

مقاله علمی - پژوهشی

تأثیر نرخ‌های کاربرد زغال‌زیستی بر تغییرات زمانی مشخصات نفوذ در یک خاک سنگین

رضا اسماعیل‌نژاد^۱، کامران زینالزاده^{۲*}، سینا بشارت^۳ و حسین خیرفام^۴

چکیده

محدودیت ذاتی پایین بودن نفوذ در خاک‌های سنگین، در مدیریت بهینه آب در مزارع مشکل ایجاد می‌نماید. در سال‌های اخیر، زغال‌زیستی به‌عنوان یک اصلاح‌گر آلی خاک برای بهبود خصوصیات خاک مورد توجه قرار گرفته است ولی شناخت کافی از تأثیر کاربرد نرخ‌های مختلف آن در مقیاس صحرایی روی نفوذپذیری خاک سنگین وجود ندارد. در این تحقیق، زغال‌زیستی در نرخ‌های صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار در سه تکرار در کرت‌هایی در ابعاد ۵ × ۲ متر با بافت لوم رسی اعمال شدند. پس از ۱۲ ماه، آزمایش‌های استوانه‌های مضاعف در کرت‌های تحقیق در سه مقطع زمانی با فاصله یک ماه انجام گردید. فرآیند نفوذ آب در خاک با استفاده از مدل فیلیپ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد اعمال زغال‌زیستی برای تیمارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار، زمان لازم برای نفوذ آب آبیاری به عمق ۱۵ سانتیمتر را به ترتیب به میزان ۳۱٫۸، ۳۷٫۷ و ۴۰٫۷ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) داد. با افزایش نرخ کاربرد زغال‌زیستی، شدت تغییرات زمانی نفوذ بین آبیاری اول و دوم کاهش یافت. یافته‌ها نشان می‌دهد که کاربرد زغال‌زیستی با نرخ پایین و اقتصادی ۲۵ تن در هکتار به‌طور قابل‌توجهی نفوذپذیری خاک سنگین را بهبود داد.

واژه‌های کلیدی: افزودنی خاک، تغییرات زمانی نفوذ، خاک لوم رسی، مدل فیلیپ، سرعت نفوذ

مقدمه

بودن آب به‌ویژه در مناطق مواجه با کمبود آب دارد (Alves et al., 2024). نرخ نفوذ به عوامل مختلفی مانند بافت، ساختمان، پوشش گیاهی، فشردگی خاک، شدت بارندگی، میزان رطوبت موجود در خاک، شیوه‌های مدیریتی خاک مانند مالچ پاشی و خاک-ورزی بستگی دارد و در به حداکثر رساندن ورود آب، کاهش فرسایش و حرکت و ذخیره آب برای رشد گیاه و سلامت اکوسیستم تأثیر می‌گذارد (Garg and Goel., 2019; Haghazari et al., 2015). بافت‌های مختلف خاک تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت نفوذ آب در خاک دارند. دונگ و همکاران در مطالعه‌ای تأثیر بافت خاک را بر روی توانایی نفوذ آب در خاک مزرعه را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و دریافتند که با تغییر بافت خاک از سبک به سنگین، نرخ نفوذ خاک به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد و به‌طور کلی ظرفیت نفوذ خاک کاهش می‌یابد (Dong et al., 2019). عواملی مانند چگالی ظاهری، محتوای رس و تخلخل کل به‌طور قابل‌توجهی بر نرخ نفوذ آب در خاک‌های رسی تأثیر می‌گذارد (Alves et al.,

نفوذ یکی از اجزاء مهم فرآیند چرخه‌ای آب در خاک اراضی کشاورزی است. فرآیند نفوذ میزان مؤثر پذیرش خاک از بارندگی و آب آبیاری را تعیین می‌کند و همچنین بر رواناب سطحی و فرآیندهای فرسایش آب خاک تأثیر می‌گذارد (Mao et al., 2016). مشخصات نفوذ آب در خاک نقش مهمی در بهینه‌سازی مدیریت آبیاری، ذخیره آب در خاک، الگوهای جریان و در دسترس

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران (* نویسنده مسئول: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir)

^۳ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۴ دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴

دسترسی کم به منابع آب و ضرورت افزایش پایدار تولید مواد غذایی، استفاده از زغال زیستی برای بهبود خاک و مدیریت بهینه آبیاری در اراضی کشاورزی به عنوان یک استراتژی حیاتی شناخته شده است. زغال زیستی، یک ماده غنی از کربن که از تجزیه در اثر حرارت زیست‌توده در شرایط بدون یا حداقل حضور اکسیژن به دست می‌آید، نقشی اساسی در تقویت سلامت خاک، افزایش عملکرد محصول و کاهش اثرات تغییرات آب و هوایی دارد (Pandian et al., 2024). زغال زیستی با بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، نه تنها حاصلخیزی و بهره‌وری خاک را بهبود می‌بخشد، بلکه به حفظ آب، در دسترس بودن عناصر غذایی و فعالیت میکروبی کمک می‌کند و در نهایت منجر به افزایش عملکرد کشاورزی و بهبود زیست‌محیطی می‌شود (Nepal et al., 2023).

علاوه بر این، توانایی زغال‌زیستی برای اصلاح آلودگی‌های خاک و آب و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بر اهمیت آن در کشاورزی پایدار و حفاظت از محیط‌زیست تأکید می‌کند (Xiang et al., 2021). با این وجود نگرانی‌هایی نیز از آلودگی خاک‌ها در اثر کاربرد زغال‌زیستی در خاک وجود دارد (Xiang et al., 2021)؛ بنابراین انتخاب مناسب نرخ کاربرد زغال‌زیستی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی بسیار مهم و ضروری می‌باشد. زغال‌زیستی به دلیل خواص ویژه به عنوان یک اصلاح‌گر بسیار با ارزش و سودمند برای خاک‌های رسی شناخته شده است (Li et al., 2024). زغال‌زیستی ظرفیت نگهداری آب خاک و عمق نفوذ آب را افزایش می‌دهد و با بهبود خواص فیزیکی مانند کاهش تراکم و افزایش خاکدانه‌های خاک، رشد ریشه را تقویت می‌کند (Kuryntseva et al., 2023). علاوه بر این، کاربرد زغال‌زیستی با مقادیر کاربرد بالاتر و اندازه ذرات ریزتر منجر به بهبود نفوذ آب در خاک شنی (کاهش نفوذ آب در خاک و تبخیر آب از سطح خاک) می‌شود (Li et al., 2022). با این حال، اثر زغال‌زیستی بر ظرفیت نگهداری آب خاک ارتباط نزدیکی با بافت خاک و خواص خود زغال‌زیستی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که زغال‌زیستی می‌تواند هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های شنی را کاهش و خاک‌های لومی و رسی را بهبود بخشد (Zhang et al., 2016; Sun et al., 2020). علاوه بر این

درک ویژگی‌های خاک برای مدیریت مؤثر آب اهمیت زیادی دارد. هرچه میزان ذرات رس خاک بیشتر باشد، نفوذ تجمع‌ی خاک در زمان مشخص کمتر می‌شود، یعنی هرچه خاک سنگین‌تر باشد، ظرفیت نفوذ آن کاهش می‌یابد (Li et al., 2024). علاوه بر این، خاک‌های رسی و سنگین، پتانسیل میزان نفوذ کم حاصل از بارندگی و آب آبیاری دارند و به راحتی رواناب سطحی در آن‌ها ایجاد می‌شود و موجب کاهش کیفیت خاک می‌گردد (Gholami et al., 2019; Wang et al., 2019). خاک‌های رسی به دلیل اندازه منافذ کوچک، پتانسیل نفوذ آب محدودی دارند که باعث جریان آهسته در خاک می‌شود. این ویژگی‌های خاک‌های رسی بر چرخه هیدرولوژیکی و حفاظت از خاک تأثیر می‌گذارد و درک این محدودیت‌ها برای مدیریت حرکت آب در چنین خاک‌هایی بسیار مهم است (Faridah et al., 2023).

علاوه بر این، خاک‌های رسی خواص نامطلوبی مانند تراکم‌پذیری بالا، استحکام برشی کم و میزان نفوذ آب کم را از خود نشان می‌دهند که آن‌ها را مستعد تغییر شکل می‌کند (Abd Al-Kareem et al., 2023; Wagner., 2013). تغییرات زمانی نفوذ به دلیل تأثیر آن‌ها بر انتقال آب و املاح، هیدرولوژی خاک و مدیریت آبیاری، چالش مهمی را در اراضی کشاورزی آبی ایجاد می‌کند. مطالعات نشان داده است که رخدادهای بارش شدید ناشی از تغییرات آب و هوایی و الگوهای نامنظم، تغییرات نفوذ را تشدید می‌کنند (Jakab et al., 2019). علاوه بر این، تغییرات زمانی و مکانی نفوذ، مدیریت آبیاری سطحی را به‌ویژه در شرایط محدود منابع آب پیچیده می‌کند. ارزیابی زمانی و مکانی داده‌های نفوذ برای توصیف عملکرد آبیاری سطحی در مزارع کشاورزی بسیار مهم است (Schwankl et al., 2000).

