

Effect of Sugarcane Biochar on Hydrological Changes in Soils with Different Textures in Arid Regions: From Improvement to Hydrophobicity Effects

Azadeh Safadoust^{1*}

(Received: July 2025 Accepted: November 2025)

Abstract

Improving water efficiency in agriculture requires enhancing soil physical and hydraulic properties. This study investigated the effect of applying sugarcane biochar at three rates (0%, 3%, and 6% by weight) on the hydraulic properties of soils with three textures: sandy loam, loam, and clay loam. The experiment was conducted as a factorial arrangement in a completely randomized design. The results showed that biochar application significantly altered soil physical and hydraulic parameters; however, the magnitude and direction of these changes depended on soil texture and biochar levels. Biochar increased both saturated and residual moisture content across all three soil textures, likely due to the placement of biochar particles (smaller than 2 mm) in the spaces between soil particles, partially blocking some pores and expanding micro- and meso-pores. This effect was more pronounced in clay loam soils, where the application of 6% biochar resulted in an 8% increase in saturated moisture content and a 31% increase in residual moisture content. Conversely, saturated hydraulic conductivity increased in sandy loam and loam soils by 42% and 5%, respectively – especially under the 6% biochar treatment – due to enhanced pore connectivity and a more porous structure. In contrast, in clay loam, saturated hydraulic conductivity decreased by 46%, likely due to higher soil compaction and potential pore blockage by biochar particles. Biochar also increased total porosity, primarily through the expansion of meso- and macro-pores. In sandy loam, the increase in macropores was consistent with improved hydraulic conductivity, whereas in clay loam, increased porosity was mainly due to fine and medium pores, contributing more to water retention than infiltration. At higher application levels (6%), the hydrophobic effect of biochar led to reductions in the water retention curve parameters, including α and n in the van Genuchten model, indicating a decline in the initial water absorption rate, especially in sandy soils. Overall, by improving soil structure, biochar can be recommended as an effective strategy for agricultural water management, especially in arid regions.

Keywords: Hydrophobic, Pore connectivity, Water management, Water retention curve, Hydraulic conductivity

Safadoust, A. 2025. Effect of Sugarcane Biochar on Hydrological Changes in Soils with Different Textures in Arid Regions: From Improvement to Hydrophobicity Effects. *Applied Soil Research*. 14(2): 17-32.

1. Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.  [0000-0002-1535-7833](https://orcid.org/0000-0002-1535-7833)

* Corresponding Author Email: safadoust@basu.ac.ir

تأثیر بیوچار نیشکر بر تغییرات هیدرولوژیکی خاک‌های با بافت مختلف در مناطق خشک: از بهبود تا اثرات آب‌گریزی

آزاده صفادوست^{*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱)

(تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰)

چکیده

افزایش بهره‌وری منابع آب در کشاورزی مستلزم بهبود ویژگی‌های فیزیکی هیدرولیکی خاک است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کاربرد بیوچار نیشکر در سه سطح صفر، ۳ و ۶ درصد وزنی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در سه کلاس بافت لوم شنی، لوم و لوم رسی انجام گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. نتایج نشان داد افزودن بیوچار پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی خاک را به‌طور معنی‌داری تغییر داد، اما شدت و جهت این تغییرات به بافت خاک و مقدار بیوچار بستگی داشت. بیوچار باعث افزایش رطوبت اشباع و باقی‌مانده در هر سه نوع بافت خاک شد که می‌تواند ناشی از قرار گرفتن ذرات بیوچار (کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر) در فضای بین ذرات خاک و انسداد بخشی از منافذ و نیز گسترش منافذ ریز و متوسط باشد؛ این اثر در خاک‌های لوم رسی، بیشتر مشهود بود به طوری که افزایش ۶٪ بیوچار به ترتیب سبب ۸٪ و ۳۱٪ افزایش در رطوبت اشباع و باقی‌مانده شد. در مقابل، هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های لوم شنی و لوم، به‌ویژه در تیمار ۶٪، به دلیل افزایش پیوستگی منافذ و ساختمان متخلخل‌تر، به ترتیب به میزان ۴۲٪ و ۵٪ افزایش یافت. اما در خاک لوم رسی، به دلیل تراکم بیشتر و احتمال انسداد منافذ توسط ذرات بیوچار، ۴۶٪ کاهش یافت. در خاک لوم شنی، افزایش منافذ درشت با بهبود هدایت هیدرولیکی همراستا بود، در حالی که در خاک لوم رسی، افزایش تخلخل بیشتر به منافذ ریز و متوسط مربوط بود که ظرفیت نگهداری آب را افزایش داد. همچنین، در سطوح بالای بیوچار (۶٪) اثر آب‌گریزی موجب کاهش پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی شامل α و n در مدل ون‌گنوختن شد که بیانگر افت سرعت جذب اولیه آب به‌ویژه در خاک‌های شنی بود. در مجموع، بیوچار با بهبود ساختمان خاک می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در مدیریت آب کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک، توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: آب‌گریزی، پیوستگی منافذ، مدیریت آب، منحنی مشخصه رطوبتی، هدایت هیدرولیکی

صفادوست، آ. ۱۴۰۴. تأثیر بیوچار نیشکر بر تغییرات هیدرولوژیکی خاک‌های با بافت مختلف در مناطق خشک: از بهبود تا اثرات آب‌گریزی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۴، شماره ۲. صفحه: ۱۷-۳۲.

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

* پست الکترونیک: safadoust@basu.ac.ir

مقدمه

سلامت خاک که به عنوان توانایی پایدار خاک در ایفای نقش‌های حیاتی زیست‌محیطی شناخته می‌شود، نقش اساسی در پایداری سامانه‌های طبیعی و انسانی از جمله گیاهان، جانوران و انسان‌ها دارد. این مفهوم، پیوندی چندبعدی میان دانش خاک، کشاورزی، سیاست‌گذاری، مدیریت زنجیره تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان برقرار می‌سازد (Lehmann et al., 2021). در این چارچوب، ارزیابی سلامت خاک از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چرا که عملکرد آن در تولید محصول، کیفیت آب، تغییرات اقلیمی و سلامت انسان به طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

از میان عوامل متعددی که بر سلامت خاک تأثیرگذارند، ماده آلی خاک (SOM) جایگاهی کلیدی دارد. این ماده با تأثیر بر ویژگی‌های زیستی، حاصل‌خیزی و ساختار فیزیکی خاک، نقش بنیادی در حفظ عملکرد مطلوب خاک ایفا می‌کند. با این حال، بهره‌برداری مؤثر از این مزایا نیازمند درک جامع و مدیریت دقیق دینامیک ماده آلی در خاک است (Canellas et al., 2014; Olaetxea et al., 2018). یکی از ویژگی‌های کمتر مورد توجه ماده آلی، خاصیت آب‌گریزی آن است که می‌تواند به طور معنی‌داری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار دهد. این خاصیت عمدتاً از حضور گروه‌های آلیفاتیک مانند متیل ($-\text{CH}_3$)، متیلن ($-\text{CH}_2-$) و متین ($-\text{CH}-$) ناشی می‌شود و در تعیین تمایل ماده آلی به جذب آب، مقاومت در برابر تجزیه میکروبی و سرعت خیس‌شدگی خاک نقش دارد (McKissock et al., 2003). در این میان، ترکیبات آب‌گریز نقش عمده‌ای در کاهش قابلیت خیس‌شدگی خاک ایفا می‌کنند، در حالی که ترکیبات آب‌دوست این قابلیت را افزایش می‌دهند (Morley et al., 2005).

در سال‌های اخیر، بیوپچار به عنوان یکی از گزینه‌های نوین برای بهبود کیفیت خاک مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از بیوپچار به دلایلی همچون تثبیت کربن، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش حاصل‌خیزی خاک، بهبود عملکرد گیاه، حذف آلاینده‌ها و مقابله با خشکسالی در بسیاری از کشورها گسترش یافته است (Wang & Wang, 2019). بیوپچار با اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، می‌تواند خواص هیدرولیکی همچون ظرفیت نگهداری آب و هدایت هیدرولیکی را بهبود بخشد.

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این ماده قادر است تخلخل خاک را افزایش و چگالی ظاهری، به ویژه در خاک‌های شنی، را کاهش دهد (Blanco-Canqui, 2017; Sohi et al., 2010). به طوری که حتی کاربرد مقادیر اندک (۱٪ حجمی) نیز اثرات محسوسی داشته است (Verheijen et al., 2019). با این وجود، خاصیت آب‌گریزی بیوپچار تحت تأثیر عوامل گوناگونی نظیر دمای تولید، ترکیب ماده اولیه و روش‌های پیش‌تیمار قرار دارد. به عنوان مثال، خان‌محمدی و همکاران (Khanmohammadi et al., 2015) گزارش کرده‌اند که بیوپچار حاصل از دماهای بالا به دلیل ساختار غالب آروماتیک، بیشترین آب‌گریزی را دارد. در حالی که یافته‌های دیگر نشان می‌دهند با افزایش دمای پیرولیز، آب‌گریزی کاهش یافته و حتی در دماهای بالا تقریباً از بین می‌رود. افزون بر این، ویژگی‌های ماده اولیه و فرایندهای آماده‌سازی پیش از پیرولیز نیز در شدت آب‌گریزی تأثیرگذارند (Abel et al., 2013; Mao et al., 2019; Li et al., 2021).

