

برهمکنش بیوچارهای باگاس نیشکر و شوری بر قابلیت استفاده و توزیع شکل‌های کادمیم در خاک آهکی لومرسی

الناز میرزاخانی، حمیدرضا متقیان* و علیرضا حسین‌پور^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰)

چکیده

آلودگی محیط‌زیست به‌وسیله فلزات دارای پتانسیل سمیت به‌ویژه کادمیم، یکی از مسائل مهم محیط‌زیست به‌شمار می‌آید. همچنین شورشدن خاک‌ها به دلیل کاهش کیفیت آب آبیاری از تنش‌هایی است که گیاهان با آن روبرو می‌شوند. بنابراین، به‌منظور بررسی اثر بیوچارهای باگاس نیشکر بر قابلیت استفاده و شکل‌های کادمیم در خاک آلوده (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم) و شور، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل فاکتور بیوچار دارای سطوح شاهد، ۱ درصد (وزنی-وزنی) باگاس، ۱ درصد (وزنی-وزنی) بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس، ۱ درصد (وزنی-وزنی) بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس و فاکتور شوری شامل شاهد، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مول کلرید سدیم در کیلوگرم خاک در ۳ تکرار انجام گرفت. مقدار کادمیم قابل استفاده با روش DTPA-TEA و شکل‌های کادمیم با روش عصاره‌گیری تسیر و همکاران (۱۹۷۹) تعیین شد. نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار و شوری تأثیری بر pH خاک نداشتند ($P > 0/05$)، اما باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک شدند ($P < 0/05$). برهمکنش بیوچار و شوری بر کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA و شکل‌های کادمیم معنی‌دار نبود ($P > 0/05$). کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA در اثر کاربرد بیوچار کاهش یافت ($P < 0/05$)؛ درحالی‌که در خاک‌های شور نسبت به شاهد افزایش یافت ($P < 0/05$). تیمار خاک با بیوچار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس موجب کاهش ($P < 0/05$) کادمیم تبدلی (۲۳/۸٪) و افزایش ($P < 0/05$) کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز (۲۵/۲٪) و باقیمانده (۱۵/۶٪) نسبت به شاهد شد. نتایج نشان داد که شوری اثر معنی‌داری بر شکل‌های کادمیم نداشت ($P > 0/05$) و تیمار خاک با بیوچار منجر به توزیع کادمیم از شکل‌های ناپایدار به شکل‌های پایدارتر و کاهش قابلیت استفاده کادمیم در خاک شد.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، شوری، کادمیم، شکل‌های شیمیایی

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hrm_61@yahoo.com

مقدمه

معینی از خاک به صورت متوالی با محلول های عصاره گیر، به ترتیب از ضعیف به قوی، عصاره گیری می شود. انتخاب نوع عصاره گیر و توالی انجام طوری انجام می شود که هر عصاره گیر شکل خاصی را استخراج کند. به طور کلی محلول های عصاره گیری و ترتیب استفاده از آن ها به گونه ای تعیین می شوند که به صورت اختصاصی تنها شکل خاصی از ترکیبات خاک، با کمترین تأثیر بر شکل های دیگر، را استخراج کرده و نیز در طول عصاره گیری عناصر آزاد شده دچار جذب مجدد و رسوب نشوند (۳).

پژوهش های مختلفی درباره اثر شوری یا بیوجار بر قابلیت استفاده کادمیم انجام شده است. زاهدی فر (۳۳) به بررسی اثر آلودگی کادمیم (۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم) و بیوجار باگاس نیشکر (صفر، ۲ و ۴ درصد (وزنی-وزنی) بر جزء بندی کادمیم در خاک های شور، سدیمی، شور و سدیمی و طبیعی پرداخت. نتایج نشان داد که کاربرد بیوجار باعث تغییر شکل های کادمیم از تبادل، پیوند شده با کربنات ها و پیوند شده با اکسیدها به پیوند شده با ماده آلی (۶۶ درصد کل کادمیم در کاربرد ۴ درصد بیوجار) شد. مرادی و کریمی (۲۱) به بررسی اثر بیوجار ساده و تغییر یافته با اکسید آهن بر جزء بندی و تحرک کادمیم در خاک آهکی آلوده (۰، ۱۵ و ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم) پرداختند. آن ها گزارش کردند که بیوجارها کادمیم عصاره گیری شده با DTPA-TEA را کاهش (۳۹/۵ - ۲۲/۱) دادند. بیوجارها مقدار کادمیم تبادلی و پیوند شده با کربنات ها را کاهش و کادمیم پیوند شده با اکسیدها، ماده آلی و باقیمانده را افزایش داد. کوئی و همکاران (۹) بیان کردند که اگرچه pH خاک نقش مهمی در قابلیت استفاده کادمیم دارد، اما شوری نیز می تواند عامل مهمی در تغییر زیست فراهمی این عنصر باشد. غلاب و عثمان (۱۲) اثر شوری کلرید سدیم (صفر، ۸/۶، ۱۷/۱، ۳۴/۲ و ۶۷/۴ میلی مولار) را بر قابلیت استفاده کادمیم در دو خاک آهکی بررسی کردند. نتایج پژوهش آن ها نشان داد که با افزایش سطح شوری مقدار کادمیم در محلول خاک افزایش یافت و بین کادمیم و غلظت کلرید در محلول خاک ارتباط معنی داری وجود

آلودگی خاک با فلزات دارای پتانسیل سمیت یکی از مهم ترین مشکلات بشر است که باعث ایجاد اثرات خطرناکی بر جوامع جانوری، گیاهی و آلودگی آب های زیرزمینی از طریق آبشویی شده و باعث کاهش کیفیت محصول و در نتیجه به خطر افتادن سلامتی بشر و دیگر موجودات زنده می شود. در بین انواع آلاینده های خاک، فلزات دارای پتانسیل سمیت به علت غیر قابل تجزیه بودن در طبیعت و طول عمر زیستی بالا، به عنوان یک آلاینده بسیار مهم محیط زیست به شمار می آیند (۲۳). یکی از مهم ترین و متحرک ترین فلزات دارای پتانسیل سمیت کادمیم است. کادمیم و سرنوشت آن در خاک از اهمیت ویژه ای برخوردار است، به علت اینکه در مقادیر کم نیز سمی بوده، به راحتی جذب گیاهان شده و با ورود به زنجیره غذایی باعث ایجاد اثرات مخرب بر سلامت انسان و دیگر حیوانات می شود (۶). نسبت قابل توجهی از کادمیم در خاک بر خلاف سایر فلزات دارای پتانسیل سمیت به شکل محلول است و در بیشتر خاک ها یون کادمیم (Cd^{2+})، گونه غالب کادمیم در محلول است. شوری آب و خاک به دلیل وجود مقادیر زیاد نمک های محلول بوده و غلظت زیاد سدیم و کلر موجب تنش شوری می شود. شوری می تواند به دلیل حضور کاتیون ها و آنیون ها و همچنین افزایش قدرت یونی بر فعالیت عناصر در محلول تأثیر گذار باشد (۱۳).

