



## تأثیر بیوجار بر پاسخ‌های مورفولوژیک رشد ذرت در یک خاک طبیعی آلوده

پروین کبیری<sup>۱</sup>، حمیدرضا متقیان<sup>۲\*</sup>، علیرضا حسین‌پور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد شیمی و حاصل‌خیزی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

<sup>۳</sup>استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، 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. بیوجار 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 برگ‌گرد و بیوجارهای تهیه‌شده از آن در دماهای ۴۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد (وزنی-وزنی) بر فراهمی زیستی روی و سرب و شاخص‌های مورفولوژیک ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) رشدکرده در یک خاک آلوده اطراف معادن روی و سرب باما بود. ابتدا خاک‌ها به مدت ۴۵ 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. شاخص‌های 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 بیوجارهای 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 بیوجار کاهش معنی‌داری (p<۰/۰۵) یافت. به گونه‌ای که کاربرد ۲ درصد بیوجار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، فراهمی زیستی روی و سرب را نسبت به شاهد به ترتیب ۴۹/۱ و ۳۴/۹ درصد کاهش داد. پاسخ‌های مورفولوژیک نشان داد که کاربرد بیوجار، نسبت رشد اندام هوایی به رشد ریشه را در مقایسه با شاهد افزایش داد. همچنین، بیوجار تأثیر معنی‌داری (p<۰/۰۵) بر رشد برگ، ساقه و ریشه ذرت داشت.

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

**واژه‌های کلیدی:** بیوجار برگ‌گرد، خاک‌های بسیار آلوده، روی، سرب، شاخص‌های مورفولوژیک ذرت علفه‌ای.

\* 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 (فتوستتوز، 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 هنگامی که غلظت آن در برگ به بیش از ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک برسد، علائم 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 رشد کرده در خاک آلوده بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (۱۴). مقدار روی در گیاه که برای انسان زیان‌آور می‌باشد، بیش از ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و میزان آن در گیاهان آلوده ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (۴). افیونی (۱۳۹۲) مقدار استاندارد محاسبه‌شده آلایندگی، محدوده بدون خطر، امکان وجود خطر و محدوده خطر فوری روی در خاک‌های کشاورزی ایران با  $pH > 7$  را به‌ترتیب ۵۰۰، ۳۶۰، ۳۶۰-۶۸۰۰ و  $> 6800$  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 میلی‌گرم 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 مضر 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  $pH > 7$  را به‌ترتیب ۷۵، ۳۷۵-۷۵ و  $> 375$  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

پایان فصل تابستان و از باغ‌های شهر سامان استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. بیوچارها در ۳ دمای گرماکافت شامل ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس با قراردادن برگ گردو درون لوله‌های استوانه‌ای با قطر ۲/۵۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر در کوره به مدت 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، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس مخلوط و پس از ۴۵ 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 سینگل کراس ۷۰۴) 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 به صورت جداگانه با آب مقطر شسته و درون پاکت کاغذی در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت در آون قرار داده شد. سپس، وزن خشک این بخش‌ها آسیاب و اندازه‌گیری شدند. طول و قطر ساقه اصلی به ترتیب توسط خط‌کش و کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد. سطح برگ با تهیه عکس از برگ‌های

خردل مورد توجه محققین قرار گرفته و دستاوردهای شگرفی را نیز به دنبال داشته است (۲۴). 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 طوری که برخی مطالعات، علاوه بر کاهش فراهمی زیستی، به کاهش مقدار فلزات سنگین در گیاه رشد کرده در خاک‌های تیمار شده با بیوچار اشاره دارند (۱۶). 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 "۴۰'۳۸" ۵۱° و "۳۵'۲۴" ۵۱° شرقی و عرض جغرافیایی "۳۰'۷۹" ۳۳° و "۳۳'۴۷" 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

کاملاً مخلوط و نمونه‌های 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) (۲۶) و فراهمی زیستی روی و سرب (جدول ۱) بعد از کشت بر اساس روش‌های عصاره‌گیری مورد استفاده در جدول ۱ تعیین شد.

