نشریه تولید گیاهان زراعی
جلد سیزدهم، شماره چهارم، زمستان ۹۹
٤١-٥٦
http://ejcp.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/ejcp.2021.17991.2329

تأثیر بیوچار بر پاسخ‌های مورفولوژیک رشد ذرت در یک خاک طبیعی آلوده

پروین کبیری[1]، حمیدرضا متقیان[2*]، علیرضا حسین‌پور[3]

[1]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد شیمی و حاصل‌خیزی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
[2]دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهر کرد، ایران
[3]استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهر کرد، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۸

چکیده

سابقه و هدف: تجمع بیش از اندازه فلزات سنگین در خاک کشاورزی، علاوه بر آلودگی‌های محیطی، باعث افزایش جذب آن‌ها توسط گیاهان شده که بر کیفیت و سلامت محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارد. سرب و روی از جمله فلزات دارای پتانسیل سمیت هستند که در خاک‌های آلوده وجود دارند و یکی از اصلی‌ترین معضلات محیط زیست در دهه‌های اخیر به شمار می‌آیند. این فلزات که با افزایش فعالیت‌های انسانی شامل فعالیت‌های کشاورزی (کاربرد کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها) و فعالیت‌های معدن‌کاوی در محیط خاک انتشار می‌یابند، اثرات سمی و خطرناکی در خاک داشته و تهدید جدی برای جانداران خاک‌زی محسوب می‌شوند. بیوچار نوعی ترکیب آلی غنی از کربن است که از گرماکافت زیست‌توده در شرایطی با اکسیژن محدود تهیه می‌شود. این ماده با داشتن سطح ویژه، ساختار متخلخل، گروه‌های عامل و pH بالا می‌تواند خطر آلودگی فلزات سنگین در خاک و ورود آن‌ها به زنجیره غذایی را کاهش دهد.

مواد و روش‌ها: هدف این مطالعه، بررسی تأثیر برگ گردو و بیوچارهای تهیه‌شده از آن در دماهای ٤٠٠،٢٠٠ و ٦٠٠ درجه سلسیوس با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد (وزنی- وزنی) بر فراهمی زیستی روی و سرب و شاخص‌های مورفولوژیک ذرت (رقم سینگل‌کراس ٧٠٤) رشدکرده در یک خاک آلوده اطراف معادن روی و سرب باما بود. ابتدا خاک‌ها به‌مدت ٤٥ روز در گلخانه خوابانیده شد. سپس بر اساس نتیجه آزمون خاک، عناصر غذایی مورد نیاز به همه گلدان‌ها افزوده شد. سپس در هر گلدان، بذر ذرت کشت و ۸ هفته پس از کشت، اندام هوایی و ریشه گیاه از خاک گلدان جدا شد. شاخص های مورفولوژیک ذرت و مقدار فراهمی زیستی روی و سرب (عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA)، pH و EC خاک بعد از کشت تعیین شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که کاربرد مقادیر مختلف بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای گوناگون بر فراهمی زیستی روی و سرب در خاک آلوده اثر معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) داشت. روی و سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با افزایش مقدار و دمای تولید بیوچار کاهش معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) یافت. به گونه‌ای که کاربرد ۲ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦٠٠ درجه سلسیوس، فراهمی زیستی روی و سرب را نسبت به شاهد به‌ترتیب ٤٩/١ و ٣٤/٩ درصد کاهش داد. پاسخ‌های مورفولوژیکی نشان داد که کاربرد بیوچار، نسبت رشد اندام هوایی به رشد ریشه را در مقایسه با شاهد افزایش داد. همچنین، بیوچار تأثیر معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) بر رشد برگ، ساقه و ریشه ذرت داشت.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج حاصل، کاربرد بیوچار در خاک آلوده می‌تواند با کاهش فراهمی زیستی و بهبود شاخص‌های مورفولوژیکی ذرت، رشد این گیاه را جهت پالایش سبز خاک بهبود دهد.

واژه‌های کلیدی: بیوچار برگ گردو، خاک‌های بسیار آلوده، روی، سرب، شاخص‌های مورفولوژیکی ذرت علوفه‌ای.

*مسئول مکاتبه: motaghian.h@yahoo.com

مقدمه

امروزه گسترش زندگی شهری، رشد کارخانجات صنعتی و فعالیت‌های معدن‌کاوی، موجب تجمع بیش از حد فلزات سنگین در بسیاری از خاک‌های کشاورزی گردیده است. تجمع فلزات سنگین دارای پتانسیل مسمومیت در خاک آثار زیان‌باری بر رشد و تولید گیاه دارد و امنیت غذایی و سلامت بشر را تهدید می‌کند (۷، ۹). مقدار بیش از حد فلزات سنگین در بیشتر گیاهان، موجب بروز سمیت می‌شود، به گونه‌ای که با بالا رفتن مقدار فلزات در محیط رشد، یون‌های آن‌ها از ریشه به اندام هوایی منتقل می‌شوند و کاهش رشد و عملکرد گیاه را در پی دارد (۳۰). مقدار بالای فلزات دارای پتانسیل مسمومیت در گونه‌های گیاهی غیرمقاوم، بسیاری از خصوصیات مورفولوژیکی و ظاهری (کاهش زیست‌توده، ممانعت از جوانه‌زنی، القای کلروز و نکروز برگ، تغییر رنگ ریشه، چوبی شدن ریشه (۱۳) و کاهش حجم ریشه (۲۱)) و همچنین، بسیاری از فعالیت‌های فیزیولوژی گیاه (فتوسنتز، تنفس، تغذیه معدنی، ساختمان غشای سلول و بیان ژن) را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۱۸).

روی فعالیت بیش از صد آنزیم موجود در فرآیندهای متابولیسمی را کنترل می‌کند (۲۸)، اما هنگامی‌که غلظت آن در برگ به بیش از ٤٠٠ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک برسد، علایم سمیت آن به صورت نکروزه بر روی اندام‌های گیاه ظاهر می‌شود و در مقادیر بالا، سبب مرگ گیاه می‌گردد (۲۰). بنابراین، اگر مقدار این عنصر بیش از حد طبیعی باشد، جزو فلزات سمی به حساب آمده و می‌تواند بقای بسیاری از موجودات زنده از جمله گیاهان را تهدید کند (۲۲). همچنین، تأثیر سوء آن بر فعالیت کرم‌های خاکی و ریزجانداران موجود در خاک، باعث تأخیر در تجزیه مواد آلی موجود در خاک می‌گردد (۱۰). مقدار روی طبیعی در خاک، حدود ۱ تا ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (۲۵). دامنه طبیعی و آستانه تحمل روی در بافت گیاه به‌ترتیب بین ۲۷ تا ۱۵۰ و بین ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در گیاهان رشدکرده در خاک آلوده بین ۱۰۰ تا ٤٠٠ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (١٤). مقدار روی در گیاه که برای انسان زیان‌آور می‌باشد، بیش از ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و میزان آن در گیاهان آلوده ۱۰۰ تا ٤٠٠ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (٤). افیونی (۱۳۹۲) مقدار استاندارد محاسبه‌شده آلایندگی، محدوده بدون خطر، امکان وجود خطر و محدوده خطر فوری روی در خاک‌های کشاورزی ایران با pH>۷ را به‌ترتیب ۵۰۰، ۳٦۰، ۳٦۰-٦۸۰۰ و ٦۸۰۰< میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کرد.