مدیریت بهینه آبیاری در اراضی کشاورزی به دلیل افزایش تقاضا برای تولید مواد غذایی و چالش‌های مربوط به منابع آبی محدود بسیار مهم است (Kouriati et al., 2024; Fang, and Tang., 2023). تحقیقات بر اهمیت کاهش مصرف آب آبیاری، به‌ویژه در مواجهه با تغییرات آب و هوایی در مناطق خشک، با بهینه‌سازی استفاده از اراضی برای افزایش بهره‌وری آب تأکید می‌کند (Kouriati et al., 2024). در مواجهه با چالش‌هایی مانند

نفوذپذیری خاک‌های سنگین اراضی کشاورزی منطقه می‌تواند در بهبود روش‌های آبیاری کمک مؤثر بنماید.

مطالعات صحرایی در مورد تأثیر نرخ‌های مختلف کاربردهای زغال‌زیستی بر بهبود مشخصات نفوذ خاک در خاک‌های سنگین به‌ندرت انجام یافته است، همچنین به دلیل گستره وسیعی از شرایط محیطی، خاک و زغال‌زیستی، هنوز هیچ اتفاق‌نظری در مورد نتایج مطالعات صورت گرفته در خصوص تغییرات نفوذ خاک تحت اعمال زغال‌زیستی وجود ندارد (Sun et al., 2018; Wang et al., 2023; Li et al., 2024). براساس دانش محققین تحقیق حاضر، شناختی از تأثیر کاربرد نرخ‌های مختلف زغال‌زیستی روی تغییرات زمانی نفوذ وجود ندارد. برای رفع این خلأ علمی، لازم است تغییرات زمانی در مشخصات نفوذ خاک سنگین اصلاح‌شده با نرخ‌های مختلف کاربرد زغال‌زیستی در مقیاس صحرایی ارزیابی گردد؛ بنابراین، هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی تأثیر استفاده از مقادیر مختلف زغال‌زیستی بر روی تغییرات زمانی مشخصات نفوذ در خاک لوم رسی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

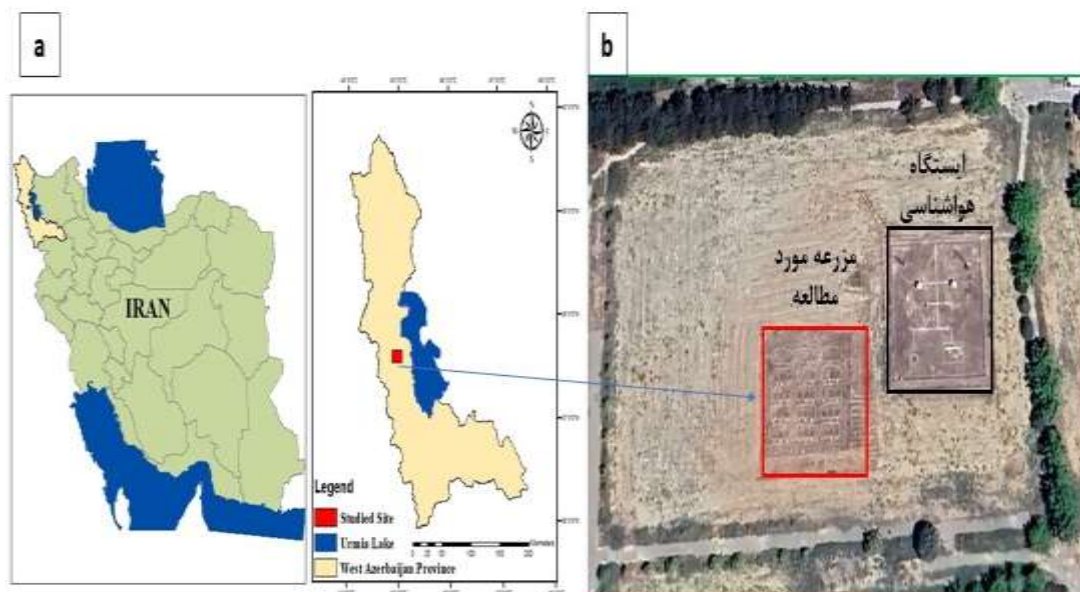
آزمایش‌های پژوهش حاضر در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه (۳۷ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی، ۴۴ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی)، واقع در دشت ارومیه در استان آذربایجان غربی انجام شد (شکل ۱). اقلیم منطقه مورد مطالعه به صورت نیمه‌خشک سرد با میانگین بارندگی سالانه ۳۴۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه $11/5^{\circ}\text{C}$ است. دشت ارومیه در شمال غربی ایران و در بخش غربی دریاچه ارومیه به‌عنوان یک منطقه مهم از لحاظ تولیدات کشاورزی در ایران شناخته می‌شود. آبیاری باغات و اراضی کشاورزی بیشتر به صورت آبیاری غرقابی است. بافت غالب خاک منطقه متوسط تا سنگین است. محدودیت نفوذ خاک اراضی این دشت از موانع مهم مدیریت بهینه آب در اراضی کشاورزی محسوب می‌شود.

اعمال زغال‌زیستی در خاک‌های رسی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای ساختار خاک را بهبود می‌بخشد و باعث تغییر در ظرفیت خاک و تخلخل خاک می‌شود (Sun, and Lu., 2014).

به‌طور کلی، زغال‌زیستی نقش مهمی در بهبود خواص هیدرولیکی خاک و عملکرد نفوذ دارد و آن را یک اصلاح‌گر ارزشمند برای بهبود کیفیت و پایداری خاک می‌کند. با این وجود، مطالعات نسبت کمی در مورد اثرات استفاده از زغال‌زیستی بر نفوذ آب در خاک‌های رسی به‌خصوص در شرایط صحرایی وجود دارد (Hardie et al., 2014; Alves et al., 2024; Ahmad Bhat et al., 2022). مدل‌هایی مانند مدل‌های کوستیاکوف و فیلیپ به‌عنوان ابزارهای مؤثری برای تخمین میزان نفوذ در سناریوهای مختلف کاربری اراضی شناسایی شده‌اند که به مدیریت کارآمد شیوه‌های آبیاری کمک می‌کنند (Alves et al., 2024).

درک دینامیک نفوذ آب در خاک از طریق ارزیابی‌ها و مدل‌سازی جامع برای مدیریت پایدار منابع آب در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند، ضروری است و امکان تصمیم‌گیری آگاهانه برای اقدامات کشاورزی و سلامت اکوسیستم را فراهم می‌کند. استفاده از مدل‌های نفوذ مانند فیلیپ، هورتون و کوستیاکوف در تخمین نرخ نفوذ در خاک‌های رسی مؤثر بوده است (Kindo et al., 2024; Faridah et al., 2023). تحقیقات نشان داده است که مدل فیلیپ برای برآورد میزان نفوذ در خاک رس قابل اعتماد است (Kindo et al., 2024).

در این مطالعه فرض شده است که اعمال زغال‌زیستی در خاک سنگین می‌تواند راه‌حل مؤثری در بهبود مشخصات نفوذ و در نتیجه مدیریت بهینه آب آبیاری در خاک سنگین باشد؛ بنابراین می‌توان این راه‌برد را به‌عنوان ایده‌ای نو برای ارتقای راندمان آبیاری در مناطقی خشک و نیمه‌خشک و مواجه با بحران کم‌آبی معرفی کرد. دشت ارومیه با بافت غالب خاک‌های متوسط تا سنگین، به دلیل مصرف بالای آب کشاورزی، تلفات زیاد آب آبیاری و تغییرات اقلیمی درگیر بحران شدید کم‌آبی است (ULRP, 2018). بهبود شرایط هیدرولیکی خاک و اصلاح



شکل ۱- (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان آذربایجان غربی، (b) جانمایی اجرای ۴ تیمار تحقیق با ۳ تکرار براساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه مورد مطالعه

