

Effects of biochar application on soil physical and hydraulic properties

A. Majnooni-Heris^{1*}, R. Hassanpour², A. Eyvazpour Dehkharghanian³, H. Farajnia⁴ and F. Mikaeili Khorramabad⁵

Extended Abstract

Introduction:

Water scarcity, declining soil organic matter, and deterioration of soil structure are important constraints to agricultural production in dry and semi-arid regions. Improving soil water retention and physical quality is therefore essential for increasing water-use efficiency and sustaining crop production. Biochar, a carbon-rich and porous material produced through pyrolysis of biomass under limited oxygen, has been proposed as a soil amendment capable of modifying soil structure, pore characteristics, and water retention. However, its effects depend on feedstock type, pyrolysis temperature, application rate, soil texture, and duration of application. Moreover, limited information is available on the effects of biochar produced from locally available poplar pruning residues and wheat straw on the simultaneous physical and hydraulic properties of soils in northwestern Iran. Therefore, this study evaluated the effects of different application rates of a 1:1 mixture of poplar wood and wheat straw biochars on selected physical and hydraulic properties of a loamy sand soil under greenhouse conditions. The study particularly focused on changes in bulk density, porosity, water retention, total available water, electrical conductivity, and saturated hydraulic conductivity.

Materials and Methods:

The experiment was conducted in the greenhouse and soil laboratory of the Faculty of Agriculture, University of Tabriz, using a completely randomized design with three replications. Surface soil was collected from the 0–30 cm layer of an agricultural field at the university research station. The soil had a loamy sand texture, containing 62% sand, 24% silt, and 14% clay, with a pH of 7.65 and organic carbon content of 0.48%. Biochars were produced separately from poplar pruning wood and wheat straw under oxygen-limited conditions. Wheat straw and poplar wood were pyrolyzed at 350 and 400 °C, respectively, using a heating rate of 15 °C min⁻¹ and a residence time of 120 min at the final temperature. The resulting biochars were mixed at a 1:1 mass ratio. Four application rates were evaluated: 0% (control), 1%, 3%, and 5% biochar by soil mass. After complete mixing, treated soils were transferred to plastic pots and maintained under greenhouse conditions for four months. Soil moisture was regularly adjusted to approximately field capacity using distilled water to maintain comparable moisture conditions among treatments. After incubation, electrical conductivity (EC), bulk density, total porosity, saturated water content, field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), total available water (TAW), and saturated hydraulic conductivity (Ks) were measured using standard laboratory methods. FC and PWP were determined at matric potentials of 33 and 1500 kPa, respectively, using pressure plates. Bulk density was measured using sampling cylinders, total porosity using a gas pycnometer, and Ks using the constant-head method. Data normality and homogeneity of variances were assessed using the Shapiro–Wilk and Levene tests, respectively. Following confirmation of the assumptions of parametric analysis, one-way analysis of variance was performed using SPSS version 26. When treatment effects were significant, means were separated using Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

Results and Discussions

The statistical analyses showed that biochar application significantly affected physical and hydraulic properties of the soil. The treatment effect was highly significant for bulk density, field capacity, and total available water ($P < 0.01$), while electrical conductivity, saturated water content, and total porosity were affected significantly

1- Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Researcher, Research Department of Soil and Water, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran

3- Former M.Sc. Student, Department of Water Science and Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

4- Former Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

5- Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* Corresponding Author: majnooni@tabrizu.ac.ir

Received: Accepted:

at $P < 0.05$. In contrast, the effects on permanent wilting point and saturated hydraulic conductivity were not statistically significant. Bulk density decreased progressively with increasing biochar rate, from 1.53 g cm^{-3} in the control to 1.44, 1.33, and 1.18 g cm^{-3} at 1%, 3%, and 5% biochar, respectively. Thus, the 5% treatment reduced bulk density by 22.80% relative to the control. Total porosity increased from 44.00% in the control to 44.61%, 48.68%, and 55.90%, corresponding to increases of 1.38%, 10.64%, and 27.04%, respectively. Saturated water content also increased markedly, from 26.43% in the control to 29.96%, 34.69%, and 41.02% at the three biochar levels. The increase at 5% reached 55.20% relative to the control. Field capacity increased significantly from 14.72% in the control to 16.95%, 18.68%, and 21.22%, representing increases of 15.15%, 33.69%, and 44.16%, respectively. Total available water increased from 12.31 mm to 15.13, 16.83, and 18.70 mm, with the 5% treatment showing a 51.90% increase compared with the control. Permanent wilting point increased numerically from 6.51% to 6.87%, 7.46%, and 8.75% as biochar rate increased, but these differences were not significant. Saturated hydraulic conductivity similarly increased from 11.45 cm h^{-1} in the control to 12.28, 13.34, and 15.87 cm h^{-1} , respectively, but the variation was not statistically significant. Electrical conductivity increased significantly from 1.11 dS m^{-1} in the control to 1.36, 1.42, and 1.40 dS m^{-1} under 1%, 3%, and 5% biochar, respectively; however, the three biochar treatments were statistically similar. The increases in porosity, saturated water content, and field capacity can be attributed to the low density and porous structure of biochar, together with changes in soil pore volume and arrangement. The stronger response of field capacity than permanent wilting point suggests that biochar preferentially increased water retention within pores contributing to plant-available water. Consequently, the increase in total available water resulted mainly from the substantial improvement in field capacity rather than from changes in the lower water-retention limit. Although saturated hydraulic conductivity showed an increasing trend, the lack of statistical significance indicates that greater total porosity did not necessarily produce proportionally greater water flow. This may reflect the importance of pore size distribution, continuity, and connectivity in controlling saturated hydraulic conductivity. The increase in electrical conductivity was likely related to the release of soluble salts and basic cations from biochar, although the measured values remained within a non-saline range. Overall, the 5% treatment produced the greatest improvement in most measured soil properties, particularly bulk density, water retention, and total available water.

Conclusion:

Application of the mixed poplar pruning and wheat straw biochar improved the physical condition and water-retention capacity of the loamy sand soil, with the 5% rate producing the greatest overall improvement. This treatment reduced bulk density and increased porosity, saturated water content, field capacity, and total available water. The results indicate that biochar can enhance soil water storage and potentially support more efficient irrigation management in dry and semi-arid environments. However, because the experiment was conducted under greenhouse conditions for only four months, the results should not be interpreted as establishing a universal optimum application rate. Long-term field studies are required to evaluate persistence, crop response, and economic feasibility.

Keywords: Biochar, Soil porosity, Soil moisture, Hydraulic conductivity

Author Contributions:

First author: Supervision, manuscript review, and preliminary data analysis

Second author: Statistical analysis of the data, editing and reviewing the manuscript, and verification of the results

Third author: Conducting the laboratory and greenhouse experiments and collecting the data

Fourth author: Preparation of biochar and measurement of its properties

Fourth author: Preparation of manuscript draft

Data Availability Statement:

All data and results obtained from this study are presented in the manuscript.

Funding:

The authors wish to express their appreciation to the Tabriz University and Tabriz Petrochemical Company for providing the necessary facilities to conduct this research.

Ethical Considerations:

The authors adhered to ethical principles throughout the conduct and publication of this research, and this statement has been approved by all authors.

How to cite this paper:

Majnooni-Heris, A., Hassanpour, R., Eyvazpour Dehkharghanian, A., Farajnia, H. and Mikaeili Khorramabad, F., (2026). Effect of biochar application on soil physical and hydraulic properties. Iranian Water Research Journal. 35: 1-24. <https://dx.doi.org/10.2203>.

Copyright:

© Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Citation: این قسمت توسط دفتر مجله تکمیل خواهد شد.



