

The effect of biochar particle size on physical and hydraulic properties and soil water characteristics curve of sandy loam soil

Reza Allahy Ashloblagh¹, Hamid Zareabyaneh^{*2}, Atefeh Azadifar³

1. M.Sc. Student, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: reza.elahi184@gmail.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: zare@basu.ac.ir
3. Ph.D. Student, Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: a.azadifar20@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: Investigating the application of biochar on the physical and hydraulic properties of soil is important due to its effect on water conservation and management. According to our knowledge, no complete studies have been done on the effect of sunflower stem biochar particle size on the physical, hydraulic and soil moisture characteristics of the soil. Therefore, the purpose of this research was to investigate the effect of sunflower stem biochar particle size on some physical and hydraulic properties of sandy loam soil in laboratory conditions.
Article history: Received: 05.07.2024 Revised: 06.02.2024 Accepted: 07.08.2024	
Keywords: Available water, Bulk density, Particle size, Saturated hydraulic conductivity, Sunflower stem biochar	Materials and Methods: In order to investigate the physical and hydraulic properties of the soil, a combination of 3% by weight of three sizes of 0.5, 0.5-1 and 1-2 mm sunflower stem biochar particles was used with a sandy loam soil. For this purpose, the parameters of bulk density, porosity, saturated moisture, field capacity moisture, available water, moisture at permanent wilting point, discharge, flow velocity, hydraulic conductivity, pore water velocity and soil water characteristics curves were measured.
	Results: The results showed that the size of biochar particles has a significant effect on physical and hydraulic properties at the 1% probability level and also on soil water retention at the 5% probability level. The application of 0.5-1 mm size of biochar had the greatest effect on soil properties, so that it caused a decrease of 14.74% in bulk density, an increase of 21.17, 22.5, 34.78 and 44.44% in porosity, saturated moisture, field capacity and available water compared to control soil. Application of 0-0.5 mm particles of biochar caused a 24.39% increase in permanent wilting moisture and a 92.93% decrease in discharge, flow velocity, hydraulic conductivity, and also a 94.04% decrease in pore water velocity compared to the control soil. Investigating the soil water characteristics curves showed that all three sizes of biochar particles increased water retention in the soil. Biochar caused an increase in volumetric moisture content at all measurement points, especially at suction from 0 to 2000 cm. In this range of suction, biochar increased medium and fine pores and thus increased soil water retention in this suction. The addition of biochar to the soil also increased the field capacity, permanent wilting point and available water.
	Conclusion: Arid and semi-arid areas with limited access to sustainable water resources generally have light textured soils with low water holding

capacity. Therefore, these soils are the priority for structure improvement and as a result improving physical and hydraulic properties. According to the obtained results, the application of biochar improves the physical and hydraulic characteristics of these soils. Therefore, the findings of this research can be very useful in water management.

Cite this article: Allahy Ashloblagh, Reza, Zareabyaneh, Hamid, Azadifar, Atefeh. 2024. The effect of biochar particle size on physical and hydraulic properties and soil water characteristics curve of sandy loam soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (2), 57-77.



© The Author(s).

DOI: [10.22069/jwsc.2024.22377.3725](https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.22377.3725)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

اثر اندازه ذرات زغال زیستی بر ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولیکی و منحنی رطوبتی خاک لوم‌شنی

رضا الهی آشلوبلاغ^۱، حمید زارع ابیانه^{۲*}، عاطفه آزادی‌فر^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: reza.elahi184@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: zare@basu.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: a.azadifar20@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: بررسی کاربرد زغال زیستی بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک به واسطه تأثیر در حفظ آب و مدیریت آن اهمیت دارد. بررسی منابع نشان داد که مورد اثر اندازه ذرات زغال زیستی ساقه گیاه آفتابگردان بر خصوصیات فیزیکی، هیدرولیکی و رطوبتی خاک مطالعات کاملی انجام نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر اندازه ذرات زغال زیستی ساقه گیاه آفتابگردان بر برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک لوم‌شنی در شرایط آزمایشگاهی بود.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳ تاریخ ویرایش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳	مواد و روش‌ها: در ابتدا زغال زیستی از قرار دادن زیست‌توده ساقه آفتابگردان در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۶ ساعت به دست آمد. پس از ادغام با خاک به مدت ۱۲۰ روز در شرایط رطوبتی ظرفیت زراعی نگهداری شد. به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک از ترکیب ۳ درصد وزنی سه اندازه ۰/۵-۰، ۰/۵-۱ و ۱-۲ میلی‌متر ذرات زغال زیستی ساقه آفتابگردان با یک خاک لوم‌شنی استفاده شد. بدین منظور پارامترهای جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، آب قابل دسترس، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم، شدت جریان، سرعت جریان، هدایت هیدرولیکی، سرعت آب حفره‌ای و منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شد.
واژه‌های کلیدی: آب قابل دسترس، اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری، زغال زیستی ساقه آفتابگردان، هدایت هیدرولیکی اشباع	یافته‌ها: نتایج نشان داد که اندازه ذرات زغال زیستی بر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی در سطح احتمال ۱ درصد و همچنین بر نگهداشت آب خاک در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر معنی‌داری دارد. کاربرد اندازه ۰/۵-۱ میلی‌متری زغال زیستی بیش‌ترین تأثیر را بر خصوصیات خاک داشت به‌طوری‌که باعث کاهش ۱۴/۷۴ درصدی جرم مخصوص ظاهری، افزایش

۲۱/۱۷، ۲۲/۵، ۳۴/۷۸ و ۴۴/۴۴ درصدی تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل دسترس نسبت به خاک شاهد شد. کاربرد اندازه ذرات ۰-۰/۵ میلی‌متر زغال زیستی موجب افزایش ۲۴/۳۹ درصدی رطوبت پژمردگی دائم و کاهش ۹۲/۹۳ درصدی شدت جریان، سرعت جریان، هدایت هیدرولیکی و همچنین کاهش ۹۴/۰۴ درصدی سرعت آب حفره‌ای نسبت به خاک شاهد شد. بررسی منحنی مشخصه رطوبتی نشان داد هر سه اندازه ذرات زغال زیستی سبب افزایش نگهداشت آب در خاک شد. زغال زیستی باعث افزایش رطوبت حجمی در همه نقاط اندازه‌گیری به‌ویژه در مکش ۰ تا ۲۰۰۰ سانتی‌متر شد. در این دامنه از مکش، زغال زیستی باعث افزایش منافذ متوسط و ریز و در نتیجه افزایش نگهداشت آب خاک در این مکش شد. افزودن زغال زیستی به خاک هم‌چنین سبب افزایش رطوبت ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل استفاده شد.

نتیجه‌گیری: مناطق خشک و نیمه خشک با دسترسی محدود به منابع آبی پایدار، عموماً دارای خاک‌های با بافت سبک با ظرفیت نگهداری آب کم هستند. بنابراین این خاک‌ها در اولویت اصلاح ساختمان و در نتیجه بهبود خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی می‌باشند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش کاربرد زغال زیستی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی این خاک‌ها را بهبود می‌بخشد. بنابراین یافته‌های این پژوهش در مدیریت آب بسیار کاربردی است.

استناد: الهی آشلوبلاغ، رضا، زارع ابیانه، حمید، آزادی‌فر، عاطفه (۱۴۰۳). اثر اندازه ذرات زغال زیستی بر ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولیکی و منحنی رطوبتی خاک لوم‌شنی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۱ (۲)، ۵۷-۷۷.

DOI: [10.22069/jwsc.2024.22377.3725](https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.22377.3725)



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

زغال زیستی حاصل از سوختن ناقص باقی‌مانده‌های گیاهی در محیط کم اکسیژن است. زغال زیستی با صفات فیزیکی خاص، خلل و فرج زیاد، محیطی مساعد برای نگه‌داشت رطوبت، مطلوب برای رشد و تکثیر میکروب‌ها، باکتری‌ها و قارچ‌های مفید برای گیاهان است. زغال زیستی با هدف ترسیب کربن و بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی خاک دارای ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، توزیع وسیع اندازه منافذ و سطح ویژه زیاد، توانایی خاک در دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی را در زیست‌بوم‌های کشاورزی فراهم می‌سازد و از هدررفت منابع نیتروژن خاک پیش‌گیری می‌نماید (۱ و ۲). از طرفی زغال زیستی قدرت ماندگاری بالایی را در تثبیت بلندمدت کربن خاک برای سال‌های طولانی دارد که به‌عنوان راه‌کاری در جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای و پدیده گرمایش کره زمین، ارزش زیست‌محیطی بالایی دارد (۳). مطالعات نشان می‌دهد که اضافه کردن زغال زیستی به خاک‌های با بافت سبک به‌طور قابل توجهی باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری (۴)، بهبود ساختار و توزیع منافذ (۵) و افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (۶ و ۷). بارنس و همکاران (۲۰۱۴) و جی‌تین‌جی (۲۰۱۴) دریافتند که کاربرد زغال زیستی در خاک‌های درشت دانه به‌واسطه قرار گرفتن در منافذ درشت موجب کند شدن حرکت آب و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع می‌گردد (۸ و ۹). آجی و هورن (۲۰۱۵) کاهش ۲۳ و ۸۲ درصدی هدایت هیدرولیکی اشباع را به‌ترتیب در خاک شنی و ماسه‌ای (ماسه بادی) اصلاح شده با زغال زیستی گزارش کردند (۱۰). تأثیر زغال زیستی روی خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های سبک به‌عوامل مختلفی مانند نوع ماده اولیه، دمای تجزیه، نرخ کاربرد و اندازه ذرات زغال زیستی وابسته است