آماده‌سازی تیمارهای آزمایشی

زغال‌زیستی مورد استفاده در پژوهش حاضر از ضایعات چوبی درخت صنوبر (*Populus sp.*) تهیه شده از مزارع کشت صنعتی صنوبر واقع در استان آذربایجان غربی به دلیل دسترسی زیاد و پایین بودن قیمت در منطقه طرح تهیه شد. ضایعات چوب تهیه شده به تراشه‌هایی با ذرات کم‌تر از چهار میلی‌متر تبدیل شد و تا اطمینان از کاهش حداکثری رطوبت آن‌ها، در دمای اتاق هوا خشک شد (Heidari et al., 2014). تراشه‌های چوب در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به مدت دو ساعت در غیاب و یا حضور حداقلی اکسیژن باهدف تولید زغال‌زیستی گرما شکافته شد (Randolph et al., 2017). در این تحقیق برای بررسی اثر کاربرد نرخ‌های مختلف زغال‌زیستی روی مشخصات نفوذ آب در خاک، آزمایش‌های مزرعه‌ای روی چهار تیمار (با چهار نرخ کاربرد زغال‌زیستی در محدوده کم تا زیاد براساس مطالعات پیشین مانند Gao et al., 2020 و Rezaei and Razzaghi, 2016) در سه تکرار در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در کرت‌هایی با ابعاد ۲×۵ متر (در مجموع ۱۲ کرت آزمایشی) با فاصله یک متری کرت‌ها از یکدیگر اجرا گردید (Gao et al., 2020). تیمارهای آزمایش شامل ۱- خاک بدون افزودن زغال‌زیستی (تیمار شاهد یا کنترل، B0)، ۲- خاک مخلوط شده با زغال‌زیستی به میزان ۲۵ تن در هکتار (B25)، ۳- خاک مخلوط شده با زغال‌زیستی به میزان ۵۰ تن در هکتار (B50) و ۴- خاک مخلوط شده با زغال‌زیستی به میزان ۷۵ تن در هکتار (B75) بودند. مزرعه مورد مطالعه در شهریور سال ۱۴۰۰ قبل از شروع بارندگی‌های پاییز تا عمق ۳۰ سانتی‌متری شخم و دیسک زده شد و زغال‌زیستی تهیه شده به صورت دستی به مقدار مورد نظر در هر کرت آزمایش به طور یکنواخت روی سطح خاک پخش (Toková et al., 2020) و تا عمق ۲۵ سانتی‌متری خاک مخلوط گردید (شکل ۲).

شکل ۱- (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان آذربایجان غربی، (b) جانمایی اجرای ۴ تیمار تحقیق با ۳ تکرار براساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه مورد مطالعه



شکل ۲- مراحل آماده‌سازی و اعمال زغال زیستی به مزرعه مطالعاتی واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه. (a) شخم زدن و آماده‌سازی کرت‌های آزمایش، (b) پخش یکنواخت زغال زیستی با نرخ کاربرد تعیین شده در سطح هر کرت، (c) مخلوط زغال زیستی و خاک به صورت دستی تا عمق ۲۵ سانتی‌متری، (d) وضعیت نهایی تیمارهای آماده‌شده برای اندازه‌گیری‌های تحقیق

اندازه‌گیری‌های تحقیق

زمانی نفوذ در یک فصل زراعی، آزمایش‌های نفوذ در سه مقطع زمانی با فواصل یک ماه با استفاده از روش استوانه‌های مضاعف (Li et al., 2019) در فصل زراعی سال ۱۴۰۱، در چهار تیمار مورد مطالعه با سه تکرار انجام شد. آزمایش نفوذ تا نفوذ تجمعی ۱۵ سانتیمتر آب (عمق آب آبیاری معمول در شبکه‌های آبیاری دشت ارومیه) ادامه یافت. زمان نهایی لازم برای نفوذ تجمعی ۱۵ سانتیمتر آب (عمق آب آبیاری معمول در شبکه‌های آبیاری دشت ارومیه) و سرعت نفوذ متوسط (ارتفاع آب نفوذ یافته بر فرصت زمان نفوذ) در کرت‌های مورد مطالعه اندازه‌گیری گردید. برای اجتناب از تأثیر تغییرپذیری مکانی روی دقت داده‌های اندازه‌گیری شده در مقاطع زمانی مختلف، تمام اندازه‌گیری‌های زمانی در هر کرت روی یک موقعیت انجام شد و تلاش گردید از به هم خوردگی سطح خاک پرهیز شود. پارامترهای مدل نفوذ فیلیپ (Philip, 1957) (رابطه ۱) با برازش بر داده‌های اندازه‌گیری مقادیر نفوذ تجمعی و زمان نفوذ در تیمارهای تحقیق، تعیین و تحلیل گردید.

برای شناخت شرایط آزمایش و قبل از شروع اندازه‌گیری‌های پارامترهای مورد نظر، با استفاده از نمونه‌های زغال زیستی و نمونه‌های دست‌خورده هوا خشک‌شده خاک مورد مطالعه، بافت خاک بر اساس طبقه‌بندی خاک USDA (وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا)، pH و هدایت الکتریکی (EC) از طریق عصاره‌گیری از نمونه‌های خاک به ترتیب با نسبت‌های (w/v) ۲/۵ و ۱ (w/v) ۱:۵ (Manzano et al., 2020) و از طریق عصاره‌گیری از نمونه‌های زغال زیستی با نسبت (w/v) ۱:۲۰ (Libutti et al., 2021) در سه تکرار تعیین گردید. جرم مخصوص ظاهری زغال زیستی مورد استفاده و خاک مورد مطالعه نیز به روش وزنی اندازه‌گیری شد. نفوذپذیری خاک از خصوصیات هیدرولیکی مهم خاک در مطالعات پدیده‌های سیکل هیدرولوژی خاک مانند برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری، رواناب، تبخیر از سطح خاک، تغذیه آب زیرزمینی و فرسایش است. در این تحقیق، برای آشکارسازی بهتر تغییرات

ذرات شن، سیلت و رس به ترتیب $(\pm 0.91/36/41)$ ، $(\pm 0.71/32)$ درصد تا عمق مورد مطالعه (30) سانتی متری سطح خاک یکنواخت بودند. بررسی مشخصات فیزیکی و شیمیایی نشان داد زغال زیستی دارای pH و EC به ترتیب، $(\pm 0.02/9.43)$ و $(\pm 0.01/0.49)$ دسی زیمنس بر متر و خاک دارای pH و EC به ترتیب، $(\pm 0.34/8.02)$ و $(\pm 0.02/0.62)$ دسی زیمنس بر متر بودند. همچنین، جرم مخصوص ظاهری زغال زیستی و خاک مورد مطالعه قبل از شروع اندازه‌گیری‌ها به ترتیب 0.48 و $1/31(\pm 0.05)$ گرم در سانتیمتر مکعب بود. هدایت الکتریکی زغال زیستی بسته به نحوه‌ی تولید و نوع ماده اولیه تغییر می‌یابد (Somparn et al., 2020; Tasim et al., 2019) و در منابع مختلف در دامنه 0.15 و 2.62 دسی زیمنس بر متر و حتی مقادیر بیشتر از 2.62 دسی زیمنس بر متر نیز ارائه شده است. در این مطالعه، مقدار هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده زغال زیستی (0.49) دسی زیمنس بر متر در محدوده داده‌های گزارش شده پارامتر مذکور است.

بررسی تأثیر نرخ‌های مختلف زغال زیستی بر روی تغییرات زمانی مشخصات نفوذ

شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات مقادیر زمان لازم برای نفوذ عمق آب ۱۵ سانتیمتر را برای خاک اصلی و خاک اصلاح‌شده با زغال زیستی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد بافت خاک مزرعه مورد مطالعه یکنواخت بود و با توجه به اینکه تمام مزرعه یکسان و مشابه تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی بودند و قبل از اعمال تیمارها و آزمایش نفوذ، خاک مورد مطالعه آب آبیاری دریافت نکرده بود می‌توان نتیجه گرفت که رطوبت اولیه خاک قبل از آزمایش نفوذ در تمام کرت‌های تحقیق یکسان و بدون تغییر معنی‌داری بودند. به عبارت بهتر، نتایج آزمون نفوذ فقط تحت تأثیر اعمال زغال زیستی بودند. تجزیه و تحلیل آماری نتایج در سه مقطع زمانی مورد مطالعه نشان‌دهنده تغییرات معنی‌دار بین تیمار شاهد با سایر تیمارها است $(P < 0.05)$ ، این درحالی است که بین نرخ‌های مختلف زغال زیستی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت $(P > 0.05)$. نتایج بیانگر بهبود شرایط نفوذ در خاک سنگین با کاربرد زغال

$$I(t) = St^{0.5} + Kt \quad (1)$$

که در آن، I نفوذ تجمعی (cm) در زمان t مدت‌زمان از شروع فرایند نفوذ (min)، S پارامتر جذب $(\text{cm min}^{-0.5})$ و K پارامتر هیدرولیکی خاک (cm min^{-1}) است.