تأثیر کاربرد بیوپار بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک

ابوالفضل مجنونی هریس^{۱*}، رضا حسن پور^۲، آیناز عیوض پور دهخوارقانیان^۳، حیدر فرج‌نیا^۴ و فاطمه میکائیلی خرم‌آباد^۵

چکیده:

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر سطوح مختلف بیوپار حاصل از بقایای هرس درخت صنوبر و کاه و کلش گندم بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک انجام شد. بدین‌منظور، بیوپار در سطوح ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی به خاک افزوده و پس از چهار ماه، هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، هدایت هیدرولیکی اشباع، تخلخل و کل آب قابل دسترس اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که کاربرد بیوپار موجب افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی و کل آب قابل دسترس و کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری شد، اما بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم و هدایت هیدرولیکی اشباع اثر معنی‌داری نداشت. در تیمار ۵ درصد بیوپار نسبت به شاهد، تخلخل کل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، کل آب قابل دسترس و هدایت هیدرولیکی اشباع به‌ترتیب ۲۷/۰۴، ۵۵/۲۰، ۴۴/۱۶، ۳۴/۴، ۵۱/۹۰ و ۳۸/۶۰ درصد افزایش و جرم مخصوص ظاهری ۲۲/۸۰ درصد کاهش یافت. در مجموع، کاربرد ۵ درصد بیوپار بیشترین بهبود را در کیفیت فیزیکی خاک و ظرفیت نگهداری آب ایجاد کرد و می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای ارتقای کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری مصرف آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: بیوپار، تخلخل خاک، رطوبت خاک، هدایت هیدرولیکی

ارجاع: این قسمت توسط دفتر مجله تکمیل خواهد شد.

۱- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- محقق بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز

۳- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

۴- دانشجوی سابق دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

۵- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

* نویسنده مسئول: majnooni@tabrizu.ac.ir

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، کاهش بارندگی و افزایش تقاضای آب، کمبود منابع آب را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان تبدیل کرده است. این شرایط ضرورت استفاده از راهکارهایی را که بتوانند ظرفیت نگهداشت آب در خاک و کارایی مصرف آب را افزایش دهند، بیش از پیش آشکار ساخته است. از سوی دیگر، کاهش ماده آلی خاک و تخریب ساختمان خاک موجب افت کیفیت فیزیکی و هیدرولیکی خاک و کاهش بهره‌وری سامانه‌های کشاورزی شده است. از این رو، استفاده از مواد آلی اصلاحی، از جمله بیوپار، به دلیل توانایی آن در بهبود خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک و افزایش بهره‌وری مصرف آب، به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای مقابله با کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطرح شده است (Basso et al., 2013).

بیوپار یک ماده جامد سیاه‌رنگ، متخلخل و غنی از کربن است که از پیرولیز زیست‌توده، شامل بقایای محصولات کشاورزی، شاخ و برگ، کاه و کلش، فضولات دامی و سایر پسماندهای آلی، در شرایط کمبود یا عدم حضور اکسیژن تولید می‌شود. ساختار متخلخل، سطح ویژه زیاد، پایداری بالای کربن و ظرفیت تبادل کاتیونی نسبتاً زیاد، بیوپار را به یکی از مهم‌ترین اصلاح‌کننده‌های آلی خاک تبدیل کرده است. کاربرد بیوپار با کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل، بهبود پایداری خاکدانه‌ها و افزایش ظرفیت نگهداشت آب، موجب بهبود خصوصیات فیزیکی، هیدرولیکی و شیمیایی خاک می‌شود (Acharya et al., 2024; Jiang et al., 2025). این تغییرات علاوه بر افزایش فراهمی آب و عناصر غذایی برای گیاه، کارایی مصرف کودها و بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی را نیز ارتقا می‌دهد (Sun et al., 2014).

علاوه بر نقش بیوپار در بهبود کیفیت خاک، تولید آن از بقایای کشاورزی و صنعتی به عنوان راهکاری برای مدیریت پایدار پسماندها و بازیافت زیست‌توده شناخته می‌شود. در این فرآیند، مواد آلی کم‌ارزش به محصولی پایدار و غنی از کربن تبدیل می‌شوند که قابلیت استفاده مجدد در سامانه‌های کشاورزی را دارد. از سوی دیگر، پایداری بالای بیوپار و مقاومت آن در برابر تجزیه، موجب تثبیت بلندمدت کربن در خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به ویژه دی‌اکسید کربن و اکسید نیتروژن، می‌شود و از این طریق می‌تواند در کاهش آثار تغییرات اقلیمی نقش مؤثری ایفا کند (Atkinson et al., 2010). به دلیل این ویژگی‌ها، طی دو دهه اخیر پژوهش‌های متعددی در نقاط مختلف جهان به بررسی اثرات بیوپار بر خصوصیات فیزیکی، هیدرولیکی و شیمیایی خاک پرداخته‌اند.

مطالعات متعددی اثرات مثبت بیوپار بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک را گزارش کرده‌اند. Han et al. (2023) نشان دادند که کاربرد بیوپار در خاک‌هایی با جرم مخصوص ظاهری بالا (بیش از ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و عناصر غذایی محدود، موجب بهبود همزمان عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب و نیتروژن می‌شود. همچنین، Guo et al. (2025) گزارش کردند که کاربرد بیوپار حاصل از دماهای مختلف پیرولیز در اراضی سیب‌زمینی مناطق خشک و نیمه‌خشک، سبب کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل، بهبود میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و افزایش پایداری خاکدانه‌ها شده و در نهایت موجب بهبود رفتار هیدرولیکی خاک و افزایش عملکرد محصول شد. در همین راستا، Yazdanpanahi et al. (2019) نیز نشان دادند که کاربرد بیوپار طبیعی و بیوپار کمپوست زباله شهری در یک خاک ماسه‌ای، موجب افزایش ظرفیت زراعی، آب قابل استفاده گیاه و دور آبیاری و در مقابل کاهش جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع شد که بیانگر نقش مؤثر بیوپار در بهبود رژیم رطوبتی خاک است. با وجود این، همه پژوهش‌ها نتایج مشابهی گزارش نکرده‌اند. Mohammadkhani et al. (2024) نشان دادند که کاربرد بیوپار در یک دوره کوتاه‌مدت (۴۰ روز)، تأثیر معنی‌داری بر جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، منحنی رطوبتی، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، آب قابل استفاده گیاه و سایر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نداشت. این تفاوت نتایج نشان می‌دهد که پاسخ ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک به کاربرد بیوپار همواره یکسان نیست و می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند نوع ماده اولیه، دمای پیرولیز، میزان مصرف، مدت زمان پس از کاربرد، بافت خاک و شرایط اقلیمی قرار گیرد. این موضوع با نتایج مطالعه مروری Zhu et al. (2025) نیز همخوانی دارد؛ به طوری که این پژوهشگران نشان دادند که نوع ماده اولیه، دمای پیرولیز و میزان مصرف بیوپار، مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده اثربخشی آن در بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک هستند. این وابستگی به ویژگی‌های بیوپار و خاک در مطالعات دیگر نیز تأیید شده است. Jiang et al. (2025) بر اساس یک فراتحلیل از ۶۱ مطالعه مزرعه‌ای نشان دادند که نوع ماده اولیه، میزان کاربرد و بافت خاک از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده پاسخ ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به بیوپار هستند. این مطالعه همچنین افزایش معنی‌دار تخلخل کل، هدایت هیدرولیکی اشباع، ظرفیت زراعی و آب قابل دسترس و کاهش جرم مخصوص ظاهری را در اثر کاربرد بیوپار گزارش کرد. همچنین، Mensah et al. (2025) در یک مطالعه مروری نشان دادند که اثر بیوپار بر ویژگی‌هایی مانند جرم مخصوص ظاهری، تخلخل و هدایت

هیدرولیکی به ویژگی‌های بیوجار و شرایط خاک وابسته است. (Osooli et al. (2022) نیز در یک مطالعه مزرعه‌ای بر روی خاک لوم شنی نشان دادند که هدایت هیدرولیکی اشباع به طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوجار قرار می‌گیرد که مؤید نقش تعیین‌کننده ویژگی‌های فیزیکی بیوجار در پاسخ هیدرولیکی خاک است.

