

مقایسه آثار بیوچار (Biochar) حاصل از کود گاوی و بقایای نیشکر بر ضرایب رطوبتی خاک لوم شنی

فاطمه عیسوند رجیبی^{۱*}، احمد کریمی^۲، حمیدرضا متقیان^۳ و جهانگرد محمدی^۴

چکیده

بیوچار از جمله ترکیبات آلی پایدار است که امروزه از آن، برای اصلاح ویژگی‌های فیزیکی خاک استفاده می‌شود. این پژوهش به منظور مقایسه آثار دو نوع بیوچار حاصل از کود گاوی و بقایای نیشکر بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی خاک با بافت لوم شنی انجام شد. آزمایش‌ها در وضعیت گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور نوع بیوچار (کود گاوی و بقایای نیشکر) در دو سطح و فاکتور مقدار کاربرد در پنج سطح (صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی) در سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که اثر بیوچارهای مصرفی بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی خاک شامل ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، آب قابل استفاده گیاه و ظرفیت نگهداری نسبی معنی‌دار ($p < 0/01$) بود. کاربرد ۲ درصد وزنی بیوچار در هر دو نوع بیوچار نسبت به تیمار شاهد، بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی در خاک لوم شنی داشت. اما به علت نبود اختلاف معنی‌دار بین سطح مصرفی ۱/۵ و ۲ درصد، می‌توان سطح ۱/۵ درصد را به عنوان سطح مصرفی بهینه و اقتصادی معرفی کرد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از بیوچارها به عنوان یک اصلاح‌کننده در خاک‌های سبک بافت که ظرفیت نگهداری آب کمی دارند، روش مناسبی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، آب قابل استفاده گیاه

ارجاع: عیسوند رجیبی ف. کریمی ا. متقیان ح. ر. و محمدی ج. ۱۳۹۹. مقایسه آثار بیوچار (Biochar) حاصل از کود گاوی و بقایای نیشکر بر ضرایب رطوبتی خاک لوم شنی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۱۷۱-۱۷۸.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

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

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

۴- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: fatmeh.rajabi97@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳

مقدمه

بافت‌های متوسط و رسی افزایش پیدا کرد (لیم و همکاران، ۲۰۱۵). نسیمی (۱۳۹۷) در آزمایشی گلخانه‌ای، اثر بیوجار حاصل از برگ خرما را در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در خاک لوم رسی شنی بررسی کرد. بیوجار در چهار سطح صفر، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی به خاک افزوده شد. نتایج وی نشان داد کاربرد ۰/۵ درصد وزنی بیوجار ۳۹/۴ درصد کاهش و تیمار ۱ و ۲ درصد آن به ترتیب باعث افزایش ۲۹/۴ و ۴۱/۴ درصد در هدایت هیدرولیکی اشباع، همچنین سبب افزایش ۱۰/۳، ۹/۲ و ۸/۴ درصدی رطوبت ظرفیت زراعی و به ترتیب سبب افزایش ۱۰/۶، ۹/۷ و ۳/۵ درصدی آب قابل استفاده گیاه شدند. اما آثار اصلاحی بیوجار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، علاوه بر وضعیت پیرولیز، به نوع ماده آلی اولیه، نوع خاک و میزان مصرف بیوجار نیز بستگی دارد (بارنز و همکاران، ۲۰۱۴). از آنجایی که در بیشتر از ۶۰ درصد زمین‌های کشاورزی ایران میزان ماده آلی کمتر از ۱ درصد است (شهبازی و بشارتی، ۱۳۹۲)، می‌توان از کودهای آلی مانند کودهای ضایعات کشاورزی و کودهای دامی استفاده کرد. لذا استفاده از بیوجار، به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک، موجب بهبود مدیریت ضایعات حیوانی و گسترش کشاورزی ارگانیک و کاهش آلودگی جوی حاصل از کودهای شیمیایی و استفاده سنتی از بقایا (سوزاندن یا دفن باقیمانده کشاورزی) می‌شود؛ بر این اساس این پژوهش با هدف، بررسی و مقایسه آثار بیوجارهای حاصل از کود گاوی و بقایای نیشکر بر هدایت هیدرولیکی و ضرایب رطوبتی خاک لوم شنی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت گلخانه‌ای در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد در سال ۹۶ انجام شد. برای انجام این پژوهش خاک از چلوان سامان، در شهرستان شهرکرد، از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۴ میلی‌متری برای پر کردن گلدان‌ها و بخشی از نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متری برای تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی عبور داده شدند که برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