(۱۱ و ۱۲). ما و همکاران (۲۰۱۶) اثرات مثبت مصرف سه ساله زغال زیستی را بر پایداری خاکدانه‌ها و موجودیت رطوبت خاک از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی خاک، کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش کربن آلی خاک، افزایش نیتروژن کل و آب در دسترس گیاه گزارش نمودند (۱۳). مطالعات صورت گرفته در سال‌های اخیر نشان‌دهنده کارایی زغال زیستی در ترسیب کربن در خاک و اصلاح‌کننده خاک‌های کشاورزی است (۱۴). پیری و همکاران (۲۰۲۳) اوپانگ و همکاران (۲۰۱۳)، کانگ و همکاران (۲۰۲۲) و گائولو و همکاران (۲۰۱۴) نیز اثرات مطلوبی از زغال زیستی‌های مختلف را در بهبود ساختمان خاک، ظرفیت نگهداری آب، هدایت هیدرولیکی اشباع و تهویه خاک‌های کشاورزی گزارش دادند (۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸). پژوهش‌های انجام شده نشان‌دهنده اثرات اصلاحی بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، تحت‌تأثیر نوع ماده آلی اولیه زغال زیستی تولیدی، شرایط گرماکافت^۱، اندازه ذرات زغال زیستی، میزان و زمان بیوچار مصرفی است (۱۹ و ۲۰). اگری و همکاران (۲۰۱۵) اثر اندازه ذرات زغال زیستی بر نگهداشت آب در خاک را حلقه مفقوده برهم‌کنش ذرات زغال زیستی با ماتریس خاک دانستند (۲۱). به اعتقاد آنان زغال زیستی‌های با اندازه ذرات کوچک‌تر، سطح ویژه و خلل و فرج ریزتر بیش‌تری نسبت به زغال زیستی‌های با اندازه ذرات بزرگ‌تر دارند که می‌تواند دلیل احتمالی کارآمدی بیش‌تر زغال زیستی در نگه‌داشت آب خاک باشد (۲۱). زغال زیستی‌های با اندازه ذرات درشت‌تر دارای منافذ درون حفره‌ای می‌باشند، که ممکن است علاوه‌بر فضای ایجاد شده بین زغال زیستی و ذرات خاک، مکانی برای حفظ بیش‌تر آب ایجاد کند (۱). استفاده از زغال زیستی در اندازه ذرات متفاوت، ویژگی

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌های جرم مخصوص ظاهری خاک، تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت پژمردگی دائم و آب قابل دسترس حاصل آزمایش‌های مربوطه بود که در آزمایشگاه تحقیقاتی زهکشی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان در سال ۱۴۰۲ انجام شد. آزمایش‌ها شامل یک تیمار خاک شاهد (S) فاقد زغال زیستی که به‌عنوان تیمار شاهد (S0) بود. تیمارهای دوم، سوم و چهارم به‌ترتیب شامل ۳ درصد وزنی زغال زیستی ساقه آفتابگردان با سه سطح از اندازه ذرات ۰/۵- (SB1)، ۰/۵-۱ (SB2) و ۱-۲ (SB3) میلی‌متر زغال زیستی در ترکیب با خاک طبیعی بود. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد (۲۶). خاک مورد نظر از لایه ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری مزارع مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان برداشت و جهت آماده‌سازی و آزمایش‌های اولیه به آزمایشگاه انتقال یافت. نمونه خاک‌های برداشتی پس از هوا خشک شدن و حذف بقایای سنگ و کلوخه‌ها، با چکش پلاستیکی خرد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. از ساقه‌های آفتابگردان جمع‌آوری شده از مزارع شهر شاهین‌دژ استان آذربایجان غربی در اندازه‌های کم‌تر از ۲ سانتی‌متر به‌عنوان منبع زغال زیستی استفاده شد. ساقه‌ها در آزمایشگاه، به‌مدت ۹۶ ساعت هوا خشک شدند. زغال زیستی مورد نیاز حاصل اعمال فرایند گرماکافت به‌روش پیرولیز بر ساقه‌ها در یک کوره الکتریکی تهویه‌دار به‌مدت ۶ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس بود. زغال زیستی پس از عبور از الک ۲، ۱ و ۰/۵ میلی‌متری، به‌میزان ۳ درصد وزنی با خاک ادغام و در تیمارهای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام آزمایش از ستون‌هایی از جنس PVC به قطر ۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر استفاده شد. ستون‌ها بر اساس حجم ستون و جرم

فضاهای خالی داخلی خاک از جمله حجم منافذ، اتصال منافذ و اعوجاج را تغییر می‌دهد، که به‌نوبه خود بر حفظ و انتقال آب در خاک تأثیر می‌گذارد (۲۲). در مجموع می‌توان چنین بیان نمود که خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلایل مختلفی چون فقدان پوشش گیاهی کافی به‌واسطه کمبود بارش، دمای بالا، حذف باقی‌مانده‌های گیاهی از سطح مزارع و استفاده از کودهای شیمیایی برای افزایش تولیدات، از کربن آلی کمی برخوردارند (۲۳). با توجه به اثرات مثبت کربن آلی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و تأثیر آن در افزایش تولیدات محصولات کشاورزی، پژوهش‌گران به‌دنبال روش‌های افزایش کربن آلی خاک هستند. بنابراین توسعه کشاورزی و کاهش آلودگی‌های جوی ناشی از باقی‌مانده‌های محصولات کشاورزی از یک‌سو و حدود شش هزار هکتار سطح زیر کشت گیاه آفتابگردان در ایران طی سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ (۲۴) از دیگر سو، فرض استفاده از باقی‌مانده‌های این گیاه در قالب زغال زیستی در زمین‌های کشاورزی به‌منظور بهبود خصوصیات رطوبتی خاک‌های کشاورزی و افزایش عملکرد محصولات تولیدی را تقویت می‌نماید. ساقه آفتابگردان به‌دلیل پایین بودن ارزش غذایی، برای تغذیه دام مناسب نمی‌باشد. بنابراین سالیانه حجم قابل‌توجهی از این پسماند کشاورزی توسط کشاورزان سوزانده می‌شود که از نظر زیست‌محیطی بسیار مشکل‌زا است (۲۵). بررسی منابع نیز نشان داد در زمینه اثر اندازه ذرات زغال زیستی ساقه گیاه آفتابگردان بر خصوصیات فیزیکی، هیدرولیکی و رطوبتی خاک مطالعات کاملی انجام نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر اندازه ذرات زغال زیستی ساقه گیاه آفتابگردان بر برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک لوم‌شنی در شرایط آزمایشگاهی بود.

مخصوص ظاهری خاک تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری پر شدند. ستون‌های تهیه شده به مدت ۱۲۰ روز در شرایط رطوبتی ظرفیت زراعی و در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. برای ایجاد شرایط اشباع بار آبی ۵ سانتی‌متری در طول آزمایش بر روی ستون‌های خاک حفظ شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و زغال زیستی تولیدی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و زغال زیستی مورد بررسی.

Table 1. Some chemical and physical properties of the studied soil and biochar.

ویژگی Properties		ویژگی Properties		اندازه ذرات Particle Size		مقدار (g) Amount		تیما Treatment
زغال Biochar	خاک Soil	پارامتر Parameter	زغال Biochar	خاک Soil	پارامتر Parameter	زغال Biochar	خاک Soil	
1286.5	1424	کلسیم Ca (mgkg ⁻¹)	0.34	1.53	جرم مخصوص ظاهری Bulk density (gcm ⁻¹)	0	لوم‌شنی Sandy Loam	SB0
67262.52	2100.1	پتاسیم K (mgkg ⁻¹)	35.1	0.52	کربن آلی Organic Carbon (%)	<0.5	60.26	شن Sand (%)
146.52	54.95	سدیم Na (mgkg ⁻¹)	60.51	0.9	ماده آلی Organic materials	0.5-1	25.6	سیلت Silt (%)
6.92	0.153	هدایت الکتریکی EC (dsm ⁻¹)	10.05	8.02	اسیدیته pH(-)	1-2	14.14	رس Clay (%)

به‌همین ترتیب رطوبت در نقطه پژمردگی دائم^۲ به‌کمک دستگاه صفحات فشاری در مکش ۱۵ بار و آب قابل دسترس^۳ از اختلاف رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی (در مکش ۰/۳۳ اتمسفر) و پژمردگی دائم (در مکش ۱۵ اتمسفر) به‌دست آمد (۳۱). ترسیم منحنی مشخصه رطوبتی خاک و خاک اصلاح شده با زغال زیستی ساقه آفتابگردان براساس اختلاف وزن نمونه خاک‌ها در مکش‌های ۰، ۳۳، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر در دستگاه صفحات فشاری با نمونه‌های خشک شده گرمخانه

بافت خاک به‌روش هیدرومتری (۲۷)، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از سیلندرهای استوانه‌ای، درصد ماده آلی و درصد کربن آلی به‌روش والکلی و بلک (۲۸)، قابلیت هدایت الکتریکی و اسیدیته در عصاره گل اشباع به‌روش هالوسچاک (۲۹)، هدایت هیدرولیکی خاک به‌روش بار ثابت (۳۰)، سدیم، پتاسیم و کلسیم با استات آمونیوم نرمال به‌دست آمد. رطوبت اشباع برابر اختلاف وزن نمونه خشک و اشباع، رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه^۱ معادل اختلاف وزن نمونه‌های مرطوب با وزن متناظر نمونه‌های خاک خشک در گرمخانه لحاظ شد.