سالم ذرت از یک فاصله یکسان و کاربرد نرم‌افزار ImageJ تعیین گردید. حجم ریشه با استفاده از استوانه مدرج ۱۰۰۰ میلی‌لیتری پر شده با مقدار معینی آب اندازه‌گیری گردید. بدین منظور، ریشه‌های جدا شده 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

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<br>Extractor                          | ترکیب عصاره‌گیر<br>Extractor composition   | نسبت خاک:عصاره‌گیر<br>Ratio of soil:<br>extractor | زمان تکان دادن (دقیقه)<br>Shaking time<br>(min) |
|---|--|---|---|
| دی‌اتیلن‌آمین پنتااستیک<br>اسید- تری‌تانول‌آمین | ۰/۰۰۵ مولار دی‌اتیلن‌آمین پنتا استیک اسید + ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم + ۰/۱ مولار تری‌تانول‌آمین (pH=۷/۳) |   |   |
| DTPA-TEA<br>آب مقطر                             | 0.005 M DTPA + 0.01 M CaCl <sub>2</sub> + 0.1 M TEA (pH=7.3)<br>آب مقطر                                | 1:2   | 120   |
| Distilled water                                 | Distilled water  | 1:10  | 120   |

شاخص‌های 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 ویژگی‌ها می‌باشد و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است (۲۷):

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

### 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 عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA اثر معنی داری ( $p < 0/01$ ) داشت. مقدار بیوچار مورد استفاده بر مقدار روی محلول و همچنین، روی و سرب عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA اثر معنی داری ( $p < 0/01$ ) داشت. اثر متقابل دما و مقدار بیوچار مورد

### تجزیه و تحلیل آماری

قبل از تجزیه واریانس داده‌ها 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، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) و اثر متقابل آن‌ها 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 تیمار شده، 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

استفاده بر مقدار روی محلول و سرب عصاره‌گیری (۲).  
شده با DTPA-TEA معنی دار ( $p < 0/01$ ) بود (جدول

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر دمای گرماکافت، سطح بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر روی و سرب محلول و عصاره‌گیری شده 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<br>S.O.V                    | درجه آزادی<br>df | روی<br>Zn        |                | سرب<br>Pb        |               |
|---|------------------|------------------|----------------|------------------|---------------|
|   |                  | محلول<br>Soluble | DTPA-TEA       | محلول<br>Soluble | DTPA-TEA      |
| دمای گرماکافت<br>Pyrolysis temperature  | 3                | 0.065(50.4)**    | 2755.5(74.7)** | 0.177(36.8)**    | 15079(76.2)** |
| سطح بیوچار<br>Biochar level             | 2                | 0.038(19.7)**    | 998.8(18.1)**  | 0.019(2.7)ns     | 5750 (19.4)** |
| دما × سطح<br>Temperature × level        | 6                | 0.013(19.2)**    | 50.7(2.75)ns   | 0.018(7.6)ns     | 238(2.4)**    |
| خطا<br>Error                            | 24               | 0.002(10.6)      | 20.7(4.49)     | 0.032(53.0)      | 49(1.98)      |
| ضریب تغییرات (درصد)<br>CV (%)           |                  | 6.9              | 2.9            | 139.7            | 2.9           |
| ضریب تبیین (درصد)<br>R <sup>2</sup> (%) |                  | 89.4             | 95.5           | 77.0             | 98.0          |

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و ns غیر معنی دار.  
اعداد نشان داده شده در پرانتز Eta<sup>2</sup> است (کل SS / عامل Eta<sup>2</sup>)

\*\* : significant at 1%. ns: non-significant.  
Data in parantheses are Eta<sup>2</sup> (Eta<sup>2</sup> = SS effect / SS total)

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، ۶، ۳۱) که این اجزاء در مطالعه قبلی بررسی شد (۱۵).