اهمیت مواد آلی در اصلاح ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند تخلخل، هدایت هیدرولیکی، ساختمان و نگهداری رطوبت به خوبی شناخته شده است (گلدبرگر، ۲۰۰۸). در کشورهای پیشرفته، در زمینه کشاورزی پایدار، به دلیل توجه زیاد به مسئله تثبیت کربن در خاک و نقش آن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به تولید اصلاح‌کننده‌های خاک کارآمد و در عین حال با کمترین آسیب به محیط‌زیست توجه زیادی شده است. در سال‌های اخیر از بیوجار (زغال زیستی) به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و به‌عنوان روشی برای ترسیب کربن در خاک‌های کشاورزی استفاده شده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ اتول و همکاران، ۲۰۱۸). در واقع بیوجار نام یک ترکیب آلی پایدار غنی از کربن است که از طریق تجزیه گرمایی هر نوع زیست توده، در شرایط حضور جزئی اکسیژن، که در اصطلاح پیرولیز گفته می‌شود، به‌دست می‌آید (پندی و همکاران، ۲۰۲۰). علی‌رغم اهمیت ویژگی‌های فیزیکی خاک در افزایش تولید و کیفیت خاک، به بررسی آثار بیوجار بر این ویژگی‌ها در مقایسه با خصوصیات شیمیایی توجه کمتری شده است. گلاب و همکاران (۲۰۱۶) در آزمایشی گلخانه‌ای با افزودن مقدار ۴ درصد وزنی بیوجار تولید شده از ساقه گندم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به خاکی شنی، به ترتیب افزایش ۵۹/۶، ۲۷ و ۶۵/۶ درصدی رطوبت در حد ظرفیت زراعی، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم و آب قابل استفاده گیاه را گزارش کردند. طبق پژوهش‌های انجام شده، اثر بیوجار بر افزایش ظرفیت نگهداری نسبی رطوبت در خاک‌های شنی نسبت به خاک‌های لومی و رسی بیشتر است (گاسکین و همکاران، ۲۰۰۸). از طرفی خاک‌های شنی معمولاً هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) بالایی دارند که باعث نفوذ و زهکشی سریع آب می‌شود (ابل و همکاران، ۲۰۱۳)؛ که این ویژگی به لحاظ کاهش رواناب سطحی مفید است؛ ولی به لحاظ آبخوبی عناصر غذایی یک عیب تلقی می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۱۳). برای بررسی اثر بیوجار بر K_{sat} ، چهار نوع متفاوت بیوجار شامل گلوله‌های چوبی، تراشه چوب کاج، تراشه چوب سخت و پوسته جو دو سر با سطوح مختلف (۰، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) به چهار نوع خاک (شن درشت، شن ریز، لوم و رس) گزارش کردند که در K_{sat} در بافت‌های شنی بطور معنی‌داری کاهش و در

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

OC	CCE	EC	pH	Texture	Clay	Silt	Sand	K _s	θ _{FC}	θ _{pwp}	pb
درصد	دسی‌زیمنس بر متر	-	-	-	درصد	درصد	درصد	سانتی‌متر بر ساعت	درصد وزنی	درصد وزنی	گرم بر سانتی‌مترمکعب
۰/۸۹	۵	۰/۷۱۸	۷/۶	S.L	۱۸	۲۷	۵۵	۰/۸۶	۲۳/۲	۱۵	۱/۷۶

CCE: کلسیم کرنات معادل

سپس لوله‌ها را در یک کوره الکتریکی تهویه‌دار (مدل PC-12 ATRA) در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد و مدت حرارت‌دهی سه ساعت قرار داده شدند تا فرآیند گرماکافت انجام شود. برخی خصوصیات کود گاوی، بقایای نیشکر و بیوچارهای حاصل شده مورد استفاده در آزمایش در جدول ۲ آورده شده است.

برای تهیه دو نوع بیوچار، از کود گاوی و بقایای نیشکر به طور جداگانه استفاده شد. کود گاوی از مزرعه دامپروری دانشکده کشاورزی و بقایای نیشکر از کشت و صنعت کارون واقع در استان خوزستان فراهم شد. نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن و خرد کردن در لوله‌های فلزی کاملاً مسدود و صرفاً یک سوراخ به قطر حدود ۱ میلی‌متر برای خروج گاز حاصل از فرآیند پیرولیز در آن‌ها تعبیه شد.

