

تاثیر بیوجار بر حاصلخیزی خاک و کارایی مصرف آب در سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) تحت شرایط تنش خشکی

فاطمه عباس‌پور^۱، حمیدرضا اصغری^{۲*}، پرویز رضوانی مقدم^۳، حمید عباسدخت^۴، جواد شباهنگ^۵، عادل بیگ بابایی^۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸

چکیده

به منظور بررسی تاثیر بیوجار بر حاصلخیزی خاک و کارایی مصرف آب در سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) در شرایط تنش خشکی، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا گردید. تیمارها شامل آبیاری به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح ۱۰۰ درصد، ۷۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی و کرت‌های فرعی شامل فاکتور بیوجار در سه سطح شامل بدون بیوجار، ۱۰ تن در هکتار بیوجار و ۲۰ تن در هکتار بیوجار و کود شیمیایی در دو سطح شامل بدون مصرف کود و مصرف کود بود. نتایج نشان داد که مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوجار بیشترین تاثیر را بر درصد نیتروژن خاک، میزان پتاسیم، درصد مواد آلی و کربن زیست‌توده میکروبی خاک داشت ولی اثر بیوجار بر میزان فسفر قابل دسترس خاک معنی‌دار نبود. نتایج مرتبط با گیاه سیاه‌دانه نشان داد که با وجود معنی‌دار نبودن اثر ساده بیوجار بر صفات گیاه، اثر متقابل آن با کود شیمیایی و نیاز آبی معنی‌دار شد. بیشترین کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد دانه در تیمارهای آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی به‌همراه مصرف کود شیمیایی (I_2F_2) و ۱۰ تن در هکتار بیوجار به‌همراه مصرف کود شیمیایی (B_2F_2) مشاهده شد. اثرات متقابل آبیاری، بیوجار و کود شیمیایی تاثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه و عملکرد کاه و کلش در سیاه‌دانه داشت و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی به‌همراه ۱۰ تن در هکتار بیوجار و کودشیمیایی ($I_2B_2F_2$) بود. به طور کلی، استفاده از بیوجار در مناطق خشک و نیمه‌خشک علاوه بر بهبود خصوصیات خاک، جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش داده و با تاثیر بهینه بر عملکرد، میزان آب مصرفی در سیاه‌دانه را کاهش داده و باعث صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کربن زیست‌توده میکروبی، کود شیمیایی، عملکرد دانه، مواد آلی خاک

مقدمه

سلامت خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گیاهان عناصر غذایی خود را از مواد آلی یا مواد معدنی موجود در خاک‌ها به‌دست می‌آورند. کشاورزی مدرن از طریق برداشت‌های مکرر محصول باعث کاهش مواد آلی خاک می‌شود. استفاده از کودهای شیمیایی که با صنعتی شدن کشاورزی رواج یافت، عملکرد گیاهان زراعی را به دو یا سه برابر افزایش داد ولی به دلیل کاهش کیفیت خاک، استفاده از کودهای شیمیایی برای حصول همان مقدار عملکرد به تدریج در طی زمان افزایش یافت. از طرف دیگر، مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه نیتروژن باعث تخریب خاک و مشکلات زیست‌محیطی در طی زمان شد (Widowati, 2012). در حال حاضر استفاده از انواع کودهای دامی یا آلی در خاک برای افزایش حاصلخیزی خاک یک روش معمول است. یکی از خصوصیات مواد آلی، تجزیه‌ی کندتر آن‌ها در مقایسه با کودهای معدنی است و معمولاً کودهای دامی هر دو تا سه سال اعمال می‌شود که علاوه بر هزینه‌های بالا، تجزیه سریع و معدنی شدن مواد آلی، تاثیر معنی‌داری نیز بر گرمایش جهانی دارد (Sika, 2012; Aslam et al., 2014). یک ایده جدید برای افزایش مواد آلی و ذخیره طولانی مدت کربن در خاک استفاده از بیوجار است.

افزایش جمعیت همراه با تغییرات شدید عوامل زیست‌محیطی و اقلیمی، بی‌ثباتی‌های اقتصادی، فقر، گرسنگی و به‌ویژه عدم وجود امنیت غذایی را به‌همراه دارد. امنیت غذایی، دسترسی همه مردم به غذای کافی در هر زمان برای یک زندگی سالم است که مستلزم افزایش عملکرد محصولات و پایداری آن، افزایش بازده منابع آب و خاک، کاهش ضایعات تولیدی و اصلاح الگوی تغذیه می‌باشد (Schouten, 2010). برای دستیابی به سیستم‌های زراعی پایدار،

۱- دانشجوی دکتری اگرکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود

۵- استادیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۶- استادیار، گروه شیمی فیزیک، موسسه پژوهشی صنایع غذایی خراسان رضوی

(Email: hamidasghari@gmail.com)

*- نویسنده مسئول:

DOI: 10.22067/gsc.v17i1.63344

التهاب، سرفه، برونشیت، سردرد، آگزما، تب، سرگیجه و آنفولانزا نیز مصرف دارد. دانه یا روغن سیاه‌دانه به‌عنوان داروی ضدنفخ، ادرارآور، شیرآور و ضدانگل استفاده می‌شود (Boskabady *et al.*, 2007; Akhondian *et al.*, 2007).

آب یکی از مهمترین عوامل محیطی در تولید گیاهان دارویی می‌باشد. به‌طوری‌که کمبود آب در جریان تولید گیاهان می‌تواند صدمات سنگینی به رشد و نمو و همچنین مواد موثره گیاهان دارویی وارد نماید. آب نه تنها به لحاظ اکولوژیکی بلکه به لحاظ فیزیولوژیکی نیز دارای اهمیت است زیرا در اکثر فرآیندهای داخلی گیاه دخالت داشته و تقریباً تمام فعالیت‌های متابولیکی سلول‌های گیاهی از جمله ساخت مواد موثره در گیاهان دارویی بستگی به وجود آب دارد. به‌نظر می‌رسد بیوپچار با داشتن صفاتی مانند توانایی ویژه در جذب و نگهداری عناصر غذایی و ظرفیت نگهداری آب بالا بتواند جایگزین کودهای شیمیایی در گیاهان شده و مقاومت گیاه به تنش‌های خشکی را افزایش دهد (Haider, 2016). در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های تلفیقی برای افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های کم‌آبی، خاک‌های فقیر یا شور همراه با حفظ عملکرد مطلوب مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی‌که تحقیقات اندکی در رابطه با تاثیر بیوپچار بر تنش خشکی وجود دارد، از طرفی نتایج مربوط به مطالعات بیوپچار بسته به نوع ماده‌ی اولیه، دمای گرماکافت و خاک منطقه‌ی مورد استفاده متفاوت می‌باشد (Teat, 2014) و با توجه به اهمیت گیاه سیاه‌دانه در صنایع داروسازی و غذایی، اطلاعاتی در زمینه اثر بیوپچار بر این گیاه به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک وجود ندارد. لذا تحقیق حاضر بر روی گیاه سیاه‌دانه در اراضی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ به صورت اسپلینت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و ۱۸ تیمار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد (طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا) به‌اجرا درآمد. زمین مورد نظر در سال قبل از اجرای این آزمایش به‌صورت آیش بود. قبل از انجام آزمایش، از خاک این زمین نمونه‌برداری تصادفی انجام شد که نتایج آنالیز آن در جدول ۱ آمده است. کرت‌های اصلی شامل سطوح آبیاری در سه سطح شامل آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی (I_1)، آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی (I_2) و آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی (I_3) و کرت‌های فرعی فاکتوریل دو عامل بیوپچار در سه سطح (بدون بیوپچار (B_1), ۱۰ تن در هکتار بیوپچار (B_2) و ۲۰ تن در هکتار بیوپچار (B_3)) و عامل کود

