نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و پنجم، شماره چهارم، ۱۳۹۷
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2018.14361.2910

پتانسیل گیاه‌پالایی ذرت تحت‌تأثیر بیوچارهای برگ گردو در یک خاک آلوده

پروین کبیری[۱]، *حمیدرضا متقیان[۲] و علیرضا حسین‌پور[۳]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، [۲]استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد،
[۳]استاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/٤/۱۳

چکیده

سابقه و هدف: امروزه نیاز به توسعه روش‌های زیستی اصلاح خاک، که از لحاظ هزینه مقرون به صرفه باشند و بدون کاهش حاصلخیزی خاک آلودگی‌ها را از بین ببرند، وجود دارد. بدین‌منظور پژوهش‌هایی در زمینه کاهش تحرک و فراهمی‌زیستی فلزات سنگین انجام شده است. اخیراً، بیوچار به‌صورت گسترده‌ای جهت کاهش سمیت فلزات سنگین استفاده می‌شود. بیوچار، ماده آلی غنی از کربن است که از گرماکافت بقایا، در شرایطی با اکسیژن محدود تهیه می‌شود و از هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای شکل گرفته است که در آن اتم‌های کربن به شکل حلقوی در ارتباط با هم هستند. وجود ساختار آروماتیک موجب پایداری آن در برابر تغییرات بیولوژیکی و شیمیایی می‌شود. این ماده کربنی، دارای گروه‌های عامل فراوانی چون هیدروکسیل، کتون، استر، آلدهید، آمین و کربوکسیل و دارای مقادیر قابل‌توجهی از اسیدهای آلی هیومیک و فولویک است که ترکیب و سطح ناهمگن آن‌ها می‌تواند ویژگی‌های آبدوستی و یا آبگریزی متفاوتی را از خود بروز دهد و خصوصیات بازی و اسیدی داشته باشد. بنابراین توانایی ترکیب با مواد آلی و غیرآلی را دارد. همچنین این ماده با داشتن سطح ویژه، ساختار متخلخل، pH و CEC بالا، می‌تواند خطر آلودگی فلزات سنگین را در زنجیره غذایی کاهش می‌دهد. هدف از انجام این مطالعه، بررسی کاربرد برگ گردو و بیوچارهای تهیه‌شده از آن در دماهای ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس بر قابلیت دسترسی و جذب سرب به‌وسیله ذرت (رقم سینگل‌کراس ۷۰٤) بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، آزمایش گلدانی شامل سطوح ۰، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد برگ گردو و بیوچارهای تهیه‌شده از آن در دماهای ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس با ۳ کیلوگرم خاک در ۳ تکرار مخلوط و به‌مدت ٤۵ روز در شرایط گلخانه خوابانده شد. پس از خواباندن، در هر گلدان (پس از افزودن کودهای مورد نیاز) ۳ بذر ذرت کشت و پس از ۸ هفته اندام هوایی و ریشه ذرت برداشت شد، شاخص‌های ذرت (وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، غلظت سرب در اندام هوایی، غلظت سرب در ریشه، ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال) و غلظت سرب در دسترس (DTPA-TEA) خاک تعیین شد.

* مسئول مکاتبه: motaghian.h@yahoo.com

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با افزایش دمای تهیه و مقدار کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک آهکی، سرب در دسترس و تجمع زیستی آن در گیاه ذرت کاهش یافت. تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس، به‌طور معنی‌داری مقدار سرب در اندام هوایی را به‌ترتیب ۳۱/۳، ۳۳/۵ و ۳٦/۱ درصد و مقدار سرب در ریشه را به‌ترتیب ۳۲/۰، ۳۵/٦ و ۳٦/۲ درصد نسبت به شاهد کاهش داد (P<۰/۰۵). پاسخ‌های فیزیولوژیکی نشان داد که اصلاح‌کننده‌ها در رشد اندام هوایی نسبت به ریشه مؤثرتر بودند. تیمار خاک با ۲ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس، وزن خشک اندام هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۱۳۱/٤ و ۱۱٦/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دمای تهیه و مقدار اصلاح‌کننده‌ها در خاک، سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA کاهش یافت. تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس، سرب در دسترس را به‌ترتیب ۳۵/۳، ٤۰/۱ و ٤۹/۱ درصد کاهش داد (P<۰/۰۵). بنابراین بیوچارها قادر به کاهش آلودگی سرب در خاک و افزایش وزن خشک ذرت بودند.

نتیجه‌گیری: کاربرد بیوچار با کاهش مقدار سرب در دسترس، مقدار سرب در گیاه را کاهش و رشد ذرت را افزایش داد. بنابراین می‌توان از بیوچار برای تثبیت گیاهی سرب در خاک در گیاه‌پالایی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: برگ گردو، تثبیت گیاهی، سرب در دسترس، گیاه‌پالایی

مقدمه

سرب (Pb) یکی از فلزات سنگین است که نه تنها نقش زیستی مشخصی در جانداران ندارد (۲٦)؛ بلکه یکی از فراوان‌ترین و مقاوم‌ترین آلاینده‌ها در بیش‌تر زیست‌بوم‌ها محسوب می‌شود (۱۹). این فلز در اغلب خاک‌های آلوده وجود دارد و سلامت محیط زیست را به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه به‌شدت تهدید می‌کند (۲٤ و ۳۱). مقدار سرب کل در خاک‌ها به‌طور متوسط ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. این مقدار در خاک‌های آلوده به سرب، بـه بیش از ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌رسد (۱٦).

روش گیاه‌پالایی در پالایش فلزات سنگین خاک بسیار مورد توجه قرار گرفته است. زیرا آلودگی فلزات سنگین در خاک با آلودگی آن‌ها در آب و هوا متفاوت است. فلزات سنگین نسبت به ترکیبات دیگر بیوسفر بسیار مقاوم‌ترند. گیاهان اولین گیرندگان فلزات سنگین هستند و در پالایش این فلزات بسیار مؤثر و کارآمدند (٤۳)؛ بنابراین نقش مهمی در جذب و خارج نمودن سرب از خاک‌های آلوده دارند. اگر مقدار سرب در بخش‌های خوراکی گیاه بیش از حد مجاز باشد، به موجود زنده مصرف‌کننده آن آسیب می‌زند. برای مثال، سرب در مغز کودکان تجمع یافته و ضریب هوشی آن‌ها را کاهش می‌دهد (٤۲). در گیاه‌پالایی، ریشه گیاه نقش کلیدی در پاکسازی فلزات سنگین دارد. زیرا در ارتباط مستقیم با خاک است و با مکانیسم‌هایی همانند جذب، جانشینی کاتیونی و رهاسازی ترشحات ریشه‌ای در محیط ریزوسفر، قابلیت دسترسی فلزات سنگین را کاهش می‌دهد (۲۸). بر اساس نتایج قبلی ذرت علوفه‌ای به‌علت رشد سریع و تولید وزن خشک بالا انتخاب مناسبی برای اهداف گیاه‌پالایی بوده است (۸ و ٥٤).

رشد گیاهان پالایش‌کننده در خاک‌های دارای آلودگی شدید سرب (که قابلیت دسترسی آن زیاد است) کاهش می‌یابد. در حال حاضر اصلاح‌کننده‌های

آلی، در کاهش جذب فلزات سنگین توسط گیاهان (به‌ویژه در کشورهایی که با کمبود زمین‌های حاصلخیز مواجهند)، انتخاب ارزان‌تر و قابل‌قبول‌تری محسوب می‌شوند. به‌گونه‌ای که این ترکیبات می‌توانند با مکانیسم‌های جذب، کمپلکس و رسوب، تحرک و قابلیت دسترسی فلزات سنگین را کاهش دهند (۵۰) تا رشد گیاه افزایش یابد. تأثیر بازدارندگی یک اصلاح‌کننده بر تجمع سرب در سیستم خاک- گیاه نه تنها به کاهش قابلیت دسترسی سرب در خاک بستگی دارد، بلکه به کاهش انتقال آن به گیاه نیز وابسته است. به‌طوری‌که برخی مطالعات علاوه بر کاهش قابلیت دسترسی، به کاهش غلظت سرب در گیاه رشدکرده در خاک‌های تیمارشده با بیوچار اشاره دارند (۲۰) و مکانیسم‌های تجمع و نگهداری سرب در بخش‌های خاصی از گیاه پس از تیمار خاک با بیوچار را گزارش می‌کنند (۲٤).