2- Permanent Wilting Point

3- Available Water

1- Field capacity moisture

انجام شد (۳۲). ترسیم کامل منحنی رطوبتی و توابع هیدرولیکی خاک در بازه مکشی ۰ تا ۱۵۰۰ سانتی متر با برازش مدل ون گنوختن با n و m وابسته به هم بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی در نرم‌افزار RETC انجام شد. چیدمان آزمایش بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در مقیاس آزمایشگاهی بود. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 و مقایسه میانگین‌ها به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها در قالب سه اندازه زغال زیستی بر برخی پارامترهای

خصوصیات فیزیکی خاک آمده است. جدول ۲ نشان می‌دهد اثر هر سه اندازه ذرات $0-0/5$ ، $0/5-1$ و $1-2$ میلی‌متر زغال زیستی در ترکیب با خاک لوم شنی بر جرم مخصوص ظاهری، سرعت آب حفره‌ای، هدایت هیدرولیکی اشباع، شدت جریان و سرعت جریان نسبت به تیمار شاهد در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. به‌همین ترتیب تأثیر تیمارهای اندازه ذرات زغال زیستی بر ویژگی‌های آب قابل دسترس، رطوبت نقطه اشباع، میزان رطوبت در ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. در مجموع زغال زیستی بر تمامی متغیرهای مورد بررسی اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد دارد.

حدول ۲- نتایج تجزیه واریانس یارامترهای اندازه‌گیری شده.

Table 2. The results of variance analysis (mean square and degree of freedom) of the measured parameters.

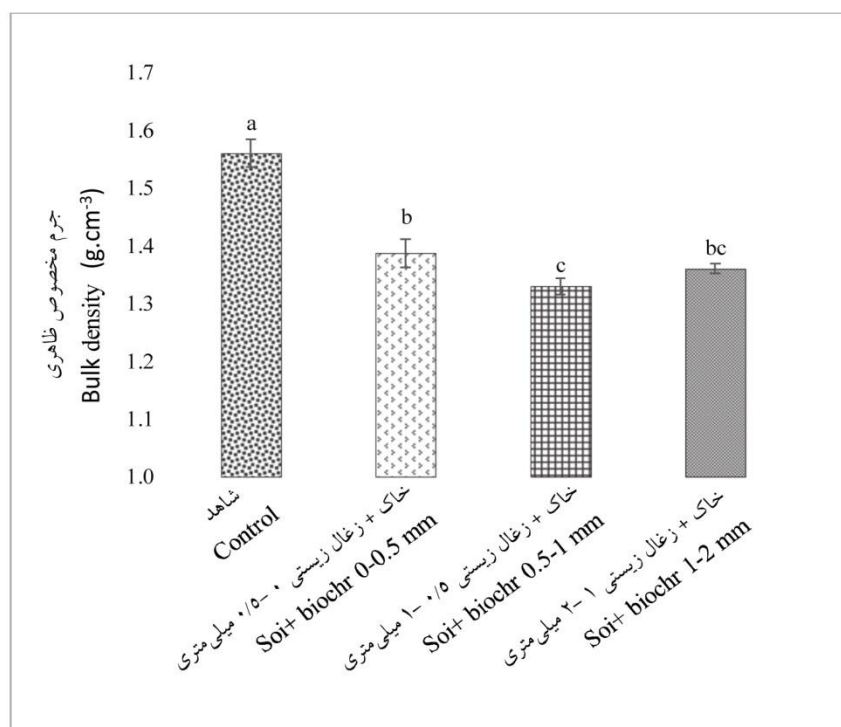
میانگین مربعات Mean of squares										درجه آزادی Degrees of Freedom	منابع Index
سرعت جریان Flow velocity	شدت جریان Discharge	هدایت هیدرولیکی اشباع Saturated hydraulic conductivity	سرعت آب خفروای Pore water velocity	رطوبت حجمی Volumetric water			آب قابل دسترس Available Water	تخلخل Porosity	جرم مخصوص ظاهری Bulk density		
پرمردگی Permanent Wilting Point	زراعی Field	اشباع saturated									
0.098**	59.3**	0.043**	0.60**	0.00018*	0.0038*	0.0046*	0.0031*	0.0045**	0.03194**	3	تیمار Treatment
0.0007	0.42	0.0003	0.005	0.0003	0.00017	0.00048	0.0001	0.00006	0.00005	8	خطا Error
15.9	15.9	15.9	19.6	13.53	4.72	4.8	4.51	1.74	1.67	-	ضریب تغییرات C.V

*** و * به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد، ns فاقد اثر

* and ** significant at the 1% and 5% probability level, respectively. ^{ns} no effect

افزودن زغال زیستی به خاک، به نوع زغال زیستی، درصد زغال زیستی، اندازه ذرات زغال زیستی و بافت خاک بستگی دارد. در شکل ۱ تأثیر اندازه ذرات زغال زیستی ساقه گیاه آفتابگردان بر خصوصیت وزن مخصوص ظاهری خاک نشان داده شده است.

در ادامه مقایسه میانگین اثرات ساده تأثیر زغال زیستی بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده فیزیکی و هیدرولیکی خاک آمده است. نتایج کلی نشان‌دهنده بهبود شرایط تیمارها به واسطه افزودن زغال زیستی به خاک می‌باشد (۳۳). البته میزان تغییرات ناشی از



شکل ۱- مقایسه میانگین جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) در پاسخ به کاربرد زغال زیستی در خاک. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

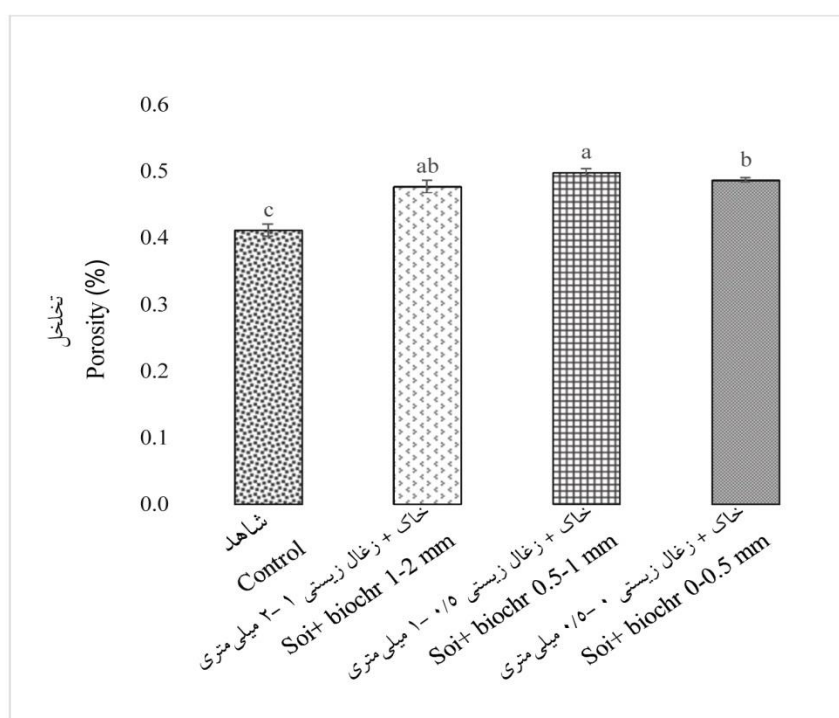
Figure 1. Mean comparisons of bulk density of soil (g cm^{-3}) in response to biochar application in soil; Different letters on the bars stand for significant differences based on Duncan's test at probability level of 5%.

میلی متر کاهش یافت. به عبارت دیگر جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمار SB1، SB2 و SB3 به ترتیب ۱۲/۸۲، ۱۴/۷۴ و ۱۰/۹۰ درصد کمتر از تیمار شاهد بود. تیمار خاک دارای زغال زیستی با اندازه ذرات زغال زیستی ۰/۵-۱ میلی متر (تیمار SB2) بیش‌ترین کاهش تخلخل را در مقایسه با تیمار شاهد تجربه نمود. کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمارهای حاوی زغال زیستی می‌تواند ناشی از اختلاط خاک با ماده‌ای دارای جرم مخصوص ظاهری

نتایج مقایسه میانگین‌ها در شکل ۱ بیانگر کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک در اثر استفاده از زغال زیستی نسبت به تیمار شاهد است. مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک از ۱/۵۶ گرم بر سانتی متر مکعب در تیمار شاهد (S0) به ۱/۳۶ در تیمار SB1 حاوی زغال زیستی با اندازه ذرات ۰-۰/۵ میلی متر، ۱/۳۳ در تیمار SB2 دارای زغال زیستی با اندازه ذرات ۰/۵-۱ میلی متر و ۱/۳۹ گرم بر سانتی متر مکعب در تیمار SB3 با اندازه ذرات زغال زیستی ۱-۲

همکاران (۲۰۱۰) (۴)، بر بهبود ساختار و توزیع منافذ توسط سان و همکاران (۲۰۱۳) (۵) و در افزایش پایداری خاکدانه‌ها از سوی ابراهیم و همکاران (۲۰۱۳) (۶) و اویبا و همکاران (۲۰۱۶) گزارش شده است (۷). شکل ۲ مقایسه میانگین اثر اندازه ذرات زغال زیستی بر صفت تخلخل خاک در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد که حاکی از افزایش مقدار تخلخل خاک در تیمارهای حاوی زغال زیستی است.