بیوپچار یک ماده زیستی گرماکافت (پیرولیز) شده است. گرماکافت فرآیند سوختن مواد آلی در حضور اکسیژن کم یا شرایط بدون اکسیژن است که منجر به تشکیل زغال غنی از کربن می‌شود که بسیار مقاوم به تجزیه است (Azeem *et al.*, 2016; Mukherjee *et al.*, 2014). دوام بالا و مقاومت به تجزیه‌ی بیوپچار مربوط به تغییر در ساختار شیمیایی سلولز، همی‌سلولز و لیگنین در دمای بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است به‌طوری‌که بیوپچار ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابر مقاوم‌تر از سایر مواد آلی موجود در خاک است (Aslam *et al.*, 2014; Azeem *et al.*, 2016). توانایی بالای این ماده در جذب و نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آشوبی آنها، جذب فلزات سمی و کودهای شیمیایی و کاهش آزادسازی گازهای گلخانه‌ای منجر به افزایش حاصلخیزی خاک می‌شود (Berek *et al.*, 2011). بیوپچار به‌دلیل منافذ زیاد و سطح ویژه بالا، زیستگاه مناسبی برای میکروارگانیسم‌های خاکزی است و از خشکی و شکار شدن آنها توسط موجودات بزرگتر جلوگیری کرده و منابع سرشاری از مواد معدنی و کربنی را برای میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند. با توجه به این‌که میکروارگانیسم‌ها از خدمات اکوسیستمی مهم در طبیعت هستند، می‌توانند با تاثیر بر ساختار بیولوژیکی خاک، چرخه‌ی عناصر غذایی، بهبود دانه‌بندی خاک و معدنی شدن کربن آلی بر رشد گیاه موثر باشند (Zhang *et al.*, 2014; Aslam *et al.*, 2016; Lehmann *et al.*, 2011). به‌دلیل نقش بیوپچار در پایداری اکوسیستم‌ها، آزمایش‌های گسترده‌ای در سال‌های اخیر در ارتباط با تاثیر بیوپچار بر رشد گیاهان و حاصلخیزی خاک انجام شده است ولی اغلب این مطالعات بر روی گیاهان زراعی بوده و تحقیق در رابطه با تاثیر بیوپچار بر گیاهان دارویی بسیار نادر است. گیاهان دارویی از ارزش و اهمیت خاصی در تأمین بهداشت و سلامت جوامع، هم به لحاظ درمان و هم پیشگیری از بیماری‌ها برخوردار بوده و هستند. تحقیقات سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد جمعیت جهان به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه از گیاهان دارویی به‌منظور رفع نیازهای اولیه بهداشتی و درمانی خود بهره می‌گیرند (Choudhary and Singh Sekhon, 2011). از طرفی به‌دلیل عوارض جانبی داروهای شیمیایی، روز به روز به گیاهان دارویی و فراورده‌های آن بیشتر توجه می‌شود و اعتقاد عمومی درباره استفاده از آن‌ها پیوسته تقویت می‌گردد.

سیاه‌دانه با نام علمی *Nigella sativa* L. یک گیاه دارویی دو لپه، علفی و یکساله که متعلق به خانواده آلاله می‌باشد که به دو صورت وحشی و زراعی در ایران دیده می‌شود. سیاه‌دانه دارای زمینه‌ی تاریخی و مذهبی در بین اقوام و ملل است، به‌طوری‌که میلیون‌ها نفر در نواحی مدیترانه و شبه قاره‌ی هند روزانه از روغن دانه آن در پیشگیری طبیعی و یا درمان بیماری‌ها استفاده می‌کنند. این گیاه به‌عنوان ادویه و در درمان بیماری‌هایی مثل آسم، فشارخون، دیابت،

هم‌زمان با عملیات برداشت، شاخص‌های مورد مطالعه در خاک شامل درصد نیتروژن کل خاک، درصد فسفر قابل دسترس، پتاسیم خاک و مقدار ماده آلی خاک تعیین شد. برای این منظور در سه نقطه از تمامی کرت‌های آزمایشی در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد. هر سه نمونه با هم مخلوط و یک نمونه واحد تهیه و در کیسه پلاستیکی بسته‌بندی و به آزمایشگاه منتقل شد (Chaudhry et al., 2016). نمونه‌برداری برای کربن زیست‌توده میکروبی خاک جداگانه و در شرایطی که خاک مزرعه از نظر رطوبتی در حد ظرفیت زراعی بود، انجام گرفت. نمونه‌های برداشت شده در ظروف حاوی یخ قرار داده شد و سریعاً به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آزمایش در دمای چهار درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شد. میزان کربن زیست‌توده‌ی میکروبی به روش تدخین - انکوآسیون (Horwath and Paul, 1994) در ۱۰۰ گرم خاک تعیین شد و بر حسب میلی‌گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک گزارش گردید. سایر نمونه‌های خاک بعد از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و پس از عبور از الک دو میلی‌متری، نیتروژن کل با روش کج‌دال (AOAC, 2000)، فسفر قابل دسترس خاک به روش اولسن و سامرز (Olsen and Sammers, 1982)، پتاسیم به روش استات آمونیوم (Klut, 1986) و کربن آلی به روش والکللی بلک (Nelson and Sommers, 1982) اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری کربن آلی، مقدار ماده آلی خاک از حاصل ضرب کربن آلی در عدد ۱/۷۲۴ به دست آمد (Baldock and Skjemstad, 1999). عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش با حذف ردیف‌های کناری و با برداشت ردیف‌های وسط در هر کرت تعیین شد. کارایی مصرف آب به صورت عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) به ازای میزان آب مصرفی (مترمکعب در هکتار) محاسبه گردید. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

صفات مرتبط با خاک

درصد نیتروژن خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که بیوچار در سطح احتمال پنج درصد بر درصد نیتروژن خاک تأثیر مثبتی داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها نیز بیانگر افزایش درصد نیتروژن خاک در تیمارهای ۲۰ و ۱۰ تن در هکتار بیوچار بود. به طوری که میزان نیتروژن در این دو تیمار به ترتیب ۰/۰۸۹ و ۰/۰۸۰۵ درصد در مقایسه با ۰/۰۷۶ درصد در شاهد بود (جدول ۴). هیچ‌یک از اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه‌ی تیمارهای مورد مطالعه بر درصد نیتروژن خاک معنی‌دار نبود. گزارش‌های زیادی مبنی بر تأثیر بیوچار