بیوچار نوعی ماده آلی جامد و غنی از کربن است که در اثر فرایند گرماکافت بقایای گیاهی در کمبود و یا نبود اکسیژن تهیه می‌شود. این اصلاح‌کننده زیستی با داشتن ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد همانند سطح ویژه (که دارای گروه‌های عاملی فراوان است)، pH قلیایی و نسبت C/N بالا، آلودگی و مسمومیت فلزات سنگین را در خاک کاهش می‌دهد (۱٤ و ۲٤). همچنین نتایج نشان می‌دهد، بیوچار تهیه‌شده از مواد خام مختلف، قابلیت و فراهمی‌زیستی سرب را در خاک‌های آلوده کاهش می‌دهد (۱۰، ۲٤، ۲۷ و ۳۹).

استخراج فلزات از معادن، از سویی زمینه رشد و پیشرفت بشر را فراهم می‌کند و از سوی دیگر با افزایش آلودگی‌ها در محل، امکان حیات و استفاده از محیط زیست سالم را از بشر می‌گیرد. به همین جهت در بسیاری از کشورها، تأثیرات زیست‌محیطی عملیات معدنکاوی مورد بررسی قرار گرفته است. نیکولادیس و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که نمونه خاک‌های نزدیک معدنی در شمال خاور یونان، دارای غلظت بالایی از فلزات سنگین بودند که نشان‌دهنده وابستگی آلودگی خاک به فعالیت‌های معدن‌کاری است (۳۳). در مکان‌های استخراج معدن معمولاً مقدار این فلزات بسیار زیاد است که می‌تواند بر رشد گیاه در فرآیند گیاه‌پالایی مؤثر باشد. بنابراین ممکن است بتوان با استفاده از بیوچار، سمیت فلزات در خاک آلوده را کاهش و رشد گیاه پالایش‌کننده را افزایش داد. همچنین به‌دلیل این‌که در بیش‌تر گیاهان، سرب با گروه‌های کربوکسیل سلول‌های ریشه (۱۰) و گروه‌های عامل پکتین دیواره سلول‌های آن پیوند داده، در ریشه باقی می‌ماند و مقدار ناچیزی از آن به اندام هوایی انتقال می‌یابد (۵۱).

در این پژوهش به بررسی تثبیت گیاهی سرب توسط ذرت به‌همراه اثر برگ گردو و بیوچارهای تولیدشده از آن در دماهای مختلف بر شاخص‌های گیاه ذرت، قابلیت دسترسی سرب و ارتباط بین سرب در دسترس با شاخص‌های ذرت پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک: خاک مورد استفاده از منطقه سپاهان‌شهر واقع در جنوب اصفهان و در شمال جاده اصفهان- شیراز برداشته شد. در قسمت‌های جنوبی اراضی منطقه مسکونی سپاهان‌شهر، معدن دولتی سرب و روی باما و چند معدن خصوصی دیگر وجود دارد که از سال‌های قبل، فرآیند استخراج از آن‌ها شروع شده و تاکنون ادامه دارد. از این منطقه، نمونه خاکی برداشت شد. نمونه خاک هوا خشک و با چکش چوبی کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های خاک مانند بافت به روش هیدرومتر

(۱۳)، pH (٤۹)، قابلیت هدایت الکتریکی (٤۰)، کربنات‌کلسیم معادل به روش تیتراسیون اسید باقی‌مانده (۲۳)، گنجایش تبادل کاتیونی با استفاده از استات‌سدیم با pH=۷ (٤٦) و ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (۳۲) تعیین شد. مقدار سرب کل با استفاده از اسیدنیتریک ٤ مولار (٤٥) و مقدار سرب در دسترس با روش DTPA-TEA (۲٥) عصاره‌گیری شد. ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

تهیه بیوچار: برای تهیه بیوچار از برگ ریخته‌شده پای درخت گردو در پایان فصل تابستان و از باغ‌های شهر سامان استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. بیوچار در ۳ سطح دمای ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس با قرار دادن در کوره به‌مدت ۲ ساعت و در شرایط کمبود اکسیژن تهیه شد. سپس، ویژگی‌های بیوچار مانند قابلیت هدایت الکتریکی، pH، سرب کل و ظرفیت تبادل کاتیونی، با استفاده از روش‌های بیان شده در بخش قبل، سطح ویژه با روش BET (۹) و کربن آلی با دستگاه آنالیزگر عنصری CHNS (۱) تعیین شد (جدول ۱).

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

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

ویژگی Properties	خاک Soil	برگ‌گردو Walnut leaf	بیوچار-۲۰۰ Biochar-200	بیوچار-٤۰۰ Biochar-400	بیوچار-٦۰۰ Biochar-600
pH	7.5	4.8	5.2	9.3	10.4
هدایت الکتریکی ($EC\ (dS\ m^{-1})$)	0.82	3.11	4.42	5.63	8.06
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) $CEC\ (Cmol^{+}\ Kg^{-1})$	10.7	30.5	28.5	22.9	19.9
سطح ویژه (مترمربع بر گرم) ($Surface\ area\ (m^2\ g^{-1})$)	-	2.2	3.3	4.0	9.2
کربن آلی (درصد) OC	0.13	43.05	49.15	47.98	54.63
شن (درصد) Sand	78	-	-	-	-
سیلت (درصد) Silt	15	-	-	-	-
رس (درصد) Clay	7	-	-	-	-
بافت Texture	شن‌لومی Loamy sand	-	-	-	-
کربنات‌کلسیم (درصد) $CaCO_3$	28.4	-	-	-	-
سرب در دسترس ($DTPA\text{-}TEA - pb\ (mg\ kg^{-1})$)	333.6	-	-	-	-
سرب کل ($Total\ pb\ (mg\ kg^{-1})$)	7933	4.2	5.5	6.3	6.7
نیتروژن کل Total N(%)	0.015	-	-	-	-
فسفر در دسترس ($P\ (mg\ kg^{-1})$)	13.1	-	-	-	-
پتاسیم در دسترس ($K\ (mg\ kg^{-1})$)	43.0	-	-	-	-

* خاک (Soil): $pH\text{-}H_2O$ (1:2) و EC (1:2).

** اصلاح‌کننده (Amendment): $pH\text{-}H_2O$ (1:10) و EC (1:10).

کشت ذرت در گلخانه: سه کیلوگرم خاک آلوده (عبورکرده از الک ۲ میلی‌متری) با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی- وزنی برگ گردو و بیوچارهای تولید شده از آن (عبورکرده از الک ۲ میلی‌متری) در دماهای ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس در آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه در گلدان (در سه تکرار) مخلوط شد. همچنین، تیمار بدون بیوچار (شاهد) در سه تکرار در کنار تیمارهای آزمایش فاکتوریل قرار داده شد. قبل از کشت، خاک‌ها به‌مدت ٤٥ روز در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه در گلخانه خوابانده شدند. پس از دوره خواباندن، طبق آزمون خاک، ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیتروژن (اوره)، ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر (سوپرفسفات تریپل)، ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پتاسیم (سولفات پتاسیم) و عناصر کم‌نیاز شامل ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم آهن (سکوسترین ۱۳۸) و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم منگنز (سولفات منگنز) به همه گلدان‌ها افزوده شد. سپس، در هر گلدان، ۵ عدد بذر ذرت (رقم سینگل‌کراس ۷۰٤) کشت و پس از جوانه‌زدن به ۳ عدد تنک شد. در طول دوره رشد، مراقبت‌های لازم مانند آبیاری در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه و حذف علف‌های هرز انجام شد. دو ماه پس از کشت، اندام هوایی گیاهان از یک سانتی‌متری سطح خاک برداشت شد. همچنین، ریشه گیاه هم از خاک هر گلدان جدا شد. بخش هوایی و ریشه‌ها به‌صورت جداگانه با آب‌مقطر شسته و درون پاکت کاغذی در دمای ٦۵ درجه سلسیوس به‌مدت ٤۸ ساعت در آون قرار داده شد. سپس، وزن خشک این بخش‌ها تعیین و غلظت سرب با خاکسترسازی خشک و عصاره‌گیری با اسیدکلریدریک ۲ نرمال تعیین شد (۱۵). غلظت سرب در عصاره‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری شد. مقدار ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال سرب، به‌ترتیب از رابطه‌های زیر محاسبه شد (۱۰).