معدن، منبع اصلی آلودگی سرب است (۱۹). مقدار سرب کل در خاک‌ها به‌طور متوسط ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است. این مقدار در خاک‌های آلوده به سرب، به بیش از ۱۰۰ میلی-گرم بر کیلوگرم می‌رسد (۱۲). سرب، رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و اگر مقدار آن از آستانه تحمل گیاه فراتر رود، تأثیرات بسیار مضری بر فرآیندهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه برجا می‌گذارد (۱۷). افیونی (۱۳۹۲) مقدار استاندارد محاسبه‌شده آلایندگی، محدوده بدون خطر، امکان وجود خطر و محدوده خطر فوری سرب در خاک‌های کشاورزی ایران با pH>۷ را به‌ترتیب ۷۵، ۷۵، ۷۵-۳۷۵ و ۳۷۵< میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کرد.

در سال‌های اخیر، استفاده از گیاهان متحمل به فلزات سنگین، که از زیست‌توده بالا و توانایی جذب و تجمع مقادیر نسبتاً بیشتری از آلاینده‌های فلزی در مقایسه با سایر گیاهان (به استثنای گیاهان بیش‌اندوز) برخوردار هستند، نظیر ذرت، برنج، آفتابگردان و

خردل مورد توجه محققین قرار گرفته و دستاوردهای شگرفی را نیز به دنبال داشته است (۲٤). رشد و نمو گیاهان پالایش‌کننده در خاک‌های دارای آلودگی شدید فلزات سنگین (که فراهمی زیستی آن‌ها زیاد است) با مشکل مواجه می‌شود. استفاده از بیوچار، به عنوان یک جاذب کربنی دارای منافذ، سطح ویژه و گروه‌های عاملی فراوان و تهیه‌شده در شرایطی با کمبود اکسیژن می‌تواند با کاهش تحرک و فراهمی زیستی فلزات سنگین (۲۹) رشد و نمو گیاه را افزایش دهد. به طوری‌که برخی مطالعات، علاوه بر کاهش فراهمی زیستی، به کاهش مقدار فلزات سنگین در گیاه رشدکرده در خاک‌های تیمارشده با بیوچار اشاره دارند (۱٦). از این‌رو، در این تحقیق به بررسی اثر بیوچار برگ گردو (به علت وجود سطح وسیع درختان گردو در استان چهارمحال و بختیاری) تولیدشده در دماهای مختلف بر پاسخ‌های مورفولوژی رشد گیاه ذرت، فراهمی زیستی روی و سرب و ارتباط آن با پاسخ‌های رشد ذرت و ویژگی‌های بیوچارهای تولیدشده پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه و نمونه‌برداری: خاک مورد استفاده از منطقه سپاهان‌شهر واقع در جنوب اصفهان و در شمال جاده اصفهان- شیراز برداشت شد. منطقه مورد مطالعه، حد فاصل طول جغرافیایی "۳۸٬ ٤۰ °۵۱ و "۲٤٬ ۳۵ °۵۱ شرقی و عرض جغرافیایی "۷۹٬ ۳۰ °۳۳ و "٤۷٬ ۳۳ °۳۲ شمالی قرار دارد. خاک مورد مطالعه در گروه کلسی‌جیپسیدز قرار داشت. نمونه-خاک هواخشک و با چکش چوبی کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های خاک در مطالعه قبلی اندازه‌گیری و گزارش شده است (۱۵).

تهیه بیوچارها و تعیین برخی ویژگی‌های آن‌ها: برای تهیه بیوچارها از برگ ریخته‌شده پای درخت گردو در پایان فصل تابستان و از باغ‌های شهر سامان استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. بیوچارها در ۳ دمای گرماکافت شامل ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس با قراردادن برگ گردو درون لوله‌های استوانه‌ای با قطر ۲/٥٤ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر در کوره به‌مدت ۲ ساعت و در شرایط کمبود اکسیژن تهیه شدند (۳۱). بیوچارها از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شدند (۳۳) و ویژگی‌های آن‌ها در مطالعه قبلی اندازه‌گیری و گزارش شده است (۱۵).

کشت ذرت در گلخانه: خاک مورد نظر با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد (وزنی- وزنی) از بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس مخلوط و پس از ٤٥ روز خواباندن خاک‌ها، طبق نتایج آزمون خاک ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیتروژن (اوره)، ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر (سوپرفسفات تریپل)، ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پتاسیم (سولفات پتاسیم) و عناصر کم‌مصرف 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 (۳ کیلوگرمی)، ۵ عدد بذر ذرت (رقم سینگل‌کراس ۷۰٤) کشت و پس از جوانه‌زدن به ۳ بوته تنک شد. در طول دوره رشد، مراقبت‌های لازم از قبیل 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 آب مقطر شسته و درون پاکت کاغذی در دمای ٦٥ درجه سلسیوس به‌مدت ٤۸ ساعت در آون قرار داده شد. سپس، وزن خشک این بخش‌ها آسیاب و اندازه‌گیری شدند. طول و قطر ساقه اصلی به‌ترتیب توسط خط‌کش و کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد. سطح برگ با تهیه عکس از برگ‌های

سالم ذرت از یک فاصله یکسان و کاربرد نرم‌افزار ImageJ تعیین گردید. حجم ریشه با استفاده از استوانه مدرج ۱۰۰۰ میلی‌لیتری پرشده با مقدار معینی آب اندازه‌گیری گردید. بدین منظور، ریشه‌های جداشده از گیاه، در آب درون استوانه فرو برده شدند و اختلاف حجم اولیه و نهایی آب درون استوانه، حجم ریشه‌ها را بر حسب سانتی‌متر مکعب مشخص نمود. علاوه بر این، پس از کشت و برداشت ریشه‌ها، خاک هر گلدان کاملاً مخلوط و نمونه‌ای از آن برداشت شد. در این نمونه‌ها فراهمی زیستی روی و سرب تعیین شد.

