



The effect of time on application of rice straw biochar on some physical properties of clay loam soil

Fatemeh Tadi Beni¹, Ahmad Karimi^{✉2}, Hassan Osooli³

1. Department of Soil Science, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, tadi.beni@yahoo.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, karimiahmad1342@sku.ac.ir

3. East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Tabriz, Iran, osoolih@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 6, 2022

Received: Apr. 10, 2022

Accepted: Apr. 26, 2022

Published online: June. 22, 2022

Keywords:

Biochar,
Bulk density,
Capillary porosity,
Soil structure stability,
Total porosity

ABSTRACT

Biochar is a carbon-rich organic compound that has recently been recommended for use as a soil conditioner. Little research has been done on the effect of biochar amount and elapsed time after biochar addition on soil physical properties. This research performed at Shahrekord University, in 2018. The aim of this study was to evaluate the long-term effects of different amount of rice straw biochar on soil bulk density (ρ_b), total porosity (n), mean weight diameter of dry (MWD_{dry}) and wet (MWD_{wet}) aggregates, air filled porosity (AFP) and capillary porosity (CP) of clay loam soil. This experiment was performed as a factorial experiment based on completely randomized design with three replications in a greenhouse. Biochar have four levels of zero as control (B_0), 0.5 (B_1), 1 (B_2) and 2 (B_3) weight percentage and the time have four levels of 2 (T_1), 3 (T_2), 6 (T_3) and 9 (T_4) months after biochar adding to the soil. The results indicated that two months after adding rice straw to the soil, ρ_b decreased by 6% compared to the control. At the same time, ' n ', ' MWD_{dry} ' and ' MWD_{wet} ' increased by 3, 11 and 13%, respectively, compared to the control. Means comparison showed that the lowest ρ_b was obtained in B_1T_2 , the highest ' n ', 'AFP' and 'CP' were obtained in B_1T_2 , B_0T_1 and B_1T_3 , respectively, and the highest ' MWD_{dry} ' and ' MWD_{wet} ' were obtained in B_3T_4 and B_0T_4 respectively. Different times are needed for the effect of biochar on soil physical properties improvement. Based on the findings of this study, 1% of rice straw biochar can be used to durabil improvement of the physical properties of clay loam soil.

Cite this article Tadi Beni, F., Karimi, A., & Osooli, H. (2022). Study the effects of time on the demand of Biochar derived from Rice Straw on some physical characteristics of clay loam soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (4), 809-820.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338692.669203>



بررسی تأثیر زمان بر کاربرد بیوجار حاصل از کاه و کلش برنج بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک لوم رسی

فاطمه طادی بنی^۱، احمد کریمی^۲، حسن اصولی^۳^۱ گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، tadi.beni@yahoo.com^۲ نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، karimiahmad1342@sku.ac.ir^۳ مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، تبریز، ایران، osoolih@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۴/۱

واژه‌های کلیدی:

بیوجار،
پایداری ساختمان خاک،
تخلخل خاک،
تخلخل موئین،
چگالی ظاهری خاک

بیوجار یک ترکیب آلی غنی از کربن است که اخیراً، استفاده از آن به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک توصیه می‌شود. پژوهش‌های اندکی در زمینه اثر مقدار بیوجار و اثر زمان بعد از افزودن بیوجار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک انجام شده است. این پژوهش در سال ۱۳۹۸ در دانشگاه شهرکرد، با هدف بررسی اثرات درازمدت کاربرد مقادیر مختلف بیوجار حاصل از کاه و کلش برنج بر چگالی ظاهری خاک (ρ_b)، تخلخل کل خاک (n)، تخلخل تهویه‌ای (AFP)، تخلخل موئین (CP)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خشک (MWD_{dry}) و تر (MWD_{wet}) خاک لوم رسی انجام شد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با فاکتور بیوجار در چهار سطح صفر (B_0)، $0.5(B_1)$ ، $1(B_2)$ ، $2(B_3)$ درصد وزنی و فاکتور زمان در چهار سطح $2(T_1)$ ، $3(T_2)$ ، $6(T_3)$ و $9(T_4)$ ماه پس از افزودن بیوجار به خاک در سه تکرار به‌صورت آزمایش گلخانه‌ای اجرا شد. نتایج نشان داد که دو ماه بعد از افزودن بیوجار کاه و کلش برنج، ρ_b نسبت به شاهد کاهش یافت؛ در حالی که در همان زمان میزان n MWD_{dry} و MWD_{wet} به ترتیب 3% ، 11% و 13% نسبت به شاهد افزایش یافت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کمترین ρ_b در B_1T_2 ، بیشترین n و AFP و CP به ترتیب در B_0T_1 ، B_1T_2 و B_1T_3 و بیشترین MWD_{dry} و MWD_{wet} به ترتیب در B_0T_4 و B_3T_4 مشاهده شد. به‌طور کلی، بیوجار کاه و کلش برنج ویژگی‌های فیزیکی مورد بررسی خاک را بهبود بخشید. برای بروز اثر بیوجار بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، زمان‌های متفاوتی مورد نیاز است. بر اساس یافته‌های این پژوهش، مقدار 1% بیوجار کاه و کلش برنج می‌تواند برای اصلاح پایداری ویژگی‌های فیزیکی خاک لوم رسی استفاده شود.

استناد: طادی بنی، فاطمه؛ احمد؛ و اصولی، حسن (۱۴۰۱). بررسی تأثیر زمان بر کاربرد بیوجار حاصل از کاه و کلش برنج بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک لوم رسی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۴)، ۸۰۹-۸۲۰.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338692.669203>

© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلایل مختلف مانند عدم وجود پوشش گیاهی کافی به دلیل کمبود بارش، دمای بالا، حذف بقایای گیاهی و استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی کربن آلی کمی دارند (Ali Doust *et al.*, 2019). با توجه به نقش مثبت کربن آلی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و تأثیر آن در افزایش محصولات کشاورزی، محققان به دنبال روش‌هایی هستند که کربن آلی خاک را افزایش دهند. یکی از راه‌های مؤثر جهت تأمین کربن آلی خاک، تبدیل ضایعات کشاورزی و حیوانی به ترکیباتی است که ضمن تولید انرژی، باعث کاهش حجم و وزن مواد زائد و اثرات نامطلوب شیرابه آن‌ها شود (Lehmann *et al.*, 2012). یکی از این ترکیبات پیشنهادی، بیوپچار است.

بیوپچار، ترکیب آلی پایدار و غنی از کربن است که از طریق تجزیه گرمایی هر نوع زیست‌توده تحت شرایط بدون اکسیژن یا حضور جزئی آن، که در اصطلاح به این فرایند گرماکافت گفته می‌شود، به‌دست می‌آید (Lehmann *et al.*, 2012; Sohi *et al.*, 2010). در سال‌های اخیر از بیوپچار به‌عنوان روشی برای ترسیب کربن در خاک و اصلاح‌کننده خاک‌های کشاورزی استفاده شده است (Liu *et al.*, 2019; O'Toole *et al.*, 2018). طبق مطالعات انجام‌شده، بیوپچار در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک مؤثر است. بیوپچار به دلیل داشتن سطح ویژه و تخلخل زیاد اغلب سبب کاهش چگالی ظاهری خاک، تغییر در توزیع اندازه منافذ، افزایش تخلخل خاک و نیز بهبود ساختمان خاک می‌شود (Blanco, 2017; O'Toole *et al.*, 2018; Tanure *et al.*, 2019).

