

ارزیابی تأثیرپذیری کوتاه‌مدت مؤلفه‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از زغال زیستی

زهرا محمدخانی^۱، کامران زینالزاده^{۲*}، حسین خیرفام^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷)

(تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵)

چکیده

اخیراً استفاده از افزودنی‌های زیستی به‌ویژه زغال زیستی برای مدیریت و بهبود رفتار آب در خاک اراضی کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. هرچند اثرگذاری زغال زیستی در دراز مدت یکی از چالش‌ها در این راستا می‌باشد. هدف از این پژوهش سنجش تغییرات مؤلفه‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از کاربرد زغال زیستی در بازه زمانی کوتاه در شرایط آزمایشگاهی و در مقیاس سینی‌های کوچک پر شده از یک خاک دست‌خورده کشاورزی بود. بدین منظور، نمونه‌های حجمی از اراضی کشاورزی مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه تهیه گردیدند و پس از انتقال به داخل سینی‌های کوچک تحت تیمارهای بدون اعمال زغال زیستی (شاهد) و افزودن زغال زیستی (۴/۷۶ درصد وزنی خاک) منتقل شدند. پس از گذشت ۴۰ روز، اقدام به اندازه‌گیری برخی مؤلفه‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک شد. نتایج نشان داد که مقادیر جرم ویژه ظاهری، تخلخل، میانگین وزنی و هندسی قطر ذرات، ابعاد شکاف‌ها، منافذ انتقال، منافذ ذخیره‌سازی و منافذ باقی‌مانده خاک به‌عنوان مؤلفه‌های فیزیکی خاک تغییر معنی‌داری با کاربرد زغال زیستی نداشتند ($p > 0/05$). زغال زیستی تأثیر معنی‌داری روی مؤلفه‌های منحنی رطوبت خاک (از پتانسیل دو تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر)، نقاط پتانسیلی مهم منحنی رطوبتی خاک شامل درصد رطوبت ظرفیت زراعی، درصد رطوبت نقطه پژمردگی دائم و درصد رطوبت در دسترس و هم‌چنین ضرایب معادله ون‌گنوختن برای تخمین مؤلفه‌های منحنی رطوبتی خاک نداشت ($p > 0/05$). هرچند یافته‌ها نشان داد که نقش زغال زیستی در کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده با روش بار ثابت (از $35/13 \pm 1/33$ به $21/43 \pm 3/26$ سانتی‌متر در روز) معنی‌دار ($p > 0/05$) و به‌مقدار ۳۹ درصد بود. بر اساس یافته‌های تحقیق حاضر، کاربرد زغال زیستی تأثیر معنی‌داری روی ویژگی‌های فیزیکی و رفتار هیدرولیکی خاک در بازه زمانی کوتاه‌مدت نداشت.

واژه‌های کلیدی: اصلاح کننده خاک، حرکت آب در خاک، منحنی رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع

محمدخانی ز.، زینالزاده ک و خیرفام ح. ۱۴۰۳. ارزیابی تأثیرپذیری کوتاه‌مدت مؤلفه‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از زغال زیستی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲، شماره ۱. صفحه: ۶۸-۸۲.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه (مکاتبه کننده)

۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

*پست الکترونیک: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir

مقدمه

رشد هم‌زمان و روزافزون جمعیت و نیازهای غذایی جهانی از یک طرف و محدودیت و بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب از طرفی دیگر به‌عنوان مهم‌ترین چالش جامعه جهانی برای دستیابی به توسعه پایدار تبدیل شده است (Liu *et al.*, 2020). لذا به‌سبب عدم مدیریت‌پذیری جمعیت، ارائه راهکارهای مدیریتی-فنی در بهره‌برداری و استفاده از منابع آب و خاک برای تولید پایدار محصولات کشاورزی و در نتیجه تأمین امنیت غذایی و زیستی جوامع اجتناب‌ناپذیر است (Smith *et al.*, 2020). با این حال تخریب اراضی ناشی از بهره‌برداری غیراصولی از منابع طبیعی و اراضی کشاورزی به تهدیدی اساسی برای مدیریت منابع آب و خاک تبدیل شده و دستیابی به توسعه پایدار را با چالش روبرو کرده است (Du Preez & Van Huyssteen, 2020). به‌گونه‌ای که میزان متوسط سالانه فرسایش خاک ناشی از تخریب اراضی در ایران بین هفت تا ۷۰ تن در هکتار تخمین زده شده که حدود سه برابر فرسایش کشورهای آسیایی و ۲۰ برابر متوسط جهانی بوده که منجر به هدررفت سالانه بین ۰/۸ تا هشت میلیارد تن خاک و ۵۶ تا ۱۱۲ میلیارد دلار (بر اساس گزارش‌های متعدد) خسارت مالی به کشور می‌شود (Sadeghi, 2017). در این بین، افت کیفی و کمی مؤلفه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از نمودها و پیامدهای مهم ناشی از تخریب اراضی بوده که منجر به کاهش بهره‌وری و پایداری در تولید محصولات کشاورزی، کاهش دسترسی به منابع غذایی، گسترش فقر عمومی و در نهایت پیامدهای اجتماعی و سیاسی می‌شود (Barbier & Hochard, 2018). تخریب اراضی و افت مؤلفه‌های کمی و کیفی خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک تشدید یافته که افزون‌بر اثرات سوء درون منطقه‌ای، خسارت‌های برون منطقه‌ای گسترده‌ای نیز در پی دارد (Sadeghi *et al.*, 2021). تخریب خاک در اراضی کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک که تحت بهره‌برداری‌های غیراصولی هم بوده، به‌شدت تشدید شده که منجر به افت قابلیت اراضی می‌شود (Kheirfam *et al.*, 2020). اصلاح و بهبود ویژگی‌های خاک سطحی راهکاری ضروری در راستای

کاهش اثرات سوء تخریب خاک در اراضی کشاورزی می‌باشد (Behzadfar *et al.*, 2017). در این راستا، در کنار اتخاذ راهکارهای مدیریتی، استفاده از افزودنی‌های خاک^۱ با هدف افزایش اصطکاک بین ذره‌ای، پیوستگی و نیروهای برهم‌چسبی ذرات خاک سطحی از راهکارهای فنی اساسی و مورد توجه می‌باشد (Sadeghi *et al.*, 2021). افزودنی‌های خاک متعددی از قبیل باقی‌مانده محصولات زراعی و صنایع غذایی و کمپوست حاصل از آن‌ها (Kranz *et al.*, 2020)، کودهای حیوانی و گیاهی (Jiang *et al.*, 2018)، مواد معدنی (Malta *et al.*, 2018) و انواع پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر (Cao *et al.*, 2018) با هدف بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. با این حال، کاربرد هر یک از مواد و روش‌های مذکور دارای محدودیت‌هایی از قبیل اثرات سوء محیط زیستی، ناپایداری، دسترسی محدود و هزینه‌بری بوده که استفاده از آن‌ها را با چالش مواجه کرده است (Kheirfam & Roohi, 2020).

