



Effect of *Conocarpus* biochar on some physical and mechanical properties of calcareous soil under corn cultivation

Ahmad Farrokhian Firouzi^{1*}, Milad Biria², Abdulmir Moezzi³, Afrasyab Rahnama⁴

¹ Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

² Ph.D. Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Khuzestan University of Agriculture and Natural Resources, Mollasani, Iran

³ Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Production Engineering and Plant Genetic, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Extended Abstract

Introduction

Biochar is a potential soil amendment produced by pyrolyzing waste organic materials. Biochar with improving soil quality indicators could increase soil sustainability. Amending soil with biochar enhances soil quality and stimulates plant growth. So far, most studies have investigated the potential impacts of biochar on soil fertility, soil biota, soil chemical properties, soil greenhouse gas emissions, and remediation of contaminated soils. Comparatively, a minimal number of research has been carried out on the implications of biochar application on soil's physical and mechanical properties on the field scale and in the presence of plants. This study aimed to investigate the effect of *Conocarpus erectus* biochar as a modifier on some mechanical properties of soil (shear strength (SS), coefficient of linear extensibility (COLE), liquid limit (LL), plastic limit (PL) moistures, and plasticity index (PI)) as well as some physical properties includes soil porosity, soil moisture retention (field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), and plant water available content (AWC)), soil air capacity (SAC), and bulk density (BD).

Materials and Methods

The research experiment was conducted in a completely randomized block design with three replications. The treatments including biochar at three levels (zero, three, and six ton ha⁻¹) were added into a calcareous soil. The biochar was produced from *Conocarpus erectus* wood through the slow pyrolysis process at 550 °C. Before being applied to soil plots, the biochar was crushed to pieces smaller than 0.5 cm. The biochar was mixed to around 20 cm soil depth and soil moisture was kept at 70% of field capacity for three months. The corn plant was then planted and harvested after three months. Then soil samples were collected and used for physical and mechanical experiments. Some physical and mechanical properties of soil include SS, COLE, LL, PL moistures, PI, BD, porosity, SAC, FC, and PWP moisture were measured. The surface functional groups analysis of the biochars was detected using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Furthermore, the surface morphology of bulk biochar was portrayed by a scanning electron microscope (SEM).

Results and Discussion

The results of the analysis of variance (ANOVA) indicated that the addition of *Conocarpus erectus* biochar had a significant effect on the soil's physical properties (P < 0.01). The results revealed that the biochar significantly enhanced soil porosity, air capacity, and moisture content at FC and PWP, while diminished soil bulk density (P < 0.01). The amount of soil porosity, air capacity, FC, PWP moisture, and AWC in the treatments of three and six ton ha⁻¹ of biochar had a significant difference with the control treatment (P < 0.01). The increase of FC, PWP, and plant available water by raising the amount of biochar was attributed to the porosity of the biochar particles. The results of SEM images revealed that synthesized biochar is a porous material that significantly can enhance the total soil porosity and water retention capacity. Furthermore, the FTIR spectra of the synthesized biochar functional groups such as carboxylic acid, phenolic, ketone, ester, and, amine were detected. The findings of the ANOVA also show a significant effect (P < 0.01) of *Conocarpus erectus* biochar on the soil mechanical properties (SS, COLE, LL, PL moistures and PI). Moreover, the results of the mean comparison test revealed that three and six ton ha⁻¹ of biochar treatments had a significant difference with the control treatment (P < 0.01); The difference between three and six ton ha⁻¹ of biochar was also significant (P < 0.01). Application of the biochar increased LL, PL, and PI; while diminished shear strength and COLE index. In the treatments of three and six ton ha⁻¹ of the biochar, the amount of LL increased by 40.32 and 77.74%, respectively, and PL increased by 40.8 and 70%, respectively, compared to the control



treatment. Furthermore, the value of PI was enhanced by 38.33 and 71.66% in the biochar treatments of three and six ton ha⁻¹ compared to the control treatment. While, the amount of shear resistance in the treatments of three and six ton ha⁻¹ of the biochar decreased by 23.94 and 34.75%, respectively, compared to the control. The amount of decrease in COLE index at the three and six ton ha⁻¹ of the biochar compared to the control was 20.28 and 36.95%, respectively. The results also revealed that the application level of six ton ha⁻¹ biochar treatment increased the amount of porosity, SAC, FC, PWP, and AWC by 70, 13.7, 6.2, 5, and 8 %, compared to the control treatment. The application of biochar reduced the COLE index significantly; therefore, biochar has the potential to improve the mechanical characteristics of expandable soils.