در ارتباط با بافت خاک، خاک‌های شنی به دلیل سطح ویژه کمتر، بیشتر مستعد بروز آب‌گریزی هستند (Doerr & Thomas, 2000; García et al., 2005). برای نمونه، شن دارای سطح ویژه‌ای در حدود 0.077 متر مربع بر گرم است، در حالی که این مقدار برای ذرات رس ممکن است از 900 متر مربع بر گرم نیز فراتر رود. از این رو، هر چه اندازه ذرات بزرگ‌تر باشد، تمایل به آب‌گریزی افزایش می‌یابد. دبانو (DeBano, 1971) نشان داد که آب‌گریزی عمدتاً در خاک‌هایی با کمتر از ۱۰٪ رس رخ می‌دهد، اگرچه شواهد جدیدتر حاکی از آن است که حتی خاک‌های با میزان رس بالا (۲۵٪ تا بیش از ۴۰٪) نیز می‌توانند به دلیل تجمع ذرات آلی هیدروفوبیک، ویژگی آب‌گریزی پیدا کنند (Bisdorn et al., 1993). در برخی محیط‌ها، غلظت بالای مواد آب‌گریز منجر به پوشش کامل ذرات، حتی ذرات ریز شده و این پدیده موجب بروز شدیدتر آب‌گریزی در خاک‌های ریزدانه نسبت به خاک‌های درشت‌دانه می‌شود (Doerr & Thomas, 2000).

آب‌گریزی خاک پیامدهای منفی متعددی از جمله کاهش نفوذپذیری آب، افزایش روان‌آب سطحی، فرسایش، جریان‌های ترجیحی و شست‌وشوی املاح به دنبال دارد (Imeson et al., 1992). مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که بین شدت آب‌گریزی و هدایت هیدرولیکی رابطه‌ای معکوس

هیدرولیکی اشباع، توزیع اندازه منافذ (تخلخل کل، منافذ ریز، متوسط و درشت)، منحنی مشخصه رطوبتی، رطوبت‌های ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی و قابل دسترسی گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های خاک از سه خاک لوم رسی با مختصات جغرافیایی $34^{\circ} 52' 49''$ E، $48^{\circ} 32' 46/75''$ N، لوم با مختصات جغرافیایی $34^{\circ} 52' 27''$ E، $48^{\circ} 31' 35/5''$ N، و لوم شنی با مختصات جغرافیایی $34^{\circ} 52' 27''$ E، $48^{\circ} 31' 35/5''$ N، واقع در استان همدان، در نوبت آیش با سابقه کشت گندم، برداشته شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986) و برخی ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌های خاک شامل هدایت الکتریکی با استفاده از EC متر (Rhoades, 1996) و پی-اچ با استفاده از pH متر (Thomas, 1996) در عصاره ۱:۵ خاک به آب اندازه‌گیری شد. همچنین ظرفیت تبادلی کاتیونی با استفاده از استات آمونیوم (Bower & Gschwend, 1952)، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ماده آلی از روش اکسیداسیون تر استفاده شد (Walkley & black, 1934). پس از انتقال نمونه‌های خاک به گلخانه، بیوچار نیشکر تهیه شده از شرکت نوآوران زیست بنیان آویسا، در اندازه کوچکتر از ۲ میلی‌متر در سه سطح صفر، ۳ و ۶ درصد وزنی به خاک اضافه گردید. انتخاب مقادیر بیوچار مورد استفاده بر اساس پژوهش انجام شده توسط رمضان‌وگلو (Ramazanoglu, 2023) بوده است. خاک‌های مخلوط شده با بیوچار به مدت ۶ ماه در درون جعبه‌های بزرگ با ابعاد $35 \times 40 \times 50$ سانتی‌متر در محیط گلخانه نگهداری شد. آماده‌سازی جعبه‌های خاک به این صورت انجام شد که برای هر بافت خاک، مقدار مشخصی خاک به‌گونه‌ای در جعبه‌ها ریخته شد که با حجم مورد نظر، جرم مخصوص برابر با مقادیر واقعی مزرعه‌ای آن بافت‌ها (۱/۲۸، ۱/۳۱ و ۱/۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ترتیب برای بافت‌های لوم رسی، لوم و لوم شنی) ایجاد شود. در مجموع، ۲۷ جعبه خاک شامل سه نوع بافت خاک (لوم شنی، لوم و لوم رسی) در سه سطح بیوچار (صفر، ۳ و ۶ درصد وزنی) و با سه تکرار آماده شد. روش نگهداری و مراقبت به این صورت بود که خاک‌ها به آهستگی طی چند روز مرطوب و همچنین طی چند روز خشک شدند. این فرآیند برای چهار بار به طور کامل طی

وجود دارد، به‌طوری که افزایش آب‌گریزی موجب کاهش هدایت هیدرولیکی و ضریب جذب آب می‌شود (Salazar et al., 2024; Acharya et al., 2024; Movasat & Tomac, 2021). هرچند مکانیسم دقیق این تأثیرگذاری هنوز به‌طور کامل شناسایی نشده، اما کاهش سرعت نفوذ ناشی از آب‌گریزی می‌تواند موجب ایجاد شرایط ماندابی، افزایش آب‌شویی آلاینده‌ها و کاهش دسترسی گیاه به آب شود که این موارد خود بر فرسایش خاک و رشد گیاه اثر منفی دارند (Doerr & Thomas, 2000). بر همین اساس، لیچنر و همکاران (Lichner et al., 2007) در بررسی خاک‌های جنگلی و مرتعی نشان دادند که حضور پوشش گیاهی می‌تواند موجب بروز آب‌گریزی در خاک‌های شنی شود؛ پدیده‌ای که به افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع و کاهش هدایت هیدرولیکی غیراشباع منجر می‌شود. این نتایج بیانگر آن است که ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مستقیماً تحت تأثیر ترکیبات آب‌گریز قرار دارند.

مطالعات متعددی تأثیر بیوچار را بر ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک گزارش کرده‌اند (Zhu et al., 2025; Zhang et al., 2025; Wang et al., 2021). با این حال، دانش موجود در زمینه اثر بیوچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک همچنان ناقص و در مواردی متناقض است. برخی پژوهش‌ها از افزایش هدایت هیدرولیکی پس از کاربرد بیوچار خبر داده‌اند (Chen et al., 2025; Wang et al., 2021). در حالی که برخی دیگر کاهش این ویژگی (Liu et al., 2021; Gelardi et al., 2021) و یا عدم تغییر معنی‌دار آن را گزارش کرده‌اند (Holt et al., 2021).

با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و پایین بودن سطح ماده آلی خاک‌ها نسبت به حد آستانه مطلوب، استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند بیوچار به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود کیفیت خاک پیشنهاد می‌شود. با این حال، با وجود مستندات متعدد درباره اثرات مثبت بیوچار، اطلاعات اندکی درباره مقایسه رفتار آن در خاک‌های با بافت مختلف و همچنین تأثیر خاص ویژگی آب‌گریزی آن بر رفتار هیدرولیکی خاک، به‌ویژه در شرایط اقلیمی ایران، در دست است.

بر این اساس، هدف اصلی مطالعه حاضر، بررسی تأثیر بیوچار حاصل از ضایعات نیشکر در سه سطح کاربرد (صفر، ۳٪ و ۶٪) بر ویژگی‌های هیدرولیکی سه نوع خاک با بافت متفاوت (لوم شنی، لوم و لوم رسی) است. این ویژگی‌ها شامل هدایت

مطرح شده توسط (Beven & Germann, 1982)، منافذ خاک بر اساس قطر به سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند: منافذ درشت با قطری بیش از ۳۰۰ میکرون، منافذ با اندازه متوسط در بازه ۳۰ تا ۳۰۰ میکرون و منافذ ریز با قطری کمتر از ۳۰ میکرون. به منظور تخمین این دسته‌ها، اختلاف رطوبت حجمی بین حالت اشباع (صفر سانتی‌متر مکش) و رطوبت در مکش ۱۰ سانتی‌متر (مربوط به قطر منفذی حدود ۳۰۰ میکرون) به عنوان شاخصی از تخلخل درشت (Macro-p) در نظر گرفته شد. همچنین، میزان اختلاف رطوبت حجمی بین مکش‌های ۱۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر برای تخمین تخلخل متوسط (Meso-p) به کار رفت که بیانگر حضور منافذی با قطر تقریباً بین ۳۰ تا ۳۰۰ میکرون است. تخلخل ریز (Micro-p) نیز با استفاده از رطوبت باقی‌مانده در مکش ۱۰۰ سانتی‌متر تخمین زده شد (Safadoust et al., 2012).

