نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۴، مهر – آبان ۱۳۹۷، ص. ۷۹۳-۷۷۹

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 4, Sept.-Oct. 2018, p. 779-793

اثر زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف بر قابلیت استفاده روی و پاسخ‌های ذرت در یک خاک آلوده به روی

پروین کبیری[۱] – حمیدرضا متقیان[۲*] – علیرضا حسین پور[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۷

چکیده

فعالیت‌های انسانی، نقش مهمی بر توزیع ژئوشیمیایی فلزات سنگین داشته‌است و باعث ورود بیش از حد مجاز آنها به محیط زیست شده‌است. وجود فلزات سنگین در محیط زیست، اثرات سوئی بر خاک، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی دارد و حیات موجودات زنده را با خطرات جدی مواجه می‌کند. اخیراً زغال زیستی به صورت گسترده‌ای جهت کاهش سمیت فلزات سنگین در خاک استفاده می‌شود. هدف این مطالعه بررسی تأثیر دمای گرماکافت زغال زیستی برگ گردو بر قابلیت استفاده و پاسخ‌های رشد ذرت در یک خاک شن‌لومی آهکی آلوده به فلزات سنگین بوده است. بدین منظور، در آزمایشی گلدانی مقادیر ۰، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد (وزنی) زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس با ۳ کیلوگرم خاک در ۳ تکرار مخلوط و به‌مدت ۴۵ روز در شرایط گلخانه خوابانده شد. پس از خواباندن، در هر گلدان ذرت علوفه‌ای (رقم سینگل‌کراس ۷۰۴) کشت و پس از دو ماه، پاسخ‌های رشد ذرت (وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، غلظت روی در اندام هوایی، غلظت روی در ریشه، ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال) و غلظت روی قابل استفاده (محلول و DTPA-TEA) خاک تعیین شد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای گرماکافت زغال زیستی، رشد ذرت و ضریب انتقال روی افزایش می‌یابد. همچنین تیمار خاک‌ها با ۲ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، غلظت روی در اندام هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۲۱/۶ و ۳۳/۰ درصد کاهش و وزن خشک اندام هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۱۳۱/۴ و ۱۱۶/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. ضریب انتقال روی در سطوح مختلف زغال زیستی تفاوت معنی‌داری نداشت ($P>0/05$). نتایج نشان داد که با افزایش مقدار و دمای تهیه زغال‌های زیستی، غلظت روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA کاهش معنی‌داری یافت ($P<0/05$). کاربرد ۲ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، مقدار روی محلول و روی قابل استفاده را نسبت به شاهد به‌ترتیب ۶۳/۱ و ۳۴/۹ درصد کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: برگ گردو، تثبیت گیاهی، گرماکافت

مقدمه

امروزه آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین چالش‌های اساسی دنیا به شمار می‌رود، زیرا فلزات سنگین فراوانی بالا، تجمع زیستی سریع و نیمه‌عمر بیولوژیکی طولانی دارند که می‌توانند باعث تهدید جنبه‌های کمی و کیفی امنیت غذایی شده و سلامتی موجودات زنده را به خطر بیندازند (۴۴). بیشتر فلزات سنگین بر خلاف آلاینده‌های آلی تجزیه شیمیایی و بیولوژیکی نمی‌شوند. بنابراین مدت‌زمان طولانی در خاک باقی می‌مانند و خطر قابل توجهی برای سلامتی انسان و محیط زیست ایجاد می‌کنند (۸).

روی (Zn)، یکی از عناصر کم‌نیاز برای رشد گیاهان و جانوران است و به عنوان کوفاکتور تنظیم‌کننده، نقش مهمی در فعالیت آنزیم‌های سلول ایفا می‌کند (۱۵). وقتی مقدار این عنصر بیش از حد طبیعی باشد، جزء فلزات سمی و خطرناک به حساب می‌آید و می‌تواند بقای بسیاری از موجودات زنده از جمله گیاهان را تهدید کند (۲۸). سازمان بهداشت جهانی بر اساس غلظت کل فلز در خاک، محدوده هشدار برای روی را ۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کرده است (۳۸).

در خاک‌های دارای آلودگی بالا می‌توان با کاربرد ترکیباتی، قابلیت استفاده عنصر دارای پتانسیل سمیت را کاهش داد تا گیاه رشد بیشتری داشته باشد. اخیراً، زغال زیستی به صورت گسترده‌ای جهت کاهش سمیت فلزات سنگین استفاده می‌شود (۱۰، ۱۹ و ۴۴).

زغال زیستی محصول فرآیند تجزیه‌گرمایی مواد آلی است که تحت شرایطی با اکسیژن محدود تهیه می‌شود. این ماده غنی از کربن، دارای تخلخل، سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و

۱، ۲ و ۳ – به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و استاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد
(*– نویسنده مسئول: (Email: motaghian.h@yahoo.com
DOI: 10.22067/jsw.v32i4.72071

همچنین گروه‌های عامل سطحی می‌باشد و به دلیل بهبود حاصلخیزی خاک، غیرمتحرک کردن آلودگی‌ها و ترسیب کربن مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (۲۱). از طرفی جهان امروز، با اثرات فاجعه‌بار تغییرات آب و هوایی روبه‌رو است و افزودن زغال زیستی به خاک به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار برای مقابله با این تغییرات و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد توجه زیادی قرار گرفته است. استفاده از زغال زیستی می‌تواند کربن را برای صدها و یا هزاران سال حفظ کرده و به کاهش غلظت گازکربنیک موجود در جو کمک کند (۲۶). مطالعات و بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که زغال زیستی قادر است به عنوان جاذب، آلودگی فلزات سنگین را در خاک کاهش دهد (۲۲، ۳۱ و ۴۱).

با توجه به توسعه صنایع و معادن در ایران و آلودگی خاک‌های این مناطق به فلزات دارای پتانسیل سمیت، نیاز به برطرف‌کردن این آلاینده‌ها وجود دارد. در مکان‌های استخراج معدن معمولاً مقدار این فلزات بسیار زیاد است و می‌تواند بر رشد گیاه در فرآیند گیاه‌پالایی مؤثر باشد. بنابراین ممکن است بتوان با استفاده از زغال زیستی، سمیت فلزات در خاک آلوده را کاهش و رشد گیاه را افزایش داد. در این تحقیق به بررسی اثر زغال زیستی برگ‌گردو (به علت وجود سطح زیر کشت زیاد باغ‌های گردو در استان چهارمحال و بختیاری) تولیدشده در دماهای مختلف بر پاسخ‌های رشد گیاه ذرت، قابلیت استفاده روی و ارتباط بین روی قابل استفاده با پاسخ‌های رشد ذرت و ویژگی‌های زغال‌های زیستی تولیدشده پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

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. در این منطقه سطحی با ابعاد ۲ در ۲ متر در نزدیکی معدن انتخاب شد. از این سطح ۵ نمونه به صورت تصادفی از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر برداشت شد. این نمونه‌ها با هم مخلوط و به عنوان نمونه نهایی خاک در نظر گرفته شد. نمونه خاک هوا خشک و با چکش چوبی کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های خاک از قبیل بافت به‌روش هیدرومتر (۱۴)، pH (سوسپانسیون ۱:۲ خاک به آب مقطر) (۳۹)، قابلیت هدایت الکتریکی (عصاره ۱:۲ خاک به آب مقطر) (۳۴)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون اسید باقیمانده (۲۰) اندازه-گیری شد، همچنین گنجایش تبادل کاتیونی با استفاده از استات - سدیم با pH=۷ (۳۷) و ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (۳۰) تعیین شد. مقدار روی کل با استفاده از اسید نیتریک ۴ مولار (۳۶) و مقدار روی قابل استفاده با روش DTPA-TEA (۲۳) عصاره‌گیری شد. ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، آلودگی خاک مورد مطالعه، به روی بسیار زیاد بود. مقدار کل روی در خاک ۳۵۷۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. در مطالعه رویز و همکاران (۳۵) نیز مقادیر زیاد روی در خاک آلوده اطراف معدنی در اسپانیا گزارش شده است.