تعیین برخی ویژگی‌های خاک‌ها: مقدار pH (در سوسپانسیون ۲ به ۱ آب به خاک)، قابلیت هدایت الکتریکی (در عصاره ۲ به ۱ آب به خاک) (۲٦) و فراهمی زیستی روی و سرب (جدول ۱) بعد از کشت بر اساس روش‌های عصاره‌گیری مورد استفاده در جدول ۱ تعیین شد.

جدول ۱- روش‌های عصاره‌گیری مورد استفاده در تعیین فراهمی زیستی **روی و سرب (۱۱).**

Table 1. Extraction Methods used to determine bioavailability of Zn and Pb (11).

عصاره‌گیر Extractor	ترکیب عصاره‌گیر Extractor composition	نسبت خاک:عصاره‌گیر Ratio of soil: extractor	زمان تکان‌دادن (دقیقه) Shaking time (min)
دی‌اتیلن‌آمین‌پنتااستیک اسید- تری‌اتانول‌آمین DTPA-TEA	۰/۰۰۵ مولار دی‌اتیلن‌آمین‌پنتا استیک اسید + ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم + ۰/۱ مولار تری‌اتانول‌آمین (pH= ۷/۳) 0.005 M DTPA + 0.01 M $CaCl_2$ + 0.1 M TEA (pH=7.3)	1:2	120
آب‌مقطر Distilled water	آب‌مقطر Distilled water	1:10	120

تجزیه و تحلیل آماری

قبل از تجزیه واریانس داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی، فرضیات تجزیه واریانس شامل همگنی واریانس ها 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 آن ها بر فراهمی زیستی روی و سرب بعد از کشت و شاخص‌های مورفولوژیکی ذرت، از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. همچنین، برای مقایسه بین شاخص‌های مورفولوژیکی ذرت و روی و سرب 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 شاخص های ذرت با روی و سرب تعیین شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Statistica, 8 انجام شد. اندازه اثر (Eta^2) نشان‌دهنده سهم هر یک از عوامل در تغییرات کل ویژگی ها می‌باشد و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است (۲۷):

رابطه ۱:
$$Eta^2 = \frac{\text{مجموع مربعات هر عامل}}{\text{مجموع مربعات کل}}$$

نتایج و بحث

تغییرات روی و سرب: نتایج تجزیه واریانس دو طرفه نشان داد که اثر دمای تهیه بیوچار بر مقدار روی و سرب محلول و عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA اثر معنی داری ($p<۰/۰۱$) داشت. مقدار بیوچار مورد استفاده بر مقدار روی محلول و همچنین، روی و سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA اثر معنی داری ($p<۰/۰۱$) داشت. اثر متقابل دما و مقدار بیوچار مورد

استفاده بر مقدار روی محلول و سرب عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA معنی دار (p<۰/۰۱) بود (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر دمای گرماکافت، سطح بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر روی و سرب محلول و عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA.

Table 2- Results of analysis of variance (mean square) of the effect of pyrolysis temperature, biochar level, and their interaction on soluble and DTPA- extractable Zn and Pb.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	روی Zn		سرب Pb	
		محلول Soluble	DTPA-TEA	محلول Soluble	DTPA-TEA
دمای گرماکافت Pyrolysis temperature	3	0.065(50.4)**	2755.5(74.7)**	0.177(36.8)**	15079(76.2)**
سطح بیوچار Biochar level	2	0.038(19.7)**	998.8(18.1)**	0.019(2.7)ns	5750 (19.4)**
دما × سطح Temperature × level	6	0.013(19.2)**	50.7(2.75)ns	0.018(7.6)ns	238(2.4)**
خطا Error	24	0.002(10.6)	20.7(4.49)	0.032(53.0)	49(1.98)
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		6.9	2.9	139.7	2.9
ضریب تبیین (درصد) R^2 (%)		89.4	95.5	77.0	98.0

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ns غیر معنی‌دار.

اعداد نشان داده‌شده در پرانتز Eta^2 است (کل ss/ عامل ss=Eta^2)

**: significant at 1%. ns: non-significant.

Data in paranteses are Eta^2 (Eta^2= ss_{effect} / ss_{total})

جدول ۳ نشان داد که تیمار خاک با بیوچار تولیدشده در دماها و مقادیر مختلف، روی و سرب محلول را به طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش داد (p<۰/۰۵). کاربرد بیوچار (در همه مقادیر و دماهای مختلف) مقدار فراهمی زیستی روی و سرب را در مقایسه با خاک شاهد کاهش معنی‌داری (p<۰/۰۵) داد. با تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس، فراهمی زیستی روی به‌ترتیب ۲٦/۱، ۲٦/۹ و ۳٤/۹ درصد و فراهمی زیستی سرب به‌ترتیب ۳۵/۳، ٤۰/۱ و ٤۹/۱ درصد نسبت به خاک شاهد کاهش یافت.

بر اساس نتایج مطالعه حاضر، با افزایش مقدار و دمای تهیه بیوچار، مقدار محلول و فراهمی زیستی روی و سرب در تیمارها کاهش یافت. بیوچار با مکانیسم‌هایی از قبیل جذب سطحی (اختصاصی و غیراختصاصی)، تشکیل کلات‌های پایدار، کمپلکس با مواد آلی، تبادل یونی و رسوب، فراهمی زیستی فلزات سنگین را کاهش داد (۸). بر اساس نتایج برخی محققین، بیوچار به علت داشتن گروه‌های عامل اکسیژنی و سطح ویژه بالاتر نسبت به ماده خام اولیه، قادر به جذب فلزات سنگین بود (۳). برخی محققین، کاهش فراهمی زیستی فلزات سنگین را به تأثیر بیوچار بر تغییر اجزاء و اشکال فلزات سنگین در خاک نسبت دادند که باعث انتقال آن‌ها به اجزای پایدارتر خاک گردید (۲، ٦، ۳۱) که این اجزاء در مطالعه قبلی بررسی شد (۱۵).

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر دمای گرماکافت، سطوح بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر روی و سرب محلول و عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA (میلی‌گرم بر کیلوگرم).

Table 3- Means' comparisons of effect of pyrolysis temperature, biochar level and their interaction on soluble and DTPA-extractable Zn and Pb (mg kg^{-1}).