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار به اجرا درآمد. تیمارهای مورد بررسی شامل سه نوع بافت خاک (لوم رسی، لوم و لوم شنی) و سه سطح بیوچار نیشکر (صفر، ۳ و ۶ درصد وزنی) بودند. در این مطالعه، اثر آب‌گریزی بیوچار استفاده‌شده بر برخی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نظیر هدایت هیدرولیکی اشباع، منحنی مشخصه رطوبتی، پارامترهای مدل وان گنوختن و توزیع اندازه منافذ مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS بهره گرفته شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های نمونه‌برداری‌شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، سه نوع خاک مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های شیمیایی، از جمله هدایت الکتریکی، میزان ماده آلی و pH، شباهت زیادی به یکدیگر دارند. انتخاب این خاک‌ها با هدف امکان تفسیر دقیق‌تر نتایج صرفاً بر اساس تفاوت در بافت (توزیع اندازه ذرات) انجام شد، به‌طوری که اثرات بیوچار بدون دخالت متغیرهای شیمیایی بررسی شوند.

مدت شش ماه انجام شد. سپس نمونه‌برداری از خاک‌های تیمار شده با استفاده از سیلندرهایی به قطر ۵/۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر، از عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر انجام شد. برای سنجش میزان آب‌گریزی خاک، از آزمون زمان نفوذ قطره آب (WDPT) بهره گرفته شد؛ در این روش، قطراتی به حجم حدودی ۶۵ میلی‌متر مکعب روی سطح نمونه‌های خاک ریخته شد و مدت زمان نفوذ کامل آن‌ها به داخل خاک ثبت گردید (Dekker & Jungerius, 1990).

منحنی مشخصه رطوبتی خاک، با استفاده از دستگاه جعبه شن برای اندازه‌گیری مکش‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر و دستگاه صفحات فشاری برای مکش‌های ۱۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. سپس داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی برای تیمارهای مختلف بدست آمده و معادله وگنوختن با فرض معلم در نرم‌افزار RETC، بر آن‌ها برازش داده شد. معادله وگنوختن برای منحنی مشخصه رطوبتی خاک به صورت معادله (۱) می‌باشد (van Genuchten et al., 1991):

$$\theta = (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_r \quad (1)$$

که در آن θ ، رطوبت خاک در مکش مورد نظر ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، θ_r ، رطوبت باقی‌مانده ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، θ_s ، رطوبت اشباع ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، h ، مکش ماتریک (cm)، m و n به ترتیب پارامترهای تجربی در ارتباط با عدم تقارن منحنی و توزیع اندازه منافذ (-) و α عکس مکش ورود هوا در منحنی مشخصه رطوبتی (cm^{-1}) می‌باشد. پارامتر m با فرض معلم به صورت $m = 1 - 1/n$ در نظر گرفته شد (Mualem, 1976).

برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی از روش آزمایشگاهی بار آبی ثابت استفاده شد (Klute & Dirksen, 1986). بدین صورت که بعد از ایجاد بار آبی ثابت، مقدار آب خارج از نمونه‌های خاک اندازه‌گیری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به استفاده از معادله ۲ بدست آمد:

$$K_s = \frac{V_L}{(\Delta H)At} \quad (2)$$

که در این رابطه K_s ، هدایت هیدرولیکی اشباع (cm h^{-1})، L ، طول نمونه خاک (cm)، V ، حجم آب خروجی از نمونه خاک (cm^3)، ΔH ، ارتفاع آب روی نمونه خاک (cm)، A ، سطح مقطع نمونه (cm^2) و t زمان خروج آب (h) است. برای ارزیابی توزیع اندازه منافذ در خاک، از داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی بهره گرفته شد. طبق تقسیم‌بندی

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

Table 1. Selected physical and chemical properties of soils in the studied areas

Soil Texture	Clay	Silt	Sand	Bulk Density	Electrical conductivity	Cation exchange capacity	pH	Organic matter
	(%)	(%)	(%)	(g cm ⁻³)	(dS m ⁻¹)	(Cmol _e kg ⁻¹)	(-)	(%)
Clay Loam	30/2	40/8	29	1/28	0/31	16	7/5	1/42
Loam	21/4	31/5	47/1	1/31	0/29	15/2	7/1	1/39
Sandy loam	19/1	20	60/9	1/51	0/25	12/5	7/9	1/21

تأثیر بیوچار بر میزان آب‌گریزی در سه بافت مختلف

جدول ۲ نشان‌دهنده تأثیر سطوح مختلف بیوچار در سه نوع خاک بر میزان آب‌گریزی (WDPT) خاک‌های مورد بررسی است. مطابق طبقه‌بندی دکر و ریتسما (Dekker & Ritsema, 1994)، دامنه رفتار خاک‌ها از خاک آبدوست $WDPT < 25$ S تا خاک شدیداً آب‌گریز $WDPT > 600$ S متغیر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر سطح آب‌گریزی در خاک لوم‌شنی با ۶٪ بیوچار مشاهده شد

WDPT برابر با ۵۸۰ ثانیه). این پدیده به سطح ویژه بسیار پایین ذرات شن و پوشش مؤثر آن‌ها توسط ترکیبات آب‌گریز موجود در بیوچار نسبت داده می‌شود که موجب دفع سریع آب توسط ذرات خاک می‌گردد. در مقابل، خاک‌های سنگین‌تر مانند لوم رسی، در همان میزان بیوچار، زمان نفوذ کمتر (۱۳۰ ثانیه) و آب‌گریزی ملایم‌تری از خود نشان دادند که با ظرفیت بالاتر برای جذب رطوبت و سطح ویژه بالاتر توجیه می‌شود (Kinney et al., 2012; Šurda et al., 2024).

جدول ۲- وضعیت آب‌گریزی (ثانیه) خاک‌های مورد بررسی در سطوح مختلف بیوچار

Table 2. Water repellency duration (seconds) of soils at various biochar application rates

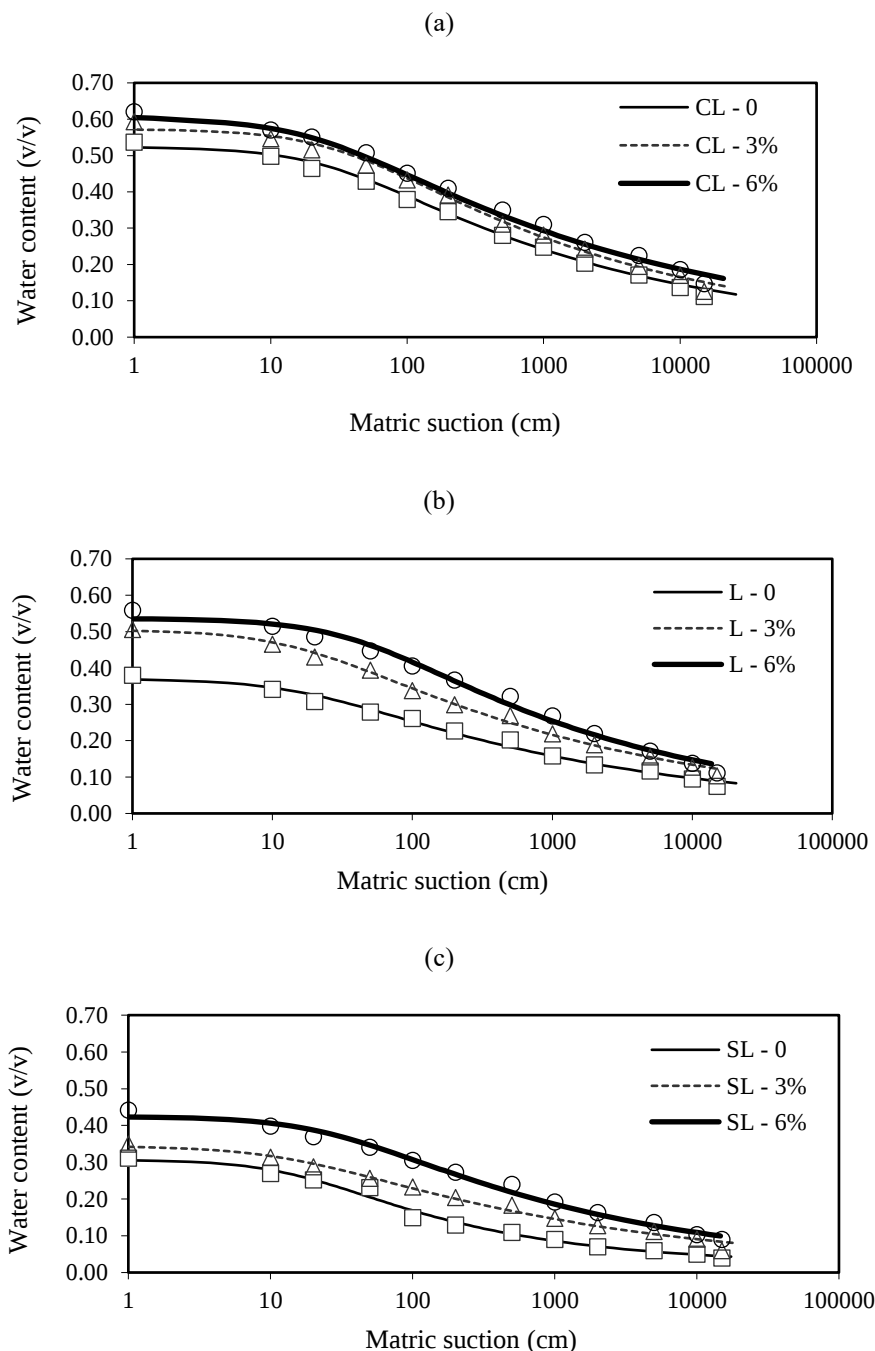
Soil texture	Biochar level		
	0	3%	6%
Clay loam	2 (Soil is not water repellent)	40 (Soil is slightly repellent)	130 (Soil is water repellent)
Loam	2 (Soil is not water repellent)	55 (Soil is slightly repellent)	300 (Soil is water repellent)
Sandy loam	5 (Soil is not water repellent)	250 (Soil is water repellent)	580 (Soil is water repellent)