کم‌تر و ماده آلی بیش‌تر باشد. در تأیید این نتیجه جدول ۱، نشان می‌دهد جرم مخصوص ظاهری زغال زیستی ۰/۳۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب است که ۷۷/۷۷ درصد از جرم مخصوص ظاهری خاک کم‌تر است. ماده آلی سبب بهبود ساختمان خاک، ایجاد و پایداری خاکدانه‌ها و به‌تبع کاهش چگالی خاک می‌شود. تأثیر زغال زیستی بر کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، به‌ویژه در خاک‌های سبک در مطالعات لایرد و



شکل ۲- مقایسه میانگین تخلخل در پاسخ به کاربرد زغال زیستی در خاک.

حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

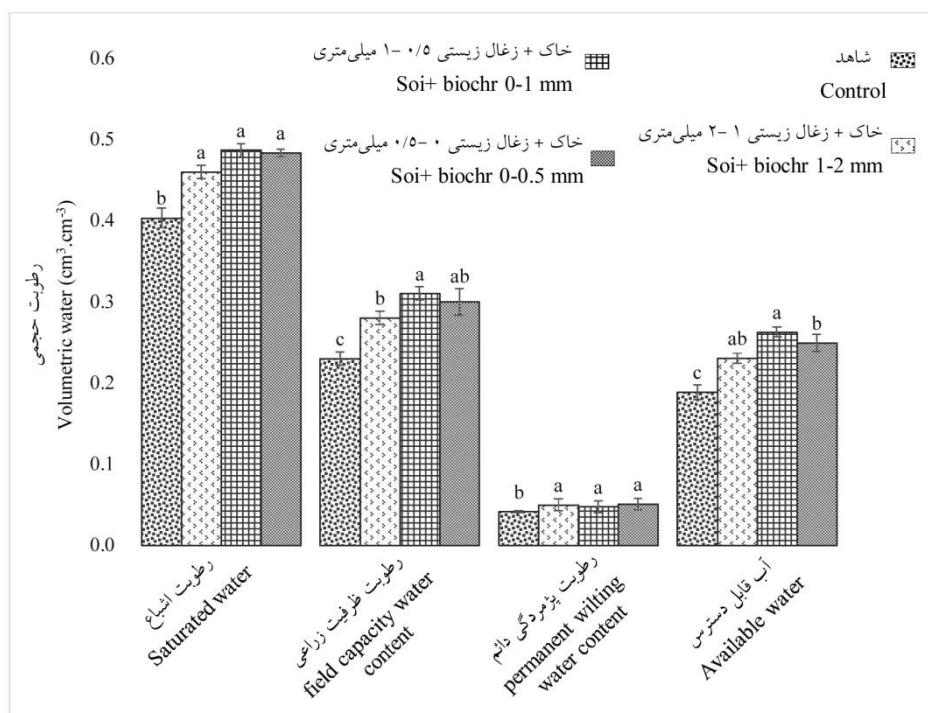
Figure 2. Mean comparisons of porosity in response to biochar application in soil; Different letters on the bars stand for significant differences based on Duncan's test at probability level of 5%.

تخلخل در تیمار SB2 نسبت به تیمار شاهد شد که بیش‌ترین تأثیر افزایشی مرتبط با تخلخل به تیمار SB2 مربوط بود. مقدار تخلخل در تیمار SB2 برابر ۴۹/۸ درصد بود که رتبه دوم تغییرات را داشت (شکل ۲). مشابه چنین افزایشی برای تیمار SB3 نیز برقرار است و تخلخل از ۴۱/۱ درصد با ۱۵/۸۲ درصد افزایش، به ۴۷/۶ درصد تغییر یافت. صادقی و

مطابق شکل ۲ افزودن زغال زیستی اثر معنی‌داری در سطح ۵ درصد در افزایش تخلخل خاک نسبت به خاک تیمار شاهد دارد. به‌طوری‌که مقدار تخلخل از ۴۱/۱ درصد در تیمار شاهد با ۱۸/۲۵ درصد افزایش به ۴۸/۶ درصد در تیمار SB1 تغییر یافت. به‌همین ترتیب افزودن زغال زیستی با اندازه ذرات ۰-۱/۵ میلی‌متر سبب افزایش معنی‌دار ۲۱/۱۷ درصدی

سبک به واسطه بهبود وضعیت خاکدانه‌ها و افزایش پایداری آن‌ها در تیمارهای حاوی زغال زیستی از سوی جین و وانگ (۲۰۱۳) و تجادا و گونزالس (۲۰۰۷) نیز گزارش شده است (۳۷ و ۳۸). در شکل ۳ اثر اندازه زغال زیستی ساقه آفتابگردان بر ویژگی‌های رطوبتی خاک سبک آمده است. همان‌گونه که شکل ۳ نشان می‌دهد اضافه کردن زغال زیستی به خاک سبب افزایش معنی‌دار رطوبت خاک شده است. مقدار رطوبت اشباع در تیمار خاک شاهد (فاقد زغال زیستی) ۰/۴۰ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب بود که به ۰/۴۸ در تیمار SB1، ۰/۴۹ در تیمار SB2 و ۰/۴۶ در تیمار SB3 افزایش یافت. بیش‌ترین تأثیر زغال زیستی در افزایش رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت قابل دسترس در اندازه ذرات ۱-۰/۵ میلی‌متر مشاهده شد که نسبت به تیمار خاک شاهد معنی‌دار بود (شکل ۳).

همکاران (۲۰۱۶) افزایش تخلخل خاک را ناشی از نقش کربن‌های فعال زغال زیستی در اتصال ذرات ریز خاک، دانسته‌اند (۳۴). در همین راستا جدول ۱، نشان می‌دهد مقادیر کربن آلی و ماده آلی خاک ۰/۵۲ و ۰/۹۰ درصد است که کم‌تر از مقادیر متناظر کربن آلی زغال زیستی (۳۵/۱ درصد) و ماده آلی زغال زیستی (۶۰/۵۱ درصد) است. بنابراین افزودن زغال زیستی به عنوان یک ماده آلی کربن‌دار به خاک سبب اثرگذاری کربن در اتصال ذرات خاک و افزایش تخلخل خاک می‌شود. تانور و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند سطح ویژه و تخلخل زیاد زغال زیستی در افزایش تخلخل خاک نقش دارند (۳۵). نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های هسو و همکاران (۲۰۱۴) مبنی بر نقش زغال زیستی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و تخلخل خاک هم‌خوانی دارد (۳۶). در همین راستا افزایش تخلخل و چگالی خاک در خاک‌های با بافت



شکل ۳- مقایسه میانگین رطوبت حجمی در پاسخ به کاربرد زغال زیستی در خاک.

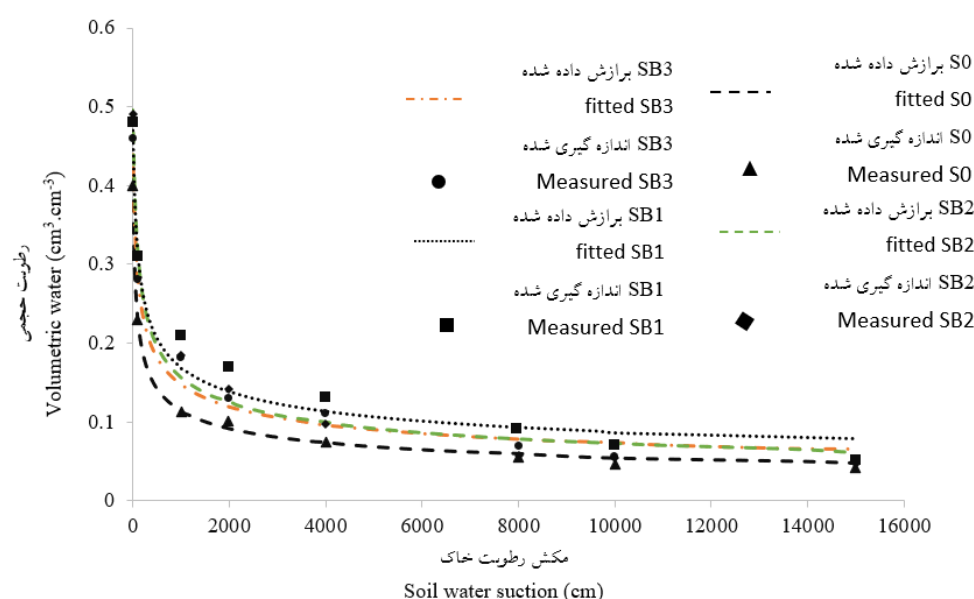
حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

Figure 3. Mean comparisons of volumetric moisture in response to biochar application in soil; Different letters on the bars stand for significant differences based on Duncan's test at probability level of 5%.