با گسترش کاربرد فن‌آوری‌های نوین در علوم طبیعی، راه‌کارهای متعدد برای بهبود ویژگی‌های ماهیتی و ظاهری خاک در راستای کاهش اثرات سوء پدیده‌های طبیعی و دخالت‌های انسانی بر پایداری خاک در اراضی کشاورزی و دامنه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا در سال‌های اخیر کاربرد زغال زیستی تهیه شده از پسماندهای کشاورزی، جنگلی، صنایع و شهری با هدف بهبود مؤلفه‌های خاک و رفتار آب در خاک مطرح و مورد تأیید قرار گرفته است (Sadeghi *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2020). زغال زیستی ماده‌ای کربنی فعال و متخلخل بوده که در اثر گرمایشکافت^۲ مواد آلی در دمای بالا و عدم و یا حداقل حضور اکسیژن به‌دست می‌آید (Paz-Ferreiro *et al.*, 2014). به‌عبارتی زغال زیستی ماده‌ای جامد پایدار و متخلخل غنی از کربن بوده و به‌عنوان افزودنی ارزان، زودبازده، دوست‌دار محیط زیست و مؤثر در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی خاک شناخته می‌شود (Mokarram-Kashtiban *et al.*, 2019). زغال زیستی علاوه‌بر استفاده برای اهداف کشاورزی و حاصل‌خیزی خاک، برای بهبود پایداری خاک در برابر

قابل اعتمادتر می‌باشد. در این راستا، اثرگذاری زغال زیستی در بازه زمانی طولانی مدت تأیید شده که یکی از چالش‌ها کاربرد آن برای اهداف اصلاح خاک در بازه زمانی کوتاه‌مدت است. لذا هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی تأثیر کاربرد زغال زیستی روی برخی مؤلفه‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک در بازه زمانی کوتاه‌مدت بوده که به صورت آزمایشگاهی در مقیاس سینی‌های کوچک انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه برداشت خاک

برای ارزیابی عملکرد افزودن زغال زیستی در تغییر و بهبود مؤلفه‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های کشاورزی، مزارع تحقیقاتی دانشگاه ارومیه واقع در پردیس نازلو به دلیل دسترسی آسان و اطلاعات پیشین انتخاب شد. منطقه برداشت خاک در محدوده جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۹ دقیقه و ۱۸ ثانیه شمالی و ۴۵ درجه و ۵۸ دقیقه و ۱۹ ثانیه طول شرقی و در شمال غربی ایران واقع شده است. متوسط بارندگی سالانه محدوده مطالعاتی بر اساس تجزیه و تحلیل آمار دراز مدت ایستگاه سینوپتیک ارومیه ۳۲۷ میلی‌متر می‌باشد. عمده بارش‌های منطقه در فصل زمستان بوده و سردترین ماه‌های سال دی و بهمن (۴- درجه سلسیوس) و گرم‌ترین آن نیز مردادماه (۳۱/۳ درجه سلسیوس) می‌باشد. پس از انتخاب محل نمونه‌برداری، اقدام به برداشت حجمی از خاک سطحی (صفر تا ۱۰ سانتی‌متری) شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های خاک هواخشک شده و سپس بر اساس جرم ویژه ظاهری خاک منطقه برداشت خاک در سینی‌های استاندارد ریخته و کوبیده شد. برخی ویژگی‌های مهم خاک مطالعاتی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه

Table 1 Soil characteristics of the studied area

Property	Value
Sand (%)	14.55
Silt (%)	41.25
Clay (%)	44.20
Texture	Silty Clay
Organic C (5)	1.11
Organic matter (%)	1.92
Organic N (%)	0.10
pH	8.20
EC (dS m ⁻¹)	1.45

عوامل تخریب‌کننده مورد توجه قرار گرفته است (Laird *et al.* 2017). ذرات زغال زیستی دارای سطح ویژه بالا بوده که منجر به اتصال مستحکم ذرات خاک به یکدیگر و ایجاد خلل و فرج درشت و افزایش آب‌گذری شده و همچنین به دلیل توانایی بالای آن در جذب عناصر غذایی و آب منجر به افزایش اندازه و استحکام خاک‌دانه‌ها در برابر عوامل تخریب‌کننده می‌شود (Sadeghi *et al.* 2018). بر اساس یافته‌های پیشین، اثرگذاری قابل توجه زغال زیستی بر بهبود ویژگی‌های خاک لوم شنی در سطح مصرفی ۳۰ تن بر هکتار نسبت به سطوح مصرفی ۱۰ و ۲۰ تن بر هکتار توسط Adekiya *et al.* (2020) تأیید شد. در حالی که Gao *et al.* (2020) با بررسی تأثیر پنج سطح کاربرد زغال زیستی (صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ تن بر هکتار) در بهبود مؤلفه حرکت آب در خاک بافت لومی، مقدار مناسب استفاده از زغال زیستی را ۴۴ تا ۵۵ تن بر هکتار گزارش کردند. از طرفی، Xiong *et al.* (2020) با بررسی تأثیر زغال زیستی بر خاک سیلتی بیان کردند که اعمال زغال زیستی به مقدار متوسط (دو درصد وزنی و معادل ۴۰ تن بر هکتار) می‌تواند یک رویکرد زراعی مفید برای کاهش نوسانات دمایی خاک باشد. Yang (۲۰۲۱) و Lu & در آزمایش مزرعه‌ای که انجام دادند بعد از سه کشت متوالی، تأثیر قابل توجه زغال زیستی در افزایش ظرفیت نگهداشت آب خاک را در خاک لوم سیلتی در پتانسیل‌های ۰/۳۳ بار و ۱۵ بار و نهایتاً افزایش درصد رطوبت در دسترس را مشاهده کردند. Vitkova *et al.* (2017) در آزمایش مزرعه‌ای با دو سطح کاربرد زغال زیستی (صفر و ۲۰ تن در هکتار) در خاک لوم سیلتی گزارش نمودند که در سال اول، زغال زیستی تأثیر نسبتاً کمی داشت ولی در سال سوم موجب افزایش قابل توجه ظرفیت نگهداشت آب خاک و همچنین افزایش عملکرد ذرت (۱۴۰ درصد) گردید. هم‌چنین Wang *et al.* (2022) نقش زغال زیستی در افزایش نگهداشت آب خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی با افزایش مقادیر مصرف زغال زیستی را گزارش کرده‌اند. جمع‌بندی یافته‌های پژوهش‌های پیشین حاکی از موفقیت کاربرد زغال زیستی در بهبود مؤلفه‌های فیزیکی، شیمیایی و حتی زیستی خاک‌ها است. پژوهش‌های محدود انجام شده در این راستا به نتایج متفاوتی دست یافته‌اند که نشان‌دهنده ضرورت انجام پژوهش‌های آتی و تکمیلی برای دستیابی به نتایج

تهیه زغال زیستی

روی پایه‌ها قرار داده شدند تا آب ثقلی آن‌ها خارج شود. در پژوهش حاضر تعداد دو تیمار (تیمار شاهد بدون افزودن زغال زیستی (با سطح صفر درصد) و تیمار با افزودن ۴/۷۶ درصد وزنی زغال زیستی) با اعمال سه تکرار برای هر تیمار و در مجموع شش آزمایش مدنظر قرار گرفت.