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که افزودن بیوچار به خاک‌های سبک، مانند خاک شنی، می‌تواند زمان نفوذ قطره آب (WDPT) را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد؛ به‌طوری‌که این شاخص از وضعیت آبدوست (کمتر از ۱ ثانیه) به محدوده‌ای بین ۶۰ تا بیش از ۸۰۰ ثانیه تغییر می‌یابد که بیانگر ظهور آب‌گریزی در سطوح متوسط تا شدید است (Gray et al., 2014; Doerr et al., 2000). این افزایش عمدتاً به ساختار متخلخل بیوچار، حضور گروه‌های سطحی آب‌گریز و ویژگی‌های فیزیکی خاک شنی نظیر سطح ویژه پایین و فضاهای درشت بین ذرات نسبت داده می‌شود؛ عواملی که موجب پوشش سریع‌تر سطح خاک با ترکیبات آب‌گریز می‌شوند. مکانیسم ایجاد آب‌گریزی توسط

بیوچار مشابه با اثر ترکیبات نفتی است؛ به‌طوری‌که گروه‌های غیرقطبی سطحی مانند آلکان‌ها و آروماتیک‌ها، لایه‌ای مقاوم در برابر نفوذ آب بر سطح ذرات خاک ایجاد می‌کنند (Šurda et al., 2024).

تأثیر بیوچار بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک در سه بافت مختلف

شکل ۱ تغییرات منحنی مشخصه رطوبتی در سه نوع خاک (لوم‌شنی، لوم، و لوم‌رسی) تحت تأثیر سطوح مختلف بیوچار را نشان می‌دهد. داده‌ها نشان می‌دهد افزودن بیوچار منجر به تغییر قابل‌توجه در رفتار نگهداری رطوبت خاک در برابر مکش ماتریک می‌شود.



شکل ۱- اثر سطوح مختلف بیوپچار بر منحنی مشخصه رطوبتی در سه خاک لوم رسی (الف)، لوم (ب) و لوم شنی (ج)

Figure 1. Impact of various biochar application rates on the water characteristic curves of three soil textures: Clay Loam (a), Loam (b), and Sandy Loam (c)

افزایش محتوی رطوبت اشباع در تیمارهای حاوی بیوپچار (به ویژه ۶٪) بیانگر افزایش تخلخل کل در اثر حضور بیوپچار متخلخل و سبک وزن است. این اثر در مکش های کمتر از مکش ورود هوا (Air Entry Value) برجسته تر بود، جایی که رطوبت ذخیره شده در تیمارهای بیوپچار بیشتر از نمونه های شاهد (بدون بیوپچار) مشاهده شد. در مکش های

این تغییرات به دلیل اثرات ساختمان و سطح ویژه بالای بیوپچار بوده که ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش داده است. با افزایش مقدار بیوپچار، خصوصاً در تیمار ۶٪، شکل منحنی به سمت نگهداری رطوبت بیشتر در مکش های پایین تر متمایل شد که به معنای بهبود ظرفیت ذخیره آب قابل استفاده برای گیاه است.

اعمال شده بود، در حالی که در مکش‌های بالا، اثر آن کاهش یافت. این نتایج با یافته‌های پیشین نظیر ونگ و همکاران (Liu et al., 2012) و لیو و همکاران (Wang et al., 2025) هم‌راستا است که نقش غالب ساختمان خاک در مکش‌های پایین و نقش بافت در مکش‌های بالا را مورد تأکید قرار داده‌اند.

تأثیر بیوچار بر پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک در سه بافت مختلف

جدول ۳، نتایج تجزیه واریانس اثر بافت و بیوچار بر پارامترهای مدل ون‌گنوختن و توزیع اندازه منافذ خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد اثر تیمارهای آزمایشی بر منافذ متوسط، ریز و هدایت هیدرولیکی اشباع معنی‌دار بود، در حالی که تنها بیوچار بر منافذ درشت اثر معنی‌داری داشت. همچنین اثر برهم‌کنش تیمارها نیز تنها بر منافذ ریز معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که اثر تیمارهای آزمایشی بر θ_s ، θ_r و α و n معنی‌دار بود و همچنین اثر برهم‌کنش تیمارها به غیر از α بر سایر پارامترها معنی‌دار بود (جدول ۳).

مقایسه میانگین اثر بافت خاک و بیوچار بر رطوبت اشباع (θ_s)، رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، عکس مکش ورود هوا در نقطه عطف منحنی مشخصه (α) و پارامتر توزیع اندازه منافذ (n)، در جدول ۴ نشان داده شده است.

در خاک لوم رسی، افزایش میزان بیوچار به‌ویژه در سطح ۰/۶٪، موجب افزایش چشمگیر در θ_s از ۰/۵۷۳ به ۰/۶۲۰ و θ_r از ۰/۱۱۲ به ۰/۱۴۷ شد. این افزایش عمدتاً به ساختمان متخلخل بیوچار نسبت داده می‌شود که با دارا بودن سطح ویژه بالا، توانایی خاک را برای نگهداری آب در تمامی سطوح مکش بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، کاهش پیوسته پارامتر α از ۰/۰۱۹ به ۰/۰۱۱، بیانگر کاهش سرعت تخلیه آب از منافذ و در نتیجه بهبود پایداری رطوبت خاک است. همچنین کاهش مقدار n از ۱/۴۴ به ۱/۳۵ نشان‌دهنده هموار شدن منحنی رطوبتی و کاهش حساسیت خاک به تغییرات مکش می‌باشد (جدول ۴، شکل ۱-الف).

بالاتر، منحنی‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر شده و اختلاف بین تیمارها کاهش یافت، به‌ویژه در خاک‌های رسی که نشان‌دهنده تأثیر کمتر بیوچار در حفظ رطوبت در محدوده منافذ ریز بود.

الگوی تغییرات رطوبت نیز نشان داد که نمونه‌ها در ابتدا با شیب ملایم، رطوبت را از دست می‌دهند اما با عبور از مکش ورود هوا، افت سریع‌تری در میزان رطوبت رخ می‌دهد. در این مرحله، بیوچار توانست با حفظ آب در منافذ متوسط، نرخ افت رطوبت را نسبت به خاک شاهد کاهش دهد. به‌طور خاص، در تیمارهای حاوی بیوچار، منحنی رطوبتی بالاتر از منحنی شاهد قرار گرفت که نشان‌دهنده توانایی بیشتر در نگهداری آب در محدوده مکش پایین تا متوسط بود. صفری و همکاران (Saffari et al., 2021) گزارش کردند که کاربرد ۴٪ بیوچار، بدون توجه به دمای پیرولیز، بیشترین تأثیر را بر نگهداشت آب خاک داشت. این اثر در تمام نقاط اندازه‌گیری‌شده منحنی مشخصه رطوبتی خاک قابل مشاهده بود، هرچند بیشترین تغییرات در محدوده مکش‌های پایین (۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) رخ داد و اختلاف‌ها در بخش خشک منحنی ناچیز بودند.

تأثیر بیوچار بر شکل منحنی مشخصه رطوبتی در خاک‌هایی با بافت مختلف، متفاوت بود (شکل ۱). در خاک لوم‌رسی، افزودن ۳٪ بیوچار موجب افزایش رطوبت در مکش‌های پایین به میزان بیشتر و در مکش‌های بالا به میزان کمتر شد. در مقابل، تأثیر بیوچار در سطح ۰/۶٪ عمدتاً در مکش‌های کمتر از ۱۰ سانتی‌متر قابل مشاهده بود (شکل ۱-الف). در خاک لوم، افزودن ۳٪ بیوچار اثرگذاری بیشتری بر منحنی مشخصه رطوبتی، به‌ویژه در مکش‌های پایین، داشت؛ در حالی که مقدار ۰/۶٪ بیوچار بیشتر منحنی را در مکش‌های میانی تحت تأثیر قرار داد (شکل ۱-ب). در خاک لوم‌شنی، منحنی مشخصه رطوبتی بیش از سایر بافت‌ها تحت تأثیر بیوچار قرار گرفت؛ به‌طوری‌که افزودن بیوچار نه تنها میزان رطوبت نگهداری‌شده در تمامی سطوح مکش را افزایش داد، بلکه موجب افزایش همواری منحنی نیز گردید (شکل ۱-ج).