(۱) غلظت سرب کل در خاک/ غلظت سرب در ریشه = ضریب تجمع زیستی

(۲) غلظت سرب در ریشه/ غلظت سرب در اندام هوایی = ضریب انتقال

اندازه‌گیری سرب در دسترس در خاک‌ها: پس از کشت و برداشت ریشه‌ها، خاک هر گلدان کاملاً مخلوط و نمونه‌ای از آن برداشته شد. در این نمونه‌ها سرب عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA (با استفاده از ۰/۰۰۵ مولار DTPA + ۰/۰۱ مولار $CaCl_2$ + ۰/۱ مولار TEA و نسبت ۱:۲ خاک - عصاره‌گیر همراه با ۱۲۰ دقیقه تکان دادن) اندازه‌گیری شد (۱۵).

تجزیه‌های آماری: قبل از تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی، فرضیات تجزیه واریانس شامل همگنی واریانس‌ها و توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها بررسی شد. برای بررسی اثر مقدار بیوچار (۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی- وزنی)، دمای تهیه بیوچار (۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس) و اثر متقابل آن‌ها بر شاخص‌های ذرت (وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، غلظت سرب در اندام هوایی، غلظت سرب در ریشه، ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال) و سرب در دسترس از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. همچنین، برای مقایسه بین شاخص‌های ذرت (وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، غلظت سرب در اندام هوایی، غلظت سرب در ریشه، ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال) و سرب در دسترس در خاک بدون بیوچار

(شاهد) با خاک‌های تیمارشده، تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش fisher-LSD و در سطح احتمال ۵ درصد انجام گردید. همچنین ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های ذرت و سرب در دسترس تعیین شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Statistica, 8 انجام شد.

نتایج و بحث

شاخص‌های ذرت در کشت گلخانه‌ای: نتایج تجزیه واریانس دوطرفه داده‌ها (داده‌ها نشان داده نشده است) نشان داد که اثر دمای تهیه بیوچار بر شاخص‌های رشد ذرت (به‌جز ضریب انتقال گیاهی) معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). اثر مقدار بیوچار مورد استفاده بر وزن خشک ریشه (P<۰/۰۱)، غلظت سرب در اندام هوایی (P<۰/۰۵) معنی‌دار بود. اثر متقابل دما و مقدار بیوچار بر وزن خشک ریشه معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). همچنین نتایج نشان داد که دمای تهیه بیوچار مهم‌ترین عامل ایجاد تغییرات بر شاخص‌های رشد ذرت بود.

وزن خشک اندام هوایی و ریشه: نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۲ نشان داده شده است. تفاوت بین وزن خشک اندام هوایی اندازه‌گیری‌شده در بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). تیمار خاک با بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس، وزن خشک اندام هوایی را به‌ترتیب ٦/۸، ٤۱/۱ و ٦۸/۱ درصد نسبت به خاک‌های تیمارشده با بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای ٤۰۰، ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس افزایش داد. با کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٤۰۰ درجه سلسیوس در خاک، وزن خشک اندام هوایی به‌ترتیب ۳۲/۱ و ۵۷/٤ درصد نسبت به خاک‌های تیمارشده با بیوچار ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس افزایش یافت. همچنین وزن خشک اندام هوایی با کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ۱۹/۱ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بیوچار تهیه‌شده در دمای ۰ درجه سلسیوس افزایش یافت.

کاربرد بیوچار (در همه مقادیر و دماهای مختلف) مقدار وزن خشک اندام هوایی را در مقایسه با خاک شاهد افزایش داد. تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بقایا، وزن خشک اندام هوایی را به‌ترتیب ۳٤/۳، ۳٤/۳ و ۳۱/٤ درصد، تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار ۲۰۰ درجه سلسیوس، وزن خشک اندام هوایی را به‌ترتیب ۵۷/۱، ٦۰/۰ و ۵۷/۱ درصد، تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار ٤۰۰ درجه سلسیوس وزن خشک اندام هوایی را به‌ترتیب ۹٤/۳، ۱۱٤/۳ و ۱۲۳/۱ درصد و تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس وزن خشک اندام هوایی را به‌ترتیب ۱۲۲/۹، ۱۲۵/۷ و ۱۳۱/٤ درصد نسبت به خاک شاهد افزایش داد.

بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)، تفاوت بین وزن خشک ریشه در بیوچار تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). تیمار خاک با بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس، وزن خشک ریشه را به‌ترتیب ۱۳/٦، ٤۷/۱ و ۵٦/۳ درصد نسبت به بیوچار تهیه‌شده در دمای ٤۰۰، ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس افزایش داد. کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٤۰۰ درجه سلسیوس در خاک، وزن خشک ریشه را به‌ترتیب ۲۹/٤ و ۳۷/۵ درصد نسبت به بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس افزایش داد. وزن خشک ریشه با کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ٦/۳ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بقایا افزایش یافت.

بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)، وزن خشک ریشه در خاک‌های تیمارشده با مقادیر مختلف بیوچار (به‌جز سطوح ۱ و ۲ درصد) تفاوت

معنی‌داری (P<۰/۰۵) داشت (جدول ۲). کاربرد ۲ درصد بیوچار در خاک، وزن خشک ریشه را ۷/۹ درصد نسبت به ۰/۵ درصد بیوچار افزایش داد. وزن خشک ریشه در خاک تیمارشده با ۱ درصد بیوچار ۵/۸ درصد نسبت به ۰/۵ درصد بیوچار افزایش یافت.

نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار تهیه‌شده در هر دمایی و با هر مقداری در خاک، وزن خشک ریشه را افزایش معنی‌داری داد (P<۰/۰۵).

بر اساس نتایج به‌دست آمده، آلودگی خاک مورد مطالعه، به سرب بسیار زیاد بود. مقدار کل سرب در خاک ۷۹۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. در مطالعات قبلی نیز مقادیر بالای سرب در خاک آلوده اطراف معدن گزارش شده است. رویز و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که سرب ٦٠ نمونه از خاک‌های زراعی، مرتعی و معدنی اطراف یک معدن در جنوب اسپانیای مرکزی غلظت بالایی (تا ۹۸۵۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) داشت (٤١). کرمی و همکاران (۲۰۱۱) آلودگی سرب را در خاک اطراف معدنی قدیمی در بریتانیا، ۲۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کردند (۱۸).

جدول ۲- مقایسه میانگین تأثیر دمای تهیه بیوچار، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه ذرت.

Table 2. Means' comparisons of effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on shoots and roots dry weight of maize.

اصلاح‌کننده amendment	دمای تولید بیوچار Pyrolysis temperature (°C)	سطح (درصد) Level (%)			
		0.5	1	2	
		وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight			
شاهد Control		3.5 ± 0.29^{E}	3.5 ± 0.29^{E}	3.5 ± 0.29^{E}	
بقایای بیوچارنشده Biomass		4.7 ± 0.09^{D}	4.7 ± 0.19^{D}	4.6 ± 0.1^{D}	4.7^{d}
بیوچار Biochar	200	5.5 ± 0.39^{C}	5.6 ± 0.1^{C}	5.5 ± 0.17^{C}	5.6^{c}
	400	6.8 ± 0.36^{B}	7.5 ± 0.32^{AB}	7.8 ± 0.64^{A}	7.4^{b}
	600	7.8 ± 0.07^{A}	7.9 ± 0.02^{A}	8.1 ± 0.13^{A}	7.9^{a}
		6.2	6.4	6.5	
		وزن خشک ریشه Root dry weight			
شاهد Control		2.4 ± 0.07^{F}	2.4 ± 0.07^{F}	2.4 ± 0.07^{F}	
بقایای بیوچارنشده Biomass		3.1 ± 0.13^{eE}	3.2 ± 0.08^{deDE}	3.2 ± 0.01^{deDE}	3.2^{d}
بیوچار Biochar	200	3.4 ± 0.04^{dD}	3.3 ± 0.07^{deDE}	3.4 ± 0.12^{deDE}	3.4^{c}
	400	3.9 ± 0.07^{cC}	4.6 ± 0.04^{bB}	4.7 ± 0.02^{bB}	4.4^{b}
	600	4.7 ± 0.14^{bB}	5.1 ± 0.07^{aA}	5.2 ± 0.09^{aA}	5.0^{a}
		3.8^{b}	4.0^{a}	4.1^{a}	

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها نسبت به شاهد، با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Each data is mean value of three replications with standard errors. Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD's test at P<0.05. Different uppercase letter(s) for each application rate represent significant differences between unamended and amended soils by fisher-LSD 's test at P<0.05.