Conclusion

This study showed that the biochar of *Conocarpus* as a suitable modifier improves the quality of the physical and mechanical properties of calcareous soils. According to the findings, it can be concluded that biochar by reducing soil bulk density, and shear strength, increasing porosity, water retention, plant available water, and air capacity, and improving soil consistency (Atterberg Limits) can provide suitable conditions for plant growth. The application of biochar not only has positive effects on the transport of nutrient elements, gases, heat, and water movement in soil but also by increasing soil porosity and water retention capacity provides beneficial conditions for plant growth. Therefore, in arid and semi-arid regions such as Khuzestan Province, which is facing the problem of lack of water resources and organic matter, biochar can be a valuable soil amendment. Overall, the use of biochar of *Conocarpus* could improve soil physical and mechanical properties at the field scale but long-term studies in different soils under plant cultivation are needed for a better understanding of its performance as a soil amendment.

Keywords: Coefficient of linear extensibility, Moisture retention, Shear strength, Soil amendment

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors of the article thank and appreciate the financial support of Shahid Chamran University of Ahvaz (research project number 1268).

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

All data generated during the manuscript analysis are included in the article. Further datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Contribution of authors

Ahmad Farrokhian Firouzi: Idea and experiments design, project supervision, data analysis and interpretation, materials/analysis tools, and article writing and editing; **Milad Biria:** Experiments, data analysis and interpretation, materials/analysis tools, article writing; **Abdulmir Moazzi:** Conceptualization, materials/analysis tool, article writing and editing; **Afrasiab Rahnama:** Conceptualization, materials/analysis tool; article writing and editing.

*Corresponding Author, E-mail: a.farrokhian@scu.ac.ir

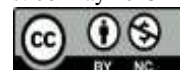
Citation: Farrokhian Firouzi, A., Biria, M., Moezzi, A.A., & Rahnama, A. (2024). Effect of *Conocarpus* biochar on some physical and mechanical properties of calcareous soil under corn cultivation. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(3), 19-38.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12233.1217

Received: 30 January 2023, Received in revised form: 04 May 2023, Accepted: 08 May 2023., Published online: 08 May 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 19-38

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





اثر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک آهکی تحت کشت ذرت

احمد فرخیان فیروزی^{۱*}، میلاد بی‌ریا^۲، عبدالامیر معزی^۳، افراسیاب راهنما^۴

^۱ دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
^۲ دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
^۳ استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
^۴ دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

زغال‌زیستی یک اصلاح‌کننده خاک است که از گرماکافت بقایای آلی تولید شده و نه تنها با بهبود کیفیت خاک پایداری آن را افزایش می‌دهد، بلکه رشد گیاه را نیز تحریک می‌کند. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر کاربرد زغال‌زیستی تولیدشده از بقایای کنوکارپوس (*Conocarpus erectus*) به‌عنوان اصلاح‌کننده بر برخی ویژگی‌های مکانیکی خاک شامل مقاومت برشی (SS) ضریب انبساط و انقباض‌پذیری (COLE) و حدود پایایی خاک شامل حد روانی (LL) حد خمیرایی (PL) و شاخص خمیرایی (PI) و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند جرم مخصوص ظاهری (BD)، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) و نگهداشت رطوبت (AWC) بوده است. بدین منظور آزمایشی در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و با سه تکرار اجرا شد. سطوح صفر، سه و شش تن در هکتار زغال‌زیستی کنوکارپوس انتخاب و به کرت‌هایی با ابعاد دو در سه متر افزوده شد. زغال‌زیستی به روش گرماکافت آهسته و در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس تهیه شد. پس از تهیه و آماده‌سازی خاک، تیمارها در کرت‌های مورد پژوهش، در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه برای سه ماه نگهداری شدند. سپس گیاه ذرت کشت و پس از مدت سه ماه برداشت شدند. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی شامل تخلخل، گنجایش هوای خاک (SAC)، BD، FC، PWP، AWC، SS، COLE، LL، PI و PL اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، تمامی تیمارهای زغال‌زیستی به‌طور معناداری ($P < 0/01$) سبب کاهش SS و COLE و افزایش LL، PI و PL خاک شدند. کاربرد تیمار شش درصد زغال‌زیستی در مقایسه با شاهد مقدار SS و COLE را به‌ترتیب ۳۴/۷ و ۳۶/۹۵ درصد کاهش و مقدار LL، PI و PL را به‌ترتیب ۷۰، ۷۷/۴، ۷۰، ۷۱/۶ درصد افزایش داد. نتایج نشان داد افزودن سطح شش درصد زغال‌زیستی به خاک مقدار تخلخل، SAC، FC، PWP، AWC را به‌ترتیب ۷۰، ۱۳/۷، ۶/۲ پنج و هشت درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد؛ درحالی‌که سبب کاهش معنادار BD خاک شد. همچنین، نتایج پژوهش حاضر حاکی از آن است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند استان خوزستان که با مسئله کمبود منابع آب و مواد آلی مواجه است، زغال‌زیستی کنوکارپوس می‌تواند اصلاح‌کننده‌ای مناسب برای بهبود کیفیت ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی خاک باشد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح خاک، ضریب انبساط و انقباض‌پذیری، مقاومت برشی، نگهداشت رطوبت

