

اثر زغال زیستی تهیه شده از بقایای کشاورزی در دماهای متفاوت بر برخی ویژگی‌های شیمیایی یک خاک آهکی و غلظت سدیم و پتاسیم در گیاه ذرت (*Zea mays*)

نرجس سوسرائی^۱، مجتبی بارانی مطلق^{۲*}، فرهاد خرمالی^۳، اسماعیل دردی پور^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۰۷)

چکیده

زغال زیستی یک ماده جامد غنی از کربن است که حاصل حرارت دهی زیست توده‌های گیاهی و بقایای کشاورزی در شرایط اکسیژن محدود می‌باشد. اثرات زغال زیستی در خاک بستگی به دمای گرماکافت و نوع ماده اولیه مورد استفاده در تولید زغال زیستی دارد. به منظور بررسی تأثیر زغال زیستی حاصل از بقایای کشاورزی در دماهای متفاوت گرماکافت بر ویژگی‌های خاک، وضعیت کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک و غلظت سدیم و پتاسیم در گیاه ذرت، آزمایشی گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۴ تکرار به اجرا درآمد. تیمارها شامل نوع زغال زیستی (بیوچارهای بقایای برنج، بقایای پنبه و بقایای کلزا)، دمای گرماکافت (۳۵۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس) و مقدار زغال زیستی (۰، ۲ و ۵ درصد وزنی/وزنی) بودند. نتایج نشان داد که همه بیوچارها سبب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک شدند. حداقل مقدار pH در خاک در تیمار زغال زیستی تهیه شده از بقایای برنج و بیشترین pH در خاک در تیمار زغال زیستی تولید شده از پنبه به دست آمد. افزایش دمای گرماکافت از ۳۵۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش معنی‌دار pH در خاک شد. بیشترین مقادیر سدیم، کلسیم، منیزیم، کلر و بی‌کربنات در خاک در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد. بیشترین مقدار سدیم در برگ و ساقه ذرت در تیمار زغال زیستی حاصل از بقایای برنج به دست آمد در حالی که در مورد پتاسیم برگ و ساقه، زغال زیستی تهیه شده از بقایای کلزا بیشترین افزایش را داشت. دمای تولید زغال زیستی تنها بر مقدار سدیم برگ اثر معنی‌داری در سطح ۵٪ داشت. دمای گرماکافت و نوع ماده خام اولیه فاکتورهای مهمی هستند که ویژگی‌های شیمیایی زغال زیستی و متعاقب آن ویژگی‌های خاک را متأثر می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: بقایای گیاهی، کاتیون‌های خاک، آنیون‌های خاک، زغال زیستی، گرماکافت.

سوسرائی ن، بارانی مطلق م، خرمالی، ف، دردی پور ا. ۱۳۹۸. اثر زغال زیستی تهیه شده از بقایای کشاورزی در دماهای متفاوت بر برخی ویژگی‌های شیمیایی یک خاک آهکی و غلظت سدیم و پتاسیم در گیاه ذرت (*Zea mays*). تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۷، شماره ۳، صفحه: ۱۶۴-۱۷۹.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (مکاتبه کننده)

۳- استاد گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

*پست الکترونیک: mbarani@gau.ac.ir

مقدمه

در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که قسمت عمده کشور ایران را نیز شامل می‌شود، عدم وجود پوشش گیاهی کافی و مناسب، عدم مدیریت صحیح استفاده از بقایای گیاهان و هم‌چنین کاهش بازگشت بقایای گیاهی به خاک سبب کمبود مواد آلی شده است (Razzaghi & Rezaie, 2017). بنابراین برای افزایش مقدار ماده آلی خاک، استفاده از منابع آلی مانند ضایعات کشاورزی ضروری بوده تا ضمن افزایش تولیدات زراعی، توسعه پایدار در کشاورزی میسر شود. اخیراً استفاده از زغال زیستی در زمین‌های کشاورزی به‌عنوان منبع تأمین‌کننده مواد آلی برای رشد گیاه و اصلاح‌کننده برای بهبود ویژگی‌های خاک مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است (Domene et al., 2014).

زغال زیستی یک ماده متخلخل، غنی از کربن و ریزدانه بوده که از گرمادهی بقایای آلی مانند ضایعات گیاهی، کودهای دامی و سایر ضایعات در دماهای ۲۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس در یک محیط بدون اکسیژن یا با میزان اکسیژن محدود به‌دست می‌آید (Lehmann & Joseph, 2009). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نوع مواد اولیه، شرایط واحد گرماکافت، سرعت گرمادهی، اندازه ذرات زغال زیستی و دمای اوج گرماکافت و مدت زمان گرماکافت قرار می‌گیرد (Laird et al., 2010). دما از متغیرهای اصلی تهیه زغال زیستی بوده که تأثیر مهمی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و پایداری آن دارد. مقدار زغال زیستی تولید شده، درصد کربن، ترکیب عنصری، میزان خاکستر، میزان مواد فرّار، جرم ویژه، توزیع اندازه خلل و فرج، سطح ویژه، ویژگی‌های شیمیایی سطح، جذب سطحی آب و یون‌ها، pH، ساختمان فیزیکی و پایداری در مقابل تجزیه از ویژگی‌های مهم زغال زیستی بوده که تحت تأثیر دما قرار می‌گیرند (Khadem et al., 2017). فو و همکاران (Fu et al., 2011) نشان دادند که با افزایش دمای پیرولیز از ۶۰۰ به ۱۰۰۰ درجه سلسیوس، عملکرد زغال زیستی تولید شده از کاه و کلش ذرت، برنج و پنبه (نسبت جرم زغال زیستی به جرم زیست‌توده اولیه)، کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، تجزیه و متلاشی شدن زیاد مواد خام در دماهای زیاد می‌تواند باشد. یوان و

همکاران (Yuan et al., 2011) با بررسی اثر دماهای مختلف پیرولیز بر ویژگی‌های زغال‌های زیستی بدست آمده از بقایای کلزا، ذرت، سویا و بادام زمینی دریافتند که با افزایش دما، مقدار pH آن‌ها افزایش می‌یابد.

گزارش‌های زیادی در خصوص تأثیر زغال زیستی تهیه شده از منابع مختلف زیست‌توده تحت شرایط متفاوت تولید بر ویژگی‌های شیمیایی و جنبه‌های حاصلخیزی خاک وجود دارد. اختر و همکاران (Akhtar et al., 2015b) اثرات دراز مدت زغال زیستی را بر بهبود رشد، فیزیولوژی و عملکرد گندم تحت تنش شوری در گلخانه بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که افزودن زغال زیستی باعث جذب سطحی سدیم از محلول شده و در نتیجه جذب سدیم توسط گیاه کاهش یافت. هم‌چنین گزارش کردند که تنش شوری کاهش و غلظت عناصر غذایی قابل جذب از جمله پتاسیم، کلسیم و منیزیم افزایش یافته و در نهایت رشد و عملکرد گندم به‌طور فزاینده‌ای در خاک افزایش یافت. کومار و همکاران (Kumar et al., 2013) اثر درجه حرارت‌های مختلف تولید زغال زیستی (۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس) را بر برخی ویژگی‌های خاک بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که زغال زیستی تولید شده در دمای ۳۰۰ تا ۳۵۰ در سطوح مختلف باعث افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک شد. در پژوهشی نبوی‌نیا (Nabavi Nia, 2013) نشان داد که مصرف زغال زیستی تولید شده از ضایعات دباغی سبب افزایش کربن آلی و هدایت الکتریکی خاک شد. آن‌ها افزایش هدایت الکتریکی ناشی از کاربرد زغال زیستی را وجود مقادیر زیادی کلسیم، منیزیم، پتاسیم در زغال زیستی گزارش کردند. هم‌چنین یافته‌های آن‌ها نشان داد که کاربرد زغال زیستی تأثیر معنی‌داری بر مقدار پتاسیم خاک نداشت. نتایج پژوهش نجمی (Najmi, 2013) نشان داد که کاربرد زغال زیستی در خاک باعث افزایش معنی‌دار اسیدیته، هدایت الکتریکی و کاتیون‌های بازی تبادل‌نیست به شاهد شد. اینال و همکاران (Inal et al., 2015) نیز اثرات افزودن سطوح مختلف زغال زیستی تولید شده از کود مرغی (صفر، ۲/۵، پنج و ۱۰ گرم در کیلوگرم) در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس بر ویژگی‌های شیمیایی خاک آهکی و رشد ذرت را بررسی و گزارش کردند که زغال زیستی سبب افزایش رشد ذرت شد.

آنجا که اثرات کاربرد زغال‌های زیستی مختلف با مواد اولیه و شرایط گرماکافت متفاوت، بر عملکرد گیاهان مختلف، یکسان نیست، لذا هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر بقایای کشاورزی (برنج، پنبه و کلزا) و زغال زیستی حاصل از آن‌ها بر ویژگی‌های خاک، وضعیت کاتیون‌ها، آنیون‌های خاک، وزن خشک اندام هوایی و غلظت سدیم و پتاسیم در گیاه ذرت در شرایط گلخانه بود.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و تعیین ویژگی‌های خاک: یک نمونه خاک مرکب از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان برداشته شد. پس از هوا خشک شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از قبیل بافت خاک، کربنات کلسیم معادل، pH و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل‌استفاده با استفاده از روش‌های استاندارد (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شدند (جدول ۱).