جدول ۲- برخی خصوصیات کود گاوی، بقایای نیشکر و بیوچارهای حاصل شده مورد استفاده در آزمایش

بازده	مقدار خاکستر	C:N	N	C	EC	pH	نوع ماده
درصد	-	-	درصد	دسی‌زیمنس بر متر	-	-	
-	۶۲/۶۹	۳۵/۰	۱/۹۲	۶۷/۳۰	۸/۲	۷/۵	کود گاوی
-	۲۴/۱۷	۲۸/۴	۱/۲۶	۳۵/۸۱	۵/۰	۶/۵	بقایای نیشکر
۳۵	۵۸/۲	۲۳/۷	۲/۲	۵۲/۳	۹/۱	۸/۸	بیوچار گاوی
۶۵	۴۵/۱	۲۲/۷	۱/۳۰	۲۹/۵۶	۱۲/۶	۸/۶	بیوچار نیشکر

در مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال (Kpa) به ترتیب در نقطه FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحه فشاری (دن و هاپمن، ۲۰۰۲)، ظرفیت نگهداری نسبی (θ_{FC}) به روش رینولدز و همکاران (۲۰۰۹)، بافت خاک به روش هیدرومتری (جی و بادر، ۱۹۸۶)، پهاش و قابلیت هدایت الکتریکی به روش توماس (۱۹۹۶)، ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (نلسون و سامرز، ۱۹۹۶)، درصد کرنات کلسیم معادل با روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک یک نرمال و تیتراسیون اسید اضافی با هیدروکسید سدیم (لوپیرت و اسپارکس، ۱۹۹۶) و برخی ویژگی‌های بیوچار شامل pH، هدایت الکتریکی، کربن، نیتروژن، مقدار خاکستر و درصد بازده بیوچارها براساس معادله (۱)، اندازه‌گیری شد (سینگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ سونگ و جنو، ۲۰۱۲).

$$B = \frac{E}{M} \times 100 \quad (1)$$

که در آن E وزن بیوچار تولیدی (گرم)، M وزن خشک ماده خام (گرم) و B درصد بازده بیوچار است.

پس از انکوباسون ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، رطوبت ظرفیت زراعی (θ_{FC})، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (θ_{pwp})، رطوبت قابل

بیوچارهای تولیدی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و در تیمارهای آزمایش (سطح شاهد (N₀))، سطوح بیوچار کود گاوی (B₁, B₂, B₃ و B₄) و سطوح بیوچار حاصل از نیشکر (M₁, M₂, M₃ و M₄) بیان‌کننده سطوح بیوچار اعمال شده به ترتیب در سطح صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی است مورد استفاده قرار گرفتند. در این پژوهش با توجه به تعداد تیمارهای آزمایش از ۲۷ گلدان پلاستیکی ۳ کیلوگرمی استفاده شد. در کف گلدان‌ها سوراخ‌هایی برای زهکشی ایجاد و فیلتر شنی (با دانه‌بندی ۲ تا ۴ میلی‌متر) به ضخامت ۲ سانتی‌متر در کف گلدان قرار داده شد. بیوچار کود گاوی و بقایای نیشکر به نسبت وزنی تیمارهای آزمایش (صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد) به صورت دستی و به طور یکنواخت با ۳ کیلوگرم خاک عبور داد شده از الک ۴ میلی‌متری مخلوط و گلدان‌ها در گلخانه به مدت ۶۰ روز در دمای میانگین روزانه ۳۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. در طول دوره آزمایش، آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰ درصد رطوبت قابل استفاده گیاه، انجام شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده قبل از انکوباسون شامل هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (کلوت و دیرکسن، ۱۹۸۶)، رطوبت

در جدول ۳ نشان شده است. نتایج نشان داد که اثر بیوچارهای مصرفی بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی خاک شامل ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، آب قابل استفاده گیاه و ظرفیت نگهداری نسبی معنی دار ($p < 0.01$) بود.