ارزیابی کارایی مدل فیلیپ

برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مشخصات نفوذ با استفاده از مدل فیلیپ، از شاخص‌های آماری همچون ضریب تبیین R^2 و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) استفاده شدند (Rezaei et al., 2021):

$$R^2 = \frac{n(\sum_{i=1}^n P_F^{(i)} P_M^{(i)}) - (\sum_{i=1}^n P_F^{(i)}) (\sum_{i=1}^n P_M^{(i)})}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n P_F^{(i)2} - (\sum_{i=1}^n P_F^{(i)})^2][n \sum_{i=1}^n P_M^{(i)2} - (\sum_{i=1}^n P_M^{(i)})^2]}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_M^{(i)} - P_F^{(i)})^2}{n}} \quad (3)$$

$P_M^{(i)}$ و $P_F^{(i)}$ به ترتیب مقادیر برازش، مقادیر اندازه‌گیری شده و تعداد نقاط داده هستند. هرچه مقادیر RMSE کوچک‌تر باشد، برآورد دقت بالاتری دارد.

تحلیل آماری

در ابتدا تبعیت داده‌ها (میانگین داده‌ها در سه تکرار) از توزیع نرمال به‌وسیله آزمون کولموگروف اسمیرونوف و همگن بودن واریانس‌ها به‌وسیله آزمون لون بررسی شد. به‌منظور بررسی تفاوت یا عدم تفاوت تیمارهای مختلف با توجه به نرمال بودن و همگن بودن داده‌ها از آنالیز واریانس یک‌طرفه و آزمون دانکن در نرم‌افزار SPSS۲۰ استفاده شد.

نتایج و بحث

مشخصات خاک و زغال زیستی

توزیع اندازه ذرات خاک در کرت‌های آزمایش اختلاف معنی‌دار $(P > 0.05)$ نداشت و بافت خاک مزرعه مورد مطالعه به‌صورت لوم رسی (بر اساس طبقه‌بندی خاک USDA) با متوسط درصد

توزیع رطوبت خاک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنان که همسو با نتایج تحقیق حاضر است، نشان داد افزودن زغال زیستی به خاک به‌طور قابل توجهی میزان نفوذ را در مقایسه با خاک شاهد و بدون زغال زیستی افزایش می‌دهد. آنان بیان نمودند بهبود در مشخصات نفوذ به بهبود تخلخل در اثر زغال زیستی نسبت داده می‌شود (Wang et al., 2023). سان و همکاران گزارش نمودند که کاربرد نرخ‌های پایین زغال زیستی (کمتر از ۲٪) در خاک لوم سیلنی موجب افزایش نفوذ گردید درحالی‌که در نرخ‌های کاربرد بالاتر (۵٪ و ۱۰٪) مقدار نفوذ کاهش یافت (Sun et al., 2018). بررسی نتایج مطالعات پیشین در ارتباط با مشخصات نفوذ در خاک‌های اصلاح‌شده با زغال زیستی بیانگر اختلاف در نتایج گزارش‌شده است و این اختلاف ناشی از خواص زغال زیستی (نوع و اندازه ذرات)، نوع خاک و شرایط آزمایش مربوطه است.

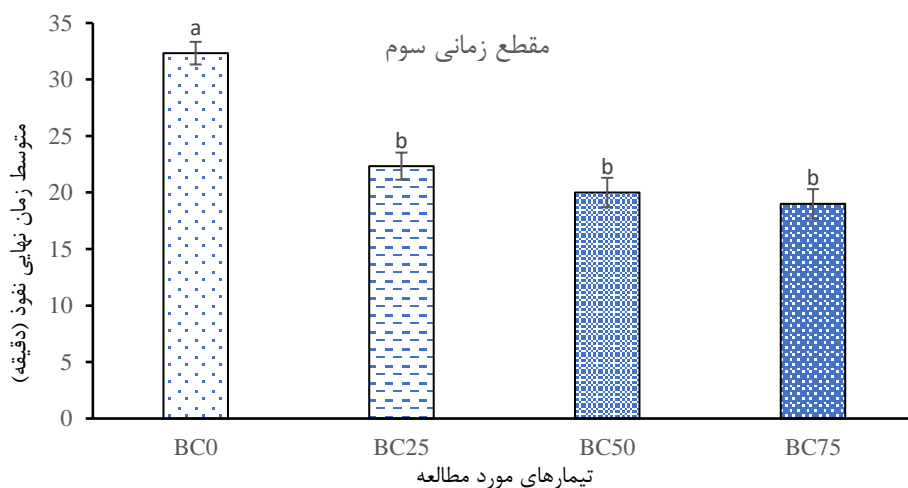
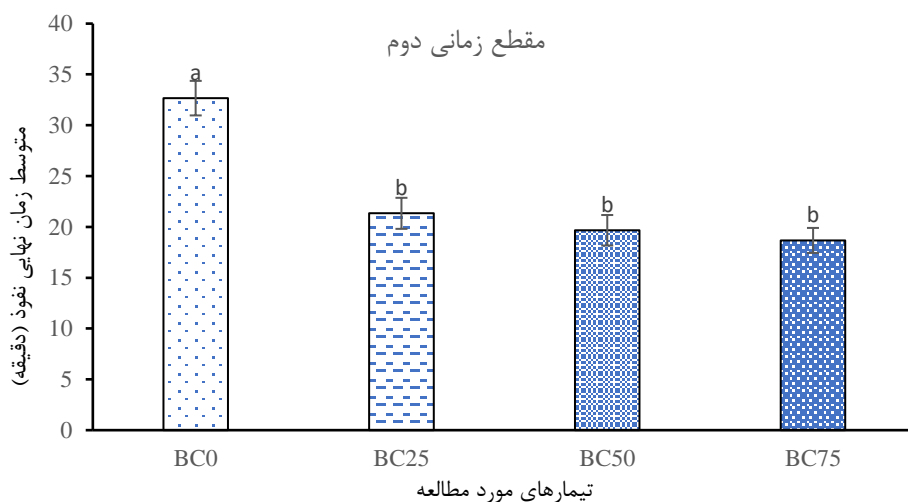
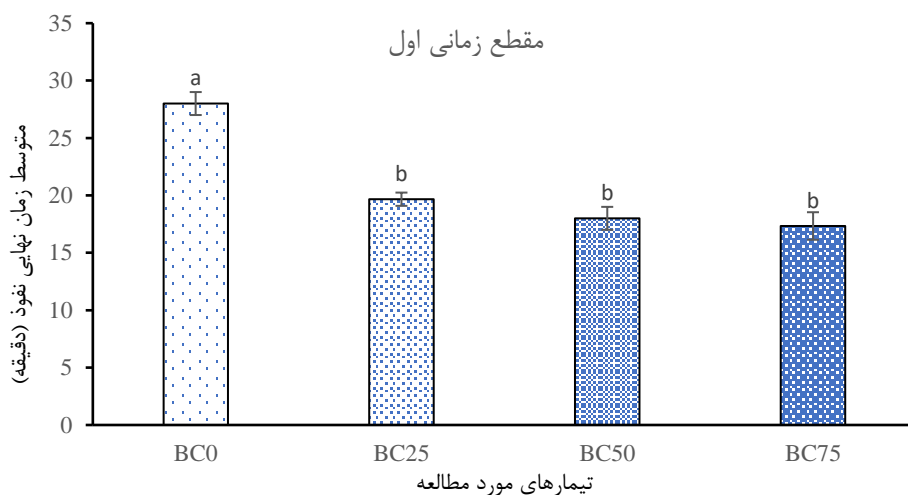
در کل، نتایج این مطالعه نشان داد اعمال زغال زیستی منجر به بهبود شرایط نفوذ (افزایش سرعت نفوذ) خاک لوم رسی می‌شود. افزایش نرخ کاربرد زغال زیستی تغییر معنی‌داری در مشخصات نفوذ ایجاد نمود ولی از شدت تغییرات نفوذ کاست (اختلاف نفوذ در مقاطع مختلف کم شد). این تأثیر مثبت اعمال زغال زیستی در نرخ‌های پایین بخصوص تیمار B25 بسیار مشهود است، لذا بیانگر مناسب بودن نرخ کاربرد ۲۵ تن در هکتار (به‌عنوان پایین‌ترین نرخ کاربرد تأثیرگذار مورد مطالعه در این تحقیق) در خاک لوم رسی مورد مطالعه از نظر مشخصات فنی و اقتصادی است.