اوزوما و همکاران (Uzoma et al., 2011) نشان دادند که کاربرد ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار زغال زیستی تولید شده از کود گاوی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به خاک شنی سبب افزایش معنی‌دار رشد و عملکرد ذرت شد. زغال زیستی بجز بخش کربنی پایدار، حاوی مقدار زیادی خاکستر بوده که حاوی نمک‌های معدنی است که در کوتاه مدت می‌تواند به تغذیه گیاه کمک نموده و باعث افزایش عملکرد گیاه شود. میزان خاکستر موجود در زغال زیستی تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد که از جمله این موارد می‌توان نوع مواد اولیه و دمای گرماکافت را نام برد (Khadem et al., 2017). باتوجه به کاربرد زغال زیستی در سال‌های اخیر و پی بردن به نقش آن در افزایش عملکرد محصول، تاکنون مطالعات چندانی در ارتباط با تأثیر زغال زیستی بر وضعیت کاتیون‌ها، آنیون‌ها و سایر ویژگی‌های خاک و همچنین غلظت عناصر در گیاه گزارش نشده است. نتایج پژوهش‌های چان و همکاران (Chan et al., 2008) و گاسکین و همکاران (Gaskin et al., 2010) نشان داده است که کاربرد زغال زیستی با منابع اولیه مختلف می‌تواند اثرات کاملاً متفاوتی را در پاسخ‌های گیاهی و تغییرات غلظت و جذب عناصر غذایی در گیاهان مختلف داشته باشد. از

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Physical and chemical characteristics of soil used in the experiment

| *Parameter | Unite | Value |
|-----------------------|------------------------------------|-----------|
| pH _e | ----- | 7.83 |
| E _{Ce} | dS m ⁻¹ | 0.92 |
| Clay | % | 14.5 |
| Silt | % | 67.2 |
| Sand | % | 18.3 |
| Textural class (USDA) | - | Silt loam |
| CEC | cmol _c kg ⁻¹ | 9.9 |
| Organic carbon | % | 0.95 |
| Total N | % | 0.005 |
| P (ava) | (mg kg ⁻¹) | 6.5 |
| K (ava) | (mg kg ⁻¹) | 448.9 |

*CEC: Cation Exchangeable Capacity; E_{Ce}: Electrical Conductivity of soil saturation extract, Ava: Available

گرماکافت از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. مقدار کافی از هر نمونه به‌وسیله ورقه‌های آلومینیمی پوشانده شد تا شرایط دسترسی اکسیژن محدود ایجاد گردد (Komkiene & Baltreinaite, 2016). گرماکافت نمونه‌ها در کوره الکتریکی به‌طور جداگانه در دماهای ۳۵۰ و

بقایای کشاورزی و تولید زغال زیستی

بقایای گیاهان برنج، پنبه و کلزا مورد استفاده در تهیه زغال زیستی از مزارع استان گلستان جمع‌آوری شد. بقایای جمع‌آوری شده پس از هواخشک شدن، آسیاب شده و برای اطمینان از یکنواختی نمونه‌ها در طی

مزرعه به روش وزنی تأمین شد. برداشت بوته‌های گیاه ذرت ۹۶ روز پس از کاشت انجام شد. نمونه‌های گیاهی به مدت ۴۸ ساعت در درجه حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند، پس از هضم نمونه‌های گیاهی به روش اکسیداسیون خشک (Benton & Case, 1990)، غلظت سدیم و پتاسیم به تفکیک در ساقه و برگ با استفاده از دستگاه فلیم فوتومتر اندازه‌گیری شد. هم‌زمان با برداشت گیاه، از خاک گلدان‌های تحت کشت، نمونه‌برداری شد. نمونه‌های خاک پس از هواخشک شدن از الک دو میلی‌متری گذرانده شدند. سپس pH و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع، میزان سدیم محلول با استفاده از فلیم فوتومتر، کلسیم و منیزیم محلول با روش کمپلکسومتری و غلظت آنیون‌های بی‌کربنات و کلر با روش‌های تیتراسیون تعیین شدند (Page et al., 1982). سپس نسبت جذب سدیم (SAR) محاسبه شد. پتاسیم تبادلی خاک نیز با استفاده از استات آمونیوم عصاره‌گیری و با دستگاه فلیم فوتومتر قرائت شد (Page et al., 1982).

تجزیه آماری مقایسه بین تیمارهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های بقایای کشاورزی و زغال‌های زیستی مورد استفاده

برخی از ویژگی‌های مهم بقایای کشاورزی و زغال‌های زیستی تهیه شده در دماهای مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. در اثر تبدیل بقایای کشاورزی به زغال زیستی مقدار کربن آلی کاهش یافت. مقدار این کاهش در بیوچارهای تهیه شده در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به مراتب بیش‌تر بود به‌گونه‌ای که مقدار کربن آلی در زغال زیستی تهیه شده از پنبه در در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در حدود ۶۸ درصد کاهش نشان داد. مقدار این کاهش در زغال زیستی تهیه شده از پنبه در در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس نسبت به بقایای پنبه ۷۵ درصد بود. کاهش میزان کربن آلی زغال زیستی با افزایش دمای گرماکافت به کاهش بخش ناپایدار کربن نسبت داده می‌شود. پایداری بیش‌تر کربن

۷۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت با آهنگ افزایش دمای کوره حدود ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه صورت گرفت. یک شبانه روز به نمونه‌ها اجازه داده شد تا به دمای محیط برسند. سپس زغال‌های زیستی تهیه شده از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. pH و قابلیت هدایت الکتریکی مواد اولیه و زغال‌های زیستی تولیدی در عصاره ۱:۲۰ (Rajkovich et al., 2012) اندازه‌گیری شدند (جدول ۲). درصد کربن آلی با روش والکلی و بلک تعیین شد (Walkley & Black, 1934). مقدار سدیم و پتاسیم کل مواد اولیه و زغال‌های زیستی تولیدی پس از هضم نمونه‌ها به روش اکسیداسیون خشک (Benton & Case, 1990) با استفاده از دستگاه فلیم فوتومتر اندازه‌گیری شد. درصد کاهش وزن بقایا بر اثر گرماکافت و تبدیل به زغال زیستی (عملکرد زغال زیستی) نیز محاسبه شد. میزان خاکستر موجود در زغال زیستی نیز با حرارت دادن پنج گرم زغال زیستی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت بیش‌تر از هشت ساعت و توزین دوباره آن تعیین شد (Song & Guo, 2012).

آزمایش گلخانه‌ای

در این پژوهش، تأثیر زغال زیستی حاصل از بقایای کشاورزی (برنج، پنبه و کلزا) بر برخی ویژگی‌های خاک، وضعیت کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک، وزن خشک اندام هوایی و غلظت سدیم و پتاسیم در گیاه ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار به‌صورت گلدانی به اجرا درآمد. تیمارها شامل شاهد (بدون زغال زیستی) و سه نوع زغال زیستی تهیه شده از بقایای برنج، پنبه و کلزا در دماهای ۳۵۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس هر کدام با مقادیر دو و پنج درصد وزنی بودند. واحدهای آزمایشی گلدان‌های پلاستیکی حاوی پنج کیلوگرم خاک بود. سپس تعداد شش عدد بذر در هر گلدان در عمق دو سانتی‌متری خاک کاشته که پس از سبز شدن و گذشت دو هفته، تعداد بوته‌ها به چهار عدد در هر گلدان تقلیل یافت. برای حذف اثرات محیطی در طول دوره رشد، جای گلدان‌ها دو بار در هفته به‌صورت تصادفی تغییر داده شد. عملیات آبیاری و وجین علف‌های هرز با دست انجام گرفت. رطوبت خاک گلدان‌ها در طول دوره رشد گیاه در حدود ظرفیت

زیستی مرتبط دانستند. یوان و همکاران (Yuan *et al.*, 2011) اظهار داشتند که قابلیت هدایت الکتریکی و pH زغال زیستی به مقدار زیادی به محتوا و ترکیب خاکستر زغال زیستی بستگی دارد. فلزات قلیایی مثل سدیم و پتاسیم تعیین کننده pH و فلزات قلیایی خاکی مثل کلسیم و منیزیم تعیین کننده EC هستند. همچنین مقادیر EC و pH زغال زیستی به شرایط گرماکافت و نوع ماده خام بستگی دارند.

مقادیر عملکرد و محتوای خاکسترزغال‌های زیستی تهیه شده از بقایای برنج، پنبه و کلزا در دماهای مختلف گرماکافت در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقدار عملکرد زغال زیستی با افزایش دمای گرماکافت کاهش یافت و از ۴۰/۱ درصد در زغال زیستی تهیه شده از پنبه در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس تا ۱۹/۴ درصد در زغال زیستی تهیه شده از برنج در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس متغیر بود. عملکرد زغال زیستی با افزایش دما کاهش یافت. بیش‌ترین کاهش مربوط به زغال زیستی تهیه شده از بقایای برنج بود به‌گونه‌ای که مقدار عملکرد از ۳۷/۱ درصد در زغال زیستی تهیه شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به ۱۹/۴ درصد در زغال زیستی تهیه شده در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس رسید. کاهش در میزان عملکرد عمدتاً به تخریب برخی ترکیبات نظیر سلولز و همی سلولز و نیز احتراق و اکسید شدن مواد آلی با افزایش دمای گرماکافت نسبت داده می‌شود (AI-Wabel *et al.*, 2013). مرادف و همکاران (Muradov *et al.*, 2012) کاهش در مقدار عملکرد با دما را به افزایش نرخ تصعید ترکیبات آلی مرتبط دانستند. یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2004) بیان داشتند که حذف کامل رطوبت در دمای ۲۲۰ درجه سلسیوس، همی سلولز در دمای ۲۲۰ تا ۳۱۵ درجه سلسیوس و سلولز در دمای ۳۱۵ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد درحالی‌که تجزیه لیگنین در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. نوواک و همکاران (Novak *et al.*, 2009) بازده بیش‌تر زغال زیستی در دمای پایین‌تر گرماکافت را ناشی از حداقل میعان ترکیبات آلیفاتیک و هدررفت کم‌تر CH_4 ، H_2 و CO دانستند. افزون بر این آن‌ها کاهش در عملکرد زغال زیستی با افزایش دما را به دهیدراته شدن گروه‌های هیدروکسیل و تخریب حرارتی ساختمان‌های لیگنو-