بیوجار حاصل گرماکافت (pyrolysis) بقایای آلی مانند بقایای زراعی-جنگلی و فضولات دامی است که در شرایط عدم اکسیژن و یا اکسیژن محدود تولید می شود. این فرایند سبب خروج ترکیبات فرار و تشکیل ترکیبات کربن باقیمانده و خاکستر شده که حاوی مقدار زیادی کلسیم و پتاسیم هستند. امروزه افزودن بیوجار به خاک ها به عنوان شیوه ای جهت ترسیب کربن خاک و کاهش غلظت دی اکسید کربن هوا مورد توجه واقع شده است (۱۵).

از جمله روش های تعیین شکل های شیمیایی یک عنصر در فاز جامد خاک عصاره گیری دنباله ای است. در این روش، مقدار

(۱۷) و ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۲) تعیین شد. مقدار کادمیم کل با استفاده از اسیدنیتریک ۴ مولار (۲۷) و مقدار کادمیم قابل استفاده با روش DTPA-TEA (۱۸) عصاره‌گیری شد.

تیمارها و انکوباسیون

ابتدا پانزده میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم از منبع $CdCl_2$ به صورت محلول به ۲۰۰ گرم نمونه خاک در سه تکرار اضافه و با خاک مخلوط و مقدار آب لازم جهت تنظیم رطوبت خاک در ۸۰ درصد رطوبت زراعی به نمونه‌ها اضافه شد. نمونه‌ها به مدت ۳ هفته در دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس در رطوبت ۸۰ درصد ظرفیت زراعی خوابانده شدند. سپس، شوری ۲۰ و ۴۰ میلی‌مول بر کیلوگرم از نمک کلرید سدیم به نمونه‌های خاک اضافه شد. در ادامه، مقدار ۱ درصد (وزنی-وزنی)، ماده اولیه، بیوچار دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس و بیوچار دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در ۳ تکرار به نمونه خاک‌ها اضافه و به مدت ۳ ماه در دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس در انکوباتور نگهداری شدند.

پس از پایان دوره خوابانیدن مقادیر pH و EC اندازه‌گیری شد. مقدار کادمیم قابل عصاره‌گیری با روش DTPA-TEA (با استفاده از ۰/۰۰۵ مولار DTPA + ۰/۰۱ مولار $CaCl_2$ + ۰/۱ مولار TEA) و با نسبت ۱:۲ خاک-عصاره‌گیر همراه با ۱۲۰ دقیقه تکان اندازه‌گیری شد (۱۸). مقدار کادمیم در محلول‌ها با دستگاه جذب اتمی مدل GBC 932 اندازه‌گیری شد.

به منظور تعیین شکل‌های شیمیایی کادمیم از روش عصاره‌گیر متوالی (sequential extraction) تسیر و همکاران (۲۹) استفاده شد. بدین منظور ابتدا ۱ گرم خاک درون لوله سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و با افزودن عصاره‌گیرهای مختلف به صورت متوالی شکل‌های کادمیم تعیین شد. این روش شامل مراحل زیر است: (۱) شکل محلول و تبدلی: ۸ میلی‌لیتر کلرید منیزیم ($MgCl_2$) ۱ مولار (pH=۷) به نمونه‌های خاک افزوده و به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق تکان داده شدند. سپس

داشت. یون سدیم حاصل از نمک می‌تواند برای جذب محل تبدلی روی فاز جامد با فلز سمی رقابت کند و از این طریق با جایگزینی فلز سمی جذب سطحی شده موجب ورود آن به محلول خاک شود و در نتیجه قابلیت دسترسی فلز سمی افزایش یابد. لو و همکاران (۱۹) به بررسی بیوچار کاه و کلش برنج تهیه شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس بر قابلیت استفاده چند فلز از جمله کادمیم در خاک آلوده طبیعی در چین پرداختند. بیوچار در سه سطح صفر، ۱ و ۵ درصد (وزنی-وزنی) به خاک اضافه و قابلیت استفاده فلزات با استفاده از روش DTPA-TEA تعیین شد. کاربرد ۵ درصد بیوچار کاه و کلش برنج باعث کاهش قابلیت استفاده فلزات در خاک شد. این مقدار بیوچار منجر به کاهش شکل‌های تبدلی و پیوندشده با کربنات‌ها شد. در سال‌های اخیر توجه زیادی به استفاده از بیوچار برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات دارای پتانسیل سمیت شده است. با این وجود اطلاعات چندانی از نحوه تأثیر آن بر اجزاء فلز در فاز جامد در خاک‌های آلوده در معرض تنش شوری وجود ندارد. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثر بیوچار بر قابلیت استفاده و جزءبندی کادمیم در خاک آهکی و شور آلوده و شور انجام شده است.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و برخی ویژگی‌های خاک

خاک مورد استفاده غیرآلوده با کلاس لومرسی از دشت شهرکرد (عرض جغرافیایی $32^{\circ} 19' 41''$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ} 47' 37''$ شرقی) در استان چهارمحال و بختیاری برداشته شد. نمونه خاک با چکش چوبی کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های خاک از قبیل بافت به روش هیدرومتر (۱۱)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۲ به ۱ آب به خاک (۲۵)، pH در سوسپانسیون ۲ به ۱ آب به خاک (۳۰)، گنجایش تبادل کاتیونی با استفاده از استات سدیم در pH=۷ (۲۸) و کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون اسید باقیمانده

شده در بخش قبل، سطح ویژه به روش BET (۸) و کربن آلی با دستگاه آنالیزگر عنصری CHNS (۳۱) تعیین شد. برخی ویژگی‌های خاک مورد آزمایش و بیوپارهای باگاس نیشکر در جدول ۱ ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل آماری

قبل از تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی، فرضیات تجزیه واریانس شامل یکنواختی واریانس‌ها و توزیع نرمال باقیمانده‌ها بررسی شد. برای بررسی اثر شوری و بیوپار در خاک آلوده و برهمکنش آن‌ها بر مقدار کادمیم قابل استفاده و شکل‌های شیمیایی آن از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با روش حداقل اختلاف معنی‌دار (Least Significant Difference; LSD) در سطح ۵ درصد با نرم‌افزار Statistica 8 انجام شد. اندازه اثر (Eta^2p) که نشان‌دهنده سهم هر یک از عوامل در تغییرات هر ویژگی است، به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$Eta^2p = \left[\frac{SS_a}{(SS_a + SS_{error})} \right] \quad (1)$$

SS_a : مجموع مربعات هر عامل و SS_{error} مجموع مربعات خطا هستند.

