

اثرات مقدار و اندازه ذرات بیوچار بر آب قابل استفاده، مقاومت روزنه‌ای، وزن خشک ریشه و کارایی مصرف آب گندم

حسن اصولی^{۱*}، احمد کریمی^۲، حسین شیرانی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۷)

چکیده

بیوچار با بهبود ویژگی‌های خاک و گیاه، به تولید پایدار کمک می‌کند. در مطالعات انجام شده، کمتر به بررسی اثر اندازه ذرات و مقدار بیوچار بر ویژگی‌های خاک و کارایی مصرف آب در شرایط مزرعه پرداخته شده است. این پژوهش با هدف بررسی اثر مقادیر مختلف دو نوع بیوچار با اندازه ذرات متفاوت بر آب قابل استفاده گیاه (PAW)، مقاومت روزنه‌ای، وزن خشک ریشه، عملکرد و کارایی مصرف آب گندم (WUE) انجام شد. برای این منظور آزمایش فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه فاکتور نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار در مزرعه اجرا گردید. بیوچارهای کاه گندم و هیزم زردآلو در اندازه‌های ۰-۰/۵ (S1)، ۰/۵-۱ (S2) و ۱-۲ (S3) میلی‌متر با مقادیر ۰/۵ (R1)، ۱/۵ (R2) و ۳ (R3) درصد وزنی به خاکی با بافت لوم شنی در عمق ۰-۱۵ سانتیمتر اضافه گردیدند. بیوچار کاه گندم با اندازه ذرات S2 در مقدار R3 و بیوچار هیزم زردآلو با اندازه ذرات S1 در مقدار R3، میزان PAW را بیشتر از بقیه تیمارها در سطح هر بیوچار افزایش دادند. کمترین مقاومت روزنه‌ای در اندازه ذرات S3 بیوچارهای کاه گندم و هیزم زردآلو و به ترتیب در مقادیر R1 و R2 این بیوچارها مشاهده شد. وزن خشک ریشه گندم کمتر تحت تأثیر مقدار و اندازه ذرات بیوچار قرار گرفت. افزایش معنی‌دار میزان عملکرد گندم در مقایسه با شاهد، در بیوچار گندم با اندازه ذرات S2 با مقدار R3 مشاهده شد. در برخی از تیمارها، میزان عملکرد نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری داشت. یافته‌های این تحقیق اثربخشی بیشتر بیوچار کاه گندم در اندازه ذرات S2 و مقدار R3 بر افزایش WUE را نشان داد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تغییر اندازه ذرات بیوچار بسته به مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک و نوع مواد اولیه بیوچار اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های خاک داشت.

واژه‌های کلیدی: اصلاح خاک، اندازه ذرات بیوچار، کربن آلی خاک، عملکرد گندم

اصولی ح.، کریمی ا.، شیرانی ح. ۱۴۰۱. اثرات مقدار و اندازه ذرات بیوچار بر آب قابل استفاده، مقاومت روزنه‌ای، وزن خشک ریشه و کارایی مصرف آب گندم. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۰، شماره ۲. صفحه: ۶۶-۷۸.

۱- دانشجوی دوره دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۲- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۳- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی عصر رفسنجان

*پست الکترونیک: osoolih@gmail.com

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه خشک، بخش کشاورزی به عنوان تکیه گاه مهم امنیت غذایی و توسعه اقتصادی مطرح است. در آن مناطق وقوع بارش های نامنظم و کمبود آب موجب بروز تنش خشکی در کشت های دیم و آبی می شود (Liu et al., 2017). از راه حل های پیشنهادی برای کم کردن اثر تنش خشکی در گیاهان زراعی می توان به اصلاح شرایط فیزیکی خاک، به ویژه ویژگی های هیدرولوژیکی آن اشاره نمود (Bonder et al., 2015). اضافه کردن مواد آلی به خاک علاوه بر بالا بردن کربن آلی خاک، شرایط فیزیکی و هیدرولوژیکی خاک را بهبود می بخشد (Haider et al., 2017). اخیراً، بیوپچار به عنوان یک ماده آلی اصلاح کننده غنی از کربن، مورد توجه محققان علوم خاک قرار گرفته است.

بیوپچار با داشتن ساختار آروماتیک، در برابر تجزیه میکروبی بسیار مقاوم تر از مواد آلی است. بیوپچار از حرارت دادن زیست توده در دمای ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، در شرایط بدون اکسیژن یا با اکسیژن کم، تولید می شود (Verheijen et al., 2010). افزودن مواد آلی به فرم بیوپچار یک رویکرد جدید در افزودن مواد آلی به خاک های مناطق خشک و نیمه خشک است که می تواند به عنوان قسمتی از کشاورزی پایدار در جهت استفاده بهینه از منابع محدود آب کشاورزی مورد توجه قرار گیرد (Gao et al., 2020).

ویژگی های فیزیکی بیوپچار مانند ساختمان متخلخل و سطح ویژه زیاد آن، موجب افزایش تخلخل کل خاک می شود. با اضافه شدن منافذ داخلی ذرات بیوپچار به منافذ خاک، توزیع اندازه منافذ خاک تغییر می کند. این موضوع، موجب افزایش میزان آب قابل استفاده گیاه شده (Langeroodi et al., 2018) و روابط آبی گیاهان در طول ماه های خشک تابستان را بهبود می بخشد (Liu et al., 2020).

عدم تامین به موقع آب برای کشت های آبی مناطق خشک، موجب بروز تنش های جزئی در گیاهان کشت شده می شود. در مواقع تنش آبی، بسته شدن جزئی روزنه ها (افزایش مقاومت روزنه ای) موجب کاهش میزان تعرق و میزان انتشار دی اکسید کربن به فضای بین سلولی برگها می شود که نتیجه آن کاهش میزان عملکرد هست (Langroodi et al., 2018). اثر بیوپچار بر کاهش

اثرات تنش آبی به ویژگی های گیاه کشت شده، خاک و شدت تنش بستگی دارد. مطالعات آزمایشگاهی وانگ و همکاران (Wang et al., 2018) نشان داد که بیوپچار با کاهش مصرف آب، اثر منفی تنش خشکی بر ذرت را کاهش می دهد. لوسیبیا و همکاران (Lusiba et al., 2017) گزارش کردند که بیوپچار میزان زیست توده، عملکرد دانه و کارآیی مصرف آب را در خاک رسی افزایش داد. این در حالی بود که بیوپچار هیچ تأثیری بر اجزای عملکرد در خاک شن لومی نداشت. لنگرودی و همکاران (Langeroodi et al., 2018) نتیجه گیری کردند که در شرایط تنش خشکی متوسط، اضافه کردن بیوپچار به خاک عملکرد را به صورت قابل توجهی افزایش داد. ایشان ابراز امیدواری کردند که در مناطق نیمه خشک، که با محدودیت دسترسی به آب روبه رو هستند، استفاده از اصلاح کننده بیوپچار بتواند روشی برای کاهش مقدار آب مصرفی در آبیاری باشد.