زغال زیستی تولید شده در دماهای بالاتر به درصد نسبی کربن الکیل و آروماتیک، میزان تراکم کربن آروماتیک و نوع مواد اولیه مورد استفاده برای تولید زغال زیستی مرتبط است. بنابراین افزودن زغال زیستی به خاک می‌تواند مخزن بالقوه‌ای از کربن را در خاک فراهم آورد (Fang *et al.*, 2014). همچنین در اثر تبدیل بقایای کشاورزی به زغال زیستی مقادیر pH و قابلیت هدایت الکتریکی افزایش یافت. افزایش دمای تولید زغال زیستی منجر به تولید زغال‌های زیستی با pH و قابلیت هدایت الکتریکی بالاتر شد. افزایش pH و قابلیت هدایت الکتریکی در نتیجه افزایش حرارت تولید زغال زیستی توسط پژوهشگران دیگر مانند ال-وابل و همکاران (AI-Wabel *et al.*, 2013) نیز گزارش شده است. بقایای کشاورزی (برنج، پنبه و کلزا) دارای pH اسیدی بودند و تبدیل آن‌ها به زغال زیستی بسته به دمای گرماکافت دارای pH اسیدی ضعیف تا قلیایی شدید بودند. مقادیر pH در بقایای کشاورزی پایین بود (با مقادیر مشابه ۵/۹) که پس از تبدیل به زغال زیستی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت و در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس مقادیر pH در زغال‌های زیستی تهیه شده از بقایای برنج، پنبه و کلزا به ترتیب به ۹/۶، ۸/۶ و ۹/۲ رسید. این افزایش در مقدار pH عمدتاً به جدا شدن نمک‌های قلیایی از بخش آلی در اثر افزایش دمای گرماکافت نسبت داده می‌شود (AI-Wabel *et al.*, 2013). سونگ و گو (Song & Guo, 2012) بیان داشتند که افزایش pH و قابلیت هدایت الکتریکی در اثر تبدیل بقایای کشاورزی به زغال زیستی احتمالاً می‌تواند در اثر افزایش غلظت اکسیدهای فلزی (کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم)، افزایش مقدار خاکستر و همچنین جدا شدن مواد معدنی از بخش آلی در اثر گرماکافت باشد. سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2010) بیان داشتند که pH زغال زیستی در دامنه نسبتاً اسیدی تا قلیایی متغیر است و افزایش دمای گرماکافت عموماً سبب افزایش pH زغال زیستی می‌شود. پایین بودن pH زغال زیستی تولید شده در دمای گرماکافت ۳۵۰ درجه سلسیوس به تولید اسیدهای آلی و ترکیبات فنلی ناشی از تجزیه سلولز و همی سلولز نسبت داده شده است (Abe *et al.*, 1998). کوکانا و همکاران (Kookana *et al.*, 2011) افزایش pH زغال زیستی با افزایش دمای گرماکافت را به افزایش نسبی فلزات قلیایی در زغال

سلولز مرتبط دانستند. برعکس مقدار عملکرد زغال زیستی، مقدار محتوای خاکستر زغال زیستی با افزایش دمای گرماکافت افزایش یافت. درصد خاکستر از ۱۲/۵، ۱/۵ و ۱۱/۵ درصد به ترتیب در بقایای برنج، پنبه و کلزا به ۳۲، ۱۱/۵ و ۱۹ درصد در زغال‌های زیستی تهیه شده از این بقایا در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس افزایش یافت. از چیمین و ارسوی-مریچیویو (Ozçimen & Ersoy-Meriçboyu, 2010) با به دست آوردن یافته‌های مشابه مقدار بالاتر خاکستر در زغال زیستی را ناشی از باقی ماندن مواد معدنی تشکیل دهنده خاکستر در زغال زیستی در طی کربن‌سازی دانستند. افزایش مقدار خاکستر و کاهش عملکرد زغال زیستی در نتیجه افزایش حرارت تولید زغال زیستی توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (Al-Wabel *et al.*, 2013).

جدول ۲- ویژگی‌های بقایای کشاورزی و زغال‌های زیستی

Table 2. Properties of agricultural residues and biochars

| Organic compound | pH | EC | O.C | Biochar yield | Biochar ash | Total Na | Total K |
|----------------------|--------------------|-----|------|---------------|-------------|----------|---------|
| | dS m ⁻¹ | | | % | | | |
| Rice residues | 5.9 | 3.6 | 50.1 | - | 12.5 | 0.88 | 0.97 |
| Cotton residues | 5.9 | 0.5 | 56.3 | - | 1.5 | 0.70 | 0.50 |
| Rapeseed residues | 5.9 | 2.7 | 52.1 | - | 11.5 | 0.26 | 0.11 |
| Rice biochar 350 | 6.8 | 4.5 | 46.1 | 37.1 | 22 | 1.37 | 1.73 |
| Cotton biochar 350 | 6.9 | 0.5 | 42.8 | 40.1 | 10.5 | 0.30 | 0.41 |
| Rapeseed biochar 350 | 6.8 | 5.2 | 48.9 | 34.1 | 12.5 | 0.70 | 2.77 |
| Rice biochar 700 | 9.6 | 5.0 | 23.7 | 19.4 | 32 | 1.19 | 2.36 |
| Cotton biochar 700 | 8.6 | 0.9 | 13.9 | 28.5 | 11.5 | 0.38 | 1.08 |
| Rapeseed biochar 700 | 9.2 | 4.5 | 22.2 | 28.0 | 19 | 0.49 | 3.58 |

نتایج تجزیه واریانس اثر زغال‌های زیستی حاصل از بقایای کشاورزی (برنج، پنبه و کلزا) بر ویژگی‌های خاک در جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل از تجزیه آماری، اثرات اصلی و متقابل فاکتورها بر قابلیت هدایت الکتریکی، pH، غلظت‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر و بی‌کربنات محلول و نیز پتاسیم تبدالی معنی‌دار بود لیکن اثر متقابل زغال زیستی، سطح و دما بر قابلیت هدایت الکتریکی معنی‌دار نبود (جدول ۳).

همچنین نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که مقدار محتوای خاکستر در مواد اولیه و زغال‌های زیستی حاصل از آن‌ها در پنبه کم‌تر از برنج و کلزا بود. آمونته و جوزف (Amonette & Joseph, 2009) با بدست آوردن نتایج مشابه گزارش کردند که پایین بودن مقدار خاکستر در زغال زیستی تهیه شده از مواد سخت بافت و چوبی نسبت به گیاهان علفی و گاه می‌تواند ناشی از مقدار پایین سیلیس در گیاهان چوبی باشد.

تأثیر بیوچارهای بر ویژگی‌های خاک

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر زغال‌های زیستی بر ویژگی‌های خاک

Table 3. Analysis of variance for the application of biochars on soil properties

| S.O.V | df | Ms | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----|----------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|------------|-----------------|-------------------------------|----------|--------------------|
| | | SAR | Mg _{sol} | Ca _{sol} | Na _{sol} | K _{sol} | Ex. K | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | pH | EC |
| Biochar | 2 | 67.64*** | 34.14*** | 705.09*** | 719*** | 69.39*** | 1628299*** | 1289*** | 31.84*** | 0.142*** | 23.89*** |
| Level | 2 | 46.48*** | 258.29*** | 203.66*** | 649.5*** | 133.69*** | 6622433*** | 1308*** | 104.58*** | 0.129*** | 27.99*** |
| Temperature | 1 | 0.425*** | 5.78** | 61.23*** | 22.51** | 4.73*** | 504043*** | 13.17*** | 137.5*** | 0.213*** | 0.75** |
| Biochar × Level | 4 | 22.39*** | 10.77*** | 239.8*** | 248.5*** | 42.18*** | 664384*** | 442.16*** | 14.24*** | 0.11*** | 8.15*** |
| Biochar × Temperature | 2 | 1.39*** | 5.44** | 5.05*** | 23.66*** | 3.42*** | 43950*** | 14.10*** | 6.93** | 0.037** | 0.3** |
| Level × Temperature | 2 | 0.11*** | 6.48** | 21.28*** | 5.65 ^{ns} | 3.62*** | 223685*** | 4.5*** | 36.5*** | 0.07*** | 0.32** |
| Biochar × Level × Temperature | 4 | 0.68** | 29.46*** | 14.64*** | 15.13*** | 1.3*** | 30965*** | 5.03*** | 2.18* | 0.02* | 0.07 ^{ns} |
| C.V | | 4.92 | 14.33 | 4.52 | 17.63 | 4.17 | 3.87 | 3.8 | 3.61 | 0.92 | 9.53 |

***, **, * and ns, significant at the 0.1, 1, 5% levels probability and non significant, respectively.

متفاوتی از سدیم، پتاسیم، منیزیم و سایر فلزات موجود در زغال زیستی باشد. سونگ و گو (Song & Guo, 2012) گزارش کردند که کاربرد زغال زیستی باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک شد؛ از این رو، به دلیل افزایش شوری خاک و احتمال صدمه به بذر و نهال گیاهان باید در استفاده از آن دقت کافی را به کار برد.