اثر بیوچارکود گاوی و بقایای نیشکر بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که اثر بیوچارهای مصرفی بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک اختلاف معنی‌داری ($p < 0.01$) دارد. طبق جدول ۴ در سطوح تیمارهای B_1 ، B_2 ، B_3 و B_4 مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع به ترتیب ۹/۴۱، ۱۸/۸۲، ۲۰ و ۲۷/۰۵ درصد و تحت تأثیر سطوح M_1 ، M_2 ، M_3 و M_4 مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع به ترتیب ۱۱/۷۶، ۲۲/۳۵، ۲۰ و ۲۹/۴۱ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش پیدا کرد. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی ($1/10 \text{ cm h}^{-1}$) در تیمار ۲ درصد وزنی بیوچار نیشکر (M_4) و کمترین مقدار هدایت هیدرولیکی ($0/85 \text{ cm h}^{-1}$) در تیمار شاهد به دست آمد؛ و بنابراین در بین دو نوع بیوچار مصرفی، بیوچار حاصل از نیشکر دارای تأثیر بیشتری نسبت به بیوچار کود گاوی بود. با توجه به نتایج برخی پژوهش‌های انجام شده از جمله وانگ و همکاران (۲۰۱۴)، کاربرد بیوچار می‌تواند سبب افزایش معنی‌دار تخلخل و کاهش چگالی ظاهری خاک شود که احتمالاً به همین دلایل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز افزایش یافته است. نتایج تحقیق نامبرده نشان داد با افزایش سطوح بیوچار حاصل از پوسته برنج چگالی ظاهری کاهش می‌یابد و باعث افزایش تخلخل و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌شود. همچنین یکی دیگر از علل افزایش K_{sat} با افزودن بیوچار به خاک، این است که بیوچار می‌تواند باعث افزایش منافذ درشت (بزرگ‌تر از ۳۰ میکرون) شود که این منافذ بیشترین نقش را در انتقال آب دارند و افزایش آن‌ها سبب افزایش K_{sat} می‌شود که این یافته‌ها با نتایج پژوهش لیم و همکاران (۲۰۱۵) و اوینگ و همکاران، (۲۰۱۳) مطابقت دارد. یافته‌های این پژوهش در روند افزایشی هدایت هیدرولیکی اشباع با افزایش سطوح بیوچار با نتایج رزاقی و رضایی (۱۳۹۶) و نسیمی (۱۳۹۷) همخوانی دارد.

استفاده گیاه (PAWC)^۱ و ظرفیت نگهداری نسبی (R_{FC}) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع پس از نمونه‌برداری خاک توسط سیلندر، مقادیر حجم آب خارج شده با ثابت نگه‌داشتن سطح آب در دستگاه مانومتر در مدت زمان معین اندازه‌گیری و هدایت هیدرولیکی به روش بار ثابت با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد (کلوت و دیرکسن، ۱۹۸۶).

$$K = \frac{Q \times L}{A \times \Delta H} \quad (2)$$

که در آن Q حجم آب عبوری از ستون خاک در واحد زمان ($\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$)، K هدایت هیدرولیکی اشباع (cm s^{-1})، A سطح مقطع ستون خاک (cm^2)، ΔH اختلاف پتانسیل هیدرولیکی بین نقطه خروجی و سطح آب ثابت شده روی ستون خاک (cm) و L طول ستون خاک (cm) است. درصد رطوبت قابل استفاده گیاه (PAWC) از اختلاف رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت نقطه پژمردگی از معادله (۳) محاسبه شد.

$$PAWC = \theta_{FC} - \theta_{PWP} \quad (3)$$

که در آن θ_{FC} درصد وزنی رطوبت خاک در ظرفیت زراعی، θ_{PWP} درصد رطوبت در نقطه پژمردگی دائم و PAWC درصد آب قابل استفاده گیاه است.

ظرفیت نگهداری نسبی (R_{FC}) نسبت رطوبت ظرفیت زراعی به رطوبت اشباع است که با استفاده از معادله (۴) محاسبه شد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۹).

$$R_{FC} = \frac{\theta_{FC}}{\theta_S} \quad (4)$$

که در آن، θ_{FC} رطوبت ظرفیت زراعی و θ_S رطوبت اشباع خاک است که با تهیه گل اشباع اندازه‌گیری شد.

نتایج به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار Statistica10 تجزیه و تحلیل آماری شد، به این صورت که اثر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های مورد بررسی از طریق تجزیه واریانس داده‌ها (ANOVA) تعیین و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای بیوچار بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، رطوبت ظرفیت زراعی (θ_{FC})، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، رطوبت قابل استفاده گیاه (PAWC) و رطوبت ظرفیت نگهداری نسبی (R_{FC})