در مجموع، اثر بیوچار بر منحنی مشخصه رطوبتی در مکش‌های پایین وابسته به ساختمان خاک و سطح

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر بافت خاک (T) و بیوچار (B) بر رطوبت اشباع (θ_s)، رطوبت باقی مانده (θ_r)، عکس مکش ورود هوا در نقطه عطف منحنی (α)، پارامتر توزیع اندازه منافذ (n)، منافذ درشت (Macro-p)، منافذ متوسط (Meso-p)، منافذ ریز (Micro-p) و هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks)

Table 3. Analysis of variance for the effects of soil texture (T) and biochar (B) on saturated water content (θ_s), residual water content (θ_r), inverse of air entry potential (α), pore size distribution parameter (n), macropores (Macro-p), mesopores (Meso-p), micropores (Micro-p), and matured hydraulic conductivity (Ks)

Source of variations	df	F ratio							
		θ_s	θ_r	α	n	Macro-p	Meso-P	Micro-p	Ks
T	2	51/21**	8/94*	3/81*	0/64*	1/34	5/82*	186/11**	65/3**
B	2	38/94**	86/37**	2/99*	59/11**	15/65**	49/37**	36/61**	147/92**
T×B	4	27/55*	5/98*	1/64	9/36*	0/94	0/19	13/71*	7/26**

آب و افزایش مقاومت خاک در برابر جریان آزاد آب می باشد. همچنین، کاهش ضریب α از ۱/۵۴ به ۱/۴۵ نمایانگر صاف تر شدن منحنی رطوبتی و کاهش حساسیت خاک به تغییرات ناگهانی در پتانسیل ماتریک است که در شرایط دیم می تواند مزیتی مهم تلقی شود (جدول ۴).

در خاک لومی افزایش بیوچار باعث افزایش محسوس در θ_s از ۰/۳۸۰ به ۰/۵۵۹ و θ_r از ۰/۰۷۲ به ۰/۱۱۱ گردید. این افزایش بیانگر بهبود ظرفیت ذخیره سازی آب در دو انتهای طیف مکش خاک است؛ هم برای آب در دسترس گیاهان و هم برای آب نگهداری شده در مکش های بالا. کاهش پارامتر α از ۰/۰۳۸۶ به ۰/۰۳۰ نیز تأییدی بر کاهش سرعت تخلیه

جدول ۴- اثر بافت خاک و بیوچار بر پارامترهای مدل ون گنوختن شامل رطوبت اشباع (θ_s)، رطوبت باقی مانده (θ_r)، عکس مکش ورود هوا در نقطه عطف منحنی (α)، پارامتر توزیع اندازه منافذ (n) و ضریب تبیین (R^2)

Table 4. Effects of soil texture and biochar on van Genuchten model parameters including saturated water content (θ_s), residual water content (θ_r), inverse of air entry potential (α), pore size distribution parameter (n) and coefficient of determination (R^2)

Soil texture	Biochar level	θ_s	θ_r	α	n	R^2
		(cm ³ cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)	(cm ⁻¹)	(-)	
CL	0	0/573 ^b	0/112 ^c	0/019 ^e	1/44 ^d	0/998
	3%	0/593 ^a	0/126 ^b	0/015 ^f	1/37 ^e	0/985
	6%	0/620 ^a	0/147 ^a	0/011 ^g	1/35 ^e	0/991
L	0	0/380 ^f	0/072 ^c	0/036 ^c	1/54 ^b	0/989
	3%	0/506 ^d	0/103 ^{cd}	0/032 ^c	1/51 ^b	0/994
	6%	0/559 ^c	0/111 ^c	0/030 ^d	1/45 ^d	0/995
SL	0	0/312 ^g	0/044 ^f	0/075 ^a	1/64 ^a	0/997
	3%	0/350 ^f	0/060 ^{ef}	0/074 ^a	1/60 ^a	0/998
	6%	0/443 ^e	0/091 ^d	0/070 ^b	1/49 ^c	0/998

نیز دلالت بر کندتر شدن روند تخلیه آب و یکنواختی بیشتر منحنی رطوبتی دارد. این تغییرات حاکی از آن است که بیوچار در این نوع خاک توانسته مقاومت در برابر جریان آزاد آب را اندکی افزایش داده و رفتار رطوبتی خاک را تا حدی اصلاح کند.

در خاک لوم شنی، بیوچار موجب افزایش θ_s از ۰/۳۱۲ به ۰/۴۴۳ و θ_r از ۰/۰۷۴ به ۰/۱۱۱ گردید. این افزایش بهبود نسبی در ظرفیت نگهداری آب را نشان می دهد، گرچه مقدار آن نسبت به خاک های ریزبافت کمتر است. کاهش پارامتر α از ۰/۰۷۵ به ۰/۰۷۰ و کاهش ضریب n از ۱/۶۴ به ۱/۴۹

تأثیر بیوچار بر توزیع اندازه منافذ خاک در سه بافت مختلف

اثر سطوح مختلف بیوچار بر توزیع اندازه منافذ خاک در بافت‌های مختلف در جدول ۵ آورده شده است. در خاک لوم رسی، سهم منافذ ریز (Micro-p) از ۰/۳۷۹ به ۰/۴۳۱ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ افزایش یافت که این امر همراه با افزایش θ_r بوده و نشان‌دهنده بهبود ظرفیت ذخیره‌سازی آب در مکش‌های بالا و افزایش پایداری رطوبت غیرقابل دسترس می‌باشد. این اثرات می‌تواند از پر شدن فضاهای بین‌ذره‌ای

توسط بیوچار و افزایش سطح تماس ذرات ناشی شود (Yao et al., 2025). همچنین، افزایش منافذ درشت (Macro-p) از ۰/۰۳۹ به ۰/۰۵۰ مشاهده شد که می‌تواند در بهبود تهویه، نفوذپذیری و زهکشی خاک موثر باشد. علاوه بر این، افزایش سهم منافذ متوسط (Meso-p) از ۰/۱۱۹ به ۰/۱۳۹ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ موجب ارتقاء ظرفیت نگهداری آب قابل استفاده برای گیاهان شده است؛ چراکه این دسته از منافذ مسئول حفظ آب در مکش‌های میانی می‌باشند که عمدتاً توسط ریشه گیاهان جذب می‌شود (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر بافت خاک و بیوچار بر منافذ درشت (Macro-p)، منافذ متوسط (Meso-p)، منافذ ریز (Micro-p) و هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks)

Table 5. Mean comparison of the effects of soil texture and biochar on macropores (Macro-p), mesopores (Meso-p), and micropores (Micro-p) and saturated hydraulic conductivity (Ks)

Soil texture	Biochar level	Macro-P ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Meso-P ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Micro-P ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Ks (cm h^{-1})
CL	0	0/039 ^c	0/119 ^c	0/379 ^c	0/9 ^f
	3%	0/047 ^{ab}	0/114 ^c	0/432 ^a	0/7 ^{fg}
	6%	0/050 ^a	0/139 ^a	0/431 ^a	0/6 ^g
L	0	0/039 ^c	0/080 ^f	0/261 ^f	1/9 ^e
	3%	0/040 ^c	0/128 ^b	0/338 ^d	2/2 ^d
	6%	0/044 ^b	0/109 ^d	0/406 ^b	1/7 ^e
SL	0	0/034 ^d	0/076 ^g	0/202 ^h	5/2 ^c
	3%	0/035 ^d	0/081 ^f	0/233 ^g	6/4 ^b
	6%	0/044 ^b	0/093 ^e	0/306 ^c	7/4 ^a

افزودن بیوچار موجب تغییرات چشمگیری در توزیع اندازه منافذ خاک لومی گردید. افزایش منافذ ریز (Micro-p) از ۰/۲۶۱ به ۰/۴۰۶ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ در سطح ۶٪ بیوچار، عامل اصلی ارتقاء θ_r بوده و ظرفیت خاک برای نگهداری رطوبت در مکش‌های بالا را افزایش داده است. همچنین، منافذ متوسط (Meso-p) که نقش کلیدی در نگهداری آب قابل استفاده برای گیاهان ایفا می‌کنند، از ۰/۰۸۰ به ۰/۱۲۸ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ در سطح ۳٪ افزایش یافته و سپس در سطح ۶٪ به ۰/۱۰۹ کاهش یافته‌اند (جدول ۵). همچنین افزایش جزئی در منافذ درشت (Macro-p) از ۰/۰۳۹ به ۰/۰۴۴ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ مشاهده شد که می‌تواند در بهبود نفوذ اولیه آب و تهویه خاک موثر باشد. در مجموع، توزیع متوازن‌تر منافذ پس از تیمار با بیوچار، ظرفیت نگهداری آب قابل استفاده را افزایش داده و شرایط مناسبی برای رشد گیاه فراهم ساخته است. پیترسن و همکاران (Petersen et al., 2016)