تأثیر بیوپچار بر چگالی ظاهری خاک به ویژگی‌های بیوپچار، مقدار بیوپچار و ویژگی‌های خاک مانند بافت خاک بستگی دارد. در مطالعات انجام‌شده اثرات متفاوتی از تأثیر بیوپچار بر چگالی ظاهری خاک گزارش شده است. به نظر می‌رسد که زمان سپری‌شده بعد از افزودن بیوپچار به خاک در تأثیر بیوپچار بر ویژگی‌های خاک مؤثر باشد. YazdanPanahi *et al.*, (2019) گزارش کردند که بلافاصله با افزودن بیوپچار طبیعی و بیوپچار تهیه شده از زباله‌های شهری، چگالی ظاهری خاک با روند افزایشی با مقدار بیوپچار اضافه شده به خاک کاهش یافت ولی (Verheijen (2019) گزارش کرد که ذرات ریز بیوپچار با پر کردن منافذ خاک (در فاصله زمان ۱۰ روز بعد از افزودن بیوپچار به خاک)، چگالی ظاهری خاک را افزایش داد.

بیوپچار یک ماده متخلخل است که به دلیل خروج گازها از زیست‌توده در فرایند گرماکافت، دارای منافذ با ابعاد مختلف است (Leng *et al.*, 2020). با اضافه شدن این ماده متخلخل به خاک، تعداد کل منافذ خاک و نیز توزیع اندازه منافذ خاک ممکن است تغییر یابد (Fu *et al.*, 2021). نتایج تحقیق گلخانه‌ای (Esmaelnejad *et al.*, 2017) نشان داد که بیوپچار چوب تهیه شده در دماهای ۳۵۰ و ۵۵۰ درجه سلسیوس، که در اندازه ذرات کوچک‌تر از ۱ و ۲-۱ میلی‌متر را به خاک لوم شنی اضافه شده بودند، در تمام تیمارها بعد از ۱۸۰ روز، موجب افزایش منافذ بین ذرات خاک و افزایش منافذ داخلی ذرات خاک نسبت به تیمار شاهد شدند. در پژوهشی مزرعه‌ای، (Osooli *et al.*, 2021) گزارش کردند که سه ماه بعد از افزودن بیوپچارهای تهیه شده از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو (تهیه شده در ۳۲۰ درجه سلسیوس) با مقادیر و اندازه ذرات مختلف به خاک لوم شنی آهکی، تخلخل کل خاک افزایش یافت و بیوپچار کاه گندم، که به مقدار ۳٪ و با اندازه ذرات ۲-۱ میلی‌متر به خاک اضافه شده بود، بیشترین تأثیر را بر افزایش تخلخل کل خاک داشت.

ساختمان خاک یکی از ویژگی‌های اصلی خاک است که در نگهداشت آب در خاک، تهویه خاک و دمای آن و همچنین در جوانه‌زنی و توسعه ریشه گیاهان نقش مهمی دارد. برای ایجاد ساختمان خاک، تشکیل خاکدانه‌ها و نیز پایداری آن‌ها ضروری است (Juriga and Šimanský, 2018). در تحقیق گلخانه‌ای (Nasimi *et al.*, 2020) بیوپچار برگ خرما (تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس)، با داشتن مقدار کربن آلی قابل توجه، سبب بهبود پایداری ساختمان خاک^۱ شد و اثر بیوپچار بر پایداری خاکدانه‌های خشک نه ماه بعد از افزودن بیوپچار به خاک مشاهده شد، این در حالی بود که اثر بیوپچار بر پایداری خاکدانه‌های تر، در فاصله زمانی یک ماه بعد از افزودن بیوپچار به خاک لوم رسی شنی مشاهده شد. نتایج تحقیق Jin *et al.* (2020) نشان داد که افزودن بیوپچار به خاک، مقدار میانگین وزنی قطر^۲ (MWD) خاکدانه‌ها را به‌طور قابل توجهی افزایش داده و منجر به افزایش تعداد خاکدانه‌های درشت خاک شد.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپچار بسته به نوع زیست‌توده مورد استفاده برای تهیه آن و شرایط گرماکافت متفاوت است (Rajkovich *et al.*, 2012). این امر سبب می‌شود که اثر بیوپچار بر ویژگی‌های خاک بسته به ویژگی‌های بیوپچار، خاک و حتی شرایط اقلیمی منطقه یکسان نباشد. از طرفی با توجه به ماهیت متفاوت ویژگی‌های فیزیکی خاک، به نظر می‌رسد که تأثیرپذیری آن‌ها از بیوپچار، متأثر از زمان سپری‌شده بعد از افزودن بیوپچار به خاک نیز باشد. در مطالعات انجام‌شده، اثر نوع بیوپچار و نیز مقدار بیوپچار بر ویژگی‌های خاک مورد تأکید بوده و کم‌تر به بررسی اثر زمان‌های متوالی بعد از افزودن بیوپچار در تأثیر بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک پرداخته شده است. با توجه به اینکه در حدود ۱۸ استان کشور برنج در مساحتی بیش از ۶۲۰ هزار هکتار کشت می‌شود (Ahmadi *et al.*, 2020) و سالانه مقادیر قابل توجهی کاه و کلش حاصل از کشت برنج تولید می‌شود. می‌توان از آن به‌عنوان ماده اولیه برای تولید بیوپچار استفاده کرد. لذا در این پژوهش اثر کاربرد بیوپچار حاصل از کاه و کلش برنج بر چگالی ظاهری، تخلخل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خشک و تر خاک لوم رسی در طی دوره‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

1 Soil structure stability

2 Mean Wight Diameter (MWD)

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش و تعیین ویژگی‌های خاک

این پژوهش در دانشگاه شهرکرد، واقع در مرکز استان چهارمحال و بختیاری با موقعیت جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و با ارتفاع ۲۰۷۴ متری از سطح دریا در سال ۱۳۹۸ انجام شد. در انجام این تحقیق از خاک سطحی مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد از عمق صفر تا ۳۰ سانتیمتری، استفاده شد. خاک پس از جمع‌آوری به آزمایشگاه منتقل و هوا خشک شد. همچنین نمونه مرکبی از خاک مورد مطالعه تهیه شد و پس از هوا خشک نمودن، کوبیدن و عبور از الک دو میلی‌متری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پایه‌ای خاک اندازه‌گیری گردید. با استفاده از استوانه‌های فلزی نمونه دست‌نخورده جهت اندازه‌گیری چگالی ظاهری خاک (pb) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تهیه شد. چگالی حقیقی به روش پیکنومتر (Blake and Hartge, 1986) تخلخل کل خاک با استفاده از مقدار چگالی ظاهری و حقیقی خاک (Hazelton and Murphy, 2007) بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986) اندازه‌گیری شد. درصد وزنی رطوبت خاک در گنجایش زراعی (FC) و در نقطه پژمردگی دائم (PWP) با استفاده از دستگاه صفحه فشار به ترتیب در مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال اندازه‌گیری گردید (Reynolds *et al.*, 2009). اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت انجام شد (Klute, 1986). ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996)، واکنش خاک (pH) با دستگاه مدل ۸۲۷ ph lab و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) با دستگاه PDR ۹۱۵ در سوسپانسیون آب و خاک (Thomas, 1996)، نیتروژن کل با استفاده از روش کج‌دال (Bremner, 1965)، پتاسیم قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با استات آمونیم (Richards, 1954) و فسفر قابل دسترس به روش (Olsen and Sommers, 1982) انجام گردید و نتایج آن در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی پایه‌ای خاک مورد آزمایش