آثار بیوچار کود گاوی و بقایای نیشکر بر ضرایب رطوبتی خاک

نتایج حاصل از جدول ۵ نشان می‌دهد در سطوح تیمارهای B₁، B₂، B₃ و B₄ مقادیر رطوبت ظرفیت زراعی به ترتیب ۱۷/۷۱، ۲۵/۳۵، ۵۷/۷۷ و ۹۱/۲۷ درصد و ظرفیت زراعی تحت تأثیر سطوح M₁، M₂، M₃ و M₄ به ترتیب ۱۲/۰۶، ۵۲/۴۰، ۶۱/۵۸ و ۹۲/۲۳ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. بیشترین مقدار رطوبت ظرفیت زراعی (۵۰/۰۴ درصد) در تیمار ۲ درصد وزنی بیوچار نیشکر (M₄) و کم‌ترین مقدار رطوبت ظرفیت زراعی (۲۶/۰۳ درصد) در تیمار شاهد به دست آمدند. دلیل افزایش رطوبت ظرفیت زراعی را می‌توان این‌گونه توضیح داد که افزودن بیوچار به خاک، سبب متخلخل‌تر شدن خاک شده و این امر با افزایش منافذ ریز خاک باعث نگهداری بیشتر رطوبت خاک می‌شود. نتایج این پژوهش با یافته‌های تحقیقات برگیس و همکاران (۲۰۱۲) و رضایی و رضایی (۱۳۹۶) از نظر روند تغییرات همخوانی دارد.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد اثر نوع بیوچار مصرفی بر سطح معنی‌داری ($p < 0.01$) بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم خاک دارای اختلاف معنی‌داری است. نتایج حاصل از جدول ۵ نشان می‌دهد که در سطوح تیمارهای B₁، B₂، B₃ و B₄ مقادیر رطوبت نقطه پژمردگی دائم به ترتیب ۲۲/۰۶، ۳۰/۰۶، ۶۶/۷۳ و ۱۰۴/۷۳ درصد و رطوبت نقطه پژمردگی دائم تحت تأثیر سطوح M₁، M₂، M₃ و M₄ به ترتیب ۵/۳۳، ۵۹/۳۳، ۷۰/۲ و ۱۰۳ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. بیشترین مقدار رطوبت نقطه پژمردگی دائم (۳۰/۷۱ درصد) در تیمار ۲ درصد وزنی بیوچار گاوی (B₄) و کم‌ترین مقدار رطوبت نقطه پژمردگی دائم (۱۵ درصد) در تیمار شاهد (N₀) به دست آمد. رفتار رطوبتی خاک در مکش‌های ماتریک بالا تحت کنترل بافت خاک و منافذ ریز آن قرار دارد ولی در مکش‌های پایین تحت کنترل ساختمان خاک و تخلخل درشت آن می‌باشد (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج این پژوهش با نتایج نوروزی و همکاران (۱۳۹۵) در مورد افزایش ضرایب رطوبتی خاک شامل ظرفیت نگهداری رطوبت (WHC)، رطوبت ظرفیت زراعی (FC)، آب قابل استفاده گیاه (PAWC) به جزء در مورد رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) مطابقت دارد. آندرلی و همکاران (۲۰۱۶) نتیجه گرفتند که کاربرد بیوچار باعث اصلاح شرایط ساختمانی

خاک و تخلخل درشت آن شده ولی در بافت و منافذ ریز آن تغییری ایجاد نمی‌کند. به همین دلیل رطوبت در ضرایب WHC، PAWC و FC تغییرات معنی‌داری پیدا کرده ولی در وضعیت رطوبت نقطه پژمردگی دائم که تحت کنترل منافذ ریز خاک قرار دارد تغییرات معنی‌داری نداشته است. نتایج این پژوهش با یافته‌های رزاقی و رضایی (۱۳۹۶) و سلیمان و همکاران (۲۰۱۷) در افزایش رطوبت نقطه پژمردگی دائم مطابقت دارد؛ اما با نتایج نوروزی و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی ندارد.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد اثر نوع بیوچار مصرفی بر رطوبت قابل استفاده گیاه دارای اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد است. نتایج حاصل از جدول ۵ نشان می‌دهد که در سطوح تیمارهای B₁، B₂، B₃ و B₄ مقادیر رطوبت قابل استفاده گیاه به ترتیب ۱۱/۷۸، ۱۸/۲۲، ۴۵/۶۰ و ۷۲/۹۸ درصد و مقادیر رطوبت قابل استفاده گیاه تحت تأثیر سطوح M₁، M₂، M₃ و M₄ به ترتیب ۴۲/۲۱، ۹۷/۲۱، ۴۹/۷۷ و ۷۷/۵۱ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. بیشترین مقدار رطوبت قابل استفاده گیاه (۱۹/۵۸ درصد) در تیمار ۲ درصد وزنی بیوچار نیشکر (M₄) و کم‌ترین مقدار رطوبت قابل استفاده گیاه (۱۱/۰۳ درصد) در تیمار شاهد (N₀) به دست آمد. می‌توان بیان کرد افزایش ماده آلی به‌ویژه کربوهیدرات‌ها در خاک از طریق بیوچار و افزایش تخلخل خاک به سبب حجم تخلخل بالا و جرم مخصوص ظاهری بیوچار مورد استفاده، شرایط خاک برای افزایش ذخیره رطوبت در خاک را افزایش داده است. بیوچار به دلیل توانایی بالای خود در جذب مواد غذایی، می‌تواند به‌عنوان زیستگاه مناسب برای رشد و فعالیت ریزموجودات خاکری محسوب شود (خیرفام و همکاران، ۲۰۱۷) که هر کدام می‌تواند تأثیر به‌سزایی در جذب و نگهداشت رطوبت خاک داشته باشد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت افزودن بیوچار به یک خاک شنی، سبب بیشتر متخلخل شدن خاک می‌گردد. اثر تیمارهای بیوچار بر آب قابل استفاده گیاه، نشان‌دهنده آن است که نسبت به شاهد اثر افزایشی چشمگیری دارد که این علت را می‌توان به سطح ویژه بیوچار و افزایش منافذ ریز خاک نسبت داد که نگهداری آب را افزایش می‌دهد. روند افزایش معنی‌دار آب قابل استفاده گیاه در این پژوهش با نتایج دملو کارالهو و همکاران (۲۰۱۴) و رزاقی و رضایی (۱۳۹۶) همخوانی دارد.