مقایسه میانگین اثرات اصلی (جدول ۴) نشان داد که نوع زغال زیستی، دما و نیز سطح کاربرد بر میزان pH خاک معنی دار بود. حداقل مقدار pH در خاک در تیمار زغال زیستی تهیه شده از بقایای برنج و بیشترین pH در خاک در تیمار زغال زیستی تولید شده از پنبه به دست آمد. افزایش دمای گرماکافت از ۳۵۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش معنی دار pH در خاک شد. این نتیجه با داده‌های جدول ۲ (ویژگی‌های زغال‌های زیستی تولیدی) هم‌خوانی دارد که با افزایش دمای گرماکافت، pH زغال زیستی نیز افزایش یافت. کاربرد سطوح دو و پنج درصد وزنی زغال زیستی سبب افزایش معنی دار pH خاک شد هرچند افزایش میزان کاربرد از دو به پنج درصد وزنی زغال زیستی اثر معنی‌داری بر میزان pH نداشت. مطالعات آلزیر و همکاران (Elzobair *et al.*, 2016) نشان داد که در خاک‌های آهکی استفاده از زغال زیستی باعث تغییر اندک در pH خاک می‌شود که این تغییر به خاصیت بافری شدید این خاک‌ها نسبت داده شده است. سونگ و گو (Song & Guo, 2012) علت اصلی افزایش pH خاک با کاربرد زغال زیستی را به کربنات‌های قلیایی موجود در آن مرتبط دانستند. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که کاربرد زغال‌های زیستی مختلف سبب افزایش pH خاک شده است (Zhang *et al.*, 2016; Masulili *et al.*, 2007; Chan *et al.*, 2010) که نتایج آن‌ها با مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد. آن‌ها دلیل افزایش pH خاک در اثر کاربرد زغال زیستی را به دمای تولید زغال زیستی و نوع ماده اولیه‌ای که زغال زیستی از آن تولید می‌شود مرتبط دانستند. معمولاً زغال‌های زیستی تولید شده در دمای بالا دارای pH بالا هستند (Zhang *et al.*, 2016; Masulili *et al.*, 2010; Chan *et al.*, 2007). در پژوهش حاضر ماده اولیه استفاده شده برای تهیه زغال زیستی دارای pH پایین بودند و نیز زغال زیستی تولید شده در

نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی در جدول ۴ ارائه است. نتایج نشان داد که همه زغال‌های زیستی منجر به افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک شدند. بیشترین افزایش در سطح پنج درصد مشاهده شد؛ به گونه‌ای نسبت به شاهد (بدون کاربرد زغال زیستی) سبب افزایش ۶۲ درصد در میزان قابلیت هدایت الکتریکی شد. افزون بر این، مقدار افزایش بستگی به نوع زغال زیستی مورد استفاده داشت، به طوری که زغال زیستی کلزا با مقدار ۲/۹ دسی‌زیمنس بر متر بالاترین قابلیت هدایت الکتریکی را موجب شد. هرچند تفاوت معنی‌داری بین مقدار افزایش قابلیت هدایت الکتریکی به وسیله زغال زیستی حاصل از بقایای کلزا و زغال زیستی بقایای برنج (۲/۸۶ دسی‌زیمنس بر متر) وجود نداشت. کمترین مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در خاک در زغال‌های زیستی حاصل از بقایای پنبه به دست آمد که با قابلیت هدایت الکتریکی خود بقایای پنبه (۰/۴۶ دسی‌زیمنس بر متر) و زغال‌های زیستی حاصل از بقایای پنبه (۰/۹۴ و ۰/۵۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب در زغال‌های زیستی تولید شده دماهای ۳۵۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس) مطابقت داشت (جدول ۲). خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی ۳۵۰ درجه سلسیوس تأثیر بیش‌تری بر افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک داشت. با توجه به قابلیت هدایت الکتریکی مواد اولیه برای تولید زغال زیستی این نتیجه دور از انتظار نیست. افزایش بیش‌تر در قابلیت هدایت الکتریکی خاک در خاک‌های تیمار شده با زغال‌های زیستی تولید شده با دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس را می‌توان به تجزیه سریع‌تر این مواد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه شده در دمای بالاتر و در نتیجه تولید بیش‌تر یا سریع‌تر نمک‌های محلول نسبت داد (Zolfi, 2016; Bavariani *et al.*, 2016). چینتالا و همکاران (Chintala *et al.*, 2013) بیان داشتند که افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک در اثر کاربرد زغال زیستی احتمالاً به دلیل حضور نمک‌های محلول در زغال زیستی و بالاتر بودن قابلیت هدایت الکتریکی آن نسبت به هدایت الکتریکی خاک می‌باشد. کرر و همکاران (Karer *et al.*, 2013) نیز افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک در اثر کاربرد زغال زیستی چوب راش را گزارش دادند. آنان بیان داشتند که دلیل این امر می‌تواند وجود مقادیر

دمای ۳۵۰ نیز دارای pH نسبتاً پایین بود؛ از این رو، افزایش دمای تولید به ۷۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش قابل توجه در میزان pH شد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود تولید زغال زیستی در دمای پایین صورت گیرد.

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های اثر زغال‌های زیستی، دما و سطح کاربرد بر ویژگی‌های خاک

Table 4. Means comparison of the effects of biochars, temperature and application rates on soil properties

| Treatment | SAR (mmol ⁺ l ⁻¹) ^{1/2} | Mg _{sol} (mmol ⁺ l ⁻¹) | Ca _{sol} (mmol ⁺ l ⁻¹) | Na _{sol} (mmol ⁺ l ⁻¹) | K _{sol} (mmol ⁺ l ⁻¹) | Ex. K (mg kg ⁻¹) | Cl ⁻ (mmol ⁺ l ⁻¹) | HCO ₃ ⁻ (mmol ⁺ l ⁻¹) | pH | EC (dS m ⁻¹) |
|-------------|--|---|---|---|--|---------------------------------|---|---|-------------------|-----------------------------|
| Biochar | | | | | | | | | | |
| Rice | 4.3 ^a | 6.13 ^b | 11.83 ^b | 13.66 ^a | 2.37 ^b | 931.71 ^b | 15.96 ^a | 22.68 ^a | 7.71 ^c | 2.86 ^a |
| Cotton | 1.12 ^c | 5.03 ^c | 7.78 ^c | 2.86 ^c | 0.875 ^c | 608.15 ^c | 1.38 ^c | 22.39 ^a | 7.86 ^a | 1.15 ^b |
| Rapeseed | 1.78 ^b | 7.41 ^a | 18.51 ^a | 6.81 ^b | 4.26 ^a | 1123.5 ^a | 7.36 ^b | 20.56 ^b | 7.82 ^b | 2.9 ^a |
| Temperature | | | | | | | | | | |
| 350 | 2.48 ^a | 6.47 ^a | 13.63 ^a | 8.38 ^a | 2.25 ^b | 804.12 ^b | 8.66 ^a | 23.26 ^a | 7.47 ^b | 2.4 ^a |
| 700 | 2.33 ^b | 5.91 ^b | 11.78 ^b | 7.21 ^b | 2.76 ^a | 971.46 ^a | 7.81 ^b | 20.5 ^b | 7.85 ^a | 2.2 ^b |
| Rate (%) | | | | | | | | | | |
| 0 | 1.04 ^c | 2.5 ^c | 10.04 ^c | 2.64 ^c | 0.799 ^c | 373.8 ^c | 0.9 ^c | 23.25 ^a | 7.71 ^b | 1.33 ^c |
| 2 | 2.35 ^b | 7.31 ^b | 11.75 ^b | 7.31 ^b | 1.52 ^b | 865.8 ^b | 8.15 ^b | 19.47 ^b | 7.85 ^a | 2.11 ^b |
| 5 | 3.82 ^a | 8.76 ^a | 15.98 ^a | 13.37 ^a | 5.19 ^a | 1423.7 ^a | 15.16 ^a | 22.91 ^a | 7.84 ^a | 3.46 ^a |

In each column, common letters demonstrate not significant at 0.05 probability levels

داشت لیکن در مورد پتاسیم (محلول و تبادل) بیش‌ترین مقادیر در خاک در هنگام استفاده از زغال‌های زیستی تولید شده در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس به- دست آمد. افزودن سطوح زغال زیستی (دو و پنج درصد وزنی) سبب افزایش معنی‌دار غلظت کاتیون‌ها و آنیون-های محلول در خاک نسبت به شاهد (بدون مصرف زغال زیستی) بجز غلظت بی‌کربنات شد. بیش‌ترین مقادیر افزایش نسبت به شاهد در مورد کلر و پتاسیم محلول به ترتیب به میزان ۹۴ و ۸۵ درصد رخ داد. لیانگ و همکاران (Liang *et al.*, 2006) نیز افزایش بازهای تبدالی پس از کاربرد زغال زیستی را گزارش کرد. نجفی قیری (Najafi-Ghiri, 2014) تأثیر کاربرد زغال زیستی را بر ویژگی‌های خاک بررسی نمود. یافته‌های ایشان نشان داد که مصرف زغال زیستی باعث افزایش معنی‌دار قابلیت هدایت الکتریکی و پتاسیم محلول و تبدالی ایشان افزایش پتاسیم تبدالی را ناشی از ارتباط تعادلی بین شکل‌های پتاسیم دانست. بدین معنی که با کاربرد زغال زیستی به خاک، پتاسیم موجود در آن وارد فاز محلول شده و به علت تعادل بین پتاسیم محلول و تبدالی، یون‌های پتاسیم از محلول خاک به نقاط تبدالی پخش می‌شوند و در نتیجه هر دو شکل محلول و تبدالی پتاسیم افزایش می‌یابد. نیگوسی و همکاران (Nigussie *et al.*, 2012) تأثیر زغال زیستی بر ویژگی‌های خاک را مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که زغال زیستی