ویژگی واحد	چگالی ظاهری g cm ⁻³	تخلخل درصد	رطوبت گنجایش زراعی درصد وزنی	رطوبت نقطه پژمردگی دائم	شن درصد	سیلت درصد	رس بافت
مقدار	۱/۳۸	۴۸	۲۰/۷	۱۱	۲۰/۸۴	۴۷/۹۱	۳۱/۲۵ لوم رسی

جدول ۲. برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد آزمایش

ویژگی واحد	pH	قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC) dS m ⁻¹	کربن آلی (O.C) درصد	نیتروژن کل (N) درصد	فسفر قابل دسترس (P) mg kg ⁻¹	پتاسیم قابل دسترس (K) mg kg ⁻¹
مقدار	۷/۵۶	۰/۳۴	۰/۸۲	۰/۰۷	۶/۶۹	۲۵۰/۱۳

نوع بیوجار و روش تهیه آن‌ها

جهت تهیه بیوجار از کاه و کلش برنج استفاده شد. کاه و کلش برنج، از برنج کاران منطقه لنجان اصفهان از رقم چمپا تهیه گردید. برای تهیه بیوجار، کاه و کلش برنج پس از هوا خشک شدن، در استوانه‌های فلزی به قطر دو اینچ که یک طرف آن‌ها کاملاً بسته بود و در طرف دیگر آن دریچه‌ای برای پر کردن مواد اولیه وجود داشت، قرار داده شد. برای خروج گازهای حاصل از گرماکافت، بروی سطح استوانه دو سوراخ به قطر نیم میلی‌متر تعبیه شده بود. برای انجام فرایند گرماکافت استوانه‌های فلزی مذکور بعد از پر شدن با مواد اولیه، به شکلی که مواد حاصل از احتراق ناقص فرصت خروج داشته باشند، در داخل کوره الکتریکی مدل (ATRA PC-12) قرار گرفتند. برای گرماکافت کاه و کلش برنج، دمای کوره با نرخ افزایش ۱۰ درجه سلسیوس در دقیقه به ۴۰۰ درجه سلسیوس رسانده شده و به مدت ۲ ساعت در این دما نگه‌داشته شد (Maniscalco *et al.*, 2021; Wu, 2012). سپس کوره الکتریکی خاموش شد تا دمای کوره به آرامی کاهش یابد. لازم به توضیح است که با این روش ۳۶ درصد مواد اولیه به بیوجار تبدیل شدند. بیوجار تولیدشده از محفظه گرماکافت خارج شده و پس از آسیاب کردن و عبور دادن از الک ۲ میلی‌متری، تا زمان استفاده در این پژوهش، جهت ممانعت از اکسید شدن سطح آن‌ها، در کیسه‌های پلی‌اتیلنی نگهداری شد. شکل ۱ تهیه کاه و کلش از مزارع و نمونه خرد شده آن‌ها و نیز کوره الکتریکی که از آن برای تهیه بیوجار استفاده شده است را نشان می‌دهد.

تعیین ویژگی‌های بیوجار حاصل از کاه و کلش برنج

چگالی ظاهری بیوجار طبق روش اصلاح‌شده ASTM d-285 اندازه‌گیری شد. برای این منظور بیوجار را داخل سیلندر شیشه‌ای ۱۰۰ میلی‌لیتری با

وزن مشخص ریخته و داخل آن از بیوپچار پر شد و به مدت ۱ دقیقه روی دستگاه تکان‌دهنده قرار داده شد تا بیوپچار داخل سیلندر را پر کند. چگالی ظاهری بیوپچار از وزن کردن مجدد سیلندر به دست آمد و در نهایت چگالی ظاهری بیوپچار از تقسیم وزن بیوپچار به حجم بیوپچار داخل سیلندر محاسبه شد (Song, 2012).



شکل ۱- تهیه بیوپچار از کاه و کلش برنج در کوره الکتریکی جهت کاربرد با خاک

pH و EC بیوپچار در سوسپانسیون آب و بیوپچار به نسبت یک به ۲۰ و تکان دادن به مدت یک و نیم ساعت با دستگاه تکان‌دهنده الکتریکی و نیز مقدار کربن و نیتروژن بیوپچار با دستگاه CHNS Analyzer مدل LEO 1455 VP اندازه‌گیری شد و همچنین اندازه‌گیری پتاسیم و فسفر کل بیوپچار با روش ارائه‌شده در منبع انجام شد (Rajkovich et al., 2012). نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. برخی ویژگی‌های بیوپچار مورد استفاده در آزمایش

ویژگی	چگالی ظاهری (pb)	قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	pH	خاکستر	کربن (C)	نیتروژن (N)	فسفر کل (P)	پتاسیم کل (K)
واحد	g cm ⁻³	dS m ⁻¹	-	درصد	درصد	درصد	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
بیوپچار	۰/۵۱	۷/۰۱	۹/۳۰	۲۷	۵۵/۰۶	۱/۵۲	۵۸۰	۱۵۸۹

طرح آزمایشی

جهت بررسی اثر بیوپچار کاه و کلش برنج بر چگالی ظاهری، تخلخل و پایداری ساختمان خاک این آزمایش در خاکی با بافت سطحی لوم رسی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور ماده اصلاح‌کننده خاک شامل بیوپچار در چهار سطح صفر، ۰/۵، ۱، ۲ درصد وزنی و فاکتور زمان در چهار سطح ۲، ۳، ۶ و ۹ ماه پس از افزودن بیوپچار در سه تکرار به صورت آزمایش گلخانه‌ای به اجرا در آمد. تیمارهای آزمایش در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. تیمارهای ماده اصلاحی (بیوچار) و زمان اعمال شده در آزمایش

فاکتور ماده اصلاحی	مقدار بیوچار		فاکتور زمان
	درصد وزنی	تن در هکتار*	
تیمار بیوچار			مدت (ماه)
B0	صفر	صفر	۲
B1	۰/۵	۲۰/۷	۳
B2	۱	۴۱/۴	۶
B3	۲	۸۲/۸	۹

*: بر اساس چگالی ظاهری خاک و عمق ۳۰ سانتی‌متر محاسبه شد.