جدول ۳ نشان داد که تیمار خاک با بیوچار تولیدشده در دماها و مقادیر مختلف، روی و سرب محلول را به طور معنی داری نسبت به شاهد کاهش داد ( $p < 0/05$ ). کاربرد بیوچار (در همه مقادیر و دماهای مختلف) مقدار فراهمی زیستی روی و سرب را در مقایسه با خاک شاهد کاهش معنی داری ( $p < 0/05$ ) داد. با تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس، فراهمی زیستی روی به ترتیب ۲۶/۱، ۲۶/۹ و ۳۴/۹ درصد و فراهمی زیستی سرب به ترتیب ۳۵/۳، ۴۰/۱ و ۴۹/۱ درصد نسبت به خاک شاهد کاهش یافت.  
بر اساس نتایج مطالعه حاضر، با افزایش مقدار و دمای تهیه بیوچار، مقدار محلول و فراهمی زیستی

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر دمای گرماکافت، سطوح بیوچار و اثر متقابل آنها بر روی و سرب محلول و عصاره‌گیری شده 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 ( $\text{mg kg}^{-1}$ ).

| اصلاح‌کننده<br>amendment        | دمای گرماکافت<br>(درجه سلسیوس)<br>Pyrolysis temperature(°C) | سطح بیوچار (درصد)<br>Biochar level (%) |               |              | میانگین<br>mean |
|---------------------------------|---|--|---------------|--------------|-----------------|
|                                 |   | 0.5                                    | 1             | 2            |                 |
| روی محلول<br>Soluble Zn         |   |  |               |              |                 |
| شاهد<br>Control                 |   | 0.90±0.003A                            | 0.90±0.003A   | 0.90±0.003A  |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves       |   | 0.61±0.04abB                           | 0.63±0.02abB  | 0.65±0.01aB  | 0.63            |
| بیوچار<br>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<br>mean                 |   | 0.58                                   | 0.54          | 0.47         |                 |
| فراهمی زیستی روی<br>Zn-DTPA-TEA |   |  |               |              |                 |
| شاهد<br>Control                 |   | 190.4±0.9A                             | 190.4±0.9A    | 190.4±0.9A   |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves       |   | 187.0±2.0A                             | 174.7±3.5B    | 170.0±0.7B   | 177.2a          |
| بیوچار<br>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<br>mean                 |   | 163.3a                                 | 154.6b        | 145.1c       |                 |
| سرب محلول<br>Soluble Pb         |   |  |               |              |                 |
| شاهد<br>Control                 |   | 0.113±0.07B                            | 0.113±0.07B   | 0.113±0.07B  |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves       |   | 0.173±0.09B                            | 0.363±0.29B   | 0.477±0.1A   | 0.338a          |
| بیوچار<br>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<br>mean                 |   | 0.090                                  | 0.128         | 0.170        |                 |
| فراهمی زیستی سرب<br>Pb-DTPA-TEA |   |  |               |              |                 |
| شاهد<br>Control                 |   | 333.6±10.5A                            | 333.6±10.5A   | 333.6±10.5A  |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves       |   | 301.0±3.7aB                            | 279.2±1.0bB   | 272.3±4.1bB  | 284.1           |
| بیوچار<br>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<br>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.

افزایش pH خاک به طور معنی داری مقدار کادمیم و روی قابل استخراج توسط نیترات آمونیوم در خاک را کاهش دادند (۳۴).

**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 ۴).

اکثر تحقیقات افزایش pH خاک (تحت تأثیر خاصیت قلیایی بیوچار) و آزاد شدن عناصر فسفر، پتاسیم و کلسیم از بیوچار به خاک را از مهم ترین 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

جدول ۴- 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<br>S.O.V                    | درجه آزادی<br>df | pH            | EC              |
|---|------------------|---------------|-----------------|
| دمای گرماکافت<br>Pyrolysis temperature  | 3                | 0.186(44.5)** | 0.008 (21.0) ns |
| سطح بیوچار<br>Biochar level             | 2                | 0.091(14.6)** | 0.002 (3.8) ns  |
| دما × سطح<br>Temperature × level        | 6                | 0.029(13.8)ns | 0.002 (11.8) ns |
| خطا<br>Error                            | 24               | 0.014(27.1)   | 0.003(36.6)     |
| ضریب تغییرات (درصد)<br>CV (%)           |                  | 1.5           | 6.8             |
| ضریب تبیین (درصد)<br>R <sup>2</sup> (%) |                  | 72.9          | 76.4            |

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و ns غیر معنی دار.