به دست آمد. پژوهش‌ها نشان داد که افزودن بیوجار به خاک باعث بهبود وضعیت رطوبتی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری نسبی رطوبت آن می‌شود (استرویل و همکاران، ۲۰۱۱). لذا می‌توان بیوجار را در عرصه‌های دیم برای حفظ رطوبت خاک و در اراضی کشاورزی برای کاهش دفعات و میزان آبیاری به کار برد. باسو و همکاران (۲۰۱۳) با کاربرد بیوجار در یک خاک شنی، متوجه افزایش ۲۳ درصدی ظرفیت نگهداری نسبی رطوبت در مقایسه با تیمار شاهد شدند. آنان گزارش دادند که انتخاب بیوجار مناسب و میزان صحیح کاربرد آن برای افزایش ظرفیت نگهداری نسبی رطوبت خاک از اهمیت بالایی برخوردار است.

اثر نوع بیوجار مصرفی با سطح معنی‌داری ($p < 0.01$) بر رطوبت ظرفیت نگهداری نسبی خاک دارای اختلاف معنی‌داری بود (جدول ۳). نتایج حاصل از جدول ۵ نشان داد که در سطوح تیمارهای B_1, B_2, B_3 و B_4 مقادیر رطوبت ظرفیت نگهداری نسبی به ترتیب $6/13, 25/42, 39/47$ و $52/63$ درصد و مقدار رطوبت ظرفیت نگهداری نسبی خاک تحت تأثیر سطوح M_1, M_2, M_3 و M_4 به ترتیب $11/39, 46/47, 42/10$ و $48/23$ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش پیدا کرد. بیشترین مقدار رطوبت ظرفیت نگهداری نسبی (۵۸ درصد) در تیمار ۲ درصد وزنی بیوجار گاوی (B_4) و کم‌ترین مقدار رطوبت ظرفیت نگهداری نسبی (۳۸ درصد) در تیمار شاهد (N_0)

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای بیوجار بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، رطوبت ظرفیت زراعی (θ_{FC})، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، رطوبت قابل استفاده گیاه (PAWC) و رطوبت ظرفیت نگهداری نسبی (R_{FC})

میانگین مربعات					درجه آزادی	منبع تغییر
PWP	AWC	FC	R_{FC}	K_{sat}		
۱۰۳/۱۵**	۲۶/۵۱۲**	۲۳۱/۳۳**	۱۷۲/۶۸**	۰/۰۱۸۰۲**	۸	بیوجار
۱/۰۳	۰/۹۶۶	۳/۶۵	۱۰/۰۷	۰/۰۰۱۲۸	۱۸	خطا

** معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد

جدول ۴- مقایسه میانگین تیمارهای بیوجار بر هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت)

M_4	M_3	M_2	M_1	B_4	B_3	B_2	B_1	N_0	بیوجار
^a ۱/۱۰	^b ۱/۰۲	^{ba} ۱/۰۴	^c ۰/۹۵	^{ba} ۱/۰۸	^b ۱/۰۲	^b ۱/۰۱	^c ۰/۹۳	^d ۰/۸۵	میانگین

میانگین‌هایی که حروف کوچک مشترک دارند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۵- مقایسه میانگین تیمارهای بیوجار بر درصد رطوبت در وضعیت‌های ظرفیت زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP)، آب قابل استفاده گیاه (PAWC) و ظرفیت نگهداری نسبی (R_{FC})