شکل ۱- آماده‌سازی تیمارهای آزمایشی
Figure 1 Preparation of experimental treatments

اندازه‌گیری مؤلفه‌های آزمایش

با تهیه نمونه‌های دست‌نخورده و دست‌خورده از هر سینی، مؤلفه‌های فیزیکی شامل پایداری خاک‌دانه‌ها (به روش الک خشک)، جرم ویژه ظاهری (با روش استوانه نمونه-گیر)، تخلخل (با استفاده از رابطه ۱)، رفتار هیدرولیکی خاک شامل منحنی رطوبتی (با دستگاه‌های جعبه شنی و صفحات فشاری) و هدایت هیدرولیکی (به روش بار ثابت) اندازه‌گیری شد. شکل (۲) نحوه تهیه نمونه‌های دست‌نخورده از هر سینی، یک نمونه با استوانه نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری، یک نمونه برای اندازه‌گیری در دستگاه صفحات فشاری، یک نمونه برای اندازه‌گیری در جعبه شنی و یک نمونه برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع، را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمونه‌برداری از تیمارهای آزمایشی برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد مطالعه
Figure 2 Sampling of experimental treatments to measure the studied parameters

برای تهیه زغال زیستی، از ضایعات چوبی صنوبر (*Populus sp.*) مزارع کشت صنعتی صنوبر استان آذربایجان غربی به وزن تقریبی ۱۰۰ کیلوگرم استفاده شد. برای تبدیل ضایعات چوبی به ذرات کم‌تر از دو میلی‌متر، الوار تهیه‌شده به پودر چوب تبدیل گردید و تا اطمینان از کاهش حداکثری رطوبت در دمای آزمایشگاه هوا خشک شدند (Heidari et al. 2014). پودر چوب هواخشک‌شده به کوره انتقال یافت و بعد از اطمینان از عدم ورود هوا به داخل کوره، دمای کوره به ۴۰۰ درجه سلسیوس رسانده شد و مدت دو ساعت فرصت داده شد تا تحت دمای مذکور و بدون (یا با حداقل) حضور اکسیژن، فرآیند گرماسکافت یا پیرولیز صورت گیرد (Randolph et al. 2017). در نهایت منطبق با ذرات مناسب برای استفاده در اصلاح خاک‌های کشاورزی و همچنین هم‌بعدسازی ذرات، زغال زیستی تهیه‌شده در هاون به‌شکل پودر در آمد و از الک دو میلی‌متر عبور داده شد (Mokarram-Kashtiban et al. 2019).

آماده‌سازی تیمارهای مطالعاتی

به‌منظور بررسی کامل فرآیندهای فیزیکی و هیدرولیکی خاک در اثر افزودن زغال زیستی، انجام آزمایش‌ها در مقیاس کوچک و قابل کنترل آزمایشگاهی ضروری می‌باشد. از این‌رو، برای اجرای تیمارهای آزمایشی موردنظر به‌صورت کنترل شده، اقدام به ساخت سینی-هایی از جنس گالوانیزه (با ابعاد طول، عرض و عمق به‌ترتیب ۱۵، ۱۵ و شش سانتی‌متر) شد. در این پژوهش، زغال زیستی با دو سطح صفر و ۴/۷۶ درصد وزنی با خاک تهیه شده مخلوط شدند. برای تهیه تیمارهای شاهد، سینی‌ها با خاک و برای تهیه تیمارهای حاوی زغال زیستی، سینی‌ها با مخلوط خاک-زغال زیستی تا عمق پنج سانتی‌متری پر شدند (شکل ۱). برای پر کردن سینی‌ها از روش تراکم صفحه‌ای استفاده شد (Zuo et al. 2022). تا نمونه‌ها به تراکم خاک دست‌نخورده محل نمونه‌برداری برسند. بعد از آماده‌سازی تیمارها، برای طی دوره نهفتگی زغال زیستی در سینی‌های پرشده، نمونه‌ها به مدت ۴۰ روز در دمای اتاق قرار گرفتند (Sadeghi et al. 2018). بعد از اتمام دوره نهفتگی، تیمارها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط اشباع قرار گرفته و به‌مدت ۴۸ ساعت

حسابی قطر خاک‌دانه‌ها در هر کلاس اندازه منافذ الک‌ها (میانگین اندازه مش دو الک بالایی و پایینی که در این آزمایش ۰/۰۷۵، ۰/۱۷۵، ۰/۳۷۵، ۰/۷۵، ۱/۵ و سه میلی-متر در نظر گرفته شد)، w_i نسبت وزن خاک‌دانه‌های خشک باقی‌مانده در هر الک به وزن کل خاک‌دانه‌ها و n نیز تعداد الک‌های مورد استفاده برای روش الک خشک می‌باشد.

برای مقایسه دانه‌بندی خاک با دانه‌بندی زغال زیستی از ضریب نرمی (مدول نرمی) استفاده گردید. ضریب نرمی به مجموع درصد‌های تجمعی باقی‌مانده روی الک‌های استاندارد تقسیم بر ۱۰۰، گفته می‌شود (رابطه ۵). برای تعیین ضریب مذکور، از سری الک‌های مورد استفاده برای تعیین پایداری خاکدانه استفاده شد. (Neville & Brooks, 1987):

رابطه ۵

$$FM = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^k w_i}{100}$$

که در آن، k شماره الک و FM ضریب نرمی می‌باشد. منحنی مشخصه رطوبتی خاک با ترکیبی از دستگاه جعبه شنی (سندباکس) در هفت مکش (دو، شش، ۱۰، ۳۲، ۶۳، ۸۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر) با استفاده از روش ستون آب آویزان و دستگاه صفحات فشاری در شش فشار (۰/۳، ۰/۶، دو، سه، شش و ۱۵ بار) اندازه‌گیری شدند (Asghari *et al.* 2022). نمونه‌های دستگاه جعبه شنی با استوانه-هایی با قطر داخلی ۵/۲ و ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر و نمونه-های دستگاه صفحات فشاری با استوانه‌هایی به قطر داخلی ۵/۲ و ارتفاع دو سانتی‌متر از سینی‌های خاک آماده‌شده، تهیه شدند. زیر هر نمونه یک توری قرار داده شد تا در طول اندازه‌گیری‌ها، خاک از زیر استوانه‌ی مورد مطالعه ریزش نداشته باشد. ابتدا نمونه‌های مورد مطالعه به صورت کامل اشباع‌شده و سپس به دستگاه جعبه شنی و دستگاه صفحات فشاری منتقل شدند (Asghari *et al.* 2022).

مؤلفه‌های مهم مشخصه آب محتوای خاک شامل ظرفیت زراعی^۳ (مقدار رطوبت حجمی خاک در پتانسیل ماتریک ۰/۳۳ بار)، نقطه پژمردگی دائم^۴ (مقدار رطوبت حجمی

برای تعیین جرم ویژه ظاهری، نمونه‌های خاک تیمارها به مدت ۲۴ ساعت در آون تحت دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس جرم خشک خاک هر نمونه توزین شده و در نهایت با استفاده از رابطه (۱) مقدار جرم ویژه ظاهری محاسبه شد.

رابطه ۱

$$\rho_b = \frac{m}{V}$$

در رابطه فوق، m جرم خشک نمونه خاک بر حسب گرم، V حجم نمونه خاک (حجم استوانه نمونه‌گیر با قطر داخلی ۵/۲ و ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر) بر حسب سانتی‌متر مکعب و ρ_b جرم ویژه ظاهری بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. تخلخل نمونه‌های مورد مطالعه نیز طبق رابطه (۲) محاسبه شد.