شیمیایی در دو سطح (بدون مصرف کود (F_1) و مصرف کود شیمیایی (F_2)) بود. میزان مصرف کود شیمیایی بر اساس آزمایش‌های خاک ۷۵ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل (P_2O_5)، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم (K_2SO_4) و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (اوره) بود. مراحل آماده‌سازی زمین در دی ماه سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ انجام گرفت. ابعاد کرت‌های آزمایش ۳×۲ متر، فاصله بین کرت‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بلوک‌ها از یکدیگر یک متر بود. بیوچار از ضایعات چوب درخت گردو تهیه شد (Mukome et al., 2012). برای این منظور از کوره‌ای که فضای آن کاملاً بسته بود، استفاده شد تا اکسیژن وارد کوره نشود. دمای کوره بین ۴۰۰-۶۵۰ درجه سانتی‌گراد بود (Mukherjee, 2011). تجزیه شیمیایی بیوچار نیز از طریق آزمایش مشخص شد (جدول ۲). بیوچار و کود شیمیایی فسفر و پتاسیم قبل از کاشت با خاک تا عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری مخلوط شد (Pühringer, 2016). سیاه‌دانه در تاریخ نوزدهم فروردین‌ماه ۹۵-۱۳۹۴ به صورت دستی در عمق دو سانتی‌متری کشت شد. هر کرت شامل هشت ردیف به فاصله ۲۵ سانتی‌متر بود. گیاهچه‌های سیاه‌دانه در دو مرحله چهار و هشت برگی برای رسیدن به تراکم مورد نظر (۲۰۰ بوته در مترمربع) با فاصله روی ردیف دو سانتی‌متر تنک شدند. کود نیتروژن در دو مرحله بعد از تنک کردن بوته‌ها (مرحله ده برگی و قبل از شروع رشد زایشی) به کرت‌های مورد نظر اضافه شد. از وجین دستی برای کنترل علف‌های هرز استفاده شد. نیاز آبی گیاه تیمار شاهد با استفاده از میانگین بلند مدت داده‌های روزانه‌ی پارامترهای هواشناسی ثبت شده از نزدیکترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری گردید. تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو (Khosroshahi, 2013) محاسبه شد. نیاز آبی گیاه سیاه‌دانه بر اساس حاصل ضرب تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ضریب گیاهی سیاه‌دانه (K_c) (Ghamarnia et al., 2014) توسط نرم‌افزار آبیاری کراپ وات که یک نرم‌افزار مناسب برای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری است و به‌وسیله فائو ارائه شده است، تعیین شد. مقدار نیاز آبی برای تیمار شاهد ۷۴۲/۹ میلی‌متر برآورد شد. نیاز آبی سایر تیمارها (تیمارهای تنش آبی) بر اساس نیاز آبی تیمار شاهد و درصد تنش آبی (۷۰ و ۴۰ درصد) برآورد و توزیع شد. آبیاری به روش قطره‌ای و به صورت هفتگی انجام گرفت و برای اجرای مقدار آب تیمارهای آبیاری از کنتور حجمی استفاده شد. زمان اعمال تیمارهای آبیاری پس از توسعه کامل گیاه و قبل از شروع مرحله زایشی در تاریخ نهم خردادماه ۹۵-۱۳۹۴ بود. دلیل انتخاب این زمان برای اعمال تنش، افزایش نیاز آبی گیاه در این مرحله و همچنین سپری شدن دوره بارندگی بود. به این ترتیب حداکثر صرفه‌جویی در مصرف آب صورت گرفت. برداشت در تاریخ‌های ۴ و ۵ مرداد ماه ۹۵-۱۳۹۴ با زرد شدن برگ‌ها و فولیکول‌ها انجام شد.

نسبت داد. همچنین وجود منافذ زیاد و سطح ویژه بالا در بیوپچار موجب افزایش قدرت تبادل کاتیونی و افزایش عناصر غذایی در تیمارهای حاوی بیوپچار می‌شود (Jemal and Abebe, 2016).

بر افزایش درصد نیتروژن خاک وجود دارد (Nigussie *et al.*, 2012; Njoku *et al.*, 2016; Foster *et al.*, 2016). دلیل افزایش درصد نیتروژن در تیمارهای حاوی بیوپچار را می‌توان به توانایی بالای این ماده در نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آبشویی نیتروژن

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1- Physicochemical properties of the experimental soil

بافت خاک Soil texture	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmolc kg ⁻¹)	فسفر قابل دسترس Available P (mg kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg kg ⁻¹)	کربن الی OC (%)	نیتروژن کل Total N (%)	درصد اشباع خاک SP (%)	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	اسیدیته pH
Loam	21	41	38	8.9	12	220	0.837	0.079	40.2	1.9	7.65

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپچار مورد استفاده

Table 2- Physicochemical properties of the biochar used for the experiment

مواد آلی فرار و رطوبت Volatile organic matter & moisture	پتاسیم K	فسفر Available P (%)	نیتروژن کل Total N	کربن Carbon	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	هدایت الکتریکی EC (μS cm ⁻¹)	اسیدیته pH
46.95	0.21	0.01	1.27	45.44	0.27	200	9.7

کامل مشاهده کردند.

درصد فسفر قابل دسترس در خاک

تاثیر بیوپچار بر فسفر قابل دسترس خاک معنی‌دار نبود ولی آبیاری در سطح احتمال پنج درصد و کود شیمیایی در سطح احتمال ۱ درصد بر درصد فسفر قابل دسترس خاک تاثیر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). در یک تحقیق بیوپچار بدون استفاده از کود شیمیایی باعث کاهش فسفر خاک شد، این امر به دلیل قلیایی شدن خاک و جذب فسفر توسط بیوپچار عنوان شد (Nelson *et al.*, 2011). ولی محققان دیگری به افزایش فسفر قابل دسترس در تیمارهای حاوی بیوپچار اشاره کردند و دلیل این افزایش را بهبود اسیدیته خاک و در نتیجه کاهش فعالیت یون‌های آلومینیوم و آهن بیان کردند (Dume *et al.*, 2016). عدم تاثیر بیوپچار بر فسفر قابل دسترس در تحقیق حاضر احتمالاً به دلیل جذب سریع فسفر توسط گیاه یا تعادل در فسفر ورودی ناشی از کود شیمیایی با معدنی شدن آن توسط میکروارگانیزم‌های خاک است که این نتایج همسو با گزارش‌های فوستر و همکاران (Foster *et al.*, 2016) بود. اثرات متقابل آبیاری و بیوپچار و آبیاری و کود شیمیایی نیز معنی‌دار بودند (جدول ۳) به طوری که تیمار I₃B₁ (آبیاری ۴۰ درصد نیاز آبی + بدون مصرف بیوپچار) با داشتن ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم، بیشترین فسفر خاک را دارا بود (جدول ۵). اثرات متقابل آبیاری، بیوپچار و کود شیمیایی نیز بیانگر تاثیر بیشتر تیمار I₃B₁F₂ (آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی + بدون بیوپچار + مصرف کود شیمیایی) بر درصد فسفر خاک بود (جدول ۵). فوستر و همکاران (Foster *et al.*, 2016) نیز فسفر قابل دسترس بیشتری را در تیمارهای تحت تنش نسبت به تیمار آبیاری

پتاسیم خاک

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که بیوپچار بر میزان پتاسیم خاک در سطح احتمال یک درصد تاثیر معنی‌داری داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات ساده نشان داد که با افزایش بیوپچار از ۱۰ تا ۲۰ تن در هکتار، میزان پتاسیم خاک از ۱۴۸/۶ تا ۱۷۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش یافت (جدول ۴). اثر متقابل آبیاری و بیوپچار نیز معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار I₁B₃ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوپچار) به مقدار ۱۸۶/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۵). در آزمایشات مختلف نیز به افزایش پتاسیم خاک با افزایش مقدار بیوپچار اشاره شده است (Dume *et al.*, 2016; Njoku *et al.*, 2016). بیوپچار به دلیل تاثیر بر افزایش قدرت تبادل کاتیونی در افزایش یون‌های خاک از جمله پتاسیم نقش دارد و باعث دسترسی بهتر گیاه به این عناصر می‌شود به علاوه بیوپچار به دلیل دارا بودن عناصر غذایی در افزایش این عناصر در خاک موثر است (Pühlinger, 2016).