با توجه به تیمارهای آزمایشی (شاهد، ۰/۵، ۱ و ۲) ماده اصلاح‌کننده بیوچار (با نسبت وزنی ۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم در ۳ کیلوگرم خاک) با دانه‌بندی متناسب با خاکی که از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شده بود، اضافه گردید و سپس در کیسه‌های پلاستیکی در دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس به مدت یک ماه در شرایط انکوباسیون قرار گرفت تا خاک درون کیسه‌ها کاملاً مخلوط شده و سپس به داخل گلدان‌های سه کیلوگرمی پلاستیکی منتقل شد (Abbas et al., 2018). در این آزمایش از ۴۸ گلدان با اندازه متوسط (ارتفاع ۲۰ و قطر دهانه ۲۵ سانتی‌متر) استفاده گردید. در کف گلدان‌ها سوراخ‌هایی به‌منظور زهکشی وجود داشت و فیلتر شنی (با دانه‌بندی ۲ تا ۴ میلی‌متر) به ضخامت ۲ سانتی‌متر در کف گلدان قرار داده شد. گلدان‌ها در گلخانه دانشگاه شهرکرد نگهداری شدند. در ابتدا رطوبت همه گلدان‌ها به حد گنجایش زراعی رسید. برای تعیین رطوبت خاک از روش وزنی استفاده شد. درصد تخلیه مجاز آب داخل گلدان پس از انجام آبیاری، ۶۵٪ آب قابل دسترس در نظر گرفته شد. هدف از آبیاری در طی مدتی که گلدان‌ها نگهداری شده بودند ایجاد فرصت برای انجام فعل‌وانفعالات فیزیکی در خاک بود که متأثر از تناوب خشکی و رطوبت هست. بدین منظور با مشخص بودن رطوبت ظرفیت زراعی و وزن خاک هر گلدان با توزین گلدان‌ها میزان کسر رطوبت به‌دست آمد. با داشتن وزن خاک و گلدان و رطوبت موجود در خاک گلدان و پس از کسر ۶۵٪ آب قابل دسترس، وزن گلدان به نقطه‌ی موردنظر که رسید آبیاری مجدد تا رساندن رطوبت به رطوبت ظرفیت زراعی انجام شد. این عمل، به‌منظور تأمین تناوب خشکی و رطوبت در خاک برای انجام فرآیند فیزیکی از جمله خاکدانه‌سازی انجام شد. در هر بازه‌ی زمانی (۲، ۳، ۶، ۹ ماه) ویژگی‌های فیزیکی موردنظر خاک شامل چگالی ظاهری، انواع تخلخل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک (جهت بررسی ساختمان) در تیمارهای آزمایش اندازه‌گیری گردید.

تعیین ویژگی‌های فیزیکی تیمارهای آزمایش

چگالی ظاهری به روش نمونه‌برداری با استوانه‌های فلزی از خاک دست‌نخورده گلدان و توزین پس از خشک شدن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت انجام گردید (Blake and Hartge, 1986). حجم استوانه‌ها با استفاده از اندازه‌های به‌دست‌آمده توسط کولیس محاسبه شد. اندازه‌گیری در هر تیمار با ۳ تکرار انجام گردید و چگالی ظاهری خاک از نسبت وزن خاک خشک به حجم کل خاک محاسبه گردید. چگالی حقیقی خاک به روش آزمایشگاهی با استفاده از پیکنومتر (Blake and Hartge, 1986) تعیین شد. درصد تخلخل کل خاک (n) با توجه به مقادیر چگالی ظاهری و چگالی حقیقی از رابطه زیر محاسبه شد.

$$n = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}\right) \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن ρ_b چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، ρ_p چگالی حقیقی خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و n درصد تخلخل کل خاک (مجموع تخلخل موینه‌ای و تهویه‌ای خاک) است.

برای اندازه‌گیری تخلخل موینه (CP) در این آزمایش، پس از اشباع نمودن خاک با توجه به نوع بافت خاک اندازه‌گیری شده، نمونه‌های اشباع خاک در مکش ۵ کیلو پاسکال در دستگاه جعبه‌شن قرار گرفت (تا زمانی که رطوبت نمونه‌های تحت مکش ثابت شود) (Wu et al., 2016). با توزین وزن مرطوب نمونه‌های تحت مکش قرار داده شده و خشکاندن آن‌ها در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و توزین مجدد، رطوبت جرمی آن‌ها محاسبه گردید و سپس رطوبت حجمی نمونه‌های خاک محاسبه شده و با استفاده از رابطه ۲ معادل تخلخل موینه تعیین گردید.

$$\theta_v = \theta_m \times \rho_b, \quad \theta_v \cong CP \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن θ_v رطوبت، حجمی θ_m رطوبت جرمی نمونه‌های خاک، ρ_b چگالی ظاهری خاک و CP تخلخل موینه خاک است.

تخلخل تهویه‌ای (AFP) از تفاضل تخلخل کل خاک و تخلخل موینه‌ی نه‌ای طبق رابطه ۳ محاسبه شد (Wu et al., 2016).

$$AFP = n-CP$$

رابطه ۳)

که در آن n تخلخل کل، CP تخلخل مویینه‌ای و AFP تخلخل تهویه‌ای است.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با استفاده از روش الک خشک (MWD_{dry}) و تر (MWD_{wet}) اندازه‌گیری گردید برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با الک خشک، ۱۰۰ گرم از خاک هوا خشک الک شده با الک ۸ میلی‌متری، بر روی سری الک‌های با قطر سوراخ‌های ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ میلی‌متر (به ترتیب از بالا به پایین) قرار داده شده و به مدت ۲ دقیقه با حرکت دورانی با تواتر ۱۵۰ دور در دقیقه الک شد (Liu et al., 2012). برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با الک تر، ۵۰ گرم خاک هوا خشک الک شده با الک با قطر منافذ ۸ میلی‌متری بر روی سری الک‌های بالا ریخته شده و توسط دستگاه تکان‌دهنده الکتریکی با تواتر یک حرکت بالا و پایین در هر ثانیه با فاصله حرکتی ۳/۵ سانتی‌متر و به مدت یک دقیقه در داخل آب (آب شهری) تکان داده شد. برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها تر، تصحیح شن انجام شد (Liu et al., 2012). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌ها و با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده است.

$$MWD = \sum_{i=0}^n w_i \cdot x_i$$

رابطه ۴)

که در آن: xi متوسط قطر یا اندازه خاکدانه‌ها در هر کلاس اندازه‌ای (میانگین قطر سوراخ الک‌های بالا و پایین) و wi مقدار نسبی خاکدانه‌های باقی‌مانده بر هر الک است.

تجزیه و تحلیل آماری

نرمال بودن نتایج به‌دست‌آمده با آزمون شاپیرو-ویلک (Keller, 2015) و یکنواختی واریانس آن‌ها با آزمون لوون (Ismailnazadeh and Nikbakht, 2019) تست شد. برای پی بردن به اثر تیمارها، از جدول تجزیه واریانس ANOVA، برای مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن از نرم‌افزار STATISTICA10 و برای سایر محاسبات آماری، رسم شکل‌ها و جداول از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

یافته‌ها و بحث

چگالی ظاهری خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی مقادیر بیوجار و زمان و نیز اثر متقابل آن‌ها بر چگالی ظاهری خاک معنی‌دار ($p < 0.05$) بود (جدول ۵). مقایسه میانگین نتایج اثر متقابل بیوجار و زمان بر چگالی ظاهری خاک نشان داد که کمترین تغییرات چگالی ظاهری خاک در مقدار ۰/۵ درصد بیوجار بعد از سپری شدن ۹ ماه از افزودن بیوجار به خاک (B1T4)، با ۱۲ درصد کاهش، نسبت به شاهد مشاهده شد. اثر بیوجار در مقادیر مورد مطالعه با گذشت زمان بر چگالی ظاهری خاک یکسان نبود. به‌این ترتیب که در زمان T1، میزان چگالی ظاهری خاک در مقادیر B1، B2 و B3 بیوجار نسبت به شاهد به ترتیب ۶/۵ و ۱۰ و ۶/۵ درصد کاهش معنی‌داری داشت. در زمان T2، بیوجار در مقادیر B1 و B2 چگالی ظاهری خاک را به ترتیب به ترتیب ۱۰ و ۵ درصد نسبت به شاهد به‌صورت معنی‌داری کاهش دادند. در زمان T4، افزایش مقدار بیوجار، موجب روند کاهش معنی‌دار چگالی ظاهری نسبت به شاهد شد.