اثر اصلی نوع زغال زیستی (برنج، کلزا و پنبه) بر کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول در جدول ۴ ارائه شده است. بیش‌ترین میزان سدیم و کلر در خاک در زغال‌های زیستی حاصل از بقایای برنج به دست آمد درحالی‌که بیش‌ترین مقادیر کلسیم، منیزیم و پتاسیم محلول و نیز پتاسیم تبدالی در خاک در هنگام کاربرد زغال‌های زیستی تولید شده از بقایای کلزا به دست آمد. استفاده از زغال زیستی حاصل از بقایای پنبه سبب کم‌ترین مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌های ذکر شده شد که با قابلیت هدایت الکتریکی خود بقایای پنبه (۰/۴۶ دسی‌زیمنس بر متر) و زغال‌های زیستی حاصل از بقایای پنبه (۰/۵۵ و ۰/۹۴ دسی‌زیمنس بر متر به- ترتیب در زغال‌های زیستی تولید شده دماهای ۳۵۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس) مطابقت داشت (جدول ۲). یون بی‌کربنات خاک روند متفاوتی داشت به گونه‌ای که در خاک‌هایی که زغال زیستی برنج و پنبه دریافت نموده بودند بالاترین مقادیر را داشت (به ترتیب ۲۲/۶۸ و ۲۲/۳۹ میلی‌مول بر لیتر) که البته تا حدی مطابق با pH بالای خاک در هنگام کاربرد زغال‌های زیستی تولید شده از پنبه بود که بیش‌ترین مقدار pH را در خاک ایجاد نمود (جدول ۴). بیش‌ترین مقادیر سدیم، کلسیم، منیزیم، کلر و بی‌کربنات در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد که با مقادیر این کاتیون‌ها و آنیون‌ها در خاک در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس تفاوت معنی‌دار

زیستی، پتاسیم محلول خاک افزایش یافت. هافلی و همکاران (Haefele *et al.*, 2011) نشان دادند اثر زغال زیستی حاصل از بقایای برنج بر عناصر قلیایی خاکی سبب افزایش قابلیت استفاده پتاسیم خاک شد اما مقدار کلسیم و منیزیم و سدیم قابل تبادل خاک کاهش یافت. نسبت جذب سدیم به عنوان غلظت نسبی سدیم بر روی جذر متوسط غلظت کلسیم و منیزیم در محلول خاک می باشد. با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) افزودن زغال زیستی به خاکها دارای تأثیر معنی داری بر نسبت جذب سدیم خاک بوده است. مقایسه میانگین-های تیمارهای مختلف زغال زیستی بیانگر این می باشد که نوع زغال زیستی، دما و سطح کاربرد زغال زیستی نسبت جذب سدیم در خاک را تغییر داد، به گونه ای که بیشترین مقادیر نسبت جذب سدیم در خاک در زغال زیستی حاصل از بقایای برنج، زغال زیستی تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس و سطح پنج درصد زغال زیستی به دست آمد. افزودن دو و پنج درصد زغال زیستی سبب افزایش به ترتیب ۵۴ و ۷۳ درصدی در مقدار نسبت جذب سدیم شد که با نتایج به دست آمده برای قابلیت هدایت الکتریکی و غلظت های کاتیون های سدیم، کلسیم و منیزیم مطابقت دارد.

موجب افزایش pH، قابلیت هدایت الکتریکی و بازهای تبدالی می شود. نتایج مطالعه ماستو و همکاران (Masto *et al.*, 2013) افزایش pH به میزان ۹ درصد، افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک به میزان ۵۰ درصد و افزایش پتاسیم به میزان ۱۱۸ درصد بر اثر کاربرد زغال زیستی را نشان داد. ایشان افزایش پتاسیم خاک را به افزوده شدن مستقیم پتاسیم توسط زغال زیستی (که در خاکستر زغال زیستی موجود است) نسبت دادند. نتایج مطالعه زلفی باوریانی و همکاران (Zolfi Bavariani *et al.*, 2016) نشان داد که افزودن زغال زیستی کود مرغی باعث افزایش معنی دار pH، قابلیت هدایت الکتریکی و پتاسیم قابل دسترس خاک شد و بالاترین میزان پتاسیم قابل جذب در خاک در زغال زیستی تهیه شده در ۳۰۰ درجه سلسیوس (در بین دماهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس) مشاهده شد. هاولین و همکاران (Havlin *et al.*, 1999) گزارش کردند که ترکیب های آلی می توانند مقداری پتاسیم از دست رفته خاک را جبران کنند؛ پتاسیم در ترکیب های آلی به فرم معدنی وجود دارد که افزودن این ترکیبات به خاک باعث رهاسازی مقدار زیادی پتاسیم به محلول خاک می شود. لایرد و همکاران (Laird *et al.*, 2010) نیز گزارش کردند که به دلیل بالا بودن پتاسیم در زغال های

جدول ۵- مقایسه میانگین های اثرات متقابل زغال های زیستی، دما و سطح کاربرد بر ویژگی های خاک

Table 5. Means comparison of the interaction effects of biochars, temperature and application rates on soil properties

| Treatment | SAR | Mg _{sol} | Ca _{sol} | Na _{sol} | K _{sol} | Ex. K | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | pH | EC | Rate (%) |
|----------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|----------|
| Control | 1.04 ^{hi} | 2.5 ^e | 10.4 ^g | 2.64 ^g | 0.799 ⁱ | 373.8 ⁱ | 0.9 ^j | 23.25 ^f | 7.71 ^d | 1.33 ^e | 0 |
| Rice biochar 350 | 4.26 ^c | 9.3 ^c | 11.7 ^f | 13.79 ^{dc} | 1.51 ^g | 844.15 ^f | 15.2 ^d | 23.5 ^d | 7.68 ^{de} | 2.72 ^c | 2 |
| Rice biochar 350 | 7.17 ^b | 7 ^d | 15.5 ^d | 24 ^b | 4.32 ^d | 1434 ^c | 20.8 ^b | 27.25 ^a | 7.56 ^e | 4.53 ^b | 5 |
| Cotton biochar 350 | 1.46 ^{hig} | 3.3 ^e | 8.1 ^h | 2.72 ^{fg} | 0.95 ⁱ | 583.9 ^h | 1.8 ⁱ | 20.62 ^e | 7.75 ^d | 1 ^{ef} | 2 |
| Cotton biochar 350 | 1.32 ^{fg} | 9 ^c | 6.7 ⁱ | 3.7 ^{fg} | 1.04 ^{hi} | 649.02 ^g | 2.7 ^h | 26.12 ^b | 7.87 ^{bc} | 1.35 ^e | 5 |
| Rapeseed biochar 350 | 2.04 ^e | 12 ^a | 17.4 ^c | 7.85 ^e | 1.89 ^f | 984.2 ^e | 8.7 ^f | 19.62 ^f | 7.94 ^b | 2.86 ^c | 2 |
| Rapeseed biochar 350 | 3.26 ^d | 10.2 ^{bc} | 32.1 ^a | 15.01 ^c | 8.09 ^b | 1619.7 ^b | 16.1 ^c | 22.5 ^c | 7.76 ^{dc} | 5.19 ^a | 5 |
| Rice biochar 700 | 4.26 ^c | 6.1 ^d | 10.3 ^g | 12.19 ^d | 1.48 ^g | 944.2 ^e | 15.9 ^c | 18.5 ^h | 7.91 ^b | 2.83 ^c | 2 |
| Rice biochar 700 | 8.05 ^a | 9.4 ^c | 12.7 ^e | 26.71 ^a | 5.33 ^c | 1619.7 ^b | 23.1 ^a | 20.37 ^g | 7.71 ^d | 4.4 ^b | 5 |
| Cotton biochar 700 | 0.95 ⁱ | 7 ^d | 5.6 ^j | 2.39 ^g | 0.529 ^k | 699.05 ^g | 0.8 ^j | 17.87 ^h | 7.91 ^b | 0.94 ^f | 2 |
| Cotton biochar 700 | 1.24 ^{fg} | 5.9 ^d | 5.5 ^j | 2.96 ^{fg} | 1.1 ^h | 969.2 ^e | 1.2 ^j | 23.25 ^f | 8.23 ^a | 0.95 ^f | 5 |
| Rapeseed biochar 700 | 1.43 ^f | 6.2 ^d | 17.4 ^c | 4.92 ^f | 2.75 ^e | 1139.3 ^d | 6.5 ^g | 16.75 ⁱ | 7.88 ^{bc} | 2.33 ^d | 2 |
| Rapeseed biochar 700 | 1.88 ^e | 11.1 ^{ab} | 23.4 ^b | 7.82 ^d | 11.27 ^a | 2550.1 ^a | 11.1 ^e | 18 ^h | 7.89 ^b | 4.36 ^b | 5 |

In each column, common letters demonstrate not significant at 0.05 probability levels

های خاک در جدول ۵ آورده شده است. بیشترین مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی و pH در سطوح پنج

اثرات متقابل نوع، سطح کاربرد و دمای تهیه زغال زیستی بر برخی ویژگی های و غلظت کاتیون ها و آنیون-

هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پس از برداشت در تیمارهای زغال‌های زیستی تهیه شده از بقایای برنج، پنبه و کلزا به ترتیب ۲/۸۶، ۱/۱۵ و ۲/۹ دسی زیمنس بر متر می‌باشد. ماجور و همکاران (Major *et al.*, 2010) بیان کردند افزایش عملکرد در اثر کاربرد زغال زیستی در خاک می‌تواند به دلیل اثرات مستقیم (عناصر غذایی موجود در بقایا که طی فرآیند تجزیه حرارتی به زغال زیستی تبدیل شده) و غیرمستقیم (بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک) باشد. افزودن سطوح دو و پنج درصد وزنی زغال زیستی نیز موجب افزایش معنی‌دار وزن خشک گیاه نسبت به شاهد شد؛ هرچند بین دو سطح دو و پنج درصد وزنی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. اثر دمای تهیه زغال زیستی تهیه شده از بقایای مختلف (برنج، پنبه و کلزا) بر وزن خشک شاخساره معنی‌دار نبود. این عدم معنی‌داری نشان‌دهنده آن است که متفاوت بودن نوع ماده اولیه (برنج، پنبه و کلزا) در تهیه زغال زیستی، تأثیر بیشتری از متفاوت بودن دمای تولید (۳۵۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس) بر رشد گیاه داشت. راجکویچ و همکاران (Rajkovich *et al.*, 2012) نیز در مطالعه‌ای در مورد تأثیر نوع ماده اولیه و دمای تولید زغال زیستی بر رشد ذرت گزارش دادند که تأثیر نوع ماده اولیه به مراتب بیشتر از تأثیر دمای تولید زغال زیستی است.

نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی (جدول ۷) نشان داد که در بین سه نوع زغال زیستی تهیه شده از بقایای کشاورزی (برنج، پنبه و کلزا)، بیش‌ترین مقادیر سدیم برگ و ساقه در گیاه در هنگام کاربرد زغال زیستی حاصل از بقایای برنج به‌دست آمد درحالی‌که در مورد پتاسیم برگ و ساقه، زغال زیستی تهیه شده از بقایای کلزا بیش‌ترین تأثیر را داشت که این نتیجه با مقادیر سدیم و پتاسیم زغال‌های زیستی تولیدی (جدول ۲) هم‌خوانی داشت. هم‌چنین نتایج نشان داد سطوح دو و پنج درصد وزنی سبب افزایش معنی‌دار سدیم و پتاسیم برگ و ساقه نسبت به تیمار شاهد (بدون مصرف زغال زیستی) شد. اثر دما بر غلظت سدیم و پتاسیم برگ و ساقه گیاه متناسب با افزایش دمای تولید زغال زیستی بود به‌گونه‌ای که دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس سبب افزایش سدیم برگ و ساقه شد؛ درحالی‌که افزایش پتاسیم برگ و ساقه گیاه در هنگام استفاده از زغال‌های

درصد زغال‌های زیستی کلزا ۳۵۰ و پنبه ۷۰۰ به‌دست آمد. بیش‌ترین افزایش در غلظت آنیون‌ها، سدیم و نیز نسبت جذب سدیم در سطح پنج درصد زغال‌های زیستی حاصل از بقایای برنج دیده شد. درحالی‌که زغال‌های زیستی حاصل از بقایای کلزا تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس بیش‌ترین تأثیر بر غلظت کلسیم و منیزیم محلول خاک را داشتند. این نتایج با داده‌های جدول ۲ (ویژگی‌های زغال‌های زیستی تولیدی) هم‌خوانی دارد. زغال‌های زیستی حاصل از بقایای پنبه کم‌ترین مقادیر را در غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها داشتند و تنها سبب افزایش مقدار pH نسبت به خاک شاهد شدند و به‌نظر می‌رسد برای جلوگیری از افزایش غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها و به‌دنبال آن، شوری خاک مناسب‌تر باشند؛ به‌گونه‌ای که افزایش سطح کاربرد از دو به پنج درصد زغال‌های زیستی حاصل از بقایای پنبه نیز اثر معنی‌داری بر افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک نداشت.

تأثیر زغال‌های زیستی بر وزن خشک و غلظت سدیم و پتاسیم اندام هوایی

در رابطه با اثر زغال زیستی بر عملکرد گیاه نتایج متفاوتی گزارش شده است. تعدادی از مطالعات عدم اثرگذاری معنی‌دار و برخی اثر مثبت زغال زیستی را گزارش کرده‌اند (Carter *et al.*, 2013; Vaccari *et al.*, 2011). هر چند تعدادی از مطالعات نیز اثر منفی زغال زیستی بر رشد گیاه را گزارش کرده‌اند (Jeffery *et al.*, 2012; Schultz & Bruno, 2011). نتایج تجزیه واریانس اثر زغال‌های زیستی حاصل از بقایای کشاورزی (برنج، پنبه و کلزا) بر وزن خشک و غلظت سدیم و پتاسیم اندام هوایی گیاه ذرت در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی (جدول ۷) نشان داد که نوع زغال زیستی تهیه شده از بقایای کشاورزی (برنج، پنبه و کلزا) و سطح کاربرد (دو و پنج درصد وزنی) بر وزن خشک اندام هوایی گیاه معنی‌دار بود به‌گونه‌ای که بیش‌ترین وزن خشک گیاه در هنگام افزودن زغال زیستی حاصل از بقایای پنبه با میانگین ۶/۹۸ گرم در گیاه به‌دست آمد. به‌نظر می‌رسد یکی از عوامل تولید وزن خشک بیش‌تر در هنگام کاربرد زغال زیستی بقایای برنج نسبت به دو نوع دیگر زغال زیستی، تأثیر منفی قابلیت هدایت الکتریکی باشد به‌گونه‌ای که قابلیت

زیستی تهیه شده در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس دیده شد. نکته مهم دیگر کاهش نسبت سدیم به پتاسیم برگ و ساقه در اثر کاربرد زغال زیستی بود، بدین مفهوم که مقدار این نسبت در سطح پنج درصد زغال زیستی نسبت به شاهد و سطح دو درصد وزنی کاهش یافت.

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر کاربرد زغال‌های زیستی بر وزن خشک و غلظت سدیم و پتاسیم اندام هوایی

Table 6. Analysis of variance for the application of biochars on dry weight and Na and K concentration of shoot

| S.O.V | df | Ms | | | | | | |
|-------------------------------|----|---------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|
| | | Shoot dry weight | Na/K of stem | concentration of stem K | concentration of stem Na | Na/K of leaf | concentration of leaf K | concentration of leaf Na |
| Biochar | 2 | 14.26*** | 0.0006*** | 12.85*** | 0.004*** | 0.0001*** | 0.647*** | 0.0002** |
| Level | 2 | 4.95*** | 0.0023*** | 37.83*** | 0.005*** | 0.00008** | 1.27*** | 0.002** |
| Temperature | 1 | 0.088 ^{ns} | 0.00002*** | 0.146 ^{ns} | 0.001 ^{ns} | 0.0008*** | 0.088 ^{ns} | 0.004*** |
| Biochar × Level | 4 | 3.87*** | 0.0001*** | 3.56*** | 0.002*** | 0.0007*** | 0.146** | 0.0002** |
| Biochar × Temperature | 2 | 1.18* | 0.000003*** | 0.011 ^{ns} | 0.0001 ^{ns} | 0.00008** | 0.004 ^{ns} | 0.0003*** |
| Level × Temperature | 2 | 0.974* | 0.000009*** | 0.082 ^{ns} | 0.0003 ^{ns} | 0.00027*** | 0.025 ^{ns} | 0.0012*** |
| Biochar × Level × Temperature | 4 | 3.23*** | 0.000008*** | 0.028 ^{ns} | 0.0002 ^{ns} | 0.00003*** | 0.001 ^{ns} | 0.0001** |
| C.V | | 7.55 | 10.64 | 6.33 | 10.17 | 10.33 | 7.11 | 7.97 |

***, **, * and ns, significant at the 0.1, 1, 5% levels probability and non significant, respectively.

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های اثر زغال‌های زیستی، دما و سطح کاربرد بر وزن خشک و غلظت سدیم و پتاسیم اندام هوایی

Table 7. Means comparison of the effects of biochars, temperature and application rates on dry weight and Na and K concentration of shoot

| Treatment | Shoot dry weight | Na/K of stem | concentration of stem K | concentration of stem Na | Na/K of leaf | concentration of leaf K | concentration of leaf Na |
|--------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| (g plant ⁻¹) | (%) | | | | | | |
| Biochar | | | | | | | |
| Rice | 6.92 ^a | 0.033 ^b | 4.04 ^b | 0.13 ^a | 0.032 ^a | 2.37 ^b | 0.076 ^a |
| Cotton | 6.98 ^a | 0.038 ^a | 2.94 ^c | 0.11 ^b | 0.031 ^a | 2.31 ^b | 0.072 ^b |
| Rapeseed | 5.62 ^b | 0.025 ^c | 4.33 ^a | 0.11 ^b | 0.027 ^b | 2.57 ^a | 0.068 ^c |
| Temperature | | | | | | | |
| 350 | 6.54 ^a | 0.032 ^a | 3.72 ^a | 0.12 ^a | 0.033 ^a | 2.38 ^a | 0.079 ^a |
| 700 | 6.47 ^a | 0.031 ^a | 3.82 ^a | 0.12 ^a | 0.026 ^b | 2.45 ^a | 0.065 ^b |
| Rate (%) | | | | | | | |
| 0 | 6 ^b | 0.046 ^a | 2.38 ^c | 0.11 ^b | 0.031 ^a | 2.17 ^c | 0.068 ^b |
| 2 | 6.65 ^a | 0.027 ^b | 4.11 ^b | 0.11 ^b | 0.031 ^a | 2.44 ^b | 0.075 ^a |
| 5 | 6.88 ^a | 0.028 ^b | 4.82 ^a | 0.14 ^a | 0.028 ^b | 2.63 ^a | 0.073 ^a |

In each column, common letters demonstrate not significant at 0.05 probability levels

بقایای گیاهی در سه دمای متفاوت (۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس) باعث افزایش جذب پتاسیم در گیاه ذرت شد؛ به طوری که غلظت این عنصر در ذرت به مقدار ۲۸۳ درصد افزایش یافت. ایشان دریافتند که ماده خام و دمای گرم‌کافت زغال زیستی بر غلظت پتاسیم در گیاه مؤثر است. فرهنگی-آبریز و ترابیان (Farhangi-Abri & Torabian, 2018) بیان داشتند که زغال زیستی حاوی مقدار زیادی از عناصر غذایی ضروری از جمله پتاسیم