درصد ماده آلی خاک

بیوپچار بر درصد مواد آلی خاک در سطح احتمال پنج درصد تاثیر معنی‌داری داشت ولی اثر سایر تیمارها بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات ساده نشان داد که در اثر افزایش سطوح بیوپچار، درصد ماده آلی خاک افزایش یافت به طوری که در

و بیوچار معنی‌دار بود و بیشترین کربن زیست‌توده میکروبی مربوط به تیمار I_1B_3 (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار) به میزان ۴۱/۵۴ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم خاک بود. اثرات متقابل آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی نیز معنی‌دار بود و بیشترین تأثیر مربوط به تیمار $I_1B_3F_2$ (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بود (جدول ۵). تأثیر بیوچار بر کربن زیست‌توده میکروبی به دلیل گزارش‌های متفاوت در مقالات هنوز ناشناخته است (Lehmann *et al.*, 2011). این تفاوت‌ها در نتایج با نوع و مقادیر بیوچار مصرفی و نوع خاک مرتبط است. برخی از محققان به افزایش کربن زیست‌توده میکروبی با افزایش مصرف بیوچار اشاره کردند (Demisie and Zhang, 2015) ولی محققان دیگری نیز کاهش کربن زیست‌توده میکروبی را در آزمایش‌های خود عنوان کردند (Dempster *et al.*, 2010). تغییرات در کربن زیست‌توده میکروبی خاک با توانایی بیوچار در بهبود اسیدیته و آب خاک، دسترسی بهتر به عناصر غذایی و جذب ترکیبات سمی مرتبط است به‌علاوه منافذ بیوچار می‌تواند از شکارشدن میکروارگانیسم‌ها جلوگیری کرده و به ذخیره‌ی کربن و عناصر معدنی کمک کند (Zhang, 2014).

تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار، ماده آلی ۱/۳۹۲ درصد و در تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوچار ۱/۵۵۸ درصد بود (جدول ۴). محققان دیگری نیز به افزایش میزان کربن آلی و ماده آلی خاک با افزودن بیوچار به خاک اشاره کرده‌اند (Dume *et al.*, 2016). افزایش میزان کربن آلی خاک با افزایش مصرف بیوچار به وجود درصد بالایی از کربن آلی در بیوچار مصرفی مربوط است. با توجه به این که میزان ماده آلی خاک یکی از مولفه‌های مهم حاصلخیزی خاک است، افزودن بیوچار به خاک به دلیل کربن بالای آن می‌تواند منبع بسیار مناسبی برای جبران کمبود کربن و مواد آلی خاک و در نتیجه بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و نیز حفظ سلامت خاک باشد (Fredro, 2013).

کربن زیست‌توده میکروبی

کربن زیست‌توده میکروبی نشانگر حضور فعال میکروارگانیسم‌های مختلف و تجزیه مواد آلی در اکوسیستم‌ها است و در آزادسازی عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک نقش به‌سزایی دارد. در تحقیق حاضر بیوچار بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر معنی‌داری داشت و بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی ۳۸/۲۸ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم خاک مربوط به مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار بود (جدول‌های ۳ و ۴). در بین اثرات متقابل دوگانه، اثر متقابل آبیاری

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای مورد مطالعه بر برخی خصوصیات خاک

Table 3- Analysis of variance (mean square) for the effect of studied treatments on some properties of experimental soil

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	نیترژن کل Total nitrogen	فسفر قابل دسترس Available phosphorus	پتاسیم Potassium	مواد آلی خاک Soil organic matter	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon
بلوک Block	2	0.0051 ^{ns}	0.891 ^{ns}	3292.1 ^{ns}	1.518 ^{ns}	35.29 ^{ns}
آبیاری Irrigation (I)	2	0.0000 ^{ns}	8.25 ^{ns}	1357.4 ^{ns}	0.003 ^{ns}	38.76 ^{ns}
کرتهای اصلی خطای Main plot error	4	0.0003	2.3	435.8	0.108	30.95
بیوچار Biochar (B)	2	0.0007*	1.91 ^{ns}	4317.1**	0.253*	49.74*
بیوچار × آبیاری Irrigation×Biochar	4	0.0001 ^{ns}	25.44**	1762.9*	0.052 ^{ns}	67.74*
کودشیمیایی Fertilizer (F)	1	0.0003 ^{ns}	78.48**	185.1 ^{ns}	0.123 ^{ns}	67.84 ^{ns}
آبیاری × کودشیمیایی Irrigation× Fertilizer	2	0.0001 ^{ns}	8.76*	179.6 ^{ns}	0.067 ^{ns}	14.7 ^{ns}
بیوچار × کودشیمیایی Biochar× Fertilizer	2	0.00006 ^{ns}	4.43 ^{ns}	311.5 ^{ns}	0.021 ^{ns}	0.021 ^{ns}
آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی Irrigation×Biochar× Fertilizer	4	0.00036 ^{ns}	14.37**	918.5 ^{ns}	0.128 ^{ns}	124.7**
خطای کرت های فرعی Sub plot error	30	0.0002	2.08	685.7	0.065	18.92
ضرب تغییرات C.V. (%)	-	19.2	10.4	16.9	17.9	11.8

ns, ** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪

ns, ** and * are significant at $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات ساده بیوچار بر خصوصیات خاک

Table 4- Means comparison for biochar effects on soil properties

فاکتور Factor	سطوح Levels	نیترژن کل Total Nitrogen (%)	پتاسیم Potassium (mg kg ⁻¹)	مواد آلی خاک Soil organic matter (%)	کربن زیست توده میکروبی Microbial biomass carbonic (mgc100g soil ⁻¹)
بیوچار Biochar (t ha ⁻¹)	0 (B ₁)	0.076b	143.1b	1.329b	36.87ab
	10 (B ₂)	0.085ab	148.6b	1.392ab	34.96b
	20 (B ₃)	0.089a	172.2a	1.558a	38.28a

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

In each column of each experimental factor, same letters had not significant differences in Duncan's multiple range at p<0.05

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری×بیوچار و اثرات سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی بر خصوصیات خاک

Table 5-Mean comparison of interaction effects for irrigation× biochar and irrigation× biochar × fertilizer on soil properties

تیمار Treatment	فسفر قابل دسترس Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	پتاسیم Potassium (mg kg ⁻¹)	کربن زیست توده میکروبی Microbial biomass carbonic (mgc100g soil ⁻¹)
I ₁ B ₁	13.53c	148.3bcd	34.15cd
I ₁ B ₂	15.5ab	156.7abc	35.62bcd
I ₁ B ₃	14.17bc	186.7a	41.54a
I ₂ B ₁	11.12d	119.2d	39.57ab
I ₂ B ₂	12.7cd	144.2cd	38.25abc
I ₂ B ₃	15.4ab	176.7ab	35.99bcd
I ₃ B ₁	16a	161.7abc	36.89abc
I ₃ B ₂	12.93c	145cd	31.03d
I ₃ B ₃	12.97c	153.3bc	37.32abc
I ₁ B ₁ F ₁	14.2 cdef		35.9bcdefg
I ₁ B ₁ F ₂	12.8defg		32.3efgh
I ₁ B ₂ F ₁	14.6cde		40abcd
I ₁ B ₂ F ₂	16.4bc		31.1fgh
I ₁ B ₃ F ₁	13.2 defg		37.1bcdefg
I ₁ B ₃ F ₂	15.1cd		45.9a
I ₂ B ₁ F ₁	10h		41.1abc
I ₂ B ₁ F ₂	12.1fgh		37.9bcdef
I ₂ B ₂ F ₁	11.7gh		37.5bcdefg
I ₂ B ₂ F ₂	13.6defg		39abcde
I ₂ B ₃ F ₁	12.6efg		41.6ab
I ₂ B ₃ F ₂	18.2ab		30.35gh
I ₃ B ₁ F ₁	12.2efgh		33defgh
I ₃ B ₁ F ₂	19.7a		40.7abc
I ₃ B ₂ F ₁	12.8defg		34.2cdefgh
I ₃ B ₂ F ₂	13defg		27.7h
I ₃ B ₃ F ₁	11.9fgh		39.7abcd
I ₃ B ₃ F ₂	14cdefg		34.9bcdefgh