کشت ذرت در گلخانه

سه کیلوگرم خاک آلوده (عبورکرده از الک ۲ میلی‌متری) با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی- وزنی زغال زیستی تولیدشده در دماهای مختلف (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) در آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه در گلدان (در سه تکرار) مخلوط شد. به این صورت که ابتدا مقدار کمی از خاک هر گلدان با بیوچار مخلوط شد. سپس به این خاک تیمارشده مقدار باقی‌مانده خاک گلدان به تدریج اضافه و مخلوط شد. به گونه‌ای که خاک و بیوچار به طور کامل مخلوط شد. همچنین، تیمار بدون زغال زیستی (شاهد) در سه تکرار در کنار تیمارهای آزمایش فاکتوریل قرار داده شد. قبل از کشت، خاک‌ها به‌مدت ۴۵ روز در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه (با اضافه کردن آب به گلدان‌ها و وزن کردن برخی از آن‌ها به صورت هفتگی) در گلخانه خوابانده شدند. رطوبت ظرفیت زراعی خاک مورد مطالعه ۲۰ درصد (حجمی) و درصد رطوبت اشباع آن ۴۰ درصد (حجمی) بود. 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 علوفه‌ای (رقم سینگل‌کراس ۷۰۴) کشت و پس از جوانه‌زدن به ۳ عدد تنک شد. در طول دوره رشد، مراقبت‌های لازم از قبیل آبیاری در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه (با قرار دادن گلدان‌هایی اضافه بر گلدان‌های آزمایشی و وزن نمودن آن‌ها هر دو روز، مقدار کاهش وزن گلدان‌ها اندازه‌گیری و به گلدان‌ها آب اضافه می‌شد) 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 ۶۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت در آون قرار داده شد. سپس، وزن خشک این بخش‌ها تعیین و غلظت روی با خاکسترسازی خشک و عصاره‌گیری با اسید کلریدریک ۲ نرمال تعیین شد (۱۶). غلظت روی در گیاه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی

(AAS) اندازه‌گیری شد. مقدار ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال روی به‌ترتیب از روابط زیر محاسبه شد (۴۲).

غلظت روی کل در خاک/ غلظت روی در ریشه = ضریب تجمع زیستی

غلظت روی در ریشه/ غلظت روی در اندام هوایی = ضریب انتقال

تهیه زغال زیستی

برای تهیه زغال زیستی از برگ ریخته‌شده پای درخت گردو در پایان فصل تابستان و از باغ‌های شهر سامان استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. زغال زیستی در ۳ سطح دمای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس با قرار دادن درکوره به‌مدت ۲ ساعت و با آهنگ حرارتی ۱ درجه سلسیوس بر دقیقه و در شرایط کمبود اکسیژن تهیه شد. سپس، ویژگی‌های زغال زیستی از قبیل قابلیت هدایت الکتریکی (عصاره ۱:۱۰ بیوچار به آب مقطر)، pH (۱:۱۰سوسپانسیون بیوچار به آب مقطر)، روی کل و ظرفیت تبادل کاتیونی، با استفاده از روش‌های بیان شده در بخش قبل، سطح ویژه با روش BET (۷) و کربن آلی با دستگاه آنالیزگر CHNSO (elemental analysis instrument Costech 4010, Italy) (۴۰) تعیین شد (جدول ۱).

اندازه‌گیری روی قابل استفاده در خاک

پس از کشت و برداشت ریشه‌ها، خاک هر گلدان کاملاً مخلوط و نمونه‌ای از آن برداشته شد. در این نمونه‌ها روی محلول (با استفاده از آب‌مقطر و نسبت ۱:۱۰ خاک: آب، همراه با ۱۲۰ دقیقه تکان دادن) و روی عصاره‌گیری شده باDTPA-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 (۱۶).

تجزیه و تحلیل 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 زغال زیستی (۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی–وزنی)، دمای تهیه زغال زیستی (۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) و اثر متقابل آنها بر پاسخ‌های ذرت و روی قابل استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. منظور از زغال زیستی تهیه شده در دمای ۰ درجه سلسیوس، برگ گردو است.

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

Table 1- Some chemical and physical properties of soil and biochars

Properties ویژگی	Soil خاک	Walnut leaf برگ‌گردو	Biochar- 200 زغال زیستی – ۲۰۰	Biochar- 400 زغال زیستی – ٤۰۰	Biochar- 600 زغال زیستی – ٦۰۰
pH	7.5	4.8	5.2	9.3	10.4
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC (dS m^{-1})	0.82	3.11	4.42	5.63	8.06
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) CEC ($cmol_c$ 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 OC (%)	0.13	43.05	49.15	47.98	54.63
شن Sand (%)	78	-	-	-	-
سیلت Silt (%)	15	-	-	-	-
رس Clay (%)	7	-	-	-	-
بافت Texture	شن‌لومی Loamy sand	-	-	-	-
کربنات‌کلسیم $CaCO_3$ (%)	28.4	-	-	-	-
روی قابل استفاده (میلی‌گرم بر کیلوگرم) DTPA-TEA - Zn (mg kg^{-1})	190.4	-	-	-	-
روی کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Total Zn (mg kg^{-1})	35758	14.4	27.6	44.9	46.8

* خاک (Soil) : pH-H_2O (1:2) و EC (1:2). ** اصلاح‌کننده (Amendment) : pH-H_2O (1:10) و EC (1:10)

همچنین، برای مقایسه بین پاسخ‌های ذرت و روی قابل استفاده در خاک بدون زغال زیستی (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 پاسخ‌های ذرت با روی قابل استفاده تعیین شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم-افزار Statistica, 8 انجام شد.

نتایج و بحث

پاسخ‌های ذرت در کشت گلخانه‌ای

نتایج تجزیه واریانس دو طرفه داده‌ها (داده‌ها نشان داده نشده است) نشان داد که اثر دمای تهیه زغال زیستی بر پاسخ‌های رشد ذرت معنی‌دار (P<۰/۰۱) بود. تأثیر مقدار زغال زیستی استفاده شده بر غلظت روی در ریشه، ضریب تجمع زیستی (P<۰/۰۵)، وزن خشک ریشه و غلظت روی در اندام هوایی معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). همچنین اثر متقابل دما و مقدار زغال زیستی بر وزن خشک ریشه (P<۰/۰۱) و غلظت روی در اندام هوایی معنی‌دار (P<۰/۰۵) بود.

