 1965. Carbonate. Pp. 1379-1400. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds). *Methods of Soil Analysis*. 2nd ed. ASA, CSSA and SSSA, Madison, Wisconsin.
- Amir S, Benlboukht F, Cancian N, Winterton P and Hafidi M, 2008. Physico-chemical analysis of tannery solid waste and structural characterization of its isolated humic acids after composting. *Hazardous Material* 160: 448-455.
- Antoniadis V, Tsadilas CD and Ashworth DJ, 2007. Monometal and competitive adsorption of heavy metals by sewage sludge-amended soil, *Chemosphere* 68 (3): 489-494.
- Asensio V, Flora V, Singh BR and Covelo EF, 2013. Effects of tree vegetation and waste amendments on the fractionation of Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in polluted mine soils. *Science of the Total Environment* 443: 446-453.
- Beckett PHT, Davis RD and Brindley P, 1979. The disposal of sewage sludge onto farmland: The scope of the problems of toxic elements. *Water Pollution Control* 78:419-445.
- Carter MR and Gregorich EG, 2006. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. CRC Press, New York.
- Chapman HD, 1965. Cation exchange capacity. Pp. 891- 901. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds). *Methods of Soil Analysis*, part 2: Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Clemente R and Bernal MP, 2006. Fractionation of heavy metals and distribution of organic carbon in two contaminated soils amended with humic acids. *Chemosphere* 64(8): 1264-1273.
- Corey RB, King LD, Leu-Hing C, Fanning DC, Street JJ and Walker JM, 1987. Effects of sludge properties on accumulation of trace elements by crops. Pp. 25-51. In: Page AL, (ed.). *Land Application of Sludge: Food Chain Implication*. Lewis Publication of Chelsea, Michigan.
- Corre MD, Schnabel RR and Shaffer JA, 1999. Evaluation of soil organic carbon under forests, cool-season and warm-season grasses in the northeastern US. *Soil Biology & Biochemistry* 31: 1531-1539.
- Diaz-Ravina M and Bååth E, 1996. Development of metal tolerance in soil bacterial communities exposed to experimentally increased metal levels. *Applied Environment Microbiology* 62: 2970-2977.
- Ebrahimi N, 2001. Investigation the effects of organic fertilizers on chemical properties of soil and nutrient uptakes by corn and wheat. Thesis of Master's Degree in Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology.

- Gee GW. and Bauder JW. 1986. Particle-size analysis. Pp. 383–411. In: Klute A (ed). Methods of soil analysis, part 1: Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Gupta Pk, 1999. Soil, Plant, Water and Fertilizer Analysis. Published by Agrobios (INDIA).
- Hoseinian Rostami G, Gholamalizadeh Ahangar A and Lakzian A, 2013. Time effect on distribution of different fractions of lead in polluted soils. *Journal of Water and Soil* 27(5):1057-1066.
- Karami N, Clemente R, Moreno-Jiménez E, Lepp NW and Beesley L, 2011. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *Journal of Hazardous Materials*, 191:41–48.
- Kelbitz K, Solinger S, Park JH, Michalzik B and Matzner E, 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Science* 165: 277-304.
- Khadivi Borojeni A, Noorbakhsh F, Afuni M and Shariatmadari H, 2007. Different fractions of lead, nickel and cadmium in a calcareous soil treated with sewage sludge. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources* 11(1):41-53.
- Khurana M and Kansal B, 2012. Influence of zinc supply on the phytotoxicity of cadmium in maize (*Zea mays* L.) grown on cadmium-contaminated soil. *Acta Agronomica Hungarica* 60(1): 37-46.
- Lopes AS and Cox FR, 1977. A survey of the fertility status of surface soils under "cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Science Society of America Journal* 41: 742-747.
- McBride MB. 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Press, New York.
- Minkina TM, Motuzova GV and Nazarenko OG, 2006. Interaction of heavy metals with the organic matter of an ordinary chernozem. *Eurasian Soil Science* 39 (7): 720–726.
- Naganuma KM, Okazaki KY and AbuBakar Z, 1993. Surface charge and adsorption characteristics of copper and zinc on tropical soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 39:455-462.
- Najafi S and Jalali M, 2015. Effects of organic acids on cadmium and copper sorption and desorption by two calcareous soils. *Environment Monitoring Assessment* 187:585.
- Nelson DW and Sommers LE, 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 539–579. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds). Methods of Soil Analysis, part 2: Chemical and Microbiological Properties. ASA and SSSA, Medison, Wisconsin.
- Rajaei M and Karimian N, 2007. Effects of added cadmium and incubation time on chemical fractions of cadmium in two texture groups of soil. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources* 11(1):97-108.
- Raskin I and Ensley BD, 2000. Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment. John Wiley and Sons, Inc. New York, 304p.
- Reihani Tabar A, Karimian N, Moezz Ardalan M, Savabeghi GR and Ghannadha M, 2006. Distribution of different fractions of zinc in some soils of the Tehran Province and their relations with the soil properties. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources* 3(1):125-135.
- Salbu B, Krekling T and Oughton DH, 1998. Characterisation of radioactive particles in the environment. *Analyst* 123: 843–849.
- Schnitzer M, 1982. Organic matter characterization Pp. 581-594. In: Page AL, Miller RH and Keeny DR (eds). Methods of Soil Analysis, part 2: Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- Shirzadeh N, Ali-Asgharzad N and Najafi N, 2013. Changes in microbial biomass carbon, ecophysiological indices, basal induced respiration of soil after incubation with -respiration and substrate levels different lead. *Water and Soil Science - University of Tabriz* 23(2):111-124.
- Shuman LM, 1999. Organic waste amendments effect on zinc fractions of two soils. *Journal of Environmental Quality* 28(5): 1442–1447.
- Sparks DL. Environmental Soil Chemistry. 2nd ed. 1995. San Diego: California, Academic Press.
- Tessier A, Campbell PGC and Bisson M, 1979. Sequential Extraction procedure for the speciation of particular trace metals. *Analytical chemistry Material* 51:1-22.
- Walker DJ, Clemente R, Roig A and Bernal MP, 2003. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in twocontaminated Mediterranean soils. *Environmental Pollution* 122 (2): 303–312.
- Zhou LX, and Wong JWC, 2001. Effect of dissolved organic matter from sludge compost on soil copper sorption. *Journal of Environmental Quality* 30: 878-883.