به‌طورکلی، بررسی روند تغییرات چگالی ظاهری خاک با زمان نشان داد که در این پژوهش، تمام سطوح مورد مطالعه بیوجار سبب کاهش میزان چگالی ظاهری خاک نسبت به شاهد شدند. با گذشت زمان، چگالی ظاهری خاک در تمام مقادیر مورد مطالعه بیوجار نسبت به شاهد کاهش یافت. کاهش چگالی ظاهری خاک در این پژوهش با نتایج پژوهش‌های Zhang et al. (2021) و Baiamonte et al. (2019) مطابقت دارد. دلیل کاهش چگالی ظاهری خاک با افزودن بیوجار این است که یک بخش خاک با چگالی بالا با بخش بیوجار با چگالی پایین (اثر رقت) جایگزین می‌شود.

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر اصلاح‌کننده (بیوجار) و زمان بر ویژگی‌های مورد مطالعه

عوامل تغییر	درجه آزادی	چگالی ظاهری خاک	تخلخل کل	تخلخل تهویه‌ای	تخلخل مویین	MWD _{Dry}	MWD _{Wet}
مقدار بیوجار	۳	۰/۰۳**	۱۴/۱*	۸/۳۶ ^{ns}	۱۲/۶۹ ^{ns}	۰/۴۹**	۰/۰۰۷ ^{ns}
خطا	۸	۰/۰۰۰۹	۲/۶	۸/۸	۷/۹۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
زمان	۳	۰/۰۰۲*	۶/۳**	۸۵/۳۸**	۱۰۶/۸۸**	۰/۵۶**	۰/۵۷**
مقدار بیوجار × زمان	۹	۰/۰۰۴**	۸/۳**	۴۴/۸۲*	۲۸/۱۱ ^{ns}	۰/۰۸**	۰/۰۱۷*
خطا	۲۴	۰/۰۰۰۴	۰/۶	۱۶/۳۵	۱۸/۱۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶
ضریب تغییرات		۴/۴	۳/۹	۱۷/۸	۱۱/۷	۱۲/۴	۱۲/۸

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪.

جدول ۶. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار بیوپچار و زمان بر چگالی ظاهری خاک

میانگین (g cm ⁻³)	مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار (ماه)				مقدار بیوپچار (درصد وزنی)
	۹	۶	۳	۲	
۱/۳۷ ^a	۱/۳۷ ^{b-f}	۱/۳۷ ^{b-f}	۱/۳۸ ^{bcd}	۱/۳۹ ^{bc}	صفر
۱/۲۶ ^c	۱/۲۱ ⁿ	۱/۳ ^{g-l}	۱/۲۴ ^{mn}	۱/۳۰ ^{g-l}	۰/۵
۱/۲۸ ^c	۱/۲۶ ^{klm}	۱/۳۳ ^{e-i}	۱/۳۰ ^{g-l}	۱/۲۴ ^{mn}	۱
۱/۳۲ ^b	۱/۳۳ ^{d-h}	۱/۲۷ ^{i-m}	۱/۳۷ ^{b-e}	۱/۳۰ ^{g-l}	۲
	۱/۳۳ ^A	۱/۳۱ ^B	۱/۳۰ ^B	۱/۲۹ ^B	میانگین

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند.

تخلخل کل خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی مقدار بیوپچار و زمان و نیز اثر متقابل آن‌ها بر تخلخل کل خاک معنی‌دار ($p < 0.05$) بود (جدول ۵). مقایسه میانگین نتایج اثر متقابل مقدار بیوپچار و زمان بر تخلخل کل خاک نشان داد که بیشترین افزایش تخلخل کل نسبت به شاهد را بیوپچار با مقدار ۰/۵ درصد در مدت ۳ ماه بعد از افزودن بیوپچار به خاک (B_1T_2) (۱۰/۵ درصد افزایش) و کمترین مقدار تخلخل کل در مقدار ۰/۵ درصد بیوپچار بعد از سپری شدن ۲ ماه از افزودن بیوپچار به خاک (B_1T_1)، با ۱/۸ درصد کاهش نسبت به شاهد، سبب شدند (جدول ۷).

اثر مقادیر مختلف بیوپچار بر تخلخل کل خاک در زمان‌های مورد مطالعه بعد از افزودن بیوپچار به خاک یکسان نبود. به طوری که در زمان T_1 ، بیوپچار با مقدار B_2 نسبت به B_1 تخلخل کل خاک را بیشتر افزایش داد. در زمان T_2 ، بیوپچار با مقادیر B_1 و B_2 تخلخل کل خاک را به ترتیب ۱۰ و ۴/۵ درصد نسبت به شاهد به صورت معنی‌داری افزایش داد. در این زمان، بیوپچار در مقادیر B_2 و B_3 نسبت به مقدار B_1 ، سبب کاهش معنی‌دار تخلخل کل خاک شد. افزایش تخلخل کل در زمان T_3 ، در مقادیر B_1 و B_2 بیوپچار در مقایسه با شاهد هم مشاهده شد، ولی در این زمان تغییر در مقدار بیوپچار، سبب تغییر معنی‌دار تخلخل کل خاک نگردید (جدول ۷).

در این پژوهش، بررسی روند تغییرات تخلخل کل خاک لوم رسی با زمان بعد از افزودن بیوپچار کاه و کلش برنج نشان داد که مقدار تخلخل کل خاک با گذشت زمان افزایش یافت. نتایج این پژوهش با گزارش Blanco (2017) مبنی بر افزایش تخلخل کل خاک در مدت کوتاه به میزان ۱۴ تا ۶۴ درصد، مطابقت دارد. بیوپچار به عنوان منبع غنی از کربن آلی، سبب تشکیل خاکدانه‌های جدید و بهبود ساختمان خاک در نهایت سبب افزایش تخلخل کل خاک شد (Baiamonte et al., 2019).

جدول ۷. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار بیوپچار و زمان بر تخلخل کل خاک

میانگین (درصد)	مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار (ماه)				مقدار بیوپچار (درصد وزنی)
	۹	۶	۳	۲	
۴۷/۶۳ ^C	۴۸/۱۶ ^{g-k}	۴۷/۹۰ ^{h-k}	۴۷/۳۱ ^{ijk}	۴۷/۱۴ ^{ijk}	صفر
۴۹/۷۰ ^{AB}	۵۱/۲۲ ^{a-d}	۴۹/۰۴ ^{e-i}	۵۲/۲۷ ^a	۴۶/۲۸ ^k	۰/۵
۴۹/۹۵ ^A	۵۲/۳۸ ^{ab}	۴۸/۳۷ ^{g-j}	۴۹/۴۴ ^{c-h}	۵۰/۵۹ ^{a-f}	۱
۴۸/۴۹ ^{BC}	۴۸/۷۷ ^{f-i}	۴۹/۶۷ ^{b-h}	۴۶/۸۸ ^{jk}	۴۸/۶۲ ^{f-i}	۲
	۴۹/۹۲ ^A	۴۸/۷۲ ^B	۴۹/۷۰ ^A	۴۹/۰۴ ^B	میانگین

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند.

تخلخل تهویه‌ای خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی مقدار بیوپچار بر تخلخل تهویه‌ای خاک معنی‌دار نبود، در حالی که اثر اصلی زمان و اثر متقابل مقدار و زمان بر تخلخل تهویه‌ای معنی‌دار ($p < 0.05$) بود (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح‌کننده و زمان بر تخلخل تهویه‌ای خاک نشان داد که بیشترین افزایش تخلخل تهویه‌ای را بیوپچار با مقدار ۲ درصد بعد از سپری شده ۶ ماه از افزودن بیوپچار به خاک (B_1T_3)، با ۳۵ درصد کاهش نسبت به شاهد را داشت (جدول ۸).