I₁, I₂ and I₃: 100, 70, 40% water requirement, respectively;

B₁, B₂, B₃: 0, 10, 20 t ha⁻¹ biochar, respectively; F₁ and F₂: non-using chemical fertilizer, using chemical fertilizer, respectively

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند

In a column of each experimental factor, same letters had no significant differences in Duncan's multiple range test at p<0.05

صفات مرتبط با گیاه

عملکرد دانه

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشانگر تاثیر معنی‌دار آبیاری بر عملکرد دانه بود (جدول ۶). مقایسه میانگین اثرات ساده بیانگر تفاوت معنی‌دار تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی با تیمار ۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی بر عملکرد دانه بود (جدول ۷). تنش آبیاری با تاثیر بر کاهش رشد رویشی و زایشی در گیاه، افت عملکرد را در پی دارد (Shabanzadeh *et al.*, 2011). در بین اثرات متقابل دوگانه، اثر متقابل کود و بیوچار بر عملکرد دانه معنی‌دار بود و بیشترین مقدار مربوط به تیمار B_3F_2 (۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و B_2F_2 (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) به ترتیب برابر ۱۲۲۷ و ۱۱۸۴ کیلوگرم در هکتار بود (جدول‌های ۶ و ۸). این نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار به همراه کود شیمیایی اثرات بهتری نسبت به مصرف هر یک از این دو ماده به تنهایی داشت. مطالعات مختلفی بیانگر تاثیر مضاعف بیوچار در ترکیب با کودهای آلی و معدنی بوده است که این امر با توانایی در جذب و نگهداری عناصر غذایی و در نتیجه دسترسی بهتر گیاه به عناصر غذایی مرتبط می‌باشد (Arif *et al.*, 2012; Chaudhry *et al.*, 2016; Gokila and Baskar, 2015). اثرات سه‌گانه کود، بیوچار و آبیاری بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۹). در بین اثرات متقابل سه‌گانه، تیمار $I_2B_2F_2$ (آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و تیمار $I_2B_3F_2$ (آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) به ترتیب با مقدار ۱۳۵۶ و ۱۳۲۵ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه را داشتند. بالا بودن عملکرد در این دو تیمار نشانگر تاثیر بیوچار در کاهش میزان آب مصرفی است. به این ترتیب می‌توان با استفاده از بیوچار به جای ۱۰۰ درصد آبیاری از ۷۰ درصد آب مورد نیاز برای کشت سیاهدانه استفاده کرد. با کاربرد بیوچار به دلیل منافذ زیاد، سطح ویژه بالای آن، افزایش جذب عناصر غذایی و قدرت نگهداری آب بالا، موجبات عملکرد بیشتر گیاه فراهم گردید. به عبارت دیگر بیوچار در گیاهان تحت تنش ملایم، عملکرد دانه را به ازای مقدار آب مصرف شده بیشتر از تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد افزایش داد. در یک تحقیق، بیشترین تاثیر بر عملکرد دانه در لوبیای بالدار (*Vigna radiate*) در مصرف ۲۵ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با مصرف ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار بیوچار مشاهده گردید (Rub *et al.*, 2016). فوستر و همکاران (Foster *et al.*, 2016) در آزمایش‌های خود به کاهش عملکرد ذرت (*Zea mays*) در تیمار بیوچار به همراه تنش آب اشاره کردند در حالی که بیوچار در تیمار آبیاری کامل باعث افزایش عملکرد شد.

عملکرد کاه و کلش

اثر ساده تیمار کود شیمیایی، اثر متقابل آبیاری و کود و اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری، کود و بیوچار بر عملکرد کاه و کلش معنی‌دار بود ولی اثر ساده آبیاری و بیوچار بر عملکرد کاه و کلش تاثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۶). عدم تاثیر معنی‌دار بیوچار بر زیست‌توده گیاهی در آزمایش‌های دیگری نیز گزارش شده است (Schulz, *et al.*, 2014). بیشترین عملکرد کاه و کلش در اثر متقابل آبیاری و کود شیمیایی مربوط به تیمارهای I_2F_2 (۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) و I_1F_2 (۱۰۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) به ترتیب ۴۰۴۴ و ۳۷۲۵ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۸). اثرات متقابل سه تیمار نشان‌دهنده تاثیر بالاتر تیمارهای $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بر عملکرد کاه و کلش بود (۴۴۲۰ کیلوگرم بر هکتار) (جدول ۹). بنابراین می‌توان اظهار داشت که استفاده از کود شیمیایی و بیوچار به همراه آبیاری مناسب، باعث فراهم شدن آب و مواد غذایی و در نتیجه رشد بهینه گیاه گردیده است. ابراهیم و همکاران (Ibrahim, *et al.*, 2015) به افزایش بیشتر عملکرد کاه و کلش در تیمارهای حاوی بیوچار و آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه در مقایسه با تیمارهای بدون بیوچار و ۱۰۰ درصد آبیاری اشاره کردند. در آزمایشی بر روی گیاه ذرت بالاترین عملکرد کاه و کلش در تیمار بیوچار به همراه کود شیمیایی مشاهده شد. استفاده همزمان بیوچار با کود شیمیایی باعث جذب نیتروژن توسط بیوچار و آزادسازی آهسته آن شده و ارتباط بین منبع و مخزن تقویت می‌شود که نتیجه آن افزایش رشد رویشی و زایشی گیاه است. در مقابل کاربرد نیتروژن معدنی به تنهایی، به دلیل آبشویی آن به طور سریع‌تری از دسترس گیاه خارج می‌شود (Gokila and Baskar, 2015).

کارایی مصرف آب (بر اساس عملکرد دانه)

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده تیمارها تاثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب نداشت ولی اثر متقابل بیوچار و کود شیمیایی و اثر متقابل سه‌گانه آبیاری، بیوچار و کود معنی‌دار بود (جدول ۶). در بین تیمارهای مربوط به اثرات متقابل بیوچار و کود، تیمار B_3F_2 (۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و B_2F_2 (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) نیز بیشترین مقدار کارایی مصرف آب را داشتند (جدول ۸). مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نشان داد که تیمارهای $I_3B_3F_2$ (۴۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بیشترین کارایی مصرف آب را داشتند (به ترتیب ۰/۲۸۴ و ۰/۲۷۲ کیلوگرم در متر مکعب) (جدول ۹). افزایش کارایی مصرف آب با بالا بودن عملکرد و

گیاهان تحت تنش تیمار شده با بیوچار به دلیل افزایش کارایی مصرف آب و محتوای نسبی آب در این تیمارها افزایش یافت. در تحقیقی دیگر استفاده از مخلوط بیوچار و کمپوست بیشترین افزایش کارایی مصرف آب و عملکرد را موجب شد (Abubakari *et al.*, 2015).