وزن خشک اندام هوایی و ریشه

نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۲ نشان داده شده است. تفاوت بین وزن خشک اندام هوایی اندازه‌گیری شده در زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار است (P<۰/۰۵). تیمار خاک با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، وزن خشک اندام هوایی را به‌ترتیب ۶/۸، ۴۱/۱ و ۶۸/۱ درصد نسبت به خاک‌های تیمارشده با زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش داد. با کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، وزن خشک اندام هوایی به‌ترتیب ۳۲/۱ و ۵۷/۴ درصد نسبت به خاک‌های تیمارشده با زغال زیستی ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش یافت. همچنین وزن خشک اندام هوایی با کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ۱۹/۱ درصد نسبت به خاک تیمارشده با برگ گردو افزایش یافت.

بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)، تفاوت بین وزن خشک ریشه در زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). تیمار خاک با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، وزن خشک ریشه را به‌ترتیب ۱۳/۶، ۴۷/۱ و ۵۶/۳ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش داد. کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، وزن خشک ریشه را به‌ترتیب ۲۹/۴ و ۳۷/۵ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش داد. وزن خشک ریشه با کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ۶/۳ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بقایا افزایش یافت.

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

در پژوهش یاداواکولاسینگام و همکاران (۴۲) وزن ذرت در خاک تیمارشده با ۵ درصد اصلاح‌کننده ۳/۸ برابر ذرت رشدکرده در خاک شاهد بود. آن‌ها علت افزایش رشد ذرت را به آزادشدن بیشتر عناصر غذایی در اثر تجزیه ترکیبات اصلاح‌کننده در خاک آلوده نسبت دادند.

غلظت روی در اندام هوایی و ریشه

نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) تفاوت بین غلظت روی اندام هوایی در زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود (P<۰/۰۵)؛ به گونه‌ای که کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک آلوده، غلظت روی اندام هوایی را ۱۰/۴، ۱۶/۶ و ۲۰/۰ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش داد. تیمار خاک با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، غلظت روی اندام هوایی را ۶/۸ و ۱۰/۷ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش داد. همچنین غلظت روی اندام هوایی با کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک ۴/۱ درصد نسبت به برگ گردو کاهش یافت.

بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار، غلظت روی اندام هوایی در خاک‌های تیمارشده با سطوح مختلف زغال زیستی (به‌جز سطوح ۱ و ۲ درصد زغال زیستی) تفاوت معنی‌داری (P<۰/۰۵) داشت (جدول ۳). با کاربرد ۲ درصد زغال زیستی در خاک، مقدار روی اندام هوایی ۵/۱ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش یافت. تیمار خاک با ۱ درصد زغال زیستی ، مقدار روی اندام هوایی را ۳/۱ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش داد.

نتایج نشان داد که تیمار خاک‌ها با زغال زیستی در هر دما و با هر مقداری (به‌جز کاربرد مقادیر مختلف بقایا و ۰/۵ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس) غلظت روی اندام هوایی را نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری داد (P<۰/۰۵).

جدول ۲- تأثیر دمای تهیه زغال زیستی، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه ذرت

Table 2- Effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on shoots and roots dry weight of maize

تیمارها Treatments	دمای گرماکافت Pyrolysis temperature (°C)	سطح Level (%) 0.5	1	2	
		بخش هوایی Shoot			
شاهد Control		3.5±0.29E	3.5±0.29E	3.5±0.29E	
زغال زیستی نشده Biomass		4.7±0.09D	4.7±0.19D	4.6±0.1D	4.7d
زغال زیستی Biochar	200	5.5±0.39C	5.6±0.1C	5.5±0.17C	5.6c
	400	6.8±0.36B	7.5±0.32AB	7.8±0.64A	7.4b
	600	7.8±0.07A	7.9±0.02A	8.1±0.13A	7.9a
		6.2	6.4	6.5	
		ریشه Root			
شاهد Control		2.4±0.07F	2.4±0.07F	2.4±0.07F	
زغال زیستی نشده Biomass		3.1±0.13eE	3.2±0.08deDE	3.2±0.01deDE	3.2d
زغال زیستی Biochar	200	3.4±0.04dD	3.3±0.07deDE	3.4±0.12deDE	3.4c
	400	3.9±0.07cC	4.6±0.04bB	4.7±0.02bB	4.4b
	600	4.7±0.14bB	5.1±0.07aA	5.2±0.09aA	5.0a
		3.8b	4.0a	4.1a	

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده 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 $p < 0.05$.

تفاوت بین غلظت روی در ریشه در خاک تیمارشده با زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف نیز معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک، غلظت روی را در ریشه به‌ترتیب ۱۹/۲، ۲۸/۴ و ۳۰/۸ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش داد. غلظت روی در ریشه در خاک تیمارشده با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۱۱/۳ و ۱۴/۴ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش یافت. تیمار خاک با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، غلظت روی را در ریشه ۳/۴ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بقایا کاهش داد.

بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)، تفاوت غلظت روی در ریشه با کاربرد ۲ و ۰/۵ درصد زغال زیستی در خاک معنی‌دار شد (P<۰/۰۵). کاربرد ۲ درصد بیوچار در خاک غلظت روی را در ریشه ۳ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش داد.

نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار تهیه‌شده در هر دمایی و با هر مقداری در خاک (به‌جز مقادیر مختلف بقایا و سطوح ۰/۵ و ۱ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس)، غلظت روی را در ریشه به‌صورت معنی‌داری (P<۰/۰۵) کاهش داد.

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 آلوده بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (۱۸). در مطالعه حاضر، با توجه به نتایج جدول ۳ غلظت روی در اندام هوایی و ریشه گیاه کشت‌شده در خاک شاهد به‌ترتیب ۶۸۷/۱ و ۶۷۶۰/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم محاسبه شد. بنابراین ذرت در همه خاک‌ها تحت تأثیر سمیت روی قرار گرفت. آرناس-لاگو و همکاران (۵) گزارش کردند که رنگدانه‌های کاروتنویید و آنتوسیانین در گیاهان رشدکرده در خاک آلوده به معدن روی افزایش یافت. با کاربرد زغال زیستی در خاک آلوده، جذب روی توسط گیاه کاهش یافت و با افزایش مقدار کاربرد و دمای تهیه زغال زیستی، از مقدار روی در اندام هوایی و ریشه گیاه کاسته شد (جدول ۳). بنابراین، زغال زیستی به عنوان یک اصلاح‌کننده می‌تواند در بهبود رشد گیاه در خاکی بشدت آلوده مؤثر

باشد. بر اساس نتایج آل وابل و همکاران (۳) زغال زیستی تهیه‌شده از بقایای درخت کنوکارپوس قابلیت تحرک روی را در خاک آلوده کاهش داد و باعث کاهش تجمع آن در اندام هوایی شد. بنابراین رشد اندام هوایی ذرت افزایش یافت. زیرا تجمع روی در بافت‌های گیاهی در غلظت‌های بالا در گیاه سمیت ایجاد کرد و رشد گیاه را کاهش داد (۳۲). سطح ویژه و گروه‌های عاملی اکسیژنی زغال زیستی نیز از عوامل مهمی بودند که جذب فلزات سنگین توسط زغال زیستی را افزایش داده و سمیت آنها در گیاه کاهش یافت (۴ و ۱۹). مطابق با نتایج مطالعه حاضر، ألی و همکاران (۲) گزارش کردند که با کاربرد ۵ درصد زغال زیستی بامبو در خاک آلوده مجاور معدن، غلظت روی ریشه ۱۹ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت.