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.farrokhian@scu.ac.ir

استناد: فرخیان فیروزی، احمد، بی‌ریا، میلاد، معزی، عبدالامیر، و راهنما، افراسیاب (۱۴۰۳). اثر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک آهکی تحت کشت ذرت. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳): ۱۹-۳۸.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12233.1217

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۱۹ تا ۳۸

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

امروزه اهمیت مواد آلی در اصلاح خصوصیات فیزیکی خاک، مانند هدایت هیدرولیکی، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، نگهداشت رطوبت و ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت برشی خاک^۱، ضریب انبساط و انقباض‌پذیری^۲ و حدود آتربرگ^۳ (رطوبت حد روانی^۴، رطوبت حد خمیری^۵ و شاخص خمیری^۶) به خوبی شناخته شده است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک خاک‌ها به لحاظ مواد آلی فقیر بوده و کودهای آلی در اثر دمای بالا سریعاً تجزیه و نابود می‌شوند؛ لذا لازم است هر سال مواد آلی به خاک اضافه شود (Varghese et al., 2021; Uzoma et al., 2011). در سال‌های اخیر برای افزایش مقدار مواد آلی خاک از مواد پایدار، مانند زغال‌زیستی استفاده می‌شود که در مقابل تجزیه میکروبی بسیار مقاوم است (Yang et al., 2019). زغال‌زیستی ترکیب آلی غنی از کربن است که از طریق تجزیه گرمایی هر نوع زیتوده تحت شرایط بدون اکسیژن یا حضور جزئی آن به دست می‌آید که این فرآیند در اصطلاح گرماکافت^۷ گفته می‌شود، (Wang et al., 2020). فرآیند گرماکافت و تبدیل مواد آلی به زغال‌زیستی منجر به تبدیل حدود ۵۰ درصد کربن فعال ذخیره شده در بافت‌های گیاهی به منبعی از کربن آلی می‌شود. در حالی که تثبیت کربن در اثر سوختن معمولی حدود سه درصد و در اثر تجزیه زیستی کم‌تر از ۲۰ درصد گزارش شده است (Woolf et al., 2010). لذا، اساساً تولید زغال‌زیستی با هدف جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق تثبیت بلندمدت کربن پیشنهاد شده است و کاربرد آن در کشاورزی از اهداف جنبی تولید زغال‌زیستی است (Verheijen et al., 2019). در این راستا، نتایج پژوهش Andrenelli et al. (2016) نشان داد که اثر اصلاحی زغال‌زیستی بر ویژگی‌های خاک، علاوه بر شرایط گرماکافت، به نوع زیتوده، نوع خاک و میزان مصرف زغال‌زیستی بستگی دارد.