مطابق نتایج شکل ۳ اندازه ذرات ۱-۰/۵ میلی‌متر زغال زیستی سبب افزایش ۳۴/۷۸ درصد تغییرات در رطوبت ظرفیت زراعی از ۰/۲۳ به ۰/۳۱، افزایش ۲۲/۵ درصدی رطوبت اشباع از ۰/۴۰ به ۰/۴۹ و ۴۴/۴۴ درصدی آب قابل دسترس خاک از ۰/۱۸ به ۰/۲۶ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب شد. در مقابل افزایش رطوبت در نقطه پژمردگی دائم ناشی از اندازه ذرات ۱-۰/۵ میلی‌متر نسبت به تیمار شاهد در حد ۱۴/۶۳ درصد بود. در این خصوص نیز بیش‌ترین افزایش رطوبت در نقطه پژمردگی دائم در اندازه ذرات ۰/۵-۰ میلی‌متر (تیمار SB1) نسبت به تیمار شاهد (S0) به اندازه ۲۴/۳۹ درصد مشاهده شد. مقادیر افزایش رطوبت نقطه پژمردگی دائم در هر سه اندازه ذرات زغال زیستی نسبت به تیمار شاهد فاقد تفاوت معنی‌دار بود (شکل ۳). دلیل این امر می‌تواند در تأثیر زغال زیستی بر تشکیل منافذ ذخیره‌ای جدید در قالب منافذ ثانویه و تغییر در اندازه و تراکم خاکدانه‌های خاک در جهت افزایش ذخیره آب قابل‌دسترس در خاک باشد (۳۹). ما و همکاران (۲۰۱۶) و دهقانی احمدآبادی و همکاران (۱۳۹۷) نشان دادند زغال زیستی به‌نحو مؤثری توانایی خاک بر نگهداشت رطوبت و بهبود ظرفیت آب خاک نقش دارد (۱۳ و ۴۰). در مجموع می‌توان چنین بیان نمود که اثر زغال زیستی بر مقادیر رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی و میزان آب در دسترس افزایشی بود. افزایش در مؤلفه‌های رطوبتی می‌تواند ناشی از خلل و فرج‌های زغال زیستی و ایجاد فضاهای جدید در خاک حاوی زغال زیستی باشد که فضای مناسبی برای نگهداشت رطوبت در خاک ایجاد می‌کنند (۴۱). نتایج این پژوهش نشان داد که زغال زیستی ضمن بهبود اندازه خلل و فرج خاک، می‌تواند به‌عنوان یک اصلاح‌کننده مؤثر در بهبود خصوصیات فیزیکی خاک، افزایش رطوبت خاک و آب قابل‌دسترس خاک

به‌منظور حفظ رطوبت خاک و تامین رطوبت گیاه نقش مؤثری ایفا نماید. از دیگر نتایج پژوهش حاضر آن‌که بیش‌ترین مقادیر رطوبتی خاک (به‌جز رطوبت نقطه پژمردگی خاک) در تیمار با اندازه ذرات زغال زیستی ۱-۰/۵ میلی‌متر یعنی تیمار SB2 مشاهده شد. ضمن آن‌که زغال زیستی موجب افزایش غیرمعنی‌دار رطوبت نقطه پژمردگی دائم در تمامی تیمارهای SB1، SB2 و SB3 نسبت به تیمار شاهد (S0) شد (شکل ۳). در واقع کاربرد زغال زیستی بر نگهداری رطوبت در نقطه پژمردگی دائم تأثیر افزایشی غیرمعنی‌دار داشت. علت عدم معنی‌داری تغییرات رطوبتی در نقطه پژمردگی دائم، این است که تغییرات رطوبت در مکش‌های ماتریک بالا عموماً تحت کنترل بافت خاک و منافذ ریز آن است (۴۲). ولی رفتار رطوبتی خاک در مکش‌های کم، مانند نقطه اشباع، نقطه ظرفیت زراعی و آب قابل دسترس خاک، رفتار رطوبتی خاک، تحت کنترل ساختمان خاک و تخلخل درشت است (۴۲). آندرنلی و همکاران (۲۰۱۶) هم بیان نمودند که تأثیر بیوچار در اصلاح شرایط ساختمانی خاک، تخلخل درشت و عدم تغییر در بافت می‌باشد (۱۹). بنابراین با توجه به نقش زغال زیستی در افزایش رطوبت خاک، می‌توان در انتخاب اندازه ذرات زغال زیستی و مقدار زغال زیستی به‌منظور افزایش رطوبت خاک مدیریت نمود که در این پژوهش افزودن ۳ درصد وزنی زغال زیستی ساقه گیاه آفتابگردان با اندازه ذرات ۱-۰/۵ میلی‌متر مناسب تشخیص داده شد.

در شکل ۴ تأثیر اندازه ذرات زغال زیستی بر منحنی رطوبتی خاک در دامنه نقطه اشباع تا نقطه پژمردگی دائم ترسیم شده است. در این شکل تغییرات منحنی رطوبتی تیمارهای حاوی سه سطح اندازه ذرات زغال زیستی نسبت به تیمار شاهد فاقد زغال زیستی و هم‌چنین منحنی‌های رطوبتی برازش یافته به نقاط اندازه‌گیری، نشان داده شده است.



شکل ۴- منحنی مشخصه رطوبتی خاک شاهد و خاک اصلاح شده با زغال زیستی.

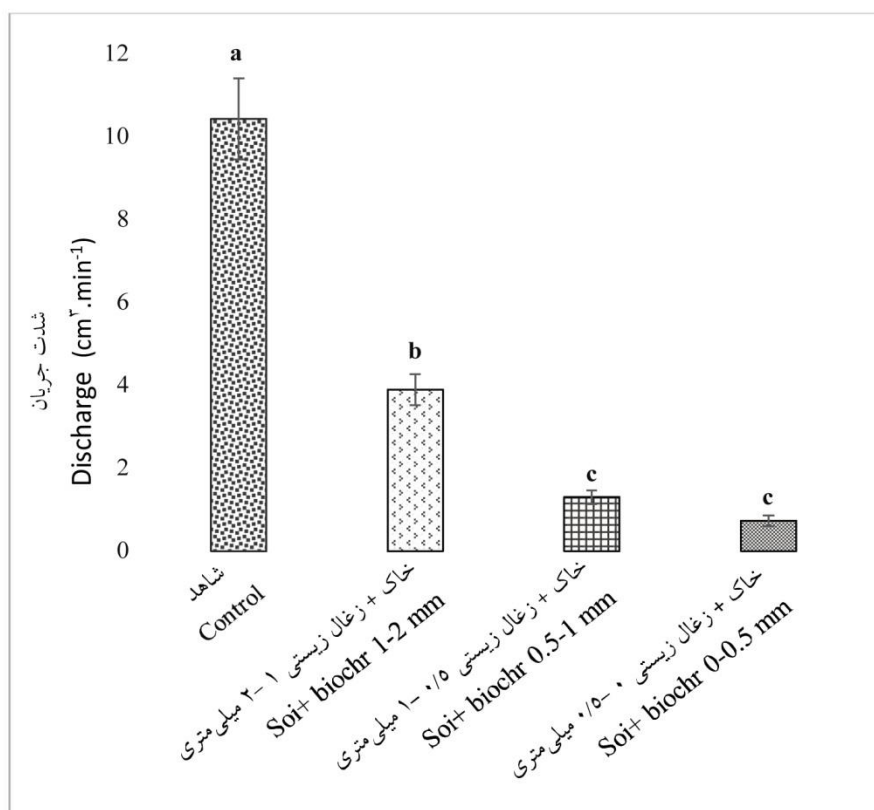
Figure 4. Soil water characteristics curves of natural soil and biochar amended soil.

کاهش و در امتداد محور افقی امتداد می‌یابد. این بخش از منحنی رطوبتی از مکش ماتریک ۸۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر ناحیه برون‌جذبی است که در پتانسیل‌های بسیار منفی قرار دارد. بنابراین مقدار رطوبت در ناحیه برون‌جذبی کم و تقریباً ثابت است و آب نه تنها توسط موئینگی بلکه به‌صورت غشاءهایی بر روی سطوح ریز خاکدانه‌ها حفظ می‌شود. شکل ۴ نشان می‌دهد منحنی رطوبتی تیمار شاهد در موقعیت پایین‌تر رطوبتی نسبت به منحنی رطوبتی دیگر تیمارها قرار دارد که بیانگر کم‌تر بودن ذخیره رطوبتی در این تیمار است. در مقابل دو منحنی رطوبتی تیمارهای SB2 و SB3 رفتار مشابه و منطبق بر یکدیگر اما متفاوت با تیمار شاهد را دارند. به‌همین ترتیب منحنی رطوبتی SB1 نسبت به دیگر منحنی‌های رطوبتی در مکان بالاتری قرار دارد که نشان‌دهنده نقش اندازه ذرات زغال زیستی در ذخیره رطوبت در خاک است. تیمار SB1، به‌دلیل کوچک‌تر بودن اندازه ذرات زغال زیستی، سطح ویژه بالاتری دارد و به‌همین دلیل از رطوبت بیش‌تری نسبت به سایر تیمارها برخوردارند.