اصلاح‌کننده amendment	دمای گرماکافت (درجه سلسیوس) Pyrolysis temperature(°C)	سطح بیوچار (درصد) Biochar level (%) 0.5	1	2	میانگین mean
			روی محلول Soluble Zn		
شاهد Control		0.90±0.003A	0.90±0.003A	0.90±0.003A	
برگ گردو Walnut leaves		0.61±0.04abB	0.63±0.02abB	0.65±0.01aB	0.63
بیوچار Biochar	200	0.62±0.01abB	0.60±0.02abcB	0.40±0.006fB	0.54
	400	0.57±0.02bcdB	0.53±0.02cdeB	0.49±0.01eB	0.53
	600	0.52±0.05deB	0.42±0.01fB	0.33±0.006gB	0.42
میانگین mean		0.58	0.54	0.47	
			فراهمی زیستی روی Zn-DTPA-TEA		
شاهد Control		190.4±0.9A	190.4±0.9A	190.4±0.9A	
برگ گردو Walnut leaves		187.0±2.0A	174.7±3.5B	170.0±0.7B	177.2a
بیوچار Biochar	200	161.6±3.7B	151.6±4.3B	148.8±0.9B	154.0b
	400	164.0±2.3B	152.8±2.3B	137.6±2.8B	151.5b
	600	140.8±1.8B	139.2±0.9B	124.0±3.2B	134.7c
میانگین mean		163.3a	154.6b	145.1c	
			سرب محلول Soluble Pb		
شاهد Control		0.113±0.07B	0.113±0.07B	0.113±0.07B	
برگ گردو Walnut leaves		0.173±0.09B	0.363±0.29B	0.477±0.1A	0.338a
بیوچار Biochar	200	0.053±0.03B	0.057±0.05B	0.070±0.07B	0.060b
	400	0.067±0.07B	0.013±0.01B	0.027±0.02B	0.036b
	600	0.067±0.07B	0.077±0.08B	0.107±0.06B	0.083b
میانگین mean		0.090	0.128	0.170	
			فراهمی زیستی سرب Pb-DTPA-TEA		
شاهد Control		333.6±10.5A	333.6±10.5A	333.6±10.5A	
برگ گردو Walnut leaves		301.0±3.7aB	279.2±1.0bB	272.3±4.1bB	284.1
بیوچار Biochar	200	268.3±3.2bB	247.5±3.5cB	233.6±4.4dB	249.8
	400	240.9±7.4cdB	203.4±7.0fB	175.4±2.5gB	206.6
	600	215.8±2.5eB	199.9±1.3fB	169.8±2.2gB	195.1
میانگین mean		256.5	232.5	212.8	

هر داده، میانگین سه تکرار ± 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 با شاهد، با روش Fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Data are expressed as mean ± standard errors (n = 3).

Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD's test at $p<0.05$. Different upper letter(s) represent significant differences between treatments and control by fisher-LSD's test at $p<0.05$.

اکثر تحقیقات افزایش pH خاک (تحت تأثیر خاصیت قلیایی بیوچار) و آزاد شدن عناصر فسفر، پتاسیم و کلسیم از بیوچار به خاک را از مهم‌ترین عوامل تثبیت فلزات سنگین در خاک بیان کردند (۳)؛ زیرا pH یکی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی مهم خاک است که واکنش‌ها، فرایندهای فیزیکوشیمیایی و بار وابسته به pH ذرات خاک را کنترل می‌کند. بر اساس نتایج ژنگ و همکاران (۲۰۱۲) بیوچارها با افزایش pH خاک به طور معنی‌داری مقدار کادمیم و روی قابل استخراج توسط نیترات آمونیوم در خاک را کاهش دادند (۳٤).

تغییرات pH و قابلیت هدایت الکتریکی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر دمای تهیه بیوچار و مقدار بیوچار مورد استفاده بر مقدار pH اثر معنی داری داشت (جدول ٤).

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر دمای گرماکافت، سطح بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر pH و EC.

Table 4- Results of analysis of variance (mean square) of the effect of pyrolysis temperature, biochar level, and their interaction on pH and EC.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	pH	EC
دمای گرماکافت Pyrolysis temperature	3	0.186(44.5)**	0.008 (21.0) ns
سطح بیوچار Biochar level	2	0.091(14.6)**	0.002 (3.8) ns
دما × سطح Temperature × level	6	0.029(13.8)ns	0.002 (11.8) ns
خطا Error	24	0.014(27.1)	0.003(36.6)
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		1.5	6.8
ضریب تبیین (درصد) R^2(%)		72.9	76.4

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ns غیر معنی‌دار.

اعداد نشان داده‌شده در پرانتز Eta^2 است (کل ss/ عامل Eta^2=ss)

**: significant at 1%. ns: non-significant.

Data in paranteses are Eta^2 (Eta^2= ss_{effect} / ss_{total})

نتایج مقایسه میانگین مقادیر pH و EC خاک پس از کشت، تحت تأثیر اثر متقابل دمای تهیه بیوچار و مقدار بیوچار در جدول ٥ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با افزایش دما و مقدار بیوچار استفاده‌شده در خاک، pH تیمارها نسبت به شاهد افزایش یافت. اما کاربرد سطوح و دماهای مختلف تهیه بیوچار بر EC تیمارها تأثیری نداشت. یانگ و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که هر دو بیوچار تهیه‌شده از ساقه تنباکو و خوک مرده، pH خاک را افزایش دادند، اما تأثیر معنی‌داری بر EC خاک نداشتند (۳۱).

شاخص‌های مورفولوژیک ذرت: نتایج تجزیه واریانس دو طرفه داده‌ها (جدول ٦) نشان داد که اثر دما بر مقدار وزن خشک اندام هوایی، ارتفاع ساقه، قطر ساقه، تعداد برگ‌ها، وزن مرطوب برگ‌های سالم، تعداد برگ‌های پژمرده گیاه، سطح برگ، وزن خشک ریشه و حجم ریشه معنی‌دار ($p<0/01$) بود. مقدار بیوچار مورد استفاده بر تعداد برگ‌های سالم

(p<۰/۰۵)، تعداد برگ‌های پژمرده گیاه، سطح برگ و وزن خشک ریشه اثر معنی‌داری (p<۰/۰۱) داشت. اثر متقابل دما و مقدار بیوچار بر تعداد برگ‌های پژمرده گیاه، سطح برگ و وزن خشک ریشه معنی‌دار (p<۰/۰۱) بود.

جدول ٥- مقایسه میانگین اثر دمای گرماکافت و سطح بیوچار بر pH و EC.

Table 5- Means' comparisons of the effect of pyrolysis temperature and biochar level on pH and EC.