نتایج و بحث

تغییرات pH و قابلیت هدایت الکتریکی در خاک

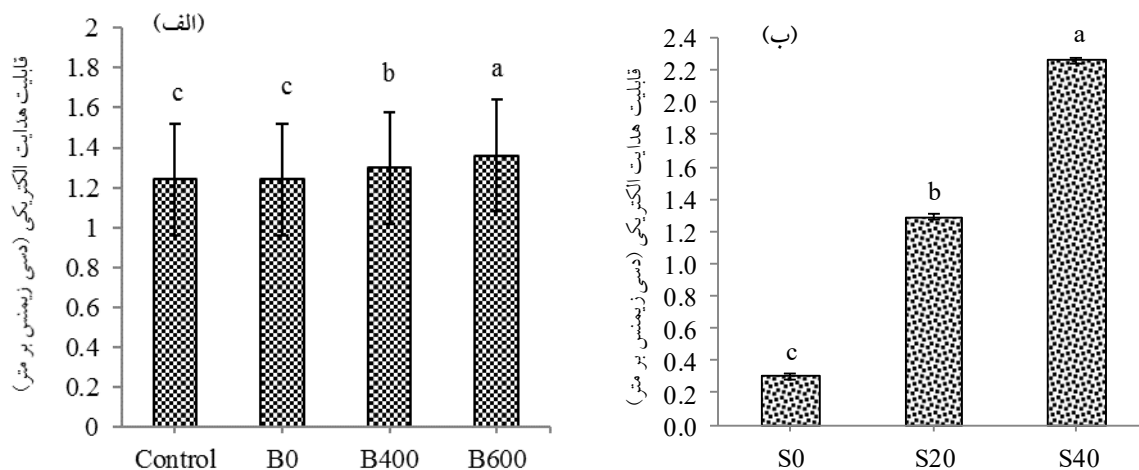
نتایج تجزیه واریانس دو طرفه اثر بیوپار و شوری بر pH و قابلیت هدایت الکتریکی در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که اثر بیوپار و شوری بر EC خاک معنی‌دار بود ($P < 0/01$). به ترتیب شوری و بیوپار بیشترین تأثیر را بر EC خاک داشتند. همچنین نتایج این جدول نشان داد که اثر بیوپار و شوری بر pH خاک معنی‌داری نبود ($P > 0/05$). برهمکنش بیوپار و شوری بر pH و EC معنی‌دار نبود ($P > 0/05$).

مقایسه میانگین قابلیت هدایت الکتریکی تحت تأثیر بیوپار در شکل ۱- الف نشان داده شده است. میانگین قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار بیوپار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به شاهد (۹/۶) و ماده

نمونه‌ها با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ و غلظت کادمیم در عصاره صاف رویی اندازه‌گیری شد. (۲) شکل پیوندشده با کربنات‌ها: به خاک باقیمانده از مرحله قبل، ۸ میلی‌لیتر استات سدیم (CH_3COONa) ۱ مولار (pH=۵) اضافه و نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای اتاق تکان داده و سپس با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ و غلظت کادمیم در عصاره صاف رویی اندازه‌گیری شد. (۳) شکل پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز: به خاک باقی‌مانده از مرحله قبل، ۲۰ میلی‌لیتر هیدروکسیل آمین هیدرو کلراید ($NH_2OH.HCl$) ۰/۰۴ مولار (در اسید استیک ۲۵٪) اضافه شد و نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای 96 ± 3 درجه سلسیوس قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ و غلظت کادمیم در عصاره صاف رویی اندازه‌گیری شد. (۴) شکل پیوندشده با ماده آلی به خاک باقیمانده از مرحله قبل، ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک (HNO_3) ۰/۰۲ مولار و ۸ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن (H_2O_2) ۳۰٪ (pH=۲) اضافه و نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در دمای 85 ± 2 درجه سلسیوس نگهداری شدند. سپس مقدار ۵ میلی‌لیتر استات آمونیوم (NH_4OAC) ۳/۲ مولار (در اسید نیتریک ۲۰٪) به نمونه‌ها اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق تکان داده شدند. نمونه‌ها با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ و غلظت کادمیم در عصاره صاف رویی اندازه‌گیری شد. (۵) شکل باقیمانده: از تفاوت مقدار کل با سایر شکل‌ها بدست آمد. مقدار کادمیم در محلول‌های استخراج‌شده با دستگاه جذب اتمی مدل GBC 932 اندازه‌گیری شد.

تهیه بیوپار

باگاس نیشکر از کشت و صنعتی در خوزستان تهیه شد. بیوپار در ۲ سطح دمایی ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس با قرار دادن در کوره به مدت ۲ ساعت و در شرایط کمبود اکسیژن تهیه شد. سپس ویژگی‌های، بیوپار مانند قابلیت هدایت الکتریکی، pH، کادمیم کل و ظرفیت تبادل کاتیونی، با استفاده از روش‌های بیان



شکل ۱. مقایسه میانگین قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) تحت تأثیر بیوچار (الف) و شوری (ب)

خطای استاندارد به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

Control: شاهد؛ B0: ماده اولیه؛ B400: بیوچار تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس؛ B600: بیوچار تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس

S0: شاهد؛ S20: مقدار ۲۰ میلی‌مول بر کیلوگرم کلرید سدیم؛ S40: مقدار ۴۰ میلی‌مول بر کیلوگرم کلرید سدیم

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک* و اصلاح‌کننده‌ها**

بیوچار ۶۰۰	بیوچار ۴۰۰	ماده اولیه	خاک	ویژگی
۹/۹۰	۹/۱۹	۶/۸۲	۷/۹۲	pH
۱/۸۸	۰/۹۷	۰/۷۹	۰/۳۱	هدایت الکتریکی (dSm ⁻¹)
۲/۵۶	۴/۰۳	۷/۴۹	۳۰/۱۲	گنجایش تبادل کاتیونی (cmol+ kg ⁻¹)
۹۷/۳۰	۱۰/۳۹	۴/۲۶	-	سطح ویژه (m ² g ⁻¹)
۵۴/۷۴	۵۲/۸۴	۳۸/۴۲	۰/۳۴	کربن آلی (درصد)
—	—	—	۲۸/۳۶	شن (درصد)
—	—	—	۴۰/۱۲	سیلت (درصد)
—	—	—	۳۱/۵۲	رس (درصد)
—	—	—	لوم رسی	بافت
—	—	—	۲۷/۹۸	کربنات کلسیم معادل (درصد)
—	—	—	ND	کادمیم قابل استفاده (mg kg ⁻¹)
۰/۲	۰/۱۸	۰/۱	۰/۲	کادمیم کل (mg kg ⁻¹)