بررسی و مقایسه تأثیر سطوح مختلف اندازه ذرات زغال زیستی بر مقادیر رطوبت حجمی خاک در مکش‌های مختلف نشان داد که افزودن زغال زیستی به خاک موجب افزایش مقادیر رطوبت حجمی بین نقطه اشباع تا نقطه پژمردگی دائم در تیمارهای حاوی زغال زیستی نسبت به مقادیر متناظر آن در تیمار خاک شاهد شد. به‌عبارت دیگر در هر سه تیمار خاک دارای زغال زیستی برازش داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه رطوبتی خاک با مدل ونگنوختن نشان داد که افزودن زغال زیستی به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک سبب افزایش سهم منافذ ساختمانی و به‌تبع بهبود پارامترهای منحنی رطوبتی خاک می‌شود. با بررسی منحنی‌های رطوبتی مشاهده شد که افزودن زغال زیستی به خاک، رطوبت حجمی خاک لوم‌شنی، افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر به‌ازای هر مقدار مکش معین، محتوای رطوبت حجمی موجود در خاک حاوی زغال زیستی، بیش‌تر و بزرگ‌تر است. ولی این افزایش برای منحنی‌های رطوبتی در مکش‌های پایین بیش‌تر و در مکش‌های بالا شیب منحنی‌های رطوبتی

است. مقادیر n در تیمارهای SB1، SB2 و SB3 به ترتیب ۱/۳، ۱/۳۴ و ۱/۳۱ به دست آمد که از n تیمار شاهد یعنی مقدار ۱/۲۶ کم تر می باشد. پارامتر n بیان کننده شکل منحنی و مرتبط با توزیع اندازه منافذ در خاک است. تأثیر پارامتر n در مدل ون گنوختن در بخش های میانی و پرشیب منحنی یعنی دامنه مکش ۰ تا ۲۰۰۰ سانتی متر در شکل ۴ است (۴۳). در بررسی تأثیر زغال زیستی بر پارامترهای منحنی های مشخصه آب خاک مشخص شد، افزودن زغال زیستی به خاک، محتوای آب اشباع (θ_s)، محتوای آب باقی مانده (θ_r) را افزایش و پارامتر تجربی (α) را کاهش داد. تغییرات پارامتر α وابسته به نوع خاک است و زغال زیستی افزوده شده در تیمارهای SB1، SB2 و SB3، موجب افزایش فشار ورود هوا و کاهش مقدار α نسبت به مقدار α در تیمار شاهد شد. مقدار α در تیمار SB1، SB2 و SB3 به ترتیب ۰/۰۳۳، ۰/۰۲۸ و ۰/۰۴۱ محاسبه شد که از مقدار α تیمار شاهد ۰/۰۶ کم تر است. کاهش ضریب α بیانگر کاهش قطر حفره های خاک در مسیر جریان آب و کاهش تخلخل مؤثر هدایت هیدرولیکی است (۴۳). این نتیجه بیانگر نقش اصلاح کننده های زغال زیستی در بهبود ساختمان خاک و توزیع مناسب خلل و فرج نسبت به تیمار شاهد در افزایش رطوبت قابل استفاده است. در شکل ۵ تغییرات مقادیر پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، سرعت آب حفره ای، سرعت جریان بر حسب سانتی متر بر دقیقه در محور عمودی اول (محور سمت چپ) و مقادیر شدت جریان بر حسب سانتی مترمکعب بر دقیقه در محور عمودی دوم (محور سمت راست) برای سه تیمار اندازه ذرات زغال زیستی در مقایسه با تیمار خاک بدون زغال زیستی نشان داده شده است.

شیب تغییرات در منحنی رطوبتی تیمار شاهد در مقایسه با تیمارهای حاوی زغال زیستی از مکش ۰ تا مکش ۲۰۰۰ سانتی متر زیاد است که نشان دهنده وجود رطوبت در منافذ درشت خاک است. مطابق شکل ۴ ناحیه موئینگی تقریباً در ناحیه مکشی ۲۰۰۰ سانتی متر قرار دارد و تغییرات منحنی رطوبتی در مکش ۰ تا ۲۰۰۰ سانتی متر به معنای وجود رطوبت در منافذ بزرگ و بزرگ تر به واسطه خاصیت موئینگی جذب آب به داخل این منافذ است. افزایش مقدار زغال زیستی یا مواد آلی خاک، موجب افزایش رطوبت متناظر با هر مکش نسبت به تیمار فاقد زغال زیستی و کاهش تغییرات شیب منحنی رطوبتی می شود. به همین ترتیب اعمال مکش به خاک های شنی به دلیل درشتی نسبی خلل و فرج، سبب تخلیه رطوبت از خلل و فرج و تندى تغییرات شیب منحنی می شود. وجود تغییرات چشم گیر در دامنه مکش ۰ تا ۲۰۰۰ سانتی متر نشان دهنده فزونی اندازه ای منافذ درشت برای تیمار S0 و توزیع مناسبی از اندازه های درشت و کوچک منافذ در تیمارهای حاوی زغال زیستی است. دامنه تغییرات منحنی رطوبتی تیمارهای SB1، SB3 و SB2 از مکش ۴۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی متر تقریباً ناچیز است که نشان دهنده یکنواختی اندازه منافذ در دو تیمار SB2 و SB3 و یکنواختی و توزیع مناسب تر اندازه منافذ در تیمار SB1 نسبت به سایر تیمارها می باشد. یکنواختی بیش تر اندازه منافذ در تیمار SB1 و همچنین توزیع مناسب تر منافذ در این تیمار نسبت به دیگر تیمارها می تواند ناشی از اندازه کوچک تر ذرات زغال زیستی نسبت به دو تیمار SB2 و SB3 باشد. به عبارت دیگر شکل ۴ نشان می دهد که زغال زیستی سبب کاهش شیب منحنی رطوبتی (پارامتر n) در تیمارهای مورد آزمایش نسبت به تیمار شاهد شده



شکل ۵- مقایسه میانگین میزان شدت جریان آب در پاسخ به کاربرد زغال زیستی در خاک.

حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

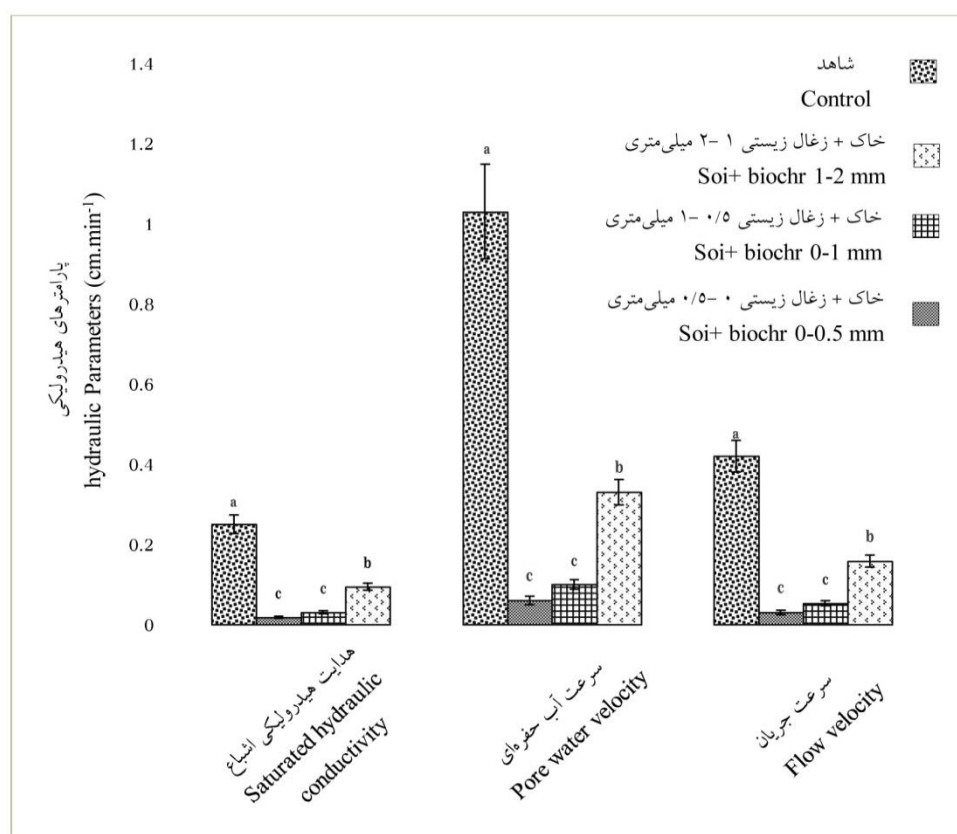
Figure 5. Mean comparisons of water discharge in response to biochar application in soil; Different letters on the bars stand for significant differences based on Duncan's test at probability level of 5%.

کاهش معنی‌دار شدت جریان در تیمار SB1 نسبت به تیمار شاهد (S0)، به اندازه ۹۳ درصد برقرار است. در مقابل کم‌ترین کاهش در مقدار شدت جریان به میزان ۶۲/۶ درصد به تیمار SB3 با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر تعلق دارد. حداکثر مقدار شدت جریان در تیمار شاهد برابر ۱۰/۴۳ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه، در تیمار SB1 با اندازه ذرات ۰-۰/۵ میلی‌متر ۰/۷۳ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه، در تیمار SB2 با اندازه ذرات ۰/۵-۱ میلی‌متر ۱/۳ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه و در تیمار SB3 با اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر ۳/۹ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه بود (شکل ۵). این نتیجه به‌خوبی اثر زغال زیستی و اثر اندازه ذرات زغال زیستی در کاستن از شدت جریان آب در خاک و

اهمیت مؤلفه شدت جریان خاک در شکل ۵ با کاربرد زغال زیستی از آن جایی پررنگ می‌شود که عموماً خاک‌های با بافت سبک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مشکل نگهداشت آب و حفظ رطوبت را دارند و نیاز است تا با کاهش سرعت جریان آب درون خاک، اصلاح شود. در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، دسترسی به منابع آبی پایدار محدود است. بنابراین کاهش تخلخل درشت خاک (شکل ۲) یا افزایش ظرفیت نگهداشت آب (شکل ۳)، و به‌عبارت کلی‌تر، کاهش شدت جریان آب در خاک، در اولویت اصلاح ساختار خاک می‌باشد. مطابق شکل ۵ با افزایش اندازه ذرات زغال زیستی از اثرگذاری آن در کاهش شدت جریان کاسته می‌شود. بیش‌ترین

که کاربرد زغال زیستی ساقه آفتابگردان در تمامی اندازه‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع، شدت جریان، سرعت جریان و سرعت آب حفره‌ای را در مقایسه با تیمار خاک شاهد (S0) به‌دنبال داشته است.