مطابق با نتایج جدول ۱، ذرت در خاک شاهد (با مقدار سرب کل ۷۹۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و سرب در دسترس ۳۳٦/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نسبت به خاک‌های تیمارشده با بیوچار رشد کم‌تری داشت و دو هفته پس از کاشت، علایم مسمومیت اندام هوایی (پژمردگی و زردی برگ‌های پایینی گیاه، توقف رشد اندام هوایی و کوتولگی) در آن مشاهده شد. رشد ذرت متناسب با دمای تهیه (۰، ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس) و سطوح مورد استفاده (۰/۵، ۱ و ۲ درصد) اصلاح‌کننده، نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری (P<۰/۰۵) داشت.

مطابق با این نتایج، در مطالعه یاداواکولاسینگام و همکاران (۲۰۱٦) ذرت در خاک شاهد نسبت به خاک‌های تیمارشده با ۱، ۲/۵ و ۵ درصد اصلاح‌کننده، رشد کم‌تری داشت و دو هفته پس از کشت، علایم مسمومیت در اندام هوایی گیاه قابل‌مشاهده بود و ذرت در خاک تیمارشده با ۱ و ۲/۵ درصد اصلاح‌کننده، به‌ترتیب ۳ و ٤ هفته پس از کاشت از بین رفت. با کاربرد ۵ درصد اصلاح‌کننده در خاک، ذرت، به تنش سرب مقاوم شد. به‌گونه‌ای که در خاک تیمارشده با ۵ درصد اصلاح‌کننده، وزن اندام هوایی و ریشه ذرت ۳/۸ برابر ذرت در خاک شاهد بود. آن‌ها علت افزایش رشد ذرت را آزادشدن بیش‌تر عناصر غذایی در اثر تجزیه ترکیبات اصلاح‌کننده در خاک آلوده نسبت دادند (٥٤).

غلظت سرب در اندام هوایی و ریشه: نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۳ نشان داده شده است. براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار، تفاوت بین غلظت سرب اندازه‌گیری‌شده اندام هوایی در بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). تیمار خاک با بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس، غلظت سرب در اندام هوایی را به‌ترتیب ۸/٤ ۱۷/٦ و ۲۸/۹ درصد نسبت به خاک‌های تیمارشده با بیوچار تهیه‌شده در دمای ٤۰۰، ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش داد. با کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٤۰۰ درجه سلسیوس در خاک، غلظت سرب در اندام هوایی به‌ترتیب ۱۰ و ۲۲/٤ درصد نسبت به خاک‌های تیمارشده با بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش داشت. همچنین غلظت سرب در اندام هوایی با کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک ۱۳/۸ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بقایا کاهش یافت.

بر اساس آزمون مقایسه میانگین، غلظت سرب در اندام هوایی فقط در خاک‌های تیمارشده با ۲ و ۰/۵ درصد بیوچار تفاوت معنی‌داری (P<۰/۰۵) داشت (جدول ۳). نتایج نشان داد که غلظت سرب اندام هوایی در خاک تیمارشده با ۲ درصد بیوچار ۵/۲ درصد نسبت به خاک تیمارشده با ۰/۵ درصد بیوچار کاهش یافت.

بر اساس نتایج، تیمار خاک با بقایا و بیوچار (در همه مقادیر و دما)، به‌جز ۱ درصد بقایا، مقدار سرب اندام هوایی را نسبت به شاهد کاهش داد (P<۰/۰۵).

مقایسه میانگین تیمارهای غلظت سرب ریشه در جدول ۳ نشان داده شده است. تفاوت بین غلظت سرب ریشه در بیوچار تهیه‌شده در دماهای مختلف (به‌جز بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ و ٤۰۰ درجه سلسیوس) معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). غلظت سرب ریشه در خاک تیمارشده با بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۱٦/۷، ۲۲/۲ و ۳۰/٤ درصد نسبت به بیوچار تهیه‌شده در دمای ٤۰۰، ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٤۰۰ درجه سلسیوس در خاک، غلظت سرب ریشه را ۱٦/٤ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بقایا کاهش داد. سرب ریشه در خاک تیمارشده با بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس ۱۰/۵ درصد نسبت به بقایا کاهش یافت.

نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار تهیه‌شده در هر دمایی و با هر مقداری در خاک (به‌جز مقادیر مختلف بقایا) غلظت سرب را در ریشه کاهش معنی‌داری داد ($P<۰/۰۵$).

جدول ۳- مقایسه میانگین تأثیر دمای تهیه بیوچار، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت سرب در اندام هوایی و ریشه ذرت.

Table 3. Means' comparisons of effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on Pb concentration in shoots and roots.

اصلاح‌کننده amendment	دمای تولید بیوچار Pyrolysis temperature (°C)	سطح (درصد) Level (%) 0.5	1	2	
		بخش هوایی Shoot			
شاهد Control		31.0±0.448^{A}	31.0±0.448^{A}	31.0±0.448^{A}	
بقایای بیوچارنشده Biomass		29.1±0.176^{B}	29.5±1.78^{AB}	28.3±0.493^{B}	29.0^{a}
بیوچار Biochar	200	25.2±0.491^{C}	25.4±0.819^{C}	24.5±0.153^{C}	25.0^{b}
	400	23.8±0.666^{DC}	22.1±0.203^{DE}	21.6±0.570^{EF}	22.5^{c}
	600	21.3±0.233^{EF}	20.6±0.219^{EF}	19.8±0.088^{F}	20.6^{d}
		24.9^{a}	24.4^{ab}	23.6^{b}	
		ریشه Root			
شاهد Control		636.9±11.3^{A}	636.9±11.3^{A}	636.9±11.3^{A}	
بقایای بیوچارنشده Biomass		614.7±53.5^{AB}	601.6±37.0^{ABC}	578.4±43.9^{ABCD}	598.2^{a}
بیوچار Biochar	200	549.6±4.7^{BCDE}	536.7±7.1^{CDE}	520.1±3.1^{DE}	535.5^{b}
	400	510.7±5.2^{DE}	499.4±34.1^{EF}	490.7±18.0^{EF}	500.3^{b}
	600	433.0±21.8F^{G}	410.3±2.3^{G}	406.4±15.1^{G}	416.6^{c}
		527.0	512.0	498.9	

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها نسبت به شاهد، با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Each data is mean value of three replications with standard errors. Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD's test at P<0.05. Different uppercase letter(s) for each application rate represent significant differences between unamended and amended soils by fisher-LSD 's test at P<0.05.

مقدار طبیعی سرب در گیاه بین ۵ تا ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و غلظت بیش از حد طبیعی آن در گیاهان بین ۳۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بـر کیلوگرم گزارش شده است (۱۷). در مطالعه حاضر مقدار سرب در اندام هوایی و ریشه ذرت خاک شاهد به‌ترتیب ۳۱/۰ و ۶۳۶/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. زیرا براساس نتایج جدول ۱ مقدار سرب در خاک زیاد بود و مقدار زیادی از آن جذب گیاه شد. همچنین مقدار سرب در ریشه گیاه در همه تیمارها بیش‌تر از اندام هوایی بود (جدول ۳). مطالعات قبلی نیز این نتیجه را تأیید می‌کند (۱۰، ۱۱ و ۱۲). زیرا سلول‌های ریشه از طریق گروه‌های کربوکسیل خود با سرب پیوند داده و سرب در اجزاء نامحلول دیواره و هسته سلول‌های ریشه تجمع یافت (۱۰). علاوه بر این، در گیاه‌پالایی، گیاه

می‌تواند فلزات سنگین را در ریزوسفر خود رسوب داده و غیرمتحرک کند (٤٨). عواملی هم‌چون تأثیر متقابل فلزات سنگین با یکدیگر (۱۲)، واکنش‌های هم‌افزایی و رقابتی (۷)، جذب و توزیع (۵۳)، تفاوت حلالیت و قابلیت دسترسی فلزات سنگین، همچنین عوامل فیزیولوژیکی و مکانیسم‌های تنظیم گیاهی، انتقال فلزات سنگین را به اندام هوایی کنترل می‌کنند (٦). اصلاح‌کننده‌های زیستی استفاده‌شده در تثبیت گیاهی باید توانایی غیرفعال کردن فلزات سنگین را داشته باشند و جذب فلزات سنگین را کاهش دهند (۳۰). طبق نتایج جدول ۳، با افزایش دمای تهیه و مقدار بیوچار در تیمارها، غلظت سرب اندام هوایی و ریشه ذرت کاهش معنی‌داری یافت. بنابراین وزن ماده خشک اندام هوایی و ریشه ذرت در تیمارهای دارای اصلاح‌کننده نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۲). یاداواکولاسینگام و همکاران (۲۰۱٦) بیان کردند با بالا رفتن مقدار کاربرد اصلاح‌کننده در تیمارها، بارهای منفی اصلاح‌کننده افزایش یافت و منافذ ریز آن در نگهداری سرب تواناتر شدند (٥٤). در پژوهش چنگ و همکاران (۲۰۱۸) با کاربرد ۵ درصد بیوچار تنباکو در خاک، مقدار سرب ریشه از ۷۵/٤۵ به ۵۱/٤۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت (۱۰). غلظت سرب در اندام هوایی و ریشه همه ذرت‌های تیمارهای مورد مطالعه، بالاتر از حد معمولی گیاه بود (جدول ۳). این نتایج نشان داد که مطابق با پژوهش‌های قبلی، ذرت گیاه متحمل به سرب در خاک آهکی با آلودگی بالا بود (٥٤). همچنین اصلاح‌کننده‌ها نه تنها جذب سرب را کاهش دادند، بلکه با داشتن عناصر غذایی بر رشد گیاه تأثیر مثبتی داشتند.

ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال سرب: مقایسه میانگین بین ضریب تجمع زیستی سرب تیمارها در جدول ٤ نشان داده شده است. بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار، تفاوت بین ضریب تجمع زیستی سرب اندازه‌گیری شده در ریشه در خاک‌های تیمارشده با بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای مختلف (به‌جز بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ و ٤۰۰ درجه سلسیوس) معنی‌دار بود ($P<۰/۰۵$). ضریب تجمع زیستی سرب ریشه در خاک تیمارشده با بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۱۵/۹، ۲۲/۱ و۲۹/۷ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بیوچارهای تهیه‌شده در دمای ٤۰۰، ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. تیمار خاک با بیوچار تهیه‌شده در دمای ٤۰۰ درجه سلسیوس، ضریب تجمع زیستی سرب ریشه را ۱٦/۵ درصد نسبت به بقایای برگ گردو کاهش داد. تیمار خاک با بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، ضریب تجمع زیستی سرب ریشه را ۹/۸ درصد نسبت به بقایا کاهش داد.

نتایج نشان داد که کاربرد مقادیر مختلف بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای مختلف (به‌جز بقایای برگ گردو) ضریب تجمع زیستی سرب را در ریشه کاهش معنی‌داری داد ($P<۰/۰۵$).

بر اساس نتایج جدول ٤، با افزایش مقدار و دمای تهیه اصلاح‌کننده‌ها، ضریب تجمع زیستی ریشه در تیمارها کاهش یافت. زیرا مقدار کل سرب خاک در تیمارها (مخرج کسر تجمع زیستی) ثابت و مقدار آن در ذرت‌های رشدکرده در خاک‌های تیمارشده (صورت کسر تجمع زیستی) کاهش یافت، به‌گونه‌ای که این ضریب در خاک شاهد و خاک‌های تیمارشده با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۰/۰۸۰، ۰/۰٦٦، ۰/۰٦۲ و ۰/۰۵۱ به‌دست آمد. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، چنگ و همکاران (۲۰۱۸) ضریب تجمع زیستی سرب را در تنباکوی رشدکرده در خاک شاهد و خاک‌های تیمارشده با ۱، ۲/۵ و ۵ درصد بیوچار بقایای تنباکو به‌ترتیب ۰/۰۷۲، ۰/۰٦۸، ۰/۰٦۷ و ۰/۰۵۲ گزارش کردند (۱۰). همچنین، در همه تیمارها، مقدار ضریب تجمع زیستی بیش‌تر از ضریب انتقال گیاهی بود.

جدول ٤- مقایسه میانگین تأثیر دمای تهیه بیوچار، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال گیاهی سرب.

Table 4. Means' comparisons of effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on Pb bioaccumulation factor and Pb translocation factor.

	سطح (درصد) Level (%)			دمای تولید بیوچار Pyrolysis temperature (°C)	اصلاح‌کننده amendment
	2	1	0.5		
	ضریب تجمع زیستی BF				
	0.080 ± 0.0014^{A}	0.080 ± 0.0014^{A}	0.080 ± 0.0014^{A}		شاهد Control
0.075^{a}	0.073 ± 0.0055^{ABCD}	0.076 ± 0.0047^{ABC}	0.077 ± 0.0067^{AB}		بقایای بیوچارنشده Biomass
0.068^{b}	0.066 ± 0.0004^{DE}	0.068 ± 0.0009^{CDE}	0.069 ± 0.0006^{BCDE}	200	
0.063^{b}	0.062 ± 0.0023^{EF}	0.063 ± 0.0043^{EF}	0.064 ± 0.0007^{DE}	400	بیوچار
0.053^{c}	0.051 ± 0.0019^{G}	0.052 ± 0.0003^{G}	0.055 ± 0.0028^{FG}	600	Biochar
	0.063	0.065	0.066		
	ضریب انتقال گیاهی TF				
	0.049±0.000	0.049±0.000	0.049±0.000		شاهد Control
0.049	0.049±0.004	0.049±0.003	0.048±0.004		بقایای بیوچارنشده Biomass
0.047	0.047±0.001	0.047±0.002	0.046±0.001	200	
0.045	0.044±0.003	0.045±0.003	0.047±0.001	400	بیوچار
0.050	0.049±0.002	0.050±0.000	0.049±0.002	600	Biochar
	0.047	0.048	0.047		

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها نسبت به شاهد، با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Each data is mean value of three replications with standard errors. Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD's test at $P<0.05$. Different uppercase letter(s) for each application rate represent significant differences between unamended and amended soils by fisher-LSD 's test at $P<0.05$.

ضریب انتقال گیاهی تیمارها تحت‌تأثیر کاربرد اصلاح‌کننده‌ها معنی‌دار نشد (جدول ٤)، زیرا متناسب با دمای تهیه و مقدار اصلاح‌کننده‌ها، انتقال سرب از خاک به ریشه کاهش یافته و مقدار سرب کم‌تری از ریشه به اندام هوایی انتقال یافت. بنابراین اصلاح‌کننده‌ها تأثیری بر ضریب انتقال سرب در گیاه ذرت نداشتند. همچنین در همه تیمارها مقدار ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال گیاهی پایین بود که نشان‌دهنده محدودیت تجمع و انتقال سرب توسط گیاه بود. محدودیت در انتقال عناصر از ریشه به اندام هوایی یکی از مکانیسم‌های تحمل گیاه است (۵۲) و گیاه با این مکانیسم، انتقال آلوده‌کننده را از خاک به کم‌ترین مقدار ممکن می‌رساند (٤٧). دو مکانیسم اصلی انتقال سیمپلاستی (انتقال فعال سرب در آوند چوبی) و فشار ریشه‌ای، سبب انتقال سرب از ریشه به اندام هوایی می‌شوند (۵۱). در بیش‌تر گیاهان غیرانباشتگر، سرب

در ریشه باقی می‌ماند و مقدار ناچیزی از آن از راه سیمپلاستی به اندام هوایی انتقال می‌یابد (۲۹ و ٤٤). در این گیاهان، سرب با گروه‌های عامل پکتین‌های دیواره سلولی پیوند برقرار می‌کند و دیواره سلولی به‌عنوان اولین سد دفاعی از انتقال سرب ریشه به اندام هوایی جلوگیری می‌کند (۲۱). علاوه بر این، ظرفیت نگهداری سرب با تعداد گروه‌های عاملی همانند COOH- و SH- ارتباط خطی دارد (۳۸). به‌گونه‌ای که کمپلکس‌های سیستئین- سرب در ریشه گیاهان برنج رشدکرده در خاک‌های تیمارشده با ۵ درصد بیوچار در پژوهش‌های قبلی مشاهده شد (٢٤). برای بررسی علت کاهش غلظت سرب در گیاه می‌توان به بررسی دسترسی سرب (DTPA-TEA) در خاک‌ها پرداخت.

سرب در دسترس در خاک‌ها: نتایج تجزیه واریانس دوطرفه نشان داد که اثر دمای تهیه، مقدار بیوچار و اثر متقابل دما و مقدار بیوچار مورد استفاده بر مقدار سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA معنی‌دار ($P<۰/۰۱$) بود (نتایج نشان داده نشده است). همچنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که دما و مقدار بیوچار، عامل مؤثری بر تغییرات مقدار سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA بودند.