رابطه ۲

$$n = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$$

در رابطه ۲، ρ_s جرم ویژه حقیقی خاک است که برابر با ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب پنداشته شد و n تخلخل خاک است. برای اندازه‌گیری پایداری خاک‌دانه‌ها از تیمار شاهد مقداری خاک و از تیمارهای حاوی زغال زیستی مقداری مخلوط خاک-زغال زیستی برداشته و از الک چهار میلی‌متری عبور داده شد و سپس به مقدار ۱۰۰ گرم از هر کدام بصورت جداگانه با استفاده از مجموعه الک‌های با اندازه قطرهای منافذ ۰/۵، ۱/۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰، یک و دو میلی‌متر و به مدت ۱۰ دقیقه در صفحه لرزاننده قرار داده شد. سپس مقدار خاک و مخلوط خاک-زغال زیستی باقی‌مانده روی هر الک و سینی انتهایی با ترازوی دیجیتال توزین شد. با استفاده از جرم خاک باقی‌مانده روی هر الک، شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها^۱ (رابطه ۳) و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها^۲ (رابطه ۴) محاسبه شد (Xue *et al.* 2019).

رابطه ۳

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i w_i$$

رابطه ۴

$$GMD = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right]$$

در روابط ۳ و ۴، MWD و GMD به ترتیب میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌ها (میلی‌متر)، \bar{X}_i میانگین

3.Field capacity (FC)

4.Permanent wilting point (PWP)

1.Mean weight diameter (MWD)

2.Geometric mean diameter (GMD)

جدول ۲- طبقه‌بندی اندازه منافذ خاک (Greenland, 1977)

Table 2 Soil pore size classification (Greenland, 1977)

Component	Equivalent diameter size range (μm)	Suction range (kPa)
Fissures	$d \geq 500$	$h \leq 0.6$
Transmission pores	$50 \leq d < 500$	$0.6 < h \leq 6$
Storage pores	$0.5 \leq d < 50$	$6 < h \leq 600$
Residual pores	$d < 0.5$	$h > 600$

برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با روش بار ثابت از نمونه‌های تهیه‌شده مربوط به هر تیمار در پلکسی گلس‌هایی با ارتفاع پنج و قطر داخلی چهار سانتی‌متر استفاده شد (Asghari et al. 2022). به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام اندازه‌گیری، بالا و پایین نمونه‌ها با توری پوشانده شد تا در حین انجام آزمایش از شست‌وشو و خروج ذرات خاک از داخل نمونه جلوگیری شود. سپس نمونه‌ها اشباع شده و پس از برقراری جریان ثابت خروجی از هر نمونه، با استفاده از روش بار ثابت حجم آب خروجی در بازه زمانی معین اندازه‌گیری شده (شکل ۳) و مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شدند (Hillel, 2003).

رابطه ۸

$$K = \frac{VL}{At\Delta H}$$

که در آن V حجم آب خروجی از هر نمونه (سانتی-مترمکعب) در بازه زمانی t (دقیقه)، L طول هر نمونه که در این آزمایش پنج سانتی‌متر می‌باشد، ΔH ارتفاع ثابت برقرارشده در آزمایش، A سطح مقطع نمونه خاک برحسب سانتی‌مترمربع و K هدایت هیدرولیکی اشباع بر حسب سانتی‌متر در دقیقه است.

خاک در پتانسیل ماتریک ۱۵ بار) و مقدار رطوبت قابل دسترس^۱ (اختلاف رطوبت حجمی بین دو نقطه پتانسیلی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم) از منحنی مشخصه رطوبتی اندازه‌گیری شده نمونه‌ها تعیین شدند. هم‌چنین به منظور ارزیابی تأثیر اعمال زغال زیستی بر پارامترهای مدل مدل ون‌گنوختن (Van Genuchten, 1980)، مؤلفه‌های هیدرولیکی خاک و ضرایب معادله ون‌گنوختن (درصد رطوبت اشباع θ_s)، درصد رطوبت باقی‌مانده θ_r)، هدایت هیدرولیکی اشباع $(K_s\text{-sat})$ ، عکس مکش ورود هوا (α) ، پارامترهای شکل منحنی (n, m, L) با استفاده از داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی، چگالی ظاهری و مشخصات بافت خاک با نرم‌افزار Retc برآورد شد (Van Genuchten et al., 1991). از معکوس α برآورد شده توسط نرم‌افزار Retc مقدار مکش ورود هوا (h_a) محاسبه گردید. به‌منظور کاهش تعداد مؤلفه‌های تخمینی و ساده‌سازی مقدار m برابر با $1-1/n$ در نظر گرفته شد (Mualem, 1976).

توزیع اندازه منافذ خاک به‌صورت غیرمستقیم با استفاده از داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی تعیین شد (Lei et al. 1988). از این‌رو، منافذ موجود در خاک به‌صورت لوله‌های دایره‌ای با اندازه‌های مختلف فرض شده که بر اساس رابطه ۶، ارتباط بین مکش (h) و قطر معادل منافذ (d) تعیین شد (Fu et al., 2019).

رابطه ۶

$$h = \frac{4\sigma}{d}$$

که σ ضریب کشش سطحی آب بوده که مقدار آن در دمای اتاق 75×10^{-5} نیوتن بر سانتی‌متر است. اگر واحدهای h و d به ترتیب متر و میکرومتر باشند رابطه فوق به رابطه ۷ ساده می‌شود (Andrenelli et al., 2016).

رابطه ۷

$$d = \frac{30}{h}$$

در پژوهش حاضر، منافذ خاک نمونه‌های آزمایش مطابق با جدول ۲ و روش پیشنهادی (Greenland 1977) به چهار طبقه مختلف تقسیم شده و تغییرات منافذ تیمارها براساس این طبقه‌بندی بررسی شد.

1. Available water capacity (AWC)

خاک در تیمارهای شاهد و زغال زیستی در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، مقادیر اندازه‌گیری شده درصد شکاف‌ها، منافذ انتقال، منافذ ذخیره‌سازی و منافذ باقی‌مانده در تیمارهای شاهد و زغال زیستی در جدول ۳ نشان داده شده است.

تحلیل آماری مقادیر مؤلفه‌های فیزیکی مورد بررسی در خاک تیمارهای مطالعاتی حاکی از عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین تیمار شاهد و زغال زیستی بوده (جدول ۴) که نشان‌دهنده عدم اثرگذاری زغال زیستی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی مهم خاک در پژوهش حاضر بود. هرچند، Wang *et al.* و Andrenelli *et al.* (2016) و Wang *et al.* (2022) نقش زغال زیستی در بهبود توزیع منافذ خاک و در نهایت نگاهداشت آب در خاک و همچنین Herath *et al.* (2013) اثر زغال زیستی در بهبود برخی مؤلفه‌های فیزیکی مؤثر در هیدرولیک آب در خاک را گزارش کرده‌اند. در این راستا، عدم اثرپذیری مؤلفه‌های فیزیکی خاک به دلیل تغییرپذیری آن‌ها در بازه زمانی طولانی‌مدت توسط برخی پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است (Hardie *et al.* 2014). همچنین Herath *et al.* (2013) نوع خاک و نوع ماده خام مورد استفاده برای تهیه زغال زیستی را یکی از عوامل مؤثر در اثرگذاری زغال زیستی بر مؤلفه‌های فیزیکی خاک بیان کردند. با این حال، یافته‌هایی مبنی بر تغییر و بهبود مؤلفه‌های فیزیکی خاک با افزایش سطح و زمان مصرف زغال زیستی گزارش شده است (Devereux *et al.* 2012). Yang & Lu (۲۰۲۱) پس از سه فصل کشت و Vitkova *et al.* (2017) در سال سوم آزمایش، تأثیر معنی‌دار کاربرد زغال زیستی را در افزایش ظرفیت نگاهداشت آب خاک در خاک لوم سیلتی گزارش نمودند.