پارامترهای برازش مدل فیلیپ

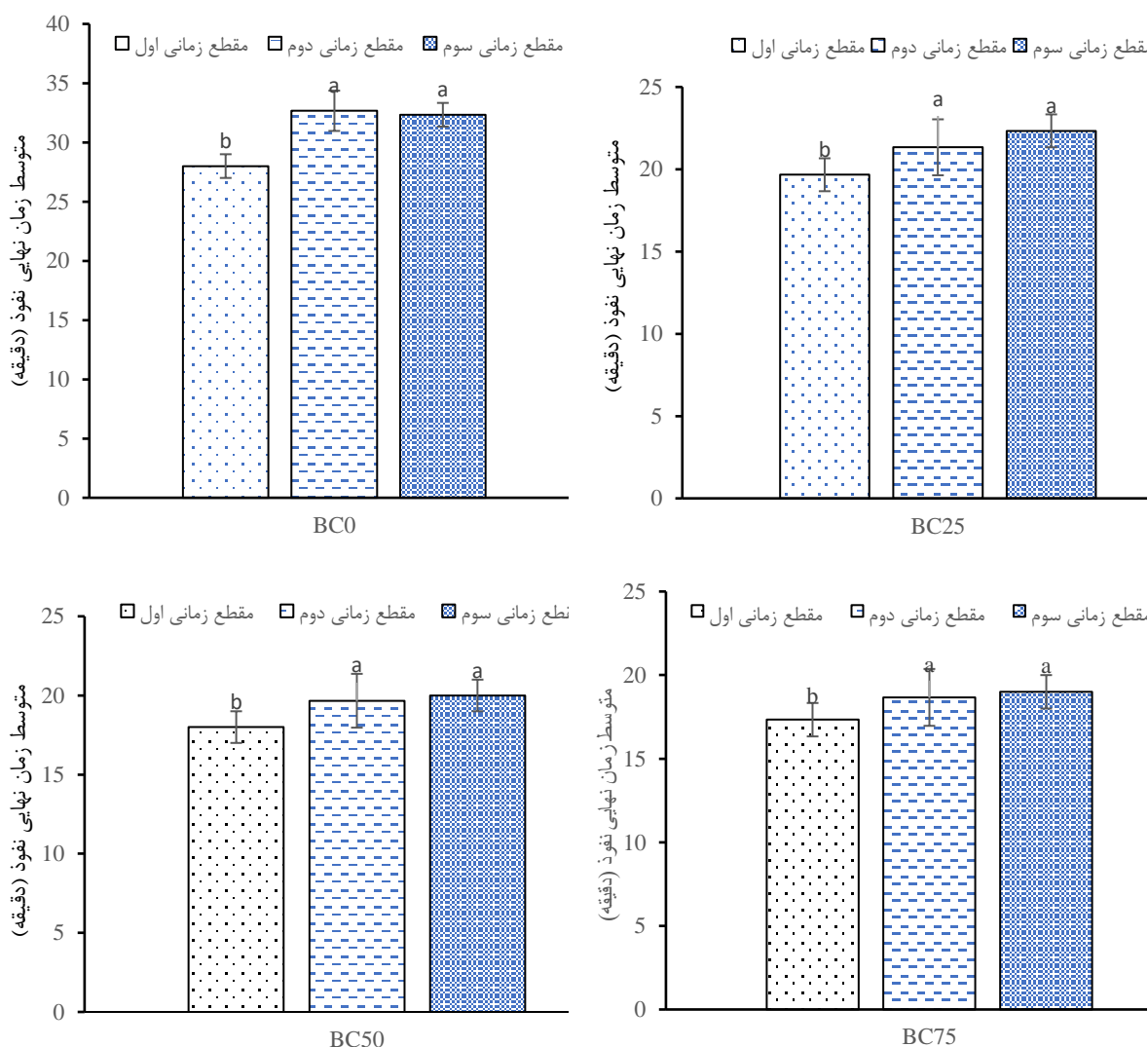
فرآیند نفوذ با استفاده از مدل فیلیپ (Philip, 1957) شبیه‌سازی گردید و نتایج برازش برای خاک اصلاح‌نشده و خاک‌های تیمار شده با زغال‌زیستی در طول سه مقطع زمانی مورد مطالعه در جداول (۱) تا (۳) ارائه شد. بررسی نتایج برازش مدل فیلیپ نشان می‌دهد که ضریب تبیین R^2 در محدوده ۰/۹۸۴۱۰ تا ۰/۹۹۸۷۲ متغیر بود که نشان‌دهنده قابلیت برازش بالای مدل فیلیپ و قابل‌اعتماد بودن آن برای شبیه‌سازی نفوذ آب در خاک لوم رسی و خاک‌های اصلاح‌شده با زغال زیستی است.

زیستی است، به‌طوری‌که با کاربرد زغال زیستی زمان لازم برای نفوذ عمق آب ۱۵ سانتیمتر کاهش (به عبارتی سرعت نفوذ آب افزایش) در خاک منطقه مورد مطالعه یافت ($P < 0.05$). نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات (Duan et al., 2021; Li et al., 2022) مطابقت دارد. متوسط سرعت نفوذ آب در مقاطع زمانی اول، دوم و سوم به‌طور متوسط برای تیمارهای B0، B25، B50 و B75 به ترتیب، ۳۱، ۲۱، ۱۹ و ۱۸ دقیقه بود. نتایج نشان می‌دهد که کاربرد زغال زیستی متوسط زمان لازم برای نفوذ را برای تیمارهای B25، B50 و B75 به ترتیب ۳۱/۸، ۳۷/۹ و ۴۰/۷ درصد نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش داد ($P < 0.05$). بررسی نتایج تحلیل آماری بیانگر افزایش معنی‌دار مدت‌زمان لازم برای نفوذ عمق آب ۱۵ سانتیمتر در مقطع زمانی دوم نسبت به زمان اول در تیمار شاهد است. این کاهش سرعت نفوذ (افزایش زمان لازم برای نفوذ) می‌تواند در نتیجه تحکیم خاک در اثر آبیاری دوم نسبت به آبیاری اول باشد. ولی در تیمار شاهد، بین دو مقطع زمانی دوم و سوم، اختلاف معنی‌داری در زمان نفوذ مشاهده نشد. در تیمارهای اصلاح‌شده با زغال زیستی در خاک سنگین مورد مطالعه، با افزایش نرخ کاربرد زغال زیستی اختلاف‌زمان نفوذ (معادل آن سرعت نفوذ) بین دو مقطع زمانی اول و دوم کاهش یافت، به طوری‌که در تیمار B75 به کمترین مقدار خود رسید. در همه تیمارهای اصلاح‌شده با زغال زیستی نیز بین دو مقطع زمانی دوم و سوم اختلاف در مدت زمان لازم برای نفوذ معنی‌دار نبود ($P > 0.05$).

لی و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی و با شبیه‌سازی ستون خاک به بررسی تأثیر نسبت‌های مختلف کاربرد زغال زیستی بر نفوذ آب در خاک رسی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که میزان نفوذ جمعی با افزایش کاربرد اعمال زغال زیستی کاهش می‌یابد که مغایر با نتایج تحقیق حاضر است (Li et al., 2024). به هم خوردن ساختمان خاک در حجم کوچک نمونه‌های آزمایشگاهی، از عوامل مهم متفاوت بودن نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و صحرائی است (Ahmad Bhat et al., 2022). این در حالی است که ونگ و همکاران اثرات دو نوع زغال زیستی کاه ذرت و پوسته برنج (به نسبت وزنی ۲٪، ۴٪ و ۸٪) را در فرآیند نفوذ خاک و



شکل ۳- بررسی تغییرات متوسط زمان نهایی نفوذ در تیمارهای تحقیق برای هر مقطع زمانی مورد مطالعه. حروف کوچک مختلف در بالای میله‌ها تفاوت معنی‌داری را در $p < 0.05$ نشان می‌دهد.