اعداد نشان داده شده در پرانتز Eta<sup>2</sup> است (کل SS/عامل SS) (Eta<sup>2</sup>=ss)

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

Data in paranteses are Eta<sup>2</sup> (Eta<sup>2</sup>= ss effect/ ss total)

افزایش دادند، اما تأثیر معنی داری بر EC خاک نداشتند (۳۱).

**شاخص‌های مورفولوژیک ذرت:** نتایج تجزیه واریانس دو طرفه داده‌ها (جدول ۶) 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 معنی دار (p<۰/۰۱) بود. مقدار بیوچار مورد استفاده بر تعداد برگ‌های سالم

نتایج مقایسه میانگین مقادیر pH و EC خاک پس از کشت، تحت تأثیر اثر متقابل دمای تهیه بیوچار و مقدار بیوچار در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با افزایش دما و مقدار بیوچار استفاده شده 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 تهیه شده از ساقه تنباکو و خوک مرده، pH خاک را

( $p < 0/05$ )، تعداد برگ‌های پژمرده گیاه، سطح برگ و وزن خشک ریشه اثر معنی‌داری ( $p < 0/01$ ) داشت. اثر متقابل دما و مقدار بیوچار بر تعداد برگ‌های پژمرده گیاه، سطح برگ و وزن خشک ریشه معنی‌دار بود. ( $p < 0/01$ )

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر دمای گرماکافت و سطح بیوچار بر pH و EC.

| اصلاح‌کننده<br>amendment   | دمای گرماکافت (درجه سلسیوس)<br>Pyrolysis temperature (°C) | سطح بیوچار (درصد)<br>Biochar level (%) |            |            | میانگین<br>mean |
|--|---|--|------------|------------|-----------------|
|  |   | 0.5                                    | 1          | 2          |                 |
| pH   |   |  |            |            |                 |
| شاهد<br>Control  |   | 7.24±0.12B                             | 7.24±0.12B | 7.24±0.12B |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves  |   | 7.60±0.04A                             | 7.65±0.05A | 7.80±0.01A | 7.68b           |
| بیوچار<br>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<br>mean  |   | 7.70b                                  | 7.74b      | 7.86a      |                 |
| هدایت الکتریکی<br>(دسی‌زیمنس بر متر)<br>EC (dS m <sup>-1</sup> ) |   |  |            |            |                 |
| شاهد<br>Control  |   | 0.81±0.02                              | 0.81±0.02  | 0.81±0.02  |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves  |   | 0.84±0.02                              | 0.83±0.02  | 0.84±0.05  | 0.84            |
| بیوچار<br>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<br>mean  |   | 0.83                                   | 0.82       | 0.80       |                 |

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  $p < 0.05$ .

هوایی را در مقایسه با خاک شاهد افزایش داد. تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس، وزن خشک اندام هوایی را به ترتیب ۱۲۲/۹، ۱۲۵/۷ و ۱۳۱/۴ درصد نسبت به خاک شاهد افزایش داد.

خصوصیات مورفولوژیکی اندام هوایی: تفاوت بین وزن خشک اندام هوایی اندازه‌گیری شده در تیمارهای بیوچارهای تهیه شده در دماهای مختلف معنی‌دار ( $p < 0/05$ ) بود (جدول ۷). کاربرد بیوچار (در همه مقادیر و دماهای مختلف)، مقدار وزن خشک اندام



جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر دمای گرماکافت، مقدار بیوجار 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<br>S.O.V                       | df | وزن خشک اندام هوایی<br>Shoots dry weight | ارتفاع ساقه<br>Stem height | قطر ساقه<br>Stem diameter | سطح برگ<br>Leaf surface | تعداد برگ‌های سالم<br>Number of healthy leaves | وزن مرطوب برگ‌های سالم<br>Wet weight of healthy leaves | تعداد برگ‌های پژمرده گیاه<br>Number of withered leaves | وزن خشک ریشه<br>Root dry weight | حجم ریشه<br>Root volume |
|--|----|--|----------------------------|---------------------------|-------------------------|--|--|--|---------------------------------|-------------------------|
| دمای گرماکافت<br>Pyrolysis temperature     | 3  | 21<br>(89.6)**                           | 51.7<br>(71.0)**           | 0.029<br>(84.1)**         | 35020<br>(74.3)**       | 44.7<br>(63.3)**                               | 1490<br>(86.4)**                                       | 32.4<br>(79.5)**                                       | 6.7 (91.8)**                    | 2023<br>(74.4)**        |
| سطح بیوجار<br>Biochar level                | 2  | 0.32<br>(0.9)ns                          | 1.3<br>(1.2)ns             | 0.0003<br>(0.6)ns         | 9808<br>(13.9)**        | 10.2<br>(9.6)*                                 | 24(0.9)ns  | 7.7<br>(12.6)**  | 0.31 (2.9)**                    | 37.8<br>(0.9)ns         |
| دما × سطح<br>Temperature × level           | 6  | 0.20<br>(1.7)ns                          | 2.9<br>(8.0)ns             | 0.0008<br>(4.7)ns         | 1465<br>(6.2)**         | 0.97<br>(2.8)ns                                | 15(1.8)ns  | 1.2 (5.8)**  | 0.11 (3.0)**                    | 56<br>(4.1)ns           |
| خطا<br>Error                               | 24 | 0.23<br>(7.8)                            | 1.8<br>(19.8)              | 0.0005<br>(10.6)          | 327<br>(5.6)            | 2.1<br>(24.3)                                  | 23(10.8)   | 0.11(2.2)  | 0.021(2.3)                      | 70<br>(20.5)            |
| ضریب تغییرات<br>(درصد)<br>CV (%)           |    | 7.8                                      | 8.1                        | 5.4                       | 7.8                     | 10.1   | 12.9   | 11.5   | 3.8                             | 20.4                    |
| ضریب تبیین<br>(درصد)<br>R <sup>2</sup> (%) |    | 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<sup>2</sup> است (کل / ss عامل = Eta<sup>2</sup>)

\*\* : significant at 1%. \* : significant at 5%. ns: non-significant.  
Data in parentheses are Eta<sup>2</sup> (Eta<sup>2</sup> = ss effect / ss total).

ساقه را نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری (p < ۰/۰۵) داد.

تیمار خاک با بیوجارها (در همه مقادیر و دماهای مختلف) سطح برگ را در مقایسه با خاک شاهد افزایش معنی‌داری (p < ۰/۰۵) داد. با کاربرد ۲ درصد بیوجار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک، سطح برگ به‌ترتیب ۴۲/۷، ۷۱/۵ و ۹۱/۷ درصد، تعداد برگ‌های سالم گیاه به‌ترتیب ۱۵/۶، ۳۰/۹ و ۳۹/۱ درصد و وزن مرطوب برگ‌های سالم گیاه به‌ترتیب ۳۶/۱، ۸۲/۴ و ۱۰۲/۲ درصد نسبت به بیوجارهای تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و بقایا افزایش یافت. (جدول ۸).

تفاوت بین ارتفاع ساقه در تیمارهای بیوجارهای تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار (p < ۰/۰۵) بود (جدول ۷). کاربرد بیوجار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ارتفاع ساقه را به‌ترتیب ۷/۷، ۲۱/۰ و ۳۹/۰ درصد نسبت به بیوجارهای تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و بقایا افزایش داد. با کاربرد بیوجار تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، قطر ساقه به‌ترتیب ۱۴/۳، ۲۹/۷ و ۳۷/۱ درصد نسبت به بیوجارهای تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و بقایا افزایش یافت (جدول ۷). نتایج نشان داد که کاربرد بیوجار (در هر دمایی و با هر مقداری) در خاک، ارتفاع و قطر

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 داد (جدول ۸). استفاده از بیوچار در هر (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 گرم‌کافت 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 گرم‌کافت (درجه سلسیوس) Pyrolysis temperature (°C) | سطح بیوچار (درصد) Biochar level (%) |               |               | میانگین mean |
|---|--|-------------------------------------|---------------|---------------|--------------|
|   |  | 0.5                                 | 1             | 2             |              |
| وزن خشک اندام هوایی (گرم بر گلدان)<br>Shoot dry weight (g pot <sup>-1</sup> ) |  |                                     |               |               |              |
| 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)<br>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)<br>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 بیوجار بر خصوصیات مورفولوژیکی برگ.

