اثر بیوچار حاصل از منابع مختلف بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم

حسن اصولی[۱]، احمد کریمی و حسین شیرانی

دانشجوی سابق دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهر کرد، ایران.

osoolih@gmail.com

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

karimiahmad1342@yahoo.com

استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

shirani@vru.ac.ir

دریافت: تیر ۱۴۰۰ و پذیرش: آذر ۱۴۰۰

چکیده

افزودن بقایای آلی به صورت بیوچار به خاک با هدف بهسازی آن، رهیافت جدیدی در مدیریت بقایای آلی است. در پژوهش‌های قبلی، بیشترین تمرکز محققان به مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک بوده است. این تحقیق با هدف بررسی ویژگی‌های بیوچارهای تهیه‌شده از منابع مختلف (کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب درخت زردآلو) و اثرات مقادیر و اندازه ذرات آن بیوچارها بر عملکرد و کارایی مصرف آب (WUE) گندم انجام شد. در آزمایشی فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، اثر سه بیوچار مذکور در مقادیر ۰/۵٪ (R_1)، ۱/۵٪ (R_2) و ۳٪ (R_3) وزنی با اندازه ذرات ۰/۵≥ (S_1)، ۱-۰/۵ (S_2) و ۲-۱ (S_3) میلی‌متر در دو سال زراعی متوالی بررسی شد. بیوچارهای مورد مطالعه فقط در سال اول تا عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر به خاک اضافه شدند. در هر تکرار یک کرت شاهد هم در نظر گرفته شد. اثرات متقابل فاکتورهای آزمایش (به‌جز اثر سال در مقدار بیوچار) بر عملکرد و کارایی مصرف آب معنی‌دار بود. مقایسه میانگین عملکرد و کارایی مصرف آب در هر نوع بیوچار نشان داد که در سال اول و دوم، تیمار بیوچار کاه گندم در مقدار R_3 و اندازه ذرات S_2، بیشترین عملکرد به ترتیب ۵۲۰۰ و ۶۶۶۴ کیلوگرم در هکتار و کارایی مصرف آب به ترتیب ۱/۶ و ۲/۱ کیلوگرم بر مترمکعب را داشت. در سال اول، در تیمارهای بیوچار ورمی کمپوست، بیشترین عملکرد (۴۵۱۷ کیلوگرم در هکتار) و کارآیی مصرف آب (۱/۴ کیلوگرم در مترمکعب) در مقدار R_2 با اندازه ذرات S_3 مشاهده گردید. در همان سال، در بین تیمارهای بیوچار چوب درخت زردآلو، تیمار با مقدار R_3 با اندازه ذرات S_3 بیشترین عملکرد (۳۸۷۱ کیلوگرم در هکتار) و کارایی مصرف آب (۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب) را داشت. در سال دوم، در تیمار بیوچار ورمی کمپوست، بیشترین عملکرد (۶۶۱۵ کیلوگرم در هکتار) و کارایی مصرف آب (۲/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب) در مقدار R_3 با اندازه ذرات S_2 و در بیوچار چوب درخت زردآلو، بیشترین عملکرد (۵۲۶۳ کیلوگرم در هکتار) و کارایی مصرف آب (۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب) در مقدار R_2 با اندازه ذرات S_3 آن بیوچار مشاهده شد. در بین تمام تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین عملکرد و کارایی مصرف آب (در هر دو سال) در بیوچار گندم با مقدار R_3 و با اندازه ذرات بیوچار S_2 مشاهده شد. نتایج نشان داد که علاوه بر نوع بیوچار، اثر متقابل مقدار و اندازه ذرات بیوچار، اثر تعیین کننده‌ای در افزایش میزان عملکرد و کارایی مصرف آب داشت.

واژه‌های کلیدی: اندازه ذرات بیوچار، خاک آهکی، بقایای آلی، ورمی‌کمپوست

---

[۱] – آدرس نویسنده مسئول: دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهر کرد، ایران.

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمی بارش‌های جوی و خشک‌سالی‌های پی‌درپی موجب فشار بیش‌ازحد به منابع آب در جهت تأمین آب موردنیاز کشت‌های آبی شده است. یکی از راهکارهای مدیریت میزان مصرف آب آبیاری، بالا بردن ظرفیت نگهداشت رطوبت در خاک، افزایش میزان عملکرد در واحد سطح و بالا بردن کارایی مصرف آب در محصولات کشاورزی است. گندم به‌عنوان یکی از محصولات اساسی کشاورزی، جایگاه خاصی در تغذیه مردم ایران دارد و تأمین به‌اندازه این محصول اهمیت ویژه‌ای دارد. راه‌حل عمومی برای افزایش تولید این محصول مهم، اصلاح ویژگی‌های خاک با اضافه کردن مواد آلی (بقایای گیاهی و جانوری) و یا فرم کمپوست شده آن‌ها است (سالداقو و همکاران، ۲۰۱۶). افزودن بقایای آلی به خاک به فرم بیوچار به‌منظور اصلاح ویژگی‌های آن، رهیافت جدیدی در مدیریت بقایای آلی است. افزودن بیوچار به خاک علاوه بر تثبیت کربن، اثرات مثبت آگرونومیکی و زیست‌محیطی زیادی داشته و موجب اصلاح ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌شود (دوکوهکی و همکاران، ۲۰۱۹).

بیوچار یک ماده آلی غنی از کربن است که از حرارت دادن بقایای آلی در دمای ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، در شرایط بدون اکسیژن یا با اکسیژن کم (گرما کافت) تولید می‌شود. در آن فرایند، بقایای گیاهان زراعی، باغی، جنگلی و پسماند گیاهان صنعتی و فضولات دامی به مواد غنی از کربن به نام بیوچار و مواد فرار تبدیل می‌شوند (ورهیژن و همکاران، ۲۰۱۹). بیوچار به دلیل قابلیت ایجاد تغییر در ویژگی‌های خاک، امروزه به‌عنوان موضوع بسیاری از تحقیقات قرارگرفته است (بایامونت و همکاران، ۲۰۱۷).

بیوچار یک ماده یکنواخت نبوده و خصوصیات آن مانند مقدار کربن آلی، خاکستر، اسیدیته، قابلیت هدایت الکتریکی، مقدار کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی به ویژگی‌های مواد اولیه و شرایط گرما کافت (دمای گرما کافت و زمان ماند) بستگی دارد (راندولف و همکاران،۲۰۱۷ و ساتو و همکاران، ۲۰۱۹).

یکی از اهداف افزودن بیوچار به خاک افزایش عملکرد محصولات زراعی است. مطالعات نشان داده است که کارایی بیوچار در افزایش عملکرد به واکنش و بافت خاک بستگی دارد. بیشترین اثر مثبت بیوچار بر عملکرد، در خاک‌های اسیدی (۱۴٪) و خاک‌های خنثی (۱۳٪) بوده است (جفری و همکاران، ۲۰۱۱). لی و همکاران (۲۰۱۵) بعد از مطالعه یک‌ساله گزارش کردند که افزودن بیوچار کاه گندم در مقادیر ۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ تن در هکتار به خاک، با بهبود شاخص‌های رشد گندم زمستانه به‌صورت مؤثری موجب افزایش میزان عملکرد و کارایی مصرف آب شد. دیو و همکاران (۲۰۱۸) در یک مطالعه چهارساله در یک منطقه مرطوب گزارش کردند که بعد از افزون بیوچار پوسته بادام‌زمینی و دوغاب بیوگاز[۲] به خاکی با سیستم تناوب کشت گندم و ذرت تابستانه مقدار عملکرد گندم ۸/۴۶ تا ۲۳/۴۷ درصد و عملکرد ذرت ۱۵/۴۶ تا ۱۸ درصد افزایش یافت. کارتیکا و همکاران (۲۰۱۸) بیوچار تهیه شده از شلتوک برنج را در مقادیر و اندازه ذرات مختلف به خاک ماندابی ساحلی مخصوص کشت برنج اضافه کردند و گزارش کردن که بیوچار موجب بهبود ویژگی‌های خاک، رشد و عملکرد برنج شد. علی و همکاران (۲۰۱۹) بعد از افزودن بیوچار، دلیل افزایش میزان عملکرد گندم بعد از افزودن بیوچار به خاک را افزایش قابلیت دسترسی نیتروژن و فسفر و نیز افزایش کارایی مصرف نیتروژن و فسفر بیان کرده‌اند.