شکل ۳- اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع با روش بار ثابت

Figure 3 Measurement of saturated hydraulic conductivity with constant head method

به منظور انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری، ابتدا بانک اطلاعاتی داده‌های مقادیر متغیرهای اندازه‌گیری‌شده تیمارها در محیط نرم‌افزار Excel 2016 تشکیل شد. به همین منظور قبل از انجام هرگونه تجزیه و تحلیل آماری، نرمال بودن داده‌ها با آزمون Shapiro-Wilk با توجه به تعداد کم داده‌ها در هر گروه از تیمارها بررسی شد. سپس در صورت نیاز، تبدیل داده‌های غیرنرمال به حالتی با توزیع نرمال مدنظر قرار گرفت. در نهایت پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها اقدام به مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دو نمونه‌ای مستقل (Independent-samples T test) گردید. آزمون‌های آماری یادشده برای تجزیه و تحلیل داده‌ها در محیط نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 23 انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک

مقادیر جرم ویژه ظاهری، تخلخل، میانگین وزنی قطر ذرات (MWD)، میانگین هندسی قطر ذرات (GMD) و ضریب نرمی (FM) به عنوان ویژگی‌های مهم فیزیکی

جدول ۳- مقادیر برخی مؤلفه‌های مهم فیزیکی خاک در تیمارهای مطالعاتی (میانگین±انحراف معیار)

Table 3 Values of some important physical components of the soil in the treatments (mean±SD)

Components	Control	Biochar
Bulk specific gravity ($g\ cm^{-3}$)	1.17±0.09	1.14±0.04
Soil porosity ($cm^3.cm^{-3}$)	0.56±0.03	0.57±0.02
MWD (mm)	1.10±0.37	0.88±0.38
GMD (mm)	0.90±0.13	0.83±0.14
FM	4.99	3.87
Fissures (%)	1.38±0.25	4.34±0.99
Transmission pores (%)	17.20±3.2	14.68±1.72
Storage pores (%)	43.91±1.24	50.46±7.11
Residual pores (%)	37.50±2.16	30.51±4.25

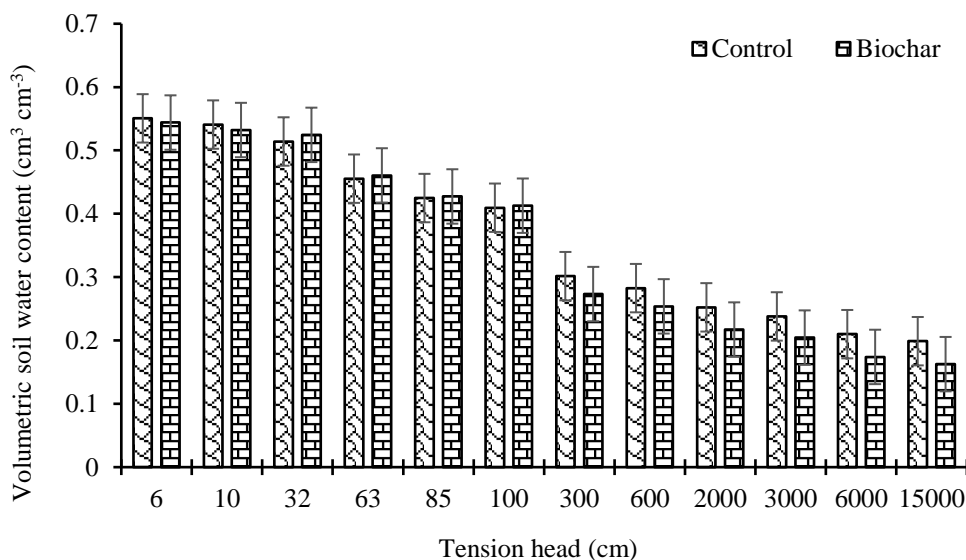
جدول ۴- نتایج آزمون دو نمونه‌ای مستقل برای مقایسه مقادیر برخی مؤلفه‌های مهم فیزیکی خاک در تیمارهای مطالعاتی
Table 4 Results of the Independent-samples T-test comparing of the soil physical properties in the treatments

Components	t	df	Sig.
Bulk specific gravity ($g\ cm^{-3}$)	0.54	4	0.63
Soil porosity (%)	0.32	4	0.77
MWD (mm)	0.70	4	0.52
GMD (mm)	0.62	4	0.57
Fissures	1.11	4	0.33
Transmission pores	0.97	4	0.38
Storage pores	-1.28	4	0.27
Residual pores	2.07	4	0.11

زیستی در بهبود مؤلفه‌های هیدرولیکی خاک را تأیید کرده‌اند؛ ولی در عین حال در برخی پژوهش‌های دیگر نیز بر عدم تأثیر زغال زیستی بر رفتار هیدرولیکی خاک را گزارش نموده‌اند (Jeffery et al. 2015). از طرفی Fu et al. (2019) میزان اثرگذاری زغال زیستی بر رفتار هیدرولیکی خاک را متأثر از بافت خاک، مواد اولیه، دمای گرما شکافت و همچنین اندازه ذرات زغال زیستی گزارش نمودند. همچنین Liang et al. (2021) با بررسی شش سطح کاربرد زغال زیستی (صفر، ۰/۲۲، ۰/۵۴، ۰/۶۵، ۱/۱ و ۲/۲ درصد) نتیجه گرفتند که با افزایش مقدار کاربرد زغال زیستی (بالاتر از ۱/۱ درصد) تأثیر این افزودنی بر بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از تأثیر مثبت به تأثیر منفی تغییر پیدا می‌کند.

منحنی رطوبتی خاک

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های منحنی رطوبتی خاک نشان داد که در مکش‌های اعمال شده (از مکش دو تا مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) مقدار محتوای رطوبتی خاک در تیمارهای شاهد و زغال زیستی به ترتیب بین ۰/۵۵ تا ۰/۱۹ و ۰/۵۵ تا ۰/۱۶ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب اندازه‌گیری شد (شکل ۴). تحلیل آماری نتایج بدست‌آمده نشان داد که در مکش‌های اعمال شده (دو تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) بین تیمار شاهد و زغال زیستی اختلاف معنی‌دار وجود نداشت (شکل ۴). لذا منحنی رطوبتی خاک نیز همانند ویژگی‌های فیزیکی بررسی‌شده خاک تأثیرپذیری معنی‌داری از افزودن ۴/۷۶ درصد وزنی زغال زیستی در بازه زمانی ۴۰ روز نداشت. هر چند Verheijen et al. (2019) و Glab et al. (2018) نقش مؤثر زغال



شکل ۴- میانگین \pm انحراف معیار محتوای رطوبت حجمی خاک مطالعاتی تیمارهای شاهد و زغال زیستی
Figure 4 The mean \pm SD of the volumetric soil water content for the study soil in the control and biochar treatments.

حاصل از برنامه Retc) برای هر دو تیمارهای شاهد و زغال زیستی ۰/۹۹ بود (جدول ۷).