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

| اصلاح کننده<br>amendment   | دمای گرماکافت<br>(درجه سلسیوس)<br>Pyrolysis<br>temperature(°C) | سطح بیوجار (درصد)<br>Biochar level (%) |               |               | میانگین<br>mean |
|--|--|--|---------------|---------------|-----------------|
|  |  | 0.5                                    | 1             | 2             |                 |
| سطح برگ (سانتی متر مربع)<br>Leaf surface (cm <sup>2</sup> )  |  |  |               |               |                 |
| شاهد Control   |  | 110.1±10.9B                            | 110.1±10.9B   | 110.1±10.9B   |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves  |  | 159.3±12.0hA                           | 171.8±4.9ghA  | 203.9±0.6efA  | 178.3           |
| بیوجار 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 برگ های سالم گیاه<br>Number of healthy<br>leaves   |  |  |               |               |                 |
| شاهد Control   |  | 9.3±0.33B                              | 9.3±0.33B     | 9.3±0.33B     |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves  |  | 11.3±0.67B                             | 13.0±0.58A    | 14.0±1A       | 12.8c           |
| بیوجار 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 برگ های سالم<br>(گرم بر گلدان)<br>Wet weight of healthy<br>leaves (g pot <sup>-1</sup> ) |  |  |               |               |                 |
| شاهد Control   |  | 17.0±1.9B                              | 17.0±1.9B     | 17.0±1.9B     |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves  |  | 26.6±0.4A                              | 29.8±2.0A     | 27.0±1.6A     | 27.8c           |
| بیوجار 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 برگ های پژمرده<br>Number of withered<br>leaves   |  |  |               |               |                 |
| شاهد Control   |  | 6.0±0.0A                               | 6.0±0.0A      | 6.0±0.0A      |                 |
| برگ گردو<br>Walnut leaves  |  | 5.0±0.0bB                              | 4.3±0.33cB    | 3.7±0.33dB    | 4.3             |
| بیوجار 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 نشان دهنده تفاوت معنی دار میانگین تیمارها با روش Fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار 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 به ترتیب از ۱۱/۹ به ۱۹/۹ سانتی‌متر، ۹/۳ به ۱۸/۳ عدد و ۱۱۰/۱ به ۳۹۰/۸ سانتی‌مترمربع افزایش داشت. در مطالعه اوگوندیران و همکاران (۲۰۱۵) با کاربرد ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ وزنی (گرم بر گرم) بیوچار بقایای برنج و کمپوست در خاک آلوده به سرب (۱۸۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ارتفاع ذرت، تعداد برگ‌ها و سطح برگ به ترتیب از ۴۰ به ۹۰ سانتی‌متر، ۲ به ۸ عدد و ۷۰ به ۲۸۰ سانتی‌متر مربع افزایش داشت (۲۳).

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 ( $p < 0.05$ ). به گونه‌ای که وزن خشک ریشه، با کاربرد ۲ درصد بیوچار تهیه‌شده در دمایی ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک به ترتیب ۱۰/۶، ۵۲/۹ و ۶۲/۵ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بیوچارهای تهیه شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و بقایا افزایش یافت.