نشان دادند که استفاده از دو نوع بیوچار مختلف، فضای منافذ قابل زهکشی با قطرهای ۶۰ تا ۳۰۰ میکرومتر را به منافذ نگهدارنده آب با اندازه ۰/۲ تا ۶۰ میکرومتر تبدیل می‌کند؛ این تغییر به‌عنوان معیاری برای افزایش ظرفیت آب قابل استفاده در خاک در نظر گرفته شد. این نوسان احتمالاً ناشی از پر شدن بخشی از منافذ متوسط توسط ذرات ریز بیوچار است که می‌تواند Meso-p را به Micro-p تبدیل کند؛ پدیده‌ای که با کاهش α در منحنی رطوبتی نیز همخوانی دارد. کاربرد بیوچار در خاک لوم شنی موجب افزایش قابل ملاحظه در منافذ ریز (Micro-p) از ۰/۲۰۲ به ۰/۳۰۶ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ گردید که با افزایش θ_r تطابق دارد و نشان‌دهنده ارتقاء توان نگهداری آب در مکش‌های بالا است. این مسئله در خاک‌های شنی از اهمیت بالایی برخوردار است، چراکه ظرفیت نگهداری آب به‌طور طبیعی در این خاک‌ها محدود است (جدول ۵). افزایش Meso-p از ۰/۰۷۶

Joseph, 2024). علاوه بر این، خاک‌های رسی به دلیل ساختمان فشرده‌تر و ذرات بسیار ریز، حساسیت بالایی نسبت به تغییرات سطحی و آب‌گریزی بیوپار دارند که می‌تواند به کاهش نفوذپذیری منجر شود (Jačka et al., 2018). بنابراین، در خاک‌های رسی، بیوپار بیشتر نقش بهبود دهنده ظرفیت نگهداری آب را ایفا می‌کند تا افزایش‌دهنده هدایت هیدرولیکی. یافته‌های ما با نتایج یائو و همکاران (Yao et al., 2025) هم‌راستا بود؛ به‌طوری‌که آن‌ها نیز گزارش کردند که افزودن بیوپار به تدریج نفوذپذیری آب اشباع خاک را تا یک مرتبه بزرگی کاهش داد. همچنین، تغییرات در توزیع اندازه‌ی منافذ نشان‌دهنده جابه‌جایی به‌سوی قطرهای کوچک‌تر بود که این امر نقش بیوپار را در انسداد ماکروپورها تأیید می‌کند.

در خاک لوم، اثر بیوپار بر هدایت هیدرولیکی اشباع پیچیده‌تر است و بسته به میزان افزودن بیوپار به میزان ۳٪ سبب ۱۲٪ افزایش و افزودن بیوپار به میزان ۶٪ سبب ۵٪ کاهش مشاهده شد. در مقادیر پایین، بیوپار می‌تواند با بهبود ساختمان خاک و پر کردن خلل و فرج، بهبود خفیفی در هدایت هیدرولیکی ایجاد کند؛ اما در مقادیر بالاتر، تجمع ذرات ریز بیوپار و احتمال آب‌گریزی سطحی ممکن است مسیرهای جریان آب را محدود کرده و کاهش K_s را به دنبال داشته باشد. این یافته‌ها با نتایج گزارش شده توسط هرات و همکاران (Herath et al., 2013) مطابقت دارد که نشان می‌دهد اثر بیوپار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک وابسته به میزان کاربرد آن و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. همچنین، بافت لوم که ترکیبی متعادل از شن، سیلت و رس است، نسبت به تغییرات فیزیکی و شیمیایی حساس‌تر بوده و واکنش آن به بیوپار تحت تأثیر تعاملات پیچیده بین ذرات خاک و بیوپار قرار دارد (Herath et al., 2013).

در خاک لوم‌شنی، افزایش ۳٪ و ۶٪ بیوپار به ترتیب سبب افزایش ۲۳٪ و ۴۲٪ هدایت هیدرولیکی اشباع گردید. این اثر می‌تواند به دلیل ساختار فیزیکی بیوپار باشد که با ایجاد منافذ درشت و شبکه متخلخل، مسیرهای جریان آب را تسهیل می‌کند (Abel et al., 2013). بافت لوم‌شنی به دلیل غلبه ذرات شن و اندازه بزرگ‌تر منافذ، ظرفیت بیشتری برای پذیرش و نگهداری بیوپار دارد و افزایش تخلخل درشت می‌تواند منجر به بهبود نفوذپذیری شود. همچنین، افزایش سطح ویژه بیوپار باعث بهبود ظرفیت نگهداری آب در این

به $0.93 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ نیز مشاهده شد که برای ارتقاء رطوبت قابل استفاده گیاهان اهمیت دارد. این تغییر همراه با افزایش θ_s تأیید می‌کند که بیوپار تا حدی توانسته ذخیره‌سازی آب مفید را افزایش دهد. بر اساس گزارش ونگ و همکاران (Wang et al., 2023)، ترکیب زغالی بیوپار می‌تواند با تشکیل پیوندهای Fe-O-Si بین فری‌هیدریت و مؤلفه سیلیسی بیوپار، از تجمع ذرات جلوگیری کرده و در نتیجه موجب افزایش حجم مزوپورها در بازه‌ی ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر گردد. در مقابل، افزایش منافذ درشت (Macro-p) از 0.34 به $0.44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ نسبتاً اندک بوده و تأثیر معنی‌داری بر بهبود زهکشی نداشته است.

این موضوع ناشی از طبیعت درشت‌دانه خاک لوم شنی است که به‌طور ذاتی دارای نفوذپذیری بالا است و کمتر از اصلاحات ساختاری بهره‌مند می‌شود. در نتیجه، اثرگذاری بیوپار در این خاک بیشتر به بهبود نگهداری آب در منافذ ریز محدود می‌شود تا اصلاح جامع در رفتار هیدرولیکی (Chen et al., 2018). چن و همکاران (Chen et al., 2018) در مطالعه‌ای تأثیر افزودن بیوپار با اندازه ذرات مختلف (زیر 0.25 ، 0.5 ، 1 ، 2 میلی‌متر) به خاک شنی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن بیوپار با اندازه ذرات بزرگتر (1 و 2 میلی‌متر) باعث افزایش نگهداری آب در شرایط اشباع و خشک می‌شود، اما در ظرفیت مزرعه‌ای کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که در خاک‌های شنی، بیوپار می‌تواند ظرفیت نگهداری آب را بهبود بخشد، اما تأثیر آن در بهبود رفتار هیدرولیکی خاک محدود است.

تأثیر بیوپار بر هدایت هیدرولیکی خاک در سه بافت مختلف

اثر سطوح مختلف بیوپار بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در بافت‌های مختلف در جدول ۵ آورده شده است. در خاک لوم‌رسی، به رغم افزایش تخلخل بزرگ ناشی از افزودن بیوپار، هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر افزودن ۳٪ و ۶٪ بیوپار به ترتیب به میزان ۱۶٪ و ۴۲٪ کاهش یافت که این امر می‌تواند ناشی از تغییر در توزیع منافذ و کاهش نفوذپذیری موضعی باشد. این پدیده می‌تواند ناشی از انسداد منافذ مؤثر توسط ذرات ریز بیوپار باشد که در فضای میان ذرات رس جای می‌گیرند و مسیرهای جریان آب را محدود می‌سازند (Mukherjee & Lal, 2013; Lehmann & Lal, 2013).

جذب رطوبت در سطوح پایین رطوبتی است. این رفتار می‌تواند نتیجه آب‌گریزی سطح بیوچار باشد که به‌ویژه در مراحل اولیه خیس شدن، مانع از تشکیل پوسته‌های آب روی سطح ذرات می‌شود.