شکل ۴- بررسی تغییرات زمانی متوسط زمان نفوذ برای هر تیمار. حروف کوچک مختلف در بالای میله‌ها تفاوت معنی‌داری را در $p < 0.05$ نشان می‌دهد

سپس کاهش پارامتر هیدرولیکی با افزایش نرخ کاربرد زغال زیستی است، اما به‌طور کلی، پارامتر هیدرولیکی به‌طور متوسط در سه مقطع زمانی به میزان ۵۸، ۶۰/۹ و ۶۱/۴ درصد نسبت به تیمار شاهد به ترتیب برای تیمارهای B25، B50 و B75 افزایش یافته است. پارامتر S (Sorptivity) جذب شاخصی است که برای توضیح جریان آب خاک از طریق شبکه منافذ خاک استفاده می‌شود. تغییرات جذب بستگی به آرایش و تداوم سیستم‌های منافذ خاک دارد (Girei et al., 2016). در ابتدای فرایند نفوذ، مقادیر جذب با برآزش نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) در مقابل جذر زمان (دقیقه^{0.5}) تعیین می‌گردد (Al-Omran et al., 2019). بررسی جداول ۱، ۲

کیندو و همکاران نشان دادند که مدل فیلیپ با مقادیر بالای R^2 برای برآورد میزان نفوذ در خاک رس قابل‌اعتماد است (Kindo et al., 2024). علاوه بر این، آیودل و همکاران نتایج برآزش خوبی از معادله فیلیپ را در خاک لومی شنی اصلاح‌شده مشاهده نمودند (Ayodele et al., 2009). به همین ترتیب، ویلاگرا و همکاران نیز بیان نمودند مدل فیلیپ از دقت خوبی برای برآزش نفوذ در خاک سبک بافت داشته است (Villagra- and Horn., 2019). نتایج مطالعه ما نشان داد که تیمار B50 بالاترین سطح پارامتر هیدرولیکی را در مقاطع زمانی اول و دوم را نشان می‌دهد. بررسی نتایج ابتدا بیانگر افزایش و

بافت (silt clay loam) انجام نمودند، مطابقت داشته است (Li et al., 2022). این درحالی است ونگ و همکاران در مطالعه‌ای بر روی خاک‌های سبک بافت با استفاده از مدل فیلیپ فرآیند نفوذ آب در خاک اصلاح‌شده با زغال زیستی را شبیه‌سازی کردند و نتایج متناقضی بامطالعه ما داشته است. به‌طوری‌که آنان بیان نمودند پارامتر جذب و نرخ نفوذ پایدار با اعمال زغال زیستی عمدتاً کمتر از تیمار شاهد (بدون زغال زیستی) بود که نشان می‌دهد زغال زیستی اثرات کاهشی بر نرخ نفوذ داشته است (Wang et al., 2023). این تفاوت ممکن است ناشی از بافت‌های مختلف خاک و مقادیر زغال زیستی اعمالی باشد، علاوه بر این شرایط انجام آزمایش نیز بسیار تأثیرگذار بوده و بستگی به آزمایشگاهی بودن و یا صحرایی بودن مطالعه نتایج متفاوتی بدست می‌آید (Ahmad Bhat et al., 2022).

و ۳ نشان می‌دهد که در مقاطع زمانی اول و دوم، تیمار B75 و در مقطع زمانی سوم تیمار B50 بالاترین میزان جذب را داشته است؛ بنابراین جذب تحت تیمارهای زغال زیستی بیشتر از تیمار شاهد (بدون زغال زیستی) بود که نشان می‌دهد افزودن زغال زیستی جذب را تسریع می‌بخشد و با افزایش نرخ افزودن زغال زیستی، جذب ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. به‌طور کلی پارامتر جذب به‌طور متوسط در سه مقطع زمانی به میزان ۱۵/۷، ۳۲/۲ و ۳۸/۴ درصد به ترتیب برای تیمارهای B25، B50 و B75 نسبت به تیمار شاهد (بدون زغال زیستی) افزایش یافته است. در مقطع زمانی دوم تغییرات معنی‌داری مابین تیمارهای B50 و B75 نسبت به تیمار شاهد برای پارامتر جذب مشاهده گردید. همچنین تغییرات معنی‌دار در این مقطع زمانی برای پارامتر هیدرولیکی خاک بین تیمارهای B25 و B50 اندازه‌گیری گردید ($P < 0.05$). نتایج تحقیق حاضر با نتایج لی و همکاران که در خاک نسبتاً سنگین

جدول ۱- مقادیر متوسط پارامترهای جذب S و هیدرولیکی A در معادله نفوذ فیلیپ برای تیمارهای تحقیق ($\pm SD$) در مقطع زمانی اول

تیمار	A (سانتیمتر بر دقیقه)	S (سانتیمتر بر مجذور دقیقه)	R ² *	RMSE**
B0	۱۳/۷(±۷/۶۷)	۱۲/۶(±۴/۰۷)	۰/۹۹۶۵	۰/۲۱۷۰
B25	۲۲/۹(±۶/۴)	۱۳/۶(±۲/۹۶)	۰/۹۸۸۵	۰/۳۲۷۹
B50	۲۶/۶(±۶/۱۴)	۱۳/۴(±۳/۰۳)	۰/۹۹۲۴	۰/۳۰
B75	۲۰/۷(±۸/۴۷)	۱۸/۶(±۱/۰۳)	۰/۹۸۴۱	۰/۴۳۵۴

* مجذور ضریب تبیین حاصل از برازش داده‌های مشاهداتی بر معادله نفوذ فیلیپ
** ریشه دوم میانگین مربعات خطا حاصل از برازش داده‌های مشاهداتی بر معادله نفوذ فیلیپ

جدول ۲- مقادیر متوسط پارامترهای جذب S و هیدرولیکی A در معادله نفوذ فیلیپ برای تیمارهای تحقیق ($\pm SD$) در مقطع زمانی دوم

تیمار	A (سانتیمتر بر دقیقه)	S (سانتیمتر بر مجذور دقیقه)	R ² *	RMSE**
B0	۱۲/۲(±۱/۹)	۱۲/۲(±۰/۱)	۰/۹۹۶۷	۰/۲۱۸۰
B25	۱۹/۸(±۳/۴)	۱۴/۰(±۲/۳)	۰/۹۹۶۲	۰/۲۳۰۹
B50	۲۰/۶(±۴/۵)	۱۵/۹(±۰/۶)	۰/۹۹۸۷	۰/۱۲۰۱
B75	۱۷/۵(±۰/۶)	۱۷/۴(±۱/۱)	۰/۹۹۷۳	۰/۱۷۹۲

* مجذور ضریب تبیین حاصل از برازش داده‌های مشاهداتی بر معادله نفوذ فیلیپ
** ریشه دوم میانگین مربعات خطا حاصل از برازش داده‌های مشاهداتی بر معادله نفوذ فیلیپ

جدول ۳- مقادیر متوسط پارامترهای جذب S و هیدرولیکی A در معادله نفوذ فیلیپ برای تیمارهای تحقیق (±SD) در مقطع زمانی سوم

تیمار	A (سانتیمتر بر دقیقه)	S (سانتیمتر بر مجذور دقیقه)	R ² *	RMSE**
B0	۱۱/۹(±۱/۶)	۱۱/۴(±۱/۸)	۰/۹۹۶۱	۰/۳۰۹۵
B25	۱۷/۲(±۷/۲)	۱۴/۱(±۶/۷)	۰/۹۹۷۵	۰/۱۷۳۱
B50	۱۴/۳(±۲/۹)	۱۸/۲(±۲/۲)	۰/۹۹۸۴	۰/۱۳۳۱
B75	۲۲/۶(±۳/۶)	۱۴/۳(±۳/۷)	۰/۹۹۸۵	۰/۱۲۹۲

* مجذور ضریب تبیین حاصل از برازش داده‌های مشاهداتی بر معادله نفوذ فیلیپ

** ریشه دوم میانگین مربعات خطا حاصل از برازش داده‌های مشاهداتی بر معادله نفوذ فیلیپ

کشاورزی، وضعیت آب خاک، بارش منطقه‌ای و روش آبیاری باید قبل از تصمیم‌گیری در مورد اعمال و میزان استفاده ارزیابی شود (Xing et al., 2021). بررسی منابع نشان می‌دهد از محدودیت‌های کاربرد زغال‌زیستی می‌توان به نبود روش استاندارد تولید زغال‌زیستی براساس مواد اولیه و اهداف کاربرد آن و همچنین تولید ارزان و قابل دسترس این افزودنی اشاره نمود. با این حال، تولید تجاری و اقتصادی این افزودنی خاک، یکی از چالش‌های علمی روز است و نیاز است برای رفع این محدودیت، مطالعات بیشتری روی روش‌های تولید استاندارد و اقتصادی زغال‌زیستی انجام گردد (Vochozka et al., 2016; Thengane et al., 2021).

