Effect of Apple Wood Biochar on Water Infiltration and Soil Hydraulic Parameters, and Some Soil Physical and Chemical Properties in Rainfed Cultivation of Thymus

Amir Mansour Shahsavar[1*], Mohammad Reza Mosaddeghi[2], Mahdi Gheysari[3] and Mahdi Rahimmalek[4]

1- Department of Soil Science, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran
2- Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology
3- Department of Water Engineering and Rural Development, College of Agriculture, Isfahan University of Technology
4- Department of Agricultural Biotechnology and Horticultural Sciences, College of Agriculture, Isfahan University of Technology
* Corresponding author, Email: amshahsavar@iau.ac.ir

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

Abstract

Background and Objective: Biochar, produced by the pyrolysis of organic residues in an oxygen-poor or oxygen-free condition, improves soil quality and reduces greenhouse gas emissions. However, little research has been conducted on the effect of biochar application in field conditions on water infiltration and soil hydraulic properties. This study aimed to investigate the effect of apple wood biochar on soil physical and chemical properties, water infiltration and soil hydraulic parameters in dryland thyme cultivation.

Methods: The effect of apple tree branch biochar application with three levels (0, 30, and 60 tons per hectare) on on soil physical and chemical properties, water infiltration, soil saturated and unsaturated hydraulic conductivity (K_s and K_{unsat}), and macroscopic capillary length (λ_c) was studied in dryland cultivation of two thymus species in the Absard region of Damavand County. Unsaturated water infiltration into the soil was measured with a tension infiltrometer. The data were analyzed in a randomized complete block design with split plots over time (in two consecutive years).

Results: Biochar application improved the soil physical and chemical properties, by reducing bulk density (BD), increasing porosity (P), organic carbon (OC) and total nitrogen (TN), as well as enhanced water infiltration, K_s and K_{unsat}. Due to the beneficial effect of biochar on soil structure and organic matter, the highest soil permeability, K_s and K_{unsat} were observed in the 30 ton/ha biochar treatment. However, higher biochar application (60 ton/ha) resulted in a lower increase in soil infiltrability, K_s and K_{unsat} compared to the control, which could be related to the filling of soil pores by biochar particles and the intensification of soil hydrophobicity. Also, soil infiltrability and hydraulic parameters were significantly higher in the second year than in the first year, indicating that the effect of biochar treatments increases with time.

Conclusion: Economic rate of biochar application (i.e., 30 ton/ha) improved the soil and plant conditions in the region. Besides, the time resulted in better influence of biochar on soil infiltrability, structure and physical quality.

Keywords: Biochar, Macroscopic capillary length, Tension infiltrometer, Unsaturated hydraulic conductivity.

تاثیر بیوچار چوب شاخه‌های درخت سیب بر نفوذ آب، پارامترهای هیدرولیکی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در کشت دیم آویشن

امیر منصور شهسوار[1*]، محمدرضا مصدقی[2]، مهدی قیصری[3] و مهدی رحیم ملک[4]

۱- گروه علوم خاک، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
۲- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳- گروه مهندسی آب و توسعه روستایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۴- گروه زیست‌فناوری کشاورزی و علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: amshahsavar@iau.ac.ir

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: بیوچار از گرماکافت مانده‌های آلی در محیطی با اکسیژن کم یا بدون اکسیژن تولید شده و موجب بهبود کیفیت خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. ولی پژوهش‌های اندکی در مورد اثر کاربرد بیوچار بر نفوذ آب و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در شرایط مزرعه‌ای انجام شده است. هدف این پژوهش بررسی تاثیر بیوچار چوب سیب بر ویژگی‌ها فیزیکی و شیمیایی، نفوذ آب و پارامترهای هیدرولیکی خاک در کشت دیم آویشن بود.

روش‌ها: در این پژوهش تأثیر کاربرد بیوچار شاخه‌های درخت سیب با سه سطح (۰، ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار) بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نفوذ آب به خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع (K_s و K_{unsat}) و طول درشت مویینه (λ_c) در کشت دیم دو گونه آویشن در منطقه آبسرد شهرستان دماوند بررسی شد. اندازه‌گیری نفوذ غیراشباع آب به خاک با دستگاه نفوذسنج مکشی انجام شد. نتایج در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با کرت‌های خردشده در زمان (دو سال متوالی) مورد تجزیه آماری قرار گرفت.

نتایج: کاربرد بیوچار موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل کاهش چگالی ظاهری (BD)، افزایش تخلخل (P)، کربن آلی (OC) و نیتروژن کل (TN)، و افزایش نفوذ آب، K_s و K_{unsat} شد. به‌دلیل تاثیر مفید بیوچار بر ساختمان و مادهٔ آلی خاک، بیشترین میزان نفوذپذیری خاک، K_s و K_{unsat} در تیمار بیوچار ۳۰ تن در هکتار مشاهده شد. ولی کاربرد بیشتر بیوچار (۶۰ تن در هکتار) موجب افزایش کمتر نفوذپذیری خاک، K_s و K_{unsat} نسبت به شاهد شد که به پرشدن منافذ خاک توسط ذرات بیوچار و تشدید آب‌گریزی خاک می‌تواند مرتبط باشد. همچنین نفوذپذیری و پارامترهای هیدرولیکی خاک در سال دوم به‌طور معناداری بیشتر از سال اول بود؛ بنابراین با گذشت زمان تاثیر تیمارهای بیوچار بر نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری کلی: کاربرد ۳۰ تن در هکتار بیوچار برای بهبود شرایط خاک و گیاه در منطقه مورد بررسی پیشنهاد می‌شود که از نظر اقتصادی نیز به‌صرفه است. همچنین گذشت زمان موجب اثرگذاری بهتر بیوچار بر نفوذآیی، ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک شد.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، طول درشت مویینه، نفوذسنج مکشی، هدایت هیدرولیکی غیراشباع.

مقدمه

مدیریت بهینه منابع آب و خاک به‌ویژه با نرخ روزافزون بهره‌برداران و محدودیت منابع آب قابل استفاده، ضرورتی حیاتی است (Rockstrom et al., 2007). با عنایت به تخصیص بخش اعظم منابع آبی به حوزه کشاورزی، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک که محدودیت منابع آب به‌صورت یک چالش راهبردی بروز می‌یابد، ارتقای مدیریت منابع آب موجود از راه واکاوی دقیق کیفیت و ویژگی‌های فیزیکی خاک، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. در این میان، سنجش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی خاک به‌عنوان پارامترهای کلیدی، پیش‌نیاز اصلی مدیریت بهینه آب در سطح مزرعه تلقی می‌شوند. علاوه بر این، هدایت هیدرولیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در بررسی بیلان آبی، پایش رشد گیاه، رژیم انتقال املاح و همچنین مدل‌سازی فرآیندهای فرسایش ایفا می‌کند (Verbist et al., 2012).

نفوذ آب به خاک فرآیندی مهم در چرخه آب است که متاثر از ویژگی‌های سطحی و عمقی خاک بوده که پدیده‌های تولید روان‌آب و حرکت آب در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بهبود پدیده‌های مذکور منجر به افزایش نفوذ آب آبیاری و بارش به خاک و به‌دنبال آن افزایش ذخیره آب خاک (افزایش کارایی مصرف آب) و در مجموع افزایش بهره‌وری مدیریت آب در بخش کشاورزی خواهد شد.

هدایت هیدرولیکی خاک (K) نقش محوری در کنترل نفوذ، ذخیره آبی خاک در ناحیه غیراشباع و پویایی کلی تغذیه آب خاک از بارندگی و آبیاری ایفا می‌کند. درک تغییرات K برای شناسایی الگوهای جریان آب، انتقال املاح و آلاینده‌ها و همچنین برای بهبود مدیریت آبیاری و زهکشی در خاک‌های تیمارشده با اصلاح‌کننده‌ها بسیار مهم است. تعیین K به عنوان یک پارامتر ورودی کلیدی در مدل‌های بارش–رواناب مهم است. عوامل متعددی مانند درجه اشباع، توزیع اندازه ذرات خاک، تخلخل درون‌خاکدانه‌ای، تخلخل مؤثر، پیوستگی و اعوجاج منافذ، سطح ویژه ذرات، انقباض–تورم، چگالی ظاهری (BD)، فعالیت میکروبی، و عوامل بیرونی مانند دما و شیوه‌های مدیریتی و خاک‌ورزی بر مقدار K موثرند (Acharya et al., 2024).

بیشتر فرآیندهای طبیعی تحت تاثیر برهمکنش آب–خاک–اتمسفر–گیاه در شرایط غیراشباع خاک رخ می‌دهند. جریان آب در خاک بستگی به ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل منحنی نگهداشت آب یا $\theta(h)$ و تابع هدایت هیدرولیکی یا $K(h)$ دارد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری و تعیین آزمایشگاهی و مزرعه‌ای تابع $K(h)$ وجود دارد. یکی از روش‌های اندازه‌گیری نفوذ غیراشباع آب به خاک و تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، استفاده از نفوذسنج مکشی/دیسکی است (Perroux and White 1988; Špongrová et al., 2009; Vandervaere et al., 1997). مزایای نفوذسنج مکشی شامل حداقل دست‌خوردگی خاک، سادگی و تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها است (Ventrella et al., 2005). ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تغییرات زمانی (فصلی) داشته، و تحت تاثیر عوامل زیادی مانند بافت و ساختمان خاک، شیوه آبیاری، فرسایش و تراکم خاک قرار می‌گیرند.

بیوچار ماده‌ای جامد و سیاه‌رنگ غنی از کربن است که از گرماکافت مانده‌های آلی در محیطی با اکسیژن کم یا بدون اکسیژن تولید می‌شود. این ماده موجب بهبود کیفیت خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. امروزه بیوچار به‌عنوان یک مادهٔ اصلاح‌کنندهٔ مؤثر برای بهبود دامنهٔ وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی خاک، از جمله گنجایش نگهداشت آب و نفوذپذیری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد و پتانسیل زیادی در کاهش آثار خشک‌سالی و افزایش محصول از راه بهبود کیفیت خاک و افزایش گنجایش نگهداشت آب خاک دارد (Bajamonte et al., 2019). ترکیب متفاوت بیوچارها به‌دلیل تفاوت در نوع ماده اولیه و شرایط تولید آن‌ها باعث می‌شود که در برهمکنش با خاک، ویژگی‌های متفاوت آب‌دوستی یا آب‌گریزی، و اسیدی یا بازی از خود نشان دهند (Atkinson et al., 2010). همچنین این ماده از راه افزایش گنجایش نگهداشت آب در خاک، توانایی زیادی در تعدیل آثار زیان‌بار خشکسالی دارد (Mansoor et al., 2021).

افزودن بیوچار به خاک، ساختار و توزیع اندازه منافذ را به‌طور مؤثری تغییر می‌دهد (Al-Wabel et al., 2024). این تغییرات

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

ساختاری مستقیماً بر پارامترهای هیدرولیکی غیراشباع خاک تأثیر می‌گذارند، به‌گونه‌ای که میزان نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی تحت تأثیر هندسه منافذ خاک قرار می‌گیرد (Alghamdi et al., 2024). به‌طور مشخص، کاربرد بیوچار می‌تواند منجر به تغییر در طول درشت مویینه (λ_c) شود که نشان‌دهنده نقش نیروهای مویینگی در جذب و جریان آب در خاک است (Fakhar et al., 2025). همچنین، افزایش سطح ویژه و تخلخل بیوچار، موجب تقویت توان جذب آب به‌دلیل افزایش پارامتر ضریب جذب (S) می‌گردد (Fakhar et al., 2025). علاوه بر این، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بیوچار با بهبود پایداری خاکدانه‌ها، می‌تواند شدت نفوذ آب به خاک را مدیریت کرده و از آب‌شویی عناصر غذایی در خاک‌های درشت‌بافت جلوگیری کند (Alghamdi et al., 2024). به‌طورکلی، کاربرد بیوچار منجر به کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) در خاک‌های درشت‌بافت و افزایش آن در خاک‌های ریزبافت می‌شود (Blanco-Canqui, 2017). کاهش K_s در خاک‌های درشت‌بافت معمولاً زمانی رخ می‌دهد که ذرات بیوچار (به‌ویژه ذرات ریز بیوچار) منافذ درشت بین ذرات خاک را پر کرده و منجر به افزایش اعوجاج و کاهش قطر منافذ خاک شوند (Esmaeelnejad et al., 2017; Igalavithana et al., 2017). به عنوان مثال، Lim et al. (2016) کاهش K_s را در اثر کاربرد بیوچار در دو خاک شنی درشت و ریز گزارش کردند، زیرا ذرات بیوچار باعث افزایش اعوجاج منافذ خاک می‌شوند. در برخی شرایط، بیوچارها ممکن است به‌دلیل پیوند هیدروژنی قطبی گروه‌های O-H و C-O-H باعث افزایش حجم در خاک‌های درشت‌بافت شده و به طور بالقوه جهت‌گیری ذرات و BD خاک را تغییر دهند (Jacka et al., 2018). شواهد بلندمدت ۵ ساله حاکی از آن است که بیوچار می‌تواند با کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل کل، بهبود ساختار فیزیکی خاک را در طول زمان تداوم بخشد (Tappar et al., 2024). در پژوهشی، با افزایش میزان کاربرد بیوچار پوسته بادام‌زمینی گرماکافت شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، کاهش خطی در K_s مشاهده شد که در درجه اول به آب‌گریزی ناشی از مواد آلی در خاک‌های اصلاح‌شده با بیوچار نسبت داده می‌شود (Githinji, 2014). همچنین در پژوهش دیگری مشاهده شد با افزایش کاربرد بیوچار صنوبر گرماکافت‌شده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس، کاهش تدریجی در K_s خاک شنی مشاهده شد که با کاهش منافذ درشت مرتبط است. در برخی از خاک‌ها، K_s به‌دلیل ساختار درونی و ظرفیت میدانی اغلب بیوچارها کاهش می‌یابد (Zhang et al., 2016). به‌طورکلی کاهش ۷ تا ۲۲۷۰ درصدی K_s خاک در اثر کاربرد بیوچار در خاک‌های درشت‌بافت (شنی تا لوم شنی) گزارش شده است.

