



ISSN 2251-7480

اثر سطوح مختلف بیوجار بر خواص فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف

فاطمه رزاقی^{۱*} و ناهید رضایی^۲

^{۱*} استادیار بخش مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شیراز؛ شیراز؛ ایران

^{۲*} نویسنده مسئول مکاتبات: razzaghi@shirazu.ac.ir

۲) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شیراز؛ شیراز؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۲۸

چکیده

بیوجار زغال تهیه شده از زیست توده‌های گیاهی و حیوانی است که سوختن آن در حضور اکسیژن کم و یا عدم حضور اکسیژن انجام می‌شود. بیوجار به دلیل ساختار متخلخلی که دارد سبب بهبود شرایط فیزیکی خاک می‌شود. از این رو پژوهش حاضر به منظور بررسی کاربرد سطوح مختلف بیوجار بر برخی خواص فیزیکی و شیمیایی چهار نوع بافت خاک در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. سطوح صفر (شاهد)، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار بیوجار تولید شده از کاه و کلش گندم در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در چهار نوع خاک با بافت‌های لوم شنی، لومی، لوم رسی و رسی در ۳ تکرار و در قالب طرح کاملاً تصادفی اعمال گردید. چهل روز پس از اختلاط خاک و بیوجار و تعیین نمودن رطوبت در حد ظرفیت مزرعه‌ای، سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک (رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم، چگالی ظاهری و حقیقی، هدایت هیدرولیکی اشباع و ظرفیت تبادل کاتیونی) با نمونه‌گیری از خاک اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که کاربرد بیوجار سبب بهبود وضعیت فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف می‌گردد به نحوی که کاربرد ۷۵ تن در هکتار بیوجار سبب افزایش ۴۵، ۱۳، ۹۵ و ۵۲ درصدی آب قابل دسترس، تخلخل، هدایت هیدرولیکی و ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت به عدم کاربرد بیوجار گردید. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از بیوجار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده به‌خصوص در خاک‌های سنگین بافت که برای بهبود وضعیت زهکشی و نفوذ و همچنین در خاک‌های سبک بافت که ظرفیت نگهداری آب کمی دارند استراتژی مناسبی است.

کلید واژه‌ها: چگالی ظاهری؛ ظرفیت تبادل کاتیونی؛ ظرفیت نگهداری آب؛ هدایت هیدرولیکی اشباع

مقدمه

کشاورزان مدام در تلاش بوده‌اند تا با تأمین نیاز غذایی گیاه به‌ویژه از طریق مصرف کودهای شیمیایی و بازگرداندن بقایای آلی به خاک و یا سوزاندن بقایا، تولید محصول را تا حد امکان افزایش دهند (Mary et al., 1996). 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، تولید اصلاح‌کننده‌های خاک کارآمد و در عین حال با کم‌ترین آسیب به محیط‌زیست مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر از بیوجار (زغال زیستی) به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک (منبع

در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که قسمت عمده کشور ایران را نیز شامل می‌شود، عدم وجود پوشش گیاهی کافی و مناسب، عدم مدیریت صحیح استفاده از بقایای گیاهان و همچنین کاهش بازگشت بقایای گیاهی به خاک سبب کمبود مواد آلی شده است. مواد آلی نقش قابل‌ملاحظه‌ای در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تأمین برخی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه داشته و می‌توان از آن‌ها برای اصلاح ویژگی‌های نامطلوب خاک و افزایش پایدار محصول استفاده کرد. به همین دلیل

سبب کاهش چگالی ظاهری می‌شود (Chen et al., 2011; Laird et al., 2010)، چون در یک واحد حجم خاک، بیوپچار وزن خاک را کاهش می‌دهد و همچنین سبب افزایش حجم منافذ خاک نیز می‌شود. از طرفی، تخلخل بیوپچار به ماده اولیه‌ای که بیوپچار از آن تولید می‌شود و شرایط تجزیه در اثر حرارت از جمله دمایی که در آن تولید می‌شود و مدت زمان تجزیه بستگی دارد (Glaser et al., 2002; Major et al., 2010).

Obia و همکاران (۲۰۱۶) در یک آزمایش مزرعه‌ای گزارش کردند که افزودن بیوپچار تهیه شده از بلال ذرت در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در یک خاک لوم شنی، چگالی ظاهری را ۳ تا ۵ درصد به ازای هر درصد بیوپچار اضافه شده، کاهش و تخلخل خاک را ۲ درصد به ازای هر درصد بیوپچار اضافه شده، افزایش داد. Burrell و همکاران (۲۰۱۶) نیز اثر بیوپچار تولید شده از خرده چوب در دمای ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد را بر چگالی ظاهری و آب قابل دسترس در سه نوع خاک با بافت‌های لوم شنی، سیلتی لوم و لوم رسی بررسی کردند. بیوپچار به میزان ۳ درصد وزنی به خاک‌ها اضافه شد. نتایج نشان داد که افزودن بیوپچار به خاک‌های لوم شنی، سیلتی لوم و لوم رسی به ترتیب سبب افزایش ۹/۶، ۴/۲ و ۱/۹ درصدی آب قابل دسترس و سبب کاهش ۱۳/۳، ۱۰/۳ و ۹/۹ درصدی چگالی ظاهری شد. در تحقیق انجام شده توسط نوروزی و همکاران (۱۳۹۵) تاثیر بیوپچار حاصل از برگ خرما بر خصوصیات فیزیکی خاک با بافت لوم شنی مورد بررسی قرار گرفت. بیوپچار در پنج دمای ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تهیه گردید. نتایج نشان داد که بیوپچار علاوه بر تاثیر مثبت بر خصوصیات فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری، قادر است که منافذ ذخیره و انتقال خاک را با تشکیل منافذ ثانویه و نیز تغییر اندازه و تراکم خاکدانه‌های خاک افزایش دهد. علاوه بر این، افزایش دمای تولید بیوپچار در دامنه ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات معنی‌داری بر خصوصیات فیزیکی و رطوبتی خاک ایجاد نکرد. نتایج

کربن آلی) و به نوعی روشی برای ترسیب کربن در خاک‌های کشاورزی استفاده شده است. در واقع بیوپچار یک محصول کربنی است که از تجزیه زیست توده گیاهی مانند بقایای محصولات کشاورزی مانند کاه و کلش گندم، ذرت، سبوس برنج و تفاله نیشکر و یا فضولات حیوانی در حرارت زیاد و در شرایط عدم حضور اکسیژن یا حضور بسیار کم آن به دست آمده است (Lehmann and Joseph, 2009). افزودن بیوپچار به خاک می‌تواند سبب بهبود خواص فیزیکی (Mukherjee and Lal, 2013; Eastman, 2011)، شیمیایی (Laird et al., 2010) و بیولوژیکی (Lehmann et al., 2011) شود و در اکثر موارد کاربرد بیوپچار می‌تواند سبب افزایش محصولات کشاورزی نیز شود (Major et al., 2010). در اکثر آزمایشات که اثر بیوپچار بر خواص خاک بررسی می‌شود، نوع خاک یک پارامتر کیفی مهم است و تفاوت در نوع خاک سبب ایجاد اختلاف معنی‌داری در تجزیه و تحلیل‌های آماری می‌شود (Jeffery et al., 2011). یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی خاک که به شدت تولید محصول را هم تحت تاثیر قرار می‌دهد، آب در دسترس گیاه است. مطالعات اخیر نشان دادند که بیوپچار سبب افزایش ظرفیت نگهداری آب می‌شود (Martinsen et al., 2014; Basso et al., 2013).