وجود بیش از ۴۵۹ هزار هکتار اراضی تحت کشت گندم و ۱۰ هزار هکتار باغ زردآلو در استان آذربایجان شرقی موجب شده است که در این استان کاه گندم و چوب زردآلو به مقدار زیادی تولید شود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹a و احمدی و همکاران، ۱۳۹۹b). استفاده از آن مواد برای تهیه بیوچار، به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک، می‌تواند مورد توجه بخش کشاورزی قرار بگیرد. از طرفی در مطالعات

[۲]- Biochar slurry

انجام شده با موضوع اثرات بیوچار برخصوصیات خاک و عملکرد گیاه، توجه محققان به مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک معطوف بوده است و اثر متقابل مقدار و اندازه ذرات چند بیوچار مختلف بر عملکرد گندم و کارایی مصرف آب گندم به‌صورت مزرعه‌ای کمتر بررسی‌شده است. این در حالی است که اثر مقدار بیوچار بر ویژگی‌های خاک بسیار متغیر بوده و به ویژگی‌هایی مانند خصوصیات مواد اولیه برای تهیه بیوچار، ویژگی‌های شیمیایی بیوچار و ویژگی‌های فیزیکی بیوچار مانند اندازه ذرات بیوچار بستگی دارد (تریفیونویچ و همکاران، ۲۰۱۸). لذا این تحقیق با هدف کلی تعیین برخی از ویژگی‌های بیوچارهای حاصل از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو و نیز اثر مقادیر و اندازه ذرات بیوچارهای ذکرشده بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم پاییزه (کشت آبی) در یک خاک آهکی منطقه نیمه‌خشک (اطراف شهرستان تبریز) در دو سال زراعی (۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸) انجام شد. بررسی وجود تفاوت بین تأثیر بیوچارهای کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو بر عملکرد و کارآیی مصرف آب، وجود یا عدم وجود اختلاف بین مقادیر و اندازه‌های ذرات بیوچارهای مورد مطالعه از نظر تاثیر بر عملکرد و کارآیی مصرف آب و نیز معرفی مناسب‌ترین تیمار برای رسیدن به حداکثر عملکرد و کارآیی مصرف آب در منطقه مورد مطالعه، هدف‌های اختصاصی این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

محل اجرا و تعیین ویژگی‌های خاک

این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی مرکز آموزش و تحقیقات کشاورزی تبریز با مختصات جغرافیایی °۳۷/۹۷۵۲۷۸ عرض شمالی و °۴۶/۵۵۱۶۶۷ طول شرقی و ارتفاع ۱۸۴۳ متر از سطح دریا اجرا گردید. بارش سالانه منطقه ۳۳۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس روش تقسیم‌بندی اقلیمی آمبرژه، اقلیم منطقه نیمه‌خشک سرد است.

قبل از افزودن بیوچار، یک نمونه خاک مرکب از محل آزمایش از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر تهیه شده و اسیدیته خاک در سوسپانسیون ۱ به ۱ خاک به آب مقطر و هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع، مقدار کربنات کلسیم با روش کلسی‌متری، کربن آلی خاک با روش اکسیداسیون تر (کارتر و گریگوریچ، ۲۰۰۷)، فسفر قابل استفاده خاک با روش اولسون و پتاسیم قابل استفاده خاک با روش بیکربنات آمونیم نرمال با pH=۷ اندازه‌گیری گردیدند (جونز، ۱۹۹۹). جرم مخصوص ظاهری خاک با روش استوانه و جرم مخصوص حقیقی خاک با پیکنومتر آب (اسمیت و مولینز، ۲۰۰۰) و بافت خاک به روش بایکاس تعیین شدند (قی و بایودر، ۱۹۸۶).

نوع بیوچار و روش تهیه آن‌ها

برای تهیه بیوچار از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو استفاده گردید. مواد اولیه هوا خشک به صورت جداگانه در یک کوره از نوع دو بشکه با ظرفیت ۲۰۰ لیتر در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۸ ساعت گرما کافت شدند (لی یو و همکاران، ۲۰۱۳). بیوچارهای تهیه شده با الک‌های با قطر منافذ ۲، ۱ و ۰/۵ میلی‌متری الک شده و تا زمان اضافه شدن به خاک در کیسه‌های پلی‌اتیلنی غیرقابل نفوذ در برابر هوا بسته‌بندی شدند.

تعیین ویژگی‌های بیوچار

جرم مخصوص ظاهری بیوچار در اندازه‌های مورد مطالعه، از طریق قرار دادن آن در قالب فلزی به قطر ۲۵ و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر (ساتو و همکاران، ۲۰۱۹) و جرم مخصوص حقیقی بیوچار با پیکنومتر و نفت سفید تعیین گردید (گوپتا و همکاران، ۲۰۰۲). میزان رطوبت و خاکستر بیوچار با استفاده از روش ASTM D1762-84 تعیین گردید (آلر و همکاران، ۲۰۱۷). برای تعیین pH و EC بیوچار، از محلول با نسبت ۱:۲۰ (وزن به حجم) بیوچار به آب مقطر استفاده شد. مقادیر فسفر، کلسیم، منیزیم، پتاسیم

و سدیم در بیوچارهای با اندازه ذرات ۱۵۰ تا ۸۵۰ میکرون تعیین شدند (راجکویچ و همکاران، ۲۰۱۲).

طرح آزمایش

این تحقیق به‌صورت آزمایش فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه فاکتور در سه تکرار و در دو سال زراعی انجام شد. فاکتور نوع بیوچار شامل بیوچارهای کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو و فاکتور مقدار بیوچار شامل مقادیر ۰/۵(R_1)، ۱/۵ (R_2) و ۳ (R_3) درصد وزنی و فاکتور اندازه ذرات بیوچار شامل بیوچار با اندازه ۰/۵> (S_1)، ۱-۰/۵ (S_2)و ۲-۱ (S_3) میلی متر بود. در هر تکرار یک کرت شاهد در نظر گرفته شد (۸۴ کرت آزمایش). برای اجرای تحقیق در مزرعه، بعد از شخم زمین مورد نظر، کرت‌های آزمایشی در ابعاد ۱×۱ متر احداث شدند. برای عدم نشت آب یک کرت به کرت‌های مجاور و نیز سهولت تردد و نمونه‌برداری، بین کرت‌های هر بلوک نیم متر و بین بلوک‌های متوالی یک متر فاصله در نظر گرفته شد. قبل از اختلاط بیوچار با خاک، کرت‌ها آبیاری شده و اجازه داده شد تا رطوبت خاک به رطوبت ظرفیت زراعی برسد. در تاریخ ۲۰ ام مرداد ۱۳۹۷، تیمارها به سطح خاک کرت‌ها اضافه و با بیل تا عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط شدند (افزودن بیوچار به خاک فقط یک بار و در سال اول انجام شد). برای انجام عمل انکوباسیون، کرت‌های آزمایشی در روز اول هر هفته به مدت ۹۰ روز، تا زمان کشت گندم، آبیاری شدند.

در دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در هر کرت بذر گندم آبی پاییزه رقم میهن (۲۵۰ کیلوگرم در هکتار)، بعد از ضدعفونی با سم قارچ‌کش تیرام با غلظت دو در هزار، به‌صورت ردیفی و با فاصله ردیف‌های ۲۰ سانتی‌متر به‌صورت دستی کشت شد (بی‌نام، ۱۳۹۴). لازم به ذکر است که در سال اول فقط در محل کشت بذرها شیار ایجاد گردید و کل خاک کرت به هم زده نشد. در سال دوم خاک کرت‌ها با بیل تا عمق ۱۵ سانتی‌متر شخم زده شدند. در هر سال ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (۲۲۰ کیلوگرم کود اوره) در سه تقسیط به هر کرت اضافه شد (ملکوتی و غیبی، ۱۳۷۶). اولین آبیاری دو روز قبل از کشت انجام شد.

آب موردنیاز گندم در مراحل مختلف رشد به‌صورت ماهانه بر اساس ویژگی‌های اقلیمی منطقه و بر اساس آمار هواشناسی بین سال‌های آبی ۳۱-۱۳۳۰ تا ۹۷-۱۳۹۶ با روش پنمن -مانتیث - فائو ۵۶ با کمک روابط ۱ و ۲ تعیین گردید (علیزاده و کاملی، ۲۰۰۷).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta\,(R_n - G)\gamma\left[\frac{890}{T+273}\right]}{\Delta + \gamma\,(1+0.34\,U_2)}\,U_2\,(e_a - e_d) \quad (۱)$$

که در آن:

ET_0 تبخیر و تعرق مرجع ($mm\ d^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دما در نقطه‌ای که دمای آن T باشد ($KPa\ ^oC^{-1}$)، R_n تشعشع خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، G شار گرما به داخل خاک مزرعه ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، γ ضریب سایکرومتری ($KPa\ ^oC^{-1}$)، T دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین(^oC)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($m\ s^{-1}$)، e_a- e_d کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری از سطح زمین (KPa) که e_a و e_d به ترتیب فشار بخار واقعی آب (KPa) و فشار بخار اشباع (KPa) است.