پژوهشگران معتقدند که کاربرد بیوچار اغلب باعث بهبود نفوذپذیری خاک می‌شود ولی در مورد برخی از خاک‌ها مانند خاک‌های دارای رس زیاد، به‌دلیل هم‌آوری ذرات رس، کاهش قابلیت زهکشی و واکنش متفاوت خاک‌های رسی به کاربرد بیوچار، هنوز مورد بحث است (Blanco-Canqui, 2017). بیوچار می‌تواند توزیع اندازه منافذ، ساختمان، تخلخل و BD خاک، الگوی جریان و مسیر جریان‌های ترجیحی و جریان آب و مواد در پیکره خاک را تغییر داده و باعث افزایش نفوذپذیری خاک در کوتاه‌مدت شود (Atkinson et al., 2010). ولی چون پس از افزوده‌شدن به خاک، ذرات بیوچار به‌سرعت به ذرات کوچک‌تر تبدیل می‌شوند، ممکن است نفوذپذیری خاک را در درازمدت کاهش دهد که به نوع بیوچار و زمان بستگی دارد (Brodowski et al., 2007). بنابراین، بیوچار به‌دلیل وجود منافذ ریز در ساختار خود می‌تواند مقدار آب بیش‌تری را در خاک نگهداری کرده و آب قابل استفاده (PAW) خاک را افزایش دهد. تغییر در ویژگی‌های هیدرولیکی و نفوذپذیری خاک بسته به ویژگی‌های خاک، بیوچار و شرایط آزمایش می‌تواند متفاوت باشد. در واقع افزایش یا کاهش هدایت هیدرولیکی خاک در اثر افزودن بیوچار به خاک ممکن است تابعی از مقدار کاربرد بیوچار، بافت خاک و دانه‌بندی بیوچار باشد. در یک پژوهش، افزودن بیوچار تهیه‌شده از مخلوط تراشهٔ چوب کاج و کود مرغی با نسبت ۵۰:۵۰ و ۸۰:۲۰ به یک خاک متراکم، سرعت نفوذ آب به خاک را نسبت به شاهد (بدون بیوچار) به‌طور معناداری افزایش داد، در صورتی

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

که افزودن بیوچار کود مرغی به تنهایی، منجر به افزایش سرعت نفوذ آب به خاک نسبت به شاهد نشد. بیوچاری که از مخلوط تراشهٔ چوب کاج و کود مرغی تهیه شد، دارای تخلخل بیشتر، منافذ درشت‌تر و پایداری ساختاری بهتری نسبت به بیوچار کود مرغی خالص بود. در نتیجه این نوع بیوچار می‌تواند، فضاهای خالی بیشتری در خاک ایجاد کند، مسیرهای ترجیحی برای عبور آب بسازد، و تاثیر بیشتری در کاهش تراکم خاک داشته باشد (Novak et al., 2016).

نتایج پژوهش دیگری نشان داد که افزودن بیوچار حاصل از چوب مانگو (با اندازهٔ ذرات کوچک‌تر از ۰/۶۳ µm) با مقادیر ۰، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی به خاک‌های شنی و لوم شنی به‌دلیل مسدودنمودن منافذ خاک کاهش معناداری در سرعت نفوذ آب به خاک ایجاد کرد (Villagra-Mendoza et al., 2019). همچنین مشاهده شد کاربرد بیوچار دانه‌بندی‌نشده (الک‌نشده) حاصل از کاه ذرت به مقدار ۱۰ درصد، موجب کاهش نفوذ آب به یک خاک شور ساحلی در مقایسه با خاک شاهد شد. دلیل این یافته را می‌توان به وجود ذرات درشت، ناهمگن و ریز و درشت مرتبط دانست. در واقع چنین ساختاری می‌تواند باعث ناهمگنی در توزیع منافذ شده و در برخی نقاط، مسیر عبور آب را مسدود کند (Wang et al., 2016).

پژوهش‌های اندکی در مورد اثر کاربرد بیوچار در شرایط مزرعه‌ای بر نفوذ آب و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک انجام شده است. بنابراین هدف پژوهش حاضر بررسی تاثیر کاربرد بیوچار شاخه‌های درخت سیب بر نفوذ آب به خاک و پارامترهای هیدرولیکی خاک در کشت دیم آویشن بود.

مواد و روش‌ها

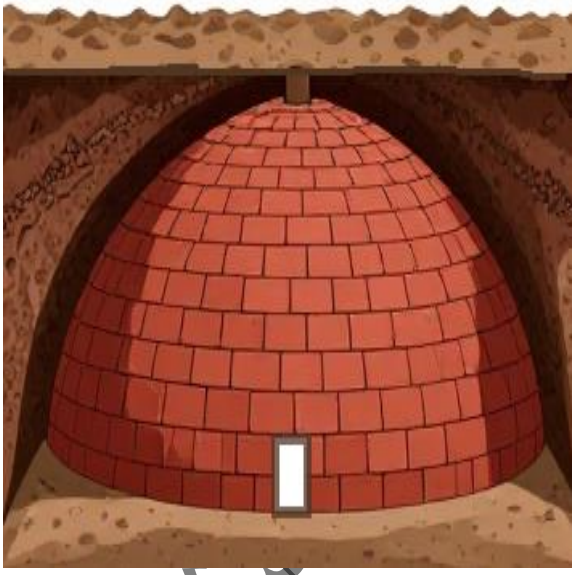
منطقه اجرای این پژوهش، "ایستگاه تحقیقاتی دیم همند آبسرد" وابسته به موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور بود. آزمایش مزرعه‌ای در دو سال متوالی (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹) و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت کرت‌های خردشده در زمان اجرا شد.

تهیه و آماده‌سازی سرشاخه‌های درخت سیب و تولید بیوچار

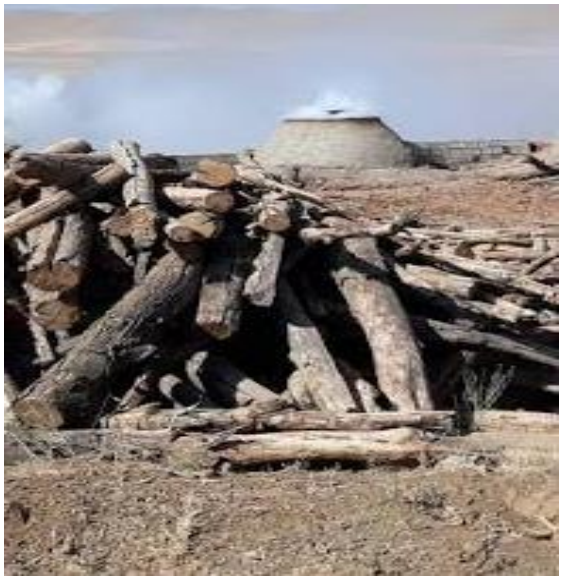
از آنجا که باغات سیب منطقه آبسرد سالانه در پاییز هرس می‌شوند، شاخه‌های هرس‌شده آن‌ها را می‌توان به‌عنوان مناسب‌ترین منبع تامین مانده‌های آلی (ماده اولیه) برای تولید بیوچار استفاده کرد. در این پژوهش شاخه‌های هرس‌شده درختان سیب پس از برش‌های مناسب به کوره تولید بیوچار انتقال داده شد. این کوره از دو بخش تونل دسترسی و کوره اصلی تشکیل شده است. تونل اصلی طولی در حدود ۱۵ متر دارد که از سطح زمین با شیبی ملایم تا عمق ۳ متری امتداد یافته و به قاعده مخزن اصلی متصل می‌شود. مخزن اصلی تقریباً مخروطی‌شکل بوده و قاعده آن دارای قطری برابر ۳/۵–۳ متر است. این مخزن از بالا توسط دهانه‌ای به قطر نیم متر به سطح زمین مرتبط است. بارگذاری از راس کوره و تخلیه از قاعده کوره و از مسیر تونل انجام می‌شد. پس از بارگذاری و روشن‌نمودن کوره با انسداد کامل از راس و قاعده برای ممانعت از ورود هوا و تامین شرایط بدون اکسیژن، عملیات تولید بیوچار آغاز شد. فرآیند تولید بیوچار در هر بارگذاری مستلزم گذشت حدود ۴۸–۲۴ ساعت برای تبدیل چوب به بیوچار است در پایان پخت و پس از خروج بیوچار لازم است کوره مجدداً بارگذاری شود. دمای نهایی کوره پس از گذشت حدودا ۲ ساعت به ۵۰۰ درجه سلسیوس رسید که با کنترل دما از طریق هواکش دما به مدت ۲۴ ساعت در همین مقدار تثبیت شد. ظرفیت کوره ۲ تن بود و برای جلوگیری از تماس چوب با دیواره و سقف و همچنین جلوگیری از فشرده شدن قطعات چوب، در هر بارگذاری حدود ۱/۵ تن چوب تازه خردشده به کوره وارد شد. در مجموع برای تامین بیوچار مورد نیاز کوره ۸ مرتبه پر و تخلیه شد.

به‌دلیل حجم زیاد بیوچار مورد نیاز، لازم بود از روشی مکانیزه در مزرعه برای خردکردن بیوچار تولیدی استفاده شود. بدین منظور از دستگاه خرمن‌کوب متصل به محور انتقال قدرت تراکتور استفاده شد. از آنجا که ذرات خروجی از خرمن‌کوب تنوع زیادی از نظر اندازه داشتند از الک بزرگی با اندازه چشمه ۵ میلی‌متر برای الک‌کردن بیوچار استفاده شد. سپس بیوچار عبوری

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده



A



B

شکل ۱. نمایی از اجزای سیستم تولید بیوچار: A) نمای شماتیک کلی، B) نمایی از ناحیه بیرونی کوره.

Fig. 1. Diagram of the components of the biochar production system: A) General schematic view, B) External view of the furnace.

از الک در کیسه‌های بزرگ توزین و بسته‌بندی شد. در نهایت انتقال، پخش‌کردن و مخلوط‌کردن آن با خاک کرت‌های آزمایشی مورد نظر که از پیش آماده شده بود، بر اساس طرح آزمایشی انجام شد. آماده‌سازی اولیه عرصه شامل قرنطینه نمودن منطقه به وسعت ۶۰۰ متر مربع، شخم نیمه‌عمیق توسط گاوآهن برگردان دار، هرس و ماله بود. کرت‌بندی و اعمال تیمارها و تکرارها که با توجه به تعداد زیاد اندازه‌گیری‌های گیاهی و خاک، بررسی ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه و نمونه‌برداری از لایه‌های خاک برای هر تیمار وسعتی برابر ۱۶ متر مربع (طول ۵/۵ متر و عرض ۳ متر) برای هر کرت منظور شد. فاصله بین کرت‌های آزمایشی یک متر در نظر گرفته شد. کرت‌های آزمایشی با قرعه‌کشی برای تیمارهای به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شد. سپس بیوچار تولیدشده به هر قطعه منتقل شده، توزیع یکنواخت سطحی با شن‌کش انجام شده و مخلوط نمودن آن با خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متر انجام شد.