اصلاح‌کننده amendment	دمای گرماکافت (درجه سلسیوس) Pyrolysis temperature (°C)	سطح بیوچار (درصد) Biochar level (%) 0.5	1	2	میانگین mean
			pH		
شاهد Control		7.24±0.12B	7.24±0.12B	7.24±0.12B	
برگ گردو Walnut leaves		7.60±0.04A	7.65±0.05A	7.80±0.01A	7.68b
بیوچار Biochar	200	7.46±0.15A	7.51±0.05A	7.86±0.10A	7.61b
	400	7.81±0.04A	7.87±0.05A	7.87±0.04A	7.85a
	600	7.91±0.04A	7.92±0.08A	7.92±0.01A	7.92a
میانگین mean		7.70b	7.74b	7.86a	
			هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC ($dS\ m^{-1}$)		
شاهد Control		0.81±0.02	0.81±0.02	0.81±0.02	
برگ گردو Walnut leaves		0.84±0.02	0.83±0.02	0.84±0.05	0.84
بیوچار Biochar	200	0.82±0.04	0.82±0.01	0.84±0.03	0.82
	400	0.84±0.03	0.85±0.01	0.80±0.04	0.83
	600	0.82±0.01	0.77±0.05	0.73±0.03	0.77
میانگین mean		0.83	0.82	0.80	

هر داده، میانگین ٣ تکرار ± خطای استاندارد است.

حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش Fisher-LSD در سطح احتمال ٥ درصد است.

حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با شاهد، با روش Fisher-LSD در سطح احتمال ٥ درصد است.

Data are expressed as mean ± standard errors (n = 3).
Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD's test at p<0.05.
Different upper letter(s) represent significant differences between treatments and control by fisher-LSD's test at p<0.05.

خصوصیات مورفولوژیکی اندام هوایی: تفاوت بین وزن خشک اندام هوایی اندازه‌گیری‌شده در تیمارهای بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار (p<۰/۰۵) بود (جدول ٧). کاربرد بیوچار (در همه مقادیر و دماهای مختلف)، مقدار وزن خشک اندام هوایی را در مقایسه با خاک شاهد افزایش داد. تیمار خاک‌ها با ۰/٥، ١ و ٢ درصد بیوچار ٦٠٠ درجه سلسیوس، وزن خشک اندام هوایی را به‌ترتیب ١٢٢/٩، ١٢٥/٧ و ١٣١/٤ درصد نسبت به خاک شاهد افزایش داد.

جدول ٦- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر دمای گرماکافت، مقدار بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر شاخص‌های مورفولوژیک ذرت.

Table 6- Results of analysis of variance (mean square) of the effect of pyrolysis temperature, biochar level, and their interaction on morphological indices of maize.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	وزن خشک اندام هوایی Shoots dry weight	ارتفاع ساقه Stem height	قطر ساقه Stem diameter	سطح برگ Leaf surface	تعداد برگ‌های سالم Number of healthy leaves	وزن مرطوب برگ‌های سالم Wet weight of healthy leaves	تعداد برگ‌های پژمرده گیاه Number of withered leaves	وزن خشک ریشه Root dry weight	حجم ریشه Root volume
دمای گرماکافت Pyrolysis temperature	3	21 (89.6) **	51.7 (71.0) **	0.029 (84.1) **	35020 (74.3) **	44.7 (63.3)**	1490 (86.4)**	32.4 (79.5) **	6.7 (91.8) **	2023 (74.4) **
سطح بیوچار Biochar level	2	0.32 (0.9)ns	1.3 (1.2)ns	0.0003 (0.6)ns	9808 (13.9) **	10.2 (9.6)*	24(0.9)ns	7.7 (12.6) **	0.31 (2.9) **	37.8 (0.9)ns
دما × سطح Temperature × level	6	0.20 (1.7)ns	2.9 (8.0)ns	0.0008 (4.7)ns	1465 (6.2) **	0.97 (2.8)ns	15(1.8)ns	1.2 (5.8) **	0.11 (3.0) **	56 (4.1)ns
خطا Error	24	0.23 (7.8)	1.8 (19.8)	0.0005 (10.6)	327 (5.6)	2.1 (24.3)	23(10.8)	0.11(2.2)	0.021(2.3)	70 (20.5)
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		7.8	8.1	5.4	7.8	10.1	12.9	11.5	3.8	20.4
ضریب تبیین (درصد) R^2 (%)		92.2	80.2	89.4	94.4	75.7	89.2	97.8	97.7	79.5

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns غیر معنی‌دار.

اعداد نشان داده‌شده در پرانتز Eta^2 است (کل ss/ عامل ss=Eta^2)

**: significant at 1%. *: significant at 5%. ns: non-significant.

Data in paranteses are Eta^2 (Eta^2= ss_{effect} / ss_{total}).

تفاوت بین ارتفاع ساقه در تیمارهای بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار ($p<۰/۰۵$) بود (جدول ۷). کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ارتفاع ساقه را به‌ترتیب ۷/۷، ۲۱/۰ و ۳۹/۰ درصد نسبت به بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای ٤۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و بقایا افزایش داد. با کاربرد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس، قطر ساقه به‌ترتیب ۱٤/۳، ۲۹/۷ و ۳۷/۱ درصد نسبت به بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای ٤۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و بقایا افزایش یافت (جدول ۷). نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار (در هر دمایی و با هر مقداری) در خاک، ارتفاع و قطر ساقه را نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) داد.

تیمار خاک با بیوچارها (در همه مقادیر و دماهای مختلف) سطح برگ را در مقایسه با خاک شاهد افزایش معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) داد. با کاربرد ۲ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس در خاک، سطح برگ به‌ترتیب ٤۲/۷، ۷۱/۵ و ۹۱/۷ درصد، تعداد برگ‌های سالم گیاه به‌ترتیب ۱۵/٦، ۳۰/۹ و ۳۹/۱ درصد و وزن مرطوب برگ‌های سالم گیاه به‌ترتیب ۳٦/۱، ۸۲/٤ و ۱۰۲/۲ درصد نسبت به بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای ٤۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و بقایا افزایش یافت. (جدول ۸). نتایج

نشان داد که کاربرد بیوچار (در هر دمایی و با هر مقداری) در خاک، تعداد و وزن مرطوب برگ‌های سالم گیاه را نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری ($p<۰/۰۵$) داد (جدول ۸). استفاده از بیوچار در هر دما و با هر مقداری (به‌جز خاک تیمار شده با ۰/۵ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس) تعداد برگ‌های پژمرده گیاه را کاهش معنی‌داری داد.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر دمای گرماکافت و سطح بیوچار بر خصوصیات مورفولوژیکی اندام هوایی ذرت.