جدول ۹- 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<br>amendment  | دمای گرماکافت (درجه سلسیوس)<br>Pyrolysis temperature<br>(°C) | سطح بیوچار (درصد)<br>Biochar level (%) |             | میانگین<br>mean |
|---|--|--|-------------|-----------------|
|   |  | 0.5                                    | 1           |                 |
| وزن خشک ریشه (گرم بر گلدان)<br>Root dry weight (g pot <sup>-1</sup> ) |  |  |             |                 |
| شاهد<br>Control   |  | 2.4±0.07B                              | 2.4±0.07B   | 2.4±0.07B       |
| برگ گردو<br>Walnut<br>leaves  |  | 3.1±0.13eA                             | 3.2±0.08deA | 3.2±0.01deA     |
| بیوچار<br>Biochar   | 200  | 3.4±0.04dA                             | 3.3±0.07deA | 3.4±0.12deA     |
|   | 400  | 3.9±0.07cA                             | 4.6±0.04bA  | 4.7±0.02bA      |
|   | 600  | 4.7±0.14bA                             | 5.1±0.07aA  | 5.2±0.09aA      |
| میانگین<br>mean   |  | 3.8                                    | 4.0         | 4.1             |
| حجم ریشه (سانتی‌متر مکعب)<br>Root volume (cm <sup>3</sup> )           |  |  |             |                 |
| شاهد<br>Control   |  | 17.5±1.44 B                            | 17.5±1.44 B | 17.5±1.44 B     |
| برگ گردو<br>Walnut<br>leaves  |  | 30.0±1.15 A                            | 31.3±1.33 A | 29.7±2.33 A     |
| بیوچار<br>Biochar   | 200  | 31.0±0.58 A                            | 30.0±0.54 A | 29.3±0.67 A     |
|   | 400  | 43.5±0.87 A                            | 56.0±0.58 A | 58.0±2.89 A     |
|   | 600  | 59.7±10.17 A                           | 56.5±7.79 A | 61.0±9.81 A     |
| میانگین<br>mean   |  | 41.0                                   | 43.5        | 44.5            |

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

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

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

\*\* معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

\*\* Significant at  $p < 0.01$ .

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 (۰/۰۵ < p) داشت. مطابق با این نتایج، در مطالعه یاداواکولاسینگام و همکاران (۲۰۱۶) ذرت در خاک شاهد نسبت به خاک‌های تیمار شده با ۱، ۲/۵ و ۵ درصد اصلاح‌کننده، رشد کمتری داشت و دو هفته پس از کشت، علائم مسمومیت در اندام هوایی گیاه قابل مشاهده بود و ذرت در خاک تیمار شده با ۱ و ۲/۵ درصد اصلاح‌کننده، به ترتیب 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 تیمار شده با این اصلاح‌کننده، وزن اندام هوایی و ریشه ذرت ۳/۸ برابر ذرت در خاک شاهد بود. آن‌ها علت افزایش رشد ذرت را آزاد شدن بیشتر عناصر غذایی در اثر تجزیه ترکیبات اصلاح‌کننده در خاک آلوده نسبت دادند. در

تیمار خاک با بیوچار تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، حجم ریشه را به ترتیب 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 تهیه شده در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، حجم ریشه را نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری (۰/۰۵ < p) داد (جدول ۹). مشابه با تحقیق حاضر، بیوچار چوب درخت کاج و بیوچار درخت زیتون تهیه شده 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 تیمار شده با بیوچارها رشد کمتری داشت و دو هفته پس از کاشت، علائم مسمومیت اندام هوایی (پژمردگی و زردی برگ‌های پایینی گیاه، توقف رشد اندام هوایی و کوتاه شدن) در آن مشاهده

جدول ۱۰ نشان داد که علت افزایش پاسخ‌های رشد گیاه می‌تواند کاهش روی و سرب قابل جذب گیاه باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

دمای تولید بیوپچار 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 بیوپچار می‌تواند راهکاری مفید جهت تثبیت گیاهی روی و سرب در خاک‌های به‌شدت آلوده باشد.

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

**همبستگی بین روی و سرب عصاره‌گیری‌شده 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 ( $p < 0.01$ ) 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 معنی‌داری ( $p < 0.01$ ) وجود داشت. نتایج

toxic elements (PTEs). Environ. Pollut. 193: 79-87.

- 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)
- 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.
- 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.
- Alloway, B.J. 1990. Heavy Metals in Soils. John Wiley and Sons, 339p.
- Brennan, A., Moreno Jiménez, E., Albuquerque, 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
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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-Watt Univ. 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 Fidell, 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.