مراحل کاشت و داشت گیاه

گیاه مورد نظر دو گونه آویشن (*T. daenensis* و *T. migricus*) و مدیریت آبیاری به روش دیم به اجرا گذاشته شد. بذور دوگونه از بانک ژن موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور تهیه شده، در بهمن ماه ۱۳۹۷ در گلخانه در سینی کشت کاشته و در فروردین ماه ۱۳۹۸ که گیاهچه ها به مرحله ۶ برگی رسیدند به عرصه انتقال یافتند. فرآیند کاشت در عرصه با رعایت فاصله ردیف‌ها به میزان ۰/۵ متر و فاصله بوته‌ها به میزان ۰/۴ متر انجام شد که در مجموع ۱۴ بوته در هر کرت آزمایشی کاشته شد. پس از گذشت ۷ ماه از کاشت گیاهان در عرصه، اقدام به نمونه‌برداری خاک از لایه ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری به‌صورت نمونه دست‌خورده و دست‌نخورده و اندازه‌گیری نفوذ غیراشباع آب به خاک شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل بافت، چگالی ظاهری (BD) و تخلخل (P) به روش سیلندر(Dane & Topp 2002) و برای ویژگی‌های شیمیایی شامل رسانایی الکتریکی (EC) در عصاره اشباع ، pH در عصاره اشباع ، کربن آلی کل (OC) به روش والکلی و بلاک، و نیتروژن کل (TN) به روش کلدال اندازه‌گیری شد (Sparks et al. 1996).

پیش از انتشار اصلاح نشده



شکل ۲. دستگاه نفوذسنج مکشی مورد استفاده برای اندازه‌گیری نفوذ غیراشباع آب به خاک

Fig. 2. Tension infiltrometer used to measure unsaturated water infiltration into soil

اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک و تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک

نفوذ آب و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک رویین با استفاده از نفوذسنج مکشی با دیسکی به قطر ۲۰ سانتی‌متر (ساخت شرکت Soil Measurement Systems LLC, Tucson, Arizona) و در فواصل بین ردیف‌های کشت تعیین شد. این اندازه‌گیری‌ها پس از برداشت شاخساره گیاه در فصل پاییز انجام شد. پیش از استقرار دیسک یا صفحه متخلخل نفوذسنج، به آرامی بقایای گیاهی از سطح خاک جمع‌آوری شد. به‌منظور اتصال مناسب هیدرولیکی دیسک دستگاه نفوذسنج مکشی در هر مکان، سنگریزه‌های سست سطحی برداشته شد. سپس حلقه فلزی مخصوص دستگاه در مکان موردنظر روی سطح زمین قرار گرفت و یک لایه شن مرطوب با اندازه ذرات ۰/۱ تا ۰/۲۵ میلی‌متر به ضخامت ۲ تا ۳ میلی‌متر درون آن ریخته شد. همچنین دستگاه نفوذسنج از آب پرشده به طوری که در دیسک حباب آبی دیده نشود. پس از برداشتن حلقه فلزی، دیسک روی سطح شن قرار گرفت. سپس با بازنمودن شیر دستگاه، نفوذ آب غیراشباع سه‌بعدی به خاک در مکش‌های ماتریک (h) ورودی (مرز بالایی) متوالی ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر در همه کرت‌ها اندازه‌گیری شد.

با استفاده از داده‌های برداشت‌شده، نفوذ تجمعی و شدت نفوذ سه‌بُعدی آب به درون خاک اندازه‌گیری شده و با مدل‌سازی داده‌ها ویژگی‌ها و پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل هدایت هیدرولیکی غیراشباع ($K(h)$) و ضریب جذب آب (S) در مکش‌های ماتریک مختلف (h)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و طول درشت مویینه (λ_c) محاسبه شد. در ابتدا مکش دستگاه در ۱۵ سانتی‌متر تنظیم شد و در مراحل بعدی به‌ترتیب مکش‌های ۱۰، ۵ و ۲ سانتی‌متر نیز اعمال گردیدند. یادداشت داده‌ها در هر مکش تا زمانی ادامه یافت که در پنج قرائت متوالی میزان افت سطح آب مخزن دستگاه ثابت شده باشد که بیانگر شرایط حصول جریان ماندگار است (Šimůnek et al. 1999). در این پژوهش در هر مکش، میزان نفوذ در بازه‌های زمانی ۱۶ تا ۲۰ دقیقه اندازه‌گیری شد که مبنا حصول شدت نفوذ ماندگار در هر مکش اعمال‌شده بود.

با استفاده از روش تحلیلی وودینگ، داده‌های نفوذ برداشت‌شده با دستگاه نفوذسنج مکشی تجزیه و تحلیل شدند (Wooding, 1968). به‌منظور محاسبه شدت جریان ماندگار (q) داده‌های نفوذ تجمعی (برحسب سانتی‌متر) در برابر زمان (برحسب ساعت) و برای محاسبه ضریب جذب آب (S) داده‌های نفوذ تجمعی (برحسب سانتی‌متر) در برابر جذر زمان (برحسب جذر ساعت) ترسیم شدند. سپس با کمینه‌نمودن مربعات خطا بین مقادیر شدت جریان ماندگار اندازه‌گیری‌شده ($q_{measured}$) و برآوردشده ($q_{predicted}$) با استفاده از ابزار Excel Solver، معادلات وودینگ و گاردنر برازش داده شد و مقادیر بهینه K_s و λ_c برآورد گردید (Hussen and Warrick 1993).

از رابطه فیلیپ (معادله ۱) برای برازش بر داده‌های نفوذ در برابر جذر زمان در زمان‌های کوتاه ابتدای آزمایش استفاده شد (Hussen and Warrick 1995):

$$I=St^{0.5} \qquad (۱)$$

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

که در این معادله I نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)، S جذب‌پذیری خاک (سانتی‌متر بر جذر ساعت) و t زمان بر حسب ساعت است.

همچنین وودینگ برای محاسبه شدت جریان ماندگار (q) در زمان‌های طولانی معادله ۲ را ارائه نمود (Wooding 1968):

$$q = K_{\text{wet}}\left[1+\frac{4\lambda_c}{\pi r_0}\right] \qquad (۲)$$

که در این رابطه q شدت جریان ماندگار (سانتی‌متر بر ساعت)، K_{wet} هدایت هیدرولیکی نظیر مکش ماتریک (h_{wet}) اعمال‌شده (سانتی‌متر بر ساعت)، λ_c طول درشت مویینه (سانتی‌متر) و r_0 شعاع صفحه متخلخل (دیسک) نفوذسنج (سانتی‌متر) است.

به‌منظور برآورد میزان ضریب جذب آب یا $S(h)$ نیز بر اساس معادله فیلیپ (۱)، در بازه زمانی ابتدای آزمایش (۴۰ تا ۱۸۰ ثانیه) در هر مکش به صورت جداگانه مقادیر I در برابر $t^{0.5}$ ترسیم شده و شیب منحنی به‌عنوان $S(h)$ در مکش ماتریک مورد بررسی (سانتی‌متر بر جذر ساعت) در نظر گرفته شد (Hussen and Warrick 1993).

هدایت هیدرولیکی در مکش‌های ماتریک مختلف نیز براساس مدل گاردنر (معادله ۳) محاسبه شد (Gardner, 1956):

$$K(h) = K_{\text{S}}\exp(-\frac{h}{\lambda_c}) \qquad (۳)$$

که در این معادله، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع (سانتی‌متر بر ساعت) در مکش ماتریک (h) مورد نظر (سانتی‌متر)، و K_s نیز هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت) است.

با در نظر گرفتن معادله گاردنر (۳) و جاگذاری پارامترها، مقادیر λ_c به‌عنوان تخمین اولیه بهینه‌سازی برای هر دو مکش متوالی اعمال‌شده با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد (Hussen and Warrick 1995):

$$\lambda_c = \frac{|h_2 - h_1|}{|\ln q_2 - \ln q_1|} \qquad (۴)$$

تجزیه آماری

در این پژوهش از طرح کرت‌های خردشده در زمان در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه سطح بیوچار (۰، ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار) و دو گونه آویشن (*T. daenensis* و *T. migricus*) برای دو سال متوالی (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹) با سه تکرار (با احتساب هر کرت به‌عنوان یک تکرار در طرح آزمایشی و تهیه نمونه خاک دست‌خورده ترکیبی از نقاط مختلف آن کرت) و از نرم‌افزار آماری SAS v. 9.2 برای تجزیه آماری داده‌ها استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

بر اساس داده‌های سه سال مرتبط با کشت ایستگاه سینوپتیکی همند، میانگین بارش در سال‌های ۱۳۹۷ (منتهی به سال نخست کشت)، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ به‌ترتیب برابر ۶۰۲، ۴۳۹ و ۴۷۹ میلی‌متر بود. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه و بیوچار تولیدشده به‌ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. خاک مکان آزمایش دارای بافت لوم رسی سیلتی با کربن آلی کم بود. خاک مورد بررسی از نظر pH و EC دارای واکنش نزدیک به خنثی و شرایط غیرشور بود (جدول ۱).

بیوچار تولیدشده غیرشور و از نظر pH خنثی و غنی از کربن آلی با محتوای نیتروژن کم بود، و همچنین CEC و BD نسبتاً زیاد از ویژگی‌های آن بود (جدول ۲). بنابراین انتظار می‌رود به‌دلیل نسبت C/N زیاد آن، پایداری بیوچار مذکور زیاد (و تجزیه‌پذیری کم) باشد. همچنین فعالیت فیزیکی و شیمیایی بیوچار به‌دلیل CEC زیاد آن می‌تواند قابل توجه باشد (جدول ۲).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در تیمارهای آزمایشی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد مقدار بیوچار کاربردی (۰، ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار) و سال (سال‌های اول و دوم) اثر معنادار بر تمامی ویژگی‌های خاک مورد بررسی شامل چگالی ظاهری (BD)، تخلخل (P)، رسانایی الکتریکی (EC)، کربن آلی کل، نیتروژن کل (TN)، نسبت کربن به نیتروژن (C/N) و pH داشتند. همچنین اثر سال بر کلیه ویژگی‌ها در سطح احتمال ۵ درصد معنادار بود. اثر برهمکنش سال × بیوچار بر هیچکدام از

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مکان آزمایش

Table 1. Soil physical and chemical properties of the soil in the study location

OC	CCE	BD	pH_e	EC_e	شن (Sand)	سیلت (Silt)	رس (Clay)	کلاس بافت (Textural class)
g kg^{-1}	g kg^{-1}	Mg m^{-3}		dS m^{-1}		g kg^{-1}		
3.86	369	1.49	7.26	0.51	100	568	332	لوم رسی سیلتی Silty clay loam

BD، OC، CCE، EC_e و pH_e به‌ترتیب بیان‌گر چگالی ظاهری، کربن آلی کل، کربنات کلسیم معادل، و رسانایی الکتریکی و واکنش عصاره اشباع خاک است.

BD, OC, CCE, EC_e and pH_e represent soil bulk density, organic carbon, calcium carbonate equivalent, and the electrical conductivity and reaction of the soil saturation extract, respectively.

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار مورد استفاده

Table 2. Physical and chemical properties of the studied biochar

BD	CEC	C/N	TN	OC	$EC_{(1:10)}$	$pH_{(1:10)}$
(Mg m^{-3})	(cmol$_c$ kg^{-1})		(g kg^{-1})	(g kg^{-1})	(dS m^{-1})	
0.81	121.7	68.5	1.8	123.3	1.38	7.3

BD، OC، TN، CEC، C/N، $EC_{(1:10)}$ و $pH_{(1:10)}$ به‌ترتیب بیان‌گر چگالی ظاهری، کربن آلی، نیتروژن کل، گنجایش تبادل کاتیونی، نسبت کربن به نیتروژن، و رسانایی الکتریکی و واکنش عصاره ۱:۱۰ آب: بیوچار است.

BD, OC, TN, CEC, C/N, $EC_{(1:10)}$ and $pH_{(1:10)}$ represent bulk density, organic carbon, total nitrogen, cation exchange capacity, carbon-to-nitrogen ratio, and the electrical conductivity and reaction of the 1:10 water-to-biochar extract, respectively.

نسخه پیش از انتشار

ویژگی‌ها (بجز تخلخل خاک) معنادار نبود. تأثیر گونه آویشن بر ویژگی‌های ذکرشده از نظر آماری معنادار نبود. این نتیجه ممکن است ناشی از مکان اندازه‌گیری با نفوذسنج مکشی باشد؛ چرا که قرارگیری صفحه دستگاه در فواصل بین ردیف‌های کشت، مانع از ثبت آثار مستقیم سیستم ریشه‌ای بر فرآیند نفوذ می‌شود (جدول ۳).