Table 7- Means' comparisons of effect of pyrolysis temperature and biochar level on morphological characteristics of maize shoot.

اصلاح‌کننده amendment	دمای گرماکافت (درجه سلسیوس) Pyrolysis temperature (°C)	سطح بیوچار (درصد) Biochar level (%) 0.5	1	2	میانگین mean
		وزن خشک اندام هوایی (گرم بر گلدان) Shoot dry weight (g pot^{-1})			
شاهد Control		3.5±0.29B	3.5±0.29B	3.5±0.29B	
برگ گردو Walnut leaves		4.7±0.09A	4.7±0.19A	4.6±0.1A	4.7d
بیوچار Biochar	200	5.5±0.39A	5.6±0.11A	5.5±0.17A	5.6c
	400	6.8±0.36A	7.5±0.32A	7.8±0.64A	7.4b
	600	7.8±0.07A	7.9±0.02A	8.1±0.13A	7.9a
میانگین mean		6.2	6.4	6.5	
		ارتفاع ساقه (سانتی‌متر) Stem height (cm)			
شاهد Control		11.9±1.75B	11.9±1.75B	11.9±1.75B	
برگ گردو Walnut leaves		13.3±0.51B	14.1±0.44B	14.9±0.95A	14.1d
بیوچار Biochar	200	15.8±0.56A	16.3±0.38A	16.4±1.18A	16.2c
	400	19.1±1.28A	19.0±0.33aA	16.6±0.73A	18.2b
	600	18.8±0.99A	20.1±0.73A	19.9±0.48A	19.6a
میانگین mean		16.8	17.4	16.9	
		قطر ساقه (میلی‌متر) Stem diameter (mm)			
شاهد Control		0.26±0.013B	0.26±0.013B	0.26±0.013B	
برگ گردو Walnut leaves		0.33±0.002eA	0.37±0.02deA	0.36±0.005deA	0.35
بیوچار Biochar	200	0.37±0.010deA	0.36±0.004deA	0.38±0.016dA	0.37
	400	0.43±0.02bcA	0.44±0.013bA	0.39±0.016dA	0.42
	600	0.48±0.010aA	0.48±0.008aA	0.48±0.004aA	0.48
میانگین mean		0.40	0.41	0.40	

هر داده میانگین ۳ تکرار ± 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 با شاهد، با روش Fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Data are expressed as mean ± standard errors (n = 3).
Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD's test at $p<0.05$.
Different upper letter(s) represent significant differences between treatments and control by fisher-LSD's test at $p<0.05$.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر دمای گرماکافت و سطح بیوچار بر خصوصیات مورفولوژیکی برگ.

Table 8- Means' comparisons of effect of pyrolysis temperature, biochar level and their interaction on morphological characteristics of leaves.

اصلاح‌کننده amendment	دمای گرماکافت (درجه سلسیوس) Pyrolysis temperature(°C)	سطح بیوچار (درصد) Biochar level (%) 0.5	1	2	میانگین mean
			سطح برگ (سانتی‌متر مربع) Leaf surface (cm^2)		
شاهد Control		110.1±10.9B	110.1±10.9B	110.1±10.9B	
برگ گردو Walnut leaves		159.3±12.0hA	171.8±4.9ghA	203.9±0.6efA	178.3
بیوچار Biochar	200	192.6±11.5fgA	205.8±17.1efA	227.9±2.1deA	208.8
	400	250.0±2.4cdA	252.3±6.4cdA	273.9±24.0bcA	258.7
	600	278.8±7.2bcA	293.3±1.4bA	390.8±5.9aA	320.9
میانگین mean		220.2	230.8	274.1	
			تعداد برگ‌های سالم گیاه Number of healthy leaves		
شاهد Control		9.3±0.33B	9.3±0.33B	9.3±0.33B	
برگ گردو Walnut leaves		11.3±0.67B	13.0±0.58A	14.0±1A	12.8c
بیوچار Biochar	200	12.3±0.33A	13.3±0.33A	15.0±0.58A	13.6c
	400	14.7±0.67A	16.0±0.58A	15.7±0.33A	15.4b
	600	17.3±0.67A	17.7±1.45A	18.3±1.67A	17.8a
میانگین mean		13.9b	15.0ab	15.8a	
			وزن مرطوب برگ‌های سالم (گرم بر گلدان) Wet weight of healthy leaves (g pot^{-1})		
شاهد Control		17.0±1.9B	17.0±1.9B	17.0±1.9B	
برگ گردو Walnut leaves		26.6±0.4A	29.8±2.0A	27.0±1.6A	27.8c
بیوچار Biochar	200	29.6±1.6A	33.3±2.1A	29.7±2.8A	30.9c
	400	43.7±3.1A	42.1±1.5A	38.3±4.4A	41.4b
	600	53.0±2.4A	57.7±5.2A	58.3±2.8A	56.3a
میانگین mean		38.2	40.7	38.4	
			تعداد برگ‌های پژمرده Number of withered leaves		
شاهد Control		6.0±0.0A	6.0±0.0A	6.0±0.0A	
برگ گردو Walnut leaves		5.0±0.0bB	4.3±0.33cB	3.7±0.33dB	4.3
بیوچار Biochar	200	6.0±0.0aA	3.3±0.33deB	3.0±0.0eB	4.1
	400	2.0±0.0fB	2.0±0.0fB	1.0±0.0gB	1.7
	600	1.0±0.0gB	0.3±0.33hB	0.0±0.0hB	0.4
میانگین mean		3.5	2.5	1.9	

هر داده میانگین ۳ تکرار ± 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 با شاهد، با روش Fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Data are expressed as mean ± standard errors (n = 3).

Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD's test at $p<0.05$. Different upper letter(s) represent significant differences between treatments and control by fisher-LSD's test at $p<0.05$.

با کاربرد بیوچار در خاک آلوده مورد مطالعه، ارتفاع ذرت، تعداد برگ‌ها و سطح برگ به‌ترتیب از ١١/٩ به ١٩/٩ سانتی‌متر، ٩/٣ به ١٨/٣ عدد و ١١٠/١ به ٣٩٠/٨ سانتی‌مترمربع افزایش داشت. در مطالعه اوگوندیران و همکاران (٢٠١٥) با کاربرد ٠/٠٥، ٠/١، ٠/٢ و ٠/٤ وزنی (گرم بر گرم) بیوچار بقایای برنج و کمپوست در خاک آلوده به سرب (١٨٣٠٠ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ارتفاع ذرت، تعداد برگ‌ها و سطح برگ به‌ترتیب از ٤٠ به ٩٠ سانتی‌متر، ٢ به ٨ عدد و ٧٠ به ٢٨٠ سانتی‌متر مربع افزایش داشت (٢٣).