لاشاری و همکاران (Lashari et al., 2015) و اختر و همکاران (Akhtar et al., 2015a) نیز کاهش نسبت سدیم به پتاسیم و افزایش غلظت پتاسیم در گندم و سیب‌زمینی را در اثر کاربرد زغال زیستی گزارش کردند. علی و همکاران (Ali et al., 2017) نیز کاهش جذب سدیم و افزایش جذب پتاسیم گیاه در اثر کاربرد زغال زیستی را مشاهده نمودند. یو و همکاران (Yu et al., 2014) گزارش کردند که تهیه شش نوع زغال زیستی از

گرماکافت و تصعید برخی از عناصر، زغال زیستی حاصله از عناصری مانند پتاسیم غنی تر شود (Zolfi Bavariani *et al.*, 2016). اثرات متقابل نوع، سطح کاربرد و دمای تهیه زغال زیستی بر وزن خشک و غلظت سدیم و پتاسیم اندام هوایی گیاه ذرت در جدول ۸ آورده شده است. بیشترین میزان وزن خشک اندام هوایی در تیمار زغال زیستی برنج ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و سطح دو درصد وزنی به‌دست آمد. سطح دو درصد وزنی تیمار زغال زیستی پنبه ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد بالاترین مقدار سدیم برگ و سطح پنج درصد تیمارهای بیوجارهای برنج ۳۵۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بالاترین مقدار سدیم ساقه را داشتند. درحالی‌که در مورد پتاسیم، سطح پنج درصد وزنی زغال زیستی کلزا دمای ۷۰۰ درجه سانتی-گراد بیشترین مقادیر در برگ و ساقه را داشت.

بوده که افزایش دسترسی این عناصر در خاک می‌تواند باعث کاهش جذب سدیم در گیاهان شود. لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2014)، نیگونی و همکاران (Nigussie *et al.*, 2012) و اینال و همکاران (Inal *et al.*, 2015) بهبود شرایط حاصلخیزی در خاک در اثر افزوده شدن زغال زیستی را ناشی از افزایش غلظت پتاسیم در گیاهان رشد یافته در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی عنوان نمودند. با توجه به افزایش غلظت پتاسیم در ساختار بیوجار با افزایش دمای گرماکافت (جدول ۲)، این نتایج دور از انتظار نمی‌باشد. تصعید عناصر مختلف از ساختار زیست‌توده در اثر تبدیل آن به زغال زیستی، تحت تأثیر دمای تصعید این عناصر می‌باشد. پتاسیم در دامنه ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس تصعید می‌شود. لذا انتظار می‌رود با افزایش دمای

جدول ۸- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل زغال‌های زیستی، دما و سطح کاربرد بر وزن خشک و غلظت سدیم و پتاسیم اندام هوایی

Table 8. Means comparison of the interaction effects of biochars, temperature and application rates on dry weight and Na and K concentration of shoot

| Treatment | Shoot dry weight (g plant ⁻¹) | Na/K of stem | concentration of stem K (%) | concentration of stem Na (%) | Na/K of leaf | Concentration of leaf K (%) | Concentration of leaf Na (%) | Rate (%) |
|----------------------|---|---------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|----------|
| Control | 6 ^{dc} | 0.046 ^a | 2.38 ^f | 0.108 ^{bc} | 0.031 ^{dc} | 2.17 ^g | 0.068 ^{dc} | 0 |
| Rice biochar 350 | 8.06 ^a | 0.025 ^e | 4.35 ^d | 0.113 ^b | 0.039 ^a | 2.31 ^{gf} | 0.091 ^{ab} | 2 |
| Rice biochar 350 | 7.36 ^{ab} | 0.034 ^{bc} | 5.17 ^b | 0.176 ^a | 0.034 ^{bc} | 2.56 ^{dce} | 0.088 ^{ab} | 5 |
| Cotton biochar 350 | 7.92 ^a | 0.037 ^b | 3.05 ^e | 0.113 ^b | 0.041 ^a | 2.26 ^{gf} | 0.094 ^a | 2 |
| Cotton biochar 350 | 7.34 ^{ab} | 0.037 ^b | 3.32 ^e | 0.123 ^b | 0.037 ^{ab} | 2.35 ^{gfe} | 0.089 ^{ab} | 5 |
| Rapeseed biochar 350 | 4.72 ^e | 0.023 ^{ef} | 4.85 ^c | 0.114 ^b | 0.032 ^{bc} | 2.56 ^{dce} | 0.084 ^b | 2 |
| Rapeseed biochar 350 | 5.50 ^{de} | 0.020 ^f | 5.62 ^a | 0.115 ^b | 0.023 ^{hfg} | 2.86 ^{ab} | 0.066 ^{dc} | 5 |
| Rice biochar 700 | 6.14 ^{dc} | 0.027 ^{de} | 4.38 ^d | 0.119 ^b | 0.030 ^{dce} | 2.39 ^{efgd} | 0.072 ^c | 2 |
| Rice biochar 700 | 7.98 ^a | 0.031 ^{dc} | 5.56 ^a | 0.177 ^a | 0.025 ^{efg} | 2.59 ^{dc} | 0.067 ^{dc} | 5 |
| Cotton biochar 700 | 6.71 ^{bc} | 0.036 ^{bc} | 3.17 ^e | 0.114 ^b | 0.019 ^h | 2.43 ^{efd} | 0.047 ^e | 2 |
| Cotton biochar 700 | 7.94 ^a | 0.033 ^{bc} | 3.36 ^e | 0.111 ^{bc} | 0.026 ^{efd} | 2.45 ^{efd} | 0.065 ^{dc} | 5 |
| Rapeseed biochar 700 | 6.34 ^c | 0.019 ^f | 4.87 ^{bc} | 0.098 ^c | 0.023 ^{hfg} | 2.70 ^{bc} | 0.064 ^{dc} | 2 |
| Rapeseed biochar 700 | 5.15 ^e | 0.020 ^f | 5.87 ^a | 0.115 ^b | 0.020 ^{hg} | 2.97 ^a | 0.062 ^d | 5 |

In each column, common letters demonstrate not significant at 0.05 probability levels

pH در خاک شد. افزودن سطوح زغال زیستی (دو و پنج درصد وزنی) سبب افزایش معنی‌دار غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول در خاک نسبت به شاهد (بدون مصرف زغال زیستی) بجز غلظت بی‌کربنات شد. بیشترین مقادیر افزایش نسبت به شاهد در مورد کلر و پتاسیم محلول به‌ترتیب به میزان ۹۴ و ۸۵ درصد رخ داد. اثر دمای تهیه زغال زیستی تهیه شده از بقایای مختلف (برنج، پنبه و کلزا) بر وزن خشک اندام هوایی

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد همه زغال‌های زیستی تولید شده سبب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک شدند. بیشترین افزایش در سطح پنج درصد مشاهده شد. حداقل مقدار pH در خاک در تیمار زغال زیستی تهیه شده از بقایای برنج و بیشترین pH در خاک در تیمار زغال زیستی تولید شده از پنبه به‌دست آمد. افزایش دمای گرماکافت از ۳۵۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش معنی‌دار

حاصل از بقایای برنج مشاهده شد اما در مورد پتاسیم بیشترین مقدار در زغال زیستی تولید شده از بقایای کلزا بود. دمای تولید زغال زیستی تنها بر مقدار سدیم برگ اثر معنی‌داری در سطح پنج درصد داشت. کاربرد دو و پنج درصد انواع زغال‌های زیستی تولیدی سبب افزایش معنی‌دار سدیم و پتاسیم برگ و ساقه شد.

معنی‌دار نبود؛ از این‌رو، اثر نوع زغال زیستی و سطح کاربرد آن اثر معنی‌داری در سطح پنج درصد بر وزن خشک اندام هوایی داشت، به‌گونه‌ای که بیشترین میزان وزن خشک اندام هوایی در تیمار زغال زیستی برنج ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و سطح دو درصد وزنی به‌دست آمد. بالاترین مقدار سدیم برگ و ساقه در زغال زیستی

References

- Abe I., Iwasaki S., Iwata Y., Kominami H., and Kera Y. 1998. Relationship between production method and adsorption property of charcoal. *TANSO*, 185: 277-284.
- Akhtar. S.S., Andersen. M.N., Liu F. 2015a. Biochar mitigates salinity stress in potato. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201: 368-378.
- Akhtar S.S., Andersen M.N., and Liu F. 2015b. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. *Agricultural Water Management*, 158: 61-68.
- Ali S., Rizwan M., Qayyum M.F., Ok Y.S., Ibrahim M., Riaz M., Arif M.S., Hafeez F., Al-Wabel M.I., and Shahzad A.N. 2017. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(14): 12700-12712.
- Al-Wabel M.I., Al-Omran A., El-Naggar A.H., Nadeem M., and Usman A.R. 2013. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced of Conocarpus wastes. *Bioresource Technology*, 131: 374-379.
- Amonette J.E., and Joseph S. 2009. Characteristics of biochar: Microchemical properties., *In: Lehmann J. and Joseph S. (Eds.), Biochar for environmental management science and technology*. Earthscan, London. pp. 33-43.
- Benton J., and Case V.W. 1990. Sampling, handling and analyzing plant tissue samples. *In: Westerman, R. L. (Ed.). Soil testing and plant analysis*. 3rd Ed. Book series No. 3. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI., USA. pp. 389-428.
- Carter S., Shackley S., Sohi S., Suy T.B., and Haeefe S. 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown Lettuce (*Lactuca sativa*) and Cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy Journal*, 3: 404-418.
- Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., and Joseph S. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 45: 629-634.
- Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., and Joseph S. 2008. Using Poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research*, 46(3): 437-444.
- Chintala R., Mollinedo J., Schumacher T.E., Papiernik S.K., Malo D.D., Clay D.E., Kumar S., and Gulbrandson D.W. 2013. Nitrate sorption and desorption in biochars from fast pyrolysis. *Microporous and Mesoporous Materials*, 179: 250-257.
- Domene X., Mattana S., Hanley K., Enders, A. and Lehmann J. 2014. Medium-term effects of corn biochar addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn. *Soil Biology and Biochemistry*, 72: 152-162.
- Elzobair K.A., Stromberger M.E., Ippolito J.A., and Lentz R.D. 2016. Contrasting effects of biochar Versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol. *Chemosphere*, 142:145-152.
- Fang Y., Singh B., Singh B.P., and Krull E. 2014. Biochar carbon stability in four contrasting soils. *European Journal of Soil Science*, 65: 60-71.
- Farhangi-Abriz S., and Torabian S. 2018. Effect of biochar on growth and ion contents of Bean Plant under saline condition. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(12): 11556-11564.
- Fu P., Yi W., Bai X., Li Z., Hu S., and Xiang J. 2011. Effect of temperature on gas composition and char structural features of pyrolyzed agricultural residues. *Bioresource Technology*, 102(17): 8211-8219.
- Gaskin J.W., Spier R.A., Das K.C., Lee R.D., Morris L.A., and Fisher D.S. 2010. Effect of Peanut hull and Pine chip biochar on soil nutrient status and yield. *Agronomy Journal*, 102: 623-633