چگالی ظاهری (BD)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد BD تحت تاثیر دو فاکتور میزان مصرف بیوچار و زمان قرار گرفت. با مصرف بیوچار به‌میزان ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار، BD به‌ترتیب ۵/۸ و ۱۱/۶ درصد نسبت به شاهد کاهش معنادار داشت. همچنین مقدار این شاخص در سال دوم در مقایسه با سال نخست ۲ درصد کاهش یافت. نتایج آماری نشان داد بیشترین مقدار BD (۱/۶۳ Mg m^{-3}) متعلق به تیمار ۶۰ تن در هکتار مربوط به سال دوم و کمترین مقدار آن مربوط به تیمار شاهد از سال اول (۱/۲۲ Mg m^{-3}) بود. در پژوهشی مشابه کاربرد بیوچار طی یک دوره ۵۰ روزه به میزان ۶/۲۵، ۱۲/۵ و ۲۵ تن در هکتار به‌ترتیب منجر به کاهش ۳۳، ۵۹ و ۶۳ درصدی در BD خاک شد. همچنین در پژوهشی که توسط Adekiya et al. (2020) بر روی خاک‌های لوم شنی انجام شد، کاربرد بیوچار به‌میزان ۳۰ تن در هکتار در مقایسه با شاهد (بدون بیوچار)، پس از گذشت یک دوره زمانی (در پایان سال دوم)، منجر به کاهش BD به میزان ۱۲ درصد شد. با توجه به نتایج تجزیه واریانس و افزایش OC و TN خاک در اثر کاربرد بیوچار و نیز اثر گذشت زمان، می‌توان نتیجه گرفت تاثیر بیوچار و گذشت زمان منجر به افزایش ماده آلی خاک و به‌دنبال آن توسعه منافذ و کاهش BD خاک شده است.

تخلخل (P)

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد تاثیر بیوچار بر افزایش تخلخل

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) آثار تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 3. Analysis of variance (mean squares) of the effects of experimental treatments on soil physical and chemical properties

C/N	TN	OC	pH_e	EC_e	P	BD	df	منابع تغییر (Sources of variation)
11.2862**	0.0043**	3.3379**	0.009*	0.0046**	1.681**	0.0038ns	1	سال (Year)
2.5676	0.0006	0.0450	0.2331	0.0026	0.7092	0.0067	4	خطای اصلی (تکرار × سال) Error a (Rep × Year)
0.3885ns	0.0006ns	0.0538ns	0.0002ns	0.0003ns	0.96ns	0.0011ns	1	گونه (Species)
14.5984**	0.0089**	1.1334**	0.0044*	0.0014**	59.1633**	0.0039**	2	بیوچار (Biochar)
2.7888ns	0.0002ns	0.2283ns	0.0022ns	0.0002ns	0.4572ns	0.0001ns	2	گونه × بیوچار (Biochar × Species)
0.6575ns	0.000005ns	0.03113ns	0.0010ns	0.000008ns	0.7701ns	0.0001ns	1	سال × گونه (Year × Species)
12.0750*	0.0004ns	0.5557*	0.0006ns	0.00005ns	0.5151ns	0.0035**	2	سال × بیوچار (Biochar × Year)
2.5716	0.0004	0.1407	0.0184	0.0008	0.7323	0.0002	20	خطا باقی‌مانده Error b

BD، P، EC_e، pH_e، OC، TN و C/N به‌ترتیب بیانگر چگالی ظاهری، تخلخل، رسانایی الکتریکی و واکنش عصاره اشباع خاک، کربن آلی کل، نیتروژن کل و نسبت کربن به نیتروژن خاک است. ** و *: به‌ترتیب بیانگر اثر معنادار در سطوح احتمال یک و پنج درصد. ns: نبود اثر معنادار

BD, P, EC_e and pH_e, OC, TN and C/N represent soil bulk density, porosity, electrical conductivity and reaction of the soil saturation extract, organic carbon, total nitrogen, and carbon-to-nitrogen ratio, respectively. ** and *: Significant effects at the 1 and 5% probability levels, respectively. ns: Non-significant effect.

(P) در دو تیمار ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار به‌ترتیب موجب افزایش ۹/۱ و ۲۱/۹ درصدی نسبت به شاهد در تخلخل خاک شد. نتایج نشان داد تاثیر گذشت زمان منجر به افزایش ۴/۵ درصدی در تخلخل خاک شد. بر طبق نتایج آماری بیشترین مقدار این شاخص متعلق به تیمار ۶۰ تن در هکتار مربوط به سال دوم (۴۵/۷ درصد) و کمترین مقدار آن مربوط به تیمار شاهد از سال اول (۴۱ درصد) بود (جدول ۴). با کاربرد بیوچار، افزایش در محتوای ماده آلی خاک از یکسو موجب افزایش تخلخل و از سوی دیگر منجر به کاهش چگالی ظاهری خاک می‌شود (Busscher et al., 2011)، همچنین بیوچار با کاهش درجه تراکم خاک منجر به افزایش تخلخل و کاهش چگالی ظاهری خاک می‌شود(Lim et al., 2016). در مقایسه با نتایج پژوهش‌های مشابه می‌توان گفت در اثر برهمکنش بیوچار با ذرات معدنی خاک، فرآیند خاکدانه‌سازی و کاهش BD خاک تقویت می‌شود (Blanco-Canqui et al., 2017). در پژوهشی مشابه، Burrell et al. (2016) گزارش کردند کاربرد بیوچار در میان‌مدت (سه سال) در سه رده مختلف خاک (Chernozem، Planosol و Cambisol) منجر به کاهش ۳/۹ تا ۵/۱ درصدی BD رده‌های Planosol و Chernozem شد اما در رده Cambisol استفاده از بیوچار منجر به افزایش BD خاک شد (Burrell et al., 2016).

pH

به‌دلیل وجود کربنات‌ها در خاک مورد بررسی که سبب ایجاد خاصیت بافری در آن می‌شود، تغییرات pH خاک در تیمارهای

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر بیوچار و سال و برهمکنش آن‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 4. Mean comparison of the effects of biochar and year, and their interaction on soil physical and chemical

C/N	TN (g kg^{-1})	OC (g kg^{-1})	EC_e (dS m^{-1})	pH_e	P (٪v/v)	BD (Mg m^{-3})	سال/بیوچار (Year/Biochar)		تیمارها /properties (Treatments)
13.8a	0.25b	4.44b	0.47b	7.29b	44.9a	1.47a	اول		Year
14.6a	0.33a	4.66a	0.54a	7.38a	46.9a	1.44b	دوم		
15.6a	0.23b	3.81a	0.47b	7.27b	41.6c	1.55a	0		Biochar (ton ha^{-1})
12.6b	0.32a	4.04a	0.51b	7.32ab	45.4b	1.46b	30		
13.4b	0.33a	4.31a	0.53a	7.41a	50.7a	1.37c	60		
16.8a	0.20c	3.02e	0.34a	7.25b	41.6c	1.63a	0	اول	Year × Biochar
13.0bc	0.26b	3.39de	0.41a	7.29ab	42.2c	1.48b	30		
14.1b	0.28b	3.90cd	0.57a	7.34ab	43.1bc	1.30c	60		
15.4a	0.29b	4.37bc	0.36a	7.36ab	44.2b	1.47a	0	دوم	
12.2c	0.36a	4.69ab	0.43a	7.39a	45.0ab	1.44ab	30		
12.7c	0.37a	4.96a	0.59a	7.42a	45.7a	1.22c	60		

BD، P، EC_e، pH_e، OC، TN و C/N به‌ترتیب بیانگر چگالی ظاهری، تخلخل، رسانایی الکتریکی، واکنش، کربن آلی کل، نیتروژن کل و نسبت کربن به نیتروژن خاک است. در هر ستون و هر گروه، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

BD, P, EC_e and pH_e, OC, TN and C/N represent soil bulk density, porosity, electrical conductivity and reaction of the soil saturation extract, organic carbon, total nitrogen, and carbon-to-nitrogen ratio, respectively. In each column and each group, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

آزمایشی اندک بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد تاثیر بیوچار و سال بر pH خاک معنادار بود(جدول ۳). بر اساس نتایج مقایسه میانگین تاثیر سال بر pH خاک معنادار بود و در سال دوم نسبت به سال اول از افزایش ۱/۲ درصدی برخوردار بود. همچنین کاربرد بیوچار به‌طور معناداری موجب افزایش pH شد. این افزایش در تیمارهای ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار، به‌ترتیب، معادل ۷/۰ و ۹/۱ درصد بود (جدول ۴). اما نتایج تجزیه واریانس نشان داد آثار برهمکنش فاکتورهای مد نظر تاثیر معناداری بر pH نداشت(جدول ۳). نتایج پژوهشی مشابه نشان داد کاربرد ۲ و ۴ درصد بیوچار به‌ترتیب منجر به افزایش ۱۳ و ۱۳ درصدی در pHخاک شد (Toorajzadeh et al., 2024). بیوچار به‌دلیل داشتن عناصر قلیایی مانند کلسیم و منیزیم دارای pH خنثی تا قلیایی است. بیوچار بسته به منشاء ماده آلی و شرایط گرماکافت آن از ۴ تا ۱۲ متغیر است. بیوچارهای با منشأ چوبی نسبت به بیوچارهای علفی pH کم‌تری دارند. بیوچارهای علفی به‌دلیل داشتن عناصر قلیایی مانند سدیم و پتاسیم بیش‌تر دارای pH بیش‌تری هستند (Singh et al., 2010). همچنین در پژوهشی نشان داده شد با افزودن بیوچار تولیدشده از بقایای ذرت به خاک اسیدی، pH خاک افزایش یافت (Chintala et al., 2013). پژوهشگران دیگر نیز نشان دادند با کاربرد بیوچار کود مرغی افزایش معناداری درpH ، EC، ماده آلی، پتاسیم و فسفر قابل دسترس خاک ایجاد شد (Zolfi Bavariani et al., 2015). در پژوهش مشابهی، پس از افزودن بیوچار چوب درخت به خاک رسی، pH خاک یک واحد افزایش یافت. آن‌ها این تغییر را به مقدار زیاد ترکیبات قلیایی در بیوچار چوب، pH زیاد بیوچار و عوامل مهم آهکی که در افزایش pH خاک نقش دارند، نسبت می‌دهند (Levesque et al., 2021). نتایج پژوهشی در شرایط دیم نشان داد تیمار بیوچار (۳۶ تن در هکتار) منجر به بیشترین pH

خاک در مقایسه با سایر تیمارها شد. در مقابل، pH خاک در تیمارهای ۴ و ۱۲ تن در هکتار بیوچار به طور قابل توجهی کمتر از تیمار ۳۶ تن در هکتار بیوچار بود (Khan et al., 2021).

رسانایی الکتریکی (EC)

به‌طورکلی EC خاک در تیمارهای آزمایشی از مقادیر کمی برخوردار بود که نشان‌دهنده شرایط مناسب خاک مورد بررسی بوده و در اثر کاربرد بیوچار محدودیت شوری در خاک برای رشد گیاه ایجاد نشده است. نتایج مقایسه میانگین نشان داد کاربرد ۳۰ و ۶۰ تن بیوچار در هکتار به‌ترتیب موجب افزایش ۸/۵ و ۱۲/۸ درصدی در EC نسبت به شاهد شد. همچنین گذر زمان منجر به افزایش ۱۴/۹ درصدی EC خاک در سال دوم نسبت به سال اول شد. نتایج آماری نشان داد بیشینه این شاخص متعلق به تیمار ۶۰ تن درهکتار از سال دوم ($59\ dsm^{-1}$) و کمینه آن مربوط به تیمار شاهد از سال نخست کشت ($34\ dsm^{-1}$) بود(جدول ۴). پژوهش‌های پیشین نشان دادند بیوچار دارای یون‌هایی مانند پتاسیم، کلسیم و منیزیم است که با افزودن به خاک، یون‌های محلول خاک را افزایش می‌دهد (Najafi et al., 2018). در پژوهشی مشخص شد افزایش EC خاک در اثر کاربرد بیوچار به‌دلیل شوری زیاد بیوچار در مقایسه با خاک است (Chintala et al., 2013). همچنین گزارش شده است افزودن بیوچار موجب افزایش EC خاک می‌شود و دلیل آن را توانایی بیوچار در نگهداری یون‌ها به‌دلیل بارهای الکتریکی و سطح ویژه زیاد بیان شده است (Ghorbani and Amirahmadi, 2018). در پژوهش دیگری مشاهده شد کاربرد بیوچار باگاس نیشکر سبب افزایش EC خاک شد. آنان دلیل این یافته را حضور نمک‌های محلول در بیوچار و EC بسیار بیش‌تر آن در مقایسه با EC خاک دانستند (Divband Hafshejani et al., 2015). در پژوهشی مشابه که با هدف بررسی تأثیر باقی‌مانده مالچ کاه و اصلاح‌کننده‌های بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و کشت ذرت (*Zea mays* L.) در شرایط دیم انجام شد، مشاهده شد با افزایش میزان بیوچار به‌کاررفته (۰، ۴، ۱۲و ۳۶ تن در هکتار)، EC خاک نسبت به شاهد افزایش یافت اما سال دوم نسبت به سال اول تغییر معناداری در میزان شوری خاک مشاهده نشد (Khan et al., 2021).