بیشتر شدن میزان آب قابل استفاده گیاه با افزودن اصلاح کننده بیوپچار به خاک، زمانی می تواند به کاهش مقاومت روزنه ای و افزایش شدت فتوسنتز و در نهایت افزایش میزان محصول منتهی شود که گیاه با توسعه ریشه (افزایش عمق و تراکم ریشه) از آب موجود در خاک استفاده نماید. اثر بیوپچار بر ریشه گیاهان بسیار متغیر و مبهم است (Svoboda et al., 2017). در تحقیقات انجام شده نتایج متفاوتی از اثر بیوپچار بر زیست توده ریشه مانند افزایش زیست توده (Xiang et al., 2017; Liu et al., 2020) کاهش زیست توده (Keith et al., 2015) یا ثابت ماندن آن (Van De Voorde et al., 2014) گزارش شده است. البته این نتایج متضاد، دور از انتظار هم نیست. چرا که فاکتورهای مختلفی مانند ویژگی های مواد اولیه و شرایط فرایند گرما کافت برای تهیه بیوپچار بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوپچار تأثیر می گذارد. در کنار این فاکتورها، ویژگی های فیزیکی بیوپچار اضافه شده به خاک هم در میزان زیست توده و عمق توسعه ریشه اهمیت دارد (Sun et al., 2017).

مطالعات انجام شده برای طراحی بیوپچار برای مقاصد خاص، غالباً بر پارامترهای گرما کافت تمرکز داشته است (Liao et al., 2019) و در کنار آن، بیشترین توجه محققان به مقدار بیوپچار اضافه شده به خاک معطوف بوده

جداگانه در یک کوره از نوع دو بشکه با ظرفیت ۲۰۰ لیتر گرما کافت شدند. برای بالا بردن دمای محفظه گرما کافت، از مشعل کوره با سوخت گاز طبیعی استفاده شد و دمای آن در زمان ۴ ساعت به ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد رسانده و ۴ ساعت دیگر در این دما نگاهداشته شد. بیوچارهای تهیه‌شده با الک‌هایی به قطر منافذ ۱، ۲ و ۵ میلی‌متری الک و تا زمان افزوده شدن به خاک (یک ماه) در کیسه‌های پلی‌اتیلنی غیرقابل نفوذ در برابر هوا بسته‌بندی شدند تا سطح بیوچارها اکسید نگردد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچارهای تهیه‌شده، در ذراتی با ابعاد ۱۵۰ تا ۸۵۰ میکرون تعیین گردیدند (Rajkovich *et al.*, 2012). pH و EC بیوچار در محلولی با نسبت ۱:۲۰ (وزن به حجم) بیوچار به آب مقطر (Definition S. P., 2015)، چگالی ظاهری بیوچار با استفاده از یک قالب با قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر (Rajkovich *et al.*, 2012) و چگالی حقیقی بیوچار با پیکنومتر و نفت سفید تعیین گردید (Gupta *et al.*, 2002). میزان رطوبت، خاکستر، کربن (C)، هیدروژن (H)، نیتروژن (N)، کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، پتاسیم (K) و سدیم (Na) بیوچارها با روش ارائه‌شده در منبع اندازه‌گیری شدند (Definition S. P., 2012; Rajkovich *et al.*, 2012) (جدول ۱).

تهیه زمین و اعمال تیمارها

این تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل نوع بیوچار، مقدار بیوچار و اندازه ذرات بیوچار بودند. نوع بیوچار دارای دو سطح، بیوچار کاه گندم (WSB) و بیوچار هیزم زردآلو (AFB) و مقدار بیوچار (R) با سه سطح ۱/۵ (R1)، ۱/۵ (R2) و ۳ (R3) درصد وزنی و اندازه ذرات بیوچار (S) با سه سطح ۱/۵-۰ (S1)، ۱/۵-۰ (S2) و ۱-۲ (S3) میلی‌متر بود. در هر بلوک یک کرت شاهد نیز در نظر گرفته شد (در مجموع ۵۷ واحد آزمایشی).

زمین مورد نظر به وسیله تراکتور شخم و سپس دیسک زده شد. کرت‌هایی به تعداد تیمارهای آزمایشی، به مساحت یک مترمربع (۱ متر × ۱ متر) احداث گردید. برای جلوگیری از نفوذ احتمالی آب آبیاری یک کرت به کرت مجاور و نیز برای تردد جهت عملیات داشت و نمونه برداری بین دو کرت متوالی در هر بلوک، نیم متر

است این در حالی است که اثر مقدار بیوچار بر ویژگی‌های خاک بسیار متغیر بوده است (Trifunovic *et al.*, 2018) از طرفی، اثر متقابل مقدار و اندازه ذرات دو بیوچار تهیه‌شده از دو منبع گیاهان علفی و چوبی به صورت مزرعه‌ای کمتر بررسی شده است. هدف از این مطالعه، بررسی اثر متقابل مقادیر مختلف بیوچار کاه گندم و هیزم زردآلو با اندازه ذرات متفاوت و نیز اثر تغییر اندازه ذرات بیوچارهای مورد نظر در یک مقدار ثابت، بر میزان آب قابل استفاده گیاه، مقاومت روزه‌ای گندم، وزن خشک ریشه، عملکرد دانه و نیز کارایی مصرف آب گندم پاییزه رقم میهن بود. دانستن اثر متقابل مقدار و اندازه ذرات بیوچار بر خصوصیات هیدرولوژیکی خاک، میزان محصول و کارایی مصرف آب، به صورت بالقوه می‌تواند در طراحی بیوچار ویژه برای مدیریت مصرف آب جهت رسیدن به حداکثر محصول بسیار مفید باشد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش و ویژگی‌های خاک آن

این تحقیق در سال ۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی مرکز آموزش و تحقیقات کشاورزی تبریز با مختصات جغرافیایی $37^{\circ}97'52''$ عرض شمالی، $46^{\circ}55'16''$ طول شرقی و ارتفاع ۱۸۴۳ متر از سطح دریا اجرا گردید. میانگین بارش سالانه منطقه ۳۳۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن، $17/5$ درجه سانتی‌گراد است. برای کسب اطلاعات اولیه از وضعیت خاک مورد مطالعه، یک نمونه مرکب (عمق ۱۵ - ۰ سانتی‌متر) تهیه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش اندازه‌گیری گردیدند. نمونه دست‌نخورده‌ای هم برای تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک تهیه شد. اسیدیتته خاک در نسبت ۱:۱ خاک به آب مقطر، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع خاک، مقدار کربنات کلسیم با کلسی‌متر، کربن آلی خاک با روش اکسیداسیون تر، فسفر قابل استفاده خاک با روش اولسون و پتاسیم قابل استفاده خاک با روش بیکربنات آمونیوم نرمال با pH خنثی اندازه‌گیری شدند (Jones, 1999) (جدول ۱).

تهیه بیوچار

بیوچارهای مورد استفاده در این تحقیق، از کاه گندم و هیزم زردآلوی هوا خشک تهیه شدند. مواد اولیه به صورت

مرحله، مقاومت روزنه‌ایی برگ پرچم بین ساعت ۶ تا ۸ صبح با سه تکرار در هر کرت آزمایشی (یک بار در سال زراعی) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ای برگ، با دستگاه پرومتر مدل AP4 شرکت دلتا دیوایس - کمبریج انگلستان انجام گرفت (Kirkham, 2005).