بر این اساس، نیاز آبی گندم در منطقه مورد مطالعه ۳۷۵ میلی‌متر (۳۷۵ لیتر در هر مترمربع) در طول یک فصل زراعی به دست آمد. نیاز آبی گیاه برای مراحل مختلف گیاه از رابطه زیر محاسبه شد.

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (۲)$$

که در آن:

K_C ضریب گیاهی گندم مربوط به منطقه مورد مطالعه، ET_0 تبخیر تعرق مرجع ($mm\ d^{-1}$) است.

میزان بارش‌ها با یک باران‌سنج که در ۲۰ متری محل اجرای طرح واقع شده بود، ثبت و بعد از کسر میزان بارش‌های اتفاق افتاده بین دو آبیاری، آب موردنیاز در مراحل مختلف رشد گندم (به‌صورت ماهانه) در اختیار گیاه قرار گرفت. میزان آب آبیاری در هر کرت با کنتور حجمی اندازه‌گیری و کنترل شد. میزان رطوبت موجود در خاک در ابتدا و انتهای رشد با نمونه‌برداری از وسط هر کرت با کمک

مته نمونه‌برداری به روش وزنی تعیین شد و بعد از تبدیل به رطوبت حجمی برای تصحیح تبخیر و تعرق (رابطه ۳) استفاده شد.

میزان تبخیر و تعرق گندم در دوره رشد گیاه از رابطه زیر محاسبه گردید (لی یوسیبا و همکاران، ۲۰۱۷).

$$ET = Ir + P - D - R \pm \Delta\theta \qquad (۳)$$

که در آن:

ET مقدار تبخیر و تعرق، P میزان بارش، D مقدار آب زهکشی شده (در این تحقیق D، برابر با صفر در نظر گرفته شد)، R مقدار روان آب (که مقدار آن صفر بود)، $\Delta\theta$ اختلاف رطوبت خاک در ابتدا و انتهای دوره رشد است.

بعد از رسیدن کامل گندم، در هر کرت با حذف حاشیه کرت‌ها، اقدام به برداشت محصول در پلاتی به ابعاد ۰/۶×۰/۶ متر نموده و عملکرد دانه گیاه تعیین شد. کارایی مصرف آب با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

$$WUE = \frac{Y}{ET} \qquad (۳)$$

که در آن:

Y: میزان عملکرد و ET: مقدار آب آبیاری (یا مقدار تبخیر و تعرق) را نشان می‌دهد (لی یوسیبا و همکاران، ۲۰۱۷).

تجزیه و تحلیل آماری

برای تعیین اثر تیمارها بر ویژگی‌های مورد مطالعه، بعد از بررسی نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولمگروف- اسمیرنوف و آزمون یکنواختی واریانس با آزمون لوون، ابتدا آنالیز واریانس یک‌طرفه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد و میانگین ویژگی‌های مورد مطالعه با شاهد با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ ($P<0.05$) مقایسه شد. برای اطلاع از اثرات اصلی و اثرات متقابل فاکتورهای مورد مطالعه، آنالیز واریانس مرکب انجام شد (در این مرحله نتایج کرت‌های شاهد دخالت داده نشد). به‌منظور بررسی اثر سال، برش دهی اثر متقابل نوع بیوچار و مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار در هر سال انجام شد. در صورت معنی‌دار بودن آن، برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر، برش دهی اثر متقابل مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار در هر نوع از بیوچارهای مورد مطالعه انجام شد (سلطانی، ۱۳۹۲). مقایسه میانگین‌ها در سطح نوع بیوچار برای سال اول و دوم انجام شد. میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ ($P<0.05$) مورد مقایسه قرار گرفتند. تجزیه واریانس داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS 9.1 و Statistix 9 انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم شنی بود و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، در جدول شماره ۱ آورده شده است. برای آبیاری کرت‌های آزمایشی از آب چاه استفاده شد که برخی از ویژگی‌های آن در جدول ۲ آورده شده است. خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم شنی و غیر شور بوده (فائو، ۱۹۹۸) و در زمره خاک‌های آهکی قرار می‌گیرد (دویکر و همکاران، ۲۰۰۱).

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

کلاس بافت خاک	رس	سیلت	شن	K	P	N	$CaCO_3$	ماده آلی	EC	pH	جرم مخصوص ظاهری	عمق نمونه‌برداری
	(%)			(mg kg^{-1})			(%)	(%)	(dS m^{-1})	-	(g cm^{-3})	(cm)
لوم شنی	۱۳	۳۰	۵۷	۵۴۷	۱۸	۰/۰۵	۱۳/۵	۱/۱۷	۱/۶	۷/۸۵	۱/۲۷	۰-۱۵

جدول ۲- برخی از مشخصات آب مورد استفاده برای آبیاری

SAR	HCO_3^- (mg L^{-1})	Na^+ (mg L^{-1})	Mg^{2+} (mg L^{-1})	Ca^{2+} (mg L^{-1})	SO_4^{2-} (mg L^{-1})	CL^- (mg L^{-1})	pH	EC (µS cm^{-1})
۱/۱۲	۲/۵	۴۰/۹	۳۰/۲	۵۰	۹۸/۴	۱۰۶/۵	۷/۴۳	۲۷۶

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچارها

برخی از ویژگی‌های بیوچارهای مورد مطالعه در جدول ۳ و ۴ آورده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که در اندازه ذرات بیوچارهای مورد مطالعه، کمترین جرم مخصوص ظاهری بیوچار (۰/۱۱ $gr\ cm^{-3}$) در اندازه ذرات ۰/۵ mm – ۰ مشاهده شد (جدول ۳). در هر نوع بیوچار، با افزایش اندازه ذرات، میزان جرم مخصوص ظاهری بیوچار افزایش یافت. پایین بودن میزان جرم مخصوص ظاهری بیوچار با زیاد بودن میزان تخلخل آن ارتباط دارد. گرما کافت مواد علفی مانند کاه گندم که مقادیر بالایی همی سلولز دارند، در دماهای پایین (۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) مقدار زیادی تخلخل ایجاد می‌نماید ولی در مواد سرشار از لیگنین مانند چوب زردآلو، پایین بودن دمای گرما کافت موجب ایجاد تخلخل زیاد در بیوچار تولیدی نمی‌شود (وبر و گیوکر، ۲۰۱۸).

جدول ۳- جرم مخصوص ظاهری بیوچارها در اندازه ذرات مورد مطالعه

اندازه ذرات (mm)	بیوچار گندم			بیوچار ورمی کمپوست			بیوچار چوب زردآلو		
	<۰/۵	۰/۵-۱	۱-۲	<۰/۵	۰/۵-۱	۱-۲	<۰/۵	۰/۵-۱	۱-۲
جرم مخصوص ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۶۰	۰/۷۴	۰/۷۸

مقدار pH بیوچار یکی از ویژگی‌های بسیار مهم بیوچار هست که در کاربرد این ماده در زمین‌های کشاورزی باید مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق میزان pH بیوچارهای تهیه شده از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو بیشتر از هفت بود. pH بیوچار تهیه شده از ورمی کمپوست به مقدار ۹/۶۷ رسید که از pH بیوچار چوب زردآلو و pH کاه گندم به ترتیب ۱۹/۰۸ و ۴/۹ درصد بیشتر بود. افزایش pH بیوچار با تجزیه گروه‌های عاملی اسیدی موجود در مواد اولیه مانند کربوکسیل، هیدروکسیل و فرمیل[۳] در طول فرایند گرما کافت و وجود کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی موجود در خاکستر بیوچار ارتباط دارد (وبر و گیوکر، ۲۰۱۸). همان‌طور که در جدول ۴ آورده شده است، میزان pH بیوچار ورمی کمپوست و نیز میزان یون‌های فلزات قلیایی مانند سدیم و پتاسیم و یون‌های قلیایی خاکی مانند کلسیم در خاکستر این بیوچار، در مقایسه با دو بیوچار دیگر، بیشتر است. این مشاهده با نتایج گزارش‌شده در این تحقیق، میزان pH بیوچار کاه گندم (pH= ۹/۲۲) ۱۳/۵ درصد بیشتر از pH بیوچار چوب زردآلو (pH= ۸/۲۲) است؛ که با نتیجه گزارش‌شده آلبیورکیورکیو و همکاران (۲۰۱۴) یکسان است. ایشان گزارش کردند که pH بیوچار تهیه شده از مواد حاصل از هرس درختان زیتون، بیشتر از کاه گندم (با دمای گرما کافت ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد) بود ولی pH کاه گندم از pH بیوچارهای تهیه شده از پوسته میوه بادام، تراشه درخت کاج و زیتون سنگی[۴] بیشتر بود. اضافه کردن بیوچار با pH بالا به خاک‌های آهکی می‌تواند جذب عناصر ریزمغذی مانند آهن، منگنز و روی را با مشکلات جدی روبرو سازد (کریمی و همکاران، ۲۰۲۰).