کربن آلی خاک (OC)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد OC به طور معناداری تحت تاثیر مقدار بیوچار و سال قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد کاربرد بیوچار به‌میزان ۶۰ تن در هکتار در مقایسه با سطح ۳۰ تن در هکتار و شاهد از افزایش معناداری برخوردار بود. کاربرد بیوچار ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار سبب افزایش نسبی ۶ و ۱۳ درصدی در OC نسبت به شاهد شد. بر اساس داده‌های مستخرج از نتایج آماری بیشترین مقدار در تیمار ۶۰ تن در هکتار مربوط به سال دوم ($4/96\ g\ kg^{-1}$) و کمترین مقدار آن مربوط به تیمار شاهد از سال اول ($3/02\ g\ kg^{-1}$) بود (جدول ۴). این افزایش از یک‌سو مربوط به افزایش کربن آلی خاک به‌دلیل افزودن مستقیم بیوچار و از سویی دیگر مربوط به تاثیر بیوچار در بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک برای فعالیت بیشتر گیاهان و ریزجانداران می‌تواند باشد. تاثیر گذشت زمان نیز بر افزایش نسبی مقدار OC به‌طور معنادار و به میزان حدود ۵ درصد بود (جدول ۲). مشاهده شده است افزودن بیوچار موجب افزایش مقدار کربن آلی خاک به‌دلیل تحریک تجزیه میکروبی یا از راه حفظ کربن آلی خاک می‌شود (Al-Wabel et al., 2015). در پژوهشی مشابه در شرایط مزرعه‌ای با طول دوره ۱ تا ۱۰ سال، کاربرد بیوچار به‌طور میانگین منجر به افزایش ۲۹ درصد در ذخیره کربن آلی خاک نسبت به تیمار شاهد شد. این افزایش به‌دلیل پایداری زیاد کربن موجود در بیوچار و همچنین اثر پرایمینگ منفی است که باعث می‌شود تجزیه ماده آلی خاک نیز کاهش یابد (Gross et al., 2021). همچنین در پژوهشی با کاربرد بیوچار در دو سال متوالی در کشت دیم، تأثیر باقی‌مانده مالچ کاه و اصلاح‌کننده‌های بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و کشت ذرت (*Zea mays* L.) در شرایط دیم بررسی شد. نتایج نشان داد مالچ کاه و بیوچار اثر معناداری بر مقدار OC

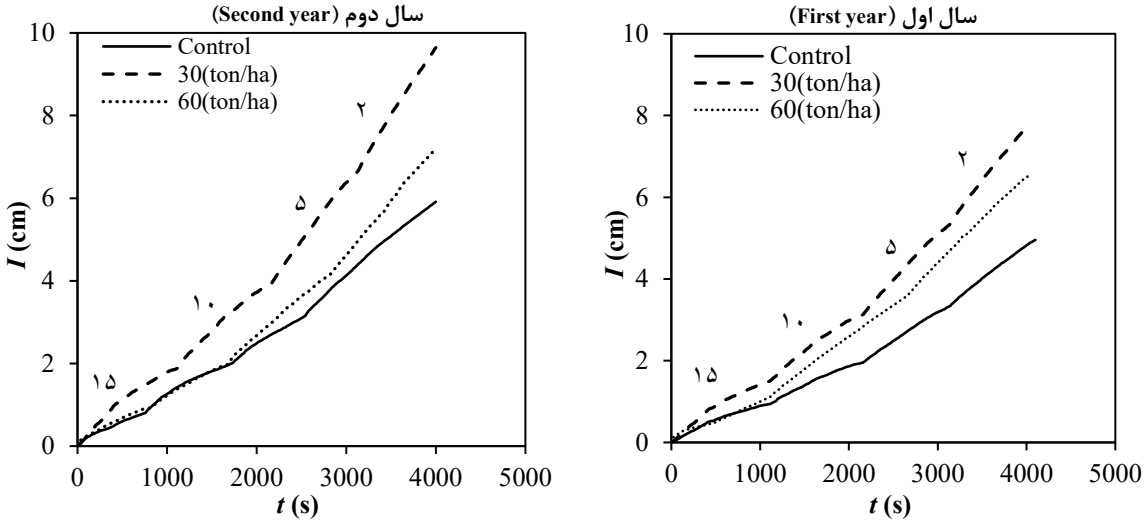
داشتند. بیشترین مقادیر OC ریزوسفر، در تیمار بیوچار (سال ۲۰۱۸) به میزان ۳۶ تن در هکتار در مرحله گل‌دهی، و تیمار بیوچار به میزان ۱۲ تن در هکتار در مرحله رسیدگی دانه مشاهده شد به‌طوری که به‌ترتیب به میزان ۲۴ و ۱۷/۵ درصد نسبت به شاهد افزایش یافتند. همچنین در سال ۲۰۱۹، بیشترین مقادیر OC در بیوچار ۱۲ تن در هکتار در هر دو مرحله گل‌دهی و رسیدگی مشاهده شد که به‌ترتیب به میزان ۲۰/۸ و ۱۸/۵ درصد نسبت به شاهد افزایش داشتند (Khan et al., 2021).

نیتروژن کل خاک (TN)

مقدار نیتروژن کل خاک (TN) به‌طور معناداری تحت تاثیر آثار اصلی تیمارها قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مقدار TN در تیمارهای ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار به‌ترتیب به میزان ۳۹ و ۴۳ درصد نسبت به شاهد افزایش معنادار داشت. همچنین اثر سال منجر به افزایش ۳۲ درصدی در TN شد (جدول ۴). با توجه به اینکه در این پژوهش از ماده اصلاح‌کننده دیگری استفاده نشد، به نظر می‌رسد افزایش TN در تیمارهای مورد بررسی با کاربرد بیوچار مرتبط باشد. این افزایش می‌تواند تا حدی ناشی از نیتروژن موجود در بیوچار باشد. Hasanpour et al (۲۰۲۱) نیز در پژوهشی درباره تأثیر بیوچار بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و فراهمی عناصر غذایی خاک در منطقه اصفهان گزارش کردند که نیتروژن بیوچار وارد خاک می‌شود و موجب افزایش TN می‌گردد. همچنین، گزارش شده است که افزودن بیوچار چمن به خاک‌هایی با بافت شنی و لوم رسی، به آزادشدن نیتروژن و افزایش TN می‌انجامد (Mukherjee et al., 2013). در پژوهشی دیگر با کاربرد مقادیر ۲، ۵ و ۱۰ گرم بیوچار باگاس نیشکر در کیلوگرم خاک شنی، درصد افزایش TN نسبت به شاهد به‌ترتیب ۶/۹۶، ۲۱/۷ و ۳۱/۳ درصد گزارش شد (Divband Hafshejani et al., 2015).

نسبت C/N خاک

نتایج مقایسه میانگین نشان داد با کاربرد بیوچار کاهش معناداری در نسبت C/N خاک مشاهده شد. مقایسه میانگین نشان داد سطح کاربرد بیوچار بر شاخص C/N تاثیر معنادار داشت؛ کاربرد بیوچار در هر دو سطح نسبت به شاهد تاثیر معناداری بر کاهش این شاخص داشت اما تفاوتی معنادار بین دو سطح مشاهده نشد(جدول ۳). کاربرد بیوچار در سطوح ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار به‌ترتیب موجب کاهش ۱۹/۲ و ۱۴/۱ درصدی در نسبت C/N شد. از سوی دیگر اثر گذشت زمان نیز بر نسبت C/N معنادار شد؛ با گذشت زمان در سال دوم نسبت به سال اول افزایش ۵/۸ درصدی در این شاخص رخ داد. بر اساس نتایج آماری کمینه این شاخص متعلق به سال دوم از تیمار ۳۰ تن در هکتار (۱۲/۲) و بیشینه آن مربوط به سال اول از تیمار شاهد (۱۶/۸) بود (جدول ۴). بر اساس داده‌های موجود ، کاهش این شاخص در تیمارهای بیوچار نسبت به شاهد، بیانگر بهبود نسبی وضعیت نیتروژنی و احتمالاً افزایش سرعت گردش عناصر غذایی در خاک است. از سوی دیگر، اثر گذشت زمان نیز بر نسبت C/N را می‌توان به تجزیه تدریجی بخش‌های قابل‌تجزیه بیوچار، آزادشدن و مصرف نیتروژن، و نیز تغییرات تدریجی در تعادل کربن و نیتروژن خاک نسبت داد. Biederman et al. (2013) با بررسی اثر بیوچار بر عملکرد گیاهان و چرخه عناصر غذایی، مشاهده کردند که نسبت C/N بیوچار تأثیر قابل‌توجهی بر باروری خاک ندارد، اما بیوچار منجر به افزایش TN خاک می‌شود. این پدیده اغلب به‌دلیل نیتروژن موجود در ساختار بیوچار است که در نهایت دسترسی گیاهان و ریزجانداران به آن را محدود می‌کند (Biederman et al., 2013). این یافته‌ها با یافته‌های دیگر پژوهشگران نیز هماهنگی دارد، که نشان می‌دهد نسبت C/N در بیوچار محدودیتی در فراهمی نیتروژن خاک ایجاد نمی‌کند. تأثیر بیوچار بر جذب نیتروژن و سایر عناصر غذایی نیز قابل‌توجه بود، به‌طوری‌که بیوچار می‌تواند مولکول‌های آلی با نسبت C/N را تولید کرده و سبب افزایش معدنی‌سازی شود. این امر ممکن است به کاهش نیتروژن خاک در اثر افزودن بیوچار منجر شود (Gundale et al., 2007).



شکل ۳. داده‌های نفوذ تجمعی (I) در برابر زمان (t) در مکش‌های ماتریک ۱۵، ۱۰، ۵ و ۲ سانتی‌متر در تیمارهای مختلف بیوچار (۰، ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار) در دو سال متوالی.

Fig. 3. Cumulative infiltration data (I) versus time (t) at matric suctions of 15, 10, 5 and 2 cm in different biochar treatments (0, 30 and 60 tons/ha) and two consecutive years.

نفوذ آب و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در تیمارهای آزمایشی

نفوذ تجمعی آب به خاک

مقادیر نفوذ تجمعی آب در برابر زمان در مکش‌های مختلف مرز ورودی در شکل ۳ ارائه شده است. در اولین مکش مرز ورودی (۱۵ سانتی‌متر)، نفوذ آب به خاک متاثر از منافذ کوچک و نیروهای ماتریک خاک است. با کاهش مکش مرز ورودی، سهم منافذ متوسط و درشت افزایش یافته و شدت نفوذ آب به خاک افزایش می‌یابد. تفاوت منحنی‌ها در هر سال بیشتر به‌دلیل تاثیر بیوچار (به‌ویژه مقدار ۳۰ تن در هکتار) در افزایش جذب‌پذیری و نقش منافذ درشت با کاهش مکش مرز ورودی در محدوده ۱۵ تا ۲ سانتی‌متر در فرآیند نفوذ مرتبط باشد. همچنین میزان نفوذ تجمعی در کل مدت آزمایش برای شاهد، و تیمارهای ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار در سال اول نسبت به سال دوم به‌ترتیب به میزان ۲۳، ۱۱ و ۲۰ درصد افزایش یافت (شکل ۳). Kelishadi et al. (2014) با بررسی شاخص‌های نفوذ و پارامترهای هیدرولیکی در خاک‌های مرتعی و دیم نشان دادند بیشترین تغییر جذب‌پذیری (S) در محدوده مکش ماتریک مورد آزمایش در کاربری دیم به‌دلیل ایجاد منافذ ناهمگن در اثر خاک‌ورزی مشاهده شد. در حالی که کمترین تغییر S در همان دامنه مکش ماتریک در کاربری مرتع به‌دلیل فشردگی خاک در اثر چرای دام ثبت شد که احتمالاً منافذ درشت را به منافذ ریز تبدیل نموده و سبب توزیع اندازه منافذ یکنواخت‌تر خاک شده است (Kelishadi et al., 2014). با توجه به ممنوعیت چرای دام در عرصه مورد بررسی در پژوهش حاضر به نظر می‌رسد اثر مثبت تیمارهای بیوچار (به‌ویژه تیمار ۳۰ تن در هکتار) به‌دلیل تاثیر بیوچار بر توزیع اندازه منافذ خاک بوده که در سال دوم از شدت بیشتری برخوردار بود.

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)

تأثیر گونه آویشن بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نیز از نظر آماری معنادار نبود (جدول ۵). به نظر می‌رسد اندازه‌گیری با نفوذسنج مکشی در حدفاصل ردیف‌های کشت و نیز گسترش ناکافی ریشه‌های دو گونه آویشن در سال‌های اول و دوم، از جمله دلایل این نتیجه باشد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد فاکتورهای

پیش از انتشار (اصلاح نشده)

جدول ۵. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای آزمایشی بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و طول درشت مویینه (λ_c) خاک.