بنابراین، اگرچه اغلب پژوهش‌ها اثر مثبت بیوجار بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک را گزارش کرده‌اند، شدت این اثرات به عواملی مانند نوع ماده اولیه، دمای پیرولیز، میزان مصرف، بافت خاک، شرایط اقلیمی و مدت زمان پس از کاربرد وابسته است. افزون بر این، اطلاعات اندکی درباره مقایسه همزمان اثر بیوجارهای حاصل از بقایای هرس درخت صنوبر و کاه و کلش گندم بر مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک، به‌ویژه در شرایط اقلیمی مناطق خشک و نیمه‌خشک شمال‌غرب ایران، وجود دارد. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که خاک‌های این منطقه عموماً از نظر ماده آلی فقیر هستند، در حالی که سالانه مقادیر قابل‌توجهی از بقایای هرس درختان صنوبر و کاه و کلش گندم بدون استفاده مناسب رها می‌شوند. با توجه به فراوانی این بقایای آلی در منطقه، بیوجار حاصل از آنها در این پژوهش به‌عنوان ماده اصلاحی انتخاب شد و اثر سطوح مختلف کاربرد آن بر برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک، شامل رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، رطوبت اشباع، چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، تخلخل، هدایت هیدرولیکی اشباع و کل آب قابل دسترس، بررسی شد. نوآوری این پژوهش در بررسی اثر بیوجار حاصل از بقایای محلی صنوبر و کاه و کلش گندم، با تأکید بر شرایط اقلیمی خشک و

نیمه‌خشک شمال‌غرب ایران و ارزیابی همزمان مجموعه‌ای از شاخص‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک در سطوح مختلف کاربرد بیوجار است. از این منظر، پژوهش حاضر علاوه بر بررسی ظرفیت بیوجار برای بهبود شرایط فیزیکی و هیدرولیکی خاک، امکان استفاده ارزشمند از بقایای آلی در دسترس منطقه را نیز مورد توجه قرار می‌دهد و می‌تواند شواهدی بومی برای استفاده از این مواد در مدیریت پایدار خاک فراهم کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز و آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی خاک واقع در ساختمان تحصیلات تکمیلی این دانشگاه انجام شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح کاربرد بیوجار معادل صفر (شاهد)، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی خاک بود.

خاک مورد نیاز برای آزمایش از لایه سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) یکی از اراضی زراعی متعلق به ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز برداشت شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، در دمای محیط خشک شدند و بقایای گیاهی، سنگریزه‌ها و سایر مواد درشت از آن‌ها جدا گردید. سپس خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شد تا برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی آماده شود. پیش از اعمال تیمارها، برخی ویژگی‌های اولیه خاک شامل بافت، اسیدیته (pH)، کربن آلی و کل مواد خنثی‌شونده اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

ردیف	ویژگی	واحد	روش اندازه‌گیری	مقدار	منبع
۱	شن			۶۲	
۲	سیلت	%	هیدرومتری	۲۴	(Gee and Or 2002)
۳	رس			۱۴	
۴	کلاس بافتی	-	مثلت بافت خاک	لوم شنی	(Soil 1996)
۵	اسیدیته	-	pH متر	۷/۶۵	(Miller and Kissel 2010)
۶	کربن آلی	%	تیتراسیون	۰/۴۸	(Nelson and Sommers 1996)
۷	کل مواد خنثی‌شونده	%	تیتراسیون با اسید و سود	۴	(Soil 1996)

این منظور، مواد اولیه جمع‌آور شده ابتدا در شرایط محیطی قرار داده شدند تا کاملاً هوا خشک شوند. سپس در یک آون الکتریکی تحت اتمسفر بدون اکسیژن (خنثی) با نرخ گرمایش ۱۵ درجه سانتیگراد بر دقیقه، دمای نهایی ۳۵۰ درجه سانتیگراد (برای کاه و کلش گندم) و ۴۰۰ درجه

بیوجار مورد استفاده در این پژوهش از اختلاط مساوی (۱:۱) وزنی (بیوجار حاصل از چوب صنوبر (شاخ و برگ هرس شده درختان تبریزی) و کاه و کلش گندم تهیه شدند. تولید بیوجارها در گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز و با استفاده از کوره پیرولیز مجتمع پتروشیمی تبریز انجام گرفت (Farajnia, 2025). به

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپارهای مورد استفاده و مخلوط حاصل در جدول ۲ ارائه شده است.

سانتیگراد (برای چوب صنوبر) حرارت داده شدند و به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای نهایی نگهداری شدند. پس از سرد شدن کوره تا دمای محیط، بیوپارهای تولیدشده از کوره خارج و به نسبت وزنی مساوی با یکدیگر مخلوط شدند. برخی

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپارهای حاصل از کاه و کلش گندم، چوب صنوبر و مخلوط آن‌ها (Farajnia, 2025)

ردیف	ویژگی	واحد اندازه‌گیری	گندم	صنوبر	ترکیب ۱:۱
۱	دمای پیرولیز	°C	۳۵۰	۴۰۰	-
۲	کربن	g kg ⁻¹	۵۵/۰۶	۶۲/۵۱	۵۸/۷۹
۳	هیدروژن	g kg ⁻¹	۳/۴۳	۳/۴۴	۳/۴۴
۴	اکسیژن	g kg ⁻¹	۲۶/۵۱	۲۵/۵۶	۲۶/۰۴
۵	pH	بدون واحد	۷/۵	۸	۷/۸
۶	هدایت الکتریکی	dS m ⁻¹	۱	۰/۵	۰/۷۵
۷	سطح ویژه	m ² g ⁻¹	۱۰۰	۱۵۰	۱۲۵
۸	ظرفیت تبادل کاتیونی	cmolc kg ⁻¹	۲۵	۳۵	۳۰
۹	ظرفیت نگهداری آب	g g ⁻¹	۳	۳/۵	۳/۲۵
۱۰	جرم مخصوص ظاهری	g cm ⁻³	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۳
۱۱	تخلخل	%	۷۰	۷۵	۷۲/۵

عصاره گل اشباع با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج اندازه‌گیری شد.

رطوبت ظرفیت مزرعه و رطوبت نقطه پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه صفحات فشار و به ترتیب در مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شدند (شکل ۱). پس از رسیدن نمونه‌ها به تعادل رطوبتی در هر فشار، نمونه‌ها در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند و مقدار رطوبت جرمی آن‌ها محاسبه گردید. کل آب قابل دسترس گیاه از اختلاف رطوبت ظرفیت مزرعه و رطوبت نقطه پژمردگی دائم و با در نظر گرفتن ضخامت لایه خاک داخل گلدان محاسبه شد.

پس از اختلاط کامل بیوپار با خاک، مخلوط‌های تهیه‌شده به گلدان‌های پلاستیکی با قطر فوقانی ۲۳ سانتی متر، قطر پایینی و ارتفاع ۱۸ سانتی متر منتقل شدند. گلدان‌ها به مدت چهار ماه در شرایط گلخانه نگهداری شدند. در طول دوره انکوباسیون، رطوبت خاک به‌طور منظم در محدوده ظرفیت مزرعه حفظ شد و به همین منظور، کاهش رطوبت خاک با افزودن آب مقطر جبران گردید تا شرایط یکنواخت رطوبتی برای تمامی تیمارها فراهم شود.

پس از پایان دوره انکوباسیون، هدایت الکتریکی و ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک مطابق روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند (جدول ۳). هدایت الکتریکی در



د: خشک کردن نمونه‌ها و تعیین رطوبت موردنظر



ج: تنظیم فشار ماتریک مورد نظر



ب: قرار دادن نمونه‌ها روی صفحات سرامیکی



الف: اشباع کردن نمونه‌ها

شکل ۱- مراحل تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه صفحات فشار

تعیین شد. هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش بار ثابت بر روی نمونه‌های دست‌نخورده خاک اندازه‌گیری شد. در این روش، پس از اشباع کامل نمونه‌ها، جریان آب تحت گرادیان

جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از استوانه نمونه‌برداری و بر اساس نسبت جرم خشک خاک به حجم استوانه تعیین گردید. تخلخل کل خاک نیز با استفاده از روش پیکنومتر گازی

هیدرولیکی ثابت برقرار شد و هدایت هیدرولیکی اشباع بر اساس قانون دارسی محاسبه گردید. این روش به دلیل دقت مناسب، برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی خاک‌های با بافت متوسط

تا درشت مورد استفاده قرار گرفت. کلیه اندازه‌گیری‌ها بر اساس روش‌های استاندارد آزمایشگاهی انجام شد و روش اندازه‌گیری هر یک از ویژگی‌های مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری خاک بعد از اعمال تیمارهای بیوچار