نتایج مقایسه میانگین سرب در دسترس تیمارها در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار، تفاوت بین سرب در دسترس در بیوچار تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود ($P<۰/۰۵$). کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس، سرب در دسترس را به‌ترتیب ٥/٦، ۲۱/۹ و ۳۱/۳ درصد نسبت به بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای ٤۰۰، ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش داد. کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٤۰۰ درجه سلسیوس در خاک، سرب در دسترس را به‌ترتیب ۱۷/۳ و ۲۷/۳ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش داد. سرب در دسترس در خاک تیمارشده با بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس ۱۲/۱ درصد نسبت به بیوچار تهیه‌شده در دمای ۰ درجه سلسیوس کاهش یافت.

سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA در خاک‌های تیمارشده با سطوح مختلف بیوچار تفاوت معنی‌داری ($P<۰/۰۵$) داشت (جدول ۵). نتایج نشان داد که با کاربرد ۲ درصد بیوچار در خاک، سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA به‌ترتیب ۸/۵ و ۱۷ درصد نسبت به خاک‌های تیمارشده با ۱ و ۰/۵ درصد بیوچار کاهش یافت. کاربرد ۱ درصد بیوچار در خاک، سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA را ۹/٤ درصد نسبت به خاک‌های تیمارشده با ۰/۵ درصد بیوچار کاهش داد.

تیمار خاک‌ها با بیوچارها (در همه سطوح و دماهای مختلف) مقدار سرب دردسترس را در مقایسه با خاک شاهد کاهش معنی‌داری ($P<۰/۰۵$) دادند. تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بقایای برگ گردو، سرب در دسترس را به‌ترتیب ۹/۸، ۱٦/۳ و ۱۸/٤ درصد، تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار ۲۰۰ درجه سلسیوس، سرب در دسترس را به‌ترتیب ۱۹/٦، ۲۵/۸ و ۳۰ درصد، تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار ٤۰۰ درجه سلسیوس، سرب در دسترس را به‌ترتیب ۲۷/۸، ۳۹/۰ و ٤۷/٤ درصد و تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس، سرب در دسترس را به‌ترتیب ۳۵/۳، ٤۰/۱ و ٤۹/۱ درصد نسبت به خاک شاهد کاهش داد.

جدول ۵- مقایسه میانگین تأثیر دمای تهیه بیوچار، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA.

Table 5. Means' comparisons of effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on DTPA-extractable Pb.

اصلاح‌کننده amendment	دمای تولید بیوچار Pyrolysis temperature (°C)	سطح (درصد) Level (%)			
		0.5	1	2	
شاهد Control		333.6 ± 10.5^{A}	333.6 ± 10.5^{A}	333.6 ± 10.5^{A}	
بقایای بیوچارنشده Biomass		301.0 ± 3.7^{aB}	279.2 ± 1.0^{bC}	272.3 ± 4.1^{bC}	284.1^{a}
بیوچار Biochar	200	268.3 ± 3.2^{bC}	247.5 ± 3.5^{cD}	233.6 ± 4.4^{dD}	249.8^{b}
	400	240.9 ± 7.4^{cdD}	203.4 ± 7.0^{fEF}	175.4 ± 2.5^{gG}	206.6^{c}
	600	215.8 ± 2.5^{eE}	199.9 ± 1.3^{fF}	169.8 ± 2.2^{gG}	195.1^{d}
		256.5^{a}	232.5^{b}	212.8^{c}	

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها نسبت به شاهد، با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Each data is mean value of three replications with standard errors. Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD's test at P<0.05. Different uppercase letter(s) for each application rate represent significant differences between unamended and amended soils by fisher-LSD 's test at P<0.05.

اطلاعات اندکی در مورد تأثیر بیوچار بر قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک‌های آهکی وجود دارد (۱۰). سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA به‌ویژه در خاک‌های آهکی به‌عنوان سرب در دسترس در نظر گرفته شده است (۲ و ۳). در مطالعه حاضر با افزایش دمای تولید و مقدار کاربرد بیوچار، سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA کاهش معنی‌داری (P<۰/۰۵) داشت. در پژوهش چنگ و همکاران (۲۰۱۸) کاربرد ۵ درصد بیوچار تنباکو، مقدار سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA را ۱۳/٦ درصد نسبت به شاهد کاهش داد (۱۰). پارک و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر دو بیوچار تهیه‌شده از کود مرغی و بقایای گیاهی بر غیرمتحرک کردن سرب را به رسوب سرب و کمپکس‌شدن آن با کربنات‌ها، سولفات‌ها و فسفات‌های موجود در بیوچار نسبت دادند (۳٦). بر اساس نتایج برخی پژوهشگران، بیوچارها به‌علت داشتن گروه‌های عاملی و سطح ویژه بیش‌تر در دماهای بالاتر تهیه بیوچار، قادر به جذب فلزات سنگین بودند (۳، ٤ و ۳۵). به گونه‌ای که تأثیر ساختار اکسی- هیدروکسی فلزی بیوچار را بر کاهش فراهمی‌زیستی فلزات سنگین گزارش کردند (۳۷). اوگوندیران و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که بیوچار سبوس برنج دارای ترکیبات معدنی همانند $CaCO_3$، KCl و SiO_2 بود و در خاک‌های تیمارشده با بیوچار، تثبیت سرب افزایش یافت. بر اساس نتایج آنان، گروه‌های عاملی آلی بیوچار همانند الکل، فنل، اسیدکربوکسیلیک و استر در pH های بالا به یون‌های با بار منفی یونیزه و باعث تثبیت سرب شدند. (۳۵). زیرا بر اساس نتایج باد و همکاران (۲۰۱۲) در خاک‌های قلیایی واکنش بین کلسیم و سیلیکات‌های بیوچار منجر به تشکیل ژل سیلیکات‌کلسیم هیدراته و به دام افتادن سرب در این ترکیب گردید (۵). احمد و همکاران (۲۰۱٦) با بررسی بیوچارهای تهیه‌شده از بقایای سویا و برگ کاج در دمای ۳۰۰ و ۷۰۰ درجه

سلسیوس بر خاک لوم‌شنی آلوده با مقدار کل سرب ۱۹٤۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم دریافتند که بیوچار تهیه‌شده از بقایای سویا در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس، تأثیر بیش‌تری بر کاهش سرب در دسترس داشت. به‌گونه‌ای که در خاک تیمارشده با ابن بیوچار، مقدار سرب ۹۵ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. آنان علت کاهش شدید سرب در دسترس را به گروه‌های عاملی اکسیژنی سطح بیوچار نسبت دادند. زیرا سرب با گروه‌های عاملی اکسیژنی (COOH–) کمپلکس تشکیل داد (۱). ألی و همکاران (۲۰۱۷) کاهش قابلیت دسترسی فلزات سنگین عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA خاک را به سطح جذب بالای بیوچار بامبو به‌علت داشتن گروه‌های فنلی، OH–، COOH– و C=N نسبت دادند (۳).

بر اساس نتایج، ضریب همبستگی پیرسون بین سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA و دمای گرماکافت ۰/۹۲– (P<۰/۰۲٤) به‌دست آمد که مطابق با نتایج پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد که گروه‌های عاملی سطح بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای بالاتر گرماکافت، نقش مهمی در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین داشتند (۳٤).

همبستگی بین سرب در دسترس و شاخص‌های ذرت: ضرایب پیرسون بین سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA در خاک آلوده و شاخص‌های گیاه در جدول ٦ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بین سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با غلظت سرب در اندام هوایی، غلظت سرب در ریشه و ضریب تجمع زیستی سرب در ریشه همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت (P<۰/۰۱). این نتایج مطابق با نتایج پژوهش‌های قبلی بود (۲۲). همچنین بین سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA و وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه همبستگی منفی و معنی‌داری بود (P<۰/۰۱). به‌عبارت دیگر، با افزایش سرب در دسترس، مقدار سرب گیاه و وزن خشک آن به‌ترتیب افزایش و کاهش یافت.

جدول ٦- ضریب همبستگی پیرسون بین سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با شاخص‌های گیاه (n=۱۳).

Table 6. Pearson correlation coeffcient between DTPA-extractable Pb and maize growth indices (n=13).