برای تعیین وزن خشک ریشه، نمونه‌ای از خاک حاوی ریشه (ردیف وسط هر کرت) با مته نمونه‌برداری به شعاع ۱۰ سانتی‌متر و تا عمق ۲۰ سانتی‌متر خاک تهیه گردید. برای جدا شدن خاک از ریشه، نمونه‌های تهیه‌شده به مدت ۲ ساعت در ظروف پلاستیکی حاوی آب قرار داده شدند. ریشه‌های جدا شده شسته شده و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک و سپس توزین شدند (Pradhan et al., 2012).

بعد از رسیدن کامل گندم‌ها، جهت برداشت آن‌ها پلاتی به ابعاد ۰/۶×۰/۶ متر تهیه شد. بعد از برداشت و کوبیدن قسمت‌های هوایی گیاه، وزن دانه‌های تولیدشده در گیاهان داخل پلات اندازه‌گیری شد. کارایی مصرف آب (WUE) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (1)$$

که در این معادله Y، کل ماده گیاهی تولیدشده یا ماده خشک (اندام هوایی) و یا عملکرد اقتصادی (دانه، کاه و یا هردو) و ET مجموع تبخیر از سطح خاک و گیاه (تبخیر و تعرق) و یا آب کاربردی در مزرعه را نشان می‌دهد. در این تحقیق بر اساس رابطه بالا، کارایی مصرف آب (WUE) بر اساس عملکرد دانه و حجم کل آب آبیاری محاسبه شد (Lusiba et al., 2017).

برای انجام تحلیل‌های آماری، نرمال بودن نتایج با آزمون کولموگروف- اسمیرنوف و یکنواختی واریانس‌ها با آزمون لوون آتست گردید. برای مقایسه نتایج تیمارها با شاهد، آنالیز واریانس یک‌طرفه در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد و نتایج تیمارها با شاهد از طریق آزمون دانت در سطح احتمال ۱٪ (P<0.01) مقایسه شد. برای مشخص نمودن اثرات اصلی تیمارها و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های مورد مطالعه، تجزیه واریانس سه عامله انجام شد. در مواردی که اثر متقابل سه‌گانه نوع بیوچار، مقدار بیوچار و اندازه بیوچار معنی‌دار بود، اثر متقابل مقدار بیوچار و اندازه بیوچار در هر سطح نوع

فاصله و بین بلوک‌ها (تکرارها)، یک متر فاصله در نظر گرفته شد. محل قرارگیری تیمارها در هر بلوک به صورت تصادفی تعیین شد. در تاریخ ۲۰ ام مرداد ۱۳۹۷، مقادیر ۰/۵٪، ۱/۵٪ و ۳٪ وزنی به سطح خاک اضافه شده و با بیل تا عمق ۱۵ سانتی‌متر با خاک مخلوط شدند. پس از اضافه شدن بیوچار به خاک به منظور تسریع در تاثیر گذاری بیوچارها بر ویژگی‌های خاک (انکوباسیون)، کرت‌های آزمایشی به صورت مستمر هر هفته یک‌بار به مدت سه ماه آبیاری شدند. بعد از سه ماه، در ۱۰ آبان ماه سال ۱۳۹۷، مطابق تقویم کشت منطقه و مقدار بذر توصیه شده ۲۰۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، مقدار ۲۵ گرم بذر گندم آبی پاییزه رقم میهن، در هر کرت کشت شد. بذرهای مورد نظر بعد از ضدعفونی با سم قارچ‌کش تیرام با غلظت دو در هزار، به صورت ردیفی با فاصله ۲۰ سانتی‌متر به صورت دستی کشت شد (Anonymous, 2015) (فقط در محل کشت بذرهای شیار ایجاد گردید و کل خاک کرت به هم زده نشد).

اندازه‌گیری‌ها

آب قابل‌استفاده گیاه (PAW) از اختلاف رطوبت گنجایش زراعی و نقطه پژمردگی دائم به دست آمد. از هر کرت آزمایشی نمونه دست‌نخورده تهیه شد و با استفاده از دستگاه صفحه‌های فشاری، مقدار رطوبت در گنجایش زراعی (FC) در مکش ۰/۱ بار و نقطه پژمردگی دائمی (PWP) در مکش ۱۵ بار تعیین گردید (Klute, 1986).

آب موردنیاز گندم در مراحل مختلف رشد بر اساس ویژگی‌های اقلیمی منطقه و به روش پنمن -مانتیت - فائو محاسبه گردید. میزان بارش‌ها با یک باران‌سنج ثبت شد و بعد از کسر میزان بارش‌های بین دو آبیاری، آب موردنیاز در مراحل مختلف رشد گندم (پنجه دهی، ساقه دهی، گل‌دهی و خوشه‌دهی) در اختیار گیاه قرار گرفت. میزان آب در هر آبیاری با کنتور حجمی اندازه‌گیری شد.

در این تحقیق برای اندازه‌گیری بروز تنش‌های جزئی و اثر تیمارهای مورد مطالعه بر میزان آن تنش‌ها در گندم، میزان مقاومت روزنه‌ای اندازه‌گیری شد. برای این منظور در زمان خوشه دهی گندم و قبل از آبیاری در این

² Leven's test

¹ Kolmogorov-Smirnov

بر هر ویژگی مورد مطالعه، میانگین چند گانه اثرات متقابل سه گانه با آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) مقایسه گردیدند. برای انجام تحلیل های آماری از نرم افزار Statistix 9 و برای رسم نمودارها، از نرم افزار Excel 2013 استفاده شد.

بیوچار به صورت جداگانه با روش برش دهی بررسی شد. در مواردی که این اثر متقابل معنی دار بود، میانگین ویژگی های مورد مطالعه در هر بیوچار به صورت جداگانه، با آزمون LSD^۲ در سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) مقایسه گردیدند. برای تعیین مؤثرترین تیمار

جدول ۱- برخی از ویژگی های خاک و بیوچارهای کاه گندم (WSB) و هیزم زردآلو (AFB)

Table 1. Some characteristics of soil and wheat straw (WSB) and apricot firewood (AFB) biochar

Characteristics	Soil	WSB	AFB
Sand (%)	57	-	-
Silt (%)	30	-	-
Clay (%)	13	-	-
Calcium carbonate (%)	13.5	-	-
Bulk density (g cm ⁻³)	1.3	0.15	0.66
Particle density (g cm ⁻³)	2.5	1.099	1.115
pH	7.85	9.22	8.12
Electrical conductivity (dS m ⁻¹)	1.65	2.15	0.18
Ash (%)	-	15.6	5.2
Moisture (%)	-	1.16	1.57
Organic carbon (mg g ⁻¹)	0.517	489	516
Total nitrogen (mg g ⁻¹)	0.011	6.3	7.1
Hydrogen (mg g ⁻¹)	-	31.9	35.4
C/N	-	77.6	72.7

