

اثر بیوچار و کود شیمیایی بر برخی ویژگی‌های خاک و عملکرد و صفات کیفی سیاه- دانه (*Nigella sativa* L.) در شرایط کمبود آب

فاطمه عباس‌پور، حمیدرضا اصغری^{۱*}، پرویز رضوانی مقدم، حمید عباس دخت، جواد شباهنگ

و عادل بیگ بابایی

دانشجوی دکتری زراعت گرایش اکولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

fatemehabbaspour@gmail.com

دانشیار گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود.

hamidasghari@gmail.com

استاد گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

rezvani@um.ac.ir

دانشیار گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود.

habbasdokht@yahoo.com

استادیار گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

ja.shabahang@gmail.com

استادیار گروه شیمی فیزیک موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی خراسان رضوی.

Baikbabaei2004@yahoo.com

چکیده

به منظور بررسی تاثیر بیوچار بر برخی ویژگی‌های خاک، عملکرد دانه، درصد روغن و اسیدهای چرب سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) در شرایط کمبود آب، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل آبیاری به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح $I_1 = 100\%$ ، $I_2 = 70\%$ و $I_3 = 40\%$ نیاز آبی و کرت‌های فرعی شامل فاکتور بیوچار در سه سطح شامل بدون کاربرد بیوچار چوب گردو (B1)، ۱۰ تن در هکتار بیوچار (B2) و ۲۰ تن در هکتار بیوچار (B3)؛ و کود شیمیایی در دو سطح شامل بدون مصرف کود (F1) و مصرف کود (F2) بود که شامل مصرف کود شیمیایی بر حسب کیلوگرم در هکتار: فسفر $(P_2O_5) = 75$ ، پتاسیم $(K_2SO_4) = 100$ و نیتروژن $N = 150$ از منبع اوره بود. نتایج نشان داد که آبیاری بر ویژگی‌های خاک موثر نبود ولی کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوچار موجب افزایش درصد کربن آلی، رطوبت اشباع خاک و درصد نیتروژن کل خاک شد. عملکرد دانه، عملکرد روغن، درصد روغن و اسیدهای چرب به‌جز اسیداولئیک تحت تاثیر تیمار تنش آبیاری قرار گرفتند. آبیاری بر اساس ۷۰٪ نیاز آبی موجب افزایش میزان اسیدهای چرب بجز اسید استئاریک شد. بیوچار نیز بر عملکرد دانه، درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب مریستک، پالمیتیک و لینولئیک تاثیر معنی‌داری داشت و کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار کارایی بهتری نسبت به سایر تیمارها داشت. کاربرد تلفیقی بیوچار به‌همراه کود شیمیایی از تاثیر بهتری نسبت به کاربرد هر یک از آنها به‌تنهایی برخوردار بود. در استفاده هم‌زمان ۱۰ تن در هکتار بیوچار به‌همراه کود شیمیایی و آبیاری بر اساس ۷۰٪ نیاز آبی $(I_2B_2F_2)$ ، بیشترین عملکرد دانه (۱۱۵۸ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. با توجه به نتایج این پژوهش به نظر می‌رسد استفاده از ۱۰ تن در هکتار بیوچار در شرایطی که گیاه تحت تاثیر محدودیت رطوبتی است یا برای کاهش میزان آب مصرفی مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، تنش خشکی، نیاز آبی، عملکرد دانه، عملکرد روغن

۱- آدرس نویسنده مسئول: شاهرود گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود

*- دریافت: بهمن ۱۳۹۶ و پذیرش: مرداد ۱۳۹۷

مقدمه

آب مهمترین ماده موجود در کره زمین است و تنش خشکی، از مهم‌ترین فاکتورهای غیر زیستی محدودکننده‌ی رشد و عملکرد در بسیاری از نواحی کره زمین محسوب می‌شود. خشکی، عامل تنش غیر زیستی تکرار شونده‌ای است که رشد گیاهان و تولیدات اکوسیستم را در مناطق خشک و نیمه‌خشک محدود می‌کند (گلزردی، ۱۳۹۵). در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی کافی میزان مواد آلی خاک کم است و از طرفی تخلیه خاک از عناصر غذایی و مواد آلی به دلیل حذف بقایا و استفاده بی رویه از کودهای شیمیایی اثرات مخربی را بر ظرفیت نگهداری آب خاک و توانایی گیاهان برای سازگاری با تغییرات آب و هوایی در این مناطق داشته است. یک تکنولوژی معمول برای افزایش حاصلخیزی خاک، مدیریت تلفیقی گیاهان زراعی است که شامل استفاده از انواع کودهای دامی یا آلی در خاک است ولی به دلیل تجزیه سریع، اثر این مواد پس از گذشت مدت زمان نسبتاً کوتاهی به شدت کاهش یافته و یا تقریباً از بین می‌رود. لذا کشاورزان ملزم به مصرف مداوم و سالیانه این مواد در خاک هستند. این موضوع علاوه بر ایجاد مشکلات زیست محیطی، افزایش هزینه تولید را نیز در پی دارد (سیکا، ۲۰۱۲). بیوپچار ماده غنی از کربن پایدار می‌باشد که در نتیجه سوزاندن مواد آلی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن کم، در دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سلسیوس تولید می‌شود که به این فرآیند گرماکافت (پیرولیز) گفته می‌شود (فیاز و همکاران، ۲۰۱۴؛ زیلی، ۲۰۱۲).

بیوپچار می‌تواند برای قرنهای متمادی در خاک باقی بماند و پتانسیل زیادی برای بهبود تولیدات کشاورزی داشته باشد (فیاز و همکاران، ۲۰۱۴؛ هاوارد، ۲۰۱۱). در اثر گرما کافت زیست توده، اسکلت کربنی تشکیل می‌شود که به دلیل دارا بودن منافذ زیاد، ساختار اسفنجی به بیوپچار می‌دهد. دمای گرماکافت زیادتر از ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد سبب افزایش تعداد منافذ ریز و کاهش

اندازه ذرات بیوپچار می‌شود (فردو، ۲۰۱۳). سطح ویژه زیاد بیوپچار سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و جذب عناصر غذایی شده و همچنین در کنترل آلودگی موثر است. میزان آب جذب شده به‌طور مستقیم به سطح ویژه بیوپچار بستگی دارد و به همین دلیل کاربرد بیوپچار در خاک موجب جذب مقادیر زیادی آب می‌شود. با افزودن بیوپچار به خاک به دلیل افزایش سطح ویژه خاک، در خاکهای رسی از تجمع زیاد آب جلوگیری شده و هواهی خاکهای رسی افزایش می‌یابد و در خاکهای شنی نیز ظرفیت نگهداری آب بیشتر شده و از هدر رفت آب جلوگیری می‌شود (کاترین، ۲۰۱۶؛ ملاز، ۲۰۱۴). به دلیل توانایی زیاد این ماده در جذب و نگهداری عناصر غذایی و کودهای شیمیایی، حتی نگهداری عناصری مانند فسفر و نیتروژن و جلوگیری از آبلشویی آنها، سبب افزایش رشد گیاهان می‌شود (برک و همکاران، ۲۰۱۱). هیراد و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند، افزودن بیوپچار ذرت موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش پایداری خاکدانه و در نهایت افزایش نگره‌داشت آب در خاک شد. ویدواتی و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی تاثیر بیوپچار بر کاهش آبلشویی نیترات و پتاسیم، بیشترین کاهش آبلشویی و افزایش ظرفیت نگهداری آب را در کاربرد ۴۵ تن در هکتار بیوپچار چوب گزارش کردند. گوگیلا و باسکار (۲۰۱۵) نیز اثرات افزودن سطوح ۵ و ۷/۵ تن در هکتار بیوپچار و ۷۵ و ۱۰۰ درصد مقدار توصیه شده از کود شیمیایی را بر ویژگی‌های گیاه ذرت (*Zea mays*) مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که بیشترین عملکرد دانه و ویژگی‌های کیفی ذرت در تیمار ۵ تن در هکتار بیوپچار به‌همراه ۱۰۰ درصد مقدار توصیه شده از کود شیمیایی به‌دست آمد.

سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) گیاهی است که به خانواده آلاله تعلق دارد. مبدا این گیاه نواحی مدیترانه‌ای و غرب آسیا می‌باشد و گونه‌های این جنس بیشتر در جنوب اروپا، شمال آفریقا و جنوب غربی آسیا پراکنش یافته‌اند (اسدادی و همکاران، ۲۰۱۴). گونه‌های این جنس

شوری خاک در کشت گیاه باقلا (*Vicia faba*) اشاره کردند. با وجود این تحقیقات انجام شده، مطالعات در زمینه تاثیر بیوچار بر ویژگی‌های کمی و کیفی گیاهان دارویی بسیار نادر است و از طرفی نتایج حاصل از آزمایش‌های مرتبط با بیوچار بسته به نوع زیست توده بکار رفته، شرایط و دمای گرماکافت و نوع خاک محل آزمایش متفاوت است. لذا تحقیق حاضر در شرایط اقلیمی مشهد بر روی گیاه سیاه‌دانه انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ به صورت اسپلیت 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 و ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا) اجرا شد. زمین مورد نظر در سال قبل از اجرای این آزمایش به صورت آیش بود. قبل از انجام آزمایش، از خاک این زمین نمونه‌برداری تصادفی انجام شد که نتایج آنالیز آن در جدول ۱ آمده است. بیوچار از ضایعات چوب درخت گردو تهیه شد (موکوم، ۲۰۱۲). برای این منظور از کوره گازسوز با جداره داخلی فلزی که فضای آن کاملاً بسته، بدون درز و ایزوله بود، استفاده شد تا اکسیژن وارد کوره نشود. دمای کوره بین ۴۰۰ درجه-سانتی‌گراد (شروع احتراق) تا ۶۵۰ درجه‌سانتی‌گراد (حد اکثر دمای احتراق) بود (روزیتو و همکاران، ۲۰۱۷). تجزیه شیمیایی بیوچار نیز از طریق آزمایش مشخص شد (جدول ۲). کرت‌های اصلی شامل سطوح آبیاری در سه سطح شامل آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی (I₁)، آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی (I₂) و آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی (I₃) و کرت‌های فرعی شامل بیوچار در سه سطح شامل بدون بیوچار (B₁)، ۱۰ تن در هکتار بیوچار (B₂) و ۲۰ تن در هکتار بیوچار (B₃) و کود شیمیایی در دو سطح شامل بدون مصرف کود (F₁) و

گیاهانی یک ساله، علفی و دولپه با دوره رویشی کوتاه هستند. ارتفاع بوته سیاه‌دانه بین ۳۰ تا ۷۰ سانتی‌متر می‌باشد. سیاه‌دانه از دیرباز به‌عنوان ضد التهاب، پایین‌آورنده تب، ضد سرطان، ضد اسپاسم و محرک تولید شیر شناخته شده است. دانه سیاه‌دانه از لحاظ اسیدهای چرب لینولئیک، اولئیک و پالمیتیک غنی است. از روغن فرار سیاه‌دانه موادی نظیر تیمول، تیموکینون و دی‌تیموکینون به‌دست می‌آید. تیموکینون از جمله ترکیباتی است که بخش عمده-ای از اثرات دارویی سیاه‌دانه و از جمله خواص ضد سرطانی را موجب می‌شود (آخوندیان، ۲۰۰۷؛ بسکابادی، ۲۰۰۷). با توجه به اهمیت گیاه سیاه‌دانه در صنایع داروسازی، غذایی، آرایشی و بهداشتی، توجه به حاصلخیزی خاک و تغذیه این گیاه با توجه به اصول کشاورزی اکولوژیک نقش مهمی را در بهبود عملکرد کمی و کیفی آن دارد. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در رابطه با تاثیر انواع بیوچارهای حاصل از مواد گیاهی و جانوری در کشور انجام شده است.

در آزمایشی که بر روی تاثیر بیوچارهای حاصل از کود مرغی بر خصوصیات شیمیایی خاک انجام شد، کاربرد بیوچار منجر به افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی و پهاش خاک شد و قابلیت ماندگاری عناصر غذایی در خاک بهبود یافت (زلفی‌باوریانی و همکاران، ۱۳۹۵). رحیمی و همکاران (۱۳۹۷) کاهش آلودگی نیکل را در خاک‌های حاوی بیوچار حاصل از کود گاوی گزارش کرده و کاربرد بیوچار را به‌عنوان یک ماده اصلاحی در خاک‌های آلوده به این عنصر گزارش کردند. جلالی‌پور و همکاران (۱۳۹۲) نیز به بهبود خصوصیات خاک و افزایش رشد آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) با کاربرد بیوچار در خاک‌های آلوده به کادمیوم اشاره کردند. نجفی قیری و بوستانی (۱۳۹۶) به تاثیر مثبت انواع بیوچارهای حاصل از بقایای گیاهی بر افزایش میزان پتاسیم در خاک‌های آهکی اشاره کردند. رضایی و همکاران (۱۳۹۷) نیز به تاثیر مثبت بیوچار در نگهداری عناصر غذایی علیرغم افزایش هدایت الکتریکی و افزایش

مصرف کود شیمیایی (F₂) بود. میزان مصرف کودشیمیایی بر اساس آزمایشات خاک ۷۵ کیلوگرم در هکتار فسفر (P₂O₅) از منبع سوپر فسفات تریپل، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم (K₂SO₄) و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (اوره) بود. ابعاد کرت‌های آزمایش ۲×۳ متر و فاصله بین کرت‌ها نیم متر و فاصله بلوک‌ها از یکدیگر یک متر بود. مراحل آماده سازی زمین و افزودن بیوپچار به زمین در دی ماه سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ انجام گرفت و بیوپچار و کود شیمیایی فسفر و پتاسیم تا عمق ۲۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط شد. در همان سال زراعی مزرعه تحت کشت سیاه‌دانه قرار گرفت. در طول اجرای طرح، موقعیت کرت‌های آزمایشی ثابت ماند. کودهای شیمیایی فسفر و پتاسیم مجدداً در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ قبل از کاشت به خاک افزوده شد. ولی بیوپچار فقط یک‌بار به‌کار برده شد (کارر و همکاران، ۲۰۱۳). سیاه‌دانه در نوزدهم فروردین ماه سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ به‌صورت دستی در عمق دو سانتی‌متری کشت شد. هر کرت شامل ۸ 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. کودنیتروژن در دو مرحله یکی بعد از تنک دوم و دیگری پیش از مرحله گلدهی به صورت سرک به تیمارهای مورد نظر اضافه شد. از وجین دستی برای کنترل علف‌های هرز استفاده شد. داده‌های مورد نیاز این پژوهش برای تعیین نیاز آبی شامل بارش، دماهای حداقل و حداکثر، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی از طریق آمار درازمدت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مشهد جمع‌آوری شد (جدول ۳). با استفاده از اطلاعات فوق، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) با استفاده از روش پنمن موتیث فائو که در برنامه کراپ وات جایگذاری شده است، محاسبه شد. برنامه کراپ وات یک نرم‌افزار مناسب برای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری است و به‌وسیله فائو ارائه شده است. نیاز آبی گیاه سیاه‌دانه بر اساس حاصل ضرب تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ضریب

گیاهی سیاه‌دانه (قمرنیا و همکاران، ۲۰۱۴) توسط نرم افزار آبیاری کراپ وات تعیین شد. مقدار نیاز آبی محاسبه شده در نرم‌افزار کراپ‌وات برای تیمار شاهد ۷۴۲/۹ میلی-متر 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 قطره-ای و به صورت هفتگی انجام شد و برای اعمال تیمارهای آبیاری از کنتور حجمی با دقت ۰/۰۰۰۱ مترمکعب استفاده شد. زمان اعمال تیمارهای آبیاری پس از توسعه کامل گیاه و قبل از شروع مرحله زایشی بود. دلیل انتخاب این زمان برای اعمال تنش، افزایش نیاز آبی گیاه در این مرحله و همچنین سپری شدن دوره بارندگی بود. برداشت در تاریخ‌های چهار و پنج مرداد ماه سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ با زرد شدن برگ‌ها و فولیکول‌ها انجام شد. به منظور مطالعه صفات مورد بررسی در خاک، بعد از برداشت محصول، از هر کرت بصورت تصادفی نمونه‌برداری انجام شد. برای تعیین عملکرد دانه ردیف‌های کناری و ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای هر ردیف به‌عنوان اثر حاشیه‌ای حذف و پس از آن برداشت گیاهان در سطح باقی‌مانده انجام شد.

برای استخراج روغن دانه‌ی سیاه‌دانه، از روش استاندارد سوکسله استفاده شد (AOAC, ۱۹۹۵). با محاسبه درصد روغن، عملکرد روغن بذر از حاصلضرب درصد روغن در عملکرد بذر هر تیمار تعیین شد. جهت تعیین درصد اسیدهای چرب روغن نیز ۵۰ گرم بذر از سه تکرار هر یک از تیمارهای آزمایش پس از آسیاب کردن، به نسبت یک به چهار با هگزان مخلوط و به مدت ۴۸ ساعت روی دستگاه شیکر (۱۶۰ دور در دقیقه) قرار داده شد (فروش، ۲۰۰۹). درصد پنج اسید چرب با روش کروماتوگرافی گازی با ستون کاپیلاری BPX70 به طول ۳۰ متر و قطر ۰/۲۵ میلی‌متر، انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش با استفاده از نرم افزار SAS انجام گرفت. میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح پنج درصد مورد مقایسه قرار گرفتند.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

پهاش	قابلیت هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	درصد اشباع خاک (%)	نیترژن کل (%)	کربن آلی (%)	پتاسیم محلول و تبدالی (mg kg ⁻¹)	فسفر قابل دسترس (mg kg ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol ⁺ kg ⁻¹)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)
۷/۶۵	۱/۹	۴۰/۱۶	۰/۰۷۹	۰/۸۳۷	۲۲۰	۱۲	۸/۹	۳۸	۴۱	۲۱

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپچار مورد استفاده

پهاش	هدایت الکتریکی (μS/cm)	ظرفیت تبادل کاتیونی (%)	کربن (%)	نیترژن کل (%)	فسفر (%)	پتاسیم (%)	مواد آلی فرار و رطوبت (%)
۲۰۰	۰/۲۶	۴۵/۴۴	۱/۲۷	۰/۰۱	۰/۲۱	۴۶/۹۵	