افزایش آب قابل دسترس در اثر افزودن بیوپچار به دلیل تغییری است که بیوپچار به دلیل سطح ویژه بالایی که دارد در توزیع اندازه ذرات و تخلخل خاک ایجاد کرده است (Sun et al., 2014). در همین راستا، Glab و همکاران (۲۰۱۶) در یک آزمایش گلخانه‌ای با افزودن مقدار ۴ درصد وزنی بیوپچار تولید شده از ساقه گندم در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به یک خاک ماسه‌ای، به ترتیب افزایش ۵۹/۶، ۲۷، ۶۵/۶ درصدی رطوبت در حد ظرفیت زراعی، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس را گزارش کردند. وزن مخصوص ظاهری نیز یک پارامتر فیزیکی خاک می‌باشد که بیان کمی آن در بسیاری از مطالعات آب و خاک اهمیت زیادی دارد. افزودن بیوپچار

هکتار بیوجار تولید شده از کود گاوی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به خاک شنی موجب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد. به‌طور کلی استفاده از بیوجار در خاک‌های کشاورزی این پتانسیل را دارد که تا حد زیادی شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود ببخشد. بیوجار با افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک از یک طرف می‌تواند آب و از طرف دیگر عناصر غذایی مورد نیاز گیاه را فراهم کند و در نتیجه سبب افزایش بهره‌وری از خاک‌ها گردد (فتیحی گردلیدانی و میرسید حسینی، ۱۳۹۴).

با توجه به آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۹۳-۱۳۹۲ سطح زیر کشت گندم در استان فارس معادل ۴۰۸ هزار هکتار و تولید آن برابر با ۱۱۵۰ تن بوده است، این در حالی است که بخشی از کاه و کلش تولیدی جهت مصارف دامداری مصرف می‌گردد و بخش دیگر سوزانده می‌شود که خطرات محیط‌زیستی را به دنبال دارد. لذا اهمیت استفاده بهینه از این کاه و کلش با کاربرد آن به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک بیشتر مطرح می‌گردد. بر این اساس، در این پژوهش به بررسی اثر سطوح مختلف بیوجار (تولید شده از کاه و کلش گندم) بر برخی خواص فیزیکی خاک با بافت‌های لوم شنی، لومی، لوم رسی و رسی پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش گلخانه‌ای در گلخانه‌ی پژوهشکده خشکسالی (با پوشش شیشه‌ای) واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز با عرض جغرافیایی $29^{\circ} 36'$ و طول جغرافیایی $52^{\circ} 33'$ و ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا انجام شد. در این پژوهش تأثیر چهار سطح بیوجار بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی ۴ نوع خاک با بافت‌های مختلف در ۳ تکرار و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. چهار سطح بیوجار شامل صفر (B₀) (شاهد)، ۲۵ (B₂₅)، ۵۰ (B₅₀) و ۷۵ (B₇₅) تن در هکتار (به‌ترتیب معادل صفر، ۱/۲۵، ۲/۵ و ۳/۷۵ درصد وزنی) و چهار نوع بافت خاک شامل بافت‌های لوم

متفاوتی از افزودن بیوجار به خاک و اثر آن بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک گزارش شده است. در چندین آزمایش انجام شده، مشاهده شده است که افزودن بیوجار سبب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع شده است (Githinji, 2014; Uzoma et al., 2011). این کاهش در خاک‌های درشت دانه بیشتر مشاهده شده است. در خاک‌های سبک و شنی بیوجار با قرار گرفتن بین منافذ ماکرو در مسیر مستقیم آب، پیچ خوردگی ایجاد می‌کند و این سبب کندتر و مشکل‌تر شدن حرکت آب و در نتیجه کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های درشت دانه می‌شود. از طرفی، در چندین مطالعه دیگر افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر افزودن بیوجار در خاک‌های رسی (اندازه منافذ کوچکتر) بیشتر مشاهده شده است (Moutier et al., 2000; Herath, 2012). این افزایش به دلیل افزایش تخلخل و افزایش حجم منافذ ماکرو و کاهش چگالی ظاهری در این خاک‌ها گزارش شده است. Lim و همکاران (۲۰۱۶) در آزمایشی به بررسی اثر بیوجار حاصل از تراشه چوب درخت کاج در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک پرداختند. سطوح بیوجار بکار برده شده ۱، ۲ و ۵ درصد وزنی بوده و چهار نوع بافت شن درشت، شن ریز، لومی و رسی مورد استفاده قرار دادند. افزودن بیوجار به دو خاک شن ریز و درشت سبب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع شد. اما در خاک لومی و رسی، بیوجار سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع شد به‌نحوی که افزودن ۵ درصد بیوجار به خاک لومی و رسی به‌ترتیب سبب افزایش ۱/۶ و ۲۲ درصدی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک شد.

افزودن بیوجار به خاک سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی نیز می‌شود. بیوجار ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی دارد. این ویژگی بیوجار برخاسته از سطح ویژه زیاد آن و سطوح باردار آن و همچنین وفور گروه‌های کربوکسیل در آن است (Laird et al., 2010). Uzoma و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که کاربرد سطوح ۱۰، ۱۵ و ۲۰ تن در

شنی، لومی، لوم رسی و رسی می‌باشد. مشخصات خاک‌های مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است.

تهیه بیوچار

برای تهیه بیوچار از کاه و کلش گندم استفاده شد. ابتدا کاه و کلش‌ها بسته بندی شده و سپس در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت و در شرایط بدون اکسیژن سوزانده شده و سپس سرد شدند. بعضی از ویژگی‌های بیوچار مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است. به منظور بررسی اثر سطوح بیوچار در چهار بافت خاک، در مجموع ۴۸ گلدان مورد استفاده قرار گرفت. متوسط ارتفاع و قطر گلدان‌های مورد استفاده به ترتیب برابر ۱۸ و ۲۲ سانتی متر می‌باشد. مقدار بیوچار در هر سطح توزین و پس از افزودن به خاک عبور کرده از الک دو میلی متری به طور کامل با خاک مخلوط شد. بعد از تعیین رطوبت در حد ظرفیت زراعی برای تمام سطوح بیوچار در هر چهار بافت به روش گلدانی، مخلوط خاک و بیوچار یک بار در هفته به مدت چهل روز تا حد ظرفیت مزرعه‌ای آبیاری گردیدند

تا اینکه خاک و بیوچار به تعادل برسند و سپس سایر اندازه‌گیری‌ها انجام گردید.