بیوچار، بیشتر به منافذ بین ذرات بیوچار و ماتریکس خاک بستگی داشت. در این تحقیق، بیوچار گندم در اندازه درشت (S3) با مقدار زیاد (R3)، فضاهای بین ذرات را به حدی بیشتر کرد که با افزایش میزان زه آب، مقدار PAW را نسبت به ذرات متوسط (S2) و کوچک (S1) کاهش داد. در بیوچار هیزم زردآلو، برعکس بیوچار کاه گندم، با کوچک تر شدن اندازه ذرات بیوچار (S1)، میزان PAW افزایش یافت. شاید دلیل این تفاوت را بتوان شکل ذرات بیوچار عنوان کرد که در ایجاد فضاهای بین ذرات نقشی اساسی دارد. بیوچار کاه گندم، که طول بیشتری در مقایسه با ذرات تقریباً کروی شکل بیوچار هیزم زردآلو دارند، زمانی که به مقدار زیاد به خاک اضافه می شوند با ایجاد ساختار شبکه ای مانند، موجب افزایش فضای بین ذرات خاک شده و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را افزایش داد (Liao et al., 2019). این در حالی است که در بیوچار هیزم زردآلو با کاهش اندازه ذرات بیوچار، میزان PAW افزایش یافت. شاید دو مکانیسم، افزایش میزان مشارکت فضاهای داخلی بیوچار در نگهداشت آب با کوچک تر شدن اندازه ذرات بیوچار و نیز مسدود شدن بخشی از منافذ درشت بین ذرات خاک

نتایج و بحث

آب قابل استفاده گیاه

در تمام مقادیر و اندازه های مورد مطالعه بیوچارهای کاه گندم و هیزم زردآلو، میزان آب قابل استفاده گیاه (PAW) به صورت معنی داری نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۲ و شکل ۱a و ۱b). تغییرات PAW، به اندازه ذرات و مقدار بیوچار و نیز به اثرات متقابل نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار بستگی داشت (جدول ۳). تغییر در اندازه ذرات بیوچار در مقادیر مورد مطالعه هر بیوچار، اثر معنی داری بر PAW داشت (جدول ۴). بیشترین مقدار PAW در بیوچارهای کاه گندم و هیزم زردآلو در مقدار ۳٪ (R3) و به ترتیب در اندازه ذرات S2 و S1 دیده شد که با سایر مقادیر و اندازه های مورد مطالعه تفاوت معنی داری داشت (شکل ۱a و ۱b).

افزایش PAW توسط ذرات S2 بیوچار کاه گندم، زمانی که در مقدار زیاد به خاک اضافه شده بودند، مشاهده شد، که با نتایج تحقیق لیو و همکاران (Liu et al., 2017) همخوانی نداشت. نتایج ایشان نشان داد که افزایش میزان رطوبت PAW به وسیله ذرات درشت

² Fisher's Least Significant Difference

¹ Slicing

توسط ذرات ریز بیوچار هیزم زردآلو، در این پدیده دخالت داشته باشند (Chen *et al.*, 2017). با کاهش اندازه ذرات بیوچار هیزم زردآلو، هر دو مکانیسم ذکر شده موجب افزایش PAW شدند به طوری که بیشترین مقدار PAW در بیوچار هیزم زردآلو با مقدار R3 و اندازه ذرات S1 مشاهده شد (جدول ۵).

جدول ۲- آنالیز واریانس تیمارهای مورد مطالعه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی

Table 2: Analysis of variance of the studied treatments in a randomized complete block design

Source of variation	df	PAW (cm ³ cm ⁻³)	SR (sec cm ⁻¹)	RDW (Kg ha ⁻¹)	Y (Kg ha ⁻¹)	WUE (Kg m ⁻³)
Mean square						
Blocks	2	0.00709	0.00001	69.071	56974	0.00506
T	18	0.00204**	0.00451**	349.628**	920713**	0.088**
Error	36	0.0001	0.00007	42.391	61821	0.00607
C.V	-	1.52	10.39	17.24	6.81	6.9

df: درجه آزادی، T: تیمارها، **: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ (P<0.01)، C.V: ضریب تغییرات.
df: Degrees of freedom, T: treatment, **: significant at 5% probability level (P<0.05), C.V: Coefficient of variation.

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) نتایج آب قابل استفاده گیاه (PAW)، مقاومت روزنه‌ای (SR)، وزن خشک ریشه (RDW)، عملکرد (Y) و کارایی مصرف آب (WUE).

Table 3. Analysis of variance (mean of square) for plant available water (PAW), stomatal resistance (SR), root dry weight (RDW), yield (Y) and water use efficiency (WUE).

Source of variation	df	PAW (cm ³ cm ⁻³)	SR (sec cm ⁻¹)	RDW (kg ha ⁻¹)	Y (kg ha ⁻¹)	WUE (kg m ⁻³)
Mean square						
Block	2	0.006945ns	1.27E-06ns	10.30ns	90648ns	0.009ns
BT	2	0.000004ns	0.0013	668.16*	403587*	0.037*
BR	2	0.000148*	7.49E-04*	231.32*	1581057*	0.150*
BS	2	0.003423*	0.00366*	37.38ns	35493ns	0.003ns
BT×BR	4	0.000117*	0.00392*	724.16*	1427993*	0.134*
BT×BS	4	0.000965*	0.01058*	491.71*	606039*	0.057*
BR×BS	4	0.000183*	0.00141*	235.02*	975147*	0.095*
BT×BR×BS	8	0.000999*	0.00636*	346.9*	1196204*	0.115*
Error	34	0.000004419	0.0000569	17.26	60174	0.00579

df: درجه آزادی، BT: نوع بیوچار، BR: مقدار بیوچار، BS: اندازه ذرات بیوچار، *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (P<0.05).
df: Degrees of freedom, BT: Biochar type, BR: Biochar rate, BS: Biochar particle size, *: significant at 5% probability level (P<0.05).

جدول ۴- برش دهی اثر متقابل مقدار بیوچار و اندازه ذرات بیوچار در هر سطح از نوع بیوچار ویژگی‌های مورد مطالعه

Table 4. biochar amount and biochar particle size interaction in each biochar type level on studied properties

Biochar type	df	PAW (cm ³ cm ⁻³)	SR (sec cm ⁻¹)	RDW (Kg ha ⁻¹)	Y (Kg ha ⁻¹)	WUE (Kg m ⁻³)
Mean square						
Wheat straw biochar	8	0.00044**	0.0042**	159.65**	1593347**	0.152**
Apricot firewood biochar	8	0.00131**	0.0043**	502.46**	404974**	0.039**

** : معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ (P<0.01)، ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ (P<0.01).
** : significant at 1% probability level (P<0.01), ns: Non significant at 1% probability level (P<0.01).