پهاش و هدایت الکتریکی در نسبت ۱:۵ نمونه به آب اندازه‌گیری شده است

جدول ۳- آمار هواشناسی منطقه مورد آزمایش در طول دوره رشدی سیاه‌دانه

ماه	حداقل دما (C°)	حداکثر دما (C°)	رطوبت (%)	سرعت باد (km/day)	متوسط ساعات آفتابی (hours)	بارندگی (mm)
فروردین	۸/۸	۲۱/۷	۶۰	۲۰۷	۶/۸	۴۶/۲
اردیبهشت	۱۲/۷	۲۷/۱	۵۰	۱۹۹	۹/۳	۲۷/۲
خرداد	۱۶/۹	۳۲/۷	۳۸	۲۳۳	۱۱/۴	۴
تیر	۱۹	۳۴/۷	۳۵	۲۵۱	۱۲/۳	۱/۲

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک

پهاش

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که پ-هش خاک تحت تاثیر آبیاری و بیوپچار قرار نگرفت (جدول ۴). کود شیمیایی در سطح احتمال پنج درصد تاثیر معنی‌داری بر پهاش خاک داشت (جدول ۴). هیچ یک از اثرات متقابل تیمارها معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد کود شیمیایی در مقایسه با عدم کاربرد آن ۰/۲۵ درصد پهاش را کاهش داد (جدول ۵). این امر مربوط به تاثیر کودهای شیمیایی در کاهش پ-هش خاک است. تغییر پهاش خاک در اثر افزودن بیوپچار و مواد آلی بستگی به ویژگی‌های ماده آلی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. به نظر می‌رسد که وجود آهک زیاد و پهاش خنثی در خاک مورد مطالعه مانع از تاثیر بیوپچار بر پهاش خاک شده است. این نتایج موافق با یافته‌های آکوم و همکاران (۲۰۱۵) و جبرمدین و همکاران (۲۰۱۵) بود. جبرمدین و همکاران (۲۰۱۵) علت عدم تغییر در پهاش خاک را با افزودن

بیوپچار به قلیایی بودن خاک مورد آزمایش و درصد زیاد رس در آن نسبت دادند. لنز و ایپولیتو (۲۰۱۲) نیز به عدم تاثیر بیوپچار بر پهاش خاک اشاره کرده و دلیل این امر را پهاش خنثی و آهکی بودن خاک مورد آزمایش عنوان کردند.

درصد کربن آلی خاک

نتایج جدول تجزیه واریانس حاکی از عدم تاثیر معنی‌دار آبیاری بر کربن آلی خاک بود ولی بیوپچار در سطح احتمال یک درصد و کود شیمیایی در سطح احتمال پنج درصد بر درصد کربن آلی تاثیر معنی‌داری داشت و جدول مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوپچار میزان کربن آلی خاک را در مقایسه با تیمار شاهد به میزان ۱۸/۱ درصد افزایش داد ولی تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوپچار اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت (جدول‌های ۴ و ۵). هیچ یک از اثرات متقابل تیمارها معنی‌دار نبود. علت افزایش میزان کربن آلی خاک با افزایش مصرف بیوپچار به وجود درصد زیاد کربن آلی در بیوپچار مصرفی مربوط است. آزمایشات متعددی بیانگر

درصد نیتروژن کل

جدول تجزیه واریانس داده‌ها تاثیر مثبت کاربرد بیوپچار بر درصد نیتروژن کل خاک را نشان داد (جدول ۴). کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوپچار بیشترین تاثیر را بر درصد نیتروژن خاک در مقایسه با تیمار شاهد و ۱۰ تن در هکتار بیوپچار داشت و میزان نیتروژن در تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوپچار ۰/۰۶ درصد به دست آمد (جدول ۵). افزایش نیتروژن خاک در اثر افزودن بیوپچار توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است (نایگوسی و همکاران، ۲۰۱۲؛ جمال و ابیبه، ۲۰۱۶؛ ویدواتی، ۲۰۱۲). دیونده‌فشجانی و همکاران (۱۳۹۴) با کاربرد بیوپچار حاصل از باگاس نیشکر، افزایش نیتروژن را در خاک مورد مطالعه گزارش کردند ولی محققان دیگری نیز به کاهش نیتروژن خاک در نتیجه کاربرد بیوپچار اشاره کردند (مرادی و همکاران، ۱۳۹۶). از آنجایی که غلظت نیتروژن خاک به نسبت C به N مواد آلی موجود در خاک بستگی دارد، افزودن موادی با نسبت C به N زیاد به خاک نیتروژن معدنی را غیر متحرک می‌کند. به همین دلیل با افزودن بیوپچار به خاک انتظار می‌رود نیتروژن غیرفعال شده و کمبود نیتروژن در خاک مشاهده شود. کاربرد بیوپچار به همراه کودهای شیمیایی، معدنی شدن نیتروژن را با کاهش نسبت C به N تسهیل کرده و نیتروژن کل خاک بهبود می‌یابد (علی و همکاران، ۲۰۱۵). اگرچه اثر متقابل بیوپچار با کود شیمیایی در این آزمایش معنی‌دار نبود، ولی مطابق گزارش‌های ویدواتی و همکاران (۲۰۱۲) و آکوم و همکاران (۲۰۱۵) بیوپچار به دلیل داشتن ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه زیاد و نیز داشتن بارهای منفی در سطح خود به نگهداری عناصر غذایی موجود در کودهای شیمیایی کمک کرده و از آبشویی آنها جلوگیری می‌کند.

تاثیر مثبت بیوپچار بر میزان کربن آلی خاک است (آکوم و همکاران، ۲۰۱۵؛ هائوجین و شنگ ونگ، ۲۰۱۳؛ نایگوسی و همکاران، ۲۰۱۲). مرادی و همکاران (۱۳۹۶) به تاثیر بیوپچار حاصل از ضایعات گیاهی بر افزایش کربن آلی خاک اشاره کرده و دلیل آن را وجود درصد بالایی از کربن در بیوپچارهای تولیدی عنوان کردند. با توجه به این که خاک‌های کنونی در مقایسه با چند دهه قبل از کربن کمتری برخوردار است، افزودن بیوپچار به خاک می‌تواند منبع بسیار مناسبی برای جبران کمبود کربن خاک باشد (فردو، ۲۰۱۳).

درصد رطوبت اشباع خاک

کاربرد بیوپچار بر درصد رطوبت اشباع خاک موثر بود. بیشترین درصد رطوبت اشباع خاک با مقدار ۳۹/۲۷ درصد در تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوپچار مشاهده شد (جدول‌های ۴ و ۵). افزایش درصد رطوبت اشباع خاک در اثر افزودن بیوپچار به خاک توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است. دوملو کاروالهو و همکاران (۲۰۱۴) هائوجین و شنگ ونگ (۲۰۱۳) نیز به افزایش معنی‌دار درصد رطوبت اشباع خاک در تیمار پنج درصد مصرف بیوپچار در مقایسه با تیمار ۲/۵ درصد و شاهد اشاره کردند. افزایش درصد رطوبت اشباع خاک به منافذ زیاد بیوپچار نسبت داده می‌شود که این منافذ به تجمع عناصر غذایی و افزایش میزان نگهداری آب کمک می‌کند (هائوجین و شنگ ونگ، ۲۰۱۳).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر برخی ویژگی‌های خاک

منابع تغییر	درجه آزادی	پهانش	کربن آلی	رطوبت اشباع خاک	نیترژن کل
بلوک	۲	۰/۰۱۷۶ ^{ns}	۰/۰۷ ^{ns}	۳/۴۹ ^{ns}	۰/۰۰۰۵۸ ^{ns}
آبیاری	۲	۰/۱۱۱۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۱/۴۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۷۳ ^{ns}
خطای اصلی	۴	۰/۰۳۶۴	۰/۰۵	۰/۳۲	۰/۰۰۰۲۱
بیوچار	۲	۰/۰۰۱۱ ^{ns}	۰/۰۷ ^{**}	۱/۴۲ [*]	۰/۰۰۰۷۶ [*]
آبیاری×بیوچار	۴	۰/۰۰۴۲ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۶۹ ^{ns}	۰/۰۰۰۲۳ ^{ns}
کودشیمیایی	۱	۰/۰۰۸۰ [*]	۰/۰۷ [*]	۰/۱۰ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۶ ^{ns}
آبیاری×کودشیمیایی	۲	۰/۰۰۰۶ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۴۰ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۸ ^{ns}
بیوچار×کودشیمیایی	۲	۰/۰۰۳۵ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۸۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۲۱ ^{ns}
آبیاری×بیوچار×کودشیمیایی	۴	۰/۰۰۲۶ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۱/۵۰ ^{**}	۰/۰۰۰۱۸ ^{ns}
خطای فرعی	۳۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۱	۰/۲۸	۰/۰۰۰۱۵

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر ساده بیوچار و کودشیمیایی بر برخی ویژگی‌های خاک

فاکتور	سطوح	پهانش	کربن آلی (درصد)	رطوبت اشباع خاک (درصد)	نیترژن کل (درصد)
بیوچار (تن در هکتار)	۰ (B ₁)	۷/۹۱a	۰/۵۰ b	۳۸/۷۲b	۰/۰۵b
	۱۰ (B ₂)	۷/۹۰ a	۰/۵۰ b	۳۹/۰۸ab	۰/۰۴b
	۲۰ (B ₃)	۷/۹۰ a	۰/۶۱ a	۳۹/۲۷ a	۰/۰۶a
کودشیمیایی (کیلوگرم در هکتار)	بدون کود (F ₁)	۷/۹۱ a	۰/۵۷ a	۳۹/۰۷ a	۰/۰۵ a
	با مصرف کود (F ₂)	۷/۸۹b	۰/۵۰ b	۳۸/۹۸ a	۰/۰۵ a

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند
 B₁، بدون مصرف بیوچار، B₂: ۱۰ تن در هکتار بیوچار، B₃: ۲۰ تن در هکتار بیوچار
 F₁، بدون مصرف کودشیمیایی، F₂: با مصرف کود شیمیایی نیترژن، فسفر و پتاسیم

ویژگی‌های گیاه

عملکرد دانه

تجزیه واریانس داده‌ها تاثیر آبیاری بر عملکرد دانه را در سطح احتمال پنج درصد نشان داد (جدول ۶). مقایسه میانگین اثرهای ساده آبیاری حاکی از تاثیر بیشتر تیمارهای آبیاری بر اساس ۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبیاری بر عملکرد دانه در مقایسه با تیمار ۴۰ درصد آبیاری بود (جدول ۷). کاهش عملکرد به دلیل اثرات منفی تنش

خشکی بر تعداد شاخه‌ها و برگ‌ها و سطح برگ می‌باشد که منجر به کاهش تثبیت کربن و فتوسنتز و در نتیجه کاهش زیست‌توده می‌شود (خان و همکاران، ۲۰۰۲). سیاه-دانه گیاهی محدود رشد است، لذا افزایش تنش خشکی سبب افزایش سرعت گذر از مرحله رویشی به زایشی می‌شود که این امر با تاثیر بر اجزای عملکرد در نهایت منجر به کاهش عملکرد خواهد شد (مظفری و همکاران، ۲۰۰۰). کاربرد بیوچار نیز در سطح احتمال یک درصد بر

اشاره کردند. روزیتو و همکاران (۲۰۱۷) نیز به کاهش عملکرد در گندم بهاره (*Triticum aestivum* L.) با کاربرد مقادیر ۱۰ درصد بیوچار در مقایسه با ۵ و ۵/۵ درصد بیوچار اشاره کردند. کارر و همکاران (۲۰۱۳) نیز کاهش عملکرد را در تیمارهای حاوی ۷۵ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با ۵۰ تن در هکتار بیوچار گزارش کردند. علیرغم تاثیر مثبت بیوچار در اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی در خاک، به نظر می‌رسد مصرف مقادیر زیاد بیوچار به دلیل قدرت جذب بسیار قوی آن می‌تواند منجر به عدم توازن یون‌های خاک و اثرات منفی بر دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی داشته باشد.

درصد روغن

تیمار آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر درصد روغن موثر بود (جدول ۶) و بیشترین میزان روغن مربوط به آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی (۳۲/۷۹ درصد) بود (جدول ۷). بلالویی و همکاران (۲۰۱۳) نیز گزارش کردند مقدار روغن دانه سویا در اثر تنش خشکی کاهش معنی‌داری نشان داد که دلیل آن را می‌توان حساسیت زیاد تجمع لیپیدها نسبت به تنش خشکی در مرحله دانه‌بندی و کاهش فتوسنتز جاری و کاهش مواد فتوسنتزی عرضه شده برای پر شدن دانه و همچنین کاهش طول دوره پر شدن دانه ذکر نمود. بیوچار نیز بر درصد روغن دانه موثر بود و بیشترین میزان درصد روغن مربوط به تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار بود (۲۹/۵۴ درصد) (جدول ۷). تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوچار درصد روغن کمتری نسبت به تیمار شاهد داشت. به نظر می‌رسد کاربرد مقدار متوسطی از بیوچار به دلیل ایجاد شرایط بهینه برای رشد گیاه، بهتر از مقادیر زیاد آن باشد (جمال و ابیبه، ۲۰۱۶). محققان دیگری نیز به تاثیر بهتر مقدار متعادل از بیوچار در مقایسه با مقادیر پایین و زیادی آن اشاره کردند. تنظیم میزان پ‌هاش و عناصر غذایی خاک در حد متعادل و در نتیجه رشد بهتر گیاه در تیمارهای مقدار متوسط

عملکرد دانه موثر بود (جدول ۶) و بیشترین عملکرد دانه در تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار (۱۰۲۰ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (جدول ۷). راب و همکاران (۲۰۱۶) به تاثیر معنی‌دار بیوچار بر عملکرد دانه در لوبیای بالدار (*Vigna radiate*) اشاره کرده و بیشترین عملکرد را در تیمارهایی با مصرف ۲۵ تن در هکتار بیوچار گزارش کردند در حالی که با افزایش بیوچار به مقادیر ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار میزان عملکرد دانه کاهش یافت. آنان دلیل این امر را افزایش بیشتر نسبت C به N در تیمارهایی با میزان مصرف بیوچار زیادتر و غیرمتحرک شدن نیتروژن و آمونیوم عنوان کردند. بایدرمن و هارپور (۲۰۱۳) نیز تاثیر مثبت بیوچار بر عملکرد دانه را گزارش کردند.

جبرمدین و همکاران (۲۰۱۵) نیز به افزایش عملکرد گندم در تیمارهای حاوی بیوچار اشاره کرده و دلیل این امر را نگهداری بهتر آب و عناصر غذایی توسط بیوچار و تغذیه بهتر گیاه عنوان کردند. اگرچه مصرف کودشیمیایی در مقایسه با عدم مصرف آن بر عملکرد دانه معنی‌دار نبود ولی از عملکرد دانه زیادتری برخوردار بود (جدول ۷). کودهای شیمیایی بویژه نیتروژن با تأثیری که بر رشد و توسعه اندام‌هایی رویشی از طریق سنتز پروتئین‌ها، گسترش سطح برگ‌ها و نیز دوام اندام‌های فتوسنتز کننده دارند، می‌توانند در افزایش عملکرد دانه در گیاهان روغنی نقش موثری داشته باشد. اثر متقابل آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی نیز بر عملکرد دانه معنی‌دار بود و بیشترین عملکرد مربوط به تیمارهای $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و $I_1B_2F_1$ (۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + بدون مصرف کود شیمیایی) به ترتیب با مقادیر ۱۱۵۸ و ۱۱۵۰ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۱۱). بهبود عملکرد در کاربرد مقدار متعادل از بیوچار در مقایسه با مقادیر زیاد آن در تحقیقات دیگری نیز گزارش شده است. کراسکا و همکاران (۲۰۱۶) به کاهش عملکرد دانه در گیاه چاودار (*Secale cereale* L.) با کاربرد ۳۰ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با ۲۰ تن در هکتار بیوچار

عملکرد روغن را داشت (جدول ۷). استفاده از کود شیمیایی نیز در مقایسه با عدم کاربرد آن ۱۲/۸ درصد عملکرد روغن را افزایش داد (جدول ۷). اثر متقابل بیوپچار و کودشیمیایی نشان داد که کاربرد توام ۱۰ تن در هکتار بیوپچار و کودشیمیایی (B_2F_2) با عملکرد روغن ۳۳۵/۵۳ کیلوگرم در هکتار تاثیر بهتری نسبت به کاربرد بیوپچار و کودشیمیایی به تنهایی داشت (جدول ۸). مونیر و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی تیمارهای مختلف تغذیه ای از کودهای آلی، شیمیایی و تلفیقی دریافتند که صفات کیفی آفتابگردان مانند درصد روغن و عملکرد روغن در تیمارهای تلفیقی از کود آلی و کود شیمیایی به طور معنی داری زیادتر از کاربرد آنها به تنهایی بوده است. اثر متقابل آبیاری و کودشیمیایی معنی دار بود و بیشترین عملکرد روغن مربوط به تیمار I_1F_2 (۱۰۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) با ۳۹۱/۹۸ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۱۰). زیادتر بودن عملکرد روغن در این تیمار اهمیت آبیاری و تغذیه مناسب گیاه را در بهبود عملکرد دانه و روغن آشکار می سازد.

تنش خشکی علاوه بر کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی، با کاهش دوره پر شدن دانه بر تجمع بسیاری از مواد از جمله روغن تاثیر می گذارد. اثر متقابل آبیاری، بیوپچار و کودشیمیایی معنی دار بود و تیمارهای آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی از عملکرد روغن زیادتری برخوردار بودند (جدول ۱۱). بخشی از کاهش عملکرد روغن در شرایط تنش رطوبتی را می توان به کاهش طول دوره پر شدن دانه نسبت داد. در شرایط بدون تنش، زمان بیشتری برای پر شدن دانه وجود دارد، در نتیجه درصد روغن و عملکرد روغن نیز بیشتر است. از آنجایی که ابتدا کربوهیدراتها تجمع می یابند و سپس این ماده به روغن، پروتئین و یا هر ماده دیگر تبدیل می شود، از این رو هر قدر طول دوره پر شدن دانه بیشتر باشد درصد روغن و عملکرد آن نیز زیادتر خواهد بود (رازی و اسد، ۱۹۹۹).

بیوپچار از دلایل بهتر بودن این تیمار نسبت به مصارف زیاد بیوپچار عنوان شده است (جمال و ابیبه، ۲۰۱۶؛ دیسینزا و همکاران، ۲۰۱۶). کاربرد کود شیمیایی در سطح احتمال پنج درصد تاثیر معنی داری بر درصد روغن دانه داشت. اثر متقابل آبیاری و بیوپچار معنی دار بود و بیشترین درصد روغن در تیمار I_1B_2 (۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوپچار) و I_1B_3 (۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوپچار) به ترتیب به میزان ۳۴/۸۸ و ۳۲/۸۳ درصد بود (جدول ۹). این امر تاثیر آبیاری کامل و مصرف بیوپچار را بر درصد روغن نشان داد. سوپادیت و همکاران (۲۰۱۲) نیز در آزمایش های خود به تاثیر بیوپچار در بهبود خواص کیفی گیاه سویا (*Glycine max*) اشاره کردند. اثر متقابل بیوپچار و کود شیمیایی معنی دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار B_2F_2 (۱۰ تن در هکتار بیوپچار + مصرف کود شیمیایی) با ۳۱/۹۷ درصد روغن بود (جدول ۸). بیکری و همکاران (۲۰۱۴) نیز بیشترین درصد روغن در گیاه کتان (*Linum Usitatissimum*) را در کاربرد توام بیوپچار، میکوریزا و اسیدهیومیک گزارش کردند. افزودن بیوپچار به خاک توانایی جذب عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش می دهد و به دلیل ساختار متخلخل بیوپچار و سطح ویژه زیاد آن از آبسویی عناصر غذایی جلوگیری شده و در نتیجه کارایی کودهای شیمیایی افزایش می یابد (سوپادیت و همکاران، ۲۰۱۲).

عملکرد روغن

همانند درصد روغن، عملکرد روغن نیز تحت تاثیر تیمارهای آبیاری، بیوپچار و کود شیمیایی قرار گرفت (جدول ۶). جدول مقایسه میانگین داده ها نشان داد که در شرایط آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی بیشترین عملکرد روغن (۳۵۰/۲۷ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد. کاهش عملکرد روغن در اثر تنش به کاهش ظرفیت دانه ها برای تجمع روغن و کاهش درصد روغن دانه ها، همچنین کاهش عملکرد دانه نسبت داده می شود. کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوپچار با ۳۰۵/۰۴ کیلوگرم در هکتار بیشترین

درصد اسیدهای چرب

آبیاری بر تمام اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع بجز اسید اولئیک موثر بود (جدول ۶). اعمال تیمارهای تنش آبی اثرات متفاوت افزایشی و کاهش‌ی بر میزان اسیدهای چرب موجود در سیاه‌دانه داشت. مقایسه میانگین اثر اصلی آبیاری نیز نشان داد که آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی بیشترین تاثیر را بر افزایش اسیدهای چرب مریستیک، پالمیتیک و لینولئیک داشت. آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی نیز موجب افزایش این اسیدهای چرب در مقایسه با تیمار شاهد (آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی) شد ولی تنش آبیاری در اسید استئاریک موجب کاهش این اسید چرب شد (جدول ۷). مالکی و همکاران (۱۳۹۲) نیز به افزایش درصد اسید لینولئیک در اثر تنش آبی در آزمایشات خود اشاره کردند. افزایش در محتوای اسیدهای چرب در بادام زمینی در شرایط تنش خشکی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است (دوایودی و همکاران، ۱۹۹۶) ولی اشرفی و رزمجو (۲۰۱۰) به کاهش اسیدهای چرب استئاریک و پالمیتیک در روغن دانه‌ی گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در شرایط تنش آبی اشاره کردند. اثرات تنش خشکی در گیاهان مختلف یکسان نیست و نوع، رقم و مرحله‌ی رشدی گیاه در میزان صدمات وارده به گیاه، نقش تعیین کننده‌ی دارد (نورمحمدی، ۲۰۰۴). اسید اولئیک به تیمار تنش آبیاری واکنشی نشان نداد (جدول‌های ۶ و ۷). نورمحمدی (۲۰۰۴) نیز به عدم تاثیر تنش خشکی بر اسید اولئیک اشاره کرد. کاربرد بیوچار بر اسیدهای چرب مریستیک، پالمیتیک و لینولئیک موثر بود و کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار تاثیر بیشتری نسبت به سایر تیمارها داشت (جدول ۷). کاربرد بیوچار اگرچه بر اسید اولئیک معنی‌دار نبود ولی مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار تاثیر بیشتری بر این اسید چرب داشت. کاربرد کودشیمیایی بجز بر اسیدهای چرب مریستیک و پالمیتیک بر سایر اسیدهای چرب موثر نبود (جدول ۷). اثر متقابل آبیاری و بیوچار در تمام اسیدهای چرب بجز اسید اولئیک معنی‌دار

بود. مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری و بیوچار نشانگر تاثیر بیشتر تیمار I_2B_2 (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) در اسیدهای پالمیتیک، مریستیک و لینولئیک بود ولی در اسیدچرب استئاریک تیمار I_1B_1 (۱۰۰ درصد نیاز آبی + بدون بیوچار) و I_1B_2 (۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار) بیشترین تاثیر را داشت (جدول ۹). به نظر می‌رسد کاربرد مقدار متعادل بیوچار و تنش آبی ملایم تاثیر افزایشی بر اکثر اسیدهای چرب داشته است. اثر متقابل آبیاری و کود شیمیایی بر اسیدهای چرب مریستیک، استئاریک، پالمیتیک و لینولئیک معنی‌دار بود (جدول ۶). تیمار I_2F_2 (۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) بیشترین تاثیر را بر اسیدهای چرب مریستیک، پالمیتیک و لینولئیک داشت و تیمار I_1F_2 (۱۰۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) بیشترین تاثیر را بر اسید چرب استئاریک داشت (جدول ۱۰).

اثر متقابل بیوچار و کودشیمیایی تنها بر اسید چرب غیر اشباع اولئیک معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار B_3F_2 (۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) با ۲۵/۸۷ درصد اسید اولئیک بود (جدول-های ۶ و ۸). افزودن همزمان بیوچار و کودشیمیایی، ضمن تأمین بخشی از نیتروژن مورد نیاز گیاه، از هدرروی نیتروژن (آبشویی یا متصاعد شدن) می‌کاهد و سپس به دلیل فرآیند معدنی شدن، مجدداً نیتروژن به صورت تدریجی به شکل قابل جذب گیاه در آمده و سبب فراهمی در طول دوره رشد گیاه می‌شود. تأثیر تلفیق بیوچار با کودشیمیایی سبب صرفه جویی در مصرف کود شیمیایی به دلیل کاهش آبشویی آنها می‌شود (علی و همکاران، ۲۰۱۵؛ ویدواتی و همکاران، ۲۰۱۴). اثر متقابل آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر اسیدهای چرب پالمیتیک، اولئیک و لینولئیک معنی‌دار بود و مقایسه میانگین اثر متقابل این سه تیمار نشان داد که در اسید پالمیتیک آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی به همراه بیوچار و کودشیمیایی بیشترین تاثیر را داشت در حالیکه در اسید اولئیک و لینولئیک آبیاری بر اساس ۴۰ درصد

کاهش دهد. کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوچار علیرغم تاثیر مثبت بر خصوصیات خاک در مقایسه با ۱۰ تن در هکتار بیوچار بر ویژگیهای گیاه تاثیر کمتری داشت؛ بنابراین کاربرد مقادیر بیشتر آن در شرایط تنش رطوبتی به دلیل خاصیت جذبی بالای آن توصیه نمی‌شود. استفاده همزمان بیوچار و کودهای شیمیایی اثرات بهتری نسبت به کاربرد هر یک از آنها به تنهایی داشت. این امر با توانایی بیوچار در حفظ و نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آبشویی آنها مرتبط است. به این ترتیب مصرف مقدار متعادلی از بیوچار در شرایط خشک و نیمه خشک برای صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش اثرات تنش خشکی توصیه می‌شود.

نیاز آبی به همراه بیوچار و کودشیمیایی بیشترین تاثیر را داشت (جدول ۱۱). حشمتی و همکاران (۱۳۹۶) نیز به افزایش درصد اسیدهای چرب اولئیک و لینولئیک با افزایش تنش خشکی و کاربرد همزمان کود زیستی و کودشیمیایی اشاره کردند.

نتیجه‌گیری

تنش رطوبتی سبب کاهش عملکرد دانه و صفات کیفی گیاه سیاه‌دانه شد ولی بیوچار به دلیل دارا بودن ساختار متخلخل، سطح ویژه زیاد و بارهای منفی سطحی، سبب بهبود ویژگی‌های خاک و در نتیجه ایجاد شرایط بهینه برای رشد گیاه شد. نتایج نشان داد که کاربرد ۱۰ تن در هکتار بیوچار توانست اثرات تنش آبی را

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر عملکرد دانه، درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب گیاه سیاه‌دانه

منابع تغییر	درجه آزادی	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	درصد روغن	عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار)	اسید مریستیک (درصد)	اسید پالمیتیک (درصد)	اسید استئاریک (درصد)	اسید اولئیک (درصد)	اسید لینولئیک (درصد)
بلوک	۲	۲۷۴۸۶ ^{ns}	۱۳/۶۰ ^{ns}	۳۸۳۰ ^{ns}	۰/۱۵ ^{ns}	۶۵۰ ^{ns}	۷۴۸/۰۱ ^{ns}	۳/۶۸ ^{ns}	۲۵/۷۹ ^{ns}
آبیاری	۲	۲۸۵۷۰۸*	۴۰۲/۳۵**	۱۱۳۷۸۳*	۰/۹۸**	۳۹۴۲**	۲۲۲۶**	۱۲/۱۴ ^{ns}	۴۶/۹۷*
خطای اصلی	۴	۲۹۳۱۱	۱۸/۳۹	۸۳۲۲	۰/۰۳	۱۵۲	۱۱۰/۸۲	۳۶/۳۳	۳/۱۱
بیوچار	۲	۹۲۱۴۹**	۶۴/۸۸*	۲۰۶۳۸**	۰/۲۶**	۱۵۸۶**	۱۴۹/۶۵ ^{ns}	۲۳/۹۳ ^{ns}	۸۰/۴۴**
آبیاری × بیوچار	۴	۱۷۷۴۸ ^{ns}	۴۶/۰۹*	۳۱۶۸ ^{ns}	۰/۴۹**	۳۰۳*	۴۳۱/۹۷**	۹/۵۵ ^{ns}	۲۳/۰۲**
کودشیمیایی	۱	۲۵۵۶۴ ^{ns}	۷۱/۵۳*	۱۸۱۳۸*	۰/۱۷*	۱۴۷۱**	۱۱/۳۷ ^{ns}	۳۶/۴۰ ^{ns}	۱۱/۱۱ ^{ns}
آبیاری × کودشیمیایی	۲	۲۰۶۶ ^{ns}	۴۸/۶۱*	۷۵۶۰*	۰/۳۳**	۳۰۷*	۴۴۷/۵۵*	۷/۶۰ ^{ns}	۱۹/۱۹**
بیوچار × کودشیمیایی	۲	۲۵۷۵ ^{ns}	۱۱۵/۹۷*	۱۲۴۳۴*	۰/۰۴ ^{ns}	۲۰/۳ ^{ns}	۷۱/۴۹ ^{ns}	۱۵۰/۰۱**	۰/۴۰ ^{ns}
آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی	۴	۳۵۱۴۲**	۳۸/۲۷ ^{ns}	۶۹۴۳*	۰/۰۲ ^{ns}	۴۴۷**	۲۸/۵۹ ^{ns}	۶۰/۲۰*	۹/۶۷*
خطای فرعی	۳۰	۹۶۰۸/۳	۱۷/۵۹	۲۸۹۹	۰/۰۳	۸۷/۳	۸۵/۰۵	۲۲/۳۲	۳/۰۹

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر اصلی تیمارها بر عملکرد دانه، درصد روغن، عملکرد روغن و اسیدهای چرب گیاه سیاه‌دانه

فاکتور	سطوح	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	درصد روغن	عملکرد روغن (کیلوگرم درهکتار)	اسید مریستیک (درصد)	اسید پالمیتیک (درصد)	اسید استتاریک (درصد)	اسید اولئیک (درصد)	اسید لینولئیک (درصد)
	۱۰۰(I ₁)	۱۰۵۸a	۳۲/۷۹ a	۳۵۰/۲۷ a	۰/۵۱ b	۲۸/۰۴ b	۴۶/۲۱ a	۱۹/۹۰ a	۵/۰۲b
آبیاری (درصد)	۷۰(I ₂)	۹۵۷ ab	۲۶/۷۲ b	۲۵۶/۲۹ b	۰/۹۸ a	۵۳/۵۱ a	۲۴/۸۹ b	۲۱/۴۰ a	۸/۲۵a
	۴۰(I ₃)	۸۰۸b	۲۶/۴۸ b	۱۹۲/۲ b	۰/۶۹ b	۴۲/۸۲ a	۳۰/۰۷ b	۲۱/۲۳ a	۶/۶۶a
	۰(B ₁)	۸۸۰b	۲۷/۷۲ab	۲۵۱/۱۱ b	۰/۵۹ b	۳۱/۰۷ b	۳۵/۲۵ a	۱۹/۶۲ a	۵/۲۵ b
بیوجار (تن درهکتار)	۱۰(B ₂)	۱۰۲۰a	۲۹/۵۴ a	۳۰۵/۰۴ a	۰/۸۰ a	۴۹/۳۰ a	۳۵/۵۲ a	۲۱/۰۱ a	۹/۰۸ a
	۲۰(B ₃)	۹۲۳b	۲۵/۷۴ b	۲۴۲/۶۱ b	۰/۷۹ a	۴۳/۸۸ a	۳۰/۴۰ a	۲۱/۹۱ a	۵/۶۱ b
کودشیمیایی (کیلوگرم درهکتار)	بدون کود(F ₁)	۹۱۹b	۲۶/۵۲ b	۲۴۷/۹۳ b	۰/۷۸ b	۳۶/۲۲ b	۳۳/۲۷ a	۲۰/۰۳ a	۶/۱۹ a
	با مصرف کود(F ₂)	۹۶۳b	۲۸/۸۲ a	۲۸۴/۵۸ a	۰/۶۷ a	۴۶/۶۰ a	۳۴/۱۸ a	۲۱/۶۷ a	۷/۱۰ a

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی I₃؛ آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، I₂ آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی، I₁ :

: با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم، F₂، بدون مصرف کودشیمیایی، F₁

: ۲۰ تن در هکتار بیوجار B₃؛ ۱۰ تن در هکتار بیوجار، B₂، بدون مصرف بیوجار، B₁

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل بیوجار و کودشیمیایی بر درصد روغن، عملکرد روغن و اسید اولئیک در گیاه سیاه‌دانه

بیوجار (درصد)	کود شیمیایی (کیلوگرم در هکتار)	درصد روغن	عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار)	اسید چرب اولئیک (درصد)
بدون مصرف بیوجار (B ₁)	بدون مصرف کود (F ₁)	۲۴/۹۲c	۲۱۴/۷۷ d	۱۹/۴۱bc
	با مصرف کود (F ₂)	۳۰/۵۲ab	۲۸۷/۴۳ ab	۱۹/۸۳bc
۱۰ تن در هکتار بیوجار (B ₂)	بدون مصرف کود (F ₁)	۲۷/۱۲ bc	۲۷۴/۵۴ bc	۲۲/۷۳ab
	با مصرف کود (F ₂)	۳۱/۹۷a	۳۳۵/۵۳a	۱۹/۳۰bc
۲۰ تن در هکتار بیوجار (B ₃)	بدون مصرف کود (F ₁)	۲۷/۵۲ bc	۲۵۴/۴۴bcd	۱۷/۹۴c
	با مصرف کود (F ₂)	۲۳/۹۸c	۲۳۰/۷۷cd	۲۵/۸۷a

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

B₁ ، بدون مصرف بیوجار، B₂؛ ۱۰ تن در هکتار بیوجار، B₃؛ ۲۰ تن در هکتار بیوجار

F₁ ، بدون مصرف کودشیمیایی، F₂؛ با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری و بیوجار بر درصد روغن، اسیدمریستیک، پالمیتیک، استئاریک و لینولئیک در گیاه سیاه دانه

اسید لینولئیک (درصد)	اسید استئاریک (درصد)	اسید پالمیتیک (درصد)	اسید مریستیک (درصد)	درصد روغن	بیوجار (تن در هکتار)	آبیاری (درصد)
۴/۳۲g	۵۳/۹۴a	۲۵/۱۶d	۰/۵۳c	۳۰/۶۹ab	B1	۱۰۰ درصد نیاز آبی (I1)
۵/۰۳f	۵۳/۰۹a	۲۸/۹۸cd	۰/۵۲c	۳۴/۸۸a	B2	
۵/۷۰d	۳۱/۶۱b	۳۰ cd	۰/۴۹c	۳۲/۸۳a	B3	
۶/۹۶c	۲۲/۸۷b	۴۳/۰۲abc	۰/۶۴ c	۳۰/۰۹ab	B1	۷۰ درصد نیاز آبی (I2)
۱۲/۱۰a	۲۴/۲۹b	۵۶/۸۸a	۱/۳۹a	۲۶/۵۱ bc	B2	
۵/۶۹d	۲۷/۵۱b	۴۸/۹۷ ab	۰/۹۰b	۲۳/۵۹ cd	B3	
۴/۴۶g	۲۸/۹۵b	۲۱/۷۲d	۰/۵۹c	۲۲/۳۹ cd	B1	۴۰ درصد نیاز آبی (I3)
۱۰/۱۱b	۲۹/۱۹b	۴۷/۱۶ab	۰/۵۰ c	۲۷/۲۴bc	B2	
۵/۴۳e	۳۲/۰۹b	۴۱/۲۶ bc	۰/۹۸b	۲۰/۸۲d	B3	

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی داری ندارند
 I1: آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی، I2: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، I3: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی
 B1، بدون مصرف بیوجار، B2: ۱۰ تن در هکتار بیوجار، B3: ۲۰ تن در هکتار بیوجار

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری و کودشیمیایی بر عملکرد روغن، اسیدمریستیک، پالمیتیک، استئاریک و لینولئیک در گیاه سیاه دانه

اسید لینولئیک (درصد)	اسید استئاریک (درصد)	اسید پالمیتیک (درصد)	اسید مریستیک (درصد)	عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار)	کود شیمیایی (کیلوگرم در هکتار)	آبیاری (درصد)
۵/۴۶b	۴۱/۰۸b	۲۷/۵۲c	۰/۴۶c	۳۰۸/۵۵b	(F1)	۱۰۰ درصد
۴/۵۷b	۵۱/۳۶a	۲۸/۵۷c	۰/۵۶c	۳۹۱/۹۸a	(F2)	نیاز آبی (I1)
۸/۰۳a	۲۹/۶۸c	۳۹/۶۷bc	۰/۷۸b	۲۵۲/۷۷c	(F1)	۷۰ درصد
۸/۴۷a	۲۰/۱۱d	۵۹/۵۸a	۱/۱۷a	۲۵۹/۸۰c	(F2)	نیاز آبی (I2)
۵/۰۸b	۲۹/۰۶c	۳۰/۴۲c	۰/۷۷b	۱۸۲/۴۴d	(F1)	۴۰ درصد
۸/۲۵a	۳۱/۰۹ c	۴۳/۰۱b	۰/۶۲bc	۲۰۱/۹۵cd	(F2)	نیاز آبی (I3)

در هر ستون و فاکتور، میانگین های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند
 I1: آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی، I2: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، I3: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی
 F1، بدون مصرف کودشیمیایی، F2: با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

جدول ۱۱- مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری، بیوچار و کودشیمیایی بر عملکرددانه، عملکردروغن، اسیدپالمیتیک، اولئیک و لینولئیک در گیاه سیاه‌دانه

آبیاری (درصد)	تیمارهای کودی	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	عملکردروغن (کیلوگرم در هکتار)	اسیدپالمیتیک (درصد)	اسید اولئیک (درصد)	اسید لینولئیک (درصد)
۱۰۰ درصد نیاز آبی (I ₁)	B ₁ F ₁	۹۵۱cdef	۲۳۰efgh	۲۶/۲۸cdef	۱۹/۱۷bc	۴/۶۶c
	B ₁ F ₂	۱۱۳۶ab	۴۲۳/۳۳a	۲۴/۰۳ef	۱۷/۵۶bc	۳/۹۹c
	B ₂ F ₁	۱۱۵۰a	۳۷۳abc	۳۱/۳۴cdef	۱۸/۳۸bc	۶/۰۷bc
	B ₂ F ₂	۱۰۶۹abc	۴۰۶ab	۲۶/۶۲cdef	۱۹/۳۱bc	۳/۹۸c
	B ₃ F ₁	۹۸۲bcde	۳۲۲/۶۶bcd	۲۴/۹۵def	۲۰/۸۳b	۵/۶۵bc
	B ₃ F ₂	۱۰۶۲abcd	۳۴۶/۶۶abcd	۳۵/۰۶bcde	۲۴/۱۹ab	۵/۷۵bc
۷۰ درصد نیاز آبی (I ₂)	B ₁ F ₁	۹۵۰cdef	۲۶۴/۶۶defg	۳۹/۷۳bcde	۱۸/۰۷bc	۶/۰۲bc
	B ₁ F ₂	۸۵۱efg	۲۷۶/۳۳defg	۴۶/۳۰abcd	۲۲/۷ab	۷/۹۰b
	B ₂ F ₁	۹۸۵bcde	۲۶۲defg	۴۷/۶۰abc	۲۴/۶۸ab	۱۲/۵۷a
	B ₂ F ₂	۱۱۵۸a	۳۰۶/۴۰cde	۶۶/۱۲a	۱۹/۰۷bc	۱۱/۶۴a
	B ₃ F ₁	۸۶۴efg	۲۳۱/۶۶efgh	۳۱/۶۴cdef	۲۰/۱۳bc	۵/۵۰bc
	B ₃ F ₂	۹۳۷cdef	۱۹۶/۶۶gh	۶۶/۳۰a	۲۳/۸۵ab	۵/۸۸bc
۴۰ درصد نیاز آبی (I ₃)	B ₁ F ₁	۷۴۳gh	۱۴۹/۶۶h	۱۲/۶۰f	۲۱/۱۹b	۴/۰۸c
	B ₁ F ₂	۶۵۱h	۱۶۲/۶۶h	۳۰/۸۳cdef	۱۹/۲۵bc	۴/۸۴c
	B ₂ F ₁	۸۴۳efg	۱۸۸/۶۶gh	۳۹/۲۵bcde	۲۵/۱۳ab	۶/۷۳bc
	B ₂ F ₂	۹۱۶cdef	۲۹۴/۱۹cdef	۵۵/۰۸ab	۱۹/۵۹bc	۱۳/۴۸a
	B ₃ F ₁	۹۰۰defg	۲۰۹fgh	۳۹/۴۰ bcde	۱۲/۸۸c	۴/۴۳c
	B ₃ F ₂	۷۹۵fgh	۱۴۹h	۴۳/۱۲bcde	۲۹/۵۹a	۶/۴۳ bc

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری I₁: آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی، I₂: آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی، I₃: آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی
 B₁: بدون مصرف بیوچار، B₂: ۱۰ تن در هکتار بیوچار، B₃: ۲۰ تن در هکتار بیوچار
 F₁: بدون مصرف کودشیمیایی، F₂: با مصرف کود شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم

فهرست منابع

- جلالی‌پور، س.، غلامعلی‌زاده آهنگر، ا. و لکزیان، ا. ۱۳۹۲. تأثیر کاربرد بیوچار بر برخی خصوصیات کمی گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus L*) در خاکهای آلوده به کادمیوم. دومین همایش ملی مباحث نوین در کشاورزی. ۲۸ آذرماه ۱۳۹۲.
- حشمتی، س.، امینی دهقی، م. و فتحی امیرخیز، ک. ۱۳۹۶. تأثیر کاربرد کودهای زیستی و شیمیایی فسفر بر عملکرد دانه، عملکرد روغن و اسیدهای چرب گلرنگ بهاره در شرایط کمبود آب. علوم گیاهان زراعی ایران. ۱۶۹: (۱) ۱۵۹-۱۶۹.
- دیوبند هفشجانی، ل.، ناصری، ع.ع.، هوشمند، ع.، عباسی، ف. و سلطانی محمدی، ا. ۱۳۹۶. بررسی تاثیر کاربرد بیوچار باگاس نیشکر بر خصوصیات شیمیایی یک خاک لوم شنی. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۷۲: (۱) ۷۲-.

۴. رحیمی، ط.، معزی، ع. و حاجتی، س. ۱۳۹۷. اثر کاربرد سطوح مختلف کود گاوی و بیوپچار حاصل از آن بر سینتیک جذب نیکل در یک خاک آهکی. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۲(۱): ۱۹۹-۲۰۹
۵. رضایی، ن.، رزاقی، ف.، سپاسخواه، ع. و موسوی، س.ع. ۱۳۹۷. تأثیر بیوپچار و شوری آب آبیاری بر خصوصیات شیمیایی خاک تحت کشت باقلا. نشریه پژوهشهای خاک (علوم خاک و آب). ۳۲(۱): ۱۳-۲۵.
۶. زلفی باوریانی، م.، رونقی، ع.، کریمیان، ن.، قاسمی، ر. و یثربی، ج. ۱۳۹۵. اثر بیوپچار تهیه شده از کود مرغی در دماهای متفاوت بر ویژگیهای شیمیایی یک خاک آهکی. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۰(۷۵): ۷۳-۸۶.
۷. گلزردی، ف. ۱۳۹۵. خشکی، خطری جدی برای تولیدات کشاورزی. اثر آنلاین. <https://www.researchgate.net/publication/307583463>
۸. مالکی خضرلو، س.، طهماسبی سروستانی، ز.، مدرس ثانوی، س.ع. ۱۳۹۲. ارزیابی عملکرد کمی و کیفی کدوی تخم پوست کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) تحت القای تنش کم آبی و کود نیتروژن. دو ماهنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۳۱(۵): ۸۶۳-۸۵۳.
۹. مرادی، ن.، رسولی صدقیانی، م.ح. و سپهر، ا. ۱۳۹۶. تأثیر نوع و مقدار بیوپچار بر برخی ویژگیهای خاک و قابلیت استفاده بعضی عناصر غذایی در یک خاک آهکی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۱(۴): ۱۲۴۶-۱۲۳۲
۱۰. نجفی قیری، م.، بوستانی، ح.ر. ۱۳۹۶. تأثیر کاربرد برخی بقایای گیاهان زراعی و تفاله شیرینبیان و بیوپچار حاصل از آنها بر وضعیت پتاسیم یک خاک آهکی. نشریه پژوهشهای حفاظت آب و خاک. ۲۴(۳): ۷۷-۹۳.
11. 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.
12. Akom, M., Boateng, Otoo1, E. and Dawoe, E. 2015. Effect of biochar and inorganic fertilizer in Yam (*Dioscorea rotundata* Poir) production in a forest agroecological zone. *Journal of Agricultural Science*, 7: 211-222.
13. Ali, K., Arif, M. and Jan, T. 2015. Integrated use of biochar: A tool for improving soil and wheat quality of degraded soil under soil wheat- maize cropping pattern. *Pakistan Journal of Botany*, 47 (1): 233-240.
14. AOAC (Association of Official Analytical Chemists).1995. Official Methods of Analysis, 16th Edition. AOAC International, Gaithersburg, MD.
15. Asdadi A., Harhar H., Gharby S., Bouzoubaâ Z.,Yadini A.E., Moutaj R., Hadek M.E., Chebli, B. and Hassani, L.M.I. 2014. Chemical composition and antifungal activity of *Nigella Sativa* L. oil seed cultivated in Morocco. *International Journal of Pharmaceutical Science Invention*, 3: 9-15.
16. Ashrafi, E. and Razmjoo, Kh. 2010. Effect of Irrigation Regimes on Oil Content and Composition of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Cultivars. *Journal of American Oil Chemists Society*, 87: 499-506.
17. Bakry, B. A., Ibrahim, O.M., Eid, A.R. and Abdelmoneim Badr, A. 2014. Effect of humic acid, mycorrhiza inoculation and biochar on yield and water use efficiency of flax under newly reclaimed sandy soil. *Agricultural Sciences*. 5: 1427-1432.
18. Bellaloui, N., Mengistu, A. and Kassem, A. 2013. Effects of Genetics and Environment on Fatty Acid Stability in Soybean Seed. *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 4(9A):165-175.
19. Berek, A.K., Hue, N. and Ahmad, A. 2011. Beneficial use of biochar to correct soil acidity. *The Food Provider*, Available at www.ctahr.hawaii.edu/huen/nvh/biochar.
20. Biderman, L. and Stanley Harpole, W. 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5: 202-214.

21. 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.
22. de Melo Carvalho, M.T., De Holanda Nunes Maia, A., Madari, B. E., Bastiaans, L., Van Oort, P. A. J., Heinemann, A. B., Soler da Silva, M. A., Petter, F. A., Marimon Jr., B. H. and Meinke, H. 2014. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. *Solid Earth*, 5: 939–952.
23. Dispenza, V., Pasquale, C. D., Fascella, G., Mammano, M.M. and Alonzo, G. 2016. Use of biochar as peat substitute for growing substrates of *Euphorbia × lomi* potted plants. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(4):1-11.
24. Dwivedi, S.L., Nigam, S.N., Nageswara Rao, R.C., Singh, U. and Rao, K.V.S. 1996. Effect of drought on oil, fatty acids and protein contents of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) seeds. *Field Crops Research*, 48 (2–3): 125–133.
25. Farhoosh R., Haddad Khodaparast M.H. and Sharif A. 2009. Bene hull oil as a highly stable and antioxidative vegetable oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 111:1259-1265.
26. Freddo, A. 2013. Biochar: for better or for worse? Ph.D. thesis, University of East Anglia School of Environmental Science.
27. Fiaz, K., Malik, S. A, Younis, U., Danish, S., Raza Shah, M. H. and Niaz, S. 2014. Drought impact on Pb/Cd toxicity remediated by biochar in *Brassica campestris*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14(4): 845-854.
28. Gebremedhin, G.H., Haileselassie, B., Berhe, D. and Belay, T. 2015. Effect of biochar on yield and yield Components of wheat and post-harvest soil properties in Tigray, Ethiopia. *Journal of Fertilizers and Pesticides*, 6:158-162.
29. 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.
30. 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.
31. Hao Jien, S. and Sheng Wang, C. 2013. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110: 225–233.
32. Herath, H.M.S.K., Camps-Arbestian, M. and Hedley, M. 2013. Effect of biochar on soil properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209-210:188-197.
33. Howard, H. 2011. The effect of biochar on the root development of corn and soybeans in Minnesota soil and sand. *International Biochar Initiative*, 24 June, <http://www.biochar-international.org>.
34. 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.
35. Karer, J., Wimmer, B., Zehetner, F., Kloss, S. and Soja, G. 2013. Biochar application to temperate soils: effects on nutrient uptake and crop yield under field conditions. *Agricultural and Food Science*, 22: 390–403.
36. Kathrin, A. 2016. Biochar in soil: Effect on physical, chemical and hydrological properties in differently textured soils. M.Sc. thesis, Department of Agro ecology, AU.
37. Khan, M.H, Singha, K.L.B. and Panda, S.K. 2002. Changes in antioxidant levels in *Oryza sativa* L. roots subjected to NaCl salinity stress. *Journal of Acta Physiology Plantarum*, 24:145–14.
38. Kraska, P., Oleszczuk, P., Andruszczak, S., Kwiecińska-Poppe, E., Różyło, K., Pałys, E., Gierasimiuk, P. and Michałojć, Z. 2016. Effect of various biochar rates on winter rye yield and the concentration of available nutrients in the soil. *Plant, Soil and Environment*, 62 (11):483-489.

39. Lentz, R.D. and Ippolito, J.A. 2012. Biochar and manure affect calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. *Journal of Environment Quality*, 41(4):1033-43.
40. Melaz, G.B. 2014. Interactions between different types of biochar and soil microbial activity. Ph.D. thesis, University of Barcelona, Department of animal biology.
41. Mozzafari, F., Ghorbanli, S., Babai, M. and Farzami, A. 2000. The effect of water stress on the seed oil of *Nigella sativa* L. *Journal of Essential Oil Research*, 12: 36-38.
42. 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.
43. Munir, M.A., Malik, M.A. and Saleem, M.F. 2007. Impact of integration of crop manuring and nitrogen application on growth, yield and quality of spring planted sunflower (*Helianthus annuus* L.) *Pakistan Journal of Botany*, 39(2): 441-449.
44. 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.
45. Nour mohammadi, Gh. 2004. Evaluation of the response of three safflower lines to different drought stress. *Journal of Agricultural Science*, 4: 251-259.
46. 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.
47. Razi, H. and Assad. M. T. 1999. Comparison of selection criteria in normal and limited irrigation in sunflower, *Euphytica* 105: 83-90.
48. Różyło, K., Świeca, M., Gawlik-Dziki, U., Stefaniuk, M., and Oleszczuk, P. 2017. The potential of biochar for reducing the negative effects of soil contamination on the phytochemical properties and heavy metal accumulation in wheat grain. *Agricultural and Food Science*, 26(1):34-46.
49. Sika, M.P. 2012. Effect of biochar on chemistry, nutrient uptake and fertilizer mobility in sandy soil. M.Sc. thesis, Department of Soil Science, Stellenbosch University, Stellenbosch.
50. Suppadit, S., Phumkokrak, N. and Pounsuk, P. 2012. The effect of using quail litter biochar on soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) Production. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(2):244-251.
51. Widowati, W.H., Asnah, A. and Utomo, W.H. 2014. The use of biochar to reduce nitrogen and potassium leaching from soil cultivated with maize. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 211-218.
52. Widowati, W.H. 2012. The effect of biochar on the growth and N fertilizer requirement of Maize (*Zea mays* L.) in green house experiment. *Journal of Agricultural Science*, 4(5):256-262.
53. Zeelie, A. 2012. Effect of biochar on selected soil physical properties and crop performance of winter wheat pot plants. M.Sc. Thesis. University of Stellenbosch.

Effect of Biochar and Chemical Fertilizers on Some Soil Properties, Yield and Quality Characteristics of Black Seed (*Nigella sativa*) under Water Deficit

F. Abbaspour, H. R. Asghari¹*, P. Rezvani Moghaddam, H. Abbasdokht,

J. Shabahang, and A. Baig Babaei

PhD. student of Agro Ecology, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

fatemehabbaspour@gmail.com

Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

hamidasghari@gmail.com

Full Professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

rezvani@um.ac.ir

Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

habbasdokht@yahoo.com

Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

ja.shabahang@gmail.com

Assistant Professor, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran.

Baikbabaei2004@yahoo.com

Abstract

A field experiment was conducted which focused on the effects of walnut wood biochar and chemical fertilizers on quality characteristics of Black Seed (*Nigella sativa*) under water deficit conditions. The experiment was carried out in a split plots factorial layout based on a randomized complete block design with three factors and three replications. Three levels of irrigation (I₁: 100%, I₂: 70% and I₃: 40% of crop water requirement) were assigned as the main plots and the combination of three levels of biochar (B₁: 0, B₂: 10 and B₃: 20 t.ha⁻¹) and two levels of chemical fertilizers (F₁: without and F₂: with chemical fertilizer) were allocated to sub plots. Recommended dose for nitrogen, phosphorus, and potassium was 150 kg N.ha⁻¹, 75 kg P₂O₅.ha⁻¹ and 100 kg K₂SO₄.ha⁻¹, respectively. Results showed that irrigation had no effect on soil properties, but application of 20 t ha⁻¹ of biochar improved soil saturation percentage, soil organic carbon, and total nitrogen. Irrigation significantly influenced the seed yield, oil yield, oil percentage, and fatty acids, except oleic acid. The 70% water requirement treatment increased the amount of fatty acids, except stearic acid. Plant quality characteristics significantly increased by 10 t ha⁻¹ biochar application. Application of 10 t ha⁻¹ biochar plus 70% irrigation water requirement and using chemical fertilizer (I₂B₂F₂) produced the highest seed yield (1158.4 kg ha⁻¹). Based on the results, it seems that application of 10 t ha⁻¹ biochar is suitable for black seed production under water deficit condition.

Keywords: Irrigation, Water requirement, Water stress, Seed yield, Oil yield

1 - Corresponding author: Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology

* - Received: February 2018 and Accepted August 2018