علی‌رغم اهمیت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک در افزایش تولید محصول، بررسی اثر زغال‌زیستی بر آن‌ها در مقایسه با ویژگی‌های شیمیایی توجه کم‌تری شده است. اخیراً گزارش‌هایی در خصوص نقش زغال‌زیستی در بهبود پایداری خاکدانه‌ها، افزایش تخلخل، کاهش جرم مخصوص ظاهری و

افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت^۸ ارائه شده است (Herath et al., 2013; Andrenelli et al., 2016; Verheijen et al., 2019; Toková et al., 2020; Abed Hussein et al., 2022). بر اساس پژوهش‌های انجام شده زغال‌زیستی نقش قابل ملاحظه‌ای در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تأمین برخی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه داشته و می‌توان از آن‌ها برای اصلاح ویژگی‌های خاک و افزایش پایدار محصول استفاده کرد. تأثیر زغال‌زیستی بر برخی ویژگی‌های خاک توسط پژوهش‌گران مختلف در جدول ۱ گزارش شده است. طی پژوهشی (Birria et al., 2017) تأثیر زغال‌زیستی باگاس نیشکر بر رشد گیاه ذرت در خاک آلوده به کادمیوم و سرب را بررسی کردند. نتایج نشان داد کاربرد زغال‌زیستی باگاس نیشکر در اثر کاهش شدید غلظت کادمیوم و سرب در ریشه و اندام هوایی موجب افزایش کلروفیل، سطح برگ، ارتفاع گیاه و وزن خشک ریشه و اندام هوایی شد. در پژوهشی دیگر (Moradi et al., 2017) دریافتند با افزایش مقدار زغال‌زیستی تهیه شده از ضایعات هرس سیب، هرس انگور و کاه و کلش گندم، مقدار کربن آلی خاک، و شکل‌های قابل استفاده پتاسیم، فسفر و منگنز به‌طور معناداری افزایش یافت.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمبود منابع آب، اولین و مهم‌ترین عامل محدودیت در توسعه کشاورزی است (Pahlavan et al., 2020). در این مناطق، آب عامل محدودکننده توسعه پوشش گیاهی بوده و رشد بسیاری از گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزودن مواد آلی اصلاحی به خاک، از طریق تأثیر بر افزایش، رطوبت قابل دسترس، کارایی مصرف آب و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک، یکی از راه‌های مؤثر در مقابله با کمبود آب به‌شمار می‌آید (Beigi Harchegani and Haghshenas Gorgabi, 2013; Melo Carvalho et al., 2014; Wang et al., 2018; Osooli et al., 2020). مطالعه (Abbasi et al., 2022) نیز نشان داد که استفاده از زغال‌زیستی چوب آلو و انار سبب تغییر منحنی مشخصه رطوبتی در نقاط بین رطوبت اشباع و ظرفیت زراعی خاک لوم رسی شد. همچنین، افزودن زغال‌زیستی دور آبیاری را در مقایسه با تیمارهای بدون زغال‌زیستی افزایش داد. این پژوهش‌گران نتیجه گرفتند استفاده از زغال‌زیستی در نواحی خشک و با کمبود آب، می‌تواند به واسطه نگهداشت بیش‌تر رطوبت و کاهش میزان تخییر کمک شایانی به کشاورزی نماید. طی پژوهشی (Lusiba et al., 2017) گزارش نمودند که استفاده از زغال‌زیستی سبب افزایش مقدار زیست‌توده، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب در

¹ Shear strength

² Coefficient of linear extensibility

³ Atterberg limits

⁴ Liquid limit

⁵ Liquid limit

⁶ Plasticity index

⁷ Pyrolysis

⁸ Water holding capacity (WHC)

هیدرولیکی اشباع و تهویه خاک و کاهش شاخص انبساط و انقباض پذیری خاک آن شد. در نهایت، Behnam et al. (2017) سطوح صفر، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار کمپوست باگاس نیشکر و سطوح صفر، دو، چهار و شش درصد زغال زیستی آن را به ستون های خاک اضافه نموده و در شرایط آزمایشگاهی به مدت شش ماه با رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نگهداری کردند. نتایج آن ها نشان داد تمامی تیمارهای زغال زیستی و کمپوست به طور معناداری موجب کاهش مقاومت برشی، ضریب انقباض و انبساط پذیری خاک و افزایش حد خمیریایی خاک شد.