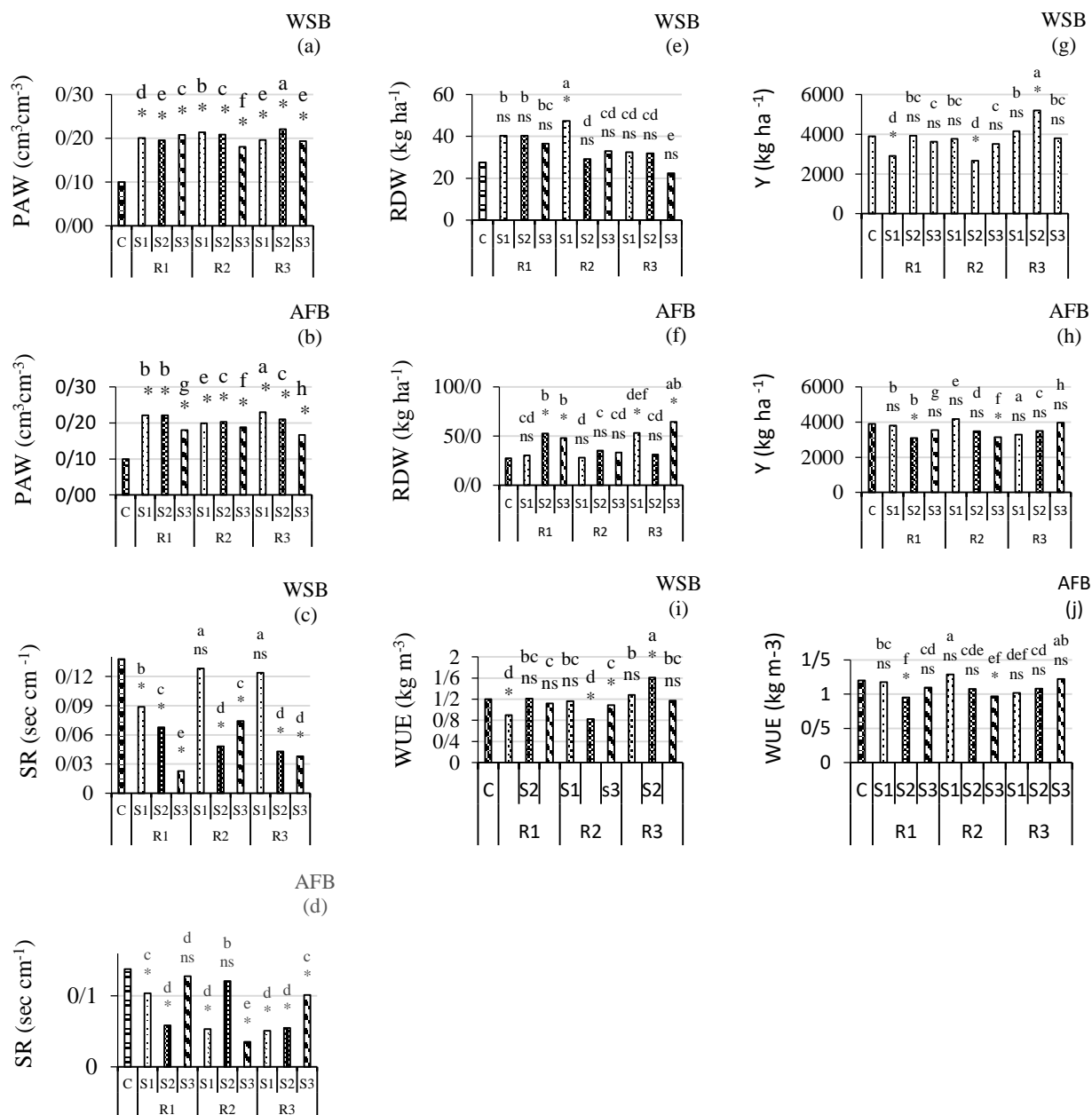
مقاومت روزه‌های برگ گندم

گیاهان برای کاهش اثرات تنش‌های آبی مقطعی از راهکارهای مختلفی بهره می‌برند که از آن راهکارها می‌توان به بسته شدن نسبی یا کامل روزه‌های برگ اشاره نمود (Kirkham, 2005). با بسته شدن نسبی یا کامل روزه‌های برگ، میزان مقاومت روزه‌های (SR) افزایش می‌یابد. در این تحقیق، بیوچارهای کاه گندم و هیزم زردآلو، در مقادیر و اندازه‌های مورد مطالعه، SR برگ گندم را به صورت معنی‌داری تحت تأثیر قرار داده و در مقایسه با شاهد کاهش دادند (جدول ۲ و شکل ۱c و ۱d). این یافته با نتایج مطالعه گلخانه‌ای تانیور و همکاران (Tanure et al., 2019) یکسان بود. نتایج مطالعه ایشان نشان داد، زمانی که گیاهان در شرایط تنش رطوبتی قرار گرفتند، بیوچار اضافه‌شده به خاک، مقدار هدایت روزه‌های را کاهش داد. در این تحقیق، کمترین مقاومت روزه‌های در بیوچار کاه گندم در اندازه ذرات درشت (S3) با مقدار R1 (شکل ۱c) و در بیوچار هیزم زردآلو در اندازه ذرات درشت (S3) با مقدار R2 مشاهده شد (شکل ۱d) که تفاوت معنی‌داری با سایر سطوح مورد مطالعه داشت. بیشترین کاهش مقاومت روزه‌ای در بین تمام تیمارهای مورد مطالعه، در بیوچار هیزم زردآلو با مقدار R1 و اندازه ذرات S3 مشاهده شد (جدول ۵). شاید بتوان این تفاوت را با اثر اندازه ذرات بیوچار بر سطح ویژه ذرات مرتبط دانست. به این ترتیب که با کاهش اندازه ذرات بیوچار، سطح ویژه بیوچار افزایش می‌یابد که این امر موجب کم شدن آب قابل جذب گیاه می‌شود (et al., 2019). برخی از محققین گزارش کرده‌اند که کاهش آب قابل دسترس خاک‌های تیمار شده با بیوچار، ممکن است ناشی از بالا بودن ظرفیت نگهداری خود بیوچار به‌عنوان ماده اصلاح‌کننده خاک باشد که در شرایط خاص می‌تواند گیاهان را در معرض تنش آبی قرار داده و شدت فتوسنتز و میزان هدایت روزه‌ای را کاهش دهد (Abel et al., 2013). در این تحقیق در بین تمام تیمارهای مورد مطالعه کمترین مقاومت روزه‌ای در تیمار بیوچار گندم با مقدار ۰/۵٪ با اندازه ذرات ۱ - ۲ mm مشاهده شد و در مقادیر مساوی این بیوچار، ذرات کوچک‌تر بیوچار (S1) مقاومت روزه‌ای را در مقایسه با ذرات متوسط (S2) و درشت (S3)، کمتر کاهش دادند (شکل ۱c). به نظر می‌رسد که کم بودن سطح ویژه ذرات درشت موجب این

وضعیت شده است. این نتیجه با یافته پان‌گیو و همکاران (Paneque et al., 2016) هم‌خوانی دارد. ایشان گزارش کرده‌اند که در بین بیوچارهای تهیه‌شده از مواد مختلف، بیوچار تهیه‌شده از چوب انگور، که کمترین سطح ویژه را داشت، بیشترین هدایت روزه‌ای (کمترین تنش آبی) را در آفتابگردان کشت‌شده در شرایط تنش آبی سبب شد.