Table 5. Analysis of variance (mean squares) for the effect of experimental treatments on soil saturated hydraulic conductivity (K_s) and macroscopic capillary length (λ_c)

λ_c	K_s	df	منابع تغییر (Sources of variation)
11.2862**	0.0043**	1	سال (Year)
2.5676	0.0006	4	خطای اصلی (تکرار × سال) Error a (Rep × Year)
0.3885ns	0.0006ns	1	گونه (Species)
14.5984**	0.0089**	2	بیوچار (Biochar)
2.7888ns	0.0002ns	2	گونه × بیوچار (Biochar × Species)
0.6575ns	0.000005ns	1	سال × گونه (Year × Species)
12.0750*	0.0004ns	2	سال × بیوچار (Biochar × Year)
2.5716	0.0004	20	خطا باقی‌مانده Error b

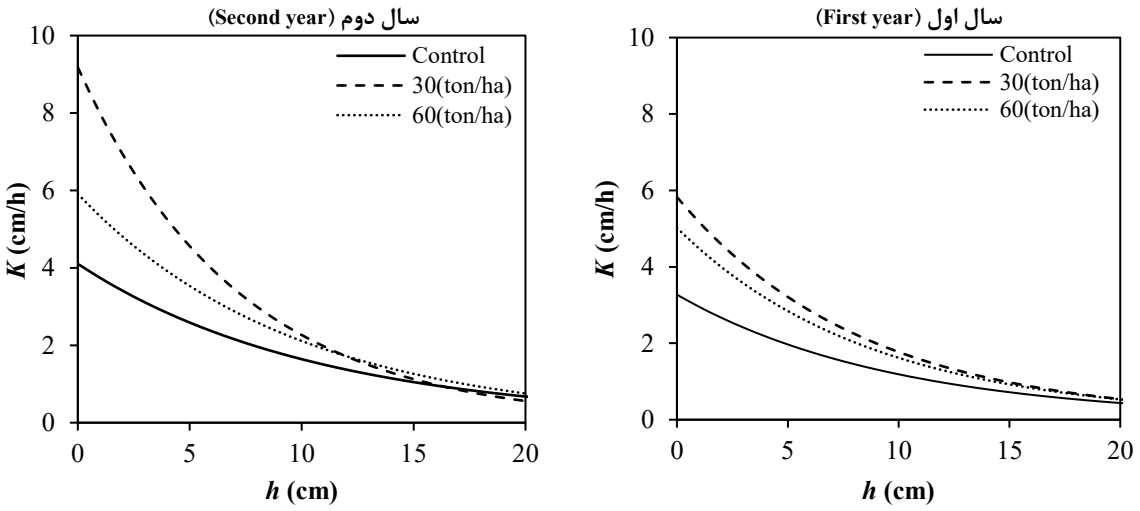
** و *: به‌ترتیب بیانگر اثر معنادار در سطوح احتمال یک و پنج درصد. ns: نبود اثر معنادار

** and *: Significant effects at the 1 and 5% probability levels. ns: no significant effect

بیوچار و سال تاثیر معنادار بر K_s داشت. همچنین اثر برهمکنش بیوچار با سال بر K_s معنادار نشد (جدول ۵). کاربرد بیوچار به میزان ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار به‌ترتیب منجر به افزایش معنادار۵۷/۹ و ۳۱/۸ درصدی در K_s نسبت به شاهد شد. همچنین این شاخص در سال دوم نسبت به سال اول از رشد ۱۷/۷ درصدی برخوردار بود (جدول ۶ و شکل ۴). نتایج مقایسه میانگین نشان داد کاربرد بیوچار سبب بهبود نفوذ آب به خاک شده و این اثر با کاهش مکش ماتریک و نزدیک‌شدن به شرایط اشباع چشم‌گیر شده است. می‌توان گفت در اثر کاربرد بیوچار، بهبود ساختمان به‌دلیل افزایش منافذ خاک منجر به کاهش BD و افزایش P خاک و در نتیجه افزایش K_s شده است (جدول ۴). در پژوهشی مشابه افزودن زغال چوب به خاک‌های شنی منجر به افزایش در K_s به‌میزان ۸۸ درصد شد (Barnes et al,2014).

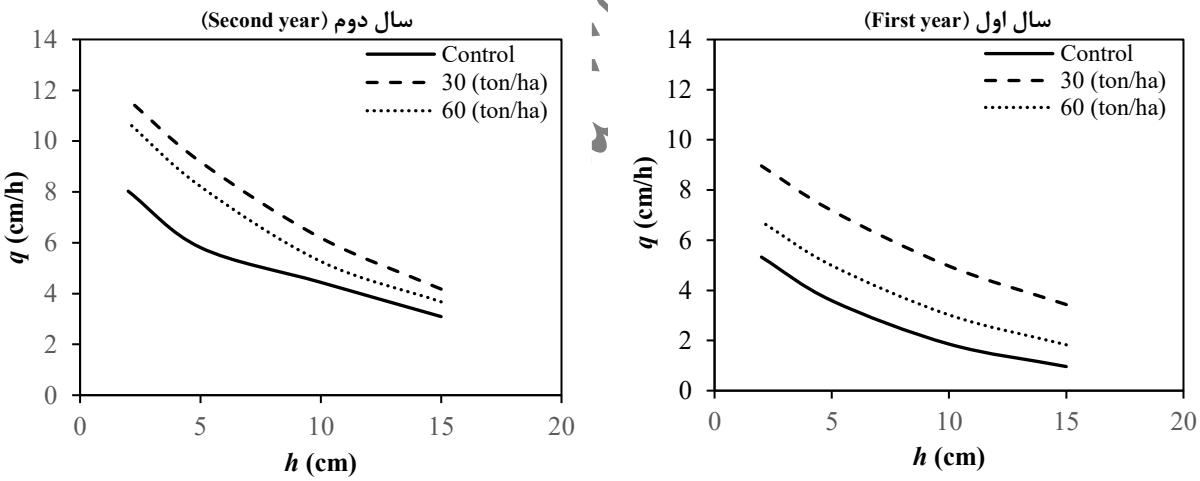
روند کاهش نسبت C/N خاک می‌تواند دلیلی بر بهبود ساختمان خاک و افزایش فراوانی منافذ خاک باشد (جداول ۳ و ۴). در پژوهشی که در همین قطعه آزمایشی درخصوص پایداری ساختمان خاک (درصد خاکدانه‌های پایدار در آب، WSA) انجام شد، کاربرد بیوچار منجر به بهبود WSA شد به‌طوری‌که بیشترین مقدار WSA (برابر ۴۵/۶ درصد) در تیمارهای ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار از سال اول و در تیمار ۳۰ تن در هکتار در سال دوم (برابر ۵۵/۷ درصد) مشاهده شد (Mansour Shahsavar et al., 2024). بنابراین می‌توان گفت کاربرد بیوچار می‌تواند منجر به بهبود ساختمان خاک و افزایش K_s شود. اثربخشی بیشتر کاربرد ۳۰ تن در هکتار بیوچار بر نفوذآبی خاک منجر به بهبود ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک شده است در حالی که کاربرد زیادتر بیوچار (۶۰ تن در هکتار) به‌دلیل انسداد منافذ درشت، منجر به افزایش

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده



شکل ۴. منحنی هدایت هیدرولیکی خاک (K) در برابر مکش ماتریک (h) در تیمارهای مختلف بیوچار (۰، ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار) در دو سال متوالی.

Fig. 4. Hydraulic conductivity (K) versus matric suction (h) curve in different biochar treatments (0, 30 and 60 tons/ha) in two consecutive years.



شکل ۵. تغییرات شدت جریان ماندگار (q) در برابر مکش ماتریک (h) در تیمارهای مختلف بیوچار (۰، ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار) در دو سال متوالی.

Fig. 5. Changes in steady-state water flow (q) versus matric suction (h) in different biochar treatments (0, 30 and 60 tons/ha) in two consecutive years.

کمتر نفوذآیی خاک در مقایسه با تیمار ۳۰ تن در هکتار شده است (شکل ۳).

شکل‌های ۴ و ۵ به‌ترتیب توابع هدایت هیدرولیکی (K) و شدت جریان ماندگار (q) در برابر مکش ماتریک (h) را در سال‌های اول و دوم تحت تاثیر تیمارهای بیوچار نشان می‌دهد. کاربرد بیوچار سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع و نزدیک اشباع و به‌دنبال آن شدت جریان ماندگار می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با کاهش مکش ماتریک، هدایت هیدرولیکی به شدت افزایش داشته و q نیز افزایش یافت که نشان‌دهنده دخالت منافذ درشت در جریان آب در خاک است. با کاربرد بیوچار این روند

جدول ۶. مقایسه میانگین آثار اصلی و برهمکنش بیوچار و سال بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و طول درشت مویینه (λ_c) خاک.

Table 6. Mean comparison for main and interaction effects of biochar and year on saturated soil hydraulic conductivity (Ks) and macroscopic capillary length (λc).

تیمارها (Treatments)	سال/بیوچار (Year/Biochar)	K_s (cm h^{-1})	λ_c (cm)
سال (Year)	اول	4.91a	11.42b
	دوم	5.78a	8.33a
بیوچار (Biochar) (Ton ha^{-1})	0	3.71c	10.47a
	30	5.86a	8.99a
	60	4.89b	10.17a
سال اول (First year)	0	4.75c	12.13a
	30	5.89ab	10.75b
	60	5.95ab	11.60ab
سال دوم (Second year)	0	5.14b	11.23a
	30	6.30a	9.72b
	60	6.40a	9.13b

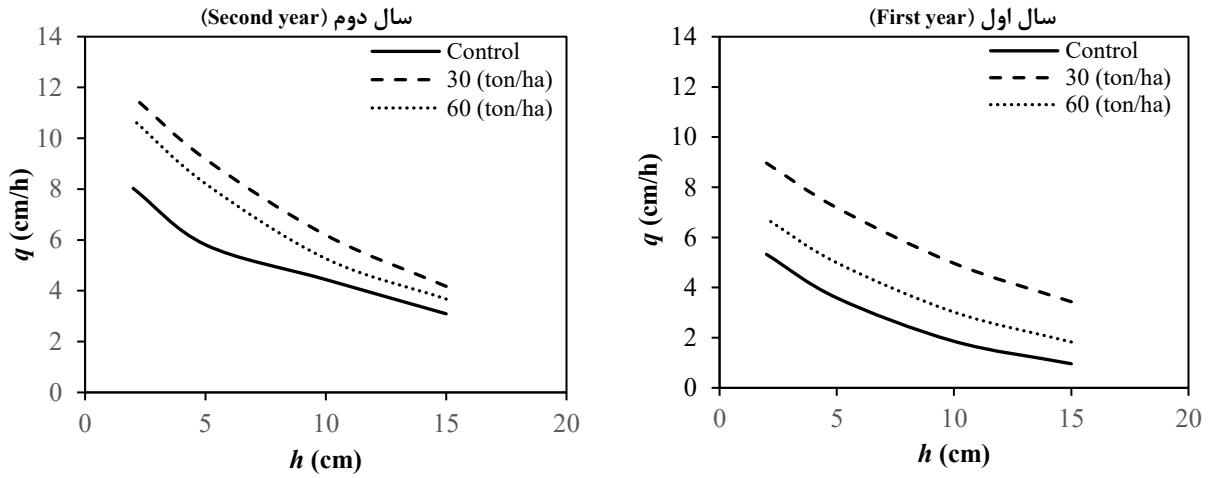
در هر ستون و هر گروه، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each column and each group, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

در تیمار ۳۰ تن در هکتار و پس از آن در تیمار ۶۰ تن در هکتار نمود شدیدتر شده است. گزارش شده است که $K(h)$ با کاهش h از ۱۵ به صفر سانتی‌متر برای زمین‌های زراعی، علفزارهای بومی و زمین‌های احیاشده به‌ترتیب به میزان ۱۰/۱، ۴۷ و ۱۳ برابر افزایش می‌یابد (Schwartz et al., 2003). Jarvis and Messing (1995) هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع را در شش خاک شخم‌خورده از شن لومی تا رس سیلتی با استفاده از نفوذسنج مکشی تعیین کرده و مشاهده کردند که تغییرات $K(h)$ در محدوده مکش ماتریک ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر در خاک‌های ریزبافت نسبت به خاک‌های درشت‌بافت ۴-۳ برابر افزایش یافت.