سرب دردسترس Pb DTPA-extractable	ویژگی Characteristics	
-0.95**	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	اندام هوایی Shoot
0.95**	غلظت سرب در اندام هوایی Concentrations in shoot	
-0.93**	وزن خشک ریشه Root dry weight	ریشه Root
0.91**	غلظت سرب در ریشه Concentrations in root	
0.91**	ضریب تجمع زیستی Bioaccumulation factor	شاخص‌های گیاه‌پالایی Phytoremedation indices
0.25	ضریب انتقال گیاهی Translocation factor	

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

** Significant at P<0.01.

نتیجه‌گیری کلی

کاربرد بیوچار برگ گردو در خاک آلوده به سرب موجب کاهش تجمع زیستی در ذرت شد و در نتیجه رشد ذرت افزایش یافت. به‌گونه‌ای که کاربرد ۲ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک، سرب در دسترس، سرب اندام هوایی و سرب ریشه را به‌ترتیب ۴۹/۱، ۳۶/۱ و ۳۶/۲ درصد کاهش و رشد اندام هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۱۳۱/۴ و ۱۱۶/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. بنابراین کاربرد بیوچار برگ‌گردو از طریق مسمومیت‌زدایی، سبب کاهش غلظت سرب در اندام‌های گیاه و بهبود مقدار زیست‌توده گیاه گردید. تجمع سرب در ریشه و کاهش انتقال آن به اندام هوایی و همچنین کاهش فاکتور تجمع زیستی نیز نقش مهمی در بهبود زیست‌توده گیاهی داشت. بدین‌ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد بیوچار برگ گردو در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار اصلاحی مناسب جهت بهبود روش گیاه‌پالایی از طریق تثبیت گیاهی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نقش بسیار مخرب سرب در سلامتی محیط زیست، ضرورت دارد چنین پژوهش‌هایی در خاک‌های اطراف معادن دیگر کشور نیز انجام شود. با توجه به جدید بودن کاربرد بیوچار در خاک، می‌توان از مزایای آن در توسعه کشاورزی پایدار بهره برد. زیرا درک بهتر مزایای کاربرد بیوچارها در کاهش مسمومیت فلزات سنگین نیازمند بررسی‌های درازمدت و مستمر در مطالعات زراعی و زیست‌محیطی می‌باشد. بنابراین، بررسی ماندگاری بیوچار و توانایی آن در غیرفعال نمودن آلاینده‌های کشاورزی امری اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد.

منابع

1. Ahmad, M., Ok, Y.S., Kim, B.Y., Ahn, J.H., Lee, Y.H., Zhang, M., Moon, D.H., Al-Wabel, M.I., and Lee, S.S. 2016. Impact of soybean stover-and pine needle-derived biochars on Pb and As mobility, microbial community, and carbon stability in a contaminated agricultural soil. J. Environ. Manage. 166: 131-139.
2. Al-Farraj, A.S., Al-Wabel, M.I., Al-Shahrani, T.S., El-Maghraby, S.E., and AlSewailem, M.A.S. 2010. Accumulation coefficient and translocation factor of heavy metals through Rhazya stricta grown in the mining area of Mahad AD'Dahab, Saudi Arabia. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 140: 325-336.
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. Sci. Rep. 7. article number 2690.
4. Archanjo, B.S., Mendoza, M.E., Albu, M., Mitchell, D.R., Hagemann, N., Mayrhofer, C., Mai, T.L.A., Weng, Z., Kappler, A., Behrens, S., and Munroe, P. 2017. Nanoscale analyses of the surface structure and composition of biochars extracted from field trials or after co-composting using advanced analytical electron microscopy. Geoderma. 294: 70-79.
5. Bade, R., Oh, S., and Shin, W.S. 2012. Assessment of metal bioavailability in smelter-contaminated soil before and after lime amendment. Ecotox. Environ. Safe. 80: 299-307.
6. Bonanno, G. 2011. Trace element accumulation and distribution in the organs of Phragmites australis (common reed) and biomonitoring applications. Ecotoxicology and Environmental Safety. 74: 4. 1057-1064.
7. Bonanno, G., and Giudice, R.L. 2010. Heavy metal bioaccumulation by the organs of Phragmites australis (*common reed*) and their potential use as contamination indicators. Ecol. Indic. 10: 639-645.

8.Brennan, A., Jiménez, E.M., Alburquerque, J.A., Knapp, C.W., and Switzer, C. 2014. Effects of biochar and activated carbon amendment on maize growth and the uptake and measured availability of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and potentially toxic elements (PTEs). Environ. Pollut. 193: 79-87.
9.Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc. 60: 2. 309-319.
10.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. Biol. Fertil. Soils. 54: 3. 373-383.
11.Eid E.M., and Shaltout K.H. 2016. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by nine native plant species grown at a sewage sludge dumpsite. Int. J. Phytoremediation. 18: 11. 1075-1085.
12.Eid, E.M., and Shaltout, K.H. 2014. Monthly variations of trace elements accumulation and distribution in above-and below-ground biomass of Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steudel in Lake Burullus (Egypt): a biomonitoring application. Ecol. Eng. 73: 17-25.
13.Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. P 475-490. In: Klute A. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part l. 2nd edition. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.
14.Gul, S., Whalen, J.K., Thomas, B.W., Sachdeva, V., and Deng, H. 2015. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. Agric. Ecosyst. Environ. 206: 46-59.
15.Hosseinpur, A., and Motaghian, H. 2018. Soil Testing (Correlation, Calibration, and Fertilizer Recommendation Studies), Shahrekord University. 386p. (In Persian)
16.Hutzinger, O. 1980. The Handbook of Environmental Chemistry. Springer. New York. 434p.
17.Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. Third Ed. CRC Press. Boca Raton, London. 331p.
18.Karami, N., Clemente, R., Moreno-Jiménez, E., Lepp, N.W., and Beesley, L. 2011. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. J. Hazard. Mater. 191: 1-3. 41-48.
19.Khalid, N., Hussain, M., Young, H.S., Ashraf, M., Hameed, M., and Ahmad, R. 2018. Lead concentrations in soils and some wild plant species along two busy roads in Pakistan. Bull Environ. Contam. Toxicol. 100: 2. 250-258.
20.Kim, H.S., Kim, K.R., Kim, H.J., Yoon, J.H., Yang, J.E., Ok, Y.S., Owens, G., and Kim, K.H. 2015. Effect of biochar on heavy metal immobilization and uptake by lettuce (*Lactuca sativa* L.) in agricultural soil. Environ. Earth. Sci. 74: 2. 1249-1259.
21.Krzesłowska, M. 2011. The cell wall in plant cell response to trace metals: polysaccharide remodeling and its role in defense strategy. Acta. Physiol. Plant. 33: 1. 35-51.
22.Kumar, A., Tsechansky, L., Lew, B., Raveh, E., Frenkel, O., and Graber, E.R. 2018. Biochar alleviates phytotoxicity in Ficus elastica grown in Zn-contaminated soil. Sci. Total. Environ. 618: 188-198.
23.Leoppert, R.H., and Suarez, D.L. I996. Carbonate and gypsum. P 437-447. In: Sparks D.L. (ed.) Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
24.Li, H., Liu, Y., Chen, Y., Wang, S., Wang, M., Xie, T., and Wang, G. 2016. Biochar amendment immobilizes lead in rice paddy soils and reduces its phytoavailability. Sci. Rep. 6. article number. 31616.
25.Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil. Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
26.Lone, M.I., He, Z.L., Stoffella, P.J., and Yang, X.E. 2008. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: progresses and perspectives. J. Zhejiang. Univ. Sci. B. 9: 3. 210-220.