تعامل بین زغال زیستی و محیط هدف یعنی پروفیل خاک را نشان می‌دهد. در شکل ۶ تغییرات هدایت هیدرولیکی، سرعت آب حفره‌ای و سرعت جریان به‌ازای سه اندازه ذرات زغال زیستی ساقه گیاه آفتابگردان مورد استفاده نسبت به تیمار شاهد فاقد زغال زیستی ترسیم شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد



شکل ۶- مقایسه میانگین پارامترهای هیدرولیکی در پاسخ به کاربرد زغال زیستی در خاک.

حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

Figure 6. Mean comparisons of hydraulic parameters in response to biochar application in soil; Different letters on the bars stand for significant differences based on Duncan's test at probability level of 5%.

سرعت آب حفره‌ای و سرعت جریان در تیمار SB1 و SB2 و SB3، با اندازه ذرات ۰/۵-۱، ۰/۵-۰/۵ میلی‌متر کمتر از تیمار شاهد، و به‌همین ترتیب در اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر از هر سه تیمار بود. خاک لوم‌شنی دارای ضریب آب‌گذری زیادی است که می‌تواند مانعی برای نگهداری رطوبت در خاک باشد

براساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، مقادیر هدایت هیدرولیکی، سرعت آب حفره‌ای و سرعت جریان در سه اندازه ذرات زغال زیستی به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمار شاهد بود (شکل ۶). مقادیر مؤلفه‌های فوق در خاک لوم‌شنی یا تیمار شاهد در بالاترین حد اندازه‌گیری شد. مقادیر هدایت هیدرولیکی،

و بنابراین کاهش آن در اثر کاربرد زغال زیستی می‌تواند اهمیت داشته باشد. کاهش هدایت هیدرولیکی توسط زغال زیستی از نظر کاهش هدر رفت آب و کاهش مصرف آب از اهمیت بالایی برخوردار است. ضمن آن‌که کاهش هدایت هیدرولیکی خاک موجب کاهش آبشویی املاح و مواد مغذی مورد نیاز گیاه و همچنین ممانعت از آلوده شدن منابع آب زیرزمینی می‌نماید. خاک شن‌لومی دارای ضریب آب‌گذری زیادی است که می‌تواند مانعی برای نگهداری رطوبت در خاک باشد و بنابراین کاهش آن در اثر کاربرد زغال زیستی می‌تواند اهمیت داشته باشد. شکل ۶ نشان می‌دهد که هدایت هیدرولیکی اشباع در تیمارهای SB1، SB2 و SB3 به ترتیب ۰/۰۱۸، ۰/۰۳۱ و ۰/۰۹۴ سانتی‌متر در دقیقه است. کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در این تیمارها نسبت به تیمار شاهد، از طریق تبدیل منافذ درشت و متوسط خاک به منافذ متوسط و ریز می‌باشد که نتیجه آن، سبب کاهش سرعت حرکت آب در خاک و ذخیره رطوبت در خاک می‌شود (۳۹). استفاده از ۳ درصد وزنی زغال زیستی ساقه گیاه آفتابگردان با اندازه ذرات ۰/۵-۱ و ۰/۵-۲ میلی‌متر در ترکیب با خاک لوم‌شنی به ترتیب موجب کاهش ۹۲/۹۳، ۸۷/۶ و ۶۲/۵ درصد هدایت هیدرولیکی، ۹۴/۰۴، ۹۰/۲۹ و ۶۷/۹۶ درصد سرعت آب حفره‌ای و ۹۲/۹۳، ۸۷/۶ و ۶۲/۵ درصد سرعت جریان شد. یک‌زیان و همکاران (۱۴۰۱) گزارش دادند کاربرد زغال زیستی برگ نخل و پوست لیمو در خاک لوم‌شنی موجب کاهش ۳۴ و ۲۲ درصدی هدایت هیدرولیکی در مقایسه با تیمار شاهد شد (۴۴). همچنین بیان کردند صرف نظر از نوع زغال زیستی و کلاس اندازه ذرات زغال زیستی، هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم‌شنی کاهش پیدا کرد. به طوری که کاربرد سطوح ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی زغال زیستی در مقایسه با شاهد سبب

کاهش معنی‌دار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم‌شنی به ترتیب به میزان ۹، ۳۲، ۵۸، ۶۵ درصد شد. در یک مطالعه فراتحلیل از خاک‌های درشت بافت، گزارش شد که زغال زیستی در خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع را به میزان ۷ الی ۲۲۷۰ درصد کاهش داد، که میانگین این تغییرات ۳۹۲ درصد گزارش شده است (۴۵). هدایت هیدرولیکی خاک ویژگی فیزیکی از خاک است که بر جابه‌جایی آب در خاک و جابه‌جایی آب به طرف ریشه گیاه اثر دارد. بنابراین تغییرات افزایشی یا کاهشی هدایت هیدرولیکی خاک بسته به مقدار بیوپچار، اندازه ذرات زغال زیستی و بافت خاک می‌تواند متفاوت باشد. در تأیید این نتیجه ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کرده‌اند که ذرات زغال زیستی پودری تراشه‌های چوبی در مقایسه با ذرات درشت آن، هدایت هیدرولیکی را به میزان بیش‌تری کاهش دادند (۴۶). اوزوما و همکاران (۲۰۱۱) نیز اثر زغال زیستی کود گاوی افزوده شده به خاک را در افزایش آب قابل دسترس گیاه و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در یک خاک شنی گزارش نمودند. ذرات ریز زغال زیستی به دلیل سطح ویژه بیش‌تر نسبت به اندازه‌های بزرگ‌تر زغال زیستی، مسدودسازی حفرات درشت خاک با قرار گرفتن در منافذ درشت خاک و به تبع طولانی نمودن مسیر جریان، اثر بیش‌تری بر کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و کاهش شدت جریان آب در خاک دارند (۴۷). ابراهیم و همکاران (۲۰۱۷)، نیز قرار گرفتن ذرات زغال زیستی در بین منافذ درشت خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی خاک را گزارش نموده‌اند (۴۸).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر سه دامنه اندازه ذرات زغال زیستی ساقه گیاه آفتابگردان بر برخی خصوصیات

فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک لوم‌شنی در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی پژوهش نشان داد که استفاده از زغال زیستی به عنوان منبع پایدار کربن سبب بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و فیزیکی خاک شد. نتایج هم‌چنین نشان داد که اثر تیمارهای بیوچار بر جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت پژمردگی دائم، آب قابل‌دسترس، شدت جریان، سرعت جریان، سرعت آب حفره‌ای و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک معنی‌دار بود. اثر اندازه‌های مختلف ذرات زغال زیستی بر خصوصیات فیزیکی خاک بیانگر کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، افزایش تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت پژمردگی دائم و آب قابل‌دسترس گیاه بود. کاربرد زغال زیستی در اندازه ذرات ۰/۵-۱ میلی‌متر بیش‌ترین اثر را بر پارامترهای مذکور به‌جز رطوبت نقطه پژمردگی دائم داشت. بیش‌ترین مقدار رطوبت پژمردگی دائم حاصل ترکیب ۳ درصد وزنی زغال زیستی ساقه آفتابگردان با اندازه ذرات ۰/۵-۰ میلی‌متر با خاک به‌دست آمد. از دیگر نتایج این پژوهش این‌که اختلاف جرم مخصوص ظاهری خاک با بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین کلاس اندازه ذرات زغال زیستی ۱۴/۷۴ درصد، برای تخلخل ۲۱/۱۷ درصد، رطوبت اشباع ۲۲/۵ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه ۳۴/۷۸ درصد و رطوبت پژمردگی دائم ۲۴/۳۹ درصد بود. به‌همین ترتیب این اختلاف برای مؤلفه‌های آب قابل‌دسترس ۴۴/۴۴ درصد، شدت جریان آب در خاک ۹۲/۹۳ درصد، سرعت جریان آب در خاک ۹۲/۹۳ درصد، سرعت آب حفره‌ای ۹۴/۰۴ درصد و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ۹۲/۹۳ درصد به‌دست آمد. کاربرد زغال زیستی ساقه آفتابگردان در اندازه ذرات کم‌تر از ۰/۵ میلی‌متر باعث کاهش پارامترهای شدت جریان، سرعت جریان، هدایت هیدرولیکی و

سرعت آب حفره‌ای در خاک دارای بافت سبک گردید. نتایج هم‌چنین نشان داد که کاربرد زغال زیستی ساقه آفتابگردان در اندازه ذرات ۱ الی ۰/۵ میلی‌متر موجب بهبود خصوصیات فیزیکی خاک مورد مطالعه شد. عموماً خاک‌های دارای بافت سبک به‌دلیل دارا بودن منافذ درشت مشکل جذب و نگهداشت رطوبت را دارند و نیازمند کاهش سرعت جریان آب درون خاک و اصلاح هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشند که کاربرد زغال زیستی برای این منظور مناسب است. نتایج این پژوهش نشان داد که بیوچار اثر معنی‌داری بر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک سبک دارد و می‌تواند به‌عنوان اصلاح‌کننده مؤثر برای بهبود خصوصیات فیزیکی خاک و افزایش رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی و آب قابل‌دسترس گیاه مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین نقش زغال زیستی و اندازه ذرات زغال زیستی در جلوگیری از آبیویی کودهای کشاورزی و مواد مغذی خاک می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از داوران محترم این مقاله به جهت صرف وقت کافی و ارائه نظرات ارزشمند کمال تشکر را دارند.