*خاک: pH-H₂O و EC در نسبت ۲ به ۱، **اصلاح‌کننده: pH-H₂O و EC در نسبت ۲۰ به ۱، ND: کمتر از حد تشخیص دستگاه

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر بیوجار و شوری بر EC و pH در خاک مورد مطالعه

میانگین مربعات (MS)		درجه آزادی	منابع تغییرات
pH	EC		
۱۵۶۱۴۹۷ (۰/۱۱) ^{ns}	۰/۰۲ (۰/۷۵) ^{**}	۳	بیوجار
۱۵۶۱۲۶۷ (۰/۰۰۷) ^{ns}	۱۱/۵ (۰/۹۹) ^{**}	۲	شوری
۱۵۶۱۵۳۹ (۰/۲) ^{ns}	۰/۰۰۰۶ (۰/۱۲) ^{ns}	۶	بیوجار × شوری
۱۵۶۱۴۵۶	۰/۰۰۱	۲۴	خطا

اعداد داخل پرانتز مقدار $E_{t_a^2_p}$ نشان‌دهنده مجموع مربعات هر عامل بر مجموع مربعات هر عامل + مجموع مربعات خطا

ns و ** به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد هستند.

کلرید کلسیم به خاک در سطوح صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر قابلیت هدایت الکتریکی خاک از ۰/۳۲ دسی‌زیمنس بر متر در تیمار شاهد به ۲/۶۷ دسی‌زیمنس بر متر در تیمار شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر رسید که معادل ۷۳۴/۳۷ درصد افزایش بود.

نتایج نشان داد که کاربرد بیوجار و شوری بر مقدار pH خاک اثر معنی‌داری نداشت ($P > ۰/۰۵$). لنتز و لپلیتو (۱۶) بیان کردند که بیوجار تهیه شده از کود حیوانی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس تأثیری بر pH خاک لوم‌سیلتی (pH=۷/۷) نداشت.

کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA

نتایج تجزیه واریانس دو طرفه اثر بیوجار و شوری بر کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که اثر بیوجار و شوری بر کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA معنی‌دار بود ($P < ۰/۰۱$). به ترتیب بیوجار و شوری بیشترین تأثیر را بر کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA داشتند. اثر برهمکنش بیوجار و شوری بر کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA معنی‌دار نبود ($P > ۰/۰۵$). به عبارت دیگر اثر کاربرد بیوجار بر این ویژگی به مقدار هدایت الکتریکی خاک بستگی نداشت.

مقایسه میانگین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA تحت تأثیر بیوجار در شکل ۲- الف نشان داده شده است. میانگین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA در تیمار

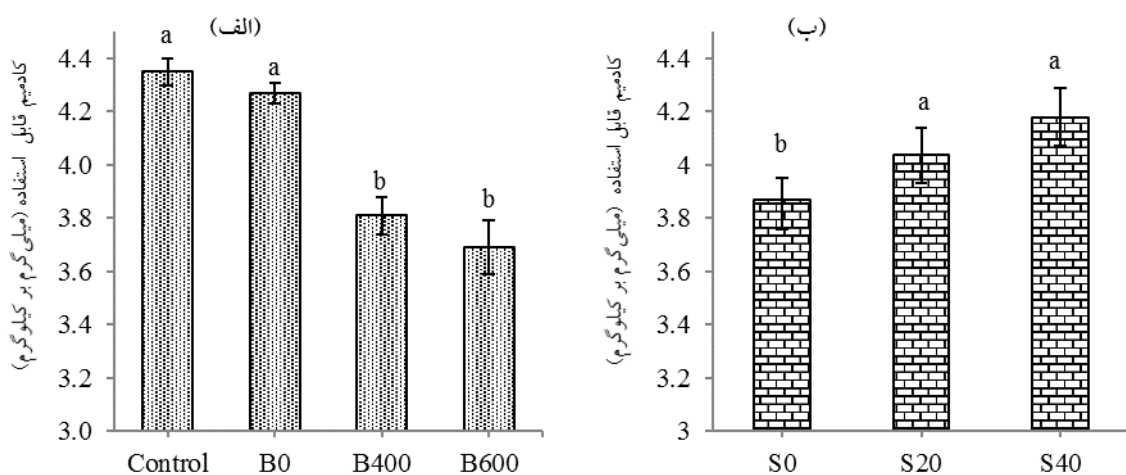
اولیه (۹/۶٪) افزایش معنی‌داری یافت ($P < ۰/۰۵$). قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار بیوجار ۴۰۰ درجه سلسیوس نیز نسبت به شاهد (۸/۸٪) و ماده اولیه (۴/۸٪) افزایش معنی‌داری یافت ($P < ۰/۰۵$). قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار بیوجار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار بیوجار تولیدشده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس بیشتر (۴/۶٪) بود ($P < ۰/۰۵$). مطابق با نتایج تحقیق حاضر، موهان و همکاران (۲۰) بیان کردند که کاربرد بیوجار سبوس برنج تهیه شده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس باعث افزایش هدایت الکتریکی خاک (۱۰۰٪) در مقایسه با شاهد شد. همچنین کاربرد بیوجار بقایای ذرت (تهیه شده در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس) باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک (۸۷/۹٪) در مقایسه با خاک شاهد شد. آن‌ها علت افزایش قابلیت هدایت الکتریکی را وجود عناصر موجود در بیوجار بیان کردند.