27.Lwin, C.S., Seo, B.H., Kim, H.U., Owens, G., and Kim, K.R. 2018. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality-a critical review. J. Soil. Sci. Plant. Nutr. 64: 2. 156-167.
28.Magaji, Y., Ajibade, G.A., Yilwa, V.M.Y., Appah, J., Haroun, A.A., Alhaji, I., Namadi, M.M., and Sodimu, A.I. 2018. Concentration of heavy metals in the soil and translocation with phytoremediation potential by plant species in military shooting range. World Scientific News. 92: 2. 260-271.
29.Małecka, A., Piechalak, A., Morkunas, I., and Tomaszewska, B. 2008. Accumulation of lead in root cells of Pisum sativum. Acta. Physiol. Plant. 30: 5. 629-637.
30.Marques, A.P., Oliveira, R.S., Rangel, A.O., and Castro, P.M. 2008. Application of manure and compost to contaminated soils and its effect on zinc accumulation by Solanum nigrum inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. Environ. Pollut. 151: 3. 608-620.
31.McCann, C.M., Gray, N.D., Tourney, J., Davenport, R.J., Wade, M., Finlay, N., Hudson-Edwards, K.A., and Johnson, K.L. 2015. Remediation of a historically Pb contaminated soil using a model natural Mn oxide waste. Chemosphere. 138: 211-217.
32.Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Carbon, organic carbon and organic matter. P 961-1010. In Sparks D.L. (ed.) Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
33.Nikolaidis, C., Zafiriadis, I., Mathioudakis, V., and Constantinidis, T. 2010. Heavy metal pollution associated with an abandoned lead–zinc mine in the Kirki Region, NE Greece. Bull Environ. Contam. Toxicol. 85: 307-312.
34.O'Connor, D., Peng, T., Zhang, J., Tsang, D.C., Alessi, D.S., Shen, Z., Bolan, N.S., and Hou, D. 2018. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials. Science of The Total Environment. 619: 815-826.
35.Ogundiran, M.B., Lawal, O.O., and Adejumo, S.A. 2015. Stabilisation of Pb in Pb smelting slag-contaminated soil by compost-modified biochars and their effects on maize plant growth. J. Environ Prot. 6: 8. 771-780.
36.Park, J.H., Choppala, G., Lee, S.J., Bolan, N., Chung, J.W., and Edraki, M. 2013. Comparative sorption of Pb and Cd by biochars and its implication for metal immobilization in soils. Water, Air, and Soil Pollution. 224: 12. 1711-1721.
37.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. Soil. 348: 1-2. 439-451
38.Pelloux, J., Rusterucci, C., and Mellerowicz, E.J. 2007. New insights into pectin methylesterase structure and function. Trends. Plant. Sci. 12: 6. 267-277.
39.Qin, P., Wang, H., Yang, X., He, L., Müller, K., Shaheen, S.M., Xu, S., Rinklebe, J., Tsang, D.C., Ok, Y.S., and Bolan, N. 2018. Bamboo-and pig-derived biochars reduce leaching losses of dibutyl phthalate, cadmium, and lead from co-contaminated soils. Chemosphere. 198: 450-459.
40. Rhoades J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. P 417-435. In: Sparks D.L. (ed.) Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
41.Ruiz, E., Alonso-Azcárate, J., Rodríguez, L., and Rincón, J. 2009. Assessment of metal availability in soils from a Pb-Zn mine site of South-Central Spain. Soil Sediment Contam. 18: 5. 619-641.
42.Ryan, J.A., Scheckel, K.G., Berti, W.R., Brown, S.L., Casteel, S.W., Chaney, R.L., Hallfrisch, J., Doolan, M., Grevatt, P., Maddaloni, M., and Mosby, D. 2004. Peer reviewed: reducing children's risk from lead in soil. Environ. Sci. Technol. 38: 1. 18-24.
43.Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M.R., Ishaque, W., Kamran, M.A., Matloob, A., Rehim, A., and Hussain, S. 2017. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. Chemosphere. 171: 710-721.

44. Shahid, M., Pinelli, E., Pourrut, B., Silvestre, J., and Dumat, C. 2011. Lead-induced genotoxicity to *Vicia faba* L. roots in relation with metal cell uptake and initial speciation. Ecotoxicol. Environ. Saf. 74: 1. 78-84.
45. 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 Sci. Soc. Am. J. 46: 260-265.
46. Sumner, M.E., and Miller, P.M. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficient. P 1201-1230. In Sparks D.L. (ed.) Methods of Soil Analysis. SSSA. Madison.
47. Susarla, S., Medina, V.F., and McCutcheon, S.C. 2002. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. Ecol. Eng. 18: 5. 647-658.
48. Taskila, S., Tuomola, M., and Ojamo, H. 2012. Enrichment cultivation in detection of food-borne Salmonella. Food Control. 26: 2. 369-377.
49. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks D.L. (ed.). Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison. 1309p.
50. Udeigwe, T.K., Eze, P.N., Teboh, J.M., and Stietiya, M.H. 2011. Application, chemistry, and environmental implications of contaminant-immobilization amendments on agricultural soil and water quality. Environ. Int. 37: 1. 258-267.
51. Verbruggen, N., Hermans, C., and Schat, H. 2009. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. New Phytol. 181: 4. 759-776.
52. Verkleij, J.A.C., and Schat, H. 1990. Mechanisms of metal tolerance in higher plants (Vol. 95). CRC Press, Boca Raton, FL.
53. Weis, J.S., Glover, T., and Weis, P. 2004. Interactions of metals affect their distribution in tissues of Phragmites australis. Environ. Pollut. 131: 3. 409-415.
54. Yathavakulasingam, T., Mikunthan, T., and Vithanage, M. 2016. Acceleration of Lead Phytostabilization by Maize (*Zea mays*) in Association with Gliricidiasepium Biomass. Chemical and Environmental Systems Modeling Research Group, National Institute of Fundamental Studies, Kandy, Sri Lanka. 2: 5. 16-21.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(4), 2018
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2018.14361.2910

Phytoremediation potential of maize (*Zea mays* L.) using biochars produced from Walnut leaves in a contaminated soil

P. Kabiri[1], *H.R. Motaghian[2] and A.R. Hosseinpur[3]
[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Shahrekord University, [2]Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Shahrekord University, [3]Professor, Dept. of Soil Science, Shahrekord University
Received: 04.18.2018; Accepted: 07.04.2018

Abstract

Background and Objectives: Today, it is necessary to develop biological soil remediation methods that are cost-effective and eliminate pollution without degrading soil fertility. So, studies have been done to reduce the mobility and bioavailability of heavy metals. Recently, biochar is widely used to reduce the toxicity of heavy metals. Biochar is a carbon-rich organic matter, which is produced from pyrolysis of residues under limited oxygen conditions. It is made up of polycyclic aromatic hydrocarbons in which carbon atoms are annularly bounded. Aromatic structure makes it resistant to biological and chemical changes. This carbon-rich material has many functional groups such as, hydroxyl, ketone, ester, aldehyde, amine and carboxyl and significant amounts of humic and fulvic organic acids, which their composition and heterogeneous surface can exhibit different hydrophilic or hydrophobic properties and acidic and basic features. Therefore, biochar has the capacity to stabilize organic and inorganic materials. Furthermore, this material can reduce the risk of entering heavy metals contamination into food chain due to its surface area, porous structure, high pH and CEC. The aim of this study was to investigate the application of Walnut leaves and biochars produced from which at three temperatures of 200, 400 and 600 °C on the availability and uptake of lead by maize (*Zea mays* L. Cv. Single cross 704).

Materials and Methods: In this study, a pot experiment was conducted, consisting of soils treated with 0, 0.5, 1 and 2 percent (w/w) of Walnut leaves and its derived biochars produced at 200, 400 and 600 °C. Walnut leaves and biochars were mixed with 3 kg of soil in 3 replicates and were incubated for 45 days in greenhouse conditions. After incubation, 3 seeds of maize were planted in each pot while adding fertilizers needed. Shoots and roots were harvested after 8 weeks of planting. The maize indices (shoot and root dry weights, Pb and Zn concentration in shoots and roots, bioaccumulation factor and translocation factor) and DTPA-extractable of pb in soils were determined.

Results: The results showed that DTPA-extractable of pb and its bioaccumulation reduced by increasing the producing temperature and the application rate of biochars in calcareous soils. Treating soil with 0.5, 1 and 2% of biochar produced at 600 °C, significantly reduced pb concentration in shoots by 31.3%, 33.5%, 36.1%, respectively and pb concentration in roots by 32.0%, 35.6% and 36.2%, respectively ($P<0.05$). Physiological responses showed that modifiers were effective for increasing the ratio of shoot to root of maize throughout its growth. Treating soil with 2% of biochar produced at 600 °C, increased significantly the dry weight of shoot and root by 131.4% and 116.7%, respectively compared to the control. Also, results showed that the

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

DTPA-extractable of pb decreased by increasing the producing temperature and the application rate of amendments in soils. Treating soil with 0.5, 1 and 2% biochar produced at 600 °C, reduced the Bioavailable soil Pb concentrations (DTPA extraction) by 35.3, 40.1 and 49.1%, respectively ($P<0.05$). Therefore, biochars were able to reduce the contamination of Pb in treatments and increase maize dry weight.

Conclusion: Biochar decreased the concentration of Pb in plant tissues and increased maize growth by reducing the bioavailable soil Pb concentrations (DTPA extraction). Therefore, biochar can be assisted to maize for phytostabilizing Pb in soil and improving phytoremediation.

Keywords: Lead bioavailability, Phytoremediation, Phytostabilization, Walnut leaves