هدایت الکتریکی بیوچار چوب زردآلو (۰/۱۸) بسیار کمتر از هدایت الکتریکی بیوچارهای کاه گندم (۲/۱۵) و ورمی کمپوست (۱/۹۳) بود. این یافته ما با نتایج گزارش شده راندولف و همکاران (۲۰۱۷) یکسان است. ایشان پیشنهاد کردند که بیوچارهای تهیه شده در دمای پایین به دلیل داشتن شوری کمتر، برای افزودن به خاک‌های مناطق خشک مناسب‌تر هستند.

یکی از اهداف تولید بیوچار، تولید مواد با میزان کربن بالا است که این امر به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد خام مورد استفاده برای تولید بیوچار، بستگی دارد (لهمان و همکاران، ۲۰۰۶). بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که میزان کربن آلی بیوچار بسته به نوع مواد

[۳] -Formyle

[۴] -Olive stone

اولیه بین ۲۹/۵ تا ۸۵/۶ درصد وزنی متغیر است (تان و همکاران، ۲۰۱۷). در این تحقیق، میزان کربن آلی در بیوچارهای مورد مطالعه ۴۵/۳ تا ۵۱/۶ درصد وزنی بود که با مطالعات قبلی مطابقت داشت (جدول ۴). تان و همکاران (۲۰۱۷) نتیجه‌گیری کردند که اگر مواد با لیگنین بالا در دمای کم (۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) گرما کافت شوند، بیوچار حاصل‌شده میزان کربن بالایی خواهد داشت. در این تحقیق میزان کربن آلی بیوچار چوب زردآلو ۵۱/۶٪ بود که از میزان کربن آلی بیوچارهای کاه گندم و ورمی کمپوست به ترتیب ۵/۲۳٪ و ۱۲/۲٪ بیشتر بود. البته نتایج تحقیق آلبیورکیورکیو و همکاران (۲۰۱۴) نشان داده است که مقدار کربن آلی بیوچار تهیه شده به نوع درخت نیز بستگی دارد.

جدول ۴- مشخصات بیوچارهای مورد استفاده در این آزمایش

ویژگی‌ها	واحد	بیوچار گندم	بیوچار ورمی کمپوست	بیوچار چوب زردآلو
جرم مخصوص حقیقی	($gr\ cm^{-3}$)	۱/۰۹۹	۱/۲۱۴	۱/۱۱۵
pH (1:20)	-	۹/۲۲	۹/۶۷	۸/۱۲
EC (1:20)	($dS\ m^{-1}$)	۲/۱۵	۱/۹۳	۰/۱۸
خاکستر	(%)	۱۵/۶	۳۸/۹	۵/۲
رطوبت	(%)	۳/۱۶	۱/۲	۲/۵۷
کربن آلی (C)	(%)	۴۸/۹	۴۵/۳	۵۱/۶
نیتروژن کل	(%)	۰/۶۳	۰/۶	۰/۷۱
هیدروژن (H)	(%)	۳/۱۹	۳/۲۶	۳/۵۴
کلسیم	($g\ kg^{-1}$)	۴/۸	۹/۸	۴
فسفر	($g\ kg^{-1}$)	۱/۴	۶/۶	۰/۶
پتاسیم	($g\ kg^{-1}$)	۱۲/۵	۲۳/۷	۸/۹
منیزیم	($g\ kg^{-1}$)	۰/۶	۱/۳	۰/۶
سدیم	($g\ kg^{-1}$)	۴/۲	۵/۳	۱/۹
H/C	($mol\ mol^{-1}$)	۰/۷۸۳	۰/۸۶۴	۰/۸۲۱

عملکرد دانه و کارایی مصرف آب گندم

اضافه کردن بیوچارهای کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو در مقادیر و اندازه ذرات مورد مطالعه به خاک لوم شنی، عملکرد و کارآیی مصرف آب گندم را به‌صورت معنی‌داری ($P<0.01$) تحت تأثیر قرار داد (جدول ۵).

جدول ۵- تجزیه واریانس یک‌طرفه عملکرد و کارآیی مصرف آب

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد ($Kg\ ha^{-1}$)	کارآیی مصرف آب ($Kg\ m^{-3}$)
		میانگین مربعات	
بلوک	۲	۱۰۴۱۲۲	۰/۰۰۹۹۳
تیمار	۲۷	۱۳۱۱۶۳۳**	۰/۱۲۵۱۷**
خطا	۵۴	۱۱۲۹۳۱	۰/۰۱۰۷۸
ضریب تغییرات	-	۶/۶۵	۶/۶۶

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪($P<0.01$)

نتایج نشان داد که در تمام تیمارهای بیوچار ورمی کمپوست عملکرد در مقایسه با شاهد افزایش یافت. در بیوچارهای کاه گندم و هیزم زردآلو افزایش معنی‌دار عملکرد و کارآیی مصرف آب در مقایسه با تیمار شاهد، به مقدار و اندازه ذرات بیوچار بستگی داشت. در کمترین مقدار آن بیوچارها (۰/۵٪) با اندازه ذرات درشت (mm ۲-۱)، افزایش معنی‌دار عملکرد و کارایی مصرف آب در مقایسه با تیمار شاهد را سبب نشدند، درحالی‌که در همان مقدار از بیوچارهای کاه گندم و چوب زردآلو، با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات بیوچار، افزایش عملکرد و کارآیی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد اتفاق افتاد. چنین می‌توان نتیجه گرفت که با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات بیوچار، به

دلیل افزایش سطح ویژه و نیز افزایش قدرت نگهداشت آب، می‌توان انتظار داشت که مقادیر کمتر بیوچار (۰/۵٪) با اندازه ذرات کوچک (۰/۵> میلی‌متر) همانند مقادیر زیاد بیوچار (۱/۵٪ و ۳٪) موجب افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب شود (لی‌یااو و توماس (۲۰۱۹)).

تجزیه واریانس مرکب میزان عملکرد و کارایی مصرف آب نشان داد که با تغییر نوع، مقدار، اندازه ذرات بیوچار و زمان و نیز اثرات متقابل مرتبه اول، مرتبه دوم (به‌جز اثر سال در مقدار بیوچار) و مرتبه سوم فاکتورهای مورد مطالعه بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم معنی‌دار بود (جدول ۶).

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد و کارایی مصرف آب گندم

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب ($kg\ m^{-3}$)
		میانگین مربعات	
سال(year)	۱	۶۲۹۴۱۷۰۶/۶۹**	۵/۹۹۷۳۳۸۸۹**
بلوک (سال)	۴	۱۱۳۶۸۶/۶۵^{ns}	۰/۰۱۱۳۱۶۰۵^{ns}
نوع بیوچار (BT)	۲	۵۳۹۱۸۳۵/۷۸**	۰/۵۱۱۳۵۶۱۷**
مقدار بیوچار (BR)	۲	۴۱۴۰۶۵۷/۰۴**	۰/۳۹۵۲۱۱۷۳**
اندازه ذرات بیوچار (BS)	۲	۶۴۵۴۹۲/۶۲**	۰/۰۶۳۰۰۰۶۲**
BT×BR	۴	۱۱۸۴۱۹۳/۱۱**	۰/۱۱۲۸۱۷۲۸**
BT×BS	۴	۵۹۵۸۸۱/۲۱**	۰/۰۵۵۴۵۸۹۵**
BR×BS	۴	۱۲۶۲۰۵۷/۵۸**	۰/۱۱۸۸۶۴۵۱**
BT×BR×BS	۸	۴۷۲۰۱۴/۰۹**	۰/۰۴۵۰۳۱۱۷**
year×BT	۲	۱۳۹۸۸۳/۰۴^{ns}	۰/۰۱۳۳۱۲۹۶^{ns}
year×BR	۲	۵۴۹۷۳۶/۹۷**	۰/۰۵۲۵۷۲۲۲**
year×BS	۲	۶۱۹۱۵۸/۵۴**	۰/۰۶۱۳۶۸۵۲**
year×BT×BR	۴	۳۱۰۴۸۰/۶۸*	۰/۰۲۹۶۹۶۳*
year×BT×BS	۴	۱۲۹۶۳۵۳/۱۷**	۰/۱۲۵۴۲۸۷**
year×BR×BS	۴	۳۸۵۴۲۷/۸۸**	۰/۰۳۶۰۷۶۸۵**
year×BT ×BR×BS	۸	۴۱۰۴۰۰/۷**	۰/۰۳۹۲۳۷۰۴**
خطا	۱۰۴	۹۶۸۴۸	۰/۰۰۹۲۶۴۱۳
ضریب تغییرات	-	۶/۶۹	۶/۹۸