مقاومت اولیه خاک در جذب آب، حتی با وجود افزایش ظرفیت تخلخل، باعث می‌شود که در شرایط رطوبت بالا یا مکش پایین، آب به‌سختی وارد خاک شود. در این حالت، کاهش مقادیر α و n می‌تواند به‌عنوان بازتابی از خاصیت آب‌گریزی بیوچار در نظر گرفته شود. در این نوع خاک، افزایش تعداد میکرومنافذ منجر به افزایش رطوبت باقی‌مانده شده است، اما به دلیل اثر آب‌گریزی، این منافذ تنها در مکش‌های بالا خیس می‌شوند. در واقع، بیوچار باعث می‌شود که خیس شدن کامل این منافذ به تعویق افتد و تنها در شرایط مکش قوی‌تر انجام شود. این رفتار با افزایش رطوبت باقی‌مانده و کاهش α هماهنگ بوده و مستقیماً به ویژگی‌های سطحی بیوچار و میزان آب‌دوستی یا آب‌گریزی آن مرتبط است. مطالعه مختلف نشان می‌دهد که خاک‌های لومی به دلیل ویژگی‌های فیزیکی متعادل و ظرفیت نگهداری متوسط، حساسیت بیشتری نسبت به اثرات آب‌گریزی بیوچار دارند و در صورت اکسید نشدن کافی بیوچار، ممکن است در مراحل ابتدایی با کاهش نفوذ آب مواجه شوند (Šurda et al., 2025; Mukherjee et al., 2011). در خاک لوم شنی (SL)، افزودن بیوچار موجب افزایش رطوبت اشباع و رطوبت باقی‌مانده می‌شود، هرچند این افزایش نسبت به سایر بافت‌های خاک محدودتر است. تغییرات اندک در پارامتر α در این خاک نیز حائز اهمیت است، زیرا حتی تغییرات جزئی در این پارامتر می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر آب‌گریزی بیوچار بر کاهش نفوذپذیری سطحی آب باشد. در خاک‌های شنی، وجود بیوچار با ویژگی‌های آب‌گریز می‌تواند باعث هدایت سطحی آب و ایجاد مسیرهای جریان ترجیحی شود؛ پدیده‌ای که جذب یکنواخت رطوبت را مختل می‌کند. این نوع رفتار یکی از پیامدهای رایج آب‌گریزی در خاک‌های با بافت درشت است (Bonanomi et al., 2024; Tian et al., 2025; Gray et al., 2014). افزایش میکرومنافذ نشان‌دهنده رشد ظرفیت نگهداری آب در مقیاس ریز است، اما همزمان با افزایش قابل توجهی در α همراه نیست. این موضوع ممکن است به دلیل خیس نشدن مؤثر این منافذ در نتیجه آب‌گریزی سطح بیوچار باشد. همچنین، افزایش محدود در ماکرومنافذ

بافت شده و جریان آب را در لایه‌های بالایی خاک تسریع می‌کند (Liu et al., 2012). بنابراین، در این نوع خاک‌ها، بیوچار موجب بهبود ترکیبی از نفوذ و نگهداری آب می‌شود.

اثر آب‌گریزی بیوچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

در بافت‌های مختلف، خاصیت آب‌گریزی (Hydrophobicity) بیوچار می‌تواند اثرات قابل توجهی بر الگوی توزیع رطوبت داشته باشد. در خاک‌های رسی لوم (CL)، افزودن بیوچار باعث افزایش رطوبت اشباع و رطوبت باقی‌مانده می‌شود، به‌طوری‌که ظرفیت نگهداری آب در خاک افزایش می‌یابد. با وجود این افزایش، کاهش پارامتر α نشان‌دهنده کاهش سرعت تخلیه آب از خاک است، که می‌تواند ناشی از افزایش اثر آب‌گریزی بیوچار در نواحی میکرومنفذی باشد (Jačka et al., 2018). بیوچارهایی که تازه هستند یا به میزان کمی اکسید شده‌اند، دارای گروه‌های عاملی آب‌گریز مانند ترکیبات آلکان و آروماتیک هستند که با تأخیر در خیس شدن سطح، مانع از جذب سریع آب در شرایط خشک می‌شوند.

هم‌زمان، کاهش پارامتر n نیز بیانگر یکنواخت‌تر شدن منحنی رطوبتی و افزایش رفتار غیرخطی خاک در جذب رطوبت است. این پدیده نیز از نشانه‌های آب‌گریزی است که باعث ایجاد نواحی با خیس‌شدگی غیر یکنواخت در خاک شده و در مراحل اولیه آبیاری، کاهش جذب آب را به دنبال دارد. افزایش میزان میکرومنافذ با افزایش رطوبت باقی‌مانده همخوانی دارد. اما با افزایش خاصیت آب‌گریزی بیوچار، این منافذ ریز در ابتدا به سختی خیس می‌شوند و تنها در شرایط مکش بالا آب جذب می‌کنند. در نتیجه، آب در این منافذ محبوس می‌شود و خیس شدن آن‌ها به تأخیر می‌افتد که خود باعث افزایش رطوبت باقی‌مانده می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده بیوچارهای تولیدشده در دماهای پایین‌تر (کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) به دلیل باقی‌ماندن گروه‌های غیرقطبی، تمایل بیشتری به رفتار آب‌گریز دارند. این ویژگی در خاک‌های ریزبافت می‌تواند باعث افزایش مقاومت در برابر ترشوندگی و کاهش نفوذپذیری اولیه خاک شود (Ghorbani et al., 2022; Usevičiūtė et al., 2021). در خاک لومی (L) نیز افزودن بیوچار موجب افزایش رطوبت اشباع و رطوبت باقی‌مانده می‌شود. با این حال، کاهش پارامترهای α و n مشابه روند مشاهده‌شده در خاک رسی لوم بوده و نشان‌دهنده تأخیر در تخلیه آب و کاهش سرعت

تأثیر چشم‌گیری در بهبود جذب سطحی آب در این نوع خاک ندارد. در چنین شرایطی، سطح بیوچار می‌تواند با دفع آب، باعث نفوذ غیریکنواخت و تشکیل نواحی خشک و مرطوب در خاک شود. این ویژگی در منحنی مشخصه رطوبتی به صورت افزایش رطوبت باقی‌مانده و کاهش پارامتر n نمایان می‌شود، که نشان‌دهنده مقاومت اولیه در تر شدن خاک و ناهمگنی توزیع رطوبت در پروفیل است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد بیوچار، به‌ویژه در سطوح بالاتر، تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک داشته و این تأثیر تا حد زیادی به بافت خاک وابسته است. آب‌گریزی ذاتی بیوچار منجر به افزایش رطوبت باقیمانده (θ_r) و کاهش پارامترهای عکس مکش ورود هوا در نقطه عطف منحنی (α) و توزیع اندازه منافذ (n)، در معادله ون‌گنوختن شد که نشان‌دهنده کاهش ترشوندگی و رفتار غیرخطی جذب آب در خاک‌های تیمار شده است. این اثرات در خاک‌های شنی شدیدتر و در خاک‌های ریزبافت کاهش یافته‌اند. افزایش بیوچار به‌ویژه در سطوح ۶٪، موجب افزایش قابل‌توجه در آب‌گریزی خاک در بافت‌های شنی و لومی شد، در حالی که خاک‌های ریزبافت‌تر مانند لوم‌رسی، پایداری بیشتری در برابر این اثر نشان دادند. بررسی منحنی مشخصه رطوبتی نشان داد که بیوچار با افزایش منافذ ریز و

متوسط موجب ارتقاء ظرفیت نگهداری آب در خاک‌های لوم و لوم‌رسی گردیده است. در این دو بافت، افزایش منافذ متوسط به‌عنوان منافذ مؤثر در فراهم‌سازی آب قابل جذب برای گیاهان، اهمیت ویژه‌ای دارد. در مقابل، تأثیر بیوچار بر خاک لوم‌شنی به دلیل ساختار درشت‌تر آن، محدودتر بوده و عمدتاً در افزایش آب غیرقابل استفاده منعکس شده است. از نظر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، واکنش خاک‌ها به بیوچار متنوع بود. در خاک شنی، بهبود K_s در نتیجه افزایش تخلخل کل مشاهده شد. در خاک‌های لوم و لوم‌رسی، بسته به سطح کاربرد بیوچار، نتایج متغیر بود؛ به‌طوری که در سطوح بالاتر، به دلیل افزایش آب‌گریزی و احتمال انسداد منافذ، کاهش K_s به‌ویژه در خاک‌های ریزبافت ثبت شد. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، تابعی از بافت خاک، میزان کاربرد و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی بیوچار است. بیوچار با بهبود ساختار منفذی و ارتقاء ظرفیت نگهداری آب در خاک‌های لوم و لوم‌رسی، نقش مهمی در افزایش پایداری رطوبتی و کاهش اثرات تنش خشکی ایفا می‌کند. با این حال، در خاک‌های شنی، استفاده از بیوچار نیازمند مدیریت دقیق‌تر به‌منظور کنترل آب‌گریزی و بهینه‌سازی شرایط جذب آب است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند راهنمایی مؤثر برای انتخاب بافت خاک و دوز مناسب بیوچار در برنامه‌های اصلاحی و مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم آورد.

Reference

- 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.
- Acharya, B. S., Dodla, S., Wang, J. J., Pavuluri, K., Darapuneni, M., Dattamudi, S., Maharjan, B., & Kharel, G. (2024). Biochar impacts on soil water dynamics: knowns, unknowns, and research directions. *Biochar*, 6(1), 34.
- Beven, K., & Germann, P. (1982). Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18(5), 1311-1325.
- Bisdorf, E. B. A., Dekker, L. W., & Schoube, J. T. (1993). Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, 56, 105-118.
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687-711.
- Bonanomi, G., Motti, R., Abd-ElGawad, A. M., & Idbella, M. (2024). Soil water repellency along elevation gradients: The role of climate, land use and soil chemistry. *Geoderma*, 443, 116847.
- Canellas, L. P., & Olivares, F. L. (2014). Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1, 1-11.
- Chen, Z., Intraravimonmata, C., Kamchoom, V., Chen, R., & Sinsamutpadung, N. (2025). Biochar Amendment as a Mitigation Against Freezing-Thawing Effects on Soil Hydraulic Properties. *Agronomy*, 15(1), 137.