ردیف	ویژگی	واحد	روش اندازه‌گیری	رفرنس
۱	هدایت الکتریکی (EC)	dS m^{-1}	EC متر	(Corwin and Lesch 2005)
۲	جرم مخصوص ظاهری	g cm^{-3}	استوانه نمونه‌برداری	(Grossman and Reinsch, 2002)
	تخلخل کل	%	پیکنومتر گازی	(Flint and Flint, 2002)
	رطوبت اشباع		روش وزنی	-
۴	رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)	درصد وزنی	دستگاه صفحات فشاری	Romano and santini, 2002
۵	رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP)		اختلاف رطوبت FC و PWP	
۶	کل آب در دسترس	mm		
۷	هدایت هیدرولیکی اشباع	cm hr^{-1}	بار ثابت	Reynolds and Elrick, 2002

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. ابتدا نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو ویلک^۱ بررسی شد. همچنین همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون لون^۲ مورد بررسی قرار گرفت. پس از تأیید پیش‌فرض‌های آزمون پارامتریک، تحلیل واریانس یک طرفه^۳ برای تعیین اثر معنی‌دار تیمارهای بیوچار بر هر یک از ویژگی‌های خاک انجام شد. در صورت معنی‌دار شدن اثر تیمار، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج آزمون شاپیرو-ویلک نشان داد که داده‌های حاصل از اندازه‌گیری ویژگی‌های مورد بررسی، در سطح احتمال ۵ درصد

از توزیع نرمال انحراف معنی‌داری نداشتند ($P>0.05$). همچنین، نتایج آزمون لون نشان داد که شواهدی دال بر ناهمگنی واریانس‌ها بین تیمارها وجود نداشت. بنابراین، با تأیید پیش‌فرض‌های تحلیل واریانس، اثر سطوح مختلف بیوچار بر ویژگی‌های مورد بررسی با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه بررسی شد. نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج، کاربرد بیوچار اثر بسیار معنی‌داری ($P<0.01$) بر جرم مخصوص ظاهری، رطوبت ظرفیت زراعی و کل آب قابل استفاده داشت. همچنین، هدایت الکتریکی، رطوبت اشباع و تخلخل خاک نیز در سطح احتمال پنج درصد ($P<0.05$) تحت تأثیر تیمارهای بیوچار قرار گرفتند. در مقابل، اثر بیوچار بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم و هدایت هیدرولیکی اشباع از نظر آماری معنی‌دار نبود.

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر بیوچار روی ویژگی‌های خاک مورد آزمایش

منبع تغییر	درجه آزادی	هدایت الکتریکی	جرم مخصوص ظاهری	تخلخل کل	رطوبت اشباع	رطوبت ظرفیت مزرعه	رطوبت نقطه پژمردگی دائم	کل آب در دسترس	هدایت هیدرولیکی اشباع
تیمار	۳	۰/۰۶۳*	۰/۰۶۸**	۹۳/۷۲*	۲۰۲/۷۹*	۱۰۴/۶**	۲/۹ ^{ns}	۷۲/۷**	۱۱/۰۶ ^{ns}
خطای آزمایشی	۸	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۲۲/۷۷	۳۸/۶۵	۵/۴۵	۱/۵۵	۳/۸۰	۵/۵۲
ضریب تغییرات (%)	-	۷/۵۷	۴/۶۲	۱۰/۳۶	۱۷/۳۶	۱۱/۷۳	۱۶/۸۵	۱۵/۶۱	۱۷/۷۶

جدول ۵ میانگین مقادیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را در تیمارهای مختلف بیوچار نشان می‌دهد. با افزایش سطح

کاربرد بیوچار، جرم مخصوص ظاهری خاک از ۱/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب در تیمار شاهد به ۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر

³. One-way ANOVA

¹. Shapiro-Wilk

². Levene's test

میانگین رطوبت نقطه پژمردگی دائم و هدایت هیدرولیکی اشباع نیز روند افزایشی داشتند، اما اختلاف بین تیمارها از نظر آماری معنی دار نبود ($P < 0.05$). در مجموع، نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار، به ویژه در سطوح بالاتر، موجب بهبود اغلب ویژگی های فیزیکی و هیدرولیکی خاک شد.

مکعب در تیمار ۵ درصد کاهش معنی داری یافت. در مقابل، تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه و کل آب قابل استفاده روند افزایشی نشان دادند، به طوری که مقادیر آنها به ترتیب از ۴۰/۵، ۲۶/۴۳، ۱۴/۷۲ و ۱۲/۳۱ در تیمار شاهد به ۵۳/۳ درصد، ۴۱/۰۲ درصد، ۲۱/۲۲ درصد و ۱۸/۷ میلی متر در تیمار ۵ درصد افزایش یافت. همچنین هدایت الکتریکی خاک در اثر کاربرد بیوچار افزایش معنی داری نشان داد. اگرچه

جدول ۵- مقایسه میانگین های ویژگی های فیزیکی و هیدرولیکی مورد آزمایش در سطوح مختلف بیوچار

تیمارها				واحد	ویژگی ها
سطوح بیوچار (درصد وزنی)					
۵	۳	۱	صفر		
۱/۴۰ ^a	۱/۴۲ ^a	۱/۳۶ ^a	۱/۱۱ ^b	dS m ⁻¹	هدایت الکتریکی
۱/۱۸ ^c	۱/۳۳ ^b	۱/۴۴ ^{ab}	۱/۵۳ ^a	g cm ⁻³	جرم مخصوص ظاهری
۵۵/۹ ^a	۴۸/۶۸ ^{ab}	۴۴/۶۱ ^b	۴۴ ^b	%	تخلخل کل
۴۱/۰۲ ^a	۳۴/۶۹ ^{ab}	۲۹/۹۶ ^b	۲۶/۴۳ ^b	%	رطوبت اشباع
۲۱/۲۲ ^a	۱۸/۶۸ ^b	۱۶/۹۵ ^{bc}	۱۴/۷۲ ^c	%	رطوبت ظرفیت مزرعه
۸/۷۵ ^a	۷/۴۶ ^a	۶/۸۷ ^a	۶/۵۱ ^a	%	رطوبت نقطه پژمردگی دائم
۱۸/۷۰ ^b	۱۶/۸۳ ^b	۱۵/۱۳ ^{bc}	۱۲/۳۱ ^c	mm	کل آب قابل دسترس
۱۵/۸۷ ^a	۱۳/۳۴ ^a	۱۲/۲۸ ^a	۱۱/۴۵ ^a	cm hr ⁻¹	هدایت هیدرولیکی اشباع

حروف یکسان نشان دهنده عدم معنی داری تأثیر بیوچار بکار رفته در خاک می باشد.

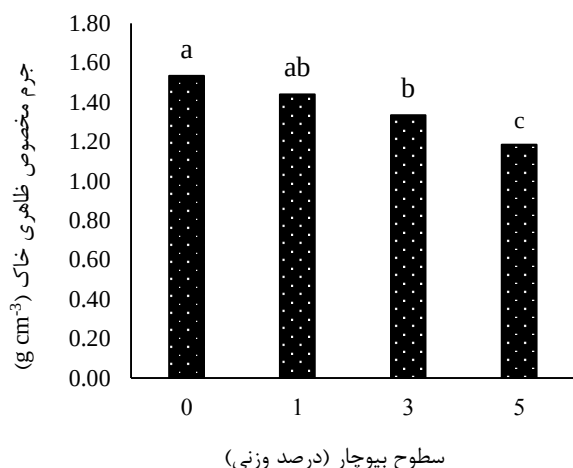
هدایت الکتریکی خاک

مقادیر هدایت الکتریکی خاک در تیمارهای مختلف بیوچار در شکل ۲ نشان داده شده است. کاربرد بیوچار موجب افزایش معنی دار هدایت الکتریکی خاک نسبت به تیمار شاهد شد. میانگین هدایت الکتریکی از ۱/۱۱ دسی زیمنس بر متر در تیمار شاهد به ۱/۳۶، ۱/۴۲ و ۱/۴۰ دسی زیمنس بر متر به ترتیب در تیمارهای ۱، ۳ و ۵ درصد افزایش یافت. اگرچه بیشترین مقدار هدایت الکتریکی در تیمار ۳ درصد مشاهده شد، اما اختلاف بین سطوح مختلف مصرف بیوچار از نظر آماری معنی دار نبود و هر سه تیمار در یک گروه آماری قرار گرفتند.

همان گونه که در جدول ۶ مشاهده می شود، کاربرد بیوچار موجب افزایش هدایت الکتریکی خاک نسبت به تیمار شاهد شد، به طوری که بیشترین درصد افزایش مربوط به تیمار ۳ درصد بود. با این حال، تفاوت درصد تغییرات بین سطوح مختلف مصرف بیوچار از نظر آماری معنی دار نبود (جدول ۴).