** و :*معنی‌دار در سطح احتمال به ترتیب ۱٪ (P<0.01) و ۵٪ (P<0.05) ، ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪(P<0.05)

چنانچه نتایج نشان داد، اثر بیوچار بر ویژگی‌های مورد مطالعه به زمان سپری شده از افزودن بیوچار به خاک بستگی دارد. با گذر زمان (در سال دوم)، عملکرد گندم و کارآیی مصرف آب افزایش یافت (جدول ۷)؛ اما نتایج نشان داد که اثر بیوچارهای مورد مطالعه به مقدار و اندازه ذرات بیوچار بستگی داشت. در سال اول، اثر مقدار بیوچار و اندازه ذرات بیوچار چوب زردآلو عملکرد و کارایی مصرف آب را به‌صورت معنی‌دار تغییر نداد و در سال دوم آن اثر معنی‌دار بود (جدول ۸). این در حالی بود که اثر مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچارهای کاه گندم و ورمی کمپوست در سال اول، عملکرد و کارآیی مصرف آب را به‌صورت معنی‌داری (P<0.01) تغییر داد و آن اثر، در سال دوم نیز وجود داشت (جدول ۸). دلیل آن ریشه در زمان طولانی موردنیاز برای تأثیر متقابل مخلوط خاک و بیوچار دارد. ولی برخی از اثرات بر ویژگیهایی مانند خاکدانه سازی و اصلاح ساختمان خاک نیاز به زمان بیشتری دارد. این در حالی است که اثر بیوچار بر برخی از ویژگی‌های خاک مانند کاهش جرم مخصوص ظاهری بلافاصله بعد از اضافه کردن بیوچار به خاک بروز می‌نماید. به نظر می‌رسد که یکی از دلایل افزایش عملکرد در سال دوم (به‌ویژه در تیمارهای بیوچار چوب زردآلو) بهبود شرایط فیزیکی خاک مانند ساختمان خاک بوده باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

جدول ۷- تجزیه واریانس اثر متقابل نوع بیوچار در مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار در هر سال بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در هر سال

سال	عملکرد ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب ($kg\ m^{-3}$)
	میانگین مربعات	میانگین مربعات
اول	۷۹۹۳۳۷**	۰/۰۷۶۱۵۱**
دوم	۱۱۳۰۲۵۸**	۰/۱۰۷۷۴۰**

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ($P<0.01$)

جدول ۸- اثر متقابل نوع بیوچار در مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار بر عملکرد گندم در سطح نوع بیوچار در سال اول و دوم

نوع بیوچار	عملکرد ($kg\ ha^{-1}$)		کارایی مصرف آب ($kg\ m^{-3}$)	
	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم
	میانگین مربعات			
بیوچار کاه گندم	۱۰۷۷۵۰۰**	۱۷۶۰۷۷۱**	۰/۱۰۳۰۷۶**	۰/۱۶۷۸۴۸**
بیوچار ورمی کمپوست	۶۰۴۱۶۶**	۹۵۰۷۴۲**	۰/۰۵۷۵۶۵**	۰/۰۹۰۹۰۹**
بیوچار چوب زردآلو	۱۳۷۱۵۷ns	۳۵۸۰۳۸**	۰/۰۱۳۰۸۴ns	۰/۳۳۹۹۵**

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ($P<0.01$)، ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ($P<0.01$)

بیوچارهای تهیه شده از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو به‌صورت یکسان عملکرد و کارآیی مصرف آب را افزایش ندادند. بیوچار کاه گندم موجب بیشترین عملکرد و کارآیی مصرف آب گندم شد و بیوچارهای ورمی کمپوست و چوب زردآلو در رتبه دوم و سوم قرار داشتند. علیرغم بیشتر بودن میزان فسفر، کلسیم، منیزیم و پتاسیم بیوچار ورمی کمپوست (جدول ۴)، این بیوچار نتوانست در سال اول بیشتر از بیوچار کاه گندم میزان عملکرد گندم را افزایش دهد (جدول ۹). یکی از دلایل آن می‌تواند بالا بودن pH بیوچار ورمی کمپوست نسبت به دو بیوچار دیگر باشد که ممکن است در خاک آهکی، مشکلاتی را برای جذب عناصر غذایی خصوصاً عناصر ریزمغذی برای گیاهان کشت‌شده به وجود آورد. دلیل دیگر آن تأثیر بیشتر بیوچار گندم در کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، مقاومت فروروی خاک و توسعه بیشتر ریشه گیاه کشت‌شده عنوان کرد (احمد و همکاران، ۲۰۱۷) که به دلیل کم بودن جرم مخصوص ظاهری آن بیوچار (اثر رقت) اتفاق می‌افتد (جدول ۲). در این تحقیق بیوچار کاه گندم، در تمام اندازه‌های مورد مطالعه، دارای کمترین جرم مخصوص ظاهری در مقایسه با بیوچار ورمی کمپوست و چوب زردآلوی با اندازه ذرات مساوی بودند (جدول ۳). در سال دوم، تفاوت معنی‌دار در افزایش عملکرد و کارآیی مصرف آب کاه گندم و ورمی کمپوست از بین رفت. به نظر می‌رسد تراکم مجدد خاک در اثر آبیاری غرقابی و تراکم خود به خودی خاک، اثر دلیل دوم کمتر شد (شیرانی و همکاران، ۱۳۸۹).

جدول ۹-مقایسه میانگین عملکرد و کارآیی مصرف در بیوچارهای مورد مطالعه

نوع بیوچار	عملکرد ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب ($kg\ m^{-3}$)	عملکرد ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب ($kg\ m^{-3}$)
	سال اول		سال دوم	
کاه گندم	۴۱۶۰/۳ A	۱/۲۸۵ A	۵۲۹۶/۱ A	۱/۶۳۵۹ A
ورمی کمپوست	۳۹۱۵/۱ B	۱/۲۰۹ B	۵۲۵۱/۱ A	۱/۶۲۱۹ A
چوب زردآلو	۳۴۸۸/۹ C	۱/۰۷۹ C	۴۷۵۷/۱ B	۱/۴۶۹۶ B

مقایسه میانگین عملکرد و کارایی مصرف آب در سطح نوع بیوچارهای مورد مطالعه به تفکیک سال نشان داد که در سال اول و دوم در تیمارهای بیوچار کاه گندم ورمی کمپوست، بیشترین عملکرد و کارایی مصرف آب در بیشترین مقدار این بیوچار (۳٪) و اندازه ذرات متوسط (۰/۵–۱ mm) مشاهده شد که با سایر سطوح مقدار و اندازه

ذرات مورد مطالعه در این نوع بیوچار تفاوت معنی‌داری داشت (شکل ۱ (الف)، (ب)، (ج) و (د)). در هر دوسال، کمترین عملکرد در مقدار کم این بیوچارها مشاهده شد و تغییر در اندازه ذرات بیوچار کاه گندم موجب تغییر معنی‌دار عملکرد و کارآیی مصرف آب در آن مقدار بیوچار نشد؛ ولی با افزایش مقدار بیوچار، غالباً عملکرد و کارآیی مصرف آب افزایش معنی‌داری یافت. علی‌رغم این‌که تحقیق ورهیژن و همکاران (۲۰۱۹) نشان داده است که ذرات کوچک‌تر بیوچار میزان نگهداشت آب در خاک را افزایش می‌دهند، ولی این امر منجر به افزایش میزان عملکرد گندم در ذرات کوچک‌تر این بیوچارها نشد. مطالعات نشان داده است که واکنش گیاهان مختلف به اندازه ذرات بیوچار می‌تواند متفاوت باشد. لیااو و توماس (۲۰۱۹) گزارش کردند که در مطالعه ایشان گیاه چچم[۵] در بیوچار با اندازه کوچک (۰/۵–۰/۰۶ میلی‌متر) بهتر رشد کرد درحالی‌که گیاه گاو پنبه[۶] در بیوچار با اندازه ذرات درشت (۵ mm–۲) رشد خوبی داشت.