تعیین رطوبت در حد ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC})، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) و آب قابل دسترس

برای تعیین رطوبت در حد ظرفیت مزرعه‌ای، به دلیل عدم دسترسی به صفحه مکش یک دهم بار (برای خاک‌های با بافت سبک)، از روش گلدانی استفاده گردید. لذا در ابتدای آزمایش، رطوبت در حد ظرفیت مزرعه‌ای برای هر سطح اعمالی بیوچار در هر ۴ بافت خاک به روش گلدانی اندازه‌گیری شد. بدین منظور داخل گلدان‌ها (پس از پر کردن گلدان‌ها از مخلوط خاک و بیوچار) آب ریخته به حدی که خاک کاملاً اشباع گردید و از انتهای گلدان‌ها خروج آب مشاهده گردد. سپس روی گلدان‌ها با پلاستیک پوشانیده شد تا آبی در اثر تبخیر از دست نرود. گلدان‌ها مرتباً (چند بار در روز و به مدت ۱۰ روز) وزن گردیدند.

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد استفاده (قلی زاده، ۱۳۸۸؛ حسینی، ۱۳۸۴)

نام خاک	بافت خاک	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	چگالی ظاهری (g cm^{-3})
گربایگان فسا	لوم شنی	۷۰	۱۸	۱۲	۱/۵
کوی اساتید	لومی	۳۹	۵۱	۱۰	۱/۲۲
سری دانشکده	لوم رسی	۴۰	۲۸	۳۲	۱/۳۴
منطقه کوشک	رسی	۱۶	۴۸	۳۶	۱/۴۸

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های بیوچار مورد استفاده

بیوچار	خواص
۲/۳	سدیم (meq l^{-1})
۸۳	پتاسیم (meq l^{-1})
۳/۸	منیزیم (meq l^{-1})
۱۵	کلسیم (meq l^{-1})
۷/۵	قابلیت هدایت الکتریکی (dS m^{-1})
۲۴/۹۸	ظرفیت تبادل کاتیونی ($\text{meq } 100\text{g}^{-1} \text{ soil}$)
۸/۵	PH
۰/۲۵	چگالی ظاهری (g cm^{-3})

برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک گربایگان فسا و خاک کوی اساتید که بافتی سبک‌تر دارند، از روش بار ثابت استفاده شد و برای خاک سری دانشکده و کوشکک که سنگین بافت هستند، از روش بار افتان استفاده شد.

اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت

ابتدا مقداری خاک دست خورده را در استوانه ریخته و آن را پر می‌کنیم سپس درب استوانه می‌بندیم. ارتفاع ستون خاک و قطر استوانه یادداشت می‌شود. روی ستون خاک ارتفاع ثابت آب قرار داده می‌شود. با استفاده از یک بشر و کرنومتر در یک بازه زمانی مشخص، حجم آب عبوری از ستون خاک را اندازه‌گیری می‌کنیم. با استفاده از معادله داری هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت تعیین گردید.

$$K = \frac{Q \times L}{A \times \Delta h} \quad (3)$$

Q: حجم آب عبوری از ستون خاک در واحد زمان ($m^3 s^{-1}$), k: هدایت هیدرولیکی اشباع ($m s^{-1}$), A: سطح مقطع ستون خاک (m^2), Δh : اختلاف گرادبان هیدرولیکی بین نقطه خروجی و سطح آب ثابت شده روی ستون خاک (m) و L: طول ستون خاک (m) می‌باشد.

اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان

مشابه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با بار ثابت، روی ستون خاک دست خورده، ارتفاع آب قرار داده می‌شود. ارتفاع آب ثابت نبوده و به تدریج کم می‌گردد. زمان نزول سطح آب را با استفاده از کرنومتر ثبت می‌کنیم. ارتفاع آب روی ستون خاک در زمان‌های مختلف پس از انجام آزمایش یادداشت می‌شود. با استفاده از رابطه زیر مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان محاسبه شد:

$$K = \frac{2.3 \times a \times L}{A \times t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (4)$$

K: هدایت هیدرولیکی اشباع ($m s^{-1}$), a: سطح مقطع لوله بورت (m^2), L: طول ستون خاک (m), h_1 : بارآبی در آغاز آزمایش (m), h_2 : بار آبی در خاتمه آزمایش (m), t:

زمانی که قرائت‌های وزن گلدان به مقدار ثابت رسید و آبی از انتهای گلدان خارج نشد، این مقدار رطوبت برابر با رطوبت ظرفیت زراعی منظور گردید. برای تعیین رطوبت در نقطه پژمردگی دائم نیز از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد. با اعمال مکش ۱۵ بار و در نهایت θ_{PWP} تعیین شد. آب قابل دسترس نیز از تفاضل رطوبت در حد ظرفیت مزرعه‌ای و رطوبت در نقطه پژمردگی دائم محاسبه گردید.

اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری و حقیقی

در ابتدا از تیمارها، نمونه خاک دست نخورده تهیه گردید. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و در آون در دمای ۱۰۵-۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ خشک گردید. وزن مخصوص ظاهری (ρ_b^1 , $g cm^{-3}$) از رابطه زیر تعیین گردید:

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_t} \quad (1)$$

که m_s : وزن خاک خشک (g) و V_t حجم کل خاک معادل حجم استوانه نمونه‌برداری (cm^3) در نظر گرفته شد. برای محاسبه وزن مخصوص حقیقی ρ_s^2 ، وزن خشک خاک به همان صورتی که برای وزن مخصوص ظاهری توضیح داده شد، تهیه و محاسبه گردید. حجم خاک خشک هم به روش جابجایی محاسبه شد. بدین صورت که ابتدا حجم مشخصی آب در یک استوانه ریخته و سپس مقدار معینی از نمونه خاک خشک مورد نظر به آب اضافه گردید. افزایش حجم آب در اثر افزودن خاک، معادل حجم نمونه خاک خشک است (رابطه ۲).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2)$$

که در آن، V_s حجم خاک خشک (cm^3) می‌باشد.

اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}^3)

¹ Bulk density

² Particle density

³ Saturated hydraulic conductivity

میزان شن آن ۷۷ درصد کمتر و میزان سیلت و رس به ترتیب ۲/۶ و ۳ برابر بیشتر از خاک گربایگان با بافت لوم شنی است)، رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی ۱۹ درصد بیشتر از خاک گربایگان با بافت لوم شنی است. این در حالی است که میزان رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی با افزودن ۲۵ تن در هکتار بیوپچار به بافت خاک لوم شنی، تقریباً برابر با بافت خاک رسی می‌شود. در واقع می‌توان نتیجه گرفت افزودن بیوپچار به یک خاک شنی، سبب متخلخل‌تر شدن خاک می‌گردد. Briggs و همکاران (۲۰۱۲) با بکار بردن مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی بیوپچار حاصل از بقایای درخت کاج در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به یک خاک لومی شنی در شرایط آزمایشگاهی، افزایش رطوبت در حد ظرفیت مزرعه‌ای را گزارش کردند.

رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})

نتایج مربوط به مقایسه میانگین اثرات اصلی و اثر متقابل تیمارها بر رطوبت در نقطه‌ی پژمردگی دائم در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد افزایش میزان رس خاک، سبب افزایش معنی‌دار θ_{PWP} می‌شود. در هر بافت خاک نیز افزایش بیوپچار سبب افزایش θ_{PWP} شد. تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوپچار نسبت به تیمار شاهد در بافت لوم شنی، لومی، لوم رسی و رس به ترتیب ۱۳۴/۷، ۴۷/۳، ۵۰/۵ و ۳۵/۵ درصد افزایش θ_{PWP} را نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار θ_{PWP} نیز با میانگین ۰/۲۱ گرم بر گرم در تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوپچار در بافت خاک رسی و کم‌ترین مقدار آن با میانگین ۰/۰۵ گرم بر گرم در تیمار شاهد (B_0) در خاک لوم شنی به دست آمد. Suliman و همکاران (۲۰۱۷) با افزودن ۴۰ تن در هکتار بیوپچار (تولید شده از پوست درخت کاج در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد)، سبب افزایش رطوبت در نقطه پژمردگی دائم در خاک ماسه‌ای را گزارش کردند.

کل زمان برای پایین افتادن آب در بورت از h_1 به h_2 (s) و A: سطح مقطع ستون خاک (m^2) می‌باشد.

اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC^1)

ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جانشینی کاتیون‌ها با استات سدیم (Summer and Miller, 1996) و با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید:

$$CEC = \frac{\text{میزان رقیق کردن سدیم} \times (\text{ppm}) \times \text{غلظت سدیم}}{100 \times \text{عدد جرمی سدیم} \times (\text{g}) \times \text{وزن نمونه خاک}} \times 1000 \quad (5)$$

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی ($meq\ 100g^{-1}\ soil$).

محاسبات آماری

این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم افزار SAS انجام شد. پردازش داده‌ها نیز با نرم‌افزار Sigma Plot صورت گرفت. تفاوت بین معنی‌داری تیمارها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن (با احتمال ۹۵ درصد) مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) با روش گلدانی

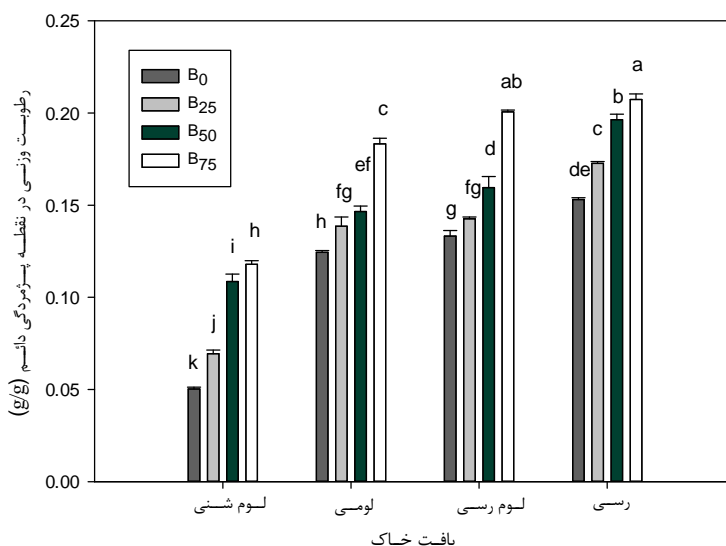
نتایج مربوط به مقایسه میانگین اثرات اصلی و اثر متقابل تیمارها بر رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه‌ای به روش گلدانی در جدول ۳ نشان داده شده است. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد سنگین‌تر شدن بافت خاک‌ها (افزایش میزان رس)، سبب افزایش θ_{FC} گردید که این تفاوت بین دو بافت لومی و لوم رسی معنی‌دار نبود. در هر ۴ بافت، افزایش بیوپچار سبب افزایش معنی‌دار θ_{FC} شد. تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوپچار نسبت به تیمار شاهد (B_0) در بافت لوم شنی، لومی، لوم رسی و رس به ترتیب ۴۷/۶، ۵۰، ۴۷/۸ و ۴۰ درصد افزایش θ_{FC} را نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار θ_{FC} نیز با میانگین ۰/۳۵ گرم بر گرم در تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوپچار در خاک رسی و کم‌ترین مقدار آن با میانگین ۰/۲۱ گرم بر گرم در تیمار شاهد (صفر تن بیوپچار) در خاک لوم شنی به دست آمد. در سطح بیوپچار B_0 ، در خاک کوشکک با بافت رسی (که

¹ Cation exchange capacity

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های اثر بیوجار و بافت خاک بر رطوبت در حد ظرفیت مزرعه‌ای ($g\ g^{-1}$) به روش گلدانی

میانگین	سطوح بیوجار				بافت خاک
	B ₇₅	B ₅₀	B ₂₅	B ₀ [*]	
۰/۲۷ ^C	۰/۳۱ ± ۰/۰۰۱ ^c	۰/۲۹ ± ۰/۰۰۳ ^d	۰/۲۵ ± ۰/۰۰۱ ^f	۰/۲۱ ± ۰/۰۰۳ ^{h**}	لوم شنی
۰/۲۸ ^B	۰/۳۳ ± ۰/۰۰۳ ^b	۰/۳۰ ± ۰/۰۰۳ ^{cd}	۰/۲۶ ± ۰/۰۰۳ ^e	۰/۲۲ ± ۰/۰۰۴ ^{gh}	لومی
۰/۲۸ ^B	۰/۳۴ ± ۰/۰۰۵ ^a	۰/۳۰ ± ۰/۰۰۱ ^d	۰/۲۷ ± ۰/۰۰۳ ^e	۰/۲۳ ± ۰/۰۰۳ ^g	لوم رسی
۰/۳۰ ^A	۰/۳۵ ± ۰/۰۰۷ ^a	۰/۳۲ ± ۰/۰۰۲ ^b	۰/۲۹ ± ۰/۰۰۲ ^d	۰/۲۵ ± ۰/۰۰۴ ^f	رسی
	۰/۳۳ ^A	۰/۳۰ ^B	۰/۲۷ ^C	۰/۲۳ ^D	میانگین

* سطوح بیوجار B₀، B₂₅، B₅₀ و B₇₅ بیان کننده سطوح بیوجار اعمال شده به ترتیب در سطح صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار می‌باشد.
 ** حروف مشابه بزرگ و کوچک به ترتیب نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ برای اثرات اصلی تیمارها (سطوح بیوجار و بافت‌های مختلف خاک) و اثرات متقابل تیمارها (سطوح بیوجار × بافت‌های مختلف خاک) می‌باشد.



شکل ۱. روند تغییرات رطوبت در نقطه پژمردگی دائم متاثر چهار سطح بیوجار B₀، B₂₅، B₅₀ و B₇₅ برای چهار بافت لوم شنی، لومی، لوم رسی و رسی. خطوط عمودی بیان کننده مقدار خطای استاندارد می‌باشد. B₀، B₂₅، B₅₀ و B₇₅ بیان کننده سطوح بیوجار اعمال شده به ترتیب در سطح صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار می‌باشد. حروف مشابه کوچک نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ برای اثرات متقابل تیمارها (سطوح بیوجار × بافت‌های مختلف خاک) می‌باشد.