افزایش هدایت الکتریکی خاک در اثر کاربرد بیوچار را می توان به آزاد شدن نمک های محلول و کاتیون های بازی موجود در بیوچار، به ویژه پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم، نسبت داد که طی فرآیند پیرولیز در خاکستر بیوچار متمرکز شده و پس از افزودن به خاک وارد محلول خاک می شوند. در نتیجه، غلظت یون های محلول و هدایت الکتریکی خاک افزایش می یابد. با وجود این، مقادیر هدایت الکتریکی اندازه گیری شده در این پژوهش همچنان در محدوده غیرشور قرار داشت و از نظر کشاورزی محدودیتی برای رشد گیاه ایجاد نمی کند. این نتایج با یافته های (Najafi-Ghiri et al. 2018) که افزایش هدایت الکتریکی خاک در اثر کاربرد انواع بقایای گیاهی و بیوچار را گزارش کردند، همخوانی دارد.

میزان مصرف، به ویژگی‌های ساختاری و سطح ویژه بیوپچار وابسته است (Zhu et al., 2025; Jiang et al., 2025).



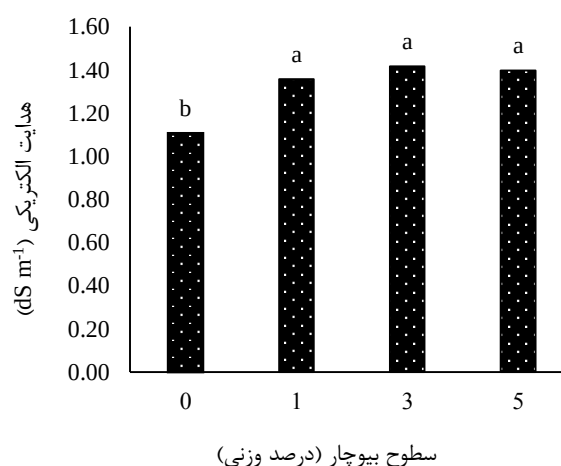
شکل ۳- تأثیر سطوح مختلف بیوپچار بر جرم مخصوص ظاهری خاک

تخلخل کل

شکل ۴ تغییرات تخلخل کل خاک را در سطوح مختلف کاربرد بیوپچار نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان مصرف بیوپچار، تخلخل کل خاک روندی افزایشی داشت، به طوری که مقدار آن از ۴۴ درصد در تیمار شاهد به ۴۸/۶۸، ۴۴/۶۱ و ۵۵/۹ درصد به ترتیب در تیمارهای ۱، ۳ و ۵ درصد افزایش یافت. نتایج آزمون دانکن نشان داد که تنها تیمار ۵ درصد بیوپچار افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد داشت، در حالی که اختلاف بین تیمارهای ۱ و ۳ درصد با شاهد از نظر آماری معنی‌دار نبود.

همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، درصد افزایش تخلخل با افزایش سطح کاربرد بیوپچار بیشتر شد و بیشترین افزایش در تیمار ۵ درصد به دست آمد.

افزایش تخلخل را می‌توان ناشی از چند سازوکار هم‌زمان دانست. از یک سو، چگالی کمتر بیوپچار نسبت به بخش معدنی خاک موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش حجم فضای منفذی می‌شود؛ از سوی دیگر، اختلاط ذرات بیوپچار با خاک می‌تواند با ایجاد فضای منفذی جدید در فصل مشترک بیوپچار-ذرات معدنی و بازآرایی شبکه منافذ، توزیع اندازه منافذ را تغییر دهد. مطالعات جدید نشان داده‌اند که افزایش تخلخل پس از کاربرد بیوپچار الزاماً تنها به تخلخل داخلی ذرات بیوپچار مربوط نیست، بلکه تغییر در ساختار خاک، تجمع ذرات و آرایش



شکل ۲- تأثیر سطوح مختلف بیوپچار بر هدایت الکتریکی خاک

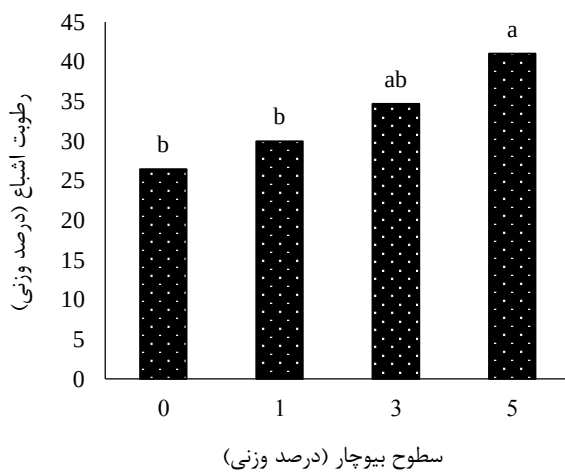
جرم مخصوص ظاهری خاک

تغییرات جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمارهای مختلف بیوپچار در شکل ۳ ارائه شده است. میانگین جرم مخصوص ظاهری از ۱/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب در تیمار شاهد به ۱/۴۴، ۱/۳۳ و ۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ترتیب در تیمارهای ۱، ۳ و ۵ درصد کاهش یافت. نتایج آزمون دانکن نشان داد که تیمار ۵ درصد بیوپچار اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت، در حالی که اختلاف بین تیمارهای ۱ و ۳ درصد معنی‌دار نبود.

همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان مصرف بیوپچار، درصد کاهش جرم مخصوص ظاهری نیز افزایش یافت و بیشترین کاهش در تیمار ۵ درصد مشاهده شد. این روند نشان می‌دهد که اثر بیوپچار بر کاهش جرم مخصوص ظاهری به میزان مصرف آن وابسته است.

کاهش جرم مخصوص ظاهری را می‌توان به چگالی کمتر بیوپچار نسبت به ذرات معدنی خاک و ساختار متخلخل آن نسبت داد. این کاهش تنها ناشی از اختلاف چگالی بیوپچار و بخش معدنی خاک نیست، بلکه می‌تواند حاصل تغییر آرایش ذرات و افزایش فضای بین‌ذره‌ای نیز باشد. بیوپچار به دلیل جرم مخصوص کم و ساختار متخلخل خود، بخشی از حجم ماتریس خاک را با ماده‌ای کم‌چگال جایگزین می‌کند و هم‌زمان می‌تواند از تراکم و آرایش فشرده ذرات معدنی جلوگیری کند. بنابراین، کاهش جرم مخصوص ظاهری مشاهده‌شده در این پژوهش را می‌توان حاصل اثر هم‌زمان جایگزینی حجمی بیوپچار، تخلخل ذاتی آن و بازآرایی ذرات خاک دانست. نتایج مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهد که پاسخ جرم مخصوص ظاهری به بیوپچار علاوه بر

کنند و با بهبود ساختمان خاک، ظرفیت نگهداری آب در حالت اشباع را افزایش دهند. همچنین، کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل که در این پژوهش نیز مشاهده شد، احتمالاً نقش مهمی در افزایش رطوبت اشباع داشته است. نتایج این پژوهش با یافته‌های Yazdanpanahi et al. (2019) همخوانی دارد که افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را در اثر کاربرد بیوپار گزارش کردند.



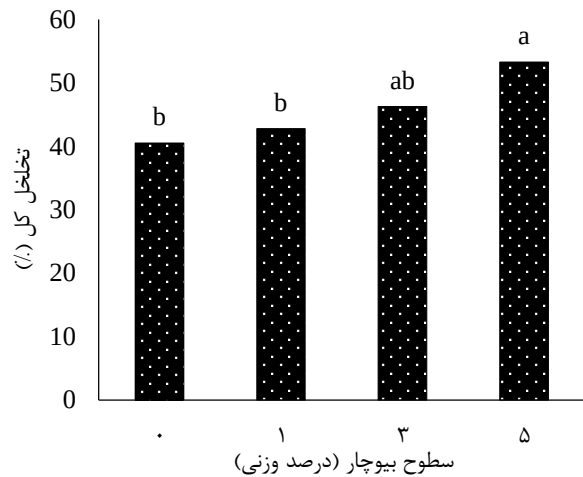
شکل ۵- تأثیر سطوح مختلف بیوپار بر رطوبت اشباع خاک

رطوبت ظرفیت مزرعه

شکل ۶ تغییرات رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) را در سطوح مختلف کاربرد بیوپار نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان مصرف بیوپار، رطوبت ظرفیت مزرعه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ($P < 0.01$)، به‌طوری‌که مقدار آن از ۲۱/۲۲ درصد در تیمار شاهد به ۱۶/۹۵، ۱۸/۶۸ و ۲۱/۲۲ درصد به‌ترتیب در تیمارهای ۱، ۳ و ۵ درصد رسید. نتایج آزمون دانکن نشان داد که تیمارهای ۳ و ۵ درصد افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد داشتند، در حالی که اختلاف بین تیمار ۱ درصد و شاهد از نظر آماری معنی‌دار نبود.