رشد ریشه با کاربرد این مقدار زغال زیستی در خاک آلوده ناشی از دودکش کارخانه‌های مجاور و در خاک آلوده مجاور معدن به‌ترتیب ۱۳۱/۰ و ۳۹/۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. تیمارهای زغال زیستی در بالا بردن تحمل برگ و خنثی‌سازی تنش‌های اکسیداسیونی ایجادشده توسط روی بسیار موثر بودند (۱۲). بر اساس نتایج یوچیما و همکاران (۴۰)، گروه‌های عاملی اکسیژنی سطح زغال زیستی، فلزات سنگین را جذب کردند. بنابراین غلظت فلزات سنگین در گیاه کاهش یافت. همچنین به دلیل تأثیر اثر رقت در اثر افزایش زیست‌توده گیاهی، سمیت فلزات در خاک‌های تیمارشده با زغال زیستی، کاهش یافت (۴۵).

جدول ۳- تأثیر دمای تهیه زغال زیستی، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت روی در اندام هوایی و ریشه ذرت

Table 3- Effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on Zn concentrations in shoots and roots of maize

تیمارها Treatments	دمای گرماکافت Pyrolysis temperature (° C)	سطح Level (%) 0.5	1	2	
			بخش هوایی Shoot		
شاهد Control		687.1±3.8A	687.1±3.8A	687.1±3.8A	
زغال زیستی نشده Biomass		694.1±6.6aA	688.0±9.9aA	682.4±20.0abAB	688.2a
زغال زیستی Biochar	200	672.3±7.5abcABC	654.0±1.9bcC	652.8±3.6cC	659.7b
	400	657.8±13.7bcBC	608.3±2.5dD	577.9±18.8eE	614.7c
	600	558.9±1.3efEF	554.0±4.8efEF	538.6±3.7fF	550.5d
		645.8a	626.1b	612.9b	
			ریشه Root		
شاهد Control		6760.3±27.6A	6760.3±27.6A	6760.3±27.6A	
زغال زیستی نشده Biomass		6746.4±125.0A	6845.2±67.2A	6841.3±50.1A	6811.0a
زغال زیستی Biochar	200	6651.8±181.5AB	6610.5±28.7AB	6467.3±105.0B	6577.0b
	400	5948.5±35.9C	5858.3±110.8C	5686.3±11.8C	5831.0c
	600	4918.7±85.2D	4686.7±88.2DE	4530.9±135.9E	4712.1d
		6066.3a	6000.2ab	5881.4b	

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده 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 تجمع زیستی روی در ریشه و ضریب انتقال گیاهی

نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۴ نشان داده شده است. آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار نشان داد که تفاوت بین ضریب تجمع زیستی روی در ریشه در خاک تیمارشده با زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف (به‌جز برگ گردو و زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس) معنی‌دار بود ($P<۰/۰۵$). ضریب تجمع زیستی روی در ریشه با کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک به‌ترتیب ۱۹/۰، ۲۸/۳ و ۳۰/۵ درصد نسبت به

زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰، ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ضریب تجمع زیستی روی را در ریشه به‌ترتیب ۱۱/۴ و ۱۴/۲ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش داد.

بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)، تفاوت ضریب تجمع زیستی روی در ریشه با کاربرد ۲ و ۰/۵ درصد زغال زیستی در خاک معنی‌دار شد (P<۰/۰۵). به این صورت که کاربرد ۲ درصد بیوچار در خاک، ضریب تجمع زیستی روی را در ریشه ۳/۵ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش داد.

بنابراین نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار تهیه‌شده در هر دمایی و با هر مقداری در خاک (به‌جز مقادیر مختلف بقایا و مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس) ضریب تجمع زیستی روی ریشه را کاهش معنی‌داری داد (P<۰/۰۵).

جدول ٤- تأثیر دمای تهیه زغال زیستی، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال گیاهی روی

Table 4- Effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on Zn bioaccumulation factor and Zn translocation factor

تیمارها Treatments	دمای گرماکافت Pyrolysis temperature (°C)	سطح Level (%) 0.5	1	2	
			BF ضریب تجمع زیستی		
شاهد Control		0.189±0.0008A	0.189±0.0008A	0.189±0.0008A	
زغال زیستی نشده Biomass		0.189±0.004AB	0.191±0.002A	0.191±0.001A	0.19a
زغال زیستی Biochar	200	0.186±0.005AB	0.185±0.0008AB	0.181±0.003B	0.184a
	400	0.166±0.001C	0.164±0.0031C	0.159±0.0003C	0.163b
	600	0.138±0.002D	0.131±0.003DE	0.127±0.004E	0.132c
		0.170a	0.168ab	0.164b	
			TF ضریب انتقال گیاهی		
شاهد Control		0.102±0.000C	0.102±0.000C	0.102±0.000C	
زغال زیستی نشده Biomass		0.103±0.001C	0.101±0.002C	0.10±0.003C	0.101c
زغال زیستی Biochar	200	0.101±0.002C	0.099±0.001C	0.101±0.002C	0.10c
	400	0.111±0.002B	0.104±0.002C	0.102±0.003C	0.105b
	600	0.114±0.002AB	0.118±0.001A	0.119±0.004A	0.117a
		0.107	0.105	0.105	

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده 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 $p < 0.05$.

تفاوت بین ضریب انتقال گیاهی روی در زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف (به‌جز بیوچار تهیه‌شده در دمای ۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس) معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). ضریب انتقال گیاهی روی در خاک تیمارشده با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، به‌ترتیب ۱۱/۴، ۱۷/۰ و ۱۵/۸ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش یافت. کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ضریب انتقال گیاهی روی را به‌ترتیب ۵/۰ و ۴/۰ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه‌شده دردمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش داد.

نتایج نشان داد که با کاربرد ۰/۵ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس و سطوح مختلف زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، ضریب انتقال گیاهی روی نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافت (P<۰/۰۵).

یک روش ساده جهت تعیین میزان انتقال فلزات سنگین از خاک به ریشه، تعیین ضریب تجمع زیستی (انتقال از خاک به ریشه) است (۶). بر اساس نتایج جدول ۴ با افزایش دمای تهیه و مقدار زغال زیستی، ضریب تجمع زیستی کاهش یافت. یوساف و همکاران (۴۴) بیان کردند که تجمع زیستی فلزات سنگین به مقدار فلزات سنگین در خاک بستگی دارد. به گونه‌ای که هر چه قابلیت‌استفاده فلزات سنگین کمتر باشد، تجمع زیستی و سمیت آن برای گیاه کمتر است. نتایج قبلی نیز نشان داد که با کاربرد زغال زیستی، انتقال فلزات سنگین از خاک و تجمع زیستی آنها در گیاه کاهش یافت (۲۷، ۴۳) زیرا تجمع زیستی فلزات سنگین به ویژگی‌های گیاهی شامل نوع گونه گیاهی، مرحله رشد گیاه، ویژگی‌های فیزیولوژیکی و تثبیت فلزات سنگین در سلول، همچنین ویژگی‌های فلزات سنگین همانند چگونگی جذب و قرارگیری فلزات سنگین در سلول (۲۹) و عوامل خاکی شامل مقدار ماده آلی، pH و مقدار فلزات سنگین خاک وابسته بود (۲۴). نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش ضریب تجمع زیستی تیمارها به دلیل کاهش قابلیت استفاده روی در نتیجه تأثیر زغال زیستی و کاهش غلظت آن در ریشه ذرت بود (جدول ۳).