نتیجه‌گیری

یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از زغال‌زیستی می‌تواند نفوذپذیری خاک‌های سنگین اصلاح‌شده را بهبود بخشد و به مدیریت پایدار اراضی و بهبود بهره‌وری کشاورزی کمک کند. این تحقیق بینش ارزشمندی را در مورد پتانسیل زغال‌زیستی به‌عنوان یک اصلاح‌گر در خاک برای افزایش نفوذ و خواص هیدرولیکی خاک‌های سنگین فراهم می‌کند و به‌عنوان یک رویکرد عملی برای بهبود کیفیت خاک، برای برنامه‌های کاربردی کشاورزی و محیط‌زیست در آینده بسیار مهم است. نتایج این مطالعه، ۱۲ ماه پس از اعمال زغال‌زیستی و تحت آزمایش‌های صحرایی بیانگر قابلیت بالای زغال‌زیستی در بهبود مشخصات نفوذ خاک لومی رسی است. این جنبه‌ها از نظر زراعی بسیار اهمیت دارند، به‌ویژه در مناطق کشاورزی که با کمبود آب و خشک‌سالی‌های مکرر مواجه هستند. افزایش حرکت آب به دلیل بهبود خصوصیات هیدرولیکی می‌تواند از دست دادن عناصر

در مطالعه حاضر، زغال‌زیستی پس از حدود یک سال از افزودن به خاک لومی رسی، موجب بهبود سرعت نفوذ آب خاک گردید. بررسی مطالعات پیشین نیز بیانگر بهبود مشخصات فیزیکی تحت تأثیر اعمال زغال‌زیستی در کوتاه‌مدت است (Andrenelli et al., 2016; Sun et al., 2013). این امر به تسریع و افزایش نفوذ آب خاک کمک می‌کند. با این حال، افزایش نفوذ را می‌توان به‌عنوان یک نکته مثبت برای خاک با بافت سنگین در نظر گرفت. افزودن زغال‌زیستی ممکن است تا حدی ورود آب باران یا آب آبیاری به خاک را تسریع دهد. در چنین شرایطی، استفاده از زغال‌زیستی ممکن است باعث افزایش راندمان استفاده از آب باران یا آب آبیاری شود که برای توسعه کشاورزی و صرفه‌جویی در مصرف آب مفید باشد. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این است که در خاک‌هایی با نفوذپذیری پایین، برای ارتقای راندمان کاربرد آب آبیاری، افزایش نفوذ آب لازم و ضروری است (Xing et al., 2017). بررسی منابع نشان می‌دهد زغال‌زیستی می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی خاک، مانند چگالی ظاهری، تخلخل خاک و خاکدانه‌ها را بهبود بخشد و در نتیجه بر فرآیند نفوذ آب در خاک، افزایش آب و هوادهی در خاک تأثیرگذار باشد. این بهبود فیزیکی در رشد و مقاومت بهتر گیاه در شرایط خشک‌سالی تأثیرگذار است (Kuryntseva et al., 2023). برای مناطق با بارندگی زیاد، نرخ نفوذ کم ممکن است خطر رواناب سطحی را افزایش دهد. برای روش‌های آبیاری، مانند آبیاری غرقابی، استفاده بیش‌ازحد از زغال‌زیستی ممکن است منجر به افزایش راندمان کاربرد آب آبیاری به دلیل سرعت بخشیدن در نفوذ آب به خاک در اراضی با بافت سنگین شود. با توجه به موارد فوق، در تولید واقعی اراضی

- D.F.D. 2024. Water Infiltration in Different Soil Covers and Management in the Cerrado–Amazon Ecotone, Brazil. *Soil Systems* 8(1): 31. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010031>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.017>.
- Ayodele, A., Oguntunde, P., Joseph, A. and Dias Junior, M.D.S. 2009. Numerical analysis of the impact of charcoal production on soil hydrological behavior, runoff response and erosion susceptibility. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 33: 137-146. <https://doi.org/10.1590/S010006832009000100015>.
- Dong, Q.G., Han, J.C., Zhang, Y., Li, N., Lei, N., Sun, Z.H., Du, Y.C. and He, J. 2019. Water infiltration of covering soils with different textures and bulk densities in gravel-mulched areas. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(6). http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1706_1403914052.
- Duan, M., Liu, G., Zhou, B., Chen, X., Wang, Q., Zhu, H. and Li, Z. 2021. Effects of modified biochar on water and salt distribution and water-stable macro-aggregates in saline-alkaline soil. *Journal of Soils and Sediments*, 21: 2192-2202. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02913-2>.
- Fang, J. and Tang, L. 2023. Developing policy-making for maximizing the water productivity in agricultural lands. *Water Supply*. 23(5): 2188-2196. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.091>.
- Faridah, S.N., Achmad, M., Jamaluddin, T.A. and Jasmira 2023. Infiltration model of Mediterranean soil with clay texture. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v12i1.162-173>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138007>.
- Garg, S. and Goel, A. 2019. Infiltration—a critical review. *Sustainable Engineering: Proceedings of EGRWSE* 2018. 111-120. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6717-5_11.
- Gholami, L., Karimi, N. and Kaviani, A. 2019. Soil and water conservation using biochar and various soil moisture in laboratory
- غذایی از طریق شستشوی خاک را افزایش دهد و پیامدهای منفی زیست‌محیطی و اقتصادی داشته باشد؛ بنابراین، آزمایش‌های بیشتری در شرایط مزرعه برای روشن شدن این جنبه‌ها مورد نیاز است. زغال زیستی نقش امیدوار کننده‌ای در بهبود بیشتر خصوصیات نفوذ خاک با نرخ کاربرد بیش از ۲۵ تن در هکتار دارد. زغال زیستی به نظر می‌رسد یک اقدام امیدوار کننده برای بهبود پایداری کشاورزی فشرده با بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک از طریق تأثیر مثبت بر ساختمان خاک باشد. با این حال، قبل از اینکه این عمل به‌طور گسترده به کشاورزان توصیه شود، تحقیقات بیشتری در مورد انواع خاک و روش‌های آبیاری مورد نیاز است. در حال حاضر، در کشور زیرساخت لازم برای تولید اقتصادی و ارزان این افزودنی وجود ندارد و امید است با شناخت بهتر تأثیرات زغال زیستی، در صورتی که این تأثیرات روی بهبود رفتار خاک معنی‌دار باشند در سال‌های آتی تمرکز بیشتری بر روش‌های تهیه اقتصادی آن صورت گیرد. در این ارتباط، پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری در مورد کاربرد سایر نرخ‌های زغال‌زیستی و روش‌های تولید تجاری و اقتصادی این افزودنی خاک انجام گردد.

منابع

- Abd Al-Kaream, K.W., Noori, M.D., Hameedi, M.K. and Shaker, Z.H. 2023. Characteristics of Clay Soils Utilizing Okra Tips. *Construction Technologies and Architecture*, 8: 3-9. <https://doi.org/10.4028/p-gOor20>.
- Ahmad Bhat, S., Kuriqi, A., Dar, M.U.D., Bhat, O., Sammen, S.S., Towfiqul Islam, A.R.M., Elbeltagi, A., Shah, O., Ai-Ansari, N., Ali, R. and Heddami, S., 2022. Application of biochar for improving physical, chemical, and hydrological soil properties: a systematic review. *Sustainability*, 14(17): 11104. <https://doi.org/10.3390/su141711104>.
- Al-Omran, A., Ibrahim, A. and Alharbi, A. 2019. Evaluating the impact of combined application of biochar and compost on hydro-physical properties of loamy sand soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 50(19): 2442-2456. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1667371>.
- Alves, M.A.B., Borella, D.R., Paulista, R.S.D., Almeida, F.T.D., Souza, A.P.D. and Carvalho,