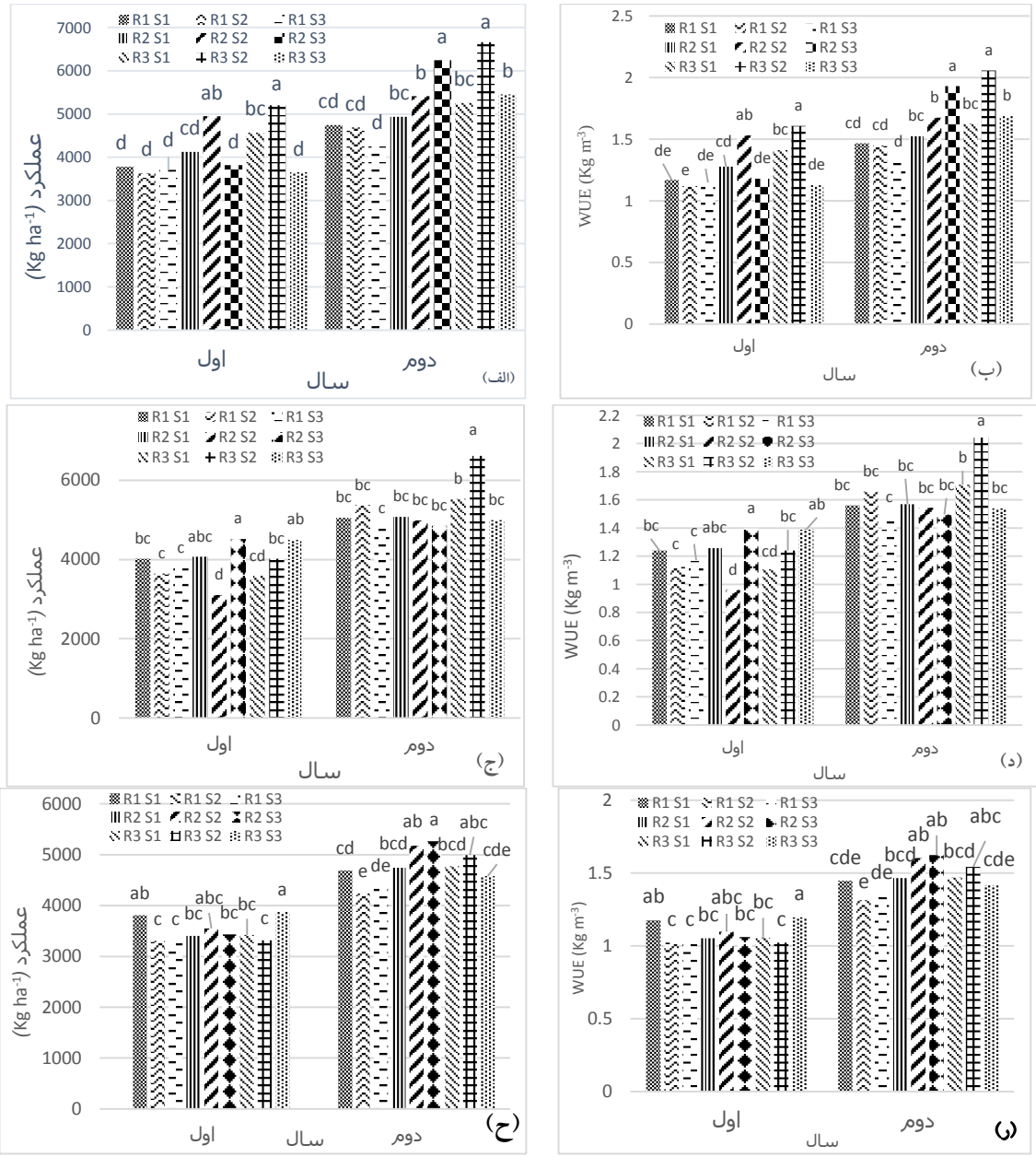
در بیوچارهای مورد مطالعه تغییر در اندازه ذرات بیوچارهای کاه گندم (شکل ۱ (الف) و (ب)) و ورمی کمپوست (شکل ۱ (ج) و (د)) صرفاً در بیشترین مقدار بیوچارهای مورد مطالعه (۳٪) موجب تفاوت معنی‌دار در عملکرد و کارآیی مصرف آب گندم شد. ولی در بیوچار چوب زردآلو در تمام مقادیر آن بیوچار تغییر در اندازه ذرات موجب تفاوت معنی‌دار عملکرد و کارآیی مصرف آب شد (شکل ۱ (ح) و (ر)). تفاوت عملکرد در مقادیر یکسان یک نوع بیوچار با اندازه ذرات متفاوت را می‌توان با ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی متفاوت یک بیوچار در اندازه ذرات متفاوت مرتبط دانست. اندازه ذرات بیوچار با سطح ویژه آن‌ها ارتباط مستقیمی دارد و با کاهش اندازه ذرات بیوچار سطح ویژه بیوچار بیشتر می‌شود که این موضوع قابلیت دسترسی آب توسط گیاه را کم می‌کند (لیااو و توماس، ۲۰۱۹). پان‌گیو و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کرده‌اند که در بین بیوچارهای تهیه‌شده از مواد مختلف، بیوچار تهیه‌شده از چوب انگور که کمترین سطح ویژه را داشت، بیشترین هدایت روزنه‌ای (کمترین تنش آبی) را در آفتابگردان کشت‌شده در شرایط تنش آبی سبب شد. بیشتر بودن عملکرد گندم آبی در ذرات متوسط (۱mm– ۰/۵ میلی‌متر) و درشت (۲ mm–۱) بیشتر از ذرات کوچک‌تر (۰/۵>) بیوچارهای مورد مطالعه با نتایج پژوهش‌های انجام‌شده مطابقت دارد.

مقایسه چندگانه میانگین عملکرد و کارآیی مصرف آب نشان داد که بیشترین عملکرد در بیوچار گندم با مقدار ۳٪ و اندازه ذرات بیوچار ۱ mm–۰/۵ مشاهده شد که تیمار ذکرشده با بیوچار گندم در مقدار ۱/۵٪ و اندازه ذرات ۲ mm–۱ و بیوچار ورمی کمپوست با مقدار ۳٪ و اندازه ذرات ۱ mm–۰/۵ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۱۰). لی یو و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه خود، نتیجه مغایری را با یافته این تحقیق گزارش کردند. در تحقیق ایشان بیوچار تهیه‌شده از کاه گندم و چوب که به مقدار ۶٪ و ۲٪ به خاک با pH قلیایی اضافه‌شده بودند، اثری بر میزان عملکرد گندم نداشتند و یا آن را کاهش دادند. در تحقیق اشاره شده، تیمارهای مورد مطالعه در خاک با pH خنثی، موجب افزایش عملکرد گندم شد. بررسی ۴۳ تحقیق انجام‌شده با موضوع اثر بیوچار روی کارایی مصرف آب توسط جائو و همکاران (۲۰۲۰) هم نشان داد که بیوچار با افزایش ۱۸/۸٪ کارایی مصرف آب (WUE)، اثر معنی‌دار مثبتی در این زمینه دارد و بافت خاک تأثیری بر اثربخشی بیوچار بر WUE نداشت، درحالی‌که pH خاک در این زمینه مؤثر بود. ایشان برای تشریح این پدیده، مکانیسم افزودن ماده قلیا به خاک قلیا را بکار برده‌اند و نتیجه‌گیری کردند که با افزایش میزان کربن موجود در بیوچار، به دلیل آزاد شدن کربن زیاد از بیوچار، میزان عملکرد و کارایی مصرف آب چندان افزایش پیدا نمی‌کند. به همین علت هم بیوچارهای تهیه‌شده از چوب در مقایسه با بیوچار تهیه‌شده از مواد علفی، WUE را کمتر افزایش می‌دهند. در این راستا، چنانچه یافته‌های این تحقیق نشان داد بیوچار تهیه

[۵]- Reygrass

[6]- Velvetleaf

شده از کاه گندم دارای کربن آلی کمتری نسبت به دو بیوچار دیگر بود (جدول ۴) و اثربخشی بیوچار کاه گندم نسبت بیوچار چوب زردآلو بر افزایش WUE بیشتر بود (جدول ۸).