انتقال فلزات سنگین از ریشه به اندام هوایی ضریب انتقال گیاهی نامیده می‌شود و جهت اهداف گیاه‌پالایی کاربرد دارد (۱۳). در مطالعه حاضر علت افزایش ضریب انتقال گیاهی در تیمارهای دارای زغال زیستی (بخصوص تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس)، وزن خشک بیشتر اندام هوایی نسبت به وزن خشک ریشه گیاه در این تیمارها بود. زیرا زغال زیستی با ممانعت از انتقال فلزات به گیاه، زیست‌توده ریشه و اندام هوایی گیاه را افزایش داد؛ اما افزایش ماده خشک بخش هوایی در سطوح و دماهای بالاتر زغال زیستی (بخصوص تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس) بیشتر بود (جدول ۲). به گونه‌ای که تیمار خاک‌ها با ۲ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، غلظت روی اندام هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۲۱/۶ و ۳۳ درصد کاهش و در عین حال، وزن خشک اندام هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۱۳۱/۴ و ۱۱۶/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. در این مطالعه ضریب انتقال در همه تیمارها کمتر از یک بود و مطابق با نتایج اید و شلتوت (۱۱) بود که ضریب انتقال روی را در گیاهان مختلف کمتر از یک گزارش کردند. آنان بیان کردند مقادیر کمتر از ۱ برای فاکتور انتقال نشان می‌دهد که گیاه به علت خاصیت سمی فلزات سنگین از انتقال آنها از ریشه به اندام هوایی ممانعت کرده است. این نتایج نشان‌دهنده وجود یک مکانیسم دفاعی در گیاه است که با تجمع فلزات سنگین در ریشه از انتقال آنها به زنجیره غذایی جلوگیری می‌کند. همچنین در مطالعه حاضر، در همه تیمارها، مقدار ضریب تجمع زیستی بیشتر از ضریب انتقال گیاهی بود. یاداواکولاسینگام و همکاران (۴۲) در پژوهش خود، به بالاتر بودن ضریب تجمع زیستی نسبت به ضریب انتقال گیاهی در تیمارها اشاره و بیان کردند که به نظر می‌رسد ذرت به دلیل تثبیت بیشتر فلزات سنگین در ریشه نسبت به اندام هوایی، گیاه تثبیت‌کننده‌تر روی نسبت به پالایش‌کننده است.

روی قابل استفاده

نتایج تجزیه واریانس دو طرفه نشان داد که دما و مقدار زغال زیستی مورد استفاده بر مقدار روی محلول و روی عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA اثر معنی‌داری داشت ($P<0/01$) (داده‌ها نشان داده نشده است). اثر متقابل دما و مقدار زغال زیستی بر روی محلول معنی‌دار بود ($P<0/01$). نتایج نشان داد که دمای گرماکافت و سطح زغال زیستی به‌ترتیب مهمترین عوامل موثر بر تغییرات مقدار روی محلول و روی عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA بودند. اثر متقابل دما و مقدار زغال زیستی نیز عامل مهم دیگری بر تغییرات مقدار روی محلول بود.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۵، تفاوت بین مقدار روی محلول در زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف (به‌جز زغال زیستی تهیه‌شده در دماهایی ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس) معنی‌دار بود ($P<0/05$). مقدار روی محلول، در خاک تیمارشده با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۲۰/۷، ۲۱/۷ و ۳۳/۱ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش یافت. با کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، مقدار روی محلول ۱۵/۶ درصد نسبت به بقایا کاهش یافت. تیمار خاک با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، مقدار روی محلول را ۱۴/۵ درصد نسبت به بقایا کاهش داد.

مقدار روی محلول در آب در خاک‌های تیمارشده با سطوح مختلف زغال زیستی تفاوت معنی‌داری ($P<0/05$) داشت (جدول ۵). نتایج نشان داد که با کاربرد ۲ درصد زغال زیستی، مقدار روی محلول به‌ترتیب ۱۳/۸ و ۱۹/۰ درصد نسبت به ۱ و ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش یافت. تیمار خاک با ۱ درصد زغال زیستی، مقدار روی محلول را ۶/۱ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش داد. نتایج نشان داد که تیمار خاک با زغال زیستی تهیه‌شده در هر دمایی و با هر مقداری، روی محلول را کاهش معنی‌داری داد.

تفاوت بین روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA در زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود ($P<0/05$) و فقط روی قابل استفاده در خاک‌های تیمارشده با زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس تفاوت معنی‌داری نداشت ($P>0/05$). کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک، باعث کاهش روی قابل استفاده به‌ترتیب ۱۱/۱، ۱۲/۵ و ۲۴/۰ درصد نسبت به خاک تیمارشده با زغال‌های زیستی

تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو شد. همچنین، کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، باعث کاهش ۱۴/۵ درصد روی قابل استفاده نسبت به برگ گردو شد. کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک، باعث کاهش ۱۳/۱ درصد روی قابل استفاده نسبت به برگ گردو شد.

بر اساس آزمون مقایسه میانگینروی عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA در سطوح مختلف زغال زیستی تفاوت معنی‌داری ($P<0/05$) داشت (جدول ۵). نتایج نشان داد که با کاربرد ۲ درصد زغال زیستی در خاک، روی عصاره‌گیری‌شده به‌ترتیب ۶/۱ و ۱۱/۱ درصد نسبت به خاک‌های تیمارشده با سطوح ۱ و ۰/۵ درصد کاهش یافت. همچنین روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با کاربرد ۱ درصد زغال زیستی ۵/۳ درصد نسبت به خاک تیمارشده با ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش یافت.

جدول ۵- تأثیر دمای تهیه زغال زیستی، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA

Table 5- Effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on soluble Zn and DTPA-extractable Zn

تیمارها Treatments	دمای گرماکافت Pyrolysis temperature (° C)	سطح Level (%) 0.5	1	2	
		روی محلول Soluble Zn			
شاهد Control		0.895±0.003A	0.895±0.003A	0.895±0.003A	
زغال زیستی نشده Biomass		0.61±0.04abBC	0.63±0.02abBC	0.65±0.01aB	0.629a
زغال زیستی Biochar	200	0.62±0.01abBC	0.595±0.02abcBCD	0.4±0.006fG	0.538b
	400	0.57±0.02bcdCDE	0.532±0.02cdeDEF	0.49±0.01eF	0.531b
	600	0.52±0.05deEF	0.42±0.01fG	0.33±0.006gH	0.421c
		0.578a	0.543b	0.468c	
		روی عصاره‌گیری‌شده DTPA-extractable Zn			
شاهد Control		190.4±0.9A	190.4±0.9A	190.4±0.9A	
زغال زیستی نشده Biomass		187.0±2.0A	174.7±3.5B	170.0±0.7BC	177.2a
زغال زیستی Biochar	200	161.6±3.7D	151.6±4.3E	148.8±0.9E	154.0b
	400	164.0±2.3CD	152.8±2.3E	137.6±2.8F	151.5b
	600	140.8±1.8F	139.2±0.9F	124.0±3.2G	134.7c
		163.3a	154.6b	145.1c	

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده 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 $p < 0.05$.