وزن خشک ریشه گندم

در این تحقیق، وزن خشک ریشه کمتر تحت تأثیر تیمارهای مورد مطالعه قرار گرفت. به طوری که در غالب مقادیر و اندازه‌های مورد مطالعه بیوچارهای کاه گندم و هیزم زردآلو در مقایسه با شاهد، وزن خشک ریشه افزایش معنی‌داری نداشت (شکل ۱e و ۱f). نتایج نشان داد که اثر بیوچار بر وزن خشک ریشه گندم به نوع بیوچار، اندازه ذرات بیوچار و مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک بستگی داشت (جدول ۳) و اثر تغییر در اندازه ذرات هر دو بیوچار مورد مطالعه، موجب تغییر معنی‌دار در وزن خشک ریشه گندم شد (جدول ۴). در بیوچار کاه گندم و هیزم زردآلو، بیشترین افزایش وزن خشک ریشه به ترتیب در مقدار و اندازه ذرات R2S1 (۷۱/۶٪ نسبت به شاهد) و R3S3 (۱۳۳٪ نسبت به شاهد) مشاهده شد (شکل ۱e و ۱f). ژیانگ و همکاران (Xiang et al., 2017) هم با بررسی مطالعات انجام‌شده، گزارش کردند که کاربرد بیوچار اثرات مثبتی بر توسعه مورفولوژیکی ریشه داشته است. به طوری که کاربرد بیوچار، زیست‌توده ریشه، حجم ریشه و سطح ریشه را به ترتیب ۳۲٪، ۲۹٪ و ۳۹٪ افزایش داده است. در این تحقیق کمتر بودن وزن خشک ریشه در بیوچار کاه گندم نسبت به بیوچار هیزم زردآلو را می‌توان با نسبت بالای C/N بیوچار کاه گندم مرتبط دانست (جدول ۱) که موجب تثبیت نیتروژن قابل دسترس گیاه شده و جذب آن توسط ریشه را محدود می‌کند (Xiao et al., 2016). برخی از محققان گزارش کرده‌اند که اثر بیوچار بر ریشه به ویژگی‌های گیاه بستگی دارد. برای نمونه نتایج مطالعه رومدهان و همکاران (Romdhane et al., 2018) نشان داد که اثر بیوچار بر توسعه ریشه ذرت به ویژگی تحمل به خشکی واریته ذرت بستگی دارد. ایشان گزارش کردند که بیوچار موجب افزایش حجم و عمق توسعه ریشه در واریته مقاوم به خشکی و کاهش زیست‌توده ریشه در واریته حساس به خشکی شد.



شکل ۱- اثر تغییر اندازه ذرات بیوجار در مقادیر مختلف دو بیوجار کاه گندم (WSB) و هیزم زردآلو (AFB) بر آب قابل استفاده گیاه

(PAW)، مقاومت روزنه‌ای (SR)، وزن خشک ریشه (RDW)، عملکرد (Y)، کارایی مصرف آب (WUE)

Figure 1. Effect of biochar particle size change in different amounts of Wheat Straw Biochar (WSB) and Apricot Firewood Biochar (AFB) on Plant available water (PAW), Stomatal resistance (SR), Root dry weight (RDW), Yield (Y) and Water use efficiency (WUE)

. 3 % : R3 +1.5 % : R2 +0.5 % : R1 +1-2 mm : S3 +0.5-1 mm : S2 +0-0.5 mm : S1

*: تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با شاهد با آزمون دانست (P<0.05)، ns: تفاوت غیر معنی‌دار میانگین تیمارها با شاهد با آزمون دانست (P<0.05)، - حروف

یکسان عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین میانگین تیمارها در هر بیوجار با آزمون LSD (P<0.05).

*: Significant difference with control by Danet test (P <0.05), ns: Non-significant difference with control by Danet test (P <0.05),

Same letters are not Significantly difference between mean of treatments in each biochar type according to LSD test (P <0.05).

جدول ۵- مقایسه میانگین آب قابل استفاده (PAW)، مقاومت روزنه‌ای (SR)، وزن خشک ریشه (RDW)، عملکرد (Y) و کارایی مصرف آب (WUE).

Table 5. Mean comparison of Plant available water (PAW), Stomatal resistance (SR), Root dry weight (RDW), Yield (Y), Water use efficiency (WUE)

BT	BR	BS	PAW	SR	RDW	Y	WUE
			(cm ³ cm ⁻³)	(sec cm ⁻¹)	(Kg ha ⁻¹)	(Kg ha ⁻¹)	(Kg m ⁻³)
Wheat Straw Biochar	R1	S1	20.03 ^{EF}	0.0887 ^D	40.34 ^C	2914.8 ^{IJ}	0.90 ^{JK}
		S2	19.543 ^H	0.0678 ^{EF}	40.297 ^C	3919.7 ^{BCD}	1.213 ^{BCDE}
		S3	20.733 ^D	0.0229 ^K	36.517 ^{CD}	3617.2 ^{DEF}	1.120 ^{DEFG}
	R2	S1	21.327 ^C	0.1302 ^B	47.387 ^B	3762.6 ^{CDE}	1.163 ^{CDEF}
		S2	20.817 ^D	0.0481 ^{GHI}	29.17 ^{EFG}	2659.8 ^J	0.820 ^K
		S3	18.007 ^J	0.0742 ^E	32.95 ^{DEF}	3509.6 ^{EFG}	1.087 ^{FGH}
	R3	S1	19.603 ^{GH}	0.1236 ^B	32.463 ^{DEF}	4147.8 ^{BC}	1.280 ^{BC}
		S2	22.067 ^B	0.0388 ^{IJ}	31.877 ^{DEF}	5200.4 ^A	1.607 ^A
		S3	19.357 ^H	0.0416 ^{HIJ}	22.377 ^G	3796.6 ^{BCDE}	1.173 ^{BCDEF}
Apricot Firewood Biochar	R1	S1	22.09 ^B	0.1039 ^C	30.32 ^{DEF}	3807.1 ^{BCDE}	1.177 ^{BCDEF}
		S2	22.097 ^B	0.0586 ^{FG}	52.657 ^B	3085.5 ^{HI}	0.957 ^{IJ}
		S3	17.983 ^J	0.145 ^A	47.983 ^B	3550.4 ^{DEF}	1.100 ^{EFG}
	R2	S1	19.917 ^{FG}	0.0532 ^{GH}	28.11 ^{FG}	4170.4 ^B	1.29 ^B
		S2	20.307 ^E	0.1211 ^B	35.247 ^{CDE}	3486.6 ^{EFGH}	1.077 ^{FGHI}
		S3	18.833 ^I	0.0352 ^{JK}	33.377 ^{DEF}	3132.7 ^{GHI}	0.967 ^{HIJ}
	R3	S1	23.017 ^A	0.0508 ^{GHI}	53.217 ^B	3293.3 ^{FGHI}	1.017 ^{GHIJ}
		S2	21.04 ^{CD}	0.0548 ^G	31.367 ^{DEF}	3489.6 ^{EFGH}	1.080 ^{FGHI}
		S3	16.683 ^K	0.1015 ^C	64.417 ^A	3956.9 ^{BCD}	1.227 ^{BCD}

- میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری (P<0.05) ندارند.

- Means with same capitals are not significantly different according to LSD test (P < 0.05).

S1 :0-0.5 mm •S2 :0.5-1 mm •S3 :1-2 mm •R1:0.5 % •R2 :1.5 % •R3 : 3 %.