همچنین کاهش میزان آب مصرفی در این تیمارها مرتبط است. افزایش کارایی مصرف آب با کاربرد بیوچار در آزمایش‌های دیگر نیز گزارش شده است. اختر و همکاران (Akhtar *et al.*, 2014) گزارش کردند که در گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) کاربرد بیوچار باعث مقاومت این گیاه به تنش خشکی گردید و عملکرد

جدول ۶- تجزیه‌وارینانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای مورد مطالعه بر عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش و کارایی مصرف آب در گیاه سیاه‌دانه

Table 6- The analysis of variance (mean square) for the effect of studied treatments on seed yield, straw yield and water use efficiency in black seed

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد کاه و کلش Straw yield	کارایی مصرف آب WUE
بلوک Block	2	338414.05 ^{ns}	4908604.05 ^{ns}	0.051 ^{ns}
آبیاری Irrigation (I)	2	678718.6 [*]	4387008.56 ^{ns}	0.002 ^{ns}
خطای کرت‌های اصلی Main plot error	4	66526.7	1136303.54	0.017
بیوچار Biochar (B)	2	18891.2 ^{ns}	124676.87 ^{ns}	0.001 ^{ns}
آبیاری × بیوچار Irrigation × Biochar	4	30726.2 ^{ns}	238939.54 ^{ns}	0.002 ^{ns}
کودشیمیایی Fertilizer (F)	1	101375.7 ^{ns}	16534020.6 ^{**}	0.004 ^{ns}
آبیاری × کودشیمیایی Irrigation × Fertilizer	2	41023.2 ^{ns}	675786.42 [*]	0.001 ^{ns}
بیوچار × کودشیمیایی Biochar × Fertilizer	2	168023.7 ^{**}	20575.56 ^{ns}	0.008 ^{**}
آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی Irrigation × Biochar × Fertilizer	4	79246.9 [*]	620880.02 [*]	0.005 ^{**}
خطای کرت های فرعی Sub plot error	30	26548.1	246939.3	0.001
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	15.0	16.7	15.1

ns, ** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪

ns, ** and * are significant at p<0.01 and p<0.05, respectively

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر ساده تیمار آبیاری بر عملکرد دانه در گیاه سیاه‌دانه

Table 7- Means comparison for the effect irrigation on seed yield in black seed

فاکتور Factor	سطوح Levels	عملکرد دانه Seed yield (kg ha ⁻¹)
آبیاری Irrigation (I)	100 (I ₁)	1239.3a
	70 (I ₂)	1157.9a
(%)	40 (I ₃)	814.2b

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

In a column of each experimental factor, same letters had not significant differences in Duncan's multiple range test at p<0.05.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری × کودشیمیایی و بیوجار × کودشیمیایی بر عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش و کارایی مصرف آب در گیاه سیاه‌دانه

Table 8- Mean comparison of interaction effects for irrigation × fertilizer and biochar × fertilizer on yield, straw yield and water use efficiency in black seed

فاکتور Factor	عملکرد دانه Seed yield (kg ha ⁻¹)	عملکرد کاه و کلش Straw yield (kg ha ⁻¹)	کارایی مصرف آب WUE(kg m ⁻³)
I ₁ F ₁		2747b	
I ₁ F ₂		3725a	
I ₂ F ₁		2502b	
I ₂ F ₂		4044a	
I ₃ F ₁		2000c	
I ₃ F ₂		2800b	

B ₁ F ₁	1117abc		0.233abc
B ₁ F ₂	986.3c		0.203c
B ₂ F ₁	1033bc		0.213bc
B ₂ F ₂	1184ab		0.243ab
B ₃ F ₁	987.4c		0.203c
B ₃ F ₂	1227a		0.253a

I₁, I₂ and I₃: 100, 70, 40% water requirement, respectively; B₁, B₂, B₃: 0, 10, 20 t ha⁻¹ biochar, respectively; F₁ and F₂: Non-using chemical fertilizer, using chemical fertilizer, respectively

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

In a column of each experimental factor, same letters had not significant differences in Duncan's multiple range test at p<0.05.

جدول ۹- مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری، کودشیمیایی و بیوجار بر عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش و کارایی مصرف آب در گیاه سیاه‌دانه

Table 9- Mean comparison of interaction effects for irrigation x fertilizer x biochar on yield, straw yield and water use efficiency

فاکتور Factor	عملکرد دانه Seed yield (kg ha ⁻¹)	عملکرد کاه و کلش Straw yield (kg ha ⁻¹)	کارایی مصرف آب WUE (kg m ⁻³)
I ₁ B ₁ F ₁	1278ab	2747efgh	0.239abcd
I ₁ B ₁ F ₂	1289ab	3327bcde	0.246abcd
I ₁ B ₂ F ₁	1140abcdef	2773efgh	0.207de
I ₁ B ₂ F ₂	1314ab	3874abc	0.24abcd
I ₁ B ₃ F ₁	1232abc	2720efghi	0.234abcd
I ₁ B ₃ F ₂	1182abcd	3973ab	0.213cde
I ₂ B ₁ F ₁	1131abcdef	2400fghi	0.228bcd
I ₂ B ₁ F ₂	1087abcdef	4053ab	0.218cde
I ₂ B ₂ F ₁	1052bcdef	2273ghi	0.212cde
I ₂ B ₂ F ₂	1356a	4420a	0.272ab
I ₂ B ₃ F ₁	996.7cdefg	2833defgh	0.202de
I ₂ B ₃ F ₂	1325a	3660abcd	0.262abc
I ₃ B ₁ F ₁	941.2defg	1893i	0.23bcd
I ₃ B ₁ F ₂	583.7h	3080cdefg	0.146f
I ₃ B ₂ F ₁	906.3efg	2007hi	0.222bcde
I ₃ B ₂ F ₂	880.7fg	2213hi	0.218cde
I ₃ B ₃ F ₁	733.1gh	2100hi	0.173ef
I ₃ B ₃ F ₂	1174abcde	3107cdef	0.284a

I₁, I₂ and I₃: 100, 70, 40% water requirement, respectively; B₁, B₂, B₃: 0, 10, 20 t ha⁻¹ biochar, respectively; F₁ and F₂: non-using chemical fertilizer, using chemical fertilizer, respectively

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

In each column, same letters had not significant differences in Duncan's multiple range test at p<0.05.

نتیجه‌گیری

داده می‌شود که از هدررفت و آشنویی نیترات جلوگیری کرده و به دستیابی بهتر گیاه برای عناصر غذایی کمک می‌کند. بیوچار در شرایط کم‌آبایی به دلیل داشتن منافذ زیاد و توانایی نگهداری آب بالا، باعث افزایش کارایی مصرف آب در گیاه شد. این امر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک میزان آب مصرفی را کاهش داده و به ازای آب مصرفی، عملکرد بیشتر از گیاهان تحت تنش بدون بیوچار افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش نشان داد که با مصرف بیوچار می‌توان به جای آبیاری ۱۰۰ درصد از ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه برای حصول همان میزان عملکرد استفاده کرده به این ترتیب می‌توان در میزان آب مصرفی صرفه‌جویی کرد.

بیوچار با تاثیر بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل بهبود اسیدیته خاک، بهبود عناصر غذایی خاک، افزایش قدرت نگهداری عناصر غذایی و ایجاد شرایط مناسب برای میکروارگانیسم‌های خاک می‌تواند بر رشد رویشی و زایشی سیاه‌دانه تاثیر مثبت داشته باشد. اگرچه تاثیر مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار بر خصوصیات خاک بیشتر از ۱۰ تن در هکتار بیوچار بود ولی تفاوت معنی‌داری بر صفات مرتبط با سیاه‌دانه بین این دو تیمار مشاهده نشد. مصرف بیوچار به همراه کود شیمیایی اثرات بهتری را بر عملکرد دانه و عملکرد کاه و کلش نسبت به مصرف بیوچار یا کود شیمیایی به تنهایی داشت. این امر به منافذ و سطح ویژه بیشتر در بیوچار نسبت

References

1. Abubakari, A. H., Bayor, H., Takyi, I., Chimsah, F. A., Nyarko, G., Atuah, L., and Banful, B. 2016. Effect of compost-biochar mixes and irrigation on the growth and yield of *Amaranthus* (*Amaranthus hybridus*) under two growing temperatures. *African Journal of Agricultural Research* 11 (25): 2257-2265.
2. Akhondian, J., Parsa, A., and Rakhshandeh, H. 2007. The effect of *Nigella sativa* (black cumin seed) on intractable pediatric seizures. *Medical of Science Monit* 13: 555-559.
3. Akhtar, S. S., Andersen, M. N., and Liu, F. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agriculture of Water Management* 138: 37-44.
4. Arif, M., Asad, A., Umair, M., Munsif, F., Kawsar, A., Inamullah, M., Saleem, M., and Gohar, A. 2012. Effect of biochar, FYM and mineral nitrogen alone and in combination on yield components of maize. *Sarhad Journal of Agriculture* 28 (2): 191-195.
5. Aslam, Z., Khalid, M., and Aon, M. 2014. Impact of biochar on soil physical properties. *Scholarly Journal of Agricultural Science* 4 (5): 280-284.
6. A.O.A.C. 2000. Association of Official Agricultural Chemists, Official and Tentative Methods of Analysis, 2nd ed., Washington, DC, USA.
7. Azeem, M., Hayat, R., Hussain, Q., Ahmed, M., Imran, M., and Crowley, D. 2016. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass, abundance, and enzyme activity in the mash bean field. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences* 8: 1-13.
8. Baldock, J. A., and Skjemstad, J. O. 1999. *Soil Organic Carbon/Soil Organic Matter*. CSIRO Publishing, Melbourne.
9. Berek, A. K., Hue, N., and Ahmad, A. 2011. Beneficial use of biochar to correct soil acidity. The Food Provider. Available at Website <http://www.ctahr.hawaii.edu/huen/nvh/biochar>.
10. Boskabady, M. H., Javan, H., Sajady, M. and Rakhshandeh H. 2007. The possible prophylactic effect of *Nigella sativa* seed extract in asthmatic patients. *Fundamental and Clinical Pharmacology* 21: 559-566.
11. Choudhary, N., and Singh Sekhon, B. 2011. An overview of advances in the standardization of herbal drugs. *Journal of Pharmacy Education Research* 2 (2): 55-70.
12. Chaudhry, U. K., Shahzad, S., Naqqash Abdul Saboor, M. N., Yaqoob, S., Salim, M., and Khalid, M. 2016. Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Peer Journal Pre Prints*. Available at Web site <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1631v1>.
13. Demisie, W., and Zhang, M. 2015. Effect of biochar application on microbial biomass and enzymatic activities in degraded red soil. *African Journal of Agricultural Research* 10: 755-766.
14. Dempster, D. N., Gleeson, D., B., Solaiman, Z. M., Jones, D. L., and Murphy, D. V. 2010. Biochar addition to soil changed microbial community structure and decreased microbial biomass carbon and net inorganic nitrogen mineralized. In 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia.
15. Dume, B., Mosissa, T., and Nebiyu, A. 2016. Effect of biochar on soil properties and lead (Pb) availability in a military camp in South West Ethiopia. *African Journal of Environmental Science and Technology* 10:77-85.
16. Foster, E. J., Neil Hansenc, B., Matt Wallenstein, B. D., and Cotrufoa, F. 2016. Biochar and manure amendments impact soil nutrients and microbial enzymatic activities in a semi-arid irrigated maize cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 233:404-414.

17. Freddo, A. 2013. Biochar: for better or for worse? Ph.D. dissertation, University of East Anglia School of Environmental Science.
18. Ghamarnia, H., Miri, E., and Ghobadei, M. 2014. Determination of water requirement, single and dual crop coefficients of black cumin (*Nigella sativa* L.) in a semi-arid climate. *Irrigation Science* 32 (1):67-76.
19. Gokila, B., and Baskar, K. 2015. Influence of biochar as soil amendment on yield and quality of maize. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences* 5:152-155.
20. Haider, G. 2016. Biochar as a Beneficial Soil Amendment in Sandy Soils. Ph.D. thesis. Department of Plant Ecology, Faculty of Biology and Chemistry Justus-Liebig-University Giessen, Germany.
21. Horwath, W. R., and Paul, E. A. 1994. Microbial biomass. In: DR Buxton (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Microbiological and Biochemical Properties*. ASA and SSSA. Madison, WI.
22. Ibrahim, O. M., Bakry, A. B., El Kramany, M. F., and Elewa, T. A. 2015. Evaluating the role of biochar application under two levels of water requirements on wheat production under sandy soil conditions. *Global Journal of Advanced Research* 2 (2): 411-418.
23. Jemal, K., and Abebe, A. 2016. Determination of bio-char rate for improved production of Lemmon grass. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 4 (2): 149-157.
24. Khosroshahi, M., 2013. Estimating water requirement of *Prosopis juliflora* at different habitates of Persian Gulf - Aman Sea region of Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* 21 (2): 300-315.
25. Klut, A. 1986. *Method of Soil Analysis: Physical, Chemical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA, 432-449.
26. Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., and Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1812-1836.
27. Mukherjee, A., Lal, R., and Zimmerman, A. R. 2014. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of the Total Environment* 487: 26-36.
28. Mukherjee, A. 2011. *Physical and Chemical Properties of a Range of Laboratory-Produced Fresh and Aged Biochars*. Doctoral Dissertation, Geological Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida.
29. Mukome, F. N. D., Six, J., and Parikh, S. J. 2012. The effects of walnut shell and wood feedstock biochar amendments on greenhouse gas emissions from a fertile soil. *Geoderma* 200(201):90-98.
30. Nelson, N. O., Agudelo, S. C., Yuan, W., and Gan, J. 2011. Nitrogen and phosphorus availability in biochar-amended soils. *Soil Science* 176, 1. doi:http://dx.doi.org/ 10.1097/SS.0b013e3182171eac.
31. Nelson, B. W., and Sommers L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page A.L, Miller R.H and Keeney D.R (eds). *Methods of soil analysis part 2. Chemical and microbiological properties*. The American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. 539-577.
32. Nigussie, A., Endalkachew 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 Environment Science* 12 (3): 369-376.
33. Njoku, C., Uguru, B. N., and Chibuike, C. C. 2016. Use of biochar to improve selected soil chemical properties, carbon storage and maize yield in an Ultisol in Abakaliki Ebonyi State, Nigeria. *International Journal of Environmental and Agriculture Research* 2: 15-22.
34. Olsen, S. R. and Sammers, L. E. 1982. Phosphorous. In: Page A.L, Miller R. Hand Keeney D.R (eds). *Methods of soil analysis part 2. Chemical and microbiological properties*. The American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. 403-427.
35. Pühringer, H. 2016. Effects of different biochar application rates on soil fertility and soil water retention in on-farm experiments on smallholder farms in Kenya. Master's thesis, Independent Project in Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences.
36. Rab, A., Rabnawaz Khan, M., Ul Haq, S., Zahid, S., Asim, M., Afridi, M.Z., Arif, M., and Munsif, F. 2016. Impact of biochar on mungbean yield and yield components. *Pure and Applied Biology* 5(3): 632-640.
37. Schouten, S. 2010. *Biochar for sustainable agricultural development. A critical review of biochar for carbon management and the improvement of agricultural production systems*. Institute of Environmental Sciences, Leiden.
38. Schulz, H., Dunst, G., and Glaser, B. 2014. No effect level of co-composted biochar on plant growth and soil properties in a greenhouse experiment. *Agronomy* 4: 34-51.
39. Shabanzadeh, Sh., Ramroudi, M., and Galavi, M. 2011. Influence of micronutrients foliar application on seed yield and quality traits of black cumin in different irrigation regimes. *Journal of Crop Production and Processing* 1 (2):79-89.
40. Sika, M. P. 2012. Effect of biochar on chemistry, nutrient uptake and fertilizer mobility in sandy soil. Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree Master of Science in Agriculture. University of Stellenbosch. ISSN 1818-6769.