خصوصیات مورفولوژی ریشه: نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار تهیه‌شده در هر دمایی و با هر مقداری در خاک، وزن خشک ریشه را افزایش معنی‌داری داد ($p<٠/٠٥$). به گونه‌ای که وزن خشک ریشه، با کاربرد ٢ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمای ٦٠٠ درجه سلسیوس در خاک به‌ترتیب ١٠/٦، ٥٢/٩ و ٦٢/٥ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بیوچارهای تهیه شده در دماهای ٤٠٠ و ٢٠٠ درجه سلسیوس و بقایا افزایش یافت.

جدول ٩- مقایسه میانگین اثر دمای گرماکافت، سطح بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر خصوصیات مورفولوژی ریشه.

Table 9- Means' comparisons of effect of pyrolysis temperature, biochar level, and their interaction on morphological characteristics of roots.

اصلاح‌کننده amendment	دمای گرماکافت (درجه سلسیوس) Pyrolysis temperature (°C)	سطح بیوچار (درصد) Biochar level (%)			میانگین mean
		0.5	1	2	
		وزن خشک ریشه (گرم بر گلدان) Root dry weight (g pot^{-1})			
شاهد Control		2.4±0.07B	2.4±0.07B	2.4±0.07B	
برگ گردو Walnut leaves		3.1±0.13eA	3.2±0.08deA	3.2±0.01deA	3.2
بیوچار Biochar	200	3.4±0.04dA	3.3±0.07deA	3.4±0.12deA	3.4
	400	3.9±0.07cA	4.6±0.04bA	4.7±0.02bA	4.4
	600	4.7±0.14bA	5.1±0.07aA	5.2±0.09aA	5.0
میانگین mean		3.8	4.0	4.1	
		حجم ریشه(سانتی‌متر مکعب) Root volume (cm^3)			
شاهد Control		17.5±1.44 B	17.5±1.44 B	17.5±1.44 B	
برگ گردو Walnut leaves		30.0±1.15 A	31.3±1.33 A	29.7±2.33 A	30.3 b
بیوچار Biochar	200	31.0±0.58 A	30.0±0.54 A	29.3±0.67 A	30.1 b
	400	43.5±0.87 A	56.0±0.58 A	58.0±2.89 A	52.5 a
	600	59.7±10.17 A	56.5±7.79 A	61.0±9.81 A	59.1a
میانگین mean		41.0	43.5	44.5	

هر داده میانگین ٣ تکرار ± خطای استاندارد است.

حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش Fisher-LSD در سطح احتمال ٥ درصد است.

حروف بزرگ متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با شاهد، با روش Fisher-LSD در سطح احتمال ٥ درصد است.

Data are expressed as mean ± standard errors (n = 3).
Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD's test at $p<0.05$. Different upper letter(s) represent significant differences between treatments and control by fisher-LSD's test at $p<0.05$.

جدول ۱۰- ضریب همبستگی پیرسون بین پاسخ‌های مورفولوژیکی ذرت و روی و سرب عصاره‌گیری‌شده با **DTPA-TEA** خاک (**n=۱۳**).

Table 10- Pearson correlation coeffcient between maize morphological responses and DTPA-extractable Pb and Zn (n=13).

ویژگی‌ها Characteristics	روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA Zn extracted by DTPA-TEA	سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA Pb extracted by DTPA-TEA
وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	-0.88**	-0.95**
ارتفاع ساقه Stem height	-0.83**	-0.86**
قطر ساقه Stem diameter	-0.83**	-0.86**
تعداد برگ‌ها Number of healthy leaves	-0.91**	-0.93**
وزن مرطوب برگ‌های سالم Wet weight of healthy leaves	-0.82**	-0.83**
تعداد برگ‌های پژمرده گیاه Number of withered leaves	0.86**	0.92**
سطح برگ Leaf surface	-0.92**	-0.93**
وزن خشک ریشه Root dry weight	-0.87**	-0.93**
حجم ریشه Root volume	-0.81**	-0.90**

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

** Significant at p<0.01.

تیمار خاک با بیوچار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، حجم ریشه را به‌ترتیب ۹۶/۳ و ۹۵/۰ درصد نسبت به بیوچار تهیه شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و بقایا افزایش داد. کاربرد ۱ درصد بقایا و مقادیر مختلف بیوچارهای تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، حجم ریشه را نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری (p<۰/۰۵) داد (جدول ۹). مشابه با تحقیق حاضر، بیوچار چوب درخت کاج و بیوچار درخت زیتون تهیه‌شده در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به طور معنی‌دار رشد زیست‌توده، قطر و طول ریشه ذرت را افزایش دادند (۵).

در مطالعه حاضر، ذرت در خاک شاهد نسبت به خاک‌های تیمارشده با بیوچارها رشد کمتری داشت و دو هفته پس از کاشت، علایم مسمومیت اندام هوایی (پژمردگی و زردی برگ‌های پایینی گیاه، توقف رشد اندام هوایی و کوتاه شدن) در آن مشاهده شد. رشد ذرت متناسب با دمای تهیه (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ 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 (۲۰۱۶) 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 قابل مشاهده بود و ذرت در خاک تیمارشده با ۱ و ۲/۵ درصد اصلاح‌کننده، به‌ترتیب ۳ و ۴ هفته پس از کاشت از بین رفت (۳۲). با کاربرد ۵ درصد اصلاح‌کننده در خاک، ذرت به تنش سرب مقاوم شد. به گونه‌ای که در خاک تیمارشده با این 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. در

مطالعه حاضر سایر عناصر غذایی به حد کافی در همه خاک‌ها استفاده شده بود (۳۲).

همبستگی بین روی و سرب عصاره گیری‌شده با DTPA-TEA و شاخص‌های مورفولوژیکی ذرت:

ضریب همبستگی پیرسون بین روی و سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA پس از کشت گیاه و تعداد برگ‌های پژمرده گیاه مثبت و معنی‌دار ($p<۰/۰۱$) بود. همچنین، بین روی و سرب عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA پس از کشت گیاه و وزن خشک اندام هوایی، ارتفاع ساقه، قطر ساقه، تعداد برگ‌ها، وزن مرطوب برگ‌های سالم، سطح برگ، وزن خشک ریشه و حجم ریشه همبستگی منفی و معنی داری ($p<۰/۰۱$) وجود داشت. نتایج جدول ۱۰ نشان داد که علت افزایش پاسخ‌های رشد گیاه می‌تواند کاهش روی و سرب قابل جذب گیاه باشد.