از سویی کاربرد بیوچار با افزایش منافذ خاک (به‌ویژه منافذ درشت) در چهار دامنه مکش ماتریک خاک منجر به بهبود هدایت هیدرولیکی خاک شد به‌گونه‌ای که در سال اول به‌ترتیب در تیمارهای ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار افزایش ۲۴ و ۲۵/۳ درصدی نسبت به شاهد مشاهده شد. این تاثیر در سال دوم به‌ترتیب با افزایش ۲۳/۶ و ۲۵/۲ درصدی نسبت به شاهد نیز ادامه یافت. نتایج نشان داد بیشینه هدایت هیدرولیکی مربوط به تیمار ۶۰ تن در هکتار از سال دوم (۶/۴ cm h^{-1}) و کمینه آن به تیمار شاهد مربوط به سال اول کشت (۴/۸ cm h^{-1}) اختصاص یافت (جدول ۶ و شکل ۴). از سویی دیگر تغییرات q با کاهش h روند افزایشی داشت و میزان آن در سال نخست در تیمار ۳۰ تن در هکتار از تفاوت محسوسی نسبت به دو تیمار دیگر برخوردار بود. در سال دوم، تیمار ۶۰ تن در هکتار تاحدی فاصله خود را با تیمار ۳۰ تن در هکتار کم کرد که می‌توان آنرا به بهبود منافذ خاک در اثر گذر زمان نسبت داد (شکل ۵). لازم به ذکر است این روند افزایشی شامل تمام دامنه مکش‌های اعمالی و برای تمام منافذ مرتبط با آن‌ها است. به نظر می‌رسد بیوچار مورد استفاده توانسته است در بهبود طیف وسیعی از منافذ ساختمانی خاک اثرگذار باشد. Abrishamkesh et al. (2020) سوسپانسیون بیوچار تهیه‌شده از ضایعات هرس درخت زبان‌گنجشک و شلتوک برنج را به خاک‌های با بافت لوم و لوم شنی حساس به فرسایش افزودند. نتایج آن‌ها نشان داد کاربرد هر دو بیوچار در خاک لوم شنی با

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده



شکل ۶. تغییرات شدت جریان ماندگار (q) در برابر مکش ماتریک (h) در تیمارهای مختلف بیوچار (۰، ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار) در دو سال متوالی.

Fig 6. Changes in steady-state water flow (q) versus matric suction (h) in different biochar treatments (0, 30 and 60 tons per hectare) in two consecutive years.

ضریب آبگذری زیاد منجر به کاهش معنادار در ضریب آبگذری آن شد؛ در حالی‌که در خاک لومی موجب افزایش ضریب آبگذری خاک شد (Abrishamkesh et al., 2020). نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد با گذشت زمان محتوای TOC و TN و نسبت C/N خاک از کاهش قابل توجهی برخوردار است این نتایج می‌تواند موید تقویت فعالیت بیولوژیک خاک با گذشت ۲ سال از آغاز کشت و همچنین دلیلی بر بهبود ساختمان و شاخص‌های هیدرولیکی خاک باشد. همچنین نتایج نشان داد عامل زمان نیز بر تاثیر آثار بیوچار بر ساختمان خاک و بهبود توزیع اندازه منافذ خاک موثر است اگرچه اثر برهمکنش بیوچار×زمان بر K_s و λ_c معنادار نشد (جدول ۵). معنادار شدن اثر بلوک بر پارامترهای فیزیکی مانند چگالی ظاهری و تخلخل نشان‌دهنده وجود تغییرپذیری مکانی در خاک مورد بررسی است (جدول ۳). از آنجایی که هدایت هیدرولیکی به شدت به چگالی و تخلخل خاک وابسته است، این ناهمگنی‌های محیطی بر هدایت هیدرولیکی نیز اثر گذاشته و باعث معنادار شدن اثر بلوک بر آن شده است (جدول ۵).

طول درشت مویینه (λ_c)

تابع $K(h)$ پیشنهادی Gardner (1958) در شکل ۲ ترسیم شده و برای مقادیر بیوچار مصرفی در دو سال متوالی مقایسه شده است. شیب تابع $K(h)$ (یعنی α) در مقیاس نیمه لگاریتمی (یعنی log K) در برابر h) برابر با عکس طول درشت مویینه (یعنی $\lambda_c = \alpha^{-1}$) است (Gardner, 1958). شاخص λ_c در واقع نشان‌دهنده میانگین اثرگذاری هندسی منافذ درشت در فرآیند هدایت هیدرولیکی خاک است. این شاخص بیانگر شدت تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک با تغییر پتانسیل ماتریک است. هرچه این پارامتر بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده سهم بیشتر نیروهای مویینه در جریان آب در خاک است.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد طول درشت مویینه (λ_c) نیز به‌طور معناداری متاثر از میزان بیوچار مصرفی و سال کشت بوده است (جدول ۵). در سال اول کاربرد بیوچار به میزان ۳۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب منجر به کاهش ۱۱/۴ و ۴/۴ درصدی در این پارامتر نسبت به شاهد شد. همچنین در سال دوم نیز این شاخص برای بیوچار ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار به‌ترتیب از کاهش ۱۳/۴ و ۱۸/۷ درصدی نسبت به شاهد برخوردار بود (جدول ۶). همچنین این شاخص در سال دوم نسبت به سال اول به‌میزان ۲۷/۱ درصد کاهش یافت. کمترین مقدار λ_c مربوط به سال دوم و تیمار ۶۰ تن

در هکتار (۹/۱۳ cm) و بیشترین آن مربوط به سال اول از تیمار شاهد (۱۲/۱۳ cm) بود (جدول ۶). کاهش λ_c در تیمارهای بیوچار، به‌ویژه در سال دوم، نشان می‌دهد که کاربرد بیوچار موجب تغییر در توزیع و پیوستگی منافذ درشت خاک شده است. این تغییر احتمالاً به‌دلیل اصلاح ساختمان خاک و افزایش تخلخل رخ داده است. تشدید این کاهش در سال دوم می‌تواند بیانگر تداوم اثر بیوچار و برهم‌کنش تدریجی آن با ذرات خاک، ریشه‌ها و فعالیت میکروبی باشد. مشاهده شده است λ_c در کشاورزی دیم در مقادیر کم h (۵–۰ سانتی‌متر) بیشتر از سایر کاربری‌ها بود که این امر نشان‌دهنده دخالت مسیرهای جریان ثقلی و منافذ درشت در خاک است (Kelishadi et al., 2014). با توجه به اینکه λ_c با درجه فشردگی و مقدار رس خاک رابطه مثبت دارد، با افزایش آن، سهم نسبی نیروهای موئینه در برابر نیروهای گرانشی در نفوذ افزایش می‌یابد (Radcliffe and Šimůnek, 2010). بنابراین انتظار می‌رود بخش عمده‌ای از سهم جریان گرانشی آب در تیمارهای ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار به جریان مکشی انتقال یابد که منجر به ذخیره بیشتر آب در خاک و افزایش گنجایش نگهداشت رطوبتی خاک شود. مشاهده می‌شود در همه موارد رابطه قوی منفی بین K_s و λ_c وجود دارد (جداول ۵ و ۶)؛ به این مفهوم که با کاهش طول درشت موئینه (افزایش اندازه منافذ و کاهش اهمیت نیروهای ماتریک)، هدایت هیدرولیکی اشباع افزایش می‌یابد که با پژوهش‌های دیگر نیز همخوانی دارد (Soares et al., 2023).

با توجه به چندساله‌بودن آویشن و توسعه عمقی و جانبی ریشه این گیاه در طی زمان به نظر می‌رسد در درازمدت نوع گونه گیاه می‌تواند از راه تاثیر بر محتوای کمّی و کیفی ماده آلی خاک، نوع و ماهیت جامعه میکروبی خاک ، تغییر در ویژگی‌های فیزیکی خاک و ایجاد جریان‌های ترجیحی، بر فرآیند نفوذ تاثیرگذار باشد. از سویی دیگر با سپری‌شدن زندگی فیزیولوژیک گیاه آویشن که معمولاً بیش از ۱۲ سال طول می‌کشد آثار حاصل از بقایای گیاه در رژیم رطوبتی خاک و ویژگی‌های هیدرولیکی آن قابل بررسی خواهد بود.

نتیجه‌گیری

۱) نتایج این پژوهش مزرعه‌ای نشان داد که با کاربرد دو سطح بیوچار چوب درخت سیب در یک خاک لوم رسی سیلتی منجر به بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله ساختمان و افزایش نفوذآیی و نگهداشت آب خاک شده است. مصرف بیوچار و گذشت زمان به‌طور معنادار موجب کاهش چگالی ظاهری (BD) و افزایش تخلخل (P) خاک شد که می‌توان آن را به افزایش ماده آلی و فعالیت زیستی خاک مرتبط دانست. مصرف ۶۰ تن در هکتار بیوچار و گذشت زمان، منجر به افزایش معنادار کربن آلی خاک (OC) شد که ناشی از افزودن مستقیم کربن پایدار و بهبود شرایط زیستی و فیزیکی خاک است. همچنین افزایش معنادار نیتروژن کل خاک (TN) در اثر کاربرد بیوچار عمدتاً به‌دلیل وجود نیتروژن در ساختار بیوچار و آزادسازی آن در خاک می‌تواند باشد. همچنین گذشت زمان سبب بهبود شاخص‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک در تیمارهای مورد بررسی شد. نتایج حاکی از برتری نسبی کاربرد بیوچار به میزان ۳۰ تن در هکتار در اغلب مولفه‌های فیزیکی (چگالی ظاهری و تخلخل) و هیدرولیکی (نفوذ تجمعی، هدایت هیدرولیکی و شدت جریان ماندگار) بود. برتری معنادار تیمار ۶۰ تن در هکتار نیز نسبت به تیمار شاهد بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی نتایج قابل اعتنا در این پژوهش بود. به‌نظر می‌رسد مصرف ۶۰ تن در هکتار بیوچار به‌دلیل انسداد منافذ قابل زهکشی خاک منجر به کاهش هدایت هیدرولیکی و نفوذ آب به خاک می‌شود.

۲) نتایج نشان داد گذشت زمان موجب اثرگذاری بهتر بیوچار بر نفوذآیی، ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک شد بنابراین آثار مثبت بیوچار بر خاک و فرایندهای آن زمان‌بر بوده و با گذشت زمان افزایش می‌یابد. مقادیر بیوچار اعمال‌شده در این پژوهش (به‌ویژه تیمار ۳۰ تن در هکتار) از نظر اقتصادی و در دسترس بودن مواد اولیه بیوچار واقع‌بینانه به نظر می‌رسند. در مقابل، پژوهش‌های بسیاری در مورد آثار بیوچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک ممکن است مزایای بیوچار را

نسخه پیش از انتشار اصلاح نشده

بیش از حد بیان کرده باشند، زیرا آنها عمدتاً از میزان زیاد بیوچار (بیش از ۳۰ تن در هکتار) استفاده کرده‌اند. برخی پژوهش‌ها (مانند Filiberto and Gaunt, 2013) نشان داده‌اند که این مقادیر کاربردی برای کشاورزان در کشت ردیفی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست.

۳) پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های میدانی بیشتری برای مشخص‌شدن تأثیر افزودن مکرر بیوچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی و ساختمان خاک‌های گرمسیری با مواد آلی کم انجام شود. به لحاظ تاثیر گذشت زمان نیز کاربرد بیوچار منجر به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی تیمارهای مورد بررسی شد. هنگام اصلاح خاک‌ها، لازم است تأثیر درازمدت بیوچار و همچنین مناسب‌ترین خوراک بیوچار برای اثربخشی بیشتر بر خاک مورد نظر مورد بررسی قرار گیرد. اثر کاربرد بیوچار شاخه‌های درخت سیب بر نفوذ آب به خاک و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک قابل توجه و معنادار بود. همچنین کاربرد ۳۰ تن در هکتار بیوچار برای بهبود شرایط خاک و گیاه در منطقه مورد بررسی پیشنهاد می‌شود که از نظر اقتصادی نیز به‌صرفه خواهد بود.