افزایش رطوبت ظرفیت زراعی را می‌توان به ساختار متخلخل بیوپار، سطح ویژه زیاد و افزایش تعداد ریزمنافذ نسبت داد که موجب افزایش نگهداری آب پس از زهکشی ثقیلی می‌شوند. همچنین کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل مشاهده‌شده در این پژوهش احتمالاً در افزایش ظرفیت زراعی خاک نقش مؤثری داشته‌اند، زیرا این تغییرات موجب افزایش حجم منافذ نگهدارنده آب در خاک می‌شوند. نتایج این پژوهش

و پیوستگی منافذ نیز نقش مهمی دارد (Acharya et al., 2024). همچنین، Faloye et al. (2024) نشان دادند که تغییر در توزیع اندازه منافذ و پیوستگی منافذ از مهم‌ترین سازوکارهای تعدیل ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در اثر کاربرد بیوپار است.



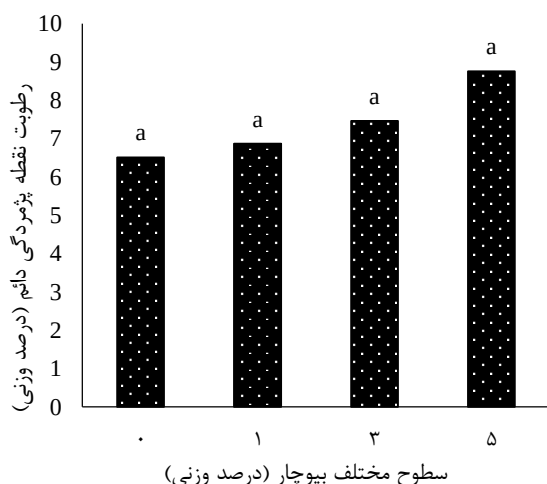
شکل ۴- تأثیر سطوح مختلف بیوپار بر تخلخل کل خاک

رطوبت اشباع خاک

شکل ۵ تغییرات رطوبت اشباع خاک در سطوح مختلف کاربرد بیوپار را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان مصرف بیوپار، رطوبت اشباع خاک روندی افزایشی داشت، به‌طوری‌که مقدار آن از ۲۶/۴۳ درصد در تیمار شاهد به ۲۹/۹۶، ۳۴/۶۹ و ۴۱/۰۲ درصد به‌ترتیب در تیمارهای ۱، ۳ و ۵ درصد افزایش یافت. نتایج آزمون دانکن نشان داد که افزایش رطوبت اشباع در تیمار ۵ درصد نسبت به شاهد معنی‌دار بود، در حالی که بین تیمارهای ۳ و ۵ درصد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.

همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، درصد افزایش رطوبت اشباع با افزایش سطح کاربرد بیوپار بیشتر شد و بیشترین مقدار آن در تیمار ۵ درصد به دست آمد. (Nowroozi et al., 2017) نیز در خاک لوم شنی با بیوپار برگ خرما، افزایش حدود ۲۳ درصدی رطوبت اشباع را گزارش کردند. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقدار بیوپار، ظرفیت خاک برای نگهداری آب در حالت اشباع را بهبود می‌بخشد.

افزایش رطوبت اشباع را می‌توان به ساختار متخلخل بیوپار، سطح ویژه زیاد و افزایش تخلخل کل خاک نسبت داد. منافذ داخلی بیوپار قادرند مقدار قابل‌توجهی آب را در خود ذخیره



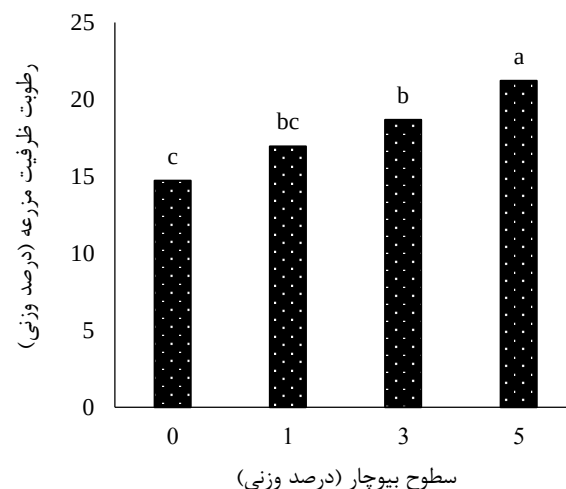
شکل ۷- تأثیر سطوح مختلف بیوجار بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم

کل آب قابل دسترس گیاه

شکل ۸ تغییرات کل آب قابل دسترس گیاه را در سطوح مختلف کاربرد بیوجار نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان مصرف بیوجار، مقدار آب قابل دسترس گیاه روندی افزایشی داشت، به‌طوری‌که میانگین آن از ۱۲/۳۱ میلی‌متر در تیمار شاهد به ۱۵/۱۳، ۱۶/۸۳ و ۱۸/۷ میلی‌متر به‌ترتیب در تیمارهای ۱، ۳ و ۵ درصد افزایش یافت. نتایج آزمون دانکن نشان داد که تیمارهای ۳ و ۵ درصد بیوجار افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد و تیمار ۱ درصد داشتند.

افزایش کل آب قابل دسترس گیاه را می‌توان به افزایش قابل توجه رطوبت ظرفیت زراعی و افزایش محدود رطوبت نقطه پژمردگی دائم نسبت داد. به بیان کمی، در تیمار ۵ درصد، افزایش FC از ۱۴/۷۲ به ۲۱/۲۲ درصد، در حالی رخ داد که PWP از ۶/۵۱ به ۸/۷۵ درصد افزایش یافت؛ بنابراین، افزایش FC نسبت به افزایش PWP بیشتر بود و در نتیجه دامنه آب قابل استفاده افزایش یافت. این الگو نشان می‌دهد که بیوجار در شرایط این آزمایش بیشتر ظرفیت نگهداری آب در منافذ قابل استفاده برای گیاه را افزایش داده است تا مقدار آب غیرقابل استفاده را. از این منظر، افزایش کل آب قابل دسترس گیاه را می‌توان پیامد مستقیم تغییر توزیع منافذ و افزایش ظرفیت نگهداری آب در محدوده رطوبتی قابل استفاده دانست. در واقع، کاربرد بیوجار موجب شد ظرفیت نگهداری آب در خاک بیش از مقدار آب غیرقابل استفاده برای گیاه افزایش یابد؛ در نتیجه اختلاف بین رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت نقطه پژمردگی دائم بیشتر شده و آب قابل استفاده گیاه

با یافته‌های (Alburquerque et al. 2014) همخوانی دارد که گزارش کردند کاربرد بیوجار، به‌ویژه در مقادیر بالا، موجب افزایش ظرفیت زراعی خاک و بهبود بهره‌وری آب می‌شود.



شکل ۶- تأثیر سطوح مختلف بیوجار بر رطوبت ظرفیت مزرعه

رطوبت نقطه پژمردگی دائم

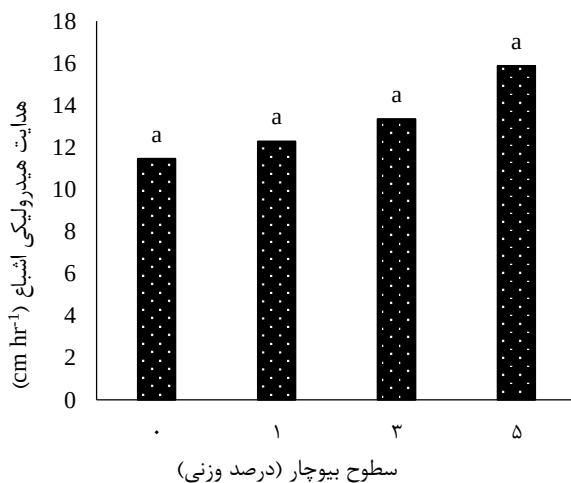
شکل ۷ تغییرات رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) خاک را در سطوح مختلف کاربرد بیوجار نشان می‌دهد. میانگین رطوبت نقطه پژمردگی دائم از ۶/۵۱ درصد در تیمار شاهد به ۶/۸۷، ۷/۴۶ و ۸/۷۵ درصد به‌ترتیب در تیمارهای ۱، ۳ و ۵ درصد افزایش یافت. با وجود این روند افزایشی، نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اختلاف بین تیمارها از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۴).