خاک های رسی شده است. Langeroodi et al. (2019) زغال زیستی را در شرایط تنش خشکی به خاک افزودند که سبب کاهش مقدار آب آبیاری مصرفی و افزایش معناداری عملکرد محصول شد. در ادامه، Gao et al. (2020) بیان کردند که در مناطق خشک و نیمه خشک افزودن مواد آلی به شکل زغال زیستی می تواند به عنوان یک رویکرد جدید در افزودن مواد آلی در زمینه کشاورزی پایدار برای استفاده بهینه از منابع محدود آب کشاورزی استفاده شود. هم چنین، Gao Lu et al. (2014) گزارش دادند که کاربرد زغال زیستی خاکستر چوب به خاک رسی سبب بهبود ساختمان خاک، ظرفیت نگهداشت رطوبت، هدایت

جدول ۱- تأثیر زغال زیستی بر برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و مکانیکی خاک

Table 1- The effect of biochar on some physicochemical and mechanical properties of soil

منبع	تغییرات (درصد)	متغیر	دمای تهیه زغال زیستی (سلسیوس)	میزان مصرف زغال زیستی (تن در هکتار)	منبع زغال زیستی
(Herath et al., 2013)	(+17)-(4) (+12)	پایداری خاکدانه درصد حجمی آب	350 and 550	10	کلش ذرت
(Farrell et al., 2013)	(-10) (+139) (+100) (+100)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) هدایت هیدرولیکی اشباع - بار ثابت (سانتی متر بر ساعت) pH EC	450	150	بقایای گندم بقایای اوکالیپتوس
(Mukherjee and Lal, 2013)	(-0.24-0.29) (+73.2-106) (+7) (+15) (-13) (-92)	خروج کربن زغال زیستی تجزیه بومی زغال زیستی کربن آلی خاک سطح ویژه جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) تصادف تجمعی نیتروز اکسید	650	15	چوب بلوط
(Ouyang et al., 2013)	(+145) (+9) (+7.4) (+10.6)	تشکیل خاکدانه های بزرگ هدایت هیدرولیکی اشباع - بار ثابت (سانتی متر بر ساعت) درصد آب اشباع آب قابل دسترس	500	60	کود دامی
(Karami et al., 2011)	(+3.7) (+38.5) (+195) (-32) بی تأثیر (-69)	pH خاک کربن محلول نیتروژن محلول فسفر قابل دسترس سرب قابل جذب مس قابل جذب جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	-	-	چوب بلوط
(Yekzaban et al., 2023)	(-54-19.8) (+37.6-73.6) (+3.2-15) +5	پایداری خاکدانه مقاومت برشی (کیلو پاسکال) مقاومت فروری (کیلو پاسکال) جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	500	3, 6 and 8	برگ نخل و تفاله لیموترش
(Singh et al. 2022)	-31 +64 +31 +55 +41	تخلخل کربن آلی شوری (دسی زیمنس بر متر) ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بر کیلو گرم)	400-600	40-80	چوب، ضایعات لیگنوسلولوزی، کود دامی

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی خاک و زغال‌زیستی

این پژوهش در مزرعه پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی و ۳۱ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۷ متر از سطح دریا انجام شد. بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی، متوسط سالانه دما ۲۶ درجه سلسیوس، میانگین بارندگی سالانه ۲۴۳ میلی‌متر و اقلیم منطقه مطابق با اقلیم نمای آمبرژه بیابانی گرم میانه است. همچنین، اهواز دارای تابستان‌های گرم و طولانی و زمستان‌های معتدل و کوتاه است (Khuzestan Meteorological Organization, 2018). برای این منظور از نه کرت به ابعاد دو در سه متر استفاده شد. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری رد شدند. ظرفیت تبادل کاتیونی به روش Bower et al. (1952) (استات آمونیوم)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر و تیتراژ کردن با سولفات آهن به روش والکلی و بلک (Walkly and Black (1934) and، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986) و نیتروژن کل با دستگاه کج‌دال اندازه‌گیری شد (Bower et al, 1952; Gee and Bauder, 1934; Walkly and Black, 1986). زغال‌زیستی حاصل از کنوکارپوس به روش گرماکافت آهسته^۱ و در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به روش (Rajkovich et al., 2011) تولید شد. میزان کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد با دستگاه CHNS Analyzer مدل LEO 1455 VP اندازه‌گیری شد. گروه‌های عاملی زغال‌زیستی به روش طیف‌سنجی مادون قرمز با دستگاه FT-IR تعیین شد. میکرومرفولوژی (ساختار) زغال‌زیستی با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 1455 VP مشخص شد. سطح ویژه زغال‌زیستی توسط دستگاه سطح ویژه مدل Nano Sord به دست آمد. ویژگی‌های خاک و زغال‌زیستی مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است.