کاربرد زغال زیستی (در همه مقادیر و دماهای مختلف) مقدار روی قابل استفاده را در مقایسه با خاک شاهد کاهش معنی‌دار ($P<0/05$) داد. تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بقایا، روی قابل استفاده را به‌ترتیب ۱/۸، ۸/۲ و ۱۰/۷ درصد، تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد زغال زیستی ۲۰۰ درجه سلسیوس روی قابل استفاده را به‌ترتیب ۱۵/۱، ۲۰/۴ و ۲۱/۸ درصد، تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد زغال زیستی ۴۰۰ درجه سلسیوس روی قابل استفاده را به‌ترتیب ۱۳/۹، ۱۹/۷ و ۲۷/۷ درصد و تیمار خاک‌ها با ۰/۵، ۱ و ۲ درصد زغال زیستی ۶۰۰ درجه سلسیوس روی قابل استفاده را به‌ترتیب ۲۶/۱، ۲۶/۹ و ۳۴/۹ درصد نسبت به خاک شاهد کاهش داد.

در مطالعه حاضر، با افزایش سطح کاربرد و دمای تهیه زغال زیستی، مقدار روی محلول در تیمارها کاهش معنی‌داری داشت ($P<0/05$). بر طبق نتایج لیو و همکاران (۲۵) نیز مقدار روی محلول با کاربرد زغال زیستی در خاک کاهش یافت. همچنین بر اساس نتایج جدول ۵، با افزایش مقدار و دمای تهیه زغال زیستی، مقدار روی قابل استفاده در تیمارها کاهش یافت. در مطالعات قبلی نیز، زغال زیستی

تهیه‌شده از بقایای میسکانتوس (۱۷) و زغال زیستی تهیه‌شده از بقایای نی‌شکر (۳۳) قابلیت استفاده روی را به‌ترتیب ۹۲ و ۵۴ درصد کاهش دادند. زیرا روی توسط سطوح خارجی، مکان‌های داخلی، شبکه منافذ و شکاف‌های درون زغال زیستی جذب شد و در ریزحفره‌های درون زغال زیستی کمپلکس تشکیل داد (۹). بنابراین زغال زیستی با مکانیسم‌هایی از قبیل جذب سطحی (اختصاصی و غیراختصاصی)، تشکیل کلات‌های پایدار و کمپلکس با مواد آلی، قابلیت استفاده فلزات سنگین را کاهش داد (۱).

نتایج مطالعه ضریب همبستگی نشان داد که بین pH تیمارها با روی محلول (۰/۸۴-) و روی قابل استفاده (۰/۷۳-) همبستگی منفی و معنی¬داری وجود داشت (P<۰/۰۱). بنابراین با افزایش pH خاک در اثر کاربرد بیوچار (داده‌ها نشان داده نشده است) می‌تواند دلیلی بر کاهش جذب روی باشد. همچنین ضریب همبستگی پیرسون بین سطح ویژه زغال زیستی و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA ۰/۹۲- (P<۰/۰۵) و بین دمای گرماکافت و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA ۰/۹۴- (P<۰/۰۵) بود که مطابق با نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که گروه‌های عاملی سطح زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای بالاتر گرماکافت، نقش مهمی در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین داشتند (۳۱).

همبستگی بین روی محلول، روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA و پاسخ‌های گیاه

بر اساس نتایج، ضرایب پیرسون (جدول ۶) بین روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با غلظت روی در اندام هوایی، غلظت روی در ریشه و ضریب تجمع زیستی روی در ریشه مثبت و معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). به عبارت دیگر با افزایش مقدار روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA قابلیت استفاده آن در خاک، تجمع در ریشه و مقدار آن در اندام هوایی گیاه افزایش یافت. بین روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با ضریب انتقال گیاهی (P<۰/۰۵)، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه همبستگی منفی و معنی‌داری وجود داشت (P<۰/۰۱). این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA، مقدار وزن خشک گیاه کاهش یافت و زغال زیستی این تأثیر منفی را کاهش داد.

جدول ٦- ضریب همبستگی پیرسون بین روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با پاسخ‌های گیاه (n=۱۳)

Table 6- Pearson correlation matrix between Soluble Zn, Zn-DTPA and maize growth indices (n=13)

	ویژگی Characteristics	روی محلول Soluble Zn	روی عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA DTPA-extractable Zn
اندام هوایی Shoot	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	-0.78**	-0.88**
	غلظت روی در اندام هوایی Concentrations in shoot	0.72**	0.90**
ریشه Root	وزن خشک ریشه Root dry weight	-0.79**	-0.87**
	غلظت روی در ریشه Concentrations in root	0.70**	0.81**
شاخص‌های گیاه‌پالایی Phytoremedation indices	ضریب تجمع زیستی Bioaccumulation factor	0.70**	0.81**
	ضریب انتقال گیاهی Translocation factor	-0.58*	-0.59*

**معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد.

** Significant at P< 0.01 , * Significant at P< 0.05.

نتیجه‌گیری

دمای تولید زغال زیستی تهیه‌شده از برگ‌گردو، مقدار کاربرد و برهمکنش بین آنها می‌تواند بر مقدار روی قابل استفاده گیاه تأثیرگذارد و جذب روی را از خاک‌های به‌شدت آلوده کاهش، و ماده خشک ذرت را افزایش دهد. بنابراین استفاده از زغال زیستی برگ گردو می‌تواند راهکاری مفید و اقتصادی جهت تثبیت روی در خاک‌های آلوده به روی و افزایش رشد گیاه ذرت در مکان‌های آلوده به شمار رود.

منابع

1- Ahmad M., Ok Y.S., Rajapaksha A.U., Lim J.E., Kim B.Y., Ahn J.H., Lee Y.H., Al-Wabel M.I., Lee S.E., and Lee S.S. 2016. Lead and copper immobilization in a shooting range soil using soybean stover and pine needle-derived biochars: Chemical, microbial and spectroscopic assessments. Journal of Hazardous Materials, 301:179-86.

2- Ali A., Guo D., Zhang Y., Sun X., Jiang S., Guo Z., Huang H., Liang W., Li R., and Zhang Z. 2017. Using bamboo biochar with compost for the stabilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in mine-contaminated soils of China. Scientific reports, 7(1):p.2690.

3- Al-Wabel M.I., Usman A.R.A., El-Naggar A.H., Aly A.A., Ibrahim H.M., Elmaghraby S., and Al-Omran A. 2015. Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. Saudi Journal of Biological Sciences, 22:503–511.