R_{FC}	PAWC	θ_{PWP}	θ_{FC}	تیمارهای آزمایش
^d ۳۸/۰۰	^d ۱۱/۰۳	^d ۱۵/۰۰	^e ۲۶/۰۳	N_0
^d ۴۰/۳۳	^{cd} ۱۲/۳۳	^c ۱۸/۳۱	^d ۳۰/۶۴	B_1
^{cb} ۴۷/۶۶	^c ۱۳/۰۴	^c ۱۹/۵۹	^c ۳۲/۶۳	B_2
^{ab} ۵۳/۰۰	^b ۱۶/۰۶	^b ۲۵/۰۱	^b ۴۱/۰۷	B_3
^a ۵۸/۰۰	^a ۱۹/۰۸	^a ۳۰/۷۱	^a ۴۹/۷۹	B_4
^{dc} ۴۲/۳۳	^c ۱۳/۳۷	^d ۱۵/۸۰	^{ed} ۲۹/۱۷	M_1
^a ۵۵/۶۶	^b ۱۵/۷۷	^b ۲۳/۹۰	^b ۳۹/۶۷	M_2
^a ۵۴/۰۰	^b ۱۶/۵۲	^b ۲۵/۵۳	^b ۴۲/۰۶	M_3
^a ۵۶/۳۳	^a ۱۹/۵۸	^a ۳۰/۴۵	^a ۵۰/۰۴	M_4

میانگین‌هایی که حروف کوچک مشترک دارند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

نتیجه‌گیری

دائم دارد که این امر خود، سبب افزایش آب قابل استفاده با افزودن بیوجار شد. نتایج نشان داد کاربرد ۲ درصد وزنی بیوجار در هر دو نوع بیوجار حاصل از کود گاوی و نیشکر،

نتایج این پژوهش نشان داد بیوجار اثر معنی‌داری بر رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی و در نقطه پژمردگی

علوفه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد. ۶۱ ص.

۴. نوروزی م. طباطبائی س.ح. نوری م.ر. و متقیان ح.ر. ۱۳۹۵. اثرات کوتاه مدت بیوچار حاصل از برگ خرما بر حفظ رطوبت در خاک لوم‌شنی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۶(۲): ۱۳۷-۱۵۰.

5. Abel S. Peters A. Trinks S. Schonsky H. Facklam M. and Wessolek G. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*. 202-203: 183-191.
6. Andrenelli M. C. Maienzab A. Genesio L. Miglietta F. Pellegrini S. Vaccari F. P. and Vignozzi N. 2016. Field application of pelletized biochar: Short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. *Agricultural Water Management*. 163: 190-196.
7. Barnes R. T. Gallagher M. E. Masiello C. A. Liu Z. and Dugan B. 2014. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. *PLoS one*. 9(9): 1-9.
8. Basso A. S. Miguez F. E. Laird D. A. Horton R. and Westgate M. 2013. Assessing potential of biochar for increasing water holding capacity of sandy soils. *Global Change Biology Bioenergy*. 5(2): 132-143.
9. Briggs C. Breiner J. M. and Graham R. C. 2012. Physical and chemical properties of *Pinus ponderosa* charcoal: implications for soil modification. *Soil Science*. 177: 263-268.
10. Dane J. H. and Hopmans J. W. 2002. Water retention and storage. In: Dane J. H. Topp G. C. (eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Madison Soil Science Society of America. pp: 1685-1692.
11. De Melo Carvalh 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.
12. Gaskin J. W. Steiner C. Harris K. Das K. C. and Bibens B. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of ASABE*. 51(6): 2061-2069.
13. Gee G. W. and Bauder J. W. 1986. Particle size analysis hydrometer methods. In: Sparks DL et al. (Eds). *Method of Soil Analysis*. American Society of Agronomy

نسبت به تیمار شاهد، بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، آب قابل استفاده گیاه و ظرفیت نگهداری نسبی در خاک لوم شنی دارد. همچنین تأثیر بیوچار نیشکر در مقایسه با بیوچار حاصل از کود گاوی، روی هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی و آب قابل استفاده گیاه بیشتر بود. اگرچه سطح مصرفی ۲ درصد نسبت وزنی دارای بیشترین تأثیر بود، در اکثر خصوصیات مورد بررسی، بین سطح مصرفی ۲ و ۱/۵ درصد نسبت وزنی تفاوت معنی داری مشاهده نشد؛ بنابراین می‌توان گفت برای انتخاب سطح بهینه و اقتصادی می‌توان سطح ۱/۵ درصد نسبت وزنی بیوچار را به‌عنوان سطح مصرفی بهینه معرفی کرد؛ به گونه‌ای که با توجه به صرف زمان و هزینه کم می‌توان بهترین نتیجه را گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده، به‌خصوص در خاک‌های سبک بافت که ظرفیت نگهداری آب کمی دارند و به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با مسأله کمبود منابع آب مواجه هستند، روش مناسبی است. باید در نظر داشت که افزایش سطوح بیوچار در خاک می‌تواند آثار منفی مانند افزایش شوری خاک به دنبال داشته باشد. با توجه به تأثیر مثبت بیوچار بر پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده در بافت لوم شنی، انتخاب بهینه‌ترین سطح بیوچار باید به‌گونه‌ای باشد که استفاده از آن، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد که این امر، نیاز به پژوهش‌های بیشتر به ویژه در وضعیت مزرعه دارد.