جدول ۵- مقادیر نقاط پتانسیلی منحنی رطوبتی خاک در تیمارهای مطالعاتی (میانگین \pm انحراف معیار)

Table 5 Values of potential points of the soil moisture curve of the the treatments (mean \pm SD)

Components	Control	Biochar
Field capacity (%)	30.15 \pm 3.98	27.32 \pm 3.57
Permanent wilting point (%)	19.89 \pm 2.45	16.26 \pm 3.16
Available water capacity (%)	10.27 \pm 1.53	11.06 \pm 0.41

جدول ۶- نتایج آزمون دو نمونه‌ای مستقل برای مقایسه مقادیر نقاط پتانسیلی منحنی رطوبتی خاک در تیمارهای مطالعاتی

Table 6 Results of the Independent-samples T-test comparing of the potential points of the soil moisture curve in the treatments

Components	t	df	Sig.
Field capacity (%)	0.91	4	0.41
Permanent wilting point (%)	1.57	4	0.19
Available water capacity (%)	- 0.86	4	0.43

تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار SPSS نشان داد که ضرایب معادله ون گنوختن بین دو تیمار شاهد و زغال زیستی تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۸). بنابراین، زغال زیستی اثر معنی‌داری روی مقادیر ضرایب معادله ون گنوختن نداشت. یافته‌های Fu et al. (2019) نیز حاکی از عدم اثرگذاری معنی‌داری زغال زیستی بر مقادیر پارامترهای m ، n و α بود. هرچند نتایج ایشان نشان داد که زغال زیستی منجر به افزایش معنی‌دار مقادیر θ_r و θ_s تخمینی نسبت به تیمار شاهد شد. از طرفی، et al. (2021) Ghorbani-Dashtaki نیز عدم اثرگذاری معنی‌دار زغال زیستی بر مقدار θ_r را گزارش کردند.

مقدار میانگین رطوبت اندازه‌گیری شده در نقاط پتانسیلی مهم منحنی رطوبتی خاک شامل درصد رطوبت ظرفیت زراعی (FC)، درصد رطوبت نقطه پژمرده‌گی دائم (PWP) و درصد رطوبت در دسترس (AWC) در تیمارهای شاهد و زغال زیستی در جدول ۵ ارائه می‌شود. تحلیل آماری مقادیر رطوبت ظرفیت زراعی، درصد رطوبت نقطه پژمرده‌گی دائم و درصد رطوبت در دسترس بین دو تیمار شاهد و زغال زیستی تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۶). از این‌رو، زغال زیستی مورد استفاده پس از ۴۰ روز افزودن به خاک اثر معنی‌داری روی مقادیر نقاط پتانسیلی منحنی رطوبتی خاک نداشت. هرچند، Fu et al. (2019) در بررسی تأثیر چهار سطح کاربرد زغال زیستی (۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ تن بر هکتار) بر منحنی رطوبتی خاک گزارش نمودند که از پتانسیل‌های بیش‌تر از ۰/۳ بار، شکاف بین منحنی مربوط به تیمار شاهد و تیمار حاوی زغال زیستی بیش‌تر شده و با کاربرد زغال زیستی به‌طور قابل توجهی رطوبت در دسترس افزایش و رطوبت نقطه پژمرده‌گی دائم کاهش یافت. Kim & shim (2013) با بررسی تأثیر دمای گرما شکافت زغال زیستی بر رفتار هیدرولیکی خاک، گزارش کردند که تولید زغال زیستی در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس با افزایش سطح ویژه زغال زیستی موجب افزایش نگهداشت آب خاک می‌شود؛ این در حالی است که دمای گرما شکافت زغال زیستی در مطالعه حاضر ۴۰۰ درجه سلسیوس بود. عدم تأثیر زغال زیستی بر رفتار هیدرولیکی خاک می‌تواند به دلیل ماهیت آگریزی زغال زیستی مورد استفاده باشد (Jeffery et al. 2015) که ماهیت مذکور در دمای گرماشکافت بالا (بالاتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس) کاهش می‌یابد (Gray et al. 2014). ضرایب برآورد شده معادله ون گنوختن شامل درصد رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، درصد رطوبت اشباع (θ_s)، عکس مکش ورود هوا (α)، مکش ورود هوا (ha)، پارامترهای شکل منحنی m و n و هم‌چنین (Ks-sat) در تیمار شاهد و زغال زیستی در جدول ۷ نشان داده می‌شود. هم‌چنین ضریب تعیین برای مقادیر برآوردی (نتایج

جدول ۷- مقادیر پارامترهای منحنی رطوبتی مدل ون گنوختن برآوردشده در تیمارهای مطالعاتی (میانگین±انحراف معیار)

Table 7 Values of the estimated parameters of soil moisture curve of Van Genuchten in the treatments (mean±SD)

Components	Control	Biochar
θ_r (%)	10.34±0.19	8.41±1.31
θ_s (%)	50.91±3.35	50.30±1.99
α (1/cm)	0.037±0.0	0.030±0.0
h_a (cm)	28.21±3.77	30.92±1.66
n	1.30±0.03	1.33±0.03
m	0.23±0.02	0.25±0.02
L	0.5±0.0	0.5±0.0
$Ks-sat$	35.95±8.09	28.91±5.86
R^2	0.99	0.99

جدول ۸- نتایج آزمون دو نمونه‌ای مستقل برای مقایسه پارامترهای منحنی رطوبتی مدل ون گنوختن برآوردشده در تیمارهای

مطالعاتی

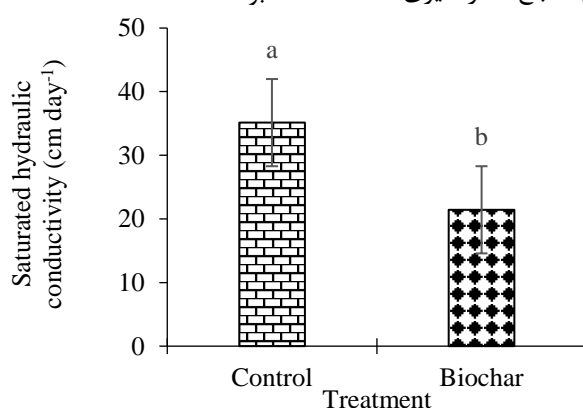
Table 8 Results of the Independent-samples T-test comparing of the the estimated parameters of soil moisture curve of Van Genuchten in the treatments

Components	t	df	Sig.
θ_r (%)	2.53	4	0.06
θ_s (%)	0.27	4	0.80
α (1/cm)	2.00	4	0.12
h_a (cm)	-1.14	4	0.32
n	-1.00	4	0.37
m	-1.07	4	0.34
L	-	4	1.00
$Ks-sat$	1.22	4	0.29

بین تیمار شاهد و تیمار زغال زیستی اختلاف معنی‌دار داشت ($p < 0.05$). بنابراین، میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری‌شده در تیمار زغال زیستی ۱۳/۷۰ سانتی‌متر در روز (۳۹ درصد) نسبت به تیمار شاهد کم‌تر بود.