شکل ۱- مقایسه عملکرد و کارآیی مصرف آب بین تیمارهای بیوچارهای کاه گندم (الف) و (ب)، ورمی کمپوست (ج) و (د) و چوب زردآلو (ح) و (ر)

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر مقدار در اندازه ذرات بیوچار بر عملکرد دانه و کارایی مصرف آب در سطح هر نوع بیوچار و نیز مقایسه میانگین اثر نوع در مقدار در اندازه ذرات بیوچار به تفکیک سال

نوع بیوچار	مقدار بیوچار	اندازه بیوچار	عملکرد ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب ($kg\ m^{-3}$)	عملکرد ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب ($kg\ m^{-3}$)
			سال اول		سال دوم	
	شاهد		۳۸۸۱/۷	۱/۲	۴۳۴۲/۷	۱/۳۸
بیوچار کاه گندم	R_1	S_1	3783.7(ns) efghi	1.17(ns) efghi	4746.3(ns) efghi	1.4667(ns) efghi
		S_2	3634.3(ns) fghij	1.12(ns) fghij	4692.7(ns) fghi	1.45(ns) fghi
		S_3	3711.7(ns) efghij	1.1467(ns) efghij	4257(ns) i	1.3133(ns) i
	R_2	S_1	4125(ns) cde	1.2767(ns) cde	4934.3(ns) cdefg	1.5233(ns) cdefg
		S_2	4950.7(*) ab	1.53(*) ab	5414.7(*) bc	1.6733(*) bc
		S_3	3816.3(ns) efghi	1.18(ns) efghi	6248(*) a	1.93(*) a
	R_3	S_1	4569.7(ns) bc	1.41(ns) bc	5255.3(*) bcde	1.6233(*) bcde
		S_2	5200.7(*) a	1.6067(*) a	6664.3(*) a	2.0567(*) a
		S_3	3651(ns) fghij	1.1267(ns) fghij	5452.7(*) bc	1.6867(*) bc
بیوچار ورمی کمپوست	R_1	S_1	4019.3(ns) efg	1.24(ns) efg	5052.7(ns) bcdefg	1.56(ns) bcdefg
		S_2	3645.7(ns) fghij	1.1233(ns) fghij	5370.7(*) bcd	1.66(*) bcd
		S_3	3784.3(ns) efghi	1.17(ns) efghi	4786(ns) efghi	1.4767(ns) efghi
	R_2	S_1	4068.7(ns) def	1.2567(ns) def	5077.3(ns) bcdefg	1.57(ns) bcdefg
		S_2	3099.7(*) k	0.96(*) k	4988(ns) bcdefg	1.5433(ns) bcdefg
		S_3	4517.7(ns) bcd	1.3967(ns) bcd	4851(ns) defgh	1.4967(ns) defgh
	R_3	S_1	3584.3(ns) ghij	1.1067(ns) ghij	5527.3(*) b	1.7067(*) b
		S_2	4019.7(ns) efg	1.24(ns) efg	6615.7(*) a	2.0433(*) a
		S_3	4497(ns) bcd	1.39(ns) bcd	4991.3(ns) bcdefg	1.54(ns) bcdefg
بیوچار چوب زردآلو	R_1	S_1	3807(ns) efghi	1.1767(ns) efghi	4688.3(ns) fghi	1.4467(ns) fghi
		S_2	3302(ns) jk	1.0233(ns) jk	4241.3(ns) i	1.3133(ns) i
		S_3	3301.7(ns) jk	1.02(ns) jk	4354.7(ns) hi	1.3433(ns) hi
	R_2	S_1	3405.3(ns) ijk	1.0533(ns) ijk	4743.7(ns) efghi	1.4667(ns) efghi
		S_2	3546.3(ns) hijk	1.0967(ns) hijk	5179.7(ns) bcdef	1.6033(ns) bcdef
		S_3	3429.7(ns) hijk	1.06(ns) hijk	5263.7(*) bcde	1.6233(*) bcde
	R_3	S_1	3419.3(ns) hijk	1.0567(ns) hijk	4770.3(ns) efghi	1.47(ns) efghi
		S_2	3317.3(ns) jk	1.0233(ns) jk	4992(ns) bcdefg	1.5433(ns) bcdefg
		S_3	3871.7(ns) efgh	1.1967(ns) efgh	4580(ns) ghi	1.4167(ns) ghi

- (*) و (ns): به ترتیب تفاوت معنی‌دار و عدم تفاوت معنی‌دار میانگین عملکرد و کارآیی مصرف آب بین تیمارها و شاهد در سطح احتمال ۵٪ ($P<0.05$).
- حروف کوچک: مقایسه چندگانه میانگین عملکرد و کارآیی مصرف آب تیمارهای مورد مطالعه برای هر سال با آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ ($P<0.05$).
- میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت آماری معنی‌داری ندارند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که ویژگی‌های بیوچار به ویژگی‌های مواد اولیه و نیز اندازه ذرات بیوچار بستگی دارد. اندازه ذرات بیوچار بر جرم مخصوص ظاهری بیوچار تأثیر داشت و با بیشتر شدن اندازه ذرات بیوچار، جرم مخصوص ظاهری بیوچار افزایش یافت. علاوه بر اندازه ذرات بیوچار، نوع بیوچار هم بر جرم مخصوص ظاهری بیوچار مؤثر بود. بیوچار تهیه شده از کاه گندم جرم مخصوص ظاهری کمتری داشت. میزان شوری و اسیدیته بیوچار تهیه شده از چوب زردآلو کمتر از دو بیوچار تهیه شده از کاه گندم و ورمی کمپوست بود درحالی‌که بیوچار چوب زردآلو دارای کربن آلی بیشتری بود. تأثیر بیوچارهای مورد مطالعه بر میزان عملکرد و کارایی مصرف آب گندم، بسته به نوع بیوچار، مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک، اندازه ذرات بیوچار و زمان متفاوت بود. در هر دو سال، بیشترین عملکرد گندم در بیوچار کاه گندم در مقادیر ۳٪ و اندازه ذرات ۱–۰/۵ میلی‌متر حاصل شد. در سال اول، در تیمارهای بیوچار چوب زردآلو میزان عملکرد و کارایی مصرف آب تفاوتی نداشتند ولی در سال دوم اثر آن‌ها بر عملکرد و کارایی مصرف معنی‌دار بود. نتایج این تحقیق نشان داد که انتخاب صحیح بیوچار، نقش مهمی در افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب گندم دارد. پیشنهاد می‌شود برای رسیدن به نتایج آگرونومیکی مطلوب، اثر اندازه ذرات بیوچار بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی برای گیاهان در شرایط مزرعه‌ای موردبررسی قرار گیرد.

فهرست منابع

۱. احمدی، ک.، عبادزاده، ح.، حاتمی، ف.، عبدشاه، ه.، و کاظمیان، آ. a ۱۳۹۹. آمار نامه کشاورزی سال ۱۳۹۸. جلد اول: محصولات زراعی. وزارت جهاد کشاورزی، ۹۷ صفحه.

۲. احمدی، ک.، عبادزاده، ح.، حاتمی، ف.، حسین‌پور، ر.، و عبدشاه، ه. b ۱۳۹۹. آمار نامه کشاورزی سال ۱۳۹۸. جلد سوم: محصولات باغی. وزارت جهاد کشاورزی، ۱۶۳ صفحه.

۳. بی‌نام. ۱۳۹۴. کاشت گندم در مناطق سرد «ویژه گندم دیم و آبی». موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، معاونت آموزش ترویج، نشر آموزش کشاورزی، ۳۹ صفحه.

۴. سلطانی، ا. ۱۳۹۲. کاربرد نرم‌افزار SAS در تجزیه‌های آماری (برای رشته‌های کشاورزی). انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه فردوسی مشهد،۱۰۰ صفحه.

۵. شیرانی، ح.، حاج عباسی، م.، افیونی، م.، و همت، ع. ۱۳۸۹. تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی و کود آلی بر مقاومت فروروی خاک تحت کشت ذرت. مجله علوم آب و خاک، ۱۴ (۵۱): ۱۴۱- ۱۵۵.

۶. ملکوتی، م.، و غیبی، م. ۱۳۷۶. تعیین حد بحرانی عناصر غذایی محصولات استراتژیک و توصیه کودی در کشور. موسسه تحقیقان خاک و آب، ۴۰ صفحه.

7. Ahmed, A., Gariepy, Y., and Raghavan, V. 2017. Influence of wood-derived biochar on the compactibility and strength of silt loam soil. International Agrophysics, 31(2): 149.
8. Alburquerque, J.A., Calero, J.M., Barrón, V., Torrent, J., Del Campillo, M C., Gallardo, A. and Villar, R. 2014. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 177(1): 16-25.
9. Ali, K., Wang, X., Riaz, M., Islam, B., Khan, Z.H., Shah, F., Munsif, F., and Haq, S.I.U. 2019. Biochar: an eco-friendly approach to improve wheat yield and associated soil properties on sustainable basis. Pakistan Journal of Botany, 51(4): 1255-1261.
10. Alizadeh, A., and Kamali, G.H. 2007. Crops water requirements in IRAN. Emam Reza University, Mashhad. 227 pp.
11. Aller, D., Bakshi, S., and Laird, D.A. 2017. Modified method for proximate analysis of biochars. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 124: 335-342.
12. Baiamonte, G., Pasquale, C.D., Marsala, V., Cimò, G., Moragues-Saitua, G.L., Arias, G.A., and Bengoetxea, G.N. 2017. Effects of biochar and wood ash on soil hydraulic properties: A field experiment involving contrasting temperate soils. Geoderma, 305:144–152.
13. Carter, M.R., and Gregorich, E.G. 2007. Soil sampling and methods of analysis. CRC press.1240 pp.
14. Dokoohaki, H., Miguez, F.E., Laird, D., and Dumortier, J. 2019. Where should we apply biochar? Environmental Research Letters, 14(4): 044005.
15. Du, Z., Xiao, Y., Qi, X., Liu, Y., Fan, X., and Li, Z. 2018. Peanut-shell biochar and biogas slurry improve soil properties in the North China Plain: a four-year field study. Scientific reports, 8(1): 1-9.
16. Duiker, S.W., Flanagan, D.C., and Lal, R. 2001. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. Catena, 45(2): 103-121.
17. FAO. 1988. Salt-affected soils and their management. FAO soils bulletin 39. Rome. Italy.
18. Gao, Y., Shao, G., Lu, J., Zhang, K., Wu, S. and Wang, Z. 2020. Effects of biochar application on crop water use efficiency depend on experimental conditions: A meta-analysis. Field Crops Research, 249: 107763.
19. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis1. Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods.

20. Gupta, M., Yang, J., and Roy, C. 2002. Density of softwood bark and softwood char: procedural calibration and measurement by water soaking and kerosene immersion method. Fuel, 81(10): 1379-1384.
21. He, X., Geng, Z., She, D., Zhang, B., and Gao, H. 2011. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 27(2): 1-7.
22. Jeffery, S., Verheijen, F., Van der Velde, M., and Bastos, A. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment, 144: 175–187.
23. Jones J.B. 1999. Soil analysis handbook of reference methods. CRC Press, 382 pp.
24. Kartika, K., Lakitan, B., Wijaya, A., Kadir, S., Widuri, L. I., Siaga, E., and Meihana, M. (2018). Effects of particle size and application rate of rice-husk biochar on chemical properties of tropical wetland soil, rice growth and yield. Australian Journal of Crop Science, 12(5): 817–826.
25. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., and Enayatizamir, N. 2020. Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 20(2): 450-459.
26. Lehmann, J., Gaunt, J., and Rondon, M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems–a review. Mitigation and adaptation strategies for global change, 11(2): 403-427.
27. Liao, W., and Thomas, S.C. 2019. Biochar particle size and post-pyrolysis mechanical processing affect soil pH, water retention capacity, and plant performance. Soil Systems, 3(1): 14.
28. Li, Z., Qi, X., Fan, X., Wu, H., Du, Z., Li, P., and Lü, M. 2015. Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(12): 119-124
29. Liu, X., Liu, M.D., Gao, Z.G. and Yang, D. 2013. Effect of different biochars on yield and yield components of wheat on different soils. Advanced Materials Research, 726: 2665-2669.
30. Lusiba, S., Odhiambo, J., and Ogola, J. 2017. Effect of biochar and phosphorus fertilizer application on soil fertility: soil physical and chemical properties. Archives of Agronomy and Soil Science, 63(4): 477-490.
31. Paneque, M., José, M., Franco-Navarro, J.D., Colmenero-Flores, J.M., and Knicker, H. 2016. Effect of biochar amendment on morphology, productivity and water relations of sunflower plants under non-irrigation conditions. Catena, 147: 280-287.
32. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A.R., and Lehmann, J. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils, 48(3): 271-284.
33. Randolph, P., Bansode, R.R., Hassan, O.A., Rehrah, D.J., Ravella, R., Reddy, M.R., Watts, D.W., Novak J.M., and Ahmedna, M. 2017. Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters. Journal of environmental management, 192: 271-280.
34. Sato, M.K., de Lima, H.V., Costa, A.N., Rodrigues, S., Pedroso, A.J.S., and de Freitas Maia, C.M.B. 2019. Biochar from Acai agroindustry waste: Study of pyrolysis conditions. Waste Management, 96: 158-167.
35. Salgado, I.R., Rodriguez, P.P., Armesto, A.G., Novoa-Munoz, J.C., Arias-Estevez M., and Fernandez-Calvino, D. 2016. Cu retention in an acid soil amended with perlite winery waste. Environmental Science and Pollution Research, 23: 3789–3798.
36. Smith, K.A. 2000. Soil and environmental analysis: physical methods, revised, and expanded. CRC Press.651 pp.
37. Tan, Z., Lin, C.S., Ji, X., and Rainey, T.J. 2017. Returning biochar to fields: A review. Applied Soil Ecology, 116: 1-11.

38. Trifunovic, B., Gonzales, H. B., Ravi, S., Sharratt, B.S., and Mohanty, S. K. 2018. Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. Land Degradation and Development, 29(4): 884-893.
39. Verheijen, F. G., Zhuravel, A., Silva, F. C., Amaro, A., Ben-Hur, M., and Keizer, J. J. 2019. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. Geoderma, 347:194-202.
40. Weber, K., and Quicker, P. 2018. Properties of biochar. Fuel, 217: 240-261.
41. Yuan, J.H., Xu, R.K., and Zhang, H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. Bioresource technology, 102(3): 3488-3497.
42. Zhang, Q., Song, Y., Wu, Z., Yan, X., Gunina, A., Kuzyakov, Y., and Xiong, Z. 2020. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. Journal of Cleaner Production, 242, 118435.

Effect of Biochar Obtained from Different Sources on Yield and Water Use Efficiency of Wheat

H. Osooli[1], A. Karimi, and H. Shirani

Graduated PhD student, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. **osoolih@gmail.com**

Assistant Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. **karimiahmad1342@yahoo.com**

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Vali–e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. **shirani@vru.ac.ir**

Received: July 2021, and Accepted: November 2021

Abstract

The use of organic waste in the form of biochar in order to ameliorate soil is a novel approach in the management of organic waste. In previous studies, researchers mostly focused on the amount of biochar that was added to the soil. However, the aim of this study was to investigate the characteristics of biochars prepared from different feedstock (wheat straw, vermicompost and apricot firewood) and the interaction effects of amounts and particle sizes of biochars on yield and water use efficiency (WUE) of winter wheat. In a factorial experiment with a randomized complete block design with three replications, the effects of these three biochars in the amount of 0.5% (R_1), 1.5% (R_2) and 3% (R_3) with a particle size of ≤0.5 (S_1), 0.5-1 (S_2) and 1-2 (S_3) mm were evaluated in two consecutive cropping years. The studied biochar were added to the soil only in the first year to a depth of 0-15 cm. A control plot was considered in each replication. The interactions of experimental factors (except interaction effect of year and biochar amount) on yield and WUE were significant. Comparison of average yield and WUE in each type of biochar showed that, in the first and second year, wheat straw biochar treatment of R_3 S_2 had the highest yield (5,200 kg ha^{-1} and 6664.3 kg ha^{-1}, respectively) and WUE (1.6 kg m^{-3} and 2.1 kg m^{-3}, respectively). In the first year, in vermicompost biochar treatments, the highest yield (4517.7 kg ha^{-1}) and WUE (1.4 kg m^{-3}) were observed in the R_2 S_3. In the same year, in apricot wood biochar, treatment R_3 S_3 had the highest yield (3871.7 kg ha^{-1}) and WUE (1.2 kg m^{-3}). In the second year, in vermicompost treatments, the highest yield (6615.7 kg ha^{-1}) and WUE (2.04 kg m^{-3}) was observed in the R_3 S_2 and, in the same year, in apricot wood biochar treatments, the highest yield (5263.7 kg ha^{-1}) and WUE (1.6 kg m^{-3}) was observed in the R_2 S_3. The highest yield and WUE (in the two years) was observed in wheat straw biochar with the R_3 S_2. These results showed that in addition to the type of biochar, the interaction of the amount and size of biochar particles had a decisive effect on increasing the yield and water use efficiency of wheat.

Keywords: Amount and size of biochar, Calcareous soil, Organic waste, Vermicompost

[1] –Corresponding author: Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.