عدم معنی‌داری تغییرات رطوبت نقطه پژمردگی دائم نشان می‌دهد که کاربرد بیوجار در شرایط این پژوهش تأثیر محدودی بر مقدار آب نگهداری‌شده در ریزمنافذ بسیار کوچک خاک داشته است.

در مقابل، افزایش معنی‌دار FC بدون تغییر معنی‌دار PWP می‌تواند نشان دهد که تغییرات ساختاری ایجادشده در اثر بیوجار عمدتاً در محدوده منافذ ریز و میانی مؤثر بر نگهداشت آب در ظرفیت زراعی رخ داده است، در حالی که حجم منافذ بسیار ریز و آب به‌شدت متصل‌شده به سطوح ذرات که در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال نگهداری می‌شود، تغییر محدودی داشته است. بنابراین، پاسخ متفاوت FC و PWP در این پژوهش می‌تواند نشان‌دهنده تغییر انتخابی‌تر در توزیع اندازه منافذ، به جای افزایش یکنواخت تمام منافذ خاک، باشد.

کوتاه مدت بیوچار تأثیر معنی داری بر هدایت هیدرولیکی و رفتار هیدرولیکی خاک نداشته است. در مقابل، Nasimi et al. (2020) در خاک لوم رسی شنی با بیوچار برگ خرما، افزایش معنی دار هدایت هیدرولیکی اشباع را پس از ۹ ماه انکوباسیون گزارش کردند که نشان دهنده نقش مدت زمان در بروز اثرات بیوچار است.

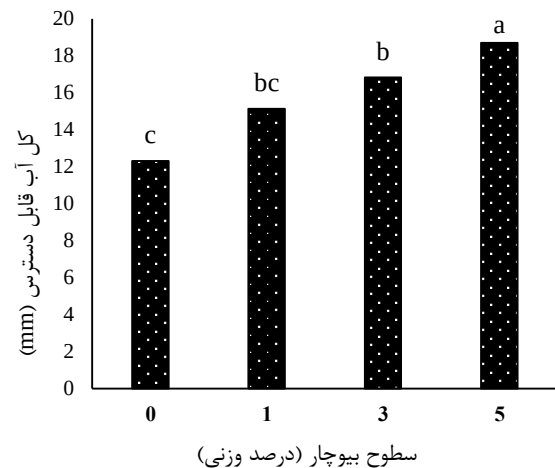
روند افزایشی هدایت هیدرولیکی را می توان به کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل و بهبود ساختمان خاک در اثر کاربرد بیوچار نسبت داد که موجب افزایش پیوستگی منافذ و تسهیل حرکت آب در خاک می شود. با این حال، افزایش تخلخل کل الزاماً به افزایش معنی دار هدایت هیدرولیکی اشباع منجر نمی شود؛ زیرا هدایت هیدرولیکی اشباع علاوه بر حجم کل منافذ، به اندازه، شکل و پیوستگی منافذ و وجود مسیرهای پیوسته برای انتقال آب وابسته است. مطالعات اخیر نشان داده اند که تغییر در پیوستگی منافذ و افزایش منافذ بزرگ و کشیده می تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد هیدرولیکی خاک پس از کاربرد بیوچار داشته باشد (Faloye et al., 2024).



شکل ۹- تأثیر سطوح مختلف بیوچار بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

به منظور جمع بندی نتایج، درصد تغییرات ویژگی های اندازه گیری شده در سطوح مختلف کاربرد بیوچار نسبت به تیمار شاهد در جدول ۶ ارائه شده است.

افزایش یافت. این موضوع از نظر مدیریت آبیاری و افزایش بهره وری مصرف آب، یکی از مهم ترین مزایای کاربرد بیوچار محسوب می شود. نتایج این پژوهش با یافته های Yazdanpanahi et al. (2019) همخوانی دارد؛ به طوری که این پژوهشگران نیز افزایش قابل توجه آب قابل دسترس گیاه در اثر کاربرد بیوچار را گزارش کردند.



شکل ۸- تأثیر سطوح مختلف بیوچار بر کل آب قابل دسترس گیاه

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

شکل ۹ تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را در سطوح مختلف کاربرد بیوچار نشان می دهد. میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع از ۱۱/۴۵ سانتی متر بر ساعت در تیمار شاهد به ۱۲/۲۸، ۱۳/۳۴ و ۱۵/۸۷ سانتی متر بر ساعت به ترتیب در تیمارهای ۱، ۳ و ۵ درصد افزایش یافت. اگرچه روند تغییرات نشان دهنده افزایش هدایت هیدرولیکی با افزایش میزان مصرف بیوچار بود، اما نتایج تجزیه واریانس نشان داد که این افزایش از نظر آماری معنی دار نبود (جدول ۴). نتایج این پژوهش از نظر روند کلی با یافته های Razzaghi and Rezaie (2017) و همخوانی دارد که افزایش هدایت هیدرولیکی خاک پس از کاربرد بیوچار را گزارش کردند. با این حال، عدم مشاهده اختلاف معنی دار در پژوهش حاضر با نتایج Mohammadkhani et al. (2024) نیز مطابقت دارد؛ به طوری که آنان نیز گزارش کردند کاربرد

جدول ۶- درصد تغییرات ویژگی های اندازه گیری شده در سطوح مختلف کاربرد بیوچار نسبت به تیمار شاهد

ویژگی	سطوح بیوچار (درصد وزنی)
-------	-------------------------

۵	۳	۱	
۲۶/۲۰	۲۸/۰۱	۲۲/۵۹	هدایت الکتریکی
-۲۲/۸۰	-۱۳/۰۴	-۵/۸۸	جرم مخصوص ظاهری
۲۷/۰۴	۱۰/۶۳	۱/۳۸	تخلخل کل
۵۵/۲۰	۳۱/۲۵	۱۳/۳۵	رطوبت اشباع
۴۴/۱۶	۳۳/۶۹	۱۵/۱۵	رطوبت ظرفیت مزرعه
۳۴/۴	۱۴/۵۹	۵/۵۲	رطوبت نقطه پژمردگی دائم
۵۱/۹	۳۶/۷۲	۲۲/۹	کل آب قابل دسترس
۳۸/۶۰	۱۶/۵	۷/۲۴	هدایت هیدرولیکی اشباع

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد بیوپار حاصل از بقایای هرس درخت صنوبر و کاه و کلش گندم، موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک شد. در مقایسه با تیمار شاهد، کاربرد ۵ درصد بیوپار باعث کاهش ۲۲/۸ درصدی جرم مخصوص ظاهری و افزایش ۲۷/۰۴ درصدی رطوبت تخلخل کل، ۵۵/۲۰ درصدی رطوبت اشباع، ۴۴/۱۶ درصدی رطوبت ظرفیت مزرعه و ۵۱/۹۰ درصدی کل آب قابل دسترس گردید. همچنین هدایت الکتریکی خاک در اثر کاربرد بیوپار افزایش معنی‌داری نشان داد. اگرچه میانگین رطوبت نقطه پژمردگی دائم و هدایت هیدرولیکی اشباع نیز روند افزایشی داشتند، اما اختلاف بین تیمارها از نظر آماری معنی‌دار نبود. در شرایط گلخانه‌ای و در دامنه سطوح مورد بررسی، کاربرد ۵ درصد وزنی بیوپار بیشترین بهبود را در اغلب شاخص‌های اندازه‌گیری شده ایجاد کرد. برتری تیمار ۵ درصد وزنی بیوپار را می‌توان به ساختار متخلخل و جرم مخصوص پایین بیوپار و در نتیجه افزایش حجم منافذ خاک نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل، رطوبت اشباع و به‌ویژه رطوبت ظرفیت زراعی را به دنبال داشت. از آنجا که افزایش رطوبت ظرفیت زراعی در مقایسه با تغییرات رطوبت نقطه پژمردگی دائم بیشتر بود، در نهایت مقدار کل آب قابل دسترس نیز افزایش یافت. این یافته نشان می‌دهد که بیوپار می‌تواند با افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، پتانسیل کاهش تنش آبی و افزایش فاصله بین آبیاری‌ها و در نتیجه بهبود مدیریت آب را داشته باشد.