- Li, M., Liu, T., Duan, L., Luo, Y., Ma, L., Zhang, J., Zhou, Y. and Chen, Z. 2019. The scale effect of double-ring infiltration and soil infiltration zoning in a semi-arid steppe. *Water*. 11(7): 1457. <https://doi.org/10.3390/w11071457>.
- Li, Y., Liu, C., Liang, Z., Wang, X., Fan, X., Liu, D.L. and Biswas, A. 2022. Effect of biochar on soil properties and infiltration in a light salinized soil: Experiments and simulations. *European Journal of Soil Science*. 73(4): 13279. <https://doi.org/10.1111/ejss.13279>.
- Libutti, A., Francavilla, M. and Monteleone, M. 2021. Hydrological Properties of a Clay Loam Soil as Affected by Biochar Application in a Pot Experiment. *Agronomy*. 11(3): 489. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030489>.
- Mao, L., Li, Y., Hao, W., Mei, X., Bralts, V.F., Li, H., Guo, R. and Lei, T. 2016. An approximate point source method for soil infiltration process measurement. *Geoderma*. 264: 10-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.011>.
- Manzano, R., Diquattro, S., Roggero, P.P., Pinna, M.V., Garau, G. and Castaldi, P. 2020. Addition of softwood biochar to contaminated soils decreases the mobility, leachability and bioaccessibility of potentially toxic elements. *Science of The Total Environment*. 739: 139946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139946>.
- Nepal, J., Ahmad, W., Munsif, F., Khan, A. and Zou, Z. 2023. Advances and prospects of biochar in improving soil fertility, biochemical quality, and environmental applications. *Frontiers in Environmental Science*, 11: 1114752. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1114752>.
- Pandian, K., Vijayakumar, S., Mustaffa, M.R.A.F., Subramanian, P. and Chitraputhirapillai, S. 2024. Biochar—a sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: a review. *Frontiers in Soil Science*, 4: 1376159. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1376159>.
- Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil science*. 83(5): 345-358. <https://doi.org/10.1097/00010694-195705000-00002>.
- Randolph, P., Bansode, R.R., Hassan, O.A., Rehrah, D.J., Ravella, R., Reddy, M.R., Watts, D.W., Novak, J.M. and Ahmedna, M. 2017. Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters. *Journal of environmental management*. 192: 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.061>.
- conditions. *Catena*, 182: 104151. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104151>.
- Girei, A., A. Abdulkadir, and N. Abdu. 2016. Goodness of fit of three infiltration models of a soil under long-term trial in Samaru, Northern Guinea Savanna of Nigeria. *Journal of Soil Science and Environmental Management* 7(5):64–72. <https://doi.org/10.5897/jssem2015.0525>.
- Haghazari, F., Shahgholi, H. and Feizi, M. 2015. Factors affecting the infiltration of agricultural soils. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*. 6(5): 21-35.
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., Close, D., 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*. 376: 347–361. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1980-x>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.10.046>.
- Jakab, G., Dobos, E., Madarász, B., Szalai, Z. and Szabó, J.A. 2019. Spatial and temporal changes in infiltration and aggregate stability: A case study of a subhumid irrigated cropland. *Water*. 11(5): 876. <https://doi.org/10.3390/w11050876>.
- Kindo, S., Agrawal, N. and Shori, A. 2024. Evaluation of infiltration models in clay loam and laterite soils under field conditions. *Environment Conservation Journal*. 25(1): 22-32. <https://doi.org/10.36953/EJC.24242644>.
- Kouriati, A., Tafidou, A., Lialia, E., Prentzas, A., Moulogianni, C., Dimitriadou, E. and Bournaris, T. 2024. A Multicriteria Decision Analysis Model for Optimal Land Uses: Guiding Farmers under the New European Union's Common Agricultural Policy (2023–2027). *Land*, 13(6): 788. <https://doi.org/10.3390/land13060788>.
- Kuryntseva, P., Karamova, K., Galitskaya, P., Selivanovskaya, S. and Evtugyn, G. 2023. Biochar functions in soil depending on feedstock and pyrolyzation properties with particular emphasis on biological properties. *Agriculture*, 13(10): 2003. <https://doi.org/10.3390/agriculture13102003>.
- Li, J., Shen, J. and Ye, S. 2024. Response of biochar-amended clayey soils to water infiltration. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3981210/v1>.

- <http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2019/35.1.134.143>.
- Thengane, S.K., Kung, K., Hunt, J., Gilani, H.R., Lim, C.J., Sokhansanj, S. and Sanchez, D.L., 2021. Market prospects for biochar production and application in California. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 15(6): 1802-1819. <https://doi.org/10.1002/bbb.2280>.
- Toková, L., Igaz, D., Horák, J. and Aydin, E. 2020. Effect of biochar application and re-application on soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam Haplic Luvisol. *Agronomy*. 10(7): 1005. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071005>.
- ULRP. 2018. Urmia Lake: Lessons and Challenges. Urmia Lake Restoration Program. <http://www.ulrp.ir>.
- Villagra-Mendoza, K. and Horn, R. 2019. Changes in water infiltration after simulated wetting and drying periods in two biochar amendments. *Soil Systems*. 3(4): 63. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3040063>.
- Vochozka, M., Maroušková, A., Váchal, J. and Straková, J., 2016. Biochar pricing hampers biochar farming. *Clean technologies and environmental policy*. 18(4): 1225-1231. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1113-3>.
- Wagner, J.F. 2013. Mechanical properties of clays and clay minerals. In *Developments in clay science*. 5: 347-381. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00011-0>.
- Wang, C., Fu, B., Zhang, L. and Xu, Z. 2019. Soil moisture-plant interactions: an ecohydrological review. *Journal of Soils and Sediments*. 19: 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2167-0>.
- Wang, J., Shi, D., Li, Y., Chen, A., Feng, S. and Liu, C. 2023. A Study on Infiltration Characteristics and One-Dimensional Algebraic Model Simulation in Reclaimed Soil with Biochar. *Water*, 15(16): 2985. <https://doi.org/10.3390/w15162985>.
- Xiang, L., Liu, S., Ye, S., Yang, H., Song, B., Qin, F., Shen, M., Tan, C., Zeng, G. and Tan, X. 2021. Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications. *Journal of Hazardous Materials*. 420: 126611. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126611>.
- Xing, X., Li, Y., Ma, X. 2017. Effects on infiltration and evaporation when adding rapeseed-oil residue or wheat straw to a loam soil. *Water*. 9:700-712. <https://doi.org/10.3390/w9090700>.
- Rezaei, E., Zeinalzadeh, K. and Ghanbarian, B. 2021. Experimental study of hydraulic properties in grain packs: Effects of particle shape and size distribution. *Journal of Contaminant Hydrology*. 243:103918. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103918>.
- Rezaei, N. and Razzaghi, F., 2016, May. Effect of different levels of water salinity and biochar on wheat yield under greenhouse conditions. In *International Symposium on the Role of Plant Genetic Resources in Reclaiming Lands and Environment Deteriorated by Human and* 1190. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1190.14>.
- Schwankl, L.J., Raghuwanshi, N.S. and Wallender, W.W. 2000. Time series modeling for predicting spatially variable infiltration. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 126(5): 283-287. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:5\(283\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:5(283)).
- Somporn, W., Panyoyai, N., Khamdaeng, T., Tippayawong, N., Tantikul, S. and Wongsiriamnuay, T. 2020, March. Effect of process conditions on properties of biochar from agricultural residues. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 463 (1): 012005. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/17551315/463/1/012005>.
- Sun, Z., Moldrup, P., Elsgaard, L., Arthur, E., Bruun, E.W., Hauggaard-Nielsen, H. and 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. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000010>.
- Sun, J., Yang, R., Li, W., Pan, Y., Zheng, M. and Zhang, Z. 2018. Effect of biochar amendment on water infiltration in a coastal saline soil. *Journal of Soils and Sediments*. 18: 3271-3279. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2001-8>.
- Sun, W.J., Li, M.Y., Zhang, W.J. and Tan, Y.Z. 2020. Saturated permeability behavior of biochar-amended clay. *Journal of Soils and Sediments*. 20: 3875-3883. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02720-1>.
- Sun, F. and Lu, S. 2014. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 177(1): 26-33. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200639>.
- Tasim, B., Masood, T., Shah, Z.A., Arif, M., Ullah, A., Miraj, G. and Samiullah, M., 2019. Quality Evaluation of Biochar Prepared from Different Agricultural Residues. *Sarhad Journal of Agriculture*, 35(1).

conductivity in sandy soil. *Pedosphere*. 26(2): 265-272. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60041-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60041-8).

Xing, X., Liu, Y., Garg, A., Ma, X., Yang, T. and Zhao, L. 2021. An improved genetic algorithm for determining modified water-retention model for biochar-amended soil. *Catena*. 200: 105143. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105143>.

Zhang, J., Qun, C.H.E.N. and Changfu, Y.O.U. 2016. Biochar effect on water evaporation and hydraulic

Effect of Biochar Application Rates on the Temporal Variation of Infiltration Characteristics in a Heavy Soil

R. Esmailnezhad¹, K. Zeinalzadeh^{2*}, S. Besharat³ and H. Kheirfam⁴

Abstract

The inherent limitation of low infiltration in heavy soils creates problems in optimal water management in farms. In recent years, biochar has considered as an organic soil amendment to improve soil properties. However, there is limited understanding of the effect of different biochar application rates on infiltration characteristics in heavy soils under field conditions. In this study, biochar was applied at rates of 0, 25, 50, and 75 tons per hectare in a randomized design with three replications on plots measuring 2 × 5 m with clay loam texture. After 12 months, the Double-Ring Infiltrometer experiments were conducted in three time intervals at one-month intervals. The water infiltration process was simulated using the Philip model. The results showed that the application of biochar at 25, 50 and 75 t. ha⁻¹ significantly ($P < 0.05$) reduced the time required for irrigation water to infiltrate to a depth of 15 cm by 31.8%, 37.7% and 40.7%, respectively, compared to the control treatment. Increasing the biochar application rate decreased the temporal variability of infiltration between the first and second irrigation events. The findings show that the application of biochar at a low and economical rate of 25 t. ha⁻¹ significantly improved the infiltration capacity of heavy soil.

Keywords: Clay loam soil, Infiltration rate, Philip's model, Soil amendment, Temporal infiltration variations

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

² Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
(* Corresponding Author Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir)

³ Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

⁴ Associate professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 9 Aug 2024

Accepted: 14 Nov 2024