بیوجار سبب افزایش معنی‌دار آب قابل دسترس در هر چهار بافت شد. تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوجار نسبت به تیمار شاهد (B₀) در بافت لوم شنی، لومی، لوم رسی و رسی به ترتیب ۱۸، ۵۴، ۵۵ و ۵۶٪ درصد افزایش میزان

آب قابل دسترس

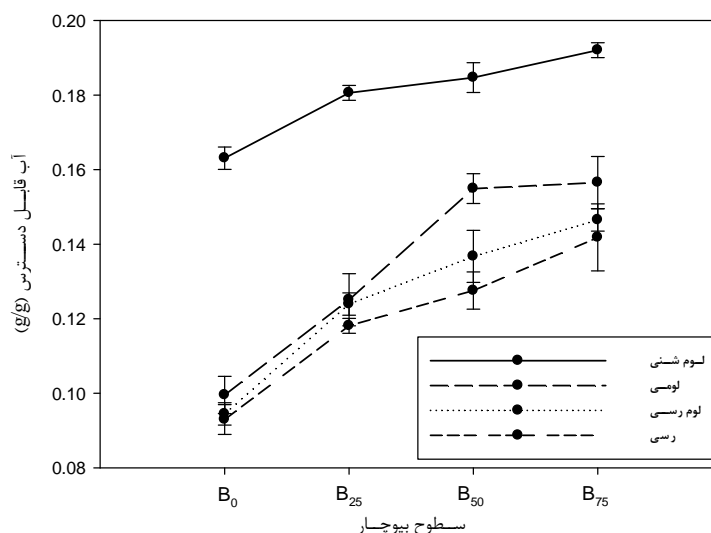
در شکل ۲ مقایسه میانگین اثرات اصلی و اثر متقابل تیمارها بر میزان آب قابل دسترس نشان داده شده است. همانگونه که در نمودار نیز قابل مشاهده است، افزایش

که کاربرد ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با شاهد (B_0) چگالی را به ترتیب ۱۵، ۲۴ و ۴۱ درصد کاهش داد. افزایش میزان رس خاک نیز سبب کاهش چگالی ظاهری شد (میزان چگالی در بافت خاک لوم شنی ۱/۲ برابر چگالی در بافت خاک رسی به دست آمد). بیشترین مقدار چگالی نیز با میانگین ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب در تیمار شاهد (B_0) در بافت خاک لوم شنی و کمترین مقدار آن با میانگین ۰/۶۶ گرم بر سانتی متر مکعب در تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوچار در بافت خاک رسی به دست آمد. در سطح بیوچار B_0 ، در بافت خاک لوم رسی با ۷۵ درصد شن کمتر، ۵۵/۵ درصد سیلت بیشتر و ۱۶۷ درصد رس بیشتر نسبت به بافت خاک لوم شنی، میزان چگالی ظاهری ۱۳/۸ درصد کمتر از چگالی ظاهری بافت خاک لوم شنی به دست آمد. در حالیکه با افزودن ۲۵ تن در هکتار بیوچار به بافت خاک لوم شنی میزان چگالی ظاهری تقریباً برابر با چگالی ظاهری بافت خاک لوم رسی به دست می‌آید.

آب قابل دسترس را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار آب قابل دسترس نیز با میانگین ۰/۱۹ گرم بر گرم در تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوچار در بافت خاک لوم شنی و کمترین مقدار آن با میانگین ۰/۰۹ گرم بر گرم در تیمار شاهد (B_0) در بافت خاک رسی به دست آمد. بهشتی و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که توانایی بالای بیوچار در حفظ آب (افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک) به خصوصیات فیزیکی آن از قبیل ساختار متخلخل و سطح ویژه بالای آن بر می‌گردد. در همین راستا، Andrenelli و همکاران (۲۰۱۶) با افزودن ۱۴ تن در هکتار بیوچار تولید شده از سبوس گندم در دو دمای ۸۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به یک خاک لوم رسی سیلتی، به ترتیب افزایش ۱۶۲ و ۸/۸ درصدی آب قابل دسترس را گزارش کردند.

چگالی ظاهری

نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی و اثر متقابل تیمارها بر چگالی ظاهری نشان می‌دهد که سطوح بیوچار اثر معنی‌داری بر چگالی ظاهری داشت (جدول ۴)، به طوری



شکل ۲. روند تغییرات آب قابل دسترس متاثر چهار سطح بیوچار B_0 ، B_{25} ، B_{50} و B_{75} برای چهار بافت لوم شنی، لومی، لوم رسی و رسی. خطوط عمودی بیان کننده مقدار خطای استاندارد می‌باشد. B_0 ، B_{25} ، B_{50} و B_{75} بیان کننده سطوح بیوچار اعمال شده به ترتیب در سطح صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار می‌باشد.

تن در هکتار بیوجار در بافت خاک رسی به دست آمد. همانطور که گفته شد در یک واحد حجم خاک، بیوجار با کاهش جرم خاک سبب کاهش چگالی حقیقی می‌شود. Anndrenelli و همکاران (۲۰۱۶) در یک آزمایش مزرعه‌ای ۱۴ تن در هکتار بیوجار تولید شده از سبوس گندم در دو دمای ۸۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را به یک خاک لوم رسی سیلتی اضافه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن بیوجار تولید شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، چگالی حقیقی خاک را از ۲/۶۵ به ۲/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش داد. بیوجار تولید شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز چگالی حقیقی خاک را از ۲/۶۵ به ۲/۵۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش داد.

با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی ظاهری و چگالی حقیقی برای کلیه سطوح بیوجار در بافت‌های مختلف خاک، مقادیر تخلخل محاسبه گردید. نتایج نشان داد که افزودن بیوجار از سطح B₀ به B₇₅ سبب افزایش معنی‌دار تخلخل گردیده است. از طرف دیگر با سنگین‌تر شدن بافت خاک، مقادیر تخلخل افزایش معنی‌داری را نشان داد. به‌طور کلی افزودن اصلاح‌کننده به خاک سبب افزایش تخلخل و در نتیجه آن افزایش آب قابل دسترس می‌گردد و به دنبال آن به وضعیت فیزیکی خاک بهبود می‌بخشد.

یافته قبلی نشان می‌دهد که بیوجار این قابلیت را دارد که سبب کاهش چگالی ظاهری و متخلخل‌تر شدن خاک گردد و لذا می‌توان بدون تغییر دادن بافت خاک، صرفاً با افزودن بیوجار (حتی در سطوح پایین) سبب بهبود وضعیت فیزیکی خاک گردید. Peake و همکاران (۲۰۱۴) اثر بیوجار حاصل از زغال درخت کاج در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را در چهار بافت لوم شنی، لومی، لوم سیلتی و لوم رسی سیلتی بررسی کردند. بیوجار در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۲/۵ درصد وزنی به خاک‌ها افزوده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که در تمام بافت‌ها، بیوجار سبب کاهش چگالی ظاهری می‌شود.