با توجه به فراوانی بقایای هرس درختان و کاه و کلش در مناطق کشاورزی، تبدیل این پسماندها به بیوپار، علاوه بر مدیریت پایدار بقایای آلی، می‌تواند راهکاری برای بهبود کیفیت فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب، به‌ویژه در خاک‌های فقیر از ماده آلی مناطق خشک و نیمه‌خشک، باشد. با این حال، از آنجا که پژوهش حاضر در شرایط گلخانه‌ای و طی یک دوره چهارماهه انجام شد، نتایج آن نباید به‌عنوان تعیین سطح بهینه مصرف بیوپار در شرایط مزرعه تلقی شود. بنابراین، ارزیابی پایداری اثر بیوپار در بلندمدت، بررسی پاسخ خاک و گیاه در شرایط مزرعه و تعیین سطح بهینه کاربرد آن در خاک‌های با بافت‌های مختلف، به‌ویژه با توجه به تأثیر آن بر نیاز آبی و بهره‌وری مصرف آب، به مطالعات آینده نیاز دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشگاه تبریز و شرکت پتروشیمی تبریز به‌دلیل فراهم نمودن امکانات و تجهیزات لازم برای انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: راهنمایی، بازبینی متن مقاله، تحلیل اولیه داده‌ها

- biochar from different parts of the mango plant. *Soil and Tillage Research*, 236, 105944. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105944>
8. Farajnia, H., 2025. The effect of different levels of biochar and irrigation water on Basil plant growth and numerical simulation of nitrate leaching rate in greenhouse conditions. PhD Thesis. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. [In Persian]
 9. Farajnia, H., Majnooni-Heris, A., Bolandnazar S. and Rezaverdinejad, V., 2025. Biochar and Irrigation Effects on Sweet Basil Growth and Water Use Efficiency in Greenhouse. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25, pp.6988–7000. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02576-9>
 10. Flint, L.E. and Flint, A.L., 2002. Porosity, in J.H. Dane and G.C. Topp (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America, pp.721-738.
 11. Grossman, R.B. and Reinsch, T.G., 2002. Bulk Density and Linear Extensibility, in Dane, J.H. and Topp, G.C. (eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America, pp.201–228.
 12. Guo, J., Zhou, H., Jia, L., Wang, Y and Fan, M., 2025. Effects of biochar from different pyrolysis temperatures on soil physical properties and hydraulic characteristics in potato farmland of arid and semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 313, 109483. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109483>
 13. Han, M., Zhang, J., Zhang, L and Wang, Z., 2023. Effect of biochar addition on crop yield, water and nitrogen use efficiency: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138425>
 14. Jiang, Z., Huang, S. and Meng, Z., 2025. Long-term effects of biochar on the hydraulic properties of soil: A meta-analysis based on 1–10 years field experiments. *Geoderma*, 458, 117318. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117318>
 15. Mensah, S.A., Simpson, A.R., Sabi, E.B., Amoatey, P.K., Ofori, P.A., Owusu-Nketia, S., Dwomoh, F.A. and Asenso, E., 2025. Impact of biochar application on soil physical and

نویسنده دوم: تحلیل آماری داده‌ها، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

نویسنده سوم: انجام مراحل آزمایشگاهی و گلخانه‌ای، جمع‌آوری داده‌ها

نویسنده چهارم: تهیه بیوچار و اندازه‌گیری خصوصیات آن
نویسنده پنجم: تهیه فایل اولیه مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

1. Acharya, B.S., Dodla, S., Wang, J.J., Pavuluri, K., Darapuneni, M., Dattamudi, S., Maharjan, B. and 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>
2. Antonio Alburquerque, J., Calero, J. M., Barrón, V. and Villar, R., 2014). Effects of biochar produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 4061. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200652>
3. Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D. and Hipps, N.A., 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and soil*, 337, pp.1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
4. Basso, A.S., Miguez, F.E. Laird, D.A. Horton, R. and Westgate, M., 2013. Assessing potential of biochar for increasing water- holding capacity of sandy soils. *Global Change Biology Bioenergy*, 5, pp.132-143. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12026>
5. Black, G.A., Evans, D.D., White, J.L., Ensminger, L.E. and Clerk, F.E., 1965. *Methods of Soil Analysis*. Parts 1 and 2. Madison: American Society of Agronomy.
6. Blake, G.R. and Hartge, K.H., 1986. Bulk density, in A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part Physical and Mineralogical Methods*. 2nd edn. Madison, WI: Soil Science Society of America, pp.363-382.
7. Faloye, O.T., Ajayi, E.A., Rostek, J., Schroeren, V., Babalola, T., Fashina, A. and Horn, R., 2024. Hydraulic and pore functions of differently textured soils modified by

- Elsgaard, L., 2014. Effect of biochar on aerobic processes, enzyme activity, and crop yields in two sandy loam soils. *Biology and Fertility of Soils*, 50, pp.1087-1097. <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0928-5>
25. Thomas, G.W. (1996). Soil pH and Soil Acidity, in D.L. Sparks (ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3-Chemical Methods*. Madison WI: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, pp.475-489.
26. Yazdanpanahi, A., Ahmadaali, K., Zare, S. and Jafari, M., 2019. The effect of two different biochars on the soil physical properties affecting irrigation management in desert regions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), pp.965-975. [In Persian]. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008479.1398.50.4.16.4>
27. Zhu, Z., Zhang, Y., Tao, W., Zhang, X., Xu, Z. and Xu, C., 2025. The biological effects of biochar on soil's physical and chemical characteristics: a review. *Sustainability*, 17, 2214. <https://doi.org/10.3390/su17052214>
- biogeochemical characteristics: a review. *Applied and Environmental Soil Science*, (1), 3734167. <https://doi.org/10.1155/aess/3734167>
16. Mohammadkhani, Z., Zeinalzadeh, K. and Kheirfam, H., 2024. Evaluation of the short-term affectivity of soil physical and hydraulic properties from biochar. *Applied Soil Reserarch*, 12(1), pp.68-82. [In Persian]. 10.30466/asr.2024.121475
17. Najafi-Ghiri, M., Boostani, H. R and Mahmoodi, A. R., 2018. Effect of three plant species residues and their biochars on some properties and potassium status of a calcareous soil. *Journal of soil research*, 32 (1), pp.25-36. [In Persian]
18. Nasimi P, Karimi A. and Motaghian H., 2019. Effects of Biochar produced from date palm's leaves on saturated hydraulic conductivity and soil moisture coefficients of sandy clay loam soil. *Iranian Water Research Journal*, 13(3), pp.161-171. [In Persian]
19. Nowroozi, M., Tabatabaei, S.H., Nouri, M.R. and Motaghian, H., 2017. Short-term effects of biochar produced from date palm's leaves on moisture retention in sandy loam soil. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 6(2), pp.137-150. [In Persian]
20. Osooli, H., Karimi, A., Tabatabaei, S. and Shirani, H., 2022. Biochar application impacts on water infiltration rate into soil and field saturation hydraulic conductivity of sandy loam soil. *Iranian Water Research Journal*, 16(1), pp. 103-112. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.10110.235>
21. Razzaghi, F. and Rezaie, N., 2017. Effects of different levels of biochar on soil physical properties with different textures. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 7 (1), 75- 89. [In Persian]
22. Reynolds, W.D. and Elrick, D.E., 2002. Saturated and Field-Saturated Water Flow Parameters—Constant Head Soil Core (Tank) method, in Dane, J.H. and Topp, G.C. (eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America, pp.815–821.
23. Romano, N. and Santini, A., 2002. Water Retention and Storage-Field, in J.H. Dane and G.C. Topp (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America, pp.721-738.
24. Sun, Z., Bruun, E.W. Arthur, E. De Jonge, L.W. Moldrup, P. Hauggaard-Nielsen, H. and