هدایت هیدرولیکی اشباع

میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری‌شده با روش بار ثابت در تیمار شاهد و زغال زیستی به ترتیب $35/1 \pm 13/33$ و $21/43 \pm 3/26$ بود (شکل ۵). بر اساس تحلیل آماری هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری‌شده



شکل ۵- میانگین±انحراف معیار هدایت هیدرولیکی اشباع مشاهداتی خاک مطالعاتی تیمارهای شاهد و زغال زیستی

Figure 5 The mean±SD of the observed saturated hydraulic conductivity for the study soil in the control and biochar treatments

سنگین از طریق افزودن زغال زیستی، در شرایط شبیه‌سازی آزمایشگاهی و در مقیاس سینی‌های کوچک و همچنین در بازه زمانی کوتاه انجام شد. تحلیل یافته‌ها نشان داد که کاربرد زغال زیستی بازه زمانی کوتاه (۴۰ روز) نقش قابل توجهی در بهبود مؤلفه‌های مهم فیزیکی خاک نداشته و لذا زغال زیستی به‌عنوان یک رویکرد و افزودنی زودبازده خاک مورد تأیید قرار نگرفت. منحنی رطوبتی خاک و مؤلفه‌های آن همچنین پارامترهای برآوردی مدل ون گنوختن نیز که متأثر ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری خاک است، اثرپذیری معنی‌داری از افزودن زغال زیستی در بازه زمانی کوتاه نداشت. با این حال، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک مورد مطالعه متأثر از زغال زیستی در بازه زمانی ۴۰ روزه کاهش معنی‌دار نشان داد. این کاهش متأثر از ضریب نرمی پایین‌تر ذرات زغال زیستی نسبت به ذرات خاک است. ذرات ریزتر زغال زیستی با قرارگیری در بین ذرات خاک، موجب انسداد منافذ خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع شده است. یافته‌های پژوهش حاضر در کوتاه مدت و مقایسه آن با نتایج مطالعات انجام شده در بلند مدت حاکی از ضرورت توجه به بازدهی استفاده از زغال زیستی به‌عنوان افزودنی و اصلاح‌گر خاک در بلندمدت می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد تحقیقات بیشتری در شرایط مزرعه‌ای جهت ارزیابی اثرگذاری کاربرد سطوح مختلف زغال زیستی در بازه‌های زمانی کوتاه، میان و دراز مدت روی مؤلفه‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های اراضی کشاورزی انجام گردد.

در این راستا، Wang *et al.* (2022) کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع با کاربرد چهار سطح (صفر، سه، شش و نه کیلوگرم بر مترمربع) زغال زیستی را گزارش کردند. همچنین Zhao *et al.* (2015) اثرگذاری دو سطح زغال زیستی (سه و شش درصد وزنی) زغال زیستی در کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع را تأیید کردند. هرچند Castellini *et al.* (2015) و Jeffery *et al.* (2015) تأثیرپذیری و Wong *et al.* (2018) افزایش هدایت هیدرولیکی با کاربرد زغال زیستی را گزارش کردند. ترکیب ذرات کوچکتر زغال زیستی با خاک موجب باریکتر شدن اندازه منافذ خاک و افزایش اعوجاج و در نتیجه کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌شود (Zhao *et al.* 2016; Lim *et al.* 2016; Ajayi *et al.* 2016). در تحقیق حاضر پایین بودن مقادیر ضریب نرمی (جدول ۳) در زغال زیستی مورد استفاده نسبت به خاک مورد مطالعه، علت کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر کاربرد زغال زیستی بوده است. عبارتی، ذرات ریزتر زغال زیستی با مسدود یا باریک کردن منافذ خاک و افزایش اعوجاج، موجب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع گردیده‌اند. کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع، جریان آب در محیط ریشه را مختل نموده و مانع توزیع یکنواخت آب در محیط ریشه می‌شود. از تأثیر مثبت آن می‌توان به کاهش آبشویی و کاهش هدر رفت املاح اشاره کرد.

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان بهبود مؤلفه‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک اراضی کشاورزی با بافت

Reference

- Adekiya A.O., Agbede T.M., Olayanju A., Ejue W.S., Adekanye T.A., Adenusi T.T. and Ayeni J.F. 2020. Effect of biochar on soil properties, soil loss, and cocoyam yield on a tropical sandy loam Alfisol. *The Scientific World Journal*, 2020: 9391630.
- Ajayi A.E., Holthusen D., Horn R. 2016. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. *Soil Tillage Research*, 155, 166–175.
- 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: 190-196.
- Asghari Sh., Zeinalzadeh K., Kheirfam H. and Habibzadeh Azar, B. 2022. The impact of cyanobacteria inoculation on soil hydraulic properties at the lab-scale experiment. *Agricultural Water Management*, 272: 107865.
- Barbier E.B. and Hochard J.P. 2018. Land degradation and poverty. *Nature Sustainability*, 1(11): 623-631.

- Behzadfar M., Sadeghi S.H.R., Khanjani M.J. and Hazbavi Z. 2017. Effects of rates and time of zeolite application on controlling runoff generation and soil loss from a soil subjected to a freeze-thaw cycle. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(2): 95-101.
- Cao Y., Wang B., Guo H., Xiao H. and Wei T. 2017. The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the loess plateau. *Ecological Engineering*, 102: 270-279.
- Castellini M., Giglio L. and Niedda M. 2015. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 154: 1-13.
- Devereux R.C., Sturrock C.J. and Mooney S.J. 2012. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 103(1): 13-18.
- Du Preez C.C. and Van Huyssteen C.W. 2020. Threats to soil and water resources in South Africa. *Environmental Research*, 183: 109015.
- Fu Q., Zhao H., Li T., Hou R., Liu D., Ji Y. and Yang L. 2019. Effects of biochar addition on soil hydraulic properties before and after freezing-thawing. *Catena*, 176: 112-124.
- Gao Y., Li T., Fu Q., Li H., Liu D., Ji Y., Li Q. and Cai Y. 2020. Biochar application for the improvement of water-soil environments and carbon emissions under freeze-thaw conditions: An in-situ field trial. *Science of the Total Environment*, 723: 138007.
- Ghorbani-Dashtaki S., Tozhi M. Motaghian H. and Ghasemi A. 2021. Effect of walnut wood and walnut green shell biochar on water retention status in a sandy soil. *Applied Soil Research*, 8(4): 44-56 (In Persian)
- Głąb T., Żabiński A., Sadowska U. 2018. Effects of co-composted maize, sewage sludge, and biochar mixtures on hydrological and physical qualities of sandy soil. *Geoderma*. 315, 27-35.
- Gray M., Johnson M.G., Dragila M.I. 2014. Water uptake in biochars: the roles of porosity and hydrophobicity. *Biomass Bioenergy* 61 (4), 196-205.
- Greenland D.J. 1977. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 281: 193-208.
- Hardie M., Clothier B., Bound S., Oliver G. and Close D. 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*, 376(1): 347-361.
- Heidari A., Stahl R., Younesi H., Rashidi A., Troeger N. and Ghoreyshi A.A. 2014. Effect of process conditions on product yield and composition of fast pyrolysis of *Eucalyptus grandis* in fluidized bed reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4): 2594-2602.
- Herath H.M.S.K., Camps-Arbestain M. and Hedley M. 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209: 188-197.
- Hillel D. 2003. *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier.
- Jeffery S., Meinders M.B., Stoof C.R., Bezemer T.M., van de Voorde T.F., Mommer L., and van Groenigen J.W. 2015. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma*, 251: 47-54.
- Jiang H., Han X., Zou W., Hao X. and Zhang B. 2018. Seasonal and long-term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the Mollisol region of Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 268: 133-143.
- Kheirfam H. and Roohi M. 2020. Accelerating the formation of biological soil crusts in the newly dried-up lakebeds using the inoculation-based technique. *Science of the Total Environment*, 706: 136036.
- Kheirfam H., Sadeghi S.H.R. and Zarei Darki B. 2020. Soil conservation in an abandoned agricultural rain-fed land through inoculation of cyanobacteria. *Catena*, 187: 104341.
- Kim, W.K., Shim, T., 2013. Characterization of cadmium removal from aqueous solution by biochar produced from a giant miscanthus at different pyrolytic temperatures. *Bioresour. Technol.* 138 (2), 266-270.
- Kranz C.N., McLaughlin R.A., Johnson A., Miller G. and Heitman J.L. 2020. The effects of compost incorporation on soil physical properties in urban soils—A concise review. *Journal of Environmental Management*, 261: 110209.
- Laird D.A., Novak J.M., Collins H.P., Ippolito J.A., Karlen D.L., Lentz R.D., Sistani K.R., Spokas K. and Van Pelt R.S. 2017. Multi-year and multi-location soil quality and crop biomass yield responses to hardwood fast pyrolysis biochar. *Geoderma*, 289: 46-53.
- Lei Z.D., Yang S.X. and Xie S.Z. 1988. *Soil Water Dynamics*. Tsinghua University Press, Beijing, 18-24.