با گذشت زمان بعد از افزودن بیوپچار به خاک، مقادیر مختلف بیوپچار کاه و کلش برنج اثرات متفاوتی بر تخلخل تهویه‌ای خاک داشتند (جدول ۸). در زمان T_1 و T_3 ، مقدار B_1 بیوپچار، تخلخل تهویه‌ای را نسبت به شاهد کاهش داد ولی در زمان‌های T_2 و T_4 سبب افزایش تخلخل تهویه‌ای خاک شد. در زمان T_2 مقدار ۰/۵ درصد بیوپچار تخلخل تهویه‌ای را به صورت معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش داد ولی مقادیر ۱ و ۲ درصد بیوپچار تغییر معنی‌دار تخلخل تهویه‌ای را نسبت به شاهد سبب نشدند. در زمان T_3 ، مقادیر ۱ و ۲ درصد نسبت به تیمار شاهد تخلخل تهویه‌ای خاک را به صورت

معنی داری نسبت به شاهد بهبود دادند. در زمان T₄ مقدار ۰/۵ درصد، سبب افزایش معنی دار تخلخل تهویه ای نسبت به شاهد شد که البته اثر آن در تغییر تخلخل تهویه ای خاک، با اثر مقدار ۲ درصد بیوپچار در همان زمان یکسان بود.

به طور کلی نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و سطح اصلاح کننده بر تخلخل تهویه ای بیانگر این است که در زمان های کمی بعد از افزودن بیوپچار کاه و کلش برنج، تخلخل تهویه ای خاک لوم رسی نسبت به تیمار شاهد در همان زمان کاهش یافت و دلیل احتمالی کم شدن تخلخل تهویه ای خاک لوم رسی، می تواند انسداد منافذ کوچک خاک توسط ذرات ریز بیوپچار در زمان های کوتاه بعد از افزودن بیوپچار باشد در حالی که با گذشت زمان اصلاح ساختمان خاک موجب افزایش منافذ درشت خاک و بهبود تخلخل تهویه ای آن شد (Verheijen et al, 2019).

جدول ۸. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار و زمان بر تخلخل تهویه ای خاک

میانگین (درصد)	مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار (ماه)				مقدار بیوپچار (درصد وزنی)
	۹	۶	۳	۲	
۲۷/۲۹ ^C	۲۶/۳۰ ^{e-j}	۲۳/۱۶ ^{ij}	۲۵/۰۵ ^{g-j}	۳۴/۶۵ ^{abc}	صفر
۲۶/۹۶ ^C	۳۰/۲۳ ^{c-h}	۲۲/۳۶ ^j	۲۹/۸۳ ^{c-i}	۲۵/۴۳ ^{f-j}	۰/۵
۲۸/۸۷ ^{ABC}	۳۲/۲۷ ^{b-f}	۲۸/۳۱ ^{c-j}	۲۳/۷۰ ^{hij}	۳۱/۱۸ ^{c-g}	۱
۲۷/۵۴ ^{BC}	۲۳/۹۳ ^{hij}	۲۷/۵۹ ^{d-j}	۲۵/۰۳ ^{g-j}	۳۳/۶۲ ^{bcd}	۲
	۲۸/۹۸ ^B	۲۷/۲۴ ^B	۲۶/۷۷ ^B	۳۳/۶۲ ^A	میانگین

میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی داری ندارند.

تخلخل موین خاک

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر اصلی اصلاح کننده و اثر متقابل اصلاح کننده و زمان بر تخلخل موین معنی دار نبود ولی اثر اصلی زمان بر تخلخل موین خاک معنی دار ($p < 0/01$) بود (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین داده ها نشان داد که در هر سه مقدار ۰/۵٪، ۱٪ و ۲٪ بیوپچار کاه و کلش برنج با گذشت سه ماه از افزودن بیوپچار به خاک بیشترین تخلخل موین در خاک لوم رسی به وجود آمد، ولی با گذشت زمان بیش از ۲ ماه، میزان آن کاهش یافت (جدول ۹). طبق بررسی (Obia et al. 2016) با افزودن بیوپچار حاصل از بلال ذرت به خاک، تخلخل موین ۳ تا ۵ درصد افزایش یافت. نتایج مشابهی مبنی بر افزایش تخلخل موین بعد از افزودن بیوپچار به خاک گزارش شده است (Chen et al. 2015).

بیوپچار حاصل، تأثیر مثبتی بر تخلخل تهویه ای در برخی از سطوح بیوپچار داشت. نتایج این پژوهش نشان داد که بعد از گذشت ۲ ماه از افزودن بیوپچار به خاک، اثر بیوپچار بر تخلخل موین تقریباً ثابت بوده و سبب تغییر معنی دار در آن نشد. پس از گذشت ۳، ۶ و ۹ ماه تفاوت معنی دار در تغییرات تخلخل موین وجود نداشت که میتوان احتمالاً آن را به پایداری ساختمان ایجاد شده در این مدت نسبت داد. اینگونه می توان توجیه نمود که دلیل کاهش منافذ موین خاک در کوتاه مدت نسبت به شاهد، مسدود شدن منافذ ریز خاک توسط بیوپچار است که در مدت زمان کوتاه بعد از اضافه شدن بیوپچار به خاک اتفاق می افتد، اما با گذشت زمان بیشتر فرصت انجام فرآیندهای فیزیکی در خاک از جمله ایجاد خاکدانه ها و افزایش پایداری ساختمان خاک، سبب افزایش منافذ موین خاک می گردد.

جدول ۹. نتایج مقایسه میانگین اثر زمان بر تخلخل موین خاک

میانگین (درصد)	مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار (ماه)				سطوح تیمار (درصد وزنی)	تیمار
	۹	۶	۳	۲		
۲۰/۹۴ ^a	۳۱/۴۸ ^a	۲۲/۹۳ ^a	۱۵/۴۲ ^b		میانگین تخلخل موین	

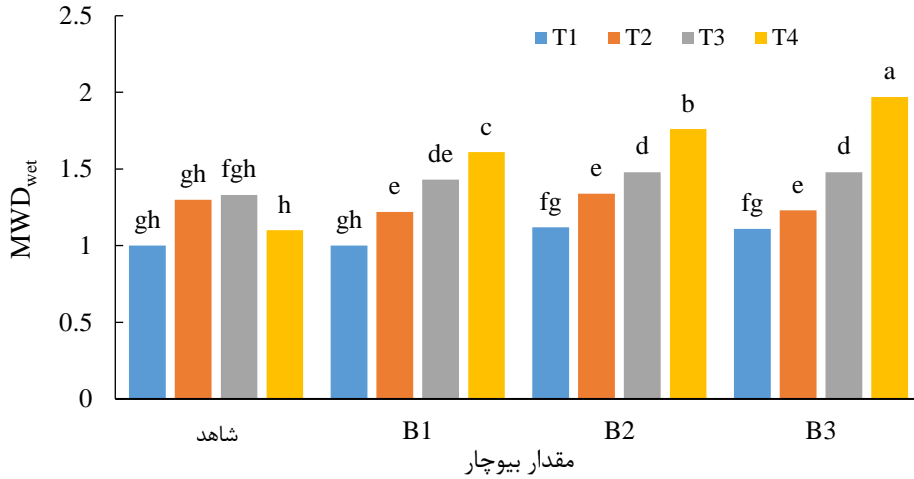
میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی داری ندارند.