کنوکارپوس از خانواده *Combretaceae* و درختی همیشه سبز است که به دلیل مقاومت به کم آبی، شوری، گرما و سایه خوب، مناسب کاشت در مناطق گرم و خشک است. این گونه در فضای سبز شهری کاشته می‌شود و علاوه بر این که نمای زیبایی دارد در یک بازه زمانی کوتاه، باعث افزایش سرانه فضای سبز می‌شود. با توجه به سیاست شهرداری‌ها برای توسعه فضای سبز در استان‌های جنوب کشور مانند خوزستان، فارس، بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی به دلیل رشد سریع و تراکم شاخ و برگ زیاد آن نیاز به هرس فراوان دارد، لذا ضایعات حاصل از هرس آن می‌تواند یک منبع بسیار خوب برای تولید ارزان زغال‌زیستی باشد.

اغلب زمین‌های کشاورزی استان خوزستان در جنوب غربی ایران، از لحاظ میزان مواد آلی فقیر هستند. این موضوع بر حفظ رطوبت خاک، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و جذب عناصر غذایی ضروری گیاه دارای تأثیر نامطلوب است. در نتیجه کشاورزان بایستی هر ساله مقادیر قابل توجهی کود حیوانی مصرف کنند. در همین حال، وجود منابع فراوان ضایعات کنوکارپوس در سطح شهر اهواز، این فرضیه را تقویت می‌کند که از این ضایعات می‌توان مقادیر قابل توجهی زغال‌زیستی را تولید کرده و از این محصول در اراضی کشاورزی به منظور بهبود وضعیت رطوبتی و کاهش تنش ناشی از آن استفاده نمود. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه استفاده از زغال‌زیستی به عنوان یک اصلاح‌کننده برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک انجام شده است؛ اما مطالعات انجام شده درباره تأثیر زغال‌زیستی تولید شده از ضایعات کشاورزی و فضای سبز (مانند شاخ و برگ حاصل از هرس درخت کنوکارپوس) بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک و رطوبت خاک در مقیاس مزرعه‌ای بسیار اندک است. همچنین، عمده مطالعات در شرایط آزمایشگاهی و بدون حضور گیاه بوده است. بنابراین، در این پژوهش تلاش بر آن بوده است تأثیر زغال‌زیستی تولید شده از کنوکارپوس بر بهبود برخی ویژگی‌های مکانیکی خاک شامل مقاومت برشی خاک، ضریب انبساط و انقباض پذیری و حدود آتربرگ (رطوبت حد روانی، رطوبت حد خمیری و شاخص خمیرایی) حالت‌های مختلف رطوبت خاک شامل رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، پژمردگی دائم، رطوبت قابل استفاده و ویژگی‌های فیزیکی شامل گنجایش هوای خاک جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک در مزرعه تحت کشت ذرت بررسی شود.

¹ Slow pyrolysis

آرامی در سرنگ پلاستیکی با طول ۲۵ سانتی‌متر و قطر یک سانتی‌متر قرار گرفته و آنگاه به آرامی (بدون تشکیل حباب) لوله تهیه شده روی صفحه کاملاً صاف مثل شیشه گذاشته شد. بلافاصله طول لوله با میله گلی با خطکش مدرج شده اندازه‌گیری شد. بعد از خشک شدن آن (گذشت ۷۲ ساعت)، مجدداً طول میله‌های گلی اندازه‌گیری شد (Smith et al., 1985). سپس میزان ضریب انقباض و انبساط طبق رابطه (۱) تعیین شد که در آن، COLE ضریب انبساط و انقباض خطی و L_m طول لوله یا میله گلی بر حسب سانتی‌متر در حالت خشک است.

$$COLE = \frac{L_m - L_d}{L_d} \quad (1)$$

رطوبت حد روانی (LL) با دستگاه کاسگرانده و رطوبت حد خمیری (PL) با روش تهیه فتیله اندازه‌گیری شد. اختلاف بین LL و PL به‌عنوان شاخص خمیرایی (PI) در نظر گرفته شد.