چگالی حقیقی

سطوح بیوجار اثر معنی‌داری بر چگالی حقیقی داشت (جدول ۵) به‌طوری که کاربرد ۱/۲۵، ۲/۵ و ۳/۷۵ درصد وزنی بیوجار (معادل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار) در مقایسه با شاهد (B₀) چگالی حقیقی را به ترتیب ۱۳/۸، ۲۵/۴ و ۳۳ درصد کاهش داد. افزایش میزان رس خاک سبب کاهش چگالی شد. بیش‌ترین مقدار چگالی نیز با میانگین ۲/۷۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در تیمار شاهد (صفر تن بیوجار) در بافت خاک لوم شنی و کم‌ترین مقدار آن با میانگین ۱/۶۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در تیمار ۷۵

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های اثر بیوجار و بافت خاک بر چگالی ظاهری (g cm⁻³)

میانگین	بیوجار سطوح				بافت خاک
	B ₇₅	B ₅₀	B ₂₅	B ₀ ^o	
۱/۲۲ ^A	۰/۹۴ ± ۰/۰۱۱ ^f	۱/۱۴ ± ۰/۰۱۴ ^{cd}	۱/۳۱ ± ۰/۰۴۷ ^b	۱/۵۰ ± ۰/۰۰۵ ^{a**}	لوم شنی
۱/۰۹ ^B	۰/۸۸ ± ۰/۰۰۱ ^{fg}	۱/۰۹ ± ۰/۰۲۸ ^{de}	۱/۱۶ ± ۰/۰۲۳ ^{cd}	۱/۲۲ ± ۰/۰۱۵ ^c	لومی
۱/۰۷ ^{BC}	۰/۸۱ ± ۰/۰۴۵ ^g	۱/۰۲ ± ۰/۰۰۹ ^e	۱/۱۳ ± ۰/۰۰۲ ^d	۱/۳۴ ± ۰/۰۰۵ ^b	لوم رسی
۱/۰۴ ^C	۰/۶۶ ± ۰/۰۲۱ ^h	۰/۹۳ ± ۰/۰۲۵ ^f	۱/۰۸ ± ۰/۰۰۶ ^{de}	۱/۴۸ ± ۰/۰۳۳ ^a	رسی
	۰/۸۲ ^D	۱/۰۵ ^C	۱/۱۷ ^B	۱/۳۹ ^A	میانگین

^o سطوح بیوجار B₀، B₂₅، B₅₀ و B₇₅ بیان‌کننده سطوح بیوجار اعمال شده به ترتیب در سطح صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار می‌باشد.

^{**} حروف مشابه بزرگ و کوچک به ترتیب نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ برای اثرات اصلی تیمارها (سطوح بیوجار و بافت‌های مختلف خاک) و اثرات متقابل تیمارها (سطوح بیوجار × بافت‌های مختلف خاک) می‌باشد.

جدول ۵. مقایسه میانگین‌های اثر بیوجار و بافت خاک بر چگالی حقیقی (g cm^{-3})

میانگین	بیوجار سطوح				بافت خاک
	B ₇₅	B ₅₀	B ₂₅	B ₀ [*]	
۲/۳۹ ^A	۱/۹۴ ± ۰/۰۶۱ ^e	۲/۳۳ ± ۰/۱۶۷ ^{cd}	۲/۵ ± ۰/۰۰۱ ^{abcd}	۲/۷۷ ± ۰/۰۱۵ ^{a**}	لوم شنی
۲/۲۴ ^B	۱/۸۲ ± ۰/۰۰۱ ^{ef}	۲/۰۰ ± ۰/۰۰۱ ^e	۲/۴۴ ± ۰/۰۵۷ ^{bcd}	۲/۷۰ ± ۰/۰۱۱۵ ^{ab}	لومی
۲/۱۶ ^B	۱/۷۸ ± ۰/۰۱۱۱ ^{ef}	۱/۸۹ ± ۰/۰۱۱۱ ^e	۲/۳۱ ± ۰/۰۹۳ ^d	۲/۶۷ ± ۰/۰۱۶۷ ^{ab}	لوم رسی
۱/۹۹ ^C	۱/۶۱ ± ۰/۰۵۷ ^f	۱/۷۶ ± ۰/۰۶۳ ^{ef}	۲/۰۰ ± ۰/۰۰۱ ^e	۲/۵۹ ± ۰/۰۴۹ ^{abc}	رسی
	۱/۷۹ ^D	۲/۰۰ ^C	۲/۳۱ ^B	۲/۶۸ ^A	میانگین

* سطوح بیوجار B₀، B₂₅، B₅₀ و B₇₅ بیان کننده سطوح بیوجار اعمال شده به ترتیب در سطح صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار می‌باشد.
** حروف مشابه بزرگ و کوچک به ترتیب نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ برای اثرات اصلی تیمارها (سطوح بیوجار و بافت‌های مختلف خاک) و اثرات متقابل تیمارها (سطوح بیوجار × بافت‌های مختلف خاک) می‌باشد.

معنی‌دار تخلخل و کاهش چگالی ظاهری (جدول ۴) خاک شد که احتمالاً به همین دلایل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز افزایش یافته است. Wang و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند افزودن سطوح ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی بیوجار تهیه شده از پوسته برنج در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش چگالی ظاهری شد، در حالی که سبب افزایش تخلخل و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک شد.

ظرفیت تبادل کاتیونی

نتایج مربوط به مقایسه میانگین اثرات اصلی و اثر متقابل تیمارها بر ظرفیت تبادل کاتیونی در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد سنگین‌تر شدن بافت خاک‌ها (افزایش میزان رس)، سبب افزایش معنی‌دار ظرفیت تبادل کاتیونی گردید.

در هر بافت خاک، افزایش بیوجار سبب افزایش معنی‌دار CEC شد. تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوجار نسبت به تیمار شاهد در بافت لوم شنی، لومی، لوم رسی و رسی به ترتیب ۶۷، ۵۳، ۴۱ و ۵۵ درصد افزایش CEC را نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار CEC نیز با میانگین ۲۶/۳۶ میلی‌اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم خاک در تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوجار در بافت خاک رسی به‌دست آمد.

در این نتایج مشاهده گردید که با افزودن ۲۵ تن در هکتار بیوجار مقدار تخلخل در بافت خاک لوم شنی تفاوت معنی‌داری با مقدار تخلخل در بافت خاک لومی بدون اعمال بیوجار نداشت. همچنین می‌توان گفت، بیوجار سبب کاهش تراکم خاک و افزایش هوادهی می‌شود که این خود سبب بیشتر شدن تخلخل خاک می‌گردد (Downie *et al.*, 2009; Majot *et al.*, 2010). Laird و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که کاربرد سطوح ۰/۵، ۱ و ۲ وزنی بیوجار تولید شده از بقایای درخت بلوط و گردو در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به یک خاک لومی سبب افزایش تخلخل شد.

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

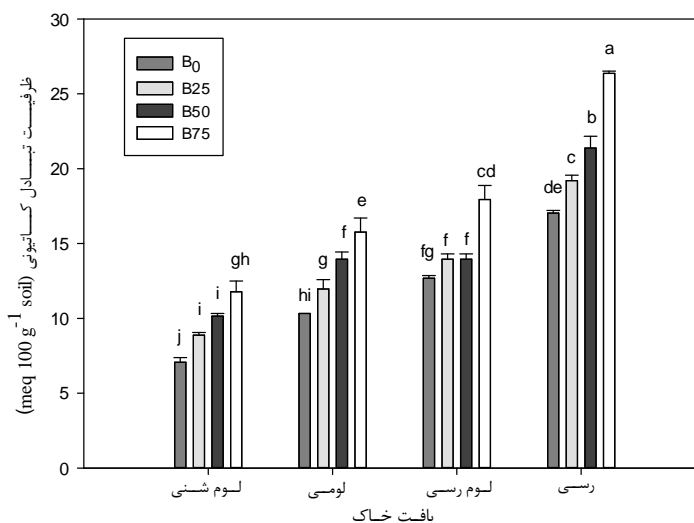
نشان داد سطوح بیوجار اثر معنی‌داری بر هدایت هیدرولیکی اشباع داشت به‌نحوی که کاربرد ۱/۲۵، ۲/۵ و ۳/۷۵ درصد وزنی بیوجار (معادل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار) در مقایسه با شاهد (B₀) میزان هدایت هیدرولیکی اشباع را به‌ترتیب ۴۵، ۷۰ و ۹۵ درصد افزایش داد (جدول ۶). در حالی که افزایش میزان رس خاک، سبب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع شد. کاربرد بیوجار سبب افزایش

جدول ۶. مقایسه میانگین‌های اثر بیوجار بر هدایت هیدرولیکی اشباع (mm hr^{-1})

میانگین	بیوجار سطوح				بافت خاک
	B ₇₅	B ₅₀	B ₂₅	B ₀ [*]	
۱/۰۷ ^A	۱/۲۵ ± ۰/۰۲۹ ^a	۱/۱۲ ± ۰/۰۰۲ ^b	۱/۰۱ ± ۰/۰۵۴ ^d	۰/۹۱ ± ۰/۰۰۱ ^{e**}	لوم شنی
۰/۹۴ ^B	۱/۱۲ ± ۰/۰۰۹ ^b	۱/۰۴ ± ۰/۰۴۴ ^{cd}	۰/۹۹ ± ۰/۰۰۶ ^d	۰/۶۳ ± ۰/۰۰۱ ^f	لومی
۰/۸۶ ^C	۱/۰۸ ± ۰/۰۳۴ ^{bc}	۱/۰۰ ± ۰/۰۰۳ ^d	۰/۸۸ ± ۰/۰۳۳ ^e	۰/۴۹ ± ۰/۰۱۲ ^g	لوم رسی
۰/۵۳ ^D	۰/۹۰ ± ۰/۰۰۹ ^e	۰/۶۲ ± ۰/۰۰۱ ^f	۰/۳۷ ± ۰/۰۱۶ ^h	۰/۲۲ ± ۰/۰۰۳ ⁱ	رسی
	۱/۰۹ ^A	۰/۹۵ ^B	۰/۸۱ ^C	۰/۵۶ ^D	میانگین

* سطوح بیوجار B₀, B₂₅, B₅₀ و B₇₅ بیان کننده سطوح بیوجار اعمال شده به ترتیب در سطح صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار می‌باشد.

** حروف مشابه بزرگ و کوچک به ترتیب نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ برای اثرات اصلی تیمارها (سطوح بیوجار و بافت‌های مختلف خاک) و اثرات متقابل تیمارها (سطوح بیوجار × بافت‌های مختلف خاک) می‌باشد.



شکل ۳. روند تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی متاثر چهار سطح بیوجار B₀, B₂₅, B₅₀ و B₇₅ برای چهار بافت لوم شنی، لومی، لوم رسی و رسی. خطوط عمودی بیان کننده مقدار خطای استاندارد می‌باشد. B₀, B₂₅, B₅₀ و B₇₅ بیان کننده سطوح بیوجار اعمال شده به ترتیب در سطح صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار می‌باشد. حروف مشابه کوچک نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ برای اثرات متقابل تیمارها (سطوح بیوجار × بافت‌های مختلف خاک) می‌باشد.

واقع می‌توان گفت بیوجار با افزایش غلظت یون‌ها در محلول خاک و از طرفی با جذب عناصری مثل سدیم و کلر، سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی می‌شود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که بیوجار اثر معنی‌داری بر رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه‌ای و در نقطه پژمردگی دائم در هر چهار بافت خاک داشت که این امر خود سبب افزایش آب قابل دسترس در کلیه بافت

همچنین کم‌ترین مقدار آن با میانگین ۷/۰۷ میلی اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم خاک در تیمار شاهد (صفر تن بیوجار) در بافت خاک لوم شنی به دست آمد. در همین راستا، Novak و همکاران (۲۰۰۹) با افزودن ۲٪ وزنی بیوجار به یک خاک شنی لومی، افزایش CEC را مشاهده کردند. می‌توان گفت افزایش میزان قابلیت هدایت الکتریکی در اثر کاربرد بیوجار، وجود املاح در مواد اولیه تولیدکننده و وفور گروه‌های کربوکسیل در آن است. در

بافت، که برای بهبود زهکشی و افزایش نفوذ جهت افزایش بهره‌وری محصول نیاز به اصلاح دارند، گزینه بسیار مناسبی به شمار می‌آید. همچنین کاربرد بیوچار در خاک‌های سبک بافت که ظرفیت نگهداری آب کمی دارند و به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک که با مساله کمبود منابع آب مواجه هستند، استراتژی بسیار مناسبی است. اما بایستی در نظر داشت که افزایش سطوح بیوچار در خاک می‌تواند اثرات منفی مانند افزایش شوری خاک به دنبال داشته باشد. با توجه به تاثیر مثبت بیوچار بر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در بافت‌های مختلف، انتخاب بهینه‌ترین سطح بیوچار بایستی به گونه‌ای باشد که استفاده از آن از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد که این امر نیاز به تحقیقات بیشتر را به خصوص در شرایط مزرعه‌ای می‌طلبد.