مقایسه میانگین قابلیت هدایت الکتریکی تحت تأثیر شوری در شکل ۱- ب نشان داده شده است. قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار شوری ۴۰ میلی‌مول بر کیلوگرم نسبت به شاهد (۶۵۳/۳٪) و تیمار شوری ۲۰ میلی‌مول بر کیلوگرم (۷۵/۱٪) افزایش معنی‌داری یافت ($P < ۰/۰۵$). همچنین قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار شوری ۲۰ میلی‌مول بر کیلوگرم نسبت به شاهد (۳۳۰٪) افزایش معنی‌داری یافت ($P < ۰/۰۵$). مطابق با نتایج پژوهش حاضر، فلاحتی و همکاران (۱۰) بیان کردند در خاک لوم‌شنی و رسی‌سیلتی با اضافه کردن نمک کلرید سدیم و

جدول ۳. نتایج تجزیه‌وارینانس اثر بیوچار و شوری بر کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA

میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی	منابع تغییرات
TEA-DTPA		
۰/۹۷ (۰/۷۷)**	۳	بیوچار
۰/۳۰ (۰/۴۱)**	۲	شوری
۰/۰۱ (۰/۰۷) ^{ns}	۶	بیوچار × شوری
۰/۰۳	۲۴	خطا

اعداد داخل پرانتز مقدار Eta^2_p نشان دهنده مجموع مربعات هر عامل بر مجموع مربعات هر عامل + مجموع مربعات خطا و ns و ** به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد هستند.



شکل ۲. مقایسه میانگین کادمیم قابل استفاده (میلی‌گرم بر کیلوگرم) تحت تأثیر بیوچار (الف) و شوری (ب)

خطای استاندارد به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

Control: شاهد؛ B0: ماده اولیه؛ B400: بیوچار تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس؛ B600: بیوچار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس
S0: شاهد؛ S20: مقدار ۲۰ میلی‌مول بر کیلوگرم کلرید سدیم؛ S40: مقدار ۴۰ میلی‌مول بر کیلوگرم کلرید سدیم

(۴) بیان کردند در خاک آلوده لوم‌شنی با $pH=7.4$ کاربرد بیوچار پوسته زردآلو (تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس) و بیوچار بقایای هرس درخت سیب (تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس) باعث کاهش به ترتیب (۱۱/۷ و ۱۹/۱٪) کادمیم قابل استفاده در مقایسه با خاک شاهد شد. آن‌ها بیان کردند حضور گروه‌های عامل مختلف در بیوچار باعث کاهش کادمیم قابل استفاده شد. علاوه بر این pH قلیایی و بالابودن فسفر در بیوچار باعث رسوب کادمیم به شکل $CdCO_3$ و

بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمارهای شاهد (۱۵/۱) و ماده اولیه (۱۳/۵٪) کاهش معنی‌داری ($P < 0.05$) یافت. همچنین، کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار بیوچار تولیدشده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس (۳/۱۴٪) کاهش یافت. کادمیم عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA در تیمار بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمارهای شاهد (۱۲/۴٪) و ماده اولیه (۱۰/۷٪) کاهش معنی‌داری ($P < 0.05$) یافت. آلی و همکاران

غلظت کادمیم در محلول می‌تواند به دلیل تشکیل کمپلکس‌های $Cd-Cl^+$ و $CdCl_2^+$ باشد (۱۲).

شکل‌های کادمیم در خاک

نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار و شوری بر شکل‌های کادمیم در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که اثر بیوچار بر کادمیم تبادلی معنی‌دار بود ($P < 0/01$). همچنین اثر بیوچار بر کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و باقیمانده معنی‌دار بود ($P < 0/05$). اثر بیوچار بر کادمیم پیوندشده با کربنات‌ها و ماده آلی معنی‌دار نبود ($P > 0/05$). اثر شوری بر شکل‌های کادمیم معنی‌دار نبود ($P > 0/05$). همچنین برهمکنش بیوچار و شوری بر شکل‌های کادمیم معنی‌دار نبود ($P > 0/05$). به عبارت دیگر اثر کاربرد بیوچار بر شکل‌های کادمیم به مقدار هدایت الکتریکی خاک بستگی نداشت.

طبق نتایج به دست آمده بیشترین مقدار کادمیم به ترتیب در شکل‌های باقیمانده و تبادلی دیده شد. نتایج مشابهی برای این فلز در خاک‌های مختلف گزارش شده است (۲ و ۲۶).

مقایسه میانگین کادمیم تبادلی تحت تأثیر بیوچار در شکل ۳ نشان داده شده است. میانگین کادمیم تبادلی در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمارهای شاهد (۲۳/۸) و ماده اولیه (۱۵٪) کاهش معنی‌داری ($P < 0/05$) یافت. کادمیم تبادلی در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار بیوچار تولیدشده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس نیز کاهش (۸/۲) یافت. کادمیم تبادلی در تیمار بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار شاهد (۱۷٪) و ماده اولیه (۷/۴) کاهش معنی‌داری ($P < 0/05$) یافت. مطابق با نتایج تحقیق حاضر، آنجیب و همکاران (۵) گزارش کردند که بیوچار هسته خرما تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در خاک لوم شنی (سدیمی) با $pH=8/59$ آلوده به سرب، مس و روی به ترتیب $9/74$ ، $7/25$ و $10/05$ میلی‌گرم بر کیلوگرم، شکل تبادلی این عناصر را کاهش داد. زاهدی فر (۳۳) گزارش کرد که کاربرد بیوچار باعث تغییر شکل‌های کادمیم از تبادلی، پیوندشده با

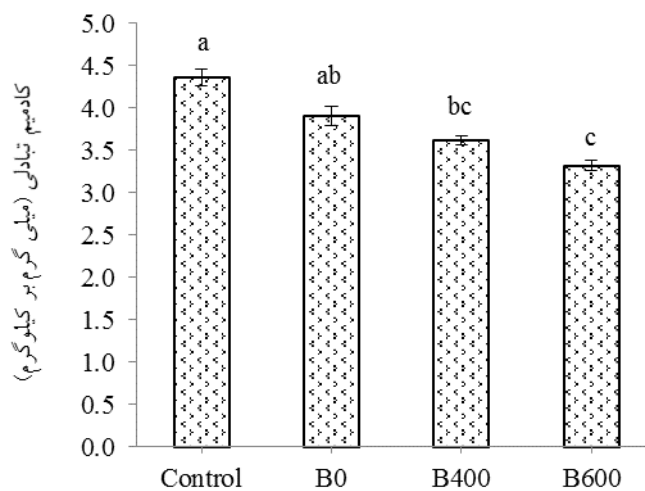
$Cd_3(PO_4)_2$ می‌شود. بشیر و همکاران (۷) بیان کردند کاربرد بیوچار باگاس نیشکر (تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس) در خاک با $pH=7/54$ آلوده‌شده به کادمیم و کروم از نمک نترات (۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) باعث کاهش کادمیم و کروم قابل استفاده به ترتیب $62/5\%$ و 85% در مقایسه با خاک شاهد شد. آن‌ها بیان کردند بیوچار به علت داشتن تخلخل، سطح ویژه، ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و گروه‌های عامل باعث کاهش تحرک فلزات دارای پتانسیل سمیت می‌شود.