- Haefele S.M., Konboon Y., Wangboon W., Amarante S., Maarifat A.A., Preiffer E.M., and Knoblauch C. 2011. Effects of biochar from rice residues in rice based systems. *Field Crops Research*, 121(3): 430-40.
- Havlin J., Beaton J., Tisdale S., and Nelson W. 1999. Soil fertility and fertilizers. Prentice Hall, New Jersey, 515p.
- Inal A., Gunes A., Sahin O., Taskin M.B., and Kaya E.C. 2015. Impacts of biochar and processed Poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of Bean and Maize. *Soil Use Management*, 31: 106-113.
- Jeffery S., Verheijen F.G.A., Van der Velde M., and Bastos A.C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144: 175-187
- Karer J., Zehetner F., Kloss S., Wimmer B., and Soja G. 2013. Biochar Application to temperate soils: Effect on nutrient uptake and Corn yield under field conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 22: 390-403.
- Khadem A., Raeesi F., and Besharati H. 2017. A review of biochar effects on soil physical, chemical, and biological properties. *Journal of Land Management*, 5 (1): 13-30. (In Persian)
- Komkiene J., and Baltreinaite E. 2016. Biochar as adsorbent for removal of heavy metal ions [Cadmium(II), Copper(II), Lead(II), Zinc(II)] from aqueous phase. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13:471-482.
- Kookana R.S., Sarmah A.K., Van Zwieten L., Krull E., and Singh B. 2011. Biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences. *Advances in Agronomy*, 112: 103-143.
- Kumar S., Masto R.E., Ram L.C., Sarkar P., George J., and Selvi V.A. 2013. Biochar preparation from *Parthenium Hysterophorus* and its potential use in soil application. *Ecological Engineering*, 55: 67-72.
- Laird D.A., Fleming P., Davis D.D., Horton R., Wang B., Karlen D.L. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158: 443-449.
- Lashari M.S., Ye Y., Ji H., Li L., Libu G.W., Lu H., Zheng J., and Pan G. 2015. Biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of Maize in a saline soil from central China: a 2-year field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95: 1321-1327.
- Lehmann J., and Joseph S. 2009. Biochar for environmental management- an introduction. In: Lehmann J. and Joseph S. (Eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 1-11.
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J.O., Theis J., Luizao F.J., Peterson J., and Neves E.G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 1719-1730.
- Liu T., Liu B., 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.
- Major J., Lehmann J., Rondon M., and Goodale C. 2010. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*, 16: 1366-1379.
- Masto R.E., Kumar S., Rout T.K., Sarkar P., George J., and Ram L.C. 2013. Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. *Catena*, 111: 64-71.
- Masulili A., Utomo W.H., and Syechfani M.S. 2010. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in west Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*, 2: 39-47.
- Muradov N., Fidalgo B., Gujar A.C., Garceau N., T-Raissi A. 2012. Production and characterization of Lemna minor bio-char and its catalytic application for biogas reforming. *Biomass Bioenergy*, 42: 123-131.
- Nabavi Nia F. 2013. The Effect of Tannery wastes and biochar on some physical and chemical properties of soil, growth and yield of Radish and Carrot plants. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)

- Najafi-Ghiri M. 2014. Effect of different biochars application on some soil properties and nutrients availability in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 29(3): 352-358. (In Persian)
- Najmi R. 2013. The effect of three types of biochar on some chemical and physical properties of soil. MSc thesis. University of Guilan. (In Persian)
- Nigussie A., Kissi E., Misganaw M., and Ambaw G. 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of Lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. *American_Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science*, 12: 369-376.
- Novak J.M., Lima I., Xing B., Gaskin J.W., Steiner C., Das K.C., Ahmedna M.A., Rehrah D., Watts D.W., Busscher W.J., and Schomberg H. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3: 195-206.
- Ozçimen D., Ersoy-Meriçboyu A. 2010. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials. *Renewable Energy*, 35: 1319-1324.
- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D. R. 1982. Methods of Analysis. Part 2. chemical and microbiological properties. 2nd Ed. ASA. Madison, WI, USA. 1159 p.
- Rajkovich S., Enders A., Hanley K., Hyland C., Zimmerman A.R., and Lehmann J. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after addition of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48: 271-284.
- Razzaghi F., and Rezaie N. 2017. Effects of different levels of biochar on soil physical properties with different textures. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 7(1): 75-88. (In Persian)
- Schultz H., and Bruno G. 2012. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175: 410-422.
- Singh B., Singh B.P., and Cowie A.L. 2010. Characterization and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 48: 516-525.
- Song W., and Guo M.X. 2012. Quality variations of Poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94: 138-145.
- Uzoma K., Inoue M., Andry H., Fujimaki H., Zahoor A., and Nishihara E. 2011. Effect of Cow manure biochar on Maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27: 205-212.
- Vaccari F., Baronti S., Lugato E., Genesio L., Castaldi S., Fornasier F., and Miglietta F. 2011. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in Durum Wheat. *European Journal of Agronomy*, 34: 231-238.
- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination degtjareff method for determination for role organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
- Yang H.P., Yan R., Chin T., Liang D.T., Chen H.P., and Zheng C.G. 2004. Thermogravimetric Analysis-Fourier transform infrared analysis of palm oil waste pyrolysis. *Energy Fuels*, 18: 1814-1821.
- Yu L., Yu-Jie J., Xiao-rong Z., Gui-Tong L., Li-Xin Z., Hai-Bo M. 2014. Improvement to Maize growth caused by biochars derived from six feedstocks prepared at three different temperatures. *Journal of Integrative Agricultural*, 13(3): 533-540.
- Yuan J. H., Xu, R. K., and Zhang, H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 102(3): 3488-3497.
- Zhang A, Bian R., Pan G., Cui L., Hussain Q., Li L., Zheng J.I., Zheng J.U., Zhang X., Han X., and Yu X. 2012. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops Research*, 127: 153-160.
- Zolfi Bavariani M., Ronaghi A., Karimian N., Ghasemi R., and Yasrebi J. 2016. Effect of Poultry manure derived biochars at different temperatures on chemical properties of a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Science*, 20(75): 73-86. (In Persian)

The Effect of Biochars Prepared from Agricultural Residues at Different Temperatures on Some Chemical Properties of a Calcareous Soil and Na and K Concentration of Corn (*Zea mays*)

Narges Sousaraee¹, Mojtaba Baranimotlagh^{2*}, Farhad Khormali³, Esmael Dordipour⁴

(Received: July 2018 Accepted: November 2018)

Abstract

Biochar is a carbon-rich solid material produced by heating biomass and agricultural residues in an oxygen-limited environment. However, effects of biochar in soil depend on pyrolysis temperature and type of the raw material used in its production. In order to determine the effect of biochars prepared from agricultural residues at different temperatures on soil characteristics, soil cations and anions and Na and K concentrations of corn, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design in four replications under greenhouse condition. Treatments included biochar type (rice, cotton and canola), pyrolysis temperatures (350 and 700 °C) and two application rates (0, 2 and 5 w/w). The results showed that all types of biochar increased soil EC values. The lowest and highest values of soil pH were observed at biochar prepared from rice and cotton residues, respectively. The soil pH was significantly increased with increasing pyrolysis temperature from 350 to 700 °C. The highest values of soil Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Cl⁻ and HCO₃⁻ was observed at 350 °C. The results showed that between each three biochars type produced from crop residues (rice, cotton and canola), the highest Na concentrations of leaf and stem were recorded with addition of biochar prepared from rice residues, however, the biochar prepared from canola residues lead to the highest amount on K concentrations of leaf and stem. The pyrolysis temperature only affected the Na concentration of leaf at 5% probability level. The results showed that pyrolysis temperature and the type of feedstock material are important factors that influence the chemical properties of biochars and subsequently the soil characteristics.

Keywords: Agricultural residues, Soil cations, Soil anions, Biochar, Pyrolysis.

Sousaraee N., Baranimotlagh M., Khormali F., Dordipour E. 2019. The Effect of Biochars Prepared from Agricultural Residues at Different Temperatures on Some Chemical Properties of a Calcareous Soil and Na and K Concentration of Corn (*Zea mays*). *Applied Soil Research*, 7(3): 164-179.

1- MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

2- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

* Corresponding author: mbarani@gau.ac.ir