41. Teat, L. 2014. Yield and physiological responses of the bioenergy crop miscanthus × giganteus to fertilizer, biochar and drought. Partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Graduate School at Appalachian State University.
42. Widowati, W. H. 2012. The effect of biochar on the growth and N fertilizer requirement of Maize (*Zea mays*) in green house experiment. Journal of Agricultural Science 4 (5): 256-262.
43. Zhang, H. 2014. Biochar Effects on Soil Microbial Biomass and Activity. Ph.D. dissertation, The University of Guelph, Canada.



Effects of Biochar on Soil Fertility and Water Use Efficiency of Black Seed (*Nigella sativa* L.) under Water Stress Conditions

F. Abbaspour¹, H. R. Asghari^{2*}, P. Rezvani Moghaddam³, H. Abbasdokht⁴, J. Shabahang⁵, A. Baig Babaei⁶

Received: 18-03-2017

Accepted: 07-04-2018

Introduction: Application of chemical fertilizers since green revolution, make the crop production doubled or even tripled in some crops. However, long-term overuse of these fertilizers decreased soil quality. Thus to obtain the same yield, the rate of inorganic fertilizer application steadily increases from year to year. Recent studies revealed that in order to increase the chemical fertilizer efficiency, it needed to integrate organic resources with chemical fertilizers to soil. However, using organic manure in the soil will be decomposed very rapidly. Biochar is a source of high organic carbon which highly resistant to decomposition. It has a porous quality and large surface area which reduces leaching of nutrients. Biochar addition to soils can change microbial biomass, adsorb toxic compounds and improved soil water and pH status. The internal porosity of biochars may help soil microorganisms avoid grazers. Globally demands for plant-based medicines are growing. Black seed (*Nigella sativa* L.) is annual plant to Ranunculaceae family, is grown in arid and semi-arid regions of the world. Black seed considered as a spice, medicinal plant and used as seasoning in cooking and foodstuffs. Recently, there has been an increasing interest in integrated approaches in improving crop production to resist conditions of nutrient-poor soil, drought, and salinization. Since, a few attempt has been made to investigate the effects of biochar amendment on medicinal plants in semi-arid agricultural systems, the present study was initiated in agro ecological condition of Mashhad.

Materials and Methods: A field experiment was conducted as split plots factorial layout based on a randomized complete block design with three factors and three replications at the Research Station, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran during growing season of 2016. Three levels of irrigation (100, 70, and 40 percent of water irrigation requirement) were assigned as main plots and the combination of three levels of biochar (0, 10, and 20 ton ha⁻¹) and two levels of chemical fertilizers (without and with chemical fertilizer) were allocated as sub plots. Recommended dose for nitrogen, phosphorus, and potassium was 150 kg ha⁻¹, 75 kg ha⁻¹ and 100 kg ha⁻¹, respectively. The size of each experimental unit was 3×2 m². Black seed thinning was performed after emergence to get a plant population density of 200 plants m⁻². Post experimental soil which was amended with biochar and fertilizer were analyzed for total nitrogen, available phosphorus, potassium, soil organic matter, and microbial biomass carbon. Plant criteria which studied were such as grain yield (kg ha⁻¹), straw yield (kg.ha⁻¹) and water use efficiency (base of grain yield). Analysis of Variance (ANOVA) and Duncan multiple range test were used to compare the recorded data.

Results and Discussion: Soil N, K, SOM, and Microbial biomass carbon were significantly affected by biochar application. Phosphorus was not affected by biochar. The highest biochar effect on soil characteristics was found under 20 ton ha⁻¹ biochar application treatment. The results showed that application of 10 and 20 ton ha⁻¹ of biochar improved soil nitrogen compared with control treatment. Soil organic matter was increased by 1.56% compared with 1.33% in control when 20 ton ha⁻¹ biochar was used. It has been reported that the biochar may increase the organic matter of the poor soils. The soil microbial biomass carbon was increased by biochar and fertilizer application. It seems that the reason for increasing soil microbial biomass by adding biochar to the soil is enhancing available soil nutrients, adsorption of toxic compounds and improved soil water and pH status. The internal porosity of biochars may help soil microorganisms avoid grazers. Combine use of fertilizer and

1- Ph.D. student of Agro ecology, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology

2- Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology

3- Full Professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

4- Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology

5- Assistant professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

6- Assistant professor, Research Institute of Food Science and Technology

(*- Corresponding Author Email: hamidasghari@gmail.com)

biochar were more affected on plants growth than biochar or fertilizer alone. The interaction between biochar, chemical fertilizer and water requirements significantly affected the seed and straw yield. The significant increase of grain yield, straw yield observed in I₂B₂F₂ (70% water requirement+10 ton ha⁻¹ biochar+ with chemical fertilizer) and I₂B₃F₂ (70% water requirement+20 t.ha⁻¹ biochar+ with chemical fertilizer) treatments. Biochar significantly increased water use efficiency which shows that under water deficiency, biochar can increase the uptake of water and nutrients. As a result, plants tolerance against water deficiency increase and more yields will be produced for a specific value of water. This means the water use efficiency can increase and the use of water will decrease.

Conclusions: This study confirmed that biochar application can help in increasing of black seed production through the improving some physical and chemical properties of the soil such as soil pH, soil nutrient availability, soil nutrient holding capacity, and soil microorganism conditions. Although the application of 20 ton ha⁻¹ biochar improved soil properties compared with 10 ton ha⁻¹, the difference was not significant. Application of biochar with chemical fertilizers had better effects on seed and straw yield, compared with solely application of biochar and chemical fertilizers. It may belong to the biochar ability to decrease nitrate and other elements leaching due to its high porosity and high water retention capacity which increased water use efficiency in the plant. This is important in particular, in arid and semi-arid areas, where reduces the amount of water consumed and increases water yields for plants that are under water stress. The seed production of black seed was not affected by reducing water requirements up to 70 % of its total water requirements when biochar was applied. This means that, by using the biochar in soil, only 70% water irrigation required. These results may use for water saving in agriculture in arid and semi-arid conditions.

Keywords: Chemical fertilizer, Seed yield, Soil microbial biomass carbon, Soil organic matter