مقایسه میانگین کادمیم عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA تحت تأثیر شوری در شکل ۲-ب نشان داده شده است. میانگین کادمیم عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA در تیمارهای ۲۰ و ۴۰ میلی‌مول بر کیلوگرم نسبت به شاهد به ترتیب ۸ و ۴ درصد افزایش یافت ($P < 0/05$). کادمیم عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA در تیمار شوری ۴۰ میلی‌مول بر کیلوگرم نسبت به تیمار شوری ۲۰ میلی‌مول بر کیلوگرم (۳/۴) افزایش یافت. دو سازوکار که نقش اصلی در فراهمی فلزات ایفا می‌کنند عبارت‌اند از کمپلکس آنیون مشتق‌شده از نمک با فلزات سنگین و رقابت کاتیون موجود در نمک با گونه‌های فلزات سنگین با بار مثبت برای جذب در سطوح فاز جامد. اثر این دو سازوکار به فلزات مورد بررسی، نوع و مقدار الکترولیت موجود در سیستم وابسته است (۲۴). کشاورز و همکاران (۱۴) بیان کردند که در خاک رسی با $pH=7/1$ با افزایش سطح شوری محلول کلرید سدیم و کلرید کلسیم با نسبت اکی‌والان یکسان از $0/79$ به $10/8$ دسی‌زیمنس روی قابل استفاده (۶/۳) در مقایسه با شاهد افزایش یافت. عباسپور و همکاران (۱) به بررسی اثر شوری کلرید سدیم (۵۰ میلی‌مول بر کیلوگرم) بر کادمیم و سرب در سه خاک اسیدی ($pH=5/56$)، خشی ($pH=6/97$) و آهکی ($pH=7/78$) آلوده‌شده با نترات کادمیم (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم) و نترات سرب (۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نمک به خاک‌های آلوده موجب افزایش کادمیم قابل استفاده در خاک‌های اسیدی و آهکی شد، ولی اثر آن بر سرب اندک بود. اثر شوری ناشی از حضور آنیون کلرید در افزایش

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار و شوری بر شکل‌های کادمیم در خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)			
		تبادلی	پیوندشده با کربنات‌ها	پیوندشده با اکسیدها	پیوندشده با ماده آلی
بیوچار	۳	۱/۷۸ (۰/۴۶)**	۰/۱۶ (۰/۰۸) ^{ns}	۰/۱۹ (۰/۲۹)*	۰/۰۳ (۰/۲۰) ^{ns}
شوری	۲	۰/۱۲ (۰/۰۳) ^{ns}	۰/۶۵ (۰/۱۸) ^{ns}	۰/۰۲ (۰/۰۳) ^{ns}	۰/۰۰۰۲ (۰/۰۰۹) ^{ns}
بیوچار × شوری	۶	۰/۰۶ (۰/۰۶) ^{ns}	۰/۰۲ (۰/۰۲) ^{ns}	۰/۰۶ (۰/۰۲) ^{ns}	۰/۰۰۱ (۰/۰۲۲) ^{ns}
خطا	۲۴	۰/۲۶	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۰۰۱

اعداد داخل پرانتز مقدار E_{p} نشان دهنده مجموع مربعات هر عامل بر مجموع مربعات هر عامل + مجموع مربعات خطا ns و ** و * به ترتیب به مفهوم غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.



شکل ۳. مقایسه میانگین کادمیم تبادلی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) تحت تأثیر بیوچار

خطای استاندارد به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

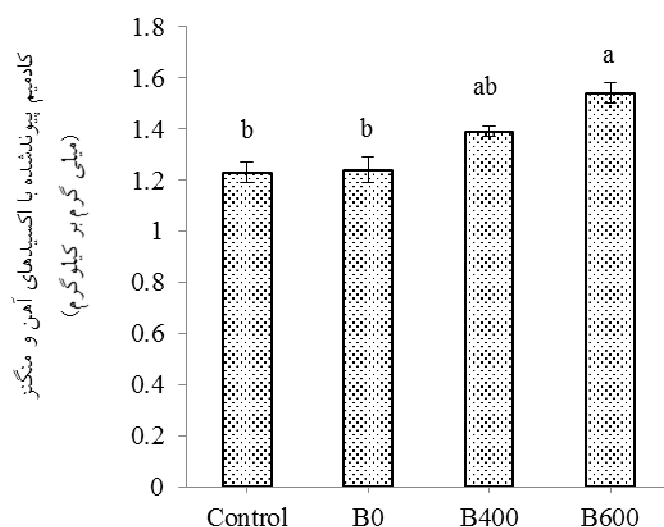
حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

Control: شاهد؛ B0: ماده اولیه؛ B400: بیوچار تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس؛ B600: بیوچار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس

دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار بیوچار تولیدشده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس (۱۰٪/۸) افزایش یافت. در تیمارهای بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس کادمیم پیوندشده با اکسیدها نسبت به شاهد (۱۳٪) و ماده اولیه (۱۲٪) بیشتر بود. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، یانگ و همکاران (۳۲) بیان کردند کاربرد بیوچار تهیه‌شده از ساقه تنباکو در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس در خاک لوم‌رسی، کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز را افزایش داد و دلیل آن را به ساختار متخلخل، سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و pH قلیایی در بیوچار نسبت دادند بیوچار به‌طور عمده بر بی‌حرکتی فلزات دارای پتانسیل سمیت توسط مکانسیم‌های

کربنات‌ها و پیوندشده با اکسیدها به پیوندشده با ماده آلی (۴۶) درصد کل کادمیم در کاربرد ۴ درصد بیوچار) شد. مرادی و کریمی (۲۱) گزارش کردند بیوچار مقدار کادمیم تبادلی و پیوند شده با کربنات‌ها را کاهش و کادمیم پیوندشده با اکسیدها، ماده آلی و باقیمانده را افزایش داد.

مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با اکسیدها تحت تأثیر بیوچار در شکل ۴ نشان داده شده است. میانگین کادمیم پیوندشده با اکسیدها در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار شاهد (۲۵٪/۲) و ماده اولیه (۲۴٪) افزایش معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) یافت. همچنین در تیمار بیوچار تولیدشده در

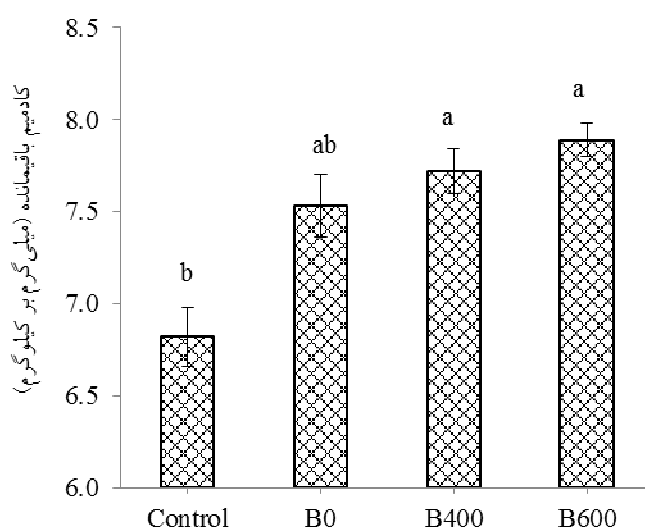


شکل ۴. مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم) تحت تأثیر بیوچار

خطای استاندارد به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

Control: شاهد؛ B0: ماده اولیه؛ B400: بیوچار تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس؛ B600: بیوچار تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس



شکل ۵. مقایسه میانگین کادمیم باقیمانده (میلی گرم بر کیلوگرم) تحت تأثیر بیوچار

خطای استاندارد به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است.

حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند.

Control: شاهد؛ B0: ماده اولیه؛ B400: بیوچار تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس؛ B600: بیوچار تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس

کادمیم پیوندشده با اکسیدها، ماده آلی و باقیمانده را افزایش داد. مقایسه میانگین کادمیم باقیمانده تحت تأثیر بیوچار در شکل ۵ نشان داده شده است. میانگین کادمیم باقیمانده در تیمار بیوچار

مستقیم و غیرمستقیم تأثیر می‌گذارد که شامل جذب، رسوب‌گذاری، کمپلکس‌های درون‌کره (inner-sphere) و تبادل کاتیونی است. مرادی و کریمی (۲۱) گزارش کردند بیوچار،

جدول ۵. ضریب همبستگی بین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA با شکل‌های کادمیم خاک (n=۱۲)

کادمیم	تبادلی	پیوندشده باکربنات‌ها	پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز	پیوندشده با ماده آلی	باقیمانده
DTPA-TEA	۰/۸۴**	۰/۳۹ ^{ns}	-۰/۶۴*	۰/۴۱ ^{ns}	-۰/۶۶*

ns غیرمعنی دار، ** و * به ترتیب به مفهوم معنی دار در سطح احتمال ۱ و معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد

داشت. بنابراین، کاهش کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA می‌تواند به دلیل کاهش کادمیم تبادلی و افزایش کادمیم پیوند شده با اکسیدهای آهن و منگنز و باقیمانده باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که در این خاک آهکی آلوده به کادمیم، اثر بیوچار باگاس نیشکر بر تغییر مقدار pH، کادمیم قابل استفاده و شکل‌های آن به سطوح شوری خاک بستگی نداشت. کاربرد بیوچار در خاک شوری را افزایش داد. شوری ناشی از کلرید سدیم تحرک و قابلیت استفاده کادمیم را افزایش داد و کاربرد بیوچار موجب کاهش کادمیم قابل استفاده شد که می‌تواند به دلیل کاهش شکل تبادلی و افزایش شکل‌های پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و باقیمانده باشد. همچنین شوری و بیوچار تأثیری بر pH خاک نداشتند. بنابراین، کاربرد بیوچار در خاک آلوده می‌تواند باعث تبدیل فلزات دارای پتانسیل سمیت از شکل‌های دارای پتانسیل زیست‌فراهمی به شکل‌های پایدار به‌ویژه با تشکیل اکسید فلز، کربنات یا رسوبات فسفات شوند و به این صورت از تحرک و قابلیت استفاده کادمیم در خاک بکاهد.

۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به شاهد (۱۵٪/۶) و ماده اولیه (۴/۷٪) افزایش یافت. این جزء در تیمار بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس نسبت به شاهد (۱۳٪) و ماده اولیه (۲٪/۵) بیشتر بود. این جزء در تیمار بیوچار تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار بیوچار تولیدشده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس (۲٪/۲) افزایش یافت. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، مرادی و کریمی (۲۱) گزارش کردند که بیوچار، کادمیم پیوندشده با اکسیدها، ماده آلی و باقیمانده را افزایش داد. آلی و همکاران (۴) بیان کردند که بیوچار پوسته زردآلو و بقایای هرس سیب تهیه شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در خاک لوم‌شنی باعث افزایش جزء باقیمانده کادمیم و روی شد.

ضریب همبستگی بین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA و شکل‌های آن

نتایج همبستگی (r) بین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA و شکل‌های کادمیم در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد که بین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA و کادمیم تبادلی (r=۰/۸۴) همبستگی مثبت و معنی دار (p<۰/۰۱) وجود داشت؛ در حالی که با کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز (r=-۰/۶۴) و کادمیم باقیمانده (r=-۰/۶۶) همبستگی منفی و معنی دار (P<۰/۰۵)

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, A., M. Kalbasi, Sh. Hajrasuliha and A. Fotovat. 2008. Effect of organic matter and salinity on ethylenediaminetetraacetic acid-extractable and solution species of cadmium and lead in three agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39:983-1005.
2. Abbaspour, A., M. Kalbasi, Sh. Hajrasuliha and A. Golchin. 2007. Effects of plant residue and salinity on fractions of cadmium and lead in three soils. *Soil and Sediment Contamination* 16:539-555.
3. Ahnstrom, Z. S. and D. R. Parker. 1999. Development and assessment of a sequential extraction procedure for the fractionation of soil cadmium. *Soil Science Society American Journal* 63: 1650-1658.