خاک‌ها با افزودن بیوچار گردید. چگالی ظاهری و حقیقی در هر چهار بافت با افزایش بیوچار نسبت به تیمار شاهد (صفر تن بر هکتار) کاهش معنی‌داری داشت که این کاهش به دلیل کاهش جرم خاک و افزایش حجم منافذ خاک توسط بیوچار رخ داده است. از طرفی از آنجایی که افزودن بیوچار به خاک سبب افزایش حجم منافذ ماکرو و کاهش چگالی می‌گردد، سبب بهبود هدایت هیدرولیکی اشباع خاک گردید. همچنین تاثیر مثبت بیوچار بر مقدار تبادل کاتیونی خاک در بافت‌های مختلف مشاهده گردید که این امر بدلیل باردار بودن سطوح بیوچار می‌باشد. به‌طور کلی تیمار ۷۵ تن در هکتار بیوچار نسبت به تیمار شاهد بیش‌ترین تاثیر را بر پارامترهای اندازه‌گیری در بافت خاک رسی داشته است. لذا با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده به خصوص در خاک‌های سنگین

فهرست منابع

بهشتی، م.، آهنگری، ا. و علیخانی، ح.ع. ۱۳۹۴. بیوچار و نقش آن در اصلاح خاک. سومین همایش ملی انجمن‌های علمی-دانشجویی رشته‌های کشاورزی و منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ۱۷-۱۶ اردیبهشت. حسینی، س.ن. ۱۳۸۴. اثر آبیاری جویچه ای یک در میان و سطوح مختلف نیتروژن بر عملکرد گندم در دو منطقه باجگاه و کوشکک. پایان نامه کارشناسی ارشد. بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران، ۱۹۰ صفحه. فتحی گردلدانی، ا. و میرسید حسینی، ح. ۱۳۹۴. جنبه‌های مختلف اثرات بیوچار در اصلاح و بهبود کیفیت خاک. همایش بین المللی پژوهش‌های کاربردی در کشاورزی، شرکت تعاونی علم گستران پیشناتز ایرانیان، تهران - ملارد، ۱ خرداد. قلی زاده، ش. ۱۳۸۸. اثر کاربرد زئولیت کلسیمی-پتاسیمی بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و معادله نفوذ آب در خاک با شوری‌های مختلف آب آبیاری در خاک‌های مختلف. پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران، ۱۳۷ صفحه.

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

Andrenelli, M.C., Maienza, 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 (1):190-196.

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*, 5:132-143.

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(4): 263-268.

Burrell, L.D., Zehetner, F. Rampazzo, N. Wimmer, B. and Soja, G. 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282: 96-102.

- Chen, H.X., Du, Z.L. Guo, W. and Zhang, Q.Z. 2011. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain. *The Journal of Applied Ecology*, 22:2930-2934.
- Downie, A., Crosky, A. and Munroe, P. 2009. Physical properties of biochar. In Lehmann, J., and S. Joseph (eds) *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*. p. 13-32.
- Eastman, CM. 2011. Soil physical characteristics of an Aeric Ochraqualf amended with Biochar. The (Dissertation) Ohio State University. 134 pp.
- Githinji, L. 2014. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60: 457-470.
- Glab, T., Palmowska, J. Zaleski, T. and Gondek, K. 2016. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*, 281: 11-20.
- Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35: 219-230.
- Herath, H.M.S.K. 2012. Stability of Biochar and its Influence on the Dynamics of Soil Properties. (Dissertation) Massey University. 185 pp.
- Jeffery, S., Verheijen, F. Velde, M. Bastos, A.C. 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.
- Laird, D.A., Fleming, P. Davis, D.D. Horton, R. Wang, B. and Karlen, D.L. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158: 443-449.
- Lehmann, J., and Joseph, S. 2009. Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann J. and S. Joseph (eds.): *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 1-12.
- Lehmann, J., Rillig, M.C. Thies, J. Masiello, C.A. Hockaday, W.C. and Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 1812-1836.
- Lim, T.J., Spokas, K.A. eyereisen, G. F and Novak, J.M. 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, 142: 136-144.
- Major, J., Lehmann, J. Rondon, M. and Goodale, C. 2010. Fate of soil applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*, 16: 1366-1379.
- Mary, B., Recous, S. Darwis, D. and Robin, D. 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil*, 181: 71-82.
- Martinsen, V., Mulder, J. Shitumbanuma, V. Sparrevik, M. Børresen, T. and Cornelissen, G. 2014. Farmer-led maize biochar trials: Effect on crop yield and soil nutrients under conservation farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177: 681-695.
- Moutier, M., Shainberg, I. and Levy, G.J. 2000. Hydraulic gradient and wetting rate effects on the hydraulic conductivity of two calcium vertisols. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1211-1219.
- Mukherjee, A., and Lal, R. 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3: 313-339.
- Novak, J.M., Lima, I. Xing, B. Gaskin, J.W. Steiner, C. Das, K.C. and Busscher, W.J. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3: 195-206.
- Obia, A., Mulder, J. Martinsen, V. Cornelissen, G. and Børresen, T. 2016. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155:35-44.
- Peake, L.R., Reid, B.J. and Tang, X. 2014. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma*, 235:182-190.
- Suliman, W., Harsh, J.B. Abu-Lail, N.I. Fortuna, A.M. Dallmeyer, I. and Garcia-Pérez, M. 2017. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of The Total Environment*, 574:139-147.
- Summer, M.E., and Miller, W.P. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: D.L. Sparks *et al.* (Eds). *Methods of soil analysis*. Part 3. 3rd Ed. PP. 1201-1229.
- Sun, Z., Bruun, E.W. Arthur, E. De Jonge, L.W. Moldrup, P. Hauggaard-Nielsen, H. and Elsgaard, L. 2014. Effect of biochar on aerobic processes, enzyme activity, and crop yields in two sandy loam soils. *Biology and Fertility of Soils*, 50:1087-1097.
- 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.
- Uzoma, K.C., Inoue, M. Andry, H. Fujimaki, H. Zahoor, A. and Nishihara, E. 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil use and Management*, 27: 205-212.



ISSN 2251-7480

Effects of different levels of biochar on soil physical properties with different textures

Fatemeh Razzaghi^{1*} and Nahid Rezaie²

1) Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

* Corresponding author email: razzaghi@shirazu.ac.ir

2) M.sc. Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 31-12-2016

Accepted: 19-07-2017

Abstract

Biochar is a charcoal made from biomass and animal manure, which is produced by thermal decomposition under a limited or zero supply of oxygen. Therefore, the current research was conducted to evaluate the effect of different biochar levels on some soil physical and chemical properties in four soil types under greenhouse conditions. The experiment was performed in completely randomized design with four levels of biochar produced from wheat straw in 500°C (0 (as control), 25, 50 and 75 ton ha⁻¹) and four soils having various textures (sandy loam, loam, clay loam and clay) in three replications. Forty days after mixture of soil and biochar and determination of soil moisture content at field capacity, other physical and chemical parameters (soil moisture at permanent wilting point, bulk and particle density, saturated hydraulic conductivity and cation exchange capacity) were measured by taking soil samples from the pots. The results showed that application of biochar enhanced soil physical properties. Increasing biochar levels from 0 to 75 ton ha⁻¹ increased soil available water content, porosity, hydraulic conductivity and cation exchange capacity by 45, 13, 95 and 52 %, respectively. It is concluded that biochar can be used as a soil amendment in coarse textured soil to increase water holding capacity and in fine textured soil to improve the drainage and infiltration.

Keywords: bulk density, cation exchange capacity, saturated hydraulic conductivity , water holding capacity