۲-۴- اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

بعد از گذشت شش ماه از افزودن تیمارهای زغال‌زیستی به خاک، رطوبت ظرفیت مزرعه (۰/۳ بار)، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (مکش ۱۵ بار) با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. رطوبت قابل استفاده گیاه از تفاضل رطوبت در مکش ۰/۳ و ۱۵ بار و گنجایش هوای خاک از تفاضل رطوبت در مکش صفر و ۰/۳ بار به‌دست آمد (Jeffery et al., 2015). بافت خاک به روش هیدرومتری، کربن آلی خاک به روش والکلی بلک (Sparrevik et al., 2015) و نیتروژن خاک با روش کج‌دال اندازه‌گیری شد. کربن و نیتروژن زغال‌زیستی با دستگاه تجزیه عنصری، مرفولوژی زغال‌زیستی با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل (LEO 1455 VP)، گروه‌های عاملی زغال‌زیستی با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز و سطح ویژه این ماده با دستگاه اندازه‌گیری سطح ویژه مدل Nano Sord به‌دست آمد (Rajkovich et al., 2011). جرم مخصوص ظاهری و حقیقی زغال‌زیستی به روش استوانه اندازه‌گیری شد (Rajkovich et al., 2011). جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) و حقیقی (ρ_s) خاک نیز به روش استوانه و پیکنومتر اندازه‌گیری شد سپس تخلخل خاک (f) با استفاده از رابطه $f = 1 - \rho_b / \rho_s$ محاسبه شد.

۲-۵- تحلیل نتایج

در این پژوهش آزمایشی در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی با سه سطح زغال‌زیستی (صفر (شاهد)، سه و شش درصد) و در سه تکرار و در نه کرت در مزرعه پژوهشی گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. نتایج با استفاده از نرم‌افزار

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های خاک و زغال‌زیستی کنوکارپوس مورد استفاده در پژوهش

Table 2- Some characteristics of soil and *Conocarpus* biochar used in the research

پارامتر	واحد	خاک	زغال‌زیستی
کلاس بافت	-	لوم رسی	-
واکنش خاک *	-	7.84	9.89
هدایت الکتریکی	دسی‌زیمنس بر متر	6.97	3.86
نیتروژن	درصد	0.07	0.71
کربن آلی	درصد	0.86	72.25
سطح ویژه	مترمربع بر گرم	-	134.6
وزن مخصوص ظاهری	گرم بر سانتی‌مترمکعب	1.54	0.27
وزن مخصوص حقیقی	گرم بر سانتی‌مترمکعب	2.73	0.55
رطوبت قابل استفاده	درصد	0.44	-
تخلخل	درصد	0.25	-
نقطه پژمردگی دائم	درصد	0.14	-
رطوبت ظرفیت مزرعه	درصد	0.36	-

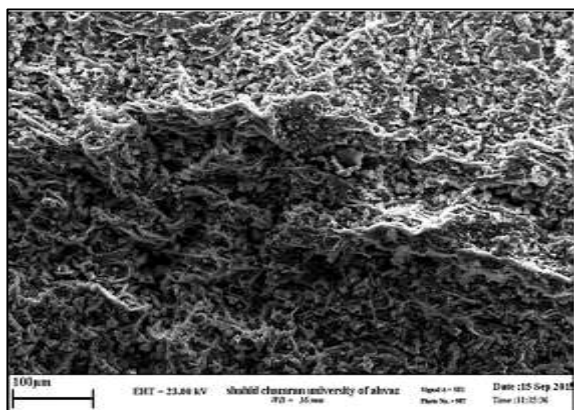
* واکنش خاک و هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع و زغال‌زیستی در نسبت ۱:۱۰ اندازه‌گیری شد.

۲-۲- آماده‌سازی و اعمال تیمارها

تیمارهای پژوهش شامل زغال‌زیستی در سه سطح صفر، سه و شش تن در هکتار به‌طور کاملاً یکنواخت با خاک کرت‌ها مخلوط شدند. خاک به مدت سه ماه با رطوبت حدود ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه در شرایط طبیعی مزرعه نگهداری شدند. سپس گیاه ذرت کاشته و پس از سه ماه برداشت شد. و پس از آن آزمایش‌های مورد نظر آغاز شد (Herath et al., 2013).