4- Archanjo B.S., Mendoza M.E., Albu M., Mitchell D.R.G., Hagemann N., Mayrhofer C., Mai T.L.A., Weng Z., Kappler A., Behrens S., Munroe P., Achete C.A., Donne S., Araujo J.R., van Zwieten L., Horvat J., Enders A., and Joseph S. 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- Arenas-Lago D., Carvalho L.C., Santos E.S., and Abreu M.M. 2016. The physiological mechanisms underlying the ability of *Cistus monspeliensis* L. from São Domingos mine to withstand high Zn concentrations in soils. Ecotoxicology and environmental safety, 129:219–227.

6- Branzini A., González RS., and Zubillaga M. 2012. Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by Sesbania virgata. Journal of environmental management, 102:50-54.

7- Brunauer S., Emmett P.H., and Teller E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. Journal of the American Chemical Society, 60(2):309-319.

8- Chen Y., Xie T., Liang Q., Liu M., Zhao M., Wang M., and Wang G. 2016. Effectiveness of lime and peat applications on cadmium availability in a paddy soil under various moisture regimes. Environmental Science and Pollution Research, 23:7757-7766.

9- Cheng C.H., Lehmann J., and Engelhard M.H. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(6):1598-1610.

10- Dai S., Li H., Yang Z., Dai M., Dong X., Ge X., Sun, M., and Shi L. 2018. Effects of biochar amendments on speciation and bioavailability of heavy metals in coal-mine-contaminated soil. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 1-14.

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. International Journal of Phytoremediation, 18(11):1075-1085.

12- Esfandbod M., Merritt C.R., Rashti M.R., Singh B., Boyd S.E., Srivastava P., Brown C.L., Butler O.M., Kookana R.S., and Chen C. 2017. Role of oxygen-containing functional groups in forest fire-generated and pyrolytic chars for immobilization of copper and nickel. Environmental Pollution, 220:946–954.

13- Galal T.M., and Shehata H.S. 2015. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. Ecological Indicators, 48:244-251.

14- 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.

15- Hofmann. N. R. 2012. Nicotianamine in zinc and iron homeostasis. Plant Cell, 24. 373.

16- Hosseinpur A., and Motaghian H. 2018. Soil Testing (Correlation, Calibration, and Fertilizer Recommendation Studies), Shahrekord University.

17- Houben D., Evrard L., and Sonnet P. 2013. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.). Biomass and Bioenergy, 57:196-204.

18- Kabata-Pendias A., and Pendias H. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. Third Ed. CRC Press. Boca Raton, London.

19- 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. Science of The Total Environment, 618:188-198.

20- 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.

21- Liang J., Liu J., Yuan X., Dong H., Zeng G., Wu H., Wang H., Liu J., Hua S., Zhang S., Yu Z., He X., and He Y. 2015. Facile synthesis of alumina-decorated multi-walled carbon nanotubes for simultaneous adsorption of cadmium ion and trichloroethylene. Chemical Engineering Journal, 273:101-110.

22- Liang J., Zhong M., Zeng G., Chen G., Hua S., Li X., Yuan Y., Wu H., and Gao X. 2017. Risk management for optimal land use planning integrating ecosystem services values: a case study in Changsha, Middle China. Science of the Total Environment, 579:1675-82.

23- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal, 42:421-428.

24- Liu J., Wang J., Qi J., Li X., Chen Y., Wang C., and Wu Y. 2012. Heavy metal contamination in arable soils and vegetables around a sulfuric acid factory, China. Clean–Soil, Air, Water, 40(7):766-772.

25- Liu T., Liu B., and Zhang W. 2014. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. Polish Journal of Environmental Studies, 23(1):271-275.

26- Liu W., Wang S., Lin P., Sun H., Hou J., Zuo Q., and Huo R. 2015. Response of $CaCl_2$-extractable heavy metals, polychlorinated biphenyls, and microbial communities to biochar amendment in naturally contaminated soils. Journal of Soils and Sediments, 16(2):476-485.

27- Mohamed I., Zhang GS., Li Z.G., Liu Y., Chen F., and Dai K. 2015. Ecological restoration of an acidic Cd contaminated soil using bamboo biochar application. Ecological Engineering, 84:67-76.

28- Mukhopadhyay M., Das A., Subba P., Bantawa P., Sarkar B., Ghosh P., and Mondal T.K. 2012. Structural, physiological, and biochemical profiling of tea plantlets under zinc stress. Biologia Plantarum, 57(3):474-480.

29- Nawab J., Khan S., Shah M.T., Gul N., Ali A., Khan K., and Huang Q. 2016. Heavy metal bioaccumulation in native plants in chromite impacted sites: a search for effective remediating plant species. CLEAN–Soil, Air, Water, 44(1):37-46.

30- 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.

31- 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.

32- Park J.H., Choppala G.K., Bolan N.S., Chung J.W., and Chuasavathi T. 2011. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. Plant and Soil, 348:439-451.

33- Puga A.P., Abreu C.A., Melo L.C.A., and Beesley L. 2015. Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. Journal of Environmental Management, 159:86–93.

34- 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.

35- Ruiz E., Azcarate J. A., Rodriguez L., and Rincon J. 2009. Assessment of metal availability in soil from a Pb- Zn mine site of South-Central Spain. Soil and Sediment Contamination, 18:619-641.

36- Sposito G., Lund L.J., and Chang A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. Soil Science Society of America Journal, 46:260-265.

37- 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.

38- Tembo B.D., Sichilongo K., and Cernak J. 2006. Distribution of copper, lead, cadmium and zinc concentrations in soils around Kabwe town in Zambia. Chemosphere, 63:497–501.

39- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks D.L. (ed.) Methods of soil Analysis. SSSA, Madison.

40- Uchimiya M., Wartelle L.H., Klasson K.T., Fortier C.A., and Lima I.M. 2011. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 59:2501–2510.

41- Wang P., Tang L., Wei X., Zeng G., Zhou Y., Deng Y., Wang J., Xie Z., and Fang W. 2017. Synthesis and

application of iron and zinc doped biochar for removal of nitrophenol in wastewater and assessment of the influence of co-existed Pb(II). Applied Surface Science, 392:391-401.

42- Yathavakulasingam T., Mikunthan T., and Vithanage M. 2016. Acceleration of Lead Phytostabilization by Maize (*Zea mays* L.) in Association with Gliricidiasepium Biomass. Chemical and Environmental Systems Modeling Research Group, National Institute of Fundamental Studies, Kandy, Sri Lanka, 2(5):16-21.

43- Yousaf B., Liu G., Wang R., Zia-ur-Rehman M., Rizwan M.S., Imtiaz M., Murtaza G., and Shakoor A. 2016. Investigating the potential influence of biochar and traditional organic amendments on the bioavailability and transfer of Cd in the soil–plant system. Environmental Earth Sciences, 75(5):374.

44- Yousaf B., Liu G., Abbas Q., Ullah H., Wang R., Zia-ur-Rehman M., and Niu Z. 2017. Addition of biochar nanosheets to soil alleviate health risks of potentially toxic elements via consumption of wheat grown in an industrially contaminated soil. Chemosphere, 1:161-170.