تشکر و سپاسگزاری

این پژوهش حاصل همکاری علمی و مساعدت‌های بی‌دریغ دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی و به‌ویژه گروه مهندسی علوم خاک است که بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از حمایت‌های این مجموعه اعلام می‌دارم. همچنین، از همکاری‌های ارزشمند مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، به‌ویژه بخش تحقیقات گیاهان دارویی و ایستگاه تحقیقات دیم همند آبسرد، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تضاد منافع

منابع مورد استفاده

References

1. Abrishamkesh, S., Fazeli, S.M., Ramezanpour, H., Norouzi, M., Shaabani, A., 2020. Effect of biochar suspension application on physicochemical properties of two erosion-prone. Environmental Erosion Res. January 37, 57–78, Iran. URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-561-fa.html. (In Persian with English abstract)
2. Adekiya, A.O., Agbede, T.M., Olayanju, A., Ejue, W.S., Adekanye.A, T., Adenusi, T.T., 2020. Effect of biochar on soil properties, soil loss, and cocoyam yield on a tropical sandy loam Alfisol. Sci. World J. 9391630. https://doi.org/10.1155/2020/9391630.
3. Alghamdi, A.G., Alomran, A., Ibrahim, H.M., Alkhasha, A., Alasmary, Z., 2024. Date palm waste-derived biochar for improving hydrological properties of sandy soil under saturated and unsaturated conditions. Sustainability, 16(24), 11081. https://doi.org/10.3390/su162411081.
4. Al-Wabel, M., Usman, A.R.A., El-Naggar, A.H., Aly, A.A., Ibrahim, H.M., Elmaghraby, S., Al-Omran, A., 2015. *Conocarpus* biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. Saudi J. Biol. Sci. 22(4), 503–511. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.003.
5. 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, 34. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00323-4.
6. Asai, H., K. Samson, B.M., Stephan, H., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T., Horie, T., 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. Field Crops Res. 111(1-2), 81–84. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.008.
7. Atkinson, J.C., Fitzgerald, D.J., Hipps, A.N., 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. Plant Soil 337(1), 1–18. https://doi.org/ 10.1007/s11104-010-0464-5.
8. Baiamonte, G., Crescimanno, G., Parrino, F., De Pasquale, C., 2019. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. Catena 175, 294–303. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.019.
9. Barnes, R.T., Gallagher, M.E., Masiello, C.A., Liu, Z., Dugan, B., 2014. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. PLOS One 9(9). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108340.
10. Biederman, L.A., Harpole, W.S., 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. Global Change Biol. Bioenergy 5, 202-214. https://doi.org/10.1111/gcbb.12037.

نسخه پیش از انتشار اصلاح شده

11. Blanco-Canqui, H., 2017. Biochar and soil physical properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 84, 687–711. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017.
12. Brodowski, S., Amelung, W., Haumaier, L., Zech, W., 2007. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils. Geoderma, 139(1-2), 220–228. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.02.004.
13. Burrell, L. D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., Soja, G., 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. Geoderma, 282, 96–102. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019.
14. Busscher, W., J.M., Ahmedna, M., 2011. Physical effects of organic matter amendment of a southeastern US coastal loamy sand. Soil Sci. Soc. Am. J. 176(12), 661–667. https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3182357ca9
15. Chintala, R., Schumacher, T. E., McDonald, L. M., Clay, D. E., Malo, D. D., Papiernik, S. K., Clay, S. A., Julson, J. L., 2013. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. CLEAN – Soil, Air, Water 42(5), 626–634. https://doi.org/10.1002/clen.201300089
16. Divband Hafshejani, L., Naseri, A.A., Hooshmand, A., Abassi, F., Soltani Mohammadi, A., 2015. Effect of sugarcane bagasse biochar application on chemical properties a sandy loam soil. J. Irri. Sci. Eng. 40(1), 63–72. https://doi.org/ 10.22055/jise.2017.12667.
17. Esmaeelnejad, L., Shorafa, M., Gorji, M., Mosaddeghi, S., 2017. Impacts of woody biochar particle size on porosity and hydraulic conductivity of biochar-soil mixtures: An incubation study. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 48, 14, 1710-1718. https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1383414.
18. Fakhar, A., Galgo, S.J.C., Canatoy, R.C., Rafique, M., Sarfraz, R., Ahsan Farooque, A., Israr Khan, M., 2025. Advancing modified biochar for sustainable agriculture: a comprehensive review on characterization, analysis, and soil performance. Biochar 7:8. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00397-0.
19. Filiberto, D.M., Gaunt, J.L., 2013. Practicality of biochar additions to enhance soil and crop productivity. Agriculture 3(4), 715–725. https://doi.org/10.3390/ agriculture3040715.
20. Gardner, W.R., 1958. Some steady-state solution of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Sci. 85, 228–232.
21. Gardner, W.H., Hsieh, J.C., 1956. Water velocity in unsaturated porous materials. Soil Sci. Soc. Am. J. 20(2), 157–161. https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000020005x.
22. Chintala, R., Schumacher, T.E., McDonald, L.M., Clay, D.E., Malo, D.D., Papiernik, S.K., Clay, S.A., Julson, J.L., 2013. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. CLEAN – Soil, Air, Water 42(5), 626–634. https://doi.org/10.1002/clen.201300089
23. Ghorbani, M., Amirahmadi, E., 2018. Effect of rice husk biochar on some physical characteristics of soil and corn growth in a loamy soil. J. Soil Res. 32(3), 305–318. https://doi.org/10.22092/ijsr.2018.117821.
24. Githinji, L., 2014. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. Arch. Agron. Soil Sci. 60, 457–470. https://doi. org/ 10. 1080/ 03650 340. 2013. 821698.
25. Gross, J., Bromm, S., Glaser, B., 2021. Soil organic carbon sequestration after biochar application: A global meta-analysis. Agronomy 11(12), 2474.
26. Gundale, M.J., DeLuca, T.H., 2007. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of Koeleria macrantha in the ponderosa pine/ Douglas-fire ecosystem. Biol. Fertil. Soils 43(3), 303–311. https://doi.org/10.1007/s00374-006-0106-5.
27. Hasanpour, I., Shirvani, M., Hajabbasi, M.A., Majidi, M.M., 2021. Effect of acidic biochars on some chemical properties and nutrient availabilities of calcareous soils. J. Water Soil Sci. 26(2), 39–59. https://doi.org/10.47176/jwss.26.2.43311. (In Persian with English abstract)
28. Hussen, A.A., Warrick, A.W., 1993. Alternative analysis of hydraulic data from disc tension infiltrometers. Water Resour. Res. 29(12), 4103–4108. https://doi.org/10.1029/93WR02404.
29. Igalavithana, A.D., Kwon, E.E., Vithanage, M., Rinklebe, J., Hyun Moon, D., Meers, E., Tsang, D.C.W., Ok, Y.S., 2019. Soil lead immobilization by biochars in short-term laboratory incubation studies. Environ. Intern. 127, 190–198. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.031.
30. Jačka, L., Trakal, L., Ouředníček, P., Pohořelý, M., Šípek, V., 2018. Biochar presence in soil significantly decreased saturated hydraulic conductivity due to swelling. Soil Tillage Res. 184, 181–185. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.07.018.
31. Jarvis, N.J., Messing, I., 1995. Near saturated hydraulic conductivity in soil of contrasting texture measured by tension infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J. 59, 27–34. https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900010004x.
32. Johnson A.I., 1963. A Field Method for Measurement of Infiltration. Washington, Geological Survey Water-Supply Paper 1544-F, United States Government Printing Office, 27.
33. Kelishadi, H., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., Ayoubi, S., 2014. Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. Geoderma 213: 426–434. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.008.
34. Khan, I., Chen, T., Farooq, M., Luan, C., Wu, Q., Wanning, D., Xu, S., Li-xue, W., 2021. The residual impact of straw

mulch and biochar amendments on soil physiochemical properties and yield of maize (*Zea mays* L.) under rainfed system. Agron. J. 113(2), 1102–1120. https://doi.org/10.1002/agj2.20540.
35. Levesque, V., Oelbermann, M., Ziadi, N., 2021. Biochar in temperate soils: Opportunities and challenges. Can. J. Soil Sci. 102(1), 1–26. https://doi.org/10.1139/cjss-2021-0047.
36. Lim, T., Spokas, K., Feyereisen, G., Novak, J., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. Chemosphere 142, 136–144. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.069.
37. Mansoor, S., Kour, N., Manhas, S., Zahid, S., Wani, O.A., Sharma, V., 2021. Biochar as a tool for effective management of drought and heavy metal toxicity. Chemosphere 271, 129458. https://doi.org/ 10.1016/j.chemosphere.2020.129458.
38. Mansour Shahsavar, A., Mosaddeghi, M.R., Rahimmalek, M., Gheysari, M., 2024. Interactive effects of wood biochar application and *Thymus* species on soil physical quality in irrigated farming. Soil Tillage Res. 244, 106260. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106260.
39. Mukherjee, A., Lal, R., 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. Agronomy 3(2), 313–339. https://doi.org/10.3390/agronomy3020313.
40. Najafi, G.M., Boostani, H.R., Mahmoodi, A.R., 2018. Effect of three plant species residues and their biochars on some properties and potassium status of a calcareous soil. J. Soil Res. 32(1), 25–36.
41. Novak, P., Sigua, G., Watts, D., Cantrell, K., Shumaker, P., Szogi., Johnson, M. J., Spokas, K., 2016. Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer. Chemosphere 142, 160–167. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.038.
42. Perroux, K.M., White, I., 1988. Designs for disc permeameters**.** Soil Sci. Soc. Am. J. 52(5), 1205–1215. https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200050001x.
43. Radcliffe, D.E., Šimůnek, J., 2010. Soil Physics with HYDRUS: Modeling and Applications. CRC Press Taylor & Francis Group.
44. Rockström, J., Barron, J., 2007. Water productivity in rainfed systems: overview of challenges and analysis of opportunities in water scarcity prone savannahs. Irrig. Sci. 25, 299–311. https://doi.org/10.1007/s00271-007-0062-3.
45. Schwartz, R.C., Evett, S.R., Unger, P.W., 2003. Soil hydraulic properties of cropland compared with reestablished and native grassland. Geoderma 116, 47–60. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00093-4.
46. Šimůnek, J., Wendroth, O., van Genuchten, M.T., 2009. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from laboratory tension disc infiltrometer experiments. Water Resour. Res. 35 (10), 2965–2979.
47. Šimůnek, J., Wendroth, O., van Genuchten, M.Th., 1999. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from laboratory tension disc infiltrometer experiments. Water Resour. Res. 35(10), 2965–2979. https://doi.org/10.1029/1999WR900179.
48. Singh, B., Singh, B., and Research, A.C., 2010. Characterization and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. CSIRO Publishing, 48(6–7), 516–525. https://doi.org/10.1071/SR10058.
49. Soares, M.F., Timm, L.C., Siqueira, T.M., Vasconcelos, S.R.C., Reichardt, K., 2023. Assessing the spatial variability of saturated soil hydraulic conductivity at the watershed scale using the sequential Gaussian co-simulation method. Catena 221, Part A, 106756. 10. https://doi.org/1016/j.catena.2022.106756.
50. Špongrová, K., Kechavarzi,C., Dresser, D., Matula, S., J. Godwin, R., 2009. Development of an automated tension infiltrometer for field use.Vados Zone J. 8(3)**,** 810–817. https://doi.org/10.2136/vzj2008.0135.
51. Tappar. K, Rhitti., Sillanpää, M., Rafatullah, M., 2024. Catalytic Applications of Biochar for Environmental Remediation: Sustainable Strategies Towards a Circular Economy. Am. Chem. Soc. https://doi.org/10.1021/bk-2024–1479.
52. Toorajzadeh, O., Piri, H., Naserin, A., Chari, M.M., 2024. Investigation of the effect of biochar on the physical and chemical properties of soil under quinoa cultivation under water and salinity stress conditions. Water Soil 38(1), 69–85. https://doi.org/10.22067/jsw.2024.83859.1322. (In Persian with English abstract)
53. Vandervaere, P., Peugeot, C., Vauclin, M., Angulo, J.R., Lebel, T., 1997. Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers. J. Hydrol. 188–189, 203–223. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03160-5.
54. van Genuchten, M.Th., Naveira-Cotta, C., Skaggs, T.H., Raoof, A., Ponted, E.M., 2014. The use of numerical flow and transport models in environmental analyses. In: Application of Soil Physics in Environmental Analyses, Measuring, Modelling and Data Integration. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06013-2_15.
55. Ventrella, D., Losavio, N., Vonella, A.V., Leij, F.J., 2005. Estimating hydraulic conductivity of a fine-textured soil using tension infiltrometry. Geoderma 124 (3–4), 267–277. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.005.
56. Verbist, K.M.J., Pierreux, S., Cornelis, W.M., McLaren, R., Gabriels, D., 2012. Parameterizing a coupled surface–subsurface three-dimensional soil hydrological model to evaluate the efficiency of a runoff water harvesting technique. Vadose Zone J. 11, 4. https://doi.org/10.2136/vzj2011.0141.
57. Villagra-Mendoza, K., Horn, R., 2019. Changes in water infiltration after simulated wetting and drying periods in two

biochar amendments. Soil Syst. 3(4), 63. https://doi.org/10.3390/soilsystems3040063.
58. Wang, J., Xiong, Z., Kuzyakov, Y., 2016. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. Global Change Biol. Bioenergy 8, 512–523 292. https://doi.org/10.1111/gcbb.12266.
59. Wooding, R.A., 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water Resour. Res. 4(6), 1259–1273. https://doi.org/10.1029/WR004i006p01259.
60. Zhang, J., Qun, C., Changfu, Y., 2016. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil. Pedosphere 26(2), 265–272. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60041-8.
61. Zolfi Bavariani, M., Ronaghi, A., Karimian, N., Ghasemi, W., Yatharbi, J., 2015. The effect of biochar prepared from chicken manure at different temperatures on the chemical characteristics of a calcareous soil. J. Water Soil Sci. 20(75), 73–84. https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.75.73.

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)