4. Ali, A., M. Sabry, Y. Li, R. Xian, F. Wahid, A. Muhammad, K. Sohail, T. Zhang, J. Rinklebe, R. Li and Z. Zhang. 2020. Apricot shell and apple tree-derived biochar affect the fractionation and bioavailability of Zn and Cd as well as the microbial activity in smelter contaminated soil. *Environmental Pollution* 264:114773.
5. Anegebe, B., J. M. Okuo, E. O. Eweka and D. E. Ogbeifun. 2014. Fractionation of lead acid battery soil amended with Biochar. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences* 7: 36-43.
6. Antoniadis, V. and B. J. Alloway. 2000. Availability of Cd, Ni and Zn to ryegrass in sewage sludge-treated soils at different temperatures. *Water, Air and Soil Pollution* 132: 201-214.
7. Bashir, S., Q. Hussain, M. Akmal, M. Riaz, H. Hu, S. Ijaz and M. Ahmad. 2018. Sugarcane bagasse-derived biochar reduces the cadmium and chromium bioavailability to mash bean and enhances the microbial activity in contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments* 18: 874-886.
8. Brunauer, S., P. H. Emmett and E. Teller. 1938. Adsorption of gases in multi molecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 60(2):309-319.
9. Cui, C., G. Pan, L. Li, R. Bian, X. Liu, J. Yan, G. Quan, Ch. Ding, T. Chen, Y. Liu, Ch. Yin, C. Wei, Y. Yang and Q. Hussain. 2016. Continuous immobilization of cadmium and lead in biochar amended contaminated paddy soil: A five-year field experiment. *Ecological Engineering* 93: 1-8.
10. Falahati Marvast, A., A. R. Hosseinpour and H. Tabatabay. 2012. Effect of salinity and sewage sludge on the availability and uptake of heavy metals by barley. *Journal of Water and Soil* 5(27):958-997 (in Farsi).
11. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 404-407. In: A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part. 2nd edition. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.
12. Ghallab, A. and A. R. A. Usman. 2007. Effect of sodium chloride-induced salinity on phyto-availability and speciation of Cd in soil solution. *Water, Air, and Soil Pollution* 185: 43-51.
13. Hosseinpour, A. R. and H. R. Motaghian. 2015. *Management and Improvement of Saline Soils*. Shahrekord University Press. (in Farsi).
14. Keshavarz, P., M. Malakouti, N. Karimian and A. Fotovat. 2006. The effects of salinity on extractability and chemical fractions of zinc in selected calcareous soils of Iran. *Journal of Agriculture and Science Technology* 8:181-190.
15. Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan. London, UK.
16. Lentz, R. D. and J.A. Ippolito. 2012. Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. *Journal of Environmental Quality* 41:1033-1043.
17. Leppert, R. H. and D. L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum. PP. 437-447. In: D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, SSSA, Madison.
18. Lindsay, W. L. and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42:421-428.
19. Lu, K., X. Yang, G. Gielen, V. Bolan, Y. Sik, N. Khan Niazi, S. Xu, G. Yuan, X. Chen, X. Zhang, D. Liu, Zh. Song, X. Liu and H. Wang. 2017. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil. *Journal of Environmental Management* 186: 285-292.
20. Mohan, D., K. Abhishek, A. Sarswat, M. Patel, P. Singh and C. U. Pittman. 2018. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration—a sustainable solution to crop-residue burning in India. *RSC Advances* 8:508-520.
21. Moradi, N. and A. Karimi. 2020. Fe-Modified common reed biochar reduced cadmium (cd) mobility and enhanced microbial activity in a contaminated calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21(1): 329-340.
22. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Carbon, organic carbon and organic matter. PP. 961-1010. In: D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, SSSA, Madison.
23. Niencheski, H. L. F. 2002. Lithium as a normalizer for the assessment of anthropogenic metal contamination of sediments of the southern area of Patos Lagoon. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 5(4):473-483.
24. Palman, M. A. A., C. H. van der Weijde and J. P. G. Loch. 1994. Sorption of cadmium on suspended matter under estuarine condition: competition and complexation with major seawater ions. *Water, Air, and Soil Pollution* 73:49-60.
25. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. PP. 417-435. In: D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, SSSA, Madison.
26. Sajadi Tabar, S. and M. Jalal. 2013. Kinetics of Cd Release from Some Contaminated Calcareous Soils. *Natural Resources Research* 22(1): 37-44.
27. 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 solid phases. *Soil Science Society of America Journal* 46: 260-265.

28. Sumner, M. E. and P. M. Miller 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficient. PP. 1201-1230. *In: D. L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis, SSSA, Madison.*
29. Tessier, A., P. G. Campbell and M. Bisson. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* 51:844-851.
30. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. PP. 475-490. *In: D. L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis, SSSA, Madison.*
31. Uchimiya, M., L. H. Wartelle, K. T. Klasson, C. A. Fortier and I.M. Lima. 2011. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59:2501-2510.
32. Yang, X., K. Lu, K. McGrouther, L. Che, G. Hu, Q. Wang, X. Liu, L. Shen, H. Huang, Z. Ye and H. Wang. 2017. Bioavailability of Cd and Zn in soils treated with biochars derived from tobacco stalk and dead pigs. *Journal of Soils and Sediments* 1:1-12.
33. Zahedifar, M. 2020. Effect of biochar on cadmium fractions in some polluted saline and sodic soils. *Environmental Management* 66(6): 1133-1141.

Interaction of Sugarcane Bagasse Biochars and Salinity on Availability and Fraction of Cadmium in a Clay Loam Calcareous Soil

E. Mirzakhani, H. R. Motaghian* and A. R. Hosseinpour¹

(Received: November 12-2020; Accepted: February 28-2021)

Abstract

Pollution of the environment by heavy metals, especially soil pollution with cadmium (Cd), is one of the most important environmental problems. Also, salinization of soils due to a decrease in irrigation water quality reduces plants growth. To investigate the effect of sugarcane bagasse biochars and salinity on Cd available and Cd fractions in a contaminated soil (15 mg kg⁻¹ Cd), an experimental factorial design in a completely randomized design including (1) biochar factor with control, 1% (w/w) bagasse, 1% (w/w) biochar 400 °C and 1% (w/w) biochar 600 °C, and (2) salinity factor with control, 20, and 40 mmol kg⁻¹ as sodium chloride were performed in 3 replications. The amount of available Cd was determined by the DTPA-TEA method and the Cd fractions were determined by Tessier et al. (1979). The results showed that biochar and salinity had no significant effect on soil pH ($P > 0.05$) but increased soil EC ($P < 0.05$). Interaction of biochar and salinity was not significant ($P > 0.05$) on available Cd and Cd fractions. Biochar application reduced Cd -DTPA-TEA ($P < 0.05$), whereas salinity increased Cd -DTPA-TEA ($P < 0.05$). Application of biochar prepared at 600 °C reduced ($P < 0.05$) exchangeable Cd (23.8%) and increased ($P < 0.05$) Cd associated with iron and manganese oxides (25.2%) and residual (15.6%) compared to the control. The results showed that salinity had no significant effect on the Cd fractions ($P > 0.05$) and soil treated with sugarcane bagasse biochar can reduce Cd available due to changing the Cd distribution from unstable forms to stable forms.

Keywords: Biochar, Salinity, Cadmium, Chemical forms

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Chaharmahal-Va-Bakhtiari, Iran.

*: Corresponding author, Email: hrm_61@yahoo.com