میزان عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در این تحقیق در بین تیمارهای مورد مطالعه، افزایش معنی‌دار میزان عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در مقایسه با شاهد، فقط در تیمار بیوچار گندم با اندازه ذرات ۵-۱ mm با مقدار ۳٪ اتفاق افتاد. در برخی از تیمارها، عملکرد و میزان کارایی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی‌داری داشت (شکل ۱g و ۱h). تغییر در میزان عملکرد و کارایی مصرف آب به نوع، اندازه ذرات بیوچار و مقدار بیوچار بستگی داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین عملکرد نشان داد که بیشترین عملکرد (۵۲۰۰ kg ha⁻³) در بیوچار کاه گندم با اندازه ذرات S2 و مقدار بیوچار R3 و کمترین عملکرد

میزان عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در این تحقیق در بین تیمارهای مورد مطالعه، افزایش معنی‌دار میزان عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در مقایسه با شاهد، فقط در تیمار بیوچار گندم با اندازه ذرات ۵-۱ mm با مقدار ۳٪ اتفاق افتاد. در برخی از تیمارها، عملکرد و میزان کارایی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی‌داری داشت (شکل ۱g و ۱h). تغییر در میزان عملکرد و کارایی مصرف آب به نوع، اندازه ذرات بیوچار و مقدار بیوچار بستگی داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین عملکرد نشان داد که بیشترین عملکرد (۵۲۰۰ kg ha⁻³) در بیوچار کاه گندم با اندازه ذرات S2 و مقدار بیوچار R3 و کمترین عملکرد

نتیجه‌گیری کلی

این تحقیق مزرعه‌ای نشان داد که افزودن بیوچار حاصل از کاه گندم و هیزم زردآلو موجب افزایش آب قابل استفاده در خاک لوم شنی گردید. بیوچارهای کاه گندم و هیزم زردآلو در مقادیر و اندازه ذرات مساوی اثر یکسانی بر ویژگی‌های مورد مطالعه خاک لوم شنی نداشتند. در بیوچار کاه گندم با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات بیوچار میزان آب قابل استفاده افزایش یافت در حالی که در بیوچار هیزم زردآلو، با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات بیوچار، افزایش مشاهده شد. تیمارهای مورد مطالعه در این تحقیق موجب کاهش مقاومت روزه‌ای گندم نسبت به شاهد شدند. با کاهش اندازه ذرات بیوچار هیزم زردآلو، مقاومت روزه‌ای کمتر شد. ذرات درشت (S3) بیوچار کاه گندم تنش آبی گیاه را بیشتر کاهش دادند. وزن خشک ریشه گندم کمتر تحت تأثیر مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک و اندازه ذرات بیوچار قرار گرفت. یافته‌های این تحقیق اثربخشی بیشتر بیوچار کاه گندم نسبت به بیوچار هیزم زردآلو بر افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب را نشان داد. افزودن بیوچار به خاک لوم شنی افزایش میزان آب قابل استفاده گیاه در خاک را سبب شد، ولی این افزایش منجر به بیشتر شدن میزان عملکرد گندم نشد. از یافته‌های این تحقیق به صورت کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که تغییر ویژگی‌های یک خاک آهکی با افزودن یک بیوچار مشخص، به اندازه ذرات بیوچار و مقدار بیوچار اضافه شده به خاک بستگی دارد. بر همین اساس برای افزایش اثربخشی کاربرد بیوچار در خاک‌های آهکی مناطق نیمه‌خشک، باید قبل از افزودن بیوچار به خاک، ویژگی‌های بیوچار به درستی انتخاب شود. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده جذب سطحی عناصر ریزمغذی توسط بیوچار و قابلیت دسترسی این عناصر در خاک‌های آهکی تیمار شده با بیوچار، مورد بررسی قرار گیرد.

همکاران (Lusiba et al., 2017) تأثیر بیوچار و کود فسفر بر میزان رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب نخود را (*Chickpea*) بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که بیوچار با مقدار 5 t ha^{-1} و کود فسفر 90 kg ha^{-1} موجب افزایش عملکرد دانه و کارایی مصرف آب در خاک رسی شد. این در حالی بود که بیوچار اضافه‌شده به خاک لوم شنی بر اجزای عملکرد تأثیری نداشت.

بررسی پژوهش‌های انجام شده بر اثر بیوچار روی کارایی مصرف آب توسط جاو و همکاران (Gao et al., 2020) نشان داد که بیوچار با افزایش $18/8\%$ کارایی مصرف آب (WUE)، اثر معنی‌دار مثبتی در این زمینه داشت و بافت خاک بر اثر بیوچار روی WUE موثر نبود، در حالی که pH خاک در این زمینه مؤثر بود. ایشان برای تشریح این پدیده، مکانیسم افزودن ماده قلیا به خاک قلیا را بکار بردند و نتیجه‌گیری کردند که با افزایش میزان کربن موجود در بیوچار، به دلیل آزاد شدن کربن زیاد از بیوچار، میزان عملکرد و کارایی مصرف آب چندان افزایش پیدا نمی‌کند. به همین علت هم بیوچارهای تهیه‌شده از چوب در مقایسه با بیوچار تهیه شده از مواد علفی، WUE را کمتر افزایش می‌دهند. در این راستا، یافته‌های این تحقیق اثربخشی بیشتر بیوچار کاه گندم نسبت به بیوچار هیزم زردآلو بر افزایش WUE را نشان داد (جدول ۵).

در این تحقیق، در غالب تیمارهای مورد مطالعه افزودن بیوچار به خاک لوم شنی افزایش میزان آب قابل استفاده گیاه در خاک را سبب شد ولی این افزایش منجر به بیشتر شدن میزان عملکرد گندم نسبت به شاهد نشد. به نظر می‌رسد که اثر بیوچار بر میزان عملکرد و کارایی مصرف آب به ویژگی‌های ماده اولیه، ویژگی‌های خاک، شرایط استفاده از بیوچار، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار بستگی دارد. بر همین اساس برای افزایش اثربخشی کاربرد بیوچار در حل مشکل موردنظر در خاک‌های کشاورزی، باید قبل از افزودن بیوچار به خاک، ویژگی‌های بیوچار به درستی انتخاب شود (Dai et al., 2020).

References

- Abel S., Peters A., Trinks S., Schonsky H., Facklam M., and Wessolek G. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202: 183-191.
- Anonymous. 2015. Planting wheat in cold regions, "Special for Rainfed and Irrigated Cultivation". Agricultural Education Publication, Tehran, 46p.