نتیجه‌گیری کلی

دمای تولید بیوچار برگ گردو، مقدار کاربرد و برهم‌کنش بین آن‌ها می‌تواند بر مقدار فراهمی زیستی روی و سرب گیاه تأثیر گذارد و موجب کاهش جذب روی و سرب از خاک‌های به‌شدت آلوده شود و رشد ذرت را افزایش دهد. بنابراین، استفاده هم‌زمان از ذرت و اصلاح‌کننده بیوچار می‌تواند راهکاری مفید جهت تثبیت گیاهی روی و سرب در خاک‌های به‌شدت آلوده باشد.

Refrences

1. Afyuni, M. 1392. Standards of soil resources quality (soil resources pollution) and their guidelines. Deputy Minister of Human Environment. Water and Soil Office, 166p. (In Persian)
2. 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.
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. 2690.
4. Alloway, B.J. 1990. Heavy Metals in Soils. John Wiley and Sons, 339p.
5. Brennan, A., Moreno Jiménez, E., 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.
6. Cui, L., Yan, J., Yang, Y., Li, L., Quan, G., Ding, C., Chen, T., Fu, Q., and Chang, A. 2013. Influence of biochar on microbial activities of heavy metals contaminated paddy fields. BioResources. 8: 4. 5536-5548.
7. Cuixia, Y., Yingming, X., Lin, W., Xuefeng, L., Yuebing, S., and Hongtao, J. 2020. Effect of different pyrolysis temperatures on physico-chemical characteristics and lead (II) removal of biochar derived from chicken manure. RSC Adv. 10: 7. 3667-3674.
8. 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-minecontaminated soil. Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J. 24: 7. 1887-1900.
9. Feng, C., Chen, Y., Zhang, S., Wang, G., Zhong, Q., Zhou, W., Xu, X., and Li, T. 2020. Removal of lead, zinc and cadmium from contaminated soils with two plant extracts: Mechanism and potential risks. Ecotoxicol. Environ. Saf. 187. 109829.
10. Greany, K.M. 2005. An assessment of heavy metal contamination in the marine

sediments of Las Perlas archipelago, gulf of Panama. Master of Science Thesis, Heriot-WattUniv. Edinburgh, 114p.
11. Hosseinpur, A.R., and Motaghian, H.R. 1396. Soil testing (correlation, calibration, and fertilizer recommendation studies). Shahrekord University. 386p. (In Persian)
12. Hutzinger, O. 1980. The handbook of environmental chemistry. Springer, New York, 434p.
13. Islam, E., Yang, X., Li, T., Liu, D., Jin, X., and Meng, F. 2007. Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of Elsholtzia argyi. J. Hazard. Mater. 147: 3. 806-816.
14. Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. 2001. Trace elements in soils and plants, Third. ed. CRC Press, Boca Raton. London, 331p.
15. Kabiri, P., Motaghian, H., and Hosseinpur, A. 2019. Effects of walnut leaves biochars on lead and zinc fractionation and phytotoxicity in a naturally calcareous highly contaminated soil. Water. Air. Soil Pollut. 230. 263.
16. Kim, H.S., Kim, K.R., Yoon, J. H., and Sik Ok, Y. 2015. Effect of biochar on heavy metal immobilization and uptake by lettuce (*Lactuca sativa* L.) in agricultural soil. Artic. Environ. Earth Sci. 74: 2. 1249-1259.
17. Kushwaha, A., Hans, N., Kumar, S., and Rani, R. 2018. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies. Ecotoxicol. Environ. Saf. 147: 1035-1045.
18. Majer, B.J., Tscherko, D., Paschke, A., Wennrich, R., Kundi, M., Kandeler, E., and Knasmüller, S. 2002. Effects of heavy metal contamination of soils on micronucleus induction in Tradescantia and on microbial enzyme activities: A comparative investigation. Mutat. Res. - Genet. Toxicol. Environ. Mutagen. 515: 1-2. 111-124.
19. Marchiol, L., Assolari, S., Sacco, P., and Zerbi, G. 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. Environ. Pollut. 132: 1. 21-27.
20. Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London, 672p.
21. Menon, M., Hermle, S., Günthardt-Goerg, M.S., and Schulin, R. 2007. Effects of heavy metal soil pollution and acid rain on growth and water use efficiency of a young model forest ecosystem. Plant Soil. 297: 171-183.
22. Mukhopadhyay, M., Subba, P.H., and Bantawa, P. 2013. Structural, physiological, and biochemical profiling of tea plantlets under zinc stress. Biol. Plant 57: 3. 474-480.
23. 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.
24. Peer, W.A., Baxter, I.R., Richards, E.L., Freeman, J.L., and Murphy, A.S. 2005. Phytoremediation and hyperaccumulator plants, Pp: 299-340. in: Tamas, M., and Martinoia, E. (eds.), Topics in current genetics. Berlin.
25. Rashed, M.N. 2010. Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. J. Hazard. Mater. 178: 1-3. 739-746.
26. Rhoades, J. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids, Pp: 417-435. in: Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. SSSA, Madison,
27. Tabachnick, B.G., and Fidel, L.S. 2012. Using multivariate statistics. Pearson, New Jersey, Pp: 54-55.
28. Tapiero, H., and Tew, K.D. 2003. Trace elements in human physiology and pathology: Zinc and metallothioneins. Biomed. Pharmacother 57: 9. 399-411.
29. 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. 37: 1. 258-267.
30. Yan-de, J.H., Zhen-li, H., and Xiao-e, Y. 2007. Role of soil rhizobacteria in phytoremediation. J. Zhejiang Univ. Sci. 8: 3. 192-207.
31. Yang, X., Lu, K., McGrouther, K., Che, L., Hu, G., Wang, Q., Liu, X., Shen, L., Huang, H., Ye, Z., and Wang, H. 2015. Bioavailability of Cd and Zn in soils treated with biochars derived from tobacco stalk and dead pigs. J. Soils Sediments 17: 3. 751-762.
32. Yathavakulasingam, T., Vithanage, M., and Mikunthan, T. 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 2: 5. 16-21.
33. Yuan, J.H., and Xu, R.K. 2011. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. Soil Use Manag. 27: 1. 110-115.
34. Zheng, R.L., Cai, C., Liang, J.H., Huang, Q., Chen, Z., Huang, Y.Z., Arp, H.P.H., and Sun, G.X. 2012. The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. Chemosphere 89: 7. 856-862.