- Liang J.P., Li Y., Si B., Wang Y.Z., Chen X.G., Wang X.F., Chen H.R., Wang H.R., Zhang F.C., Bai Y.G., Biswas A. 2021. Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils. *Science of the Total Environment*, 771: 144802.
- Lim T.J., Spokas K.A., Feyereisen G., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, 142: 136–144.
- Liu B., Fan H., Han W., Zhu L., Zhao X., Zhang Y. and Ma R. 2021. Linking soil water retention capacity to pore structure characteristics based on X-ray computed tomography: Chinese Mollisol under freeze-thaw effect. *Geoderma*, 401: 115170.
- Maltas A., Kebli H., Oberholzer H.R., Weisskopf P. and Sinaj S. 2018. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degradation & Development*, 29(4): 926-938.
- Mokarram-Kashtiban S., Hosseini S.M., Tabari Kouchaksaraei M. and Younesi H. 2019. Biochar improves the morphological, physiological and biochemical properties of white willow seedlings in heavy metal-contaminated soil. *Archives of Biological Sciences*, 71(2): 281-291.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513-522.
- Neville A.M. and Brooks, J.J. 1987. *Concrete technology* (Vol. 438). England: Longman Scientific & Technical.
- Paz-Ferreiro J., Lu H., Fu S., Méndez A. and Gascó G. 2014. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Solid Earth*, 5(1): 65-75.
- Randolph P., Bansode R.R., Hassan O.A., Rehrah D., Ravella R., Reddy M.R., Watts D.W., Novak J.M. and Ahmedna M. 2017. Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters. *Journal of Environmental Management*, 192: 271-280.
- Sadeghi S.H.R. 2017. Soil erosion in Iran: state of the art, tendency and solutions. *Poljoprivreda i Sumarstvo* 63(3): 33-37.
- Sadeghi S.H.R., GhavimiPanah M.H., Younesi, H. and Kheirfam H. 2018. Ameliorating some quality properties of an erosion-prone soil using biochar produced from dairy wastewater sludge. *Catena*, 171: 193-198.
- Sadeghi S.H.R., Najafinejad A. Gharemahmudli S., Zarei Darki B. Behbahani A.M. and Kheirfam H. 2021. Reduction in soil loss caused by a freeze-thaw cycle through inoculation of endemic soil microorganisms. *Applied Soil Ecology*, 157: 103770.
- Smith P., Calvin K., Nkem J., Campbell D., Cherubini F., Grassi G., Korotkov V., Le Hoang A., Lwasa S., McElwee P. and Nkonya E. 2020. Which practices co-deliver food security, climate change mitigation and adaptation, and combat land degradation and desertification. *Global Change Biology*, 26(3): 1532-1575.
- Van Genuchten M.T. 1980. A closed - form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892-898.
- Van Genuchten M.T. Leij F.J. and Yates S.R. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. US Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, California.
- Verheijen F.G.A., Zhuravel A., Silva F.C., Amaro A., Ben-Hur M., Keizer J.J. 2019. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma*, 347: 194–202.
- Vitkova J., Surda P., Kondrlova E., Horak J. and Rodny, M. 2017. Analysis of soil water content and crop yield after biochar application in field conditions. *Plant, soil and environment*, 63(12): 569-573.
- Wang H., Shao D., Ji B., Gu W. and Yao M. 2022. Biochar effects on soil properties, water movement and irrigation water use efficiency of cultivated land in Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 829: 154520.
- Wong J.T.F., Chen Z., Wong A.Y.Y., Ng C.W.W. and Wong M.H. 2018. Effects of biochar on hydraulic conductivity of compacted kaolin clay. *Environmental Pollution*, 234: 468–472.
- Xue S., Ye Y., Zhu F., Wang Q., Jiang J. and Hartley W. 2019. Changes in distribution and microstructure of bauxite residue aggregates following amendments addition. *Journal of Environmental Sciences*, 78: 276-286.

- Yang C.D. and Lu, S.G. 2021. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. *Soil and Tillage Research*, 205, 104798.
- Zhao D., Huang S., Huang J.S. 2015. Effects of biochar on hydraulic parameters and shrinkage-swelling rate of silty clay. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31 (17): 136–143.
- Zuo Y., Meng F., Li T., Fu Q., Liu D., Hou R. Li Q. and Li M. 2022. Effect of biochar application on freezing-thawing deformation of farmland soil during freeze–thaw cycling. *Geoderma*, 405: 115510.

Evaluation of the Short-Term Affectivity of Soil Physical and Hydraulic Properties from Biochar

Zahra Mohammadkhani¹, Kamran Zeinalzadeh^{2*}, Hossein Kheirfam³

(Received: August, 2022 Accepted: May, 2023)

Abstract

Recently, using bio-amendments, especially biochar, has been considered to manage and improve water behavior in the soil of agricultural lands. However, the effect of biochar in a long-time period is one of the challenges. The aim of this research was to measure the physical and hydraulic components of the soil changes from the application of biochar in a short-time period at the laboratory conditions and on the small-scale trays filled by an agricultural disturbed soil. To this end, the bulk samples were taken from the research farm of Urmia University, and the samples poured into the small trays, they were treated by no biochar adding (control) and adding biochar (4.76% of soil weight). After 40 days, some physical and hydraulic components of the soil were measured. The results showed that the values of bulk specific gravity, porosity, weighted and geometric mean of diameter, fissures, transmission pores, storage pores and residual pores of soil as physical components of soil did not change significantly with the use of biochar ($p>0.05$). The effect of biochar on the components of the soil moisture curve (from suction 2 to 15000 cm), the important potential points of the soil moisture curve including the Field capacity, Permanent wilting point and Available water capacity, as well as the parameters of soil moisture curve of Van Genuchten model was not significant ($p>0.05$). However, the findings showed that the role of biochar in reducing saturated hydraulic conductivity measured by constant-head method (from 35.13 ± 1.33 to 21.43 ± 3.26 cm day^{-1} ; 39% reduction) was significant ($p<0.05$). Based on the findings of the present research, the application of biochar did not have a significant effect on the physical characteristics and hydraulic behavior of the soil in a short period of time.

Keywords: Soil conditioner, Saturated hydraulic conductivity, Soil moisture curve, Soil water movement

Mohammadkhani Z., Zeinalzadeh K. and Kheirfam H. 2024. Evaluation of the short-term affectivity of soil physical and hydraulic properties from biochar. *Applied Soil Research*, 12(1): 68-82.

1-Ph.D. student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University.

2-Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University.

3-Assistant professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University.

* Corresponding Author Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir