



نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار

جلد یازدهم، شماره سوم، ۱۴۰۰

۹۹-۱۱۷

<http://ejms.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/ejms.2021.18515.1985



(مقاله کامل علمی - پژوهشی)

اثر بیوچارهای باگاس نیشکر و شوری سدیم کلرید بر قابلیت استفاده و شکل‌های کادمیم در یک خاک درشت‌بافت آهکی

الناز میرزاخانی^۱، حمیدرضا متقیان^{۲*} و علیرضا حسین‌پور^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد،

^۳ استاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

چکیده

سابقه و هدف: یکی از روش‌های مؤثر در جهت کاهش اثرهای زیان‌آور فلزهای سنگین در خاک‌های آلوده، استفاده از بیوچار است که به‌عنوان یک ماده اصلاح‌گر آلی ممکن است برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک را تغییر داده و شرایط مناسب را جهت بی‌حرکی فلزهای سنگین در خاک فراهم کند. بیوچار ماده جامد کربنی است که از گرم‌کافت بقایای آلی در شرایطی با اکسیژن محدود تهیه می‌شود. این ماده با داشتن سطح‌ویژه، ساختار متخلخل، گروه‌های عامل می‌تواند خطر آلودگی فلزهای سنگین در خاک و ورود آن‌ها به زنجیره غذایی را کاهش دهد. هدف از انجام این پژوهش بررسی کاربرد بیوچارهای باگاس نیشکر تهیه‌شده از آن در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس بر قابلیت استفاده و شکل‌های کادمیم در یک خاک شور و آلوده به کادمیم بود.

مواد و روش‌ها: ابتدا ۱۵ میلی‌گرم بر کیل‌گرم کادمیم از منبع کادمیم کلرید به‌صورت محلول به نمونه خاک (۲۰۰ گرم) اضافه و با کل خاک مخلوط شد. نمونه‌ها به‌مدت ۳ هفته در دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس در رطوبت ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای خوابانده شدند. سپس، شوری ۱۱۷۰ و ۲۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم از نمک سدیم کلرید (معادل ۳/۶۵ و ۷/۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) به نمونه‌های خاک اضافه شد. در ادامه، ۱ درصد (وزنی - وزنی) باگاس نیشکر و بیوچار دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس و بیوچار دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در ۳ تکرار به نمونه خاک اضافه و به‌مدت ۳ ماه در دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس در رطوبت ۸۰ درصد ظرفیت زراعی در انکوباتور نگهداری شدند. پس از پایان دوره خوابانیدن، از هر یک از تیمارها مقداری خاک برداشته و مقدار کادمیم قابل استخراج به‌روش DTPA و شکل‌های کادمیم با استفاده از روش عصاره‌گیری تسیر و همکاران (۱۹۷۹) استخراج شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیوچار کادمیم عصاره‌گیری‌شده با DTPA را کاهش داد ($P < 0.05$). هم‌چنین بیوچار بر pH خاک اثر معناداری نداشت ($P > 0.05$) و باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک شد ($P < 0.05$). شوری کادمیم عصاره‌گیری‌شده با DTPA را افزایش داد ($P < 0.05$). هم‌چنین شوری اثر معناداری بر pH خاک نداشت ($P > 0.05$). کاربرد بیوچار موجب کاهش ($P < 0.05$) کادمیم تبادلی ($1.13/7$) و پیوندشده با کربنات‌ها ($1.24/1$) و

* مسئول مکاتبه: motaghian.h@yahoo.com

افزایش ($P < 0.05$) کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز ($0.37/2$) و باقی مانده ($0.30/6$) نسبت به خاک شاهد گردید. کادمیم پیوندشده با کربنات‌ها و اکسیدهای آهن و منگنز در تیمار شوری 2340 میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب $31/5$ و $25/8$ درصد نسبت به تیمار شوری 1170 میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافتند. کادمیم پیوندشده با ماده آلی در تیمار 1170 و 2340 میلی‌گرم بر کیلوگرم نمک سدیم کلرید به ترتیب $38/8$ و $22/2$ درصد نسبت به شاهد کاهش یافتند. همچنین کادمیم باقیمانده در تیمار شوری 2340 میلی‌گرم بر کیلوگرم $24/9$ درصد نسبت به تیمار شوری 1170 میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: کاربرد بیوچار باگاس نیشکر در خاک آهکی آلوده به کادمیم، منجر به تغییر شکل کادمیم از شکل‌های ناپایدار (تبادلی و کربناتی) به شکل‌های پایدارتر (پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و باقی مانده) و در نتیجه کاهش تحرک و قابلیت استفاده کادمیم در خاک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، شکل‌بندی، شوری، کادمیم

مقدمه

ورود و تجمع فلزهای سنگین به زنجیره‌های غذایی یکی از اصلی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی جوامع امروزی به‌خصوص در کشورهای پیشرفته است. مهم‌ترین منبع تولیدکننده فلزهای سنگین فعالیت‌های انسانی به‌ویژه استخراج فلزات از معادن، آب‌فلزکاری، باطری‌سازی، معدن‌کاوی و سایر فرآیندهای صنعتی است. فلزهای سنگین برخلاف آلاینده‌های آلی در محیط تجزیه شیمیایی و بیولوژیکی نمی‌شوند بنابراین، مدت زمان طولانی در خاک باقی می‌مانند و خطر قابل‌توجهی برای سلامتی انسان و محیط زیست ایجاد می‌کنند (۳۸). یکی از این عناصر کادمیم است؛ کودهای فسفره از مهم‌ترین منابع آلودگی خاک‌های زراعی به کادمیم هستند. زیرا سنگ فسفاتی که برای کود مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌تواند کادمیم زیادی (10 تا 980 میلی‌گرم بر کیلوگرم) داشته باشد. خاکی که دارای $8-1$ درصد ماده آلی، رس کم‌تر از 30 درصد و $pH=7$ و دارای غلظت کادمیم بیش از 13 میلی‌گرم بر کیلوگرم در کاربری کشاورزی در محدوده خطر فوری است (۱۰).

بیوچار ماده آلی حاصل از فرآیند گرماکافت^۱ ترکیبات آلی است. گرماکافت ترکیبات بقایای آلی مانند بقایای گیاهی، زراعی، جنگلی و فضولات دامی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن محدود و دمای بالا، سبب تشکیل مقداری ترکیبات کربنی فرار، مقداری ترکیبات کربنی باقی‌مانده و خاکستر حاوی مقدار قابل‌ملاحظه کلسیم و پتاسیم می‌شود افزودن بیوچار به خاک‌ها به‌عنوان روشی جهت ترسیب کربن درون خاک، کاهش پسماندها و کاهش غلظت دی‌اکسید کربن هوا توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۲۰).

شوری یکی از عوامل تخریب خاک است که با تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژی خاک‌ها رشد گیاهان را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. خاک‌های شور بیش‌تر به‌علت شوری آب‌های زیرزمینی و یا تبخیر و تعرق از اراضی کشاورزی بوجود می‌آیند. شوری معمولاً قابلیت استفاده و تحرک کادمیم را افزایش می‌دهد. سه مکانیسم مهم در این فرآیند نقش عمده دارند که شامل (۱) تشکیل کمپلکس با انواع لیگاندهای غیر آلی (مانند کلرید) در محلول (۲) تبادل

بنابراین با توجه به افزایش آلودگی خاکها بویژه کادمیم از طریق کودهای با کیفیت نامناسب نیاز به کاربرد روشهای کاهش سمیت این عنصر وجود دارد. همچنین شوری خاکها در حال افزایش است و مطالعات کمتری به بررسی اثر کاربرد بیوچار بر تحرک کادمیم در خاک آلوده و شور پرداخته است. بنابراین در این پژوهش به بررسی برهمکنش شوری و بیوچار باگاس بر قابلیت استفاده و تعیین شکل‌های کادمیم در خاک آهکی آلوده پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و ویژگی‌های خاک: خاک مورد استفاده غیر آلوده با کلاس بافت درشت بافت (لومی‌شنی) از دشت استان چهارمحال و بختیاری برداشته شد. نمونه خاک با چکش چوبی کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های خاک مانند بافت به روش هیدرومتر (۱۲)، قابلیت هدایت الکتریکی^۱ (EC) در عصاره ۲ به ۱ آب به خاک (۲۹)، pH در سوسپانسیون ۲ به ۱ آب به خاک (۳۳) و کربنات کلسیم معادل^۲ (CCE) به روش تیتراسیون اسید باقی‌مانده (۲۸) و ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۴) تعیین شد. مقدار کادمیم شبه کل با استفاده از اسید نیتریک ۴ مولار (۳۰) و مقدار کادمیم قابل‌استفاده با روش DTPA (۱۹) عصاره‌گیری و با دستگاه جذب اتمی مدل GBC, 932 اندازه‌گیری شد. برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در جدول ۱ گزارش شده است.

تهیه بیوچار: باگاس نیشکر از کشت و صنعت نیشکر در خوزستان تهیه و با استفاده از آسیاب خرد شد. بیوچارها در ۲ سطح دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس با قراردادن باگاس نیشکر در کوره به مدت ۲ ساعت با سرعت افزایش دمای ۱۰ درجه سلسیوس

یونی و یا به‌عبارت دیگر رقابت کاتیون‌ها برای مکان‌های جذب در بخش جامد و (۳) افزایش فعالیت کاتیون‌های فلزی در محلول ناشی از افزایش قدرت یونی (۲). شوری می‌تواند سمیت فلزهای سنگین را افزایش دهد (۲، ۱۱، ۱۳ و ۳۵). عثمان (۲۰۱۵) در پژوهشی به بررسی قابلیت استفاده کادمیم تحت‌تأثیر شوری (شامل صفر، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌مول بر کیلوگرم کلرید سدیم) در خاک شنی لومی آهکی آلوده به کادمیم (غلظت‌های ۰/۵، ۱/۵، ۳، ۶، ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم از منبع کادمیم کلرید) پرداخت. نتایج نشان داد که کادمیم قابل استخراج با DTPA با افزایش شوری افزایش یافت. همچنین pH خاک با افزایش مقدار نمک کاهش یافت (۳۵). برخی مطالعات نشان دادند که بیوچار می‌تواند به‌طور معناداری تحرک فلزهای سنگین را از طریق تغییر شکل‌های آن‌ها در خاک کاهش دهد (۳، ۷ و ۳۶). دای و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به بررسی بیوچار کاه و کلش برنج تهیه‌شده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس بر قابلیت استفاده و شکل‌های فلزهای سنگین در یک خاک آهکی (pH=۷/۶۲) آلوده در چین پرداختند. شش سطح بیوچار (بدون بیوچار، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ وزنی وزنی) به خاک اضافه شد. آنان گزارش کردند که بیوچار باعث کاهش غلظت مس، روی و کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA شد و با افزایش مقدار کاربرد بیوچار جزء باقیمانده افزایش یافت. طبق نتایج آنان افزایش pH در خاک‌های تیمار شده با بیوچار، تشکیل کمپلکس‌های پایدار با مواد آلی را تشدید می‌کند (۹). یانگ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثر بیوچار تهیه‌شده از ساقه تنباکو در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس بر شکل‌ها و قابلیت استفاده فلزهای سنگین در خاک اسیدی دارای بافت لوم رسی پرداختند. بیوچار در ۴ سطح صفر، ۱، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی به‌کار برده شد. نتایج نشان داد که مقدار کادمیم و روی استخراج شده توسط کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار با افزایش سطح بیوچار کاهش یافت (۳۷).

1- Electrical Conductivity
2- Calcium Carbonate Equivalen

بر دقیقه و در شرایط کمبود اکسیژن تهیه و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس، ویژگی‌های بیوچارها مانند قابلیت هدایت الکتریکی و pH در نسبت ۱ به ۲۰ آب به بقایا، کادمیم کل و ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از روش‌های بیان شده در بخش قبل سطح ویژه به روش BET (۵) و کربن آلی با دستگاه تجزیه عنصری (۳۴) تعیین شد (جدول ۱).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک* و اصلاحگرها**.

Table 1. Some chemical and physical properties of soil and amendment.

بیوچار-۶۰۰ Biochar-600	بیوچار-۴۰۰ Biochar-400	ماده اولیه feedstock	خاک Soil	ویژگی Properties
9.9	9.19	6.82	8.05	pH
1.88	0.97	0.79	0.46	هدایت الکتریکی EC (dSm ⁻¹)
97.3	10.39	4.26	-	سطح ویژه (مترمربع بر گرم) Surface area (m ² g ⁻¹)
54.74	52.84	38.42	1.42	کربن آلی (%) OC
-	-	-	53.3	شن (%) Sand
-	-	-	38.5	سیلت (%) Silt
-	-	-	8.2	رس (%) Clay
-	-	-	20.8	کربنات کلسیم معادل (%) Carbonate calcium equivalent
-	-	-	nd	کادمیم قابل استفاده (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available Cd (mg kg ⁻¹)
0.2	0.18	0.1	0.013	کادمیم کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Total Cd (mg kg ⁻¹)
27.2	38.8			عملکرد (%) Yield (%)
35.3	29.6			خاکستر (%) Ash (%)

* خاک (Soil) pH-H₂O (1:2) و EC (1:2)

** اصلاحگر (Amendment) pH-H₂O (1:20) و EC (1:20)

Under detection limit: زیر حد تشخیص دستگاه: nd

دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس در انکوباتور (80 درصد ظرفیت مزرعه‌ای) نگهداری شدند. پس از پایان دوره خوابانیدن، از هریک از تیمارها مقدار مشخصی از خاک برداشت شده و شکل‌های کادمیم با استفاده از روش تسیر و همکاران (۱۹۷۹) استخراج شد (۳۲). خلاصه روش عصاره‌گیری متوالی در جدول ۲ نشان داده شده است. هم‌چنین مقدار قابل استفاده کادمیم به‌روش DTPA (با استفاده از 0.005 مولار DTPA + 0.1 مولار $CaCl_2$ + 0.1 مولار TEA) با نسبت ۱:۲ خاک-عصاره‌گیر همراه با 120 دقیقه تکان عصاره‌گیری شد (۱۵). سپس، مقدار کادمیم در محلول‌ها با دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی مدل GBC, 932 اندازه‌گیری شد.

اعمال تیمار و اجرای آزمایش انکوباسیون: برای انجام این پژوهش ابتدا 15 میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم از منبع کادمیم کلرید به‌صورت محلول به 200 گرم نمونه خاک اضافه و با خاک مخلوط و مقدار آب لازم جهت تنظیم رطوبت خاک در 80 درصد ظرفیت مزرعه‌ای، به نمونه‌ها اضافه شد. نمونه‌ها به‌مدت 3 هفته در دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس در رطوبت 80 درصد ظرفیت مزرعه‌ای خوابانده شدند. سپس، 1170 و 2340 میلی‌گرم بر کیلوگرم از نمک سدیم کلرید معادل $3/65$ و $7/30$ دسی‌زیمنس بر متر به نمونه‌های خاک اضافه شد. در ادامه، مقدار 1 درصد (وزنی-وزنی) ماده‌اولیه، بیوپچار دمای 400 درجه سلسیوس و بیوپچار دمای 600 درجه سلسیوس در 3 تکرار به نمونه خاک‌ها اضافه و به‌مدت 3 ماه در

جدول ۲- روش عصاره‌گیری تسیر و همکاران (۱۹۷۹) با کمی تغییر برای تعیین شکل‌های کادمیم در خاک.

Table 2. Extraction method of Tessier et al. (1979) with modification for Cd fractionation in soil.

زمان (ساعت) Time	دما (°C) Temperature	روش عصاره‌گیری Extraction method	مرحله Stage	شکل Fraction
2	دمای اتاق Room Temperature	۱ گرم خاک + ۸ میلی‌لیتر کلرید منیزیم ۱ مولار (pH=7) 1g Soil+8 ml 1 M Magnesium Chloride (pH=7)	1	محلول و تبادل Soluble and exchangeable
6	دمای اتاق Room Temperature	۸ میلی‌لیتر استات سدیم ۱ مولار (pH=5) 8ml 1M Sodium Acetate (pH=5)	2	پیوندشده با کربنات‌ها Associated with carbonate
6	96 ± 3	۲۰ میلی‌لیتر هیدروکسیل آمین هیدروکلراید ۰/۰۴ مولار (در اسید استیک ۲۵٪) 20ml 0.04 M Hydroxyl Amine-Hydrochloride in 25% Acetic Acid	3	پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز Associated with Fe/Mn oxides
5	85 ± 2	۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۰/۰۲ مولار + ۸ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰٪ 5 ml 0.02 M Nitric Acid + 8 ml 30% Hydrogen Peroxide (pH=2) + 5 ml 3.2 M Ammonium Acetate in 20% Nitric Acid	4	پیوندشده با ماده آلی Associated with organic matter
0.5	دمای اتاق Room Temperature			

باقیمانده از تفاوت مقدار کل با سایر شکل‌ها به‌دست آمد.

Residual is obtained from the difference between the total value and the other fractions.

تجزیه و تحلیل آماری: قبل از تجزیه واریانس، فرضیات تجزیه واریانس شامل یکنواختی واریانس‌ها و توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها بررسی شد. برای بررسی اثر شوری و بیوپچار در خاک آلوده و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار قابل‌استفاده کادمیم و شکل‌های آن از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با روش حداقل اختلاف معنادار^۱ (LSD) در سطح ۵ درصد با نرم‌افزار Statistica 8 انجام شد.

نتایج و بحث

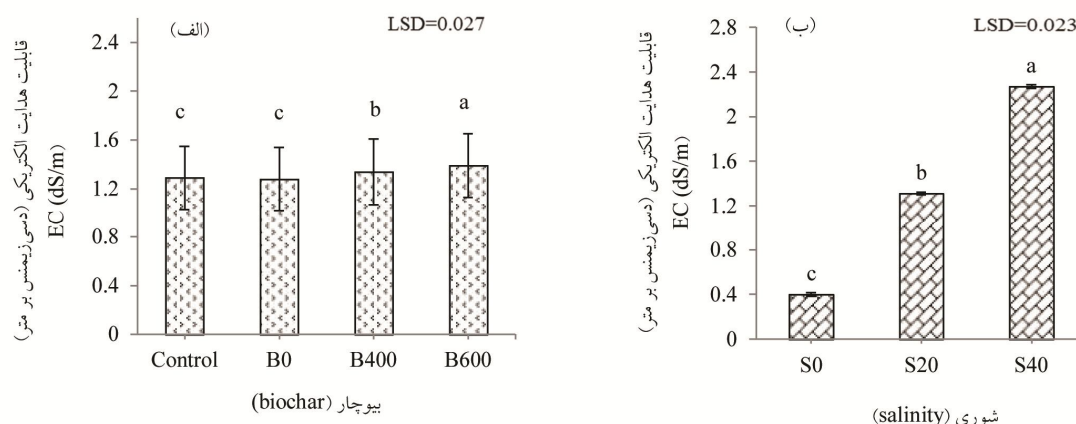
تغییرات pH و قابلیت هدایت الکتریکی در خاک: نتایج تجزیه واریانس دو طرفه اثر بیوپچار و شوری (داده‌ها نشان داده نشده است) نشان داد که اثر بیوپچار و شوری بر EC خاک معنادار بود ($P < 0/01$). به ترتیب شوری و بیوپچار بیش‌ترین تأثیر را بر EC خاک داشتند. مقایسه میانگین قابلیت هدایت الکتریکی تحت تأثیر بیوپچار در (شکل ۱- الف) نشان داده شده است. میانگین قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار بیوپچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به شاهد ($P < 0/05$) و ماده اولیه ($P < 0/05$) افزایش معناداری یافت ($P < 0/05$). میانگین EC در تیمار بیوپچار ۴۰۰ درجه سلسیوس نسبت به شاهد ($P < 0/05$) و ماده اولیه ($P < 0/05$) افزایش معناداری یافت ($P < 0/05$). میانگین EC در تیمار بیوپچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار بیوپچار تولید شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس ($P < 0/05$) افزایش معناداری یافت ($P < 0/05$). مطابق با نتایج این پژوهش، مرادی و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند کاربرد بیوپچار ضایعات هرس درخت سیب و گاه و کلاه گندم تهیه‌شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در یک خاک لوم سیلتی با $pH = 7/58$ باعث افزایش قابلیت

هدایت الکتریکی خاک (۱۲٪) در مقایسه با خاک شاهد شد. آنان بیان کردند دلیل افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌تواند به دلیل بالا بودن قابلیت هدایت الکتریکی بیوپچار باشد. بیوپچار حاوی برخی عناصر مانند پتاسیم، کلسیم و منیزیم است (۲۳).

مقایسه میانگین قابلیت هدایت الکتریکی تحت تأثیر عامل شوری در (شکل ۱- ب) نشان داده شده است. قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار شوری ۲۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد ($P < 0/05$) و تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ($P < 0/05$) افزایش معناداری یافت ($P < 0/05$). قابلیت هدایت الکتریکی در تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد ($P < 0/05$) افزایش معناداری یافت ($P < 0/05$). مطابق با نتایج این پژوهش، عباسپور و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند در سه خاک با بافت لوم رسی (خشتی $pH = 6/97$ ، اسیدی $pH = 5/56$ ، آهکی $pH = 7/78$) با اضافه کردن نمک کلرید سدیم به مقدار ۵۰ میلی‌مول بر کیلوگرم قابلیت هدایت الکتریکی خاک را از ۲/۳ به ۲/۷ دسی‌زیمنس بر متر در مقایسه با خاک شاهد افزایش داد که معادل ($P < 0/05$) افزایش بود (۱).

نتایج نشان داد که کاربرد بیوپچار و شوری بر مقدار pH خاک اثر معناداری نداشت ($P > 0/05$). چنگ و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر بیوپچار ساقه تنباکو بر یک خاک آهکی به صورت مصنوعی با سرب آلوده شده بود، را بررسی و مشاهده کردند که بین pH در خاک شاهد و تیمارها تفاوت معناداری نبود. زیرا خاک‌های آهکی ظرفیت بافری بالایی در برابر تغییرات pH دارند بنابراین تأثیر بیوپچار بر pH خاک در خاک آهکی با توجه به خاصیت بافری خاک به دلیل حضور کربنات کلسیم در این خاک‌ها حداقل می‌باشد (۸).

1- Least Significant Difference



شکل ۱- مقایسه میانگین قابلیت هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) تحت تأثیر بیوچار (الف) و شوری (ب). حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند
 C: 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 ۱۱۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم؛ S40: مقدار ۲۳۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم
 خطای استاندارد میانگین به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است

Figure 1. Comparison means of EC (dSm⁻¹) of effects of biochar (a) and salinity (b). Different letters represent significant difference (P < 0.05) between means by LSD test
C: control; B0: feedstock; B400, and B600 are biochars produced at 400, and 600 °C respectively
S0: control; S20, and S40 are 1170 and 2340 mg kg⁻¹ NaCl respectively
Values are mean ± Standard errors of mean

شوری بر کادمیم عصاره گیری شده با DTPA معنادار بود (P < ۰/۰۱). به ترتیب بیوچار و شوری بیشترین تأثیر را بر کادمیم عصاره گیری شده با DTPA داشتند.

کادمیم عصاره گیری شده با DTPA: نتایج تجزیه واریانس دوطرفه اثر بیوچار و شوری بر کادمیم عصاره گیری شده با DTPA در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داد اثر بیوچار و

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچار و شوری بر کادمیم عصاره گیری شده با DTPA در خاک مورد مطالعه.

Table 3. Results of analysis of variance of biochar and salinity effects on Cd extracted with DTPA in the studied soil.

میانگین مربعات (MS) DTPA	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of changes
		اثرات اصلی Main effects
2.72**	3	بیوچار Biochar
0.38**	2	شوری Salinity
0.01 ^{ns}	6	بیوچار × شوری Biochar × Salinity
0.04	24	خطا Error

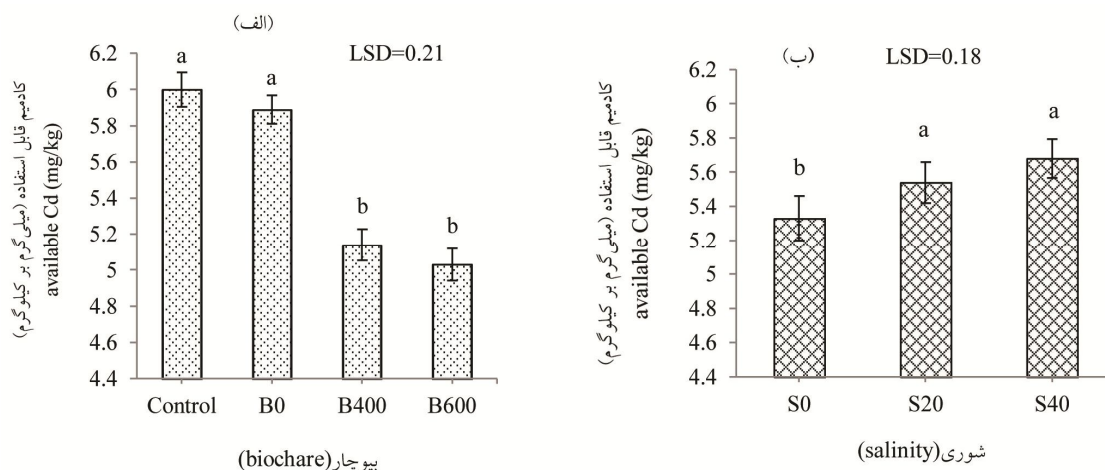
^{ns} و ** به ترتیب به مفهوم غیر معنادار و معنادار در سطح احتمال ۱ درصد می باشد
^{ns} and ** are non-significant and significant at the probability level of 1% respectively

مقایسه میانگین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA تحت تأثیر شوری در (شکل ۲-ب) نشان داده شده است. میانگین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA در تیمار شوری ۲۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد (۶/۵٪) افزایش معناداری یافت ($P < 0/05$). میانگین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA در تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد (۳/۹٪) افزایش معناداری یافت ($P < 0/05$). مطابق با نتایج این پژوهش، فلاحتی و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند در خاک لوم شنی و رسی سیلتی (مقدار کل کادمیم ۰/۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در لوم شنی و ۰/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک رسی سیلتی) با افزایش سطوح شوری نمک سدیم کلرید و کلسیم کلرید به خاک کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA افزایش یافت. به طوری که مقدار از ۰/۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم تیمار شاهد شوری به ۰/۱۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر رسید که معادل (۳۲/۸٪) افزایش بود (۱۱). غلاب و عثمان (۲۰۰۷) بیان کردند که در دو خاک با بافت لوم رسی $pH=7/65$ و شنی با $pH=8$ آلوده شده به طور مصنوعی مقدار کلرید کادمیم شامل ۰/۵ و ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم (مقدار کل کادمیم در خاک شنی ۰/۰۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در خاک لوم رسی ۰/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود) با افزایش سطح شوری از صفر به ۶۸/۴ میلی‌مولار کلرید سدیم کادمیم قابل استفاده افزایش یافت. یون سدیم حاصل از نمک می‌تواند برای جذب محل‌تبادلی 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 فلزات سمی افزایش می‌یابد (۱۳). در مطالعه‌ای که توسط آکوستا و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد، اثر شوری ناشی از نمک‌های $CaCl_2$ ، $MgCl_2$ ، $NaCl$ و Na_2SO_4 در

مقایسه میانگین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA تحت تأثیر بیوچار در (شکل ۲-الف) نشان داده شده است. میانگین کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمارهای شاهد (۱۶/۱٪) و ماده اولیه (۱۴/۶٪) کاهش معناداری ($P < 0/05$) یافت. کادمیم عصاره‌گیری شده با DTPA در تیمار بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمارهای شاهد (۱۴/۳٪) و ماده اولیه (۱۲/۷٪) کاهش معناداری ($P < 0/05$) یافت. بیوچار از طریق چند مکانیسم موجب کاهش حلالیت و زیست‌فراهمی فلزات سمی می‌شود. (۱) تشکیل رسوب، (۲) افزایش جذب ویژه فلزات سمی، (۳) افزایش جذب الکترواستاتیک و تبادل یونی بین کاتیون فلزی و پروتون مشتق شده از بیوچار، (۴) افزایش جذب الکترواستاتیک و تبادل یونی بین کاتیون فلزی مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم و گروه‌های فعال (مانند کربوکسیل و هیدروکسیل) بیوچار و (۵) تشکیل کمپلکس پایدار با بیوچار (۱۶ و ۲۷). آلی و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند کاربرد بیوچار بامبو در خاک لوم شنی آلوده ناشی از کارخانه با $pH=7/7$ و در خاک لوم رسی آلوده معدن با $pH=8/1$ قابلیت استفاده سرب، مس و کادمیم را کاهش داد. آنان علت را به سطح جذب بالای بیوچار بامبو به علت داشتن گروه‌های فنلی، $-OH$ ، $-COOH$ و $C=N$ نسبت دادند (۳). یانگ و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند کاربرد بیوچار کاه و کلش برنج تهیه شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و بیوچار بامبو تهیه شده در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس در خاک اسیدی با $pH=5/7$ باعث کاهش قابلیت استفاده فلزهای سنگین شد. بر طبق نتایج آنان بیوچار کاه و کلش برنج دارای مقادیر بیش‌تری سدیم، پتاسیم، منیزیم، آهن و سیلیسیم بیش‌تری نسبت به بیوچار بامبو داشت که باعث غیرمتحرک شدن سرب شد. بیوچار کاه و کلش برنج با تشکیل رسوبات $CdCO_3$ موجب کاهش قابلیت استفاده فلزات سمی در خاک شد (۳۶).

تحرک و قابلیت استفاده این عنصر رقابت بین کمپلکس کادمیم کلرید با کاتیون‌های کلسیم و منیزیم موجود در خاک شور برای مکان‌های جذب در خاک بود (۲).

تحرک مس، کادمیم، سرب و روی مورد بررسی قرار گرفت. همه خاک‌ها دارای $pH > 7.5$ داشتند. نتایج حاصل نشان داد که در حضور $CaCl_2$ و $NaCl$ کادمیم و سرب بالاترین تحرک را داشتند. مکانیسم اصلی در



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

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

C: 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 ۱۱۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم؛ S40: مقدار ۲۳۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم

خطای استاندارد میانگین به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است

Figure 2. Comparison means of available Cd (mg/kg) influenced by biochar (a) and salinity (b). Different letters represent significant difference ($P < 0.05$) between means by LSD test
C: control; B0: feedstock; B400, and B600 are biochars produced at 400, and 600 °C respectively
S0: control; S20, and S40 are 1170 and 2340 mg kg⁻¹ NaCl respectively
Values are mean ± Standard errors of mean

بیشترین تأثیر را بر کادمیم پیوندشده با اکسیدها داشت. شوری بیشترین تأثیر را بر کادمیم پیوندشده با ماده آلی و باقیمانده داشت.

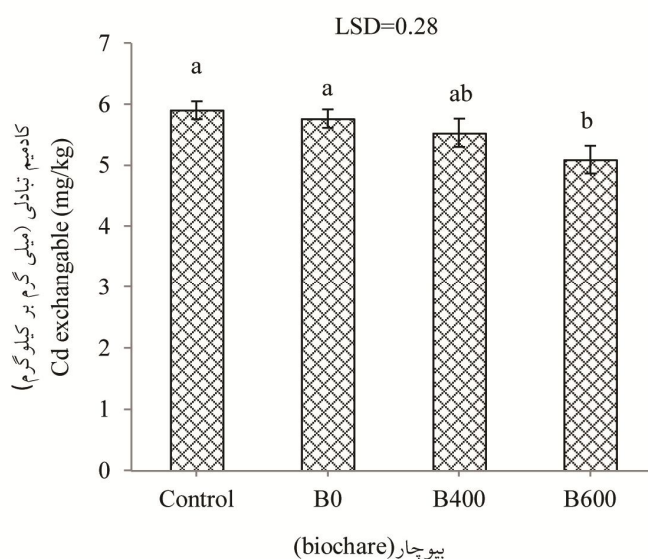
طبق نتایج به دست آمده بیشترین مقدار کادمیم به ترتیب در شکل‌های باقی مانده و تبادلی توزیع شده بود. نتایج مشابهی برای این فلز در خاک‌های مختلف گزارش شده است (۱ و ۳۱).

مقایسه میانگین کادمیم تبادلی تحت تأثیر بیوچار در (شکل ۳) نشان داده شده است. میانگین کادمیم تبادلی

شکل‌های کادمیم: نتایج تجزیه واریانس دو طرفه داده‌ها (داده‌ها نشان داده نشده است) نشان داد که اثر بیوچار بر کادمیم تبادلی معنادار بود ($P < 0.05$). اثر بیوچار بر کادمیم پیوندشده با کربنات‌ها، اکسیدهای آهن و منگنز و باقیمانده معنادار بود ($P < 0.01$). اثر شوری بر همه شکل‌های کادمیم به جز تبادلی معنادار بود ($P < 0.01$). بیوچار بیشترین تأثیر را بر کادمیم تبادلی داشت. اثر متقابل بیوچار و شوری بیشترین تأثیر را بر کادمیم پیوندشده با کربنات‌ها داشت. بیوچار

فلزات به شکل اکسید و هیدروکسیدهای فلزی می‌شود (۱۴). پارک و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که بیوچار حاصل از کود مرغ و بیوچار حاصل از بقایای گیاهی تهیه‌شده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس در خاک اسیدی با $pH=5/9$ آلوده به مس و سرب (غلظت کل مس و سرب به ترتیب $81/3$ و 254 میلی‌گرم بر کیلوگرم)، شکل قابل تبادل مس و سرب را کاهش داد. آنان وجود گروه‌های هیدروکسیل و پیوند C-H در حلقه‌های آروماتیک بیوچار را علت اصلی توانایی جذب بیوچارها بیان کردند (۲۷).

در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمارهای شاهد ($13/7\%$) و ماده اولیه ($11/63\%$) کاهش معناداری ($P < 0/05$) یافت. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، حمزه‌نژاد و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که با کاربرد بیوچار بقایای هرس درخت سبب تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در خاک لوم‌شنی (سدیمی) با $pH=8/7$ که به‌طور طبیعی آلوده به کادمیم (۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود، کادمیم تبدلی کاهش یافت. آنان علت را این‌طور بیان کردند که کاربرد بیوچار باعث افزایش pH خاک و در نتیجه باعث افزایش هیدرولیز کاتیون‌های فلزی و تشکیل رسوب



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

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

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

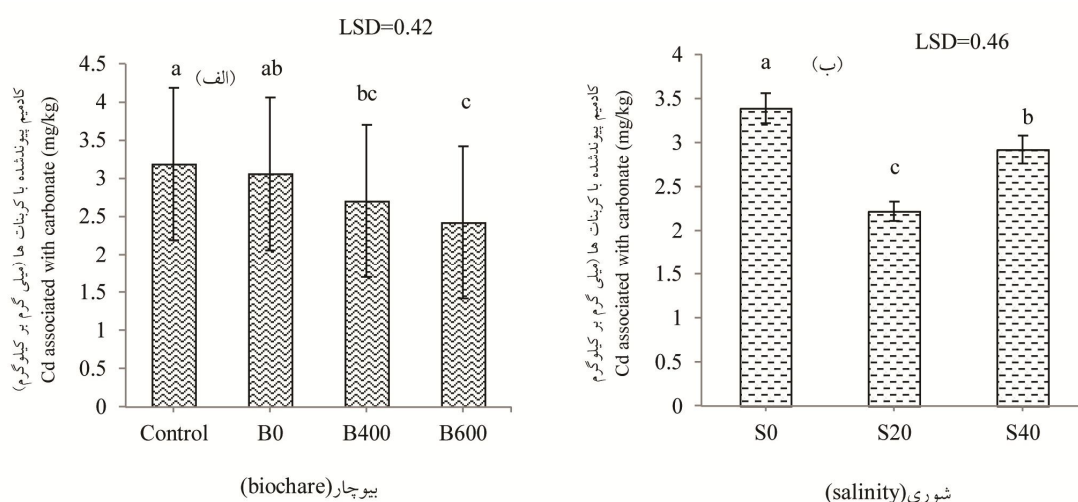
خطای استاندارد میانگین به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است

Figure 3. Comparison means of exchangeable Cd (mg/kg) influenced by biochar. Different letters represent significant difference ($P < 0.05$) between means by LSD test C; control; B0: feedstock; B400, and B600 are biochars produced at 400, and 600 °C respectively Values are mean \pm Standard Errors of mean

می‌دهد. بنابراین گروه‌های عاملی کمپلکس پایدار با فلزات تشکیل داده و جذب اختصاصی بین فلز و خاک اصلاح شده با بیوچار تشکیل می‌شود (۲۱).

مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با کربنات‌ها تحت تأثیر شوری در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. میانگین کادمیم پیوندشده با کربنات‌ها در تیمار شوری ۲۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد (۱۳/۸٪) کاهش معناداری ($P < 0/05$) یافت. کادمیم این شکل در تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد (۳۴/۵٪) کاهش معناداری ($P < 0/05$) یافت. کادمیم این شکل در تیمار شوری ۲۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۳۱/۵٪) افزایش معناداری ($P < 0/05$) یافت. کریمی و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که در خاک لوم رسی با $pH=8/2$ که آلوده طبیعی به روی ۳۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود روی پیوندشده با کربنات‌ها با افزایش سطح شوری از ۲ به ۴ دسی‌زیمنس بر متر افزایش معناداری نیافت ($P > 0/05$). آن‌ها دلیل این نتیجه را احتمالاً افزایش قدرت یونی و مقدار بیش‌تر کلسیم محلول و کاهش حلالیت کربنات کلسیم گزارش کردند (۱۸). مطالعات نشان می‌دهد که یون کلرید در خاک شور زیاد بوده و ممکن است کمپلکس‌های قوی با کادمیم تشکیل دهد و منجر به کاهش آن در سایر اجزا شود. کمپلکس‌های پایدار کادمیم کلرید مانع شکل‌گیری اشکال غیرمتحرک کادمیم می‌شود (۲۵).

مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با کربنات‌ها تحت تأثیر بیوچار در (شکل ۴-الف) نشان داده شده است. میانگین کادمیم پیوندشده با کربنات‌ها در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمارهای شاهد (۲۴/۱٪) و ماده اولیه (۲۰/۹٪) کاهش معناداری ($P < 0/05$) یافت. همچنین این شکل در خاک تیمار شده با بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس نسبت به شاهد (۳۰/۷٪) کاهش معناداری ($P < 0/05$) یافت. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، آلی و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که بیوچار پوسته زردآلو و بقایای هرس سیب تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در خاک لوم‌شنی (سدیمی) با $pH=8/4$ در خاک آلوده به کادمیم و روی (مقادیر کل کادمیم و روی به ترتیب ۱۸۶۰ و ۳۹/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود باعث کاهش شکل پیوندشده با کربنات‌ها کادمیم و روی شد. آنان کاهش کادمیم و روی پیوندشده با کربنات‌ها را به افزایش ناشی از بیوچار در EC خاک و افزایش احتمال رسوب فلز در شرایط قلیایی یا جذب فلز توسط گروه‌های عاملی بیوچار نسبت دادند (۴). لو و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند کاربرد بیوچار تهیه‌شده از کاه و کلش برنج در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در خاک لوم‌شنی به‌طور طبیعی آلوده اطراف کارخانه ذوب مس سرب، مس، کادمیم و روی پیوندشده با کربنات‌ها را به ترتیب ۳۴، ۱۶، ۱۱ و ۱۷ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. آنان بیان کردند گروه‌های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل از بیوچار جذب سطحی با فلزات تشکیل



شکل ۴- مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با کربنات‌ها (میلی‌گرم بر کیلوگرم) تحت تأثیر بیوجار (الف) و شوری (ب).

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

C: شاهد؛ B0: ماده اولیه؛ B400: بیوجار تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس؛ B600: بیوجار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس

S0 : شاهد؛ S20: مقدار ۱۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم؛ S40: مقدار ۲۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم

خطای استاندارد میانگین به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است

Figure 4. Comparison means of Cd associated with carbonate (mg/kg) influenced by biochar (a) and salinity (b).

Different letters represent significant difference ($p < 0.05$) between means by LSD test

C: control; B0: feedstock; B400, and B600 are biochars produced at 400, and 600 °C respectively

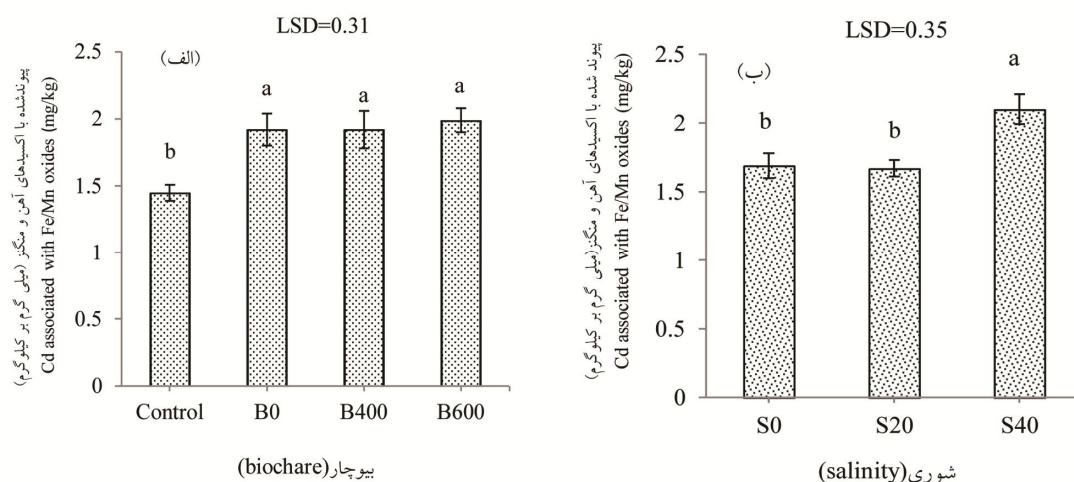
S0: control; S20, and S40 are 1170 and 2340 mg kg⁻¹ NaCl respectively

Values are mean \pm Standard Errors of mean

تشکیل اکسید فلز، کربنات یا رسوبات فسفات شود (۳۸).

مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز تحت تأثیر شوری در (شکل ۵- ب) نشان داده شده است. میانگین کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز در تیمار شوری ۲۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد (۲/۲۴٪) و تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۷/۲۵٪) افزایش معناداری ($P < 0.05$) یافت. لی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که با افزایش شوری از صفر به ۳۰ گرم بر لیتر (صفر تا ۳۰ درصد) جزء پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز کادمیم، کروم و سرب افزایش یافت (۲۲).

مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با اکسیدها تحت تأثیر بیوجار در (شکل ۵- الف) نشان داده شده است. میانگین کادمیم پیوندشده با اکسیدها در تیمار بیوجار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار شاهد (۲/۳۷٪) افزایش معناداری ($P < 0.05$) یافت. این شکل در تیمار بیوجار ۴۰۰ درجه سلسیوس نسبت به شاهد (۲/۳۷٪) افزایش معناداری ($P < 0.05$) یافت. ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که کاربرد بیوجار کاه و کلش برنج تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در خاک لوم‌شنی با pH=۶/۵ آلوده به کادمیم باعث افزایش کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز شد. بنابراین اصلاحات بیوجار در خاک می‌تواند باعث تبدیل کادمیم از اشکال محلول به فرم‌های پایدار به‌ویژه



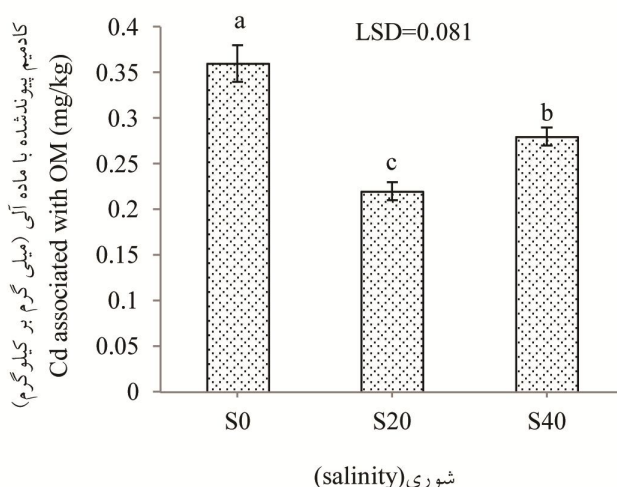
شکل ۵- مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم) تحت تأثیر بیوچار (الف) و شوری (ب). حروف مشابه، فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵ درصد بین تیمارها بر اساس آزمون LSD هستند
 C: شاهد؛ B0: ماده اولیه؛ B400: بیوچار تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس؛ B600: بیوچار تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس
 S0 : شاهد؛ S20: مقدار ۱۱۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم؛ S40: مقدار ۲۳۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم
 خطای استاندارد میانگین به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است

Figure 5. Comparison means of Cd associated with Fe/Mn oxides (mg/kg) influenced by biochar (a) and salinity (b).

Different letters represent significant difference ($P < 0.05$) between means by LSD test
 C: control; B0: feedstock; B400, and B600 are biochars produced at 400, and 600 °C respectively
 S0: control; S20, and S40 are 1170 and 2340 mg kg⁻¹ NaCl respectively
 Values are mean ± Standard Errors of mean

کیلوگرم نسبت به تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم (۲/۲۷٪) افزایش معناداری ($P < ۰/۰۵$) یافت. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، بوستانی و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند که در خاک لوم رسی سیلتی با pH=۷/۸ روی پیوندشده با ماده آلی با افزایش سطح شوری (کلرید کلسیم، کلرید سدیم و کلرید منیزیم با نسبت اکی والان یکسان) از صفر به ۳۰ میلی اکی والان نمک در کیلوگرم خاک کاهش یافت (۶).

مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با ماده آلی تحت تأثیر شوری در (شکل ۶) نشان داده شده است. میانگین کادمیم پیوندشده با ماده آلی در تیمار شوری ۲۳۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد (۲/۲۷٪) کاهش معناداری ($P < ۰/۰۵$) یافت. کادمیم این شکل در تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد (۸/۳۸٪) کاهش معناداری ($P < ۰/۰۵$) یافت. کادمیم این شکل در تیمار شوری ۲۳۴۰ میلی گرم بر



شکل ۶- مقایسه میانگین کادمیم پیوندشده با ماده آلی (میلی گرم بر کیلوگرم) تحت تأثیر شوری. S0: شاهد؛ S20: مقدار ۱۱۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم؛ S40: مقدار ۲۳۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم. خطای استاندارد میانگین به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است

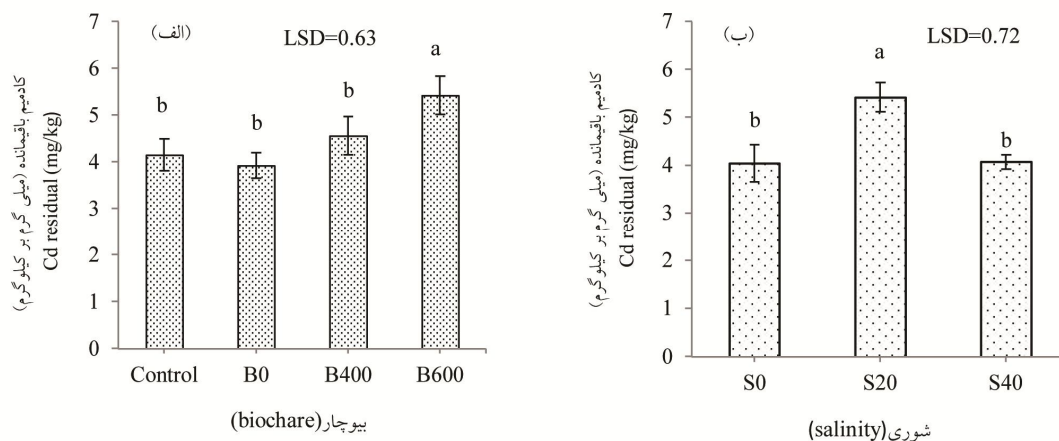
Figure 6. Comparison means of Cd associated with OC (mg/kg) influenced by salinity. S0: control; S20, and S40 are 1170 and 2340 mg kg⁻¹ NaCl respectively. Values are mean ± Standard Errors of mean

نسبت به شاهد (۳۴/۱٪) افزایش معناداری ($P < 0/05$) یافت. کادمیم این شکل در تیمار شوری ۲۳۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم (۲۴/۹٪) کاهش معناداری ($P < 0/05$) یافت. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، کریمی و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که در خاک لوم رسی (آهکی) شکل باقی مانده روی و مس با افزایش سطوح شوری (کلرید سدیم) از صفر به ۸ دسی زیمنس کاهش یافت و دلیل آن را کاهش pH ناشی از نمک کلرید سدیم دانست (۱۸). در مطالعه حاضر افزودن نمک به خاک pH را تغییر نداده و موجب افزایش و کاهش آن نشده است. همچنین کشاورز و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که در ۴ خاک رسی با pH های قلبایی که به طور طبیعی آلوده به روی بودند شکل باقی مانده روی با افزایش سطوح شوری محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید با نسبت اکی والان یکسان از ۰/۷۹ به ۲۰/۷۷ دسی زیمنس بر متر) کاهش

مقایسه میانگین کادمیم باقی مانده تحت تأثیر بیوچار (شکل ۷- الف) نشان داده شده است. میانگین کادمیم باقی مانده در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به شاهد (۳۰/۶٪) و ماده اولیه (۳۸/۲٪) افزایش معناداری ($P < 0/05$) یافت. این شکل در تیمار بیوچار تولید شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار بیوچار تولید شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس (۱۸/۸٪) افزایش معناداری ($P < 0/05$) یافت. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، جیانگ و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که بیوچار کاه و کلش برنج در در خاک رسی با pH=۵/۲ کادمیم باقی مانده را افزایش داد (۱۶). بیوچار شکل باقی مانده فلز را عمدتاً به علت اتصال قوی فلز به ذرات داخلی بیوچار افزایش داده و باعث کاهش قابلیت دسترسی فلزات می شود (۲۶). مقایسه میانگین کادمیم باقی مانده تحت تأثیر شوری در (شکل ۷- ب) نشان داده شده است. میانگین کادمیم باقی مانده در تیمار شوری ۱۱۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم

معنادار $F=0.83$ برای کادمیم باقی مانده و پیوندشده با کربنات‌ها به دست آمد.

یافت (۱۷). کاهش کادمیم باقی مانده می‌تواند به دلیل انتقال آن در اثر حضور شوری به شکل پیوندشده با کربنات‌ها باشد. در همین راستا ضریب همبستگی



شکل ۷- مقایسه میانگین کادمیم باقی مانده (میلی‌گرم بر کیلوگرم) تحت تأثیر بیوچار (الف) و شوری (ب).

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

C: 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 ۱۱۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم؛ S40: مقدار ۲۳۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کلرید سدیم

خطای استاندارد به صورت خطوط عمودی نشان داده شده است

Figure 7. Comparison means of Cd residual (mg/kg) influenced by biochar (a) and salinity (b). Different letters represent significant difference ($P < 0.05$) between means by LSD test
C: control; B0: feedstock; B400, and B600 are biochars produced at 400, and 600 °C respectively
S0: control; S20, and S40 are 1170 and 2340 mg kg⁻¹ NaCl respectively
Values are mean ± Standard Errors

یونی بر اثر شوری و در نتیجه افزایش حلالیت فازهای جامد کنترل‌کننده فعالیت فلزهای سنگین در خاک باشد. در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که هر چند شوری مقدار در دسترس فلزهای سنگین را افزایش می‌دهد اما بیوچار می‌تواند بر این افزایش اثر تعدیل‌کننده داشته باشد.

نتیجه‌گیری کلی

کاربرد بیوچار باگاس نیشکر موجب کاهش کادمیم قابل استفاده شد که می‌تواند به دلیل تغییر در شکل‌های تبادلی و پیوندشده با کربنات‌ها و افزایش (P < ۰/۰۵) آن در شکل‌های پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و باقی مانده نسبت به شاهد باشد. در حقیقت افزایش کادمیم قابل استفاده این فلز سنگین بر اثر شوری می‌تواند به دلیل افزایش قدرت

منابع

1. Abbaspour, A., Kalbasi, M., Hajrasuliha, S., and Golchin, A. 2007. Effects of plant residue and salinity on fractions of cadmium and lead in three soils. *Soil & Sediment Contamination*. 16: 539-555.
2. Acosta, J.A., Jansen, B., Kalbitz, K., Faz, A., and Martrinez, S. 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soil. *Chemosphere*. 85: 1318-1324.
3. Ali, A., Guo, D., Zhang, Y., Sun, X., Jiang, S., Guo, Z., Huang, H., Liang, W., Li, R., and Zhang, Z. 2017. Using bamboo biochar with compost for the stabilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in mine-contaminated soils of China. *Scientific Reports*. 7: 1-12.
4. Ali, A., Shaheen, S.M., Guo, D., Li, Y., Xiao, R., Wahid, F., Azeem, M., Sohail, K., Zhang, T., Rinklebe, J., and Li, R. 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. Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*. 60: 309-319.
6. Boostani, H.R., Chorom, M., Moezzi, A., Enayatizamir, N., and Karimian, N. 2016. Effect of salinity and organic matter on distribution of zinc chemical forms in a calcareous soil after maize cultivation. *Water and Soil Science*. 25: 157-169. (In Persian)
7. Cui, L., Pan, G., Li, L., Bian, R., Liu, X., Yan, J., Quan, G., Ding, C., Chen, T., Liu, Y., and Liu, Y. 2016. Continuous immobilization of cadmium and lead in biochar amended contaminated paddy soil: a five-year field experiment. *Ecological Engineering*. 93: 1-8.
8. Cheng, J., Li, Y., Gao, W., Chen, Y., Pan, W., Lee, X., and Tang, Y. 2018. Effects of biochar on Cd and Pb mobility and microbial community composition in a calcareous soil planted with tobacco. *Biology and Fertility of Soils*. 54: 373-383.
9. Dai, S., Li, H., Yang, Z., Dai, M., Dong, X., Ge, X., Sun, M., and Shi, L. 2018. Effects of biochar amendments on speciation and bioavailability of heavy metals in coal-mine-contaminated soil. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 24: 1887-1900.
10. Efiuni, A. 2013. Soil resource quality standards (soil resource pollution) and, its guidelines. Deputy Minister of Human Environment. Water and Soil Office. (In Persian)
11. Falahati Marvast, A., Hosseinpour, A.R., and Tabatabay, H. 2012. Effect of salinity and sewage sludge on the availability and uptake of heavy metals by barley. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology)*. 27: 958-997. (In Persian)
12. Gee, G.H., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. P 383-409, In: A. Klute, (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 2 physical properties. American Society of Agronomy Madison, WI.
13. Ghallab, A., and Usman, A.R.A. 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.
14. Hamzenejad, R., Sepehr, E., Samadi, A., Rasouli-Sadaghiani, M.H., and Khodaverdiloo, H. 2017. effect of apple pruning residue biochar on chemical forms, mobility factor index (MF) and reduced partition index (IR) of heavy metals in a contaminated soil. *Journal of Water and Soil*. 28: 65-78. (In Persian)
15. Jones, B.J. 2001. *Conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press. 363p.
16. Jiang, J., Xu, R.K., Jiang, T.Y., and Li, Z. 2012. Immobilization of Cu (II), Pb (II) and Cd (II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol. *Journal of Hazardous Materials*. 229: 145-150.
17. Keshavarz, P., Malakouti, M.J., Karimian, N., and Fotovat, A. 2006. The effects of salinity on extractability and chemical fractions of zinc in selected calcareous soils of Iran. 8: 181-190.

18. Karimi, F., Rahimi, G., and Kolahchi, Z. 2020. Interaction effects of salinity, sewage sludge, and earthworms on the fractionations of Zn and Cu, and the metals uptake by the earthworms in a Zn-and Cu-contaminated calcareous soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 10565-10580.
19. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*. 42: 421-428.
20. Lehmann, J., and Joseph, S.M. 2009. Biochar for environmental management Science and technology, Earthscan, London UK. *Forest Policy and Economics*. 11: 535-536.
21. Lu, K., Yang, X., Gielen, G., Bolan, N., Ok, Y.S., Niazi, N.K., Xu, S., Yuan, G., Chen, X., Zhang, X., and Liu, D. 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.
22. Li, P., Wang, X., Yu, J., Yang, J., Yu, Y., Zhou, D., and Li, Y. 2020. Effect of water level and salinity on metal fractionation in sediments of the Yellow River Delta. *Wetlands*. 40: 2765-2774.
23. Moradi, N., Rasouli-Sadaghiani, M.H., and Sepehr, E. 2017. Effect of biochar types and rates on some soil properties and nutrients availability in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*. 31: 1232-1246. (In Persian)
24. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Carbon, organic carbon and organic matter. P 961-1010, In: D.L. Sparks, (Ed), *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison. WI.
25. Petruzzelli, G., Guidi, G., and Lubrano, L. 1985. Ionic strength effect on heavy metal adsorption by soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 16: 971-986.
26. Poon, C.S., Lio, K.W., and Tang, C.I. 2001. A systematic study of cement/PFA chemical stabilisation/solidification process for the treatment of heavy metal waste. *Waste Management & Research*. 19: 276-283.
27. Park, J.H., Choppala, G.K., Bolan, N.S., Chung, J.W., and Chuasavathi, T. 2011. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*. 348: 439-451.
28. Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils*, Agriculture, 160, Handbook 60. US Department of Agriculture, Washington DC. 154p.
29. Rhoades, J.D. 1996. Salinity electrical conductivity and total dissolved solids. P 417-437, In: D.L. Sparks, (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3 chemical methods. American Society of Agronomy Madison, WI.
30. Sposito, G., Lund, L.J., and Chang, A.C. 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: 260-264.
31. Sajadi Tabar, S., and Jalali, M. 2013. Kinetics of Cd release from some contaminated calcareous soils. *Natural Resources Research*. 22: 37-44.
32. Tessier, A., Campbell, P.G., and Bisson, M.J.A.C. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*. 51: 844-851.
33. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. P 475-490, In: D.L. Sparks, (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3, chemical methods, American Society of Agronomy Madison . Madison, WI.
34. Uchimiya, M., Wartelle, L.H., Klasson, K.T., Fortier, C.A., and Lima, I.M. 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.
35. Usman, A.R. 2015. Influence of NaCl-induced salinity and Cd toxicity on respiration activity and Cd availability to barley plants in farmyard manure-amended soil. *Applied and Environmental Soil Science*. <https://doi.org/10.1155/2015/483836>.

36. Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Huang, H., Lu, K., Guo, X., He, L., Lin, X., Che, L., Ye, Z., and Wang, H. 2016. Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 23: 974-984.
37. Yang, X., Lu, K., McGrouther, K., Che, L., Hu, G., Wang, Q., Liu, X., Shen, L., Huang, H., Ye, Z., and Wang, H. 2017. Bioavailability of Cd and Zn in soils treated with biochars derived from tobacco stalk and dead pigs. *Journal of Soils and Sediments*. 17: 751-762.
38. Zhang, G., Guo, X., Zhao, Z., He, Q., Wang, S., Zhu, Y., Yan, Y., Liu, X., Sun, K., Zhao, Y., and Qian, T. 2016. Effects of biochars on the availability of heavy metals to ryegrass in an alkaline contaminated soil. *Environmental Pollution*. 218: 513-522.



Effect of bagasse biochars and sodium chloride salinity on fractionation and availability of cadmium in a coarse-textured calcareous Soil

E. Mirzakhani¹, H.R. Motaghian^{*2} and A.R. Hosseinpur³

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Shahrekord University,

²Associate Prof., Dept. of Soil Science, Shahrekord University,

³Professor, Dept. of Soil Science, Shahrekord University

Received: 11.05.2020; Accepted: 05.17.2021

Abstract

Background and Objectives: Biochar application is one of the effective methods to reduce the harmful effects of heavy metals in contaminated soils. Biochar is an organic amendment may change some of the chemical properties of the soil and create suitable conditions for immobilizing of heavy metals in the soil. Biochar is a carbon solid obtained from the pyrolysis of residues under limited oxygen conditions. Biochar have high surface area, porous structure, and functional groups, which can reduce the risk of heavy metal contamination in the soil and their entry into the food chain. The aim of this study was to investigate the effect of sugarcane bagasse biochar produced at 400 and 600 °C on the availability and fractions of Cd in saline and cadmium-contaminated soil.

Materials and Methods: Initially, 15 mg kg⁻¹ Cd as cadmium chloride was added to sandy soil sample (200 g) and mixed with the soil. The soils were incubated for 3 weeks at 25±2 °C at a moisture content of 80% field capacity in incubator. After incubation period, salinity levels of 1170 and 2340 mg kg⁻¹ as sodium chloride was added to the soils. Then, the 1% (w/w) of the sugarcane bagasse and biochars produced at 400 and 600 °C were added to the soil and incubated for 3 months at 25±2 °C. At the end of the incubation period, a soil sample was removed from each of the treatments and available Cd (DTPA) and its fractions (Tessier et al., 1979) were extracted.

Results: The results showed that the application of biochar reduced Cd extracted by DTPA (P<0.05). Also, effect of biochar on pH was not significant (P>0.05) and increased EC (P<0.05). Salinity increased Cd extracted by DTPA (P<0.05). Also, biochar application reduced exchangeable Cd (13.7%) and Cd associated with carbonates (24.1%), while, increased Cd associated with oxides (37.2%) and residual (30.6%) compared to control. Cadmium associated with Fe/Mn oxides and associated with carbonates in 2340 mg kg⁻¹ treatment compared to 1170 mg kg⁻¹ treatment increased 31.5 and 25.8% respectively. The results revealed that Cd associated with OM in 1170 and 2340 mg kg⁻¹ treatments compared control reduced 38.8 and 22.2% respectively. Also, residual Cd reduced (24.9%) in 2340 mg kg⁻¹ treatment compared to 1170 mg kg⁻¹ treatment.

Conclusion: Application of sugarcane bagasse biochar in soil led to change Cd from unstable fractions (exchange and associated with carbonates) to stable fractions (associated with Fe/Mn oxides and residual), therefore reduced the mobility of Cd in saline calcareous sandy soil.

Keywords: Biochar, Cadmium, Fraction, Salinity

* Corresponding Author; Email: motaghian.h@yahoo.com