45- Zhang G., Guo X., Zhao Z., He Q., Wang S., Zhu Y., Yan Y., Liu X., Sun K., Zhao Y., and Qian T. 2016. Effects of biochars on the availability of heavy metals to ryegrass in an alkaline contaminated soil. Environmental Pollution, 218:513-522.

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 4, Sept.-Oct. 2018, p. 779-793

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۴، مهر – آبان ۱۳۹۷، ص. ۷۹۳-۷۷۹

Effect of Biochars Produced at Different Temperatures on the Availability of Zinc and Maize (*Zea mays* L.) Responses in a Contaminated Soil

P. Kabiri[1] – H.R. Motaghian[2*] – A.R. Hosseinpur[3]

Received: 23-04-2018
Accepted: 18-07-2018

Introduction: Anthropogenic activities have transformed the global geochemical cycling of heavy metals. Mine tailings are of great concern due to the detrimental effects of toxic inorganic elements causing environmental risks. Zinc (Zn) as an essential element is required in small amounts for various biochemical reactions and physiological functions. However, high concentrations of Zn can induce oxidative stress. Applying an organic amendment is a promising, in situ phytostabilization approach to alleviate the phytotoxic effects of heavy metal in contaminated soils. The application of biochar as an amendment may be a solution to reduce the risk of pollutant diffusion. Biochars is a fine-grained biological residue combusted under low oxygen conditions, resulting in a porous, stable carbon-based material. The potential biochar applications include carbon sequestration, soil fertility improvement, and pollution remediation; therefore, it can reduce pollutants mobility and bioavailability.

Materials and Methods: Results of this research indicated that biochars decreased Zn concentration in maize shoots and roots. They reduced Zn concentration in the shoot/root of maize. Zinc concentration in shoots and roots of maize (*Zea mays* L.) harvested at 60 days after sowing, decreased with increasing thermochemical temperature and application rate of biochar. In treated soil with 2% (w/w) biochar prepared at 600 °C, Zn concentration in shoots and roots decreased by 21.6 and 33.0 % respectively ($p<0.05$). Physiological responses showed that WB applications improved the shoot/root growth and dry biomass (root and shoot). In comparison with the control, the highest shoot and root dry matter values were found in 2% (w/w) biochar-600 °C treatment by 131.4 and 116.7% respectively ($p<0.05$). Zinc bioaccumulation towards plant decreased with increasing thermochemical temperatures and application rate of biochars. Determination of bioaccumulation factor (BF) and translocation factor (TF) indicated that bioaccumulation factor is higher than translocation factor in maize planting. For the treatment biochar produced at 600 °C, BF, and TF were 0.132 and 0.117 respectively. Thereby maize can be considered as a potential phytostabilizer. At the same time efficiency of phytostabilizing nature of maize can increase together with the application of biochar. The results showed that water and DTPA-extractable Zn concentrations were significantly ($p < 0.05$) lower in Walnut leaves biochars treated soils than those in unamended soils. Bioavailable Zn concentration (soluble and DTPA-extractable Zn) decreased by increasing WB thermochemical temperature and application rate.In comparison with the control, the 2% biochar-600 °C significantly reduced soluble and DTPA-extractable Zn by 63.1 and 34.9 % respectively ($p<0.05$). A significant positive correlation coefficients was found between soluble Zn and Zn concentrations in plant shoot and root (0.72, 0.70, $p < 0.01$), and between DTPA-extractable values and shoot and root Zn concentrations (0.90, 0.81, $p < 0.01$, respectively). There is a negative correlation between soluble Zn and shoot and root dry weight (-0.78, -0.79, $p < 0.01$ respectively), and between bioaccessible Zn and shoot and root dry weight (-0.88, -0.87, $p < 0.01$, respectively). Importantly, the results of the Pearson correlation analysis revealed a negative relationship between biochar surface area (and production temperature) and DTPA-extractable Zn in the soil, suggesting biochars produced at higher temperature played a more important role in immobilizing heavy metals.

Results and Discussions: The results indicated that biochars decreased Zn concentration in maize shoots and roots. Zinc concentration in shoots and roots of maize (*Zea mays* L.) harvested at 60 days after sowing date, decreased with increasing thermochemical temperature and application rate of biochar. In treated soil with 2% (w/w) biochar prepared at 600 °C, Zn concentration in shoots and roots decreased by 21.6 and 33.0 %, respectively ($p<0.05$). Physiological responses showed that WB application improved the shoot/root growth and dry biomass (root and shoot). In comparison with the control, the highest shoot and root dry matter values were found in 2% (w/w) biochar-600 °C treatment by 131.4 and 116.7%, respectively ($p<0.05$). Zinc bioaccumulation towards plant decreased with increasing thermochemical temperatures and application rate of biochars.

1, 2 and 3 M.Sc. Student, Assistant Professor and Professor, Department of Soil Science, University of Shahrekord, Respectively
(*- Corresponding Author Email: motaghian.h@yahoo.com)

Determination of bioaccumulation factor (BF) and translocation factor (TF) indicated that bioaccumulation factor is higher than translocation factor in maize planting. For the treatment biochar produced at 600 °C, BF and TF were 0.132 and 0.117, respectively. Therefore, maize can be considered as a potential phytostabilizer. The efficiency of phytostabilizing nature of maize can be increased by application of biochar. The results showed that water and DTPA-extractable Zn concentrations were significantly ($p< 0.05$) lower in the soils treated by Walnut leaves biochars as compared with those in unamended soils. Bioavailable Zn concentration (soluble and DTPA-extractable Zn) decreased by increasing WB thermochemical temperature and application rate. In comparison with the control, the 2% biochar-600 °C significantly reduced soluble and DTPA-extractable Zn by 63.1 and 34.9 %, respectively ($p<0.05$). A significant positive correlation coefficient was found between soluble Zn and Zn concentrations in plant shoot and root (0.72, 0.70, $p< 0.01$), and between DTPA-extractable values and shoot and root Zn concentrations (0.90, 0.81, $p< 0.01$, respectively). There was a negative correlation between soluble Zn and shoot and root dry weight (-0.78, -0.79, $p< 0.01$ respectively), and between bioaccessible Zn and shoot and root dry weight (-0.88, -0.87, $p< 0.01$, respectively). Importantly, the results of the Pearson correlation analysis revealed a negative relationship between biochar surface area (and production temperature) and DTPA-extractable Zn in the soil, implying the fact that the biochars produced at higher temperature played a more important role in immobilizing heavy metals.

Conclusions: Our results denote that WB application to a contaminated soil has the potential of in situ remediation by immobilizing Zn, thereby reducing metal availability to maize. Given that Walnut leaf is a readily available agricultural residue, we suggest that its conversion to biochar and incorporation into a contaminated soil can be an achievable and cost-effective approach to mitigate metal exposure of maize. The WB has the potential to significantly affect the behavior of Zn in soil by altering its solubility and availability. In conclusion, these results highlight the biochar potential to mitigate the metals phytoaccumulation and reduce metal exposure of maize. Further experiments are needed not only to define the biochar potential in phytoremediation but also to better understand the criteria for choosing the best ingredient. The results of this pot experiment are encouraging and need to be confirmed with the long-term field experiments.

Keywords: Heavy metals, Phytostabilization, Pyrolysis