- Chen, C., Wang, R., Shang, J., Liu, K., Irshad, M. K., Hu, K., & Arthur, E. (2018). Effect of biochar application on hydraulic properties of sandy soil under dry and wet conditions. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-8.
- DeBano, L. F. (1971). The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 35(2), 340-343.
- Dekker, L. W., & Ritsema, C. J. (1994). How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 30(9), 2507-2517.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214.
- Doerr, S. H., & Thomas, A. D. (2000). The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*, 231, 134-147.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Walsh, R. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51(1-4), 33-65.
- Dekker, L. W., & Jungerius, P. D. (1990). Water repellency in the dunes with special reference to The Netherlands. *Catena*, 18, 173-183.
- García, F. J. M., Dekker, L. W., Oostindie, K., & Ritsema, C. J. (2005). Water repellency under natural conditions in sandy soils of southern Spain. *Soil Research*, 43(3), 291-296.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods* (5, pp. 383-411). American Society of Agronomy.
- Gelardi, D. L., Ainuddin, I. H., Rippner, D. A., Patiño, J. E., Abou Najm, M., & Parikh, S. J. (2021). Biochar alters hydraulic conductivity and impacts nutrient leaching in two agricultural soils. *Soil*, 7(2), 811-825.
- Ghorbani, M., Amirahmadi, E., Neugschwandtner, R. W., Konvalina, P., Kopecký, M., Moudrý, J., Perná, K., & Murindangabo, Y. T. (2022). The impact of pyrolysis temperature on biochar properties and its effects on soil hydrological properties. *Sustainability*, 14(22), 14722.
- Gray, M., Johnson, M. G., Dragila, M. I., & Kleber, M. (2014). Water uptake in biochars: The roles of porosity and hydrophobicity. *Biomass and Bioenergy*, 61, 196-205.
- Herath, H. M. S. K., Camps-Arbestain, M., & Hedley, M. (2013). Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209, 188-197.
- Holt, J. A., Yost, M. A., Winward, D., Creech, J. E., Allen, L. N., & McAvoy, D. (2022). Biochar had minor effects on yield, quality, and water availability of irrigated alfalfa, corn, and wheat. *Agronomy Journal*, 114(3), 1717-1730.
- Imeson, A. C., Verstraten, J. M., Van Mulligen, E. J., & Sevink, J. (1992). The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *Catena*, 19(3-4), 345-361.
- Jačka, L., Trakal, L., Ouředníček, P., Pohořelý, M., & Šípek, V. (2018). Biochar presence in soil significantly decreased saturated hydraulic conductivity due to swelling. *Soil and Tillage Research*, 184, 181-185.
- Khanmohammadi, Z., Afyuni, M., & Mosaddeghi, M. R. (2015). Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. *Waste Management & Research*, 33(3), 275-283.
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods* (5, pp. 687-734). American Society of Agronomy.
- Kinney, T. J., Masiello, C. A., Dugan, B., Hockaday, W. C., Dean, M. R., Zygourakis, K., & Barnes, R. T. (2012). Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass and Bioenergy*, 41, 34-43.
- Kirkham, M. B. (2023). *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Elsevier.
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2024). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Taylor & Francis.
- Li, L., Zhang, Y. J., Novak, A., Yang, Y., & Wang, J. (2021). Role of biochar in improving sandy soil water retention and resilience to drought. *Water*, 13(4), 407.
- Lichner, L., Orfánus, T., Nováková, K., Šír, M., & Tesář, M. (2007). The impact of vegetation on hydraulic conductivity of sandy soil. *Soil and Water Research*, 2, 59-66.

- Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C. A., Barnes, R. T., Gallagher, M. E., & Gonnermann, H. (2016). Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar-sand mixtures. *Journal of Hydrology*, 533, 461-472.
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., & Paz-Ferreiro, J. (2013). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. *Plant and Soil*, 373, 583-594.
- Mao, J., Zhang, K., & Chen, B. (2019). Linking hydrophobicity of biochar to the water repellency and water holding capacity of biochar-amended soil. *Environmental Pollution*, 253, 779-789.
- McKissock, I., Gilkes, R. J., & Van Bronswijk, W. (2003). The relationship of soil water repellency to aliphatic C and kaolin measured using DRIFT. *Soil Research*, 41(2), 251-265.
- Morley, C. P., Mainwaring, K. A., Doerr, S. H., Douglas, P., Llewellyn, C. T., & Dekker, L. W. (2005). Organic compounds at different depths in a sandy soil and their role in water repellency. *Soil Research*, 43(3), 239-249.
- Movasat, M., & Tomac, I. (2021). Assessment of physical properties of water-repellent soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(9), 06021010.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3(2), 313-339.
- Mukherjee, A., Zimmerman, A. R., & Harris, W. (2011). Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163(3-4), 247-255.
- Olaetxea, M., De Hita, D., Garcia, C. A., Fuentes, M., Baigorri, R., Mora, V., Garnica, M., Urrutia, O., Erro, J., Zamarreño, A. M., & Berbara, R. L. (2018). Hypothetical framework integrating the main mechanisms involved in the promoting action of rhizospheric humic substances on plant root-and shoot-growth. *Applied Soil Ecology*, 123, 521-537.
- Petersen, C. T., Hansen, E., Larsen, H. H., Hansen, L. V., Ahrenfeldt, J., & Hauggaard-Nielsen, H. (2016). Pore-size distribution and compressibility of coarse sandy subsoil with added biochar. *European Journal of Soil Science*, 67(6), 726-736.
- Ramazanoglu, E. (2023). Effects of Biochar application as a carbon substrate on cotton plant growth and some soil enzymes. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 7(4), 904-915.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* (5, pp. 417-435). American Society of Agronomy.
- Safadoust, A., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., & Yousefi, G. (2012). Effects of Wetting/Drying, Freezing/Thawing and Earth Worm Activities on Soil Hydraulic Properties. *Water and Soil*, 26(2), 340-348.
- Saffari, N., Hajabbasi, M. A., Shirani, H., Mosaddeghi, M. R., & Owens, G. (2021). Influence of corn residue biochar on water retention and penetration resistance in a calcareous sandy loam soil. *Geoderma*, 383, 114734.
- Salazar, M. P., Lozano, L. A., Villarreal, R., Bellora, G. L., Villeda, C. A. M., Churquina, N., Polich, N. G., & Soracco, C. G. (2024). Soil water repellency under Eucalyptus stands of different age and its relationship with soil hydrological function and soil organic matter. *Catena*, 246, 108441.
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47-82.
- Šurda, P., Vitková, J., Lichner, L., Botková, N., & Toková, L. (2024). Effect of wettable and hydrophobic biochar addition on properties of sandy soil. *Biologia*, 1-12.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* (5, pp. 475-490). American Society of Agronomy.
- Tian, Z., Deng, H., Zhang, S., Xu, Q., & Jin, X. (2025). Fractal parameters of soil particle size distribution in karst area, and implications of soil water repellency by plantations. *Soil and Water Research*, 20(2), 93-104.
- Usevičiūtė, L., & Baltrėnaitė-Gedienė, E. (2021). Dependence of pyrolysis temperature and lignocellulosic physical-chemical properties of biochar on its wettability. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(6), 2775-2793.

- Van Genuchten, M. T., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1992). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency.
- Verheijen, F. G., 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.
- 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.
- Wang, M., Shen, J., Xu, X., Feng, H., Huang, D., & Chen, Z. (2023). Biochar as an enhancer of the stability, mesoporous structure and oxytetracycline adsorption capacity of ferrihydrite: Role of the silicon component. *Science of the Total Environment*, 875, 162652.
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002-1022.
- Wang, C., Wu, Y., Xie, L., Yang, Z., Tian, J., Yu, F., Ren, J., & Li, S. (2025). Estimating soil-water characteristic curve from the particle size distribution with a novel granular packing model. *Water Resources Research*, 61(2), e2024WR037262.
- Wang, K., Zhang, X., Sun, C., Yang, K., Zheng, J., & Zhou, J. (2021). Biochar application alters soil structure but not soil hydraulic conductivity of an expansive clayey soil under field conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 73-82.
- Yao, Y., Xu, P., Yang, S., Ni, J., & Wang, Y. (2025). Effect of biochar on water permeability and cracking behaviour of granite residual soil. *Géotechnique Letters*, 1-5.
- Zhang, T., Cai, H., Tang, Y., Gao, W., Lee, X., Li, H., Li, C., & Cheng, J. (2025). Visualising the trends of biochar influencing soil physicochemical properties using bibliometric analysis 2010–2022. *Environment, Development and Sustainability*, 27(2), 2815-2839.
- Zhu, Z., Zhang, Y., Tao, W., Zhang, X., Xu, Z., & Xu, C. (2025). The biological effects of biochar on soil's physical and chemical characteristics: A review. *Sustainability*, 17(5), 2214.