منابع

۱. رزاقی ف. و رضایی ن. ۱۳۹۶. اثر سطوح مختلف بیوچار بر خواص فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف. نشریه حفاظت و منابع آب و خاک. ۷(۱): ۷۵-۸۸.
۲. شهبازی ک. و بشارتی ح. ۱۳۹۲. بررسی اجمالی وضعیت حاصلخیزی خاک‌های کشاورزی ایران. نشریه مدیریت اراضی. ۱(۱): ۱-۱۵.
۳. نسیمی پ. ۱۳۹۷. بررسی تغییرپذیری زمانی اثرات بیوچار حاصل از برگ خرما بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک و اجزاء عملکرد ذرت

- immobilization. *Journal of Cleaner Production*. 255: 1-9.
25. Reynolds J. D. Drury C. F. Tan C. S. Fox C. A. and Yang X. M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*. 152: 252-263.
 26. Singh B. Singh B. P. and Cowie A. L. 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Aust Journal Soil Research*. 48: 516-525.
 27. Song W. and Guo M. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 94: 138-145.
 28. Streubel J. D. Collins H. P. Garcia-Perez M. Tarara J. Granatstein D. and Kruger C. E. 2011. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application. *Soil Biology and Biochemistry*. 75: 1402-1413.
 29. Suliman W. Harsh J. B. Abu-Lail N. I. Fortuna A. M. Dallmeyer I. and Garcia-Perez M. 2016. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy*. 84: 37-48.
 30. Thomas G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. In Sparks D. L. et al. (ed). *Method of Soil Analysis*. 3rd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison WI. Part 3. pp: 475-490.
 31. Wang Y. Pan F. Wang G. Zhang G. Wang Y. Chen X. and Mao Z. 2014. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions. *Scientia Horticulturae*. 175: 9-15.
 - and Soil Science Society of America Madison WI USA. part 1. pp: 383-411.
 14. Goldberger J. R. 2008. Diffusion and adoption of non-certified organic agriculture: a case study from semi-arid Makueni District. Kenya. *Journal of Sustainable Agriculture*. 32(4): 597-609.
 15. Kheirfam H. Sadeghi S. H. R. Homae M. and Zarei Darki B. 2017. Quality improvement of an erosion-prone soil through microbial enrichment. *Soil and Tillage Research*. 165: 230-238.
 16. Klute A. and Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: Klute A. (Ed). *Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison WI USA. Part 1. pp. 687-734.
 17. Li Y. Gao R. Yang R. Wei H. Li Y. Xiao H. and Wu J. 2013. Using a simple soil column method to evaluate soil phosphorus leaching risk. *Clean-Soil Air Water*. 41: 1100-1107.
 18. Lim T. J. Spokas K. A. Feyereisen G. and Novak J. M. 2015. Predicting the impact of biochar addition on soil hydraulic properties. *Chemosphere*. 142: 136-144.
 19. Liu X. Mao P. Li L. and Ma J. 2019. Impact of biochar application on yield-scaled greenhouse gas intensity: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 656: 969-976.
 20. Loeppert R. H. and Sparks D. L. 1996. Carbonate and gypsum. In: D. L. Sparks (ed) *Methods of Soil Analysis*. Part 3 chemical methods. SSSA Madison WI. pp. 437-474.
 21. Nelson D. W. and Sommers L. E. 1996. Total carbon organic carbon and organic matter. In: Sparks D. L et al. (Eds). *Method of Soil Analysis. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison WI USA. Part 3 3rd Ed. pp: 961-1010.
 22. O'Toole A. Moni C. Weldon S. Schols A. Carnol M. Bosman B. and Rasse D. P. 2018. Miscanthus biochar had limited effects on soil physical properties, microbial biomass, and grain yield in a four-year field experiment in Norway. *Agriculture*. 8(171): 1-19.
 23. Ouyang L. Wang F. Tang J. Yu L. and Zhang R. 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 13(4): 991-1002.
 24. Pandey D. Daverey A. and Arunachalam K. 2020. Biochar: production, properties and emerging role as a support for enzyme