۲-۳- اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی خاک

برای تعیین مقاومت برشی لایه رویی خاک از پره برشی (Eijkkelkamp 14.10 POCKET VANE TESTER) در شرایط اشباع استفاده شد (Gimenez and Govers, 2002; Franti et al., 1999; Ghebreyessus et al., 1994). بدین‌منظور دستگاه در داخل خاک تا جایی که پره‌ها کاملاً در خاک قرار بگیرند، وارد شد. سپس پره‌ها در جهت عقربه‌های ساعت به‌صورت دورانی چرخانده شدند. این چرخش تا زمان متوقف شدن حرکت عقربه ادامه پیدا کرد. در دستگاه تنش برشی میزان تنش وارد شده بر صفحه مندرج بالای پرده قابل مشاهده است که با توجه به نوع پره استفاده شده، می‌توان میزان مقاومت اندازه‌گیری شده را بر حسب کیلوپاسکال محاسبه نمود. برای به‌دست آوردن ضریب انبساط و انقباض‌پذیری از آزمایش تهیه لوله یا میله‌های گلی استفاده شد. بدین‌صورت، ابتدا نمونه خاک‌ها از الک دو میلی‌متری عبور داده شد سپس خمیری از خاک با رطوبتی کمتر از حالت اشباع (به‌صورت کیفی) تهیه شده و به



شکل ۲- ریخت‌شناسی زغال زیستی با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی

Figure 2- Morphology of biochar with scanning electron microscope

۳-۳- تأثیر زغال زیستی کنوکارپوس بر ویژگی‌های فیزیکی خاک
نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد زغال زیستی بر مقدار جرم مخصوص ظاهری، گنجایش هوای خاک، تخلخل، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی و آب قابل استفاده خاک در جدول ۳ آمده است. همان طوری که ملاحظه می‌شود افزودن زغال زیستی به خاک تحت کشت ذرت دارای تأثیری معنادار بر ویژگی‌های فیزیکی مورد مطالعه در سطح معناداری یک درصد بوده است. همچنین، نتایج آزمون مقایسه میانگین سطوح مختلف زغال زیستی در شکل ۳ گزارش شده است.

SAS 9.1 تحلیل شد. مقایسه میانگین تیمارها با آزمون دانکن در سطح یک و پنج درصد صورت پذیرفت (Duncan, 1955).

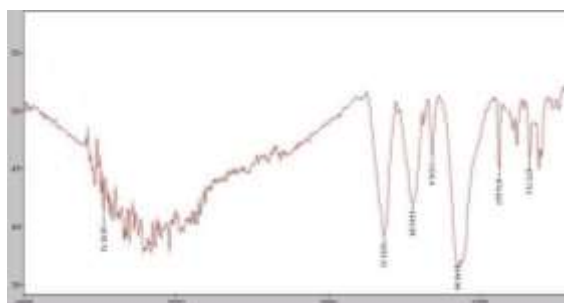
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی طیف مادون قرمز زغال زیستی کنوکارپوس

زغال زیستی طیف مادون قرمز زغال زیستی کنوکارپوس در شکل ۱ آمده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود زغال زیستی دارای رفتار آروماتیکی است. در این طیف مشاهده می‌شود که گروه فنولی (O-H) در محدوده تقریبی با طول ۳۵۰۰ واقع شده است. وجود این طیف گویای آن است که بیش‌تر کربن موجود در این زغال زیستی پایدار است (Zorzona et al., 2012; Qayyum et al., 2014). نوار مربوط به ارتعاش کششی C=O گروه‌های کتونی و کربوکسیلی در محدوده طول موج ۱۵۸۹ قرار دارد. گروه آلکیل در محدوده طول موج ۲۹۱۰ واقع شده است. در این طیف، پیک موجود در محدوده طول موج ۱۱۹۵ می‌تواند متعلق به گروه‌های آمین، سولفور و یا استر باشد (Weber and Quicker, 2018).

۳-۲- بررسی ریخت‌شناسی^۱ زغال زیستی کنوکارپوس

برای نمایش مرفولوژی زغال زیستی با کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه عکس‌برداری شد (شکل ۲). با توجه به شکل ۲ می‌توان متخلخل بودن زغال زیستی را مشاهده کرد. خلل و فرج‌های زغال زیستی فضای مناسبی جهت ذخیره آب، زیستگاهی برای ریزجانداران^۲ و فضایی برای جذب عناصر است. بیضی مانند بودن حفره‌ها این واقعیت را نشان می‌دهد که ساختار متخلخل کنوکارپوس اولیه در حین فرآیند گرماگافت از حالت اولیه خارج شده و کج و معوج شده است که (Mukherjee and Lal و Gondim et al. (2018) به این موارد اشاره داشته‌اند.



شکل ۱- طیف مادون قرمز زغال زیستی کنوکارپوس
Figure 1- Infrared spectrum of Conocarpus biochar