- Bodner G., Nakhforoosh A., and Kaul H. P. 2015. Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2): 401-442.
- Chen J., Li S., Liang C., Xu Q., Li Y., Qin H., and Fuhrmann J.J. 2017. Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: effect of particle size and addition rate. *Science of the Total Environment*, 574: 24-33.
- Dai Y., Zheng H., Jiang Z., and Xing B. 2020. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 713: 136635.
- Definition S.P. 2015. Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. International Biochar Initiative. Version, 2.
- Gao Y., Shao G., Lu J., Zhang K., Wu S., and Wang Z. 2020. Effects of biochar application on crop water use efficiency depend on experimental conditions: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 249: 107763.
- Gupta M., Yang J., and Roy C. 2002. Density of softwood bark and softwood char: procedural calibration and measurement by water soaking and kerosene immersion method. *Fuel*, 81(10): 1379-1384.
- Haider G., Steffens D., Moser G., Müller C., and Kammann C.I. 2017. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study. *Agriculture, ecosystems & environment*, 237: 80-94.
- Jones Jr, J. B. (Ed.). 1999. Soil Analysis Handbook of Reference Methods. CRC Press, 382 p.
- Keith A., Singh B., and Dijkstra F.A. 2015. Biochar reduces the rhizosphere priming effect on soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 88: 372-379.
- Kirkham M.B. 2005. Principles of Soil and Plant Water Relations. Academic Press, Amsterdam, 500 p.
- Klute A. 1986. Water retention: laboratory methods. In: Klute A. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 1, Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 635-662.
- Langeroodi A.R.S., Campiglia E., Mancinelli R., and Radicetti E. 2019. Can biochar improve pumpkin productivity and its physiological characteristics under reduced irrigation regimes? *Scientia Horticulturae*, 247:195-204.
- Langroodi A.R.S. and Nora R. 2018. Effect of different levels of biochar on physiological properties of squash (*Cucurbita pepo* L.) under water stress. *Plant environmental physiology*, 13(49): 13-32.
- Liao W., and Thomas S.C. 2019. Biochar particle size and post-pyrolysis mechanical processing affect soil pH, water retention capacity, and plant performance. *Soil Systems*, 3(1): 14.
- Liu C., Liu F., Ravnskov S., Rubæk G.H., Sun Z., and Andersen M.N. 2017. Impact of wood biochar and its interactions with mycorrhizal fungi, phosphorus fertilization and irrigation strategies on potato growth. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(2): 131-145.
- Liu X., Wang H., Liu C., Sun B., Zheng J., Bian R., Drosos M., Zhang X., Li, L. and Pan G. 2020. Biochar increases maize yield by promoting root growth in the rainfed region. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1-14.
- Lusiba S., Odhiambo J., and Ogola J. 2017. Effect of biochar and phosphorus fertilizer application on soil fertility: soil physical and chemical properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(4): 477-490.
- Paneque M., José M., Franco-Navarro J.D., Colmenero-Flores J.M., and Knicker, H. 2016. Effect of biochar amendment on morphology, productivity and water relations of sunflower plants under non-irrigation conditions. *Catena*, 147: 280-287.
- Pradhan S., Bandyopadhyay K.K., and Aggarwal P. 2012. Root study of different crops. *Training Manual*, 160.
- Rajkovich S., Enders A., Hanley K., Hyland C., Zimmerman A.R., and Lehmann J. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48(3): 271-284.
- Romdhane L., Pawad Y.M., Radhouane L., Dal Cortivo C., Barion G., Panozzo A., and Vamerali, T. 2019. Wood biochar produces different rates of root growth and transpiration in two maize hybrids (*Zea mays* L.) under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(6): 846-866.
- Sun C.X., Chen X., Cao M.M., Li M.Q., and Zhang Y.L. 2017. Growth and metabolic responses of maize roots to strPAW biochar application at different rates. *Plant and soil*, 416(1): 487-502.

- Sun H.N., Wang S.W., Li Y.L., Yang W.J., Yin X.S., Yin L.N., and Deng X.P. 2018. Effects of biochar levels on winter wheat yield and water-use efficiency in Loess Plateau. *Agricultural Research of Arid Areas*, 36: 159–167. (In Chinese with English Abstract)
- Svoboda Z., Zahora J., and Dvořáčková H. 2017. Effects of biochar application on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) roots under long-term drought conditions. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(5): 1615-1622.
- Tanure M.M.C., da Costa L.M., Huiz H.A., Fernandes R.B.A., Cecon P.R., Junior J.D.P., and da Luz J.M.R. 2019. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research*, 192: 164-173.
- Trifunovic B., Gonzales H.B., Ravi S., Sharratt B.S., and Mohanty S.K. 2018. Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. *Land Degradation and Development*, 29(4): 884-893.
- van de Voorde T.F.J., Van Noppen F., and Nachenius R.W. 2014. Biochars produced from individual grassland species differ in their effect on plant growth. *Basic and Applied Ecology*, 15: 18–25.
- Verheijen F., Jeffery S., Bastos A. C., Van der Velde M., and Diafas I. 2010. Biochar Application to Soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions. European Commission, 166p.
- Wang A., Lam S.K., Hao X., Li F.Y., Zong Y., Wang H., and Li P. 2018. Elevated CO₂ reduces the adverse effects of drought stress on a high-yielding soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivar by increasing water use efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132: 660-665.
- Xiang Y., Deng Q., Duan H., and Guo Y. 2017. Effects of biochar application on root traits: a meta - analysis. *GCB bioenergy*, 9(10): 1563-1572.
- Xiao Q., Zhu L.X., Shen Y.F., and Li S.Q. 2016. Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment. *Field Crops Research*, 196: 284-293.

Biochar amount and Particle Sizes Effects on Plant Available Water, Stomatal Resistance, Root Dry Weight and Water Use Efficiency of Wheat

Hassan Osooli^{1*}, Ahmad Karimi², Hossain Shirani³

(Received: December 2020 Accepted: June 2021)

Abstract

Biochar contributes to sustainable production by improving soil and plant characteristics. In previous studies, less attention has been paid to the effect of particle size and amount of biochar on soil hydraulic properties and plant water use efficiency. The aim of this field study was to investigate the effect of different amounts of biochar with different particle sizes on plant available water (PAW) and stomatal resistance, root dry weight, yield and Wheat water use efficiency (WUE). Factorial experiment with a randomized complete block design was performed with three factors of type, amount and particle size of biochar. Wheat straw and apricot firewood biochar, in the sizes of 0- 0.5 (S1), 0.5-1 (S2) and 1-2 (S3) mm with amount of 0.5 (R1), 1.5 (R2) and 3 (R3) percent were added to the loamy sand soil. Wheat straw biochar with S2 particle size in R3 amount and apricot firewood biochar with S1 particle size in R3 amount further increased PAW. The lowest stomatal resistance in S3 particle size of wheat straw and apricot firewood biochar was observed in R1 and R2 amounts of these biochars, respectively. Wheat root dry weight was less affected by the amount and particle size of those biochars. A significant increase in wheat yield compared to the control was observed in wheat straw biochar with S2 particle size at amount of R3. In some treatments, the yield was significantly lower than the control. The results of this study showed the greater effectiveness of wheat straw biochar in particle size of S2 and amount of R3 on WUE increase. The effect of a change in the particle size of biochar on studying properties varied depending on the amount of biochar that added to the soil and the characteristics of raw materials for biochar production. The results of this study showed that the effect of biochar on soil properties is not the same.

Keywords: Biochar particle size, Soil organic carbon, Soil improvement, Wheat yield

Osooli H., Karimi A., and Shirani H. 2022. Biochar amount and particle sizes effects on plant available water, stomatal resistance, root dry weight and water use efficiency of wheat. *Applied Soil Research*, 10(2): 66-78.

1. Ph.D Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of ShahreKord

2. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of ShahreKord

3. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

* Corresponding Author Email: osoolih@gmail.com