میانگین وزنی قطر خاکدانه ها به روش الک خشک

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثرات اصلی مقدار بیوپچار و زمان و نیز اثر متقابل آنها بر MWD_{Dry} معنی دار ($p < 0/01$) بود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار بیوپچار و زمان بر میانگین وزنی قطر خاکدانه نشان داد که در تمام مقادیر بیوپچار، با گذشت زمان میانگین وزنی قطر خاکدانه های خشک افزایش یافت (شکل ۲). در زمان های ۲، ۳ و ۶ ماه بعد از افزودن بیوپچار، تفاوت در مقدار بیوپچار کاه و کلش سبب تفاوت معنی دار MWD_{Dry} نشد، در حالی که ۹ ماه بعد از افزودن بیوپچار به خاک، بیشترین مقدار بیوپچار (۲ درصد) بزرگترین MWD_{Dry} (۱/۹۲ mm) با ۹۷ درصد افزایش نسبت به شاهد را ایجاد کرد (شکل ۲).

با توجه به نتایج این پژوهش می توان گفت که با گذشت زمان، MWD_{Dry} روندی افزایشی داشت و این افزایش در زمان طولانی بیشتر مشاهده شد. چرا که بیوپچار با افزایش کربن خاک باعث اتصال ذرات خاک و تشکیل خاکدانه های بزرگ تر شده و پایداری آنها را بالا می برد. چنانکه نتایج این پژوهش نشان داد این فرایند زمان بر بود و سپری شدن بیشتر زمان پس از افزودن بیوپچار، فرصت کافی برای تشکیل خاکدانه های درشت پایدار را

فراهم کرد. Li et al., (2019) نتیجه‌گیری کردند که اثر بیوجار چوب درختان میوه بر افزایش پایداری خاکدانه‌ها فرایندی تدریجی است و نتایج پژوهش حاضر نیز با نتایج ایشان مطابقت دارد.

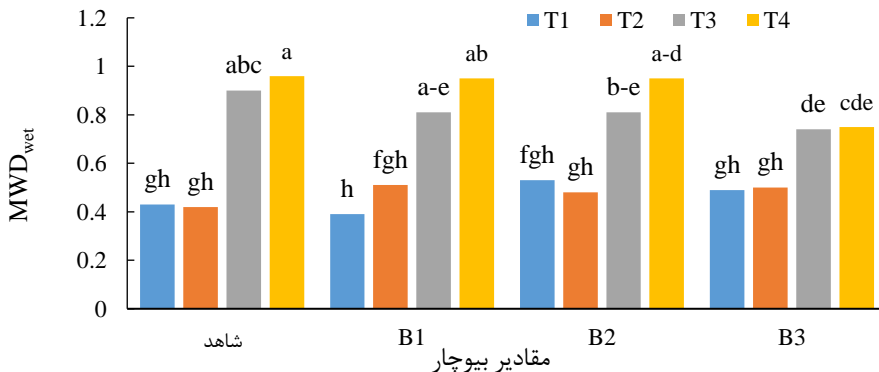


شکل ۲. مقایسه میانگین قطر خاکدانه‌های خشک در زمان‌های مورد مطالعه

B1, B2 و B3 به ترتیب مقدار ۰/۵٪، ۱٪ و ۲٪ و T1, T2 و T3 به ترتیب ۲، ۳، ۶ و ۹ ماه پس از کاربرد بیوجار در خاک است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی بیوجار بر MWD_{wet} معنی‌دار نبود، ولی اثر اصلی زمان و نیز اثر متقابل بیوجار و زمان بر MWD_{wet} معنی‌دار است (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر متقابل بیوجار و زمان بر میانگین وزنی قطر خاکدانه نشان داد که که بیشترین تغییرات MWD_{wet} نسبت به شاهد را تیمار B₁T₄ با ۵۵ درصد افزایش و کمترین تغییرات را تیمار B₁T₁ با ۹/۳ درصد کاهش نسبت به شاهد سبب شدند (شکل ۳). در زمان T₁ و T₂، اثر تغییر در مقادیر بیوجار بر MWD_{wet} معنی‌دار نبود. در زمان T₃، بیوجار با مقدار B₃، MWD_{wet} را نسبت به شاهد ۲۱/۶ درصد، به صورت معنی‌داری، کاهش داد. در تیمار زمان T₄، بیوجار در مقدار B₃، MWD_{wet} نسبت به شاهد ۲۱ درصد کاهش معنی‌داری داشت. بررسی روند تغییرات MWD_{wet} با گذشت زمان نشان داد که تمام مقادیر مورد مطالعه بیوجار، با گذشت زمان طولانی (۹ ماه) از افزودن بیوجار سبب بهبود میانگین قطر تر خاکدانه‌ها شدند (شکل ۳). یافته‌های این پژوهش با نتایج Lu et al., (2014) مبنی بر نقش مؤثر مواد آلی در ایجاد خاکدانه‌های بزرگ‌تر و افزایش مقدار MWD_{wet} و نیز در افزایش پایداری خاکدانه‌ها با افزایش نیروی پیوستگی بین واحدهای تشکیل دهنده خاکدانه‌ها توسط ترکیبات موجود در مواد آلی مرتبط می‌دانند، نیز همخوانی داشت.



شکل ۳. مقایسه میانگین قطر خاکدانه‌های خشک در زمان‌های مورد مطالعه

B1, B2 و B3 به ترتیب مقدار ۰/۵٪، ۱٪ و ۲٪ و T1, T2 و T3 به ترتیب ۲، ۳، ۶ و ۹ ماه پس از کاربرد بیوجار در خاک است. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری ندارند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی اثر زمان پس از کاربرد بیوپچار کاه و کلش برنج در مقادیر مختلف بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک لوم رسی انجام شد. نتایج نشان داد که اثر بیوپچار کاه و کلش برنج بر ویژگی‌های مورد مطالعه به مقدار بیوپچار و زمان سپری شده بعد از افزودن بیوپچار به خاک بستگی داشت. با سپری شدن زمان‌های کوتاه بعد از افزودن بیوپچار کاه و کلش برنج چگالی ظاهری خاک، کاهش و تخلخل کل خاک، تخلخل موئین و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر افزایش پیدا کردند، ولی با گذشت زمان اثر بیوپچار در بهبود این ویژگی‌ها از بین رفت. نتایج این پژوهش نشان داد که اثر بیوپچار بر افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خشک، به مقدار بیوپچار بیشتر و زمان طولانی‌تر نیاز داشت. بر اساس یافته‌های این پژوهش، مقدار ۱ درصد بیوپچار کاه و کلش برنج می‌تواند برای اصلاح پایدار ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود بررسی اثر زمان بعد از افزودن بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در شرایط مزرعه‌ای و در زمان‌های طولانی‌تر بررسی شود.