داده‌ها و اطلاعات

این پژوهش با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول نگارش شده است. آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها در آزمایشگاه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آماده‌سازی و اندازه‌گیری داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافع وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است.

نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، نظارت پژوهش، اصلاح نهایی و بازبینی مقاله.
نویسنده سوم: مشارکت در آنالیزها، طرح تحقیق، روش‌شناسی و بازبینی مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر، رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

منابع

1. Abbasalian, H., Soitani, J., Hashemi, S, E., Borzouei, A., & Ahmadvand, M. (2021). A study on the effect of biochar and wheat straw application on nitrogen fertilizer utilization in barley using 15N isotope technology. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 43 (1), 47-56.
2. Haider, G., Steffens, D., Moser, G., Müller, C., & Kammann, C. I. (2017). Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study. *Agriculture, ecosystems & environment*, 237, 80-94.
3. Tan, R. R. (2019). Data challenges in optimizing biochar-based carbon sequestration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 174-177.
4. Laird, D. A., Fleming, P., Davis, D. D., Horton, R., Wang, B., & Karlen, D. L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158 (3-4), 443-449.
5. Sun, Z., Moldrup, P., Elsgaard, L., Arthur, E., Bruun, E. W., Hauggaard-Nielsen, H., & de Jonge, L. W. (2013). Direct and indirect short-term effects of biochar on physical characteristics of an arable sandy loam. *Soil Science*, 178 (9): 465-473.
6. Ibrahim, H. M., Al-Wabel, M. I., Usman, A. R., & Al-Omran, A. (2013). Effect of Conocarpus biochar application on the hydraulic properties of a sandy loam soil. *Soil Science*, 178 (4), 165-173.
7. Obia, A., Mulder, J., Martinsen, V., Cornelissen, G., & 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.
8. Barnes, R. T., Gallagher, M. E., Masiello, C. A., Liu, Z., & Dugan, B. (2014). Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. *Plos one*, 9 (9), e108340.
9. 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 (4), 457-470.
10. Ajayi, A. E., & Horn, R. (2016). Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar. *Soil and Tillage Research*, 164, 34-44.
11. Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B., & Glaser, B. (2012). Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 175 (5): 698-707.
12. Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C. A., & Gonnermann, H. M. (2017). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *Plos one*. 12 (6), e0179079.

13. Ma, N., Zhang, L., Zhang, Y., Yang, L., Yu, C., Tin, G., Diane, T. A., & Ma, X. (2016). Biochar Improves Soil Aggregate Stability and Water Availability in a Mollisol after Three Years of Field Application. *Plos one*. 11 (5), 1-10.
14. Liu, X., Mao, P., Li, L., & Ma, J. (2019). Impact of biochar application on yield-scaled greenhouse gas intensity: Ameta-analysis. *Science of the Total Environment*. 656, 969-976.
15. Piri, H., Barahooi, F., & Naserin, A. (2023). Effect of the amount and particles size of Conocarpus Biochar on physical and hydraulic properties and evaporation from loam sandy soil surface. *Journal of Water and Soil Conservation*. 30 (20), 97-117.
16. Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L., & Zhang, R. (2013). Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 13, 991-1002.
17. Kang, M. W., Yibeltal, M., Kim, Y. H., Oh, S. J., Lee, J. C., Kwon, E. E., & Lee, S. S. (2022). Enhancement of soil physical properties and soil water retention with biochar-based soil amendments. *Science of the total environment*, 836, 155746.
18. GaoLu, S., Fang, S. F., & Tong, Z. Y. (2014). Effect of rice husk biochar and charcoal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*. 114, 37-44.
19. Andrenelli, M. C., Maienzab, A., Genesiob, L., Migliettab, F., Pellegrini, S., Vaccari, F. P., & Vignozzi, N. (2016). Field application of pelletized biochar: Short-term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. *Journal of Agricultural Water Management*. 163, 190-196.
20. Basso, A. S., Miguez, F. E., Laird, D. A., Horton, R., & Westgate, M. (2013). Assessing potential of biochar for increasing water potential of biochar for increasing water Change Biology Bioenergy. *Gcb Bioenergy*. 5, 132-143.
21. Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., Yargicoglu, E., & Spokas, K. (2015). Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45 (9), 939-969.
22. Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., & Wessolek, G. (2013). Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202, 183-191.
23. Ali Doust, A., Afioni, M., Haj Abbasi, M., & Mossadeghi, M. (2019). Application of multivariate statistical methods in evaluating soil quality indicators in the semi-arid region of Lordegan. *Applied Soil Research*, 7 (3): 192-206.
24. Cresswell, H. P., Green, T. W., & McKenzie, N. J. (2008). The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. *Soil science society of America Journal*, 72 (1), 41-49.
25. Jack, F. C. (1373). Sunflower science and technology, translated by Yousef Arshi, publications of the General Directorate of Cotton and Oilseeds, Tehran, first edition, 735p.
26. Osooli, H., Karimi, A., & Shirani, H. (2022). Biochar amount and Particle Sizes Effects on Plant Available Water, Stomatal Resistance, Root Dry Weight and Water Use Efficiency of Wheat. *Applied soil research*, 10 (2), 66-78.
27. Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54 (5), 464-465.
28. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37 (1), 29-38.
29. Haluschak, P. (2006). Laboratory methods of soil analysis. *Canada-Manitoba soil survey*, 3, 133.
30. Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 687-734.

31. Razzaghi, F., & Rezaie, N. (2017). Effects of different levels of biochar on soil physical properties with different textures. *Journal of Water and soil Resources Conservation*, 7 (1), 75-87.
32. Zare Abyaneh, H., Khodabandehlo, Z., Bayat, H., & Jovzi, M. (2022). The effect of a superabsorbent and biochar on some physical and hydraulic properties of two arable sandy loam and clay loam soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22 (2), 2557-2569.
33. Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management- an introduction. In: Lehmann J. and Joseph S. (Eds). *Biochar for environmental management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 1-11.
34. Sadeghi, S. H. R., Hazbavi, Z., & Kiani Harchegani, M. (2016). Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar. *Science of the Total Environment*. 541, 483-490.
35. Tanure, M. M. C., da Costa, L. M., Huiz, H. A., Fernandes, R. B. A., Cecon, P. R., Junior, J. D. P., & da Luz, J. M. R. (2019). Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research*, 192, 164-173.
36. Hseu, Z., Hao Jien, Sh., Chien, W. H., & Liou, R. C. (2014). Impacts of biochar on physical properties and erosion potential of a mudstone slope land soil. *The Scientific World Journal* ID 602197, 10 p.
37. Jien, S. H., & Wang, C. S. (2013). Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110, 225-233.
38. Tejada, M., & Gonzalez, J. (2007). Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain. *Soil and Tillage Research*, 93 (1), 197-205.
39. Nowroozi, M., Tabatabaei, S. H., Nouri, M. R., & Motaghian, H. (2016). Short-term effects of biochar produced from date palm's leaves on moisture retention in sandy loam soil. *Journal of Water and soil Resources Conservation*, 6 (2), 137-150.
40. Dehgani, M., Shahnazari, A., Ahmadi, MZ., Ardakani, M., & Ghadami Firouzabadi, A. (2018). Effect of Different Rates of Biochar on Soil Moisture Characteristics under partial root zone drying of maize. *Iranian journal of Irrigation and Drainage*, 12 (5), 1217-1228.
41. Behnam, H., Farkhian Firouzi, A., & Moezzi, A. (2016). Effect of biochar and compost sugarcane bagasse on some soil mechanical properties. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23 (4), 235-250.
42. Khadem, A., Raiesi, F., & Besharati, H. (2017). A Review of Biochar Effects on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Journal of land Management*, 5 (1), 13-30.
43. Ebrahimi, E., Bayat, H., Sadeghi, S., Fallah, M., Jorreh, M., & Zanganeh, M. (2016). Using compression curve characteristics to estimate water content by the van Genuchten model. *Journal of water and soil research in Iran*, 47 (2), 217-228.
44. Yekzaban, A., Moosavi, S. A. A., Sameni, A., & Rezaei, M. (2022). Effect of Particle Size, Amounts, and sources of Biochar on Saturated Hydraulic Conductivity in two Texturally Different Soils. *Iranian Journal of Soil Research*, 36 (3), 321-334.
45. Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81 (4), 687-711.
46. Zhang, J., Qun, C. H. E. N., & Changfu, Y. O. U. (2016). Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil. *Pedosphere*. 26 (2): 265-272.
47. Uzoma, K., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use Management*. 27, 205-212.
48. Ibrahim, A., Usman, A. R. A., Al-Wabel, M. I., Nadeem, M., Ok, Y. S., & Al-Omran, A. (2017). Effects of conocarpus biochar on hydraulic properties of calcareous sandy soil: influence of particle size and application depth. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63 (2), 185-197.