به طور کلی در این پژوهش بررسی روند تغییرات چگالی ظاهری خاک با زمان نشان داد که در تمام سطوح مورد مطالعه بیوپچار موجب کاهش میزان چگالی ظاهری خاک نسبت به شاهد شدند. با گذشت زمان، چگالی ظاهری خاک در سطوح اصلاح‌کننده نسبت به شاهد کاهش یافت.
"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Mahmood, A., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., rshad M. and Qayyum, M. F. (2018). Biochar application increased the growth and yield and reduced cadmium in drought stressed wheat grown in an aged contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 825-833.
- Ahmadi K. Ebadzadeh H.Hatami, F., Hosseinpour R., Abdehshah, h. And Kazemian A. (2020a). Agricultural Statistics of 1398. Volume One: Crops. Ministry of Agriculture.
- Ali Doust, A., and Afioni, M., and Haj Abbasi, M., and Mossadeghi, M. (2019). Application of multivariate statistical methods in evaluating soil quality indicators in the semi-arid region of Lordegan. *Applied Soil Research*, 7 (3), 192-206. (In farsi).
- Baiamonte, G., Crescimanno, G., Parrino, F. and Pasquale, C. D. (2019). Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. *Catena*. 175:294-303.
- Blake, G. R., and Hartge, K. H. (1986). Bulk density 1. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods, (methodsofsoilan1), 363-375.
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. Review and Analysis-Soil Physics and Hydrology. *Soil Science Society of America Journal*. 81:687-711.
- Bremner, J. M. (1965). Total nitrogen. p. 1148-1158. In C. A. Black (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. Monograph. No. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Chen, Y., Chen, W., Lin, Y. C., Cheng, J. Z., and Pan, W. J. (2015). Effects of biochar on the micro-ecology of tobacco-planting soil and physiology of flue-cured tobacco. *Ying Yong Sheng tai xue bao= The Journal of Applied Ecology*, 26(12), 3781-3787
- Esmaelnejad, L., Shorafa, M., Gorji, M., and Hosseini, S. M. (2017). Impacts of woody biochar particle size on porosity and hydraulic conductivity of biochar-soil mixtures: an incubation study. *Communications in soil science and plant analysis*. 48(14), 1710-1718.
- Fu, G., Qiu, X., Xu, X., Zhang, W., Zang, F., and Zhao, C. (2021). The role of biochar particle size and application rate in promoting the hydraulic and physical properties of sandy desert soil. *Catena*, 207, 105607.
- Gee, G. W., and Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis 1. Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods, (methodsofsoilan1), 383-411.
- Hazelton, P., and B. Murphy. (2007). Interpreting soil test results: what do all the numbers mean? CSIRO publishing, Australia.
- Houba, V. J. G., Temminghoff, E. J. M., Gaikhorst, G. A., and Van Vark, W. (2000). Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in soil science and plant analysis*, 31(9-10), 1299-1396.
- Ismailzadeh, N., and Nikbakht, R. (2019). Comparison of variance homogeneity tests in a randomized complete block design. *Journal of Statistical Sciences - Iranian Journal of Statistics Association*, 12 (2), 323-340. (In Farsi)
- Jin, L., Wei, D., Yin, D., Zhou, B., Ding, J., Wang, W and Wang, L. (2020). Investigations of the effect of the amount of biochar on soil porosity and aggregation and crop yields on fertilized black soil in northern China. *Plos one*, 15(11), e0238883.
- Keller, G. (2015). Statistics for management and economics, abbreviated. Cengage Learning.
- Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods, (methodsofsoilan1), 635-662.
- Lehmann, J., Czimczik, C., Laird, D., and Sohi, S. (2012). Stability of biochar in soil. In *Biochar for environmental management* (pp. 215-238).
- Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jang, Sh., Li, H. and Huang, H. (2020). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment*. 144204.
- Li, Q. Q., Xu, C. Y., Geng, Z. C., Zhang, J. C., Chen, S. L., Wang, H. L., Zhang, Y., Yun, F. Y., Yang, L., and Dong, S.



- H. (2019). Impact of biochar on soil bulk density and aggregates of Lou soil. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*, 40(7), 3388-3396.
- Liu, X. H., Han, F. P., and Zhang, X. C. 2012. Effect of biochar on soil aggregates in the loess plateau: results from incubation experiments. *International Journal Agricultural Biology*, 14, 975-979.
- Liu, X., Mao, P., Li, L., and Ma, J. (2019). Impact of biochar application on yield-scaled greenhouse gas intensity: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 656, 969-976.
- Maniscalco, M., Infurna, G., Caputo, G., Botta, L., and Dintcheva, N. T. (2021). Slow Pyrolysis as a Method for Biochar Production from Carob Waste: Process Investigation and Products' Characterization. *Energies*, 14(24), 8457.
- Nasimi, P., Karimi, A. and Gerami, Z. (2020). Long-term effects of biochar from palm leaves on porosity and stability of sandy loam soil structure. *Journal of Soil Science Research*, 34(2), 200-215. (In Farsi)
- Nelson, D. W., and Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis part 3 chemical methods, (methodsofsoilan3)*, 961-1010.
- O'toole, A., Moni, C., Weldon, S., Schols, A., Carnol, M., Bosman, B., and Rasse, D. P. (2018). Miscanthus biochar had limited effects on soil physical properties, microbial biomass, and grain yield in a four-year field experiment in Norway. *Agriculture*, 8(11), 171.
- Obia, A., Mulder, J., Martinsen, V., Cornelissen, G., and Børresen, T. (2016). In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155, 35-44.
- Olsen, S. R., and Sommers L. E. (1982). Phosphorus. p. 403-427. In A.L. Page et al. *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.*
- Osooli, H., Ahmad, K., Shirani, H., Tabatabaea, S.H. (2021). Effect of type, amount and biochar particles size on porosity, penetration resistance and stability of aggregates in a calcareous soil. *Journal of Soil and Water Resources Protection (Scientific-Research)*, 11 (1), 113-128. (In Farsi)
- Rajkovich S., Enders A., Hanley K., Hyland C., Zimmerman A. R., and Lehmann J. (2012). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48(3), 271-284.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., and Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263.
- Richards, L.A. (1954). *Diagnosis and Importance of Salin and Alkali Soil. U.S.D.A. Handbook, No. 60, Washington, D.C.*
- Lu, S. G., Sun, F. F., and Zong, Y. T. (2014). Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*, 114, 37-44.
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., and Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. In *Advances in agronomy (Vol. 105, pp. 47-82). Academic Press.*
- Song, W., and Guo, M. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 94, 138-145.
- Tanure, M. M. C., da Costa, L. M., Huiz, H. A., Fernandes, R. B. A., Cecon, P. R., Junior, J. D. P., and da Luz, J. M. R. (2019). Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research*, 192, 164-173.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis part 3 chemical methods, (methodsofsoilan3)*, 475-490.
- Verheijen, F. G., Zhuravel, A., Silva, F. C., Amaro, A., Ben-Hur, M., and 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.
- Wu, G. L., Yang, Z., Cui, Z., Liu, Y., Fang, N. F., and Shi, Z.H. (2016). Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity. *Journal of Hydrology*, 535, 54-60.
- Wu, W., Yang, M., Feng, Q., McGrouther, K., Wang, H., Lu, H., and Chen, Y. (2012). Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. *Biomass and bioenergy*, 47, 268-276.
- Zhang, J., Amonette, J. E., and Flury, M. (2021). Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil. *Soil and Tillage Research*, 104992.
- Juriga, M., and Šimanský, V. (2018). Effect of biochar on soil structure—Review. *Acta Fytotech. Zootech*, 21, 11-19
- YazdanPanahi, A., and Ahmadali, Kh., And Zare, S., and Jafari, M. (2019). The effect of two different biochars on the soil physical properties affecting irrigation management in desert regions. *Iranian Soil and Water Research (Iranian Agricultural Sciences)*, 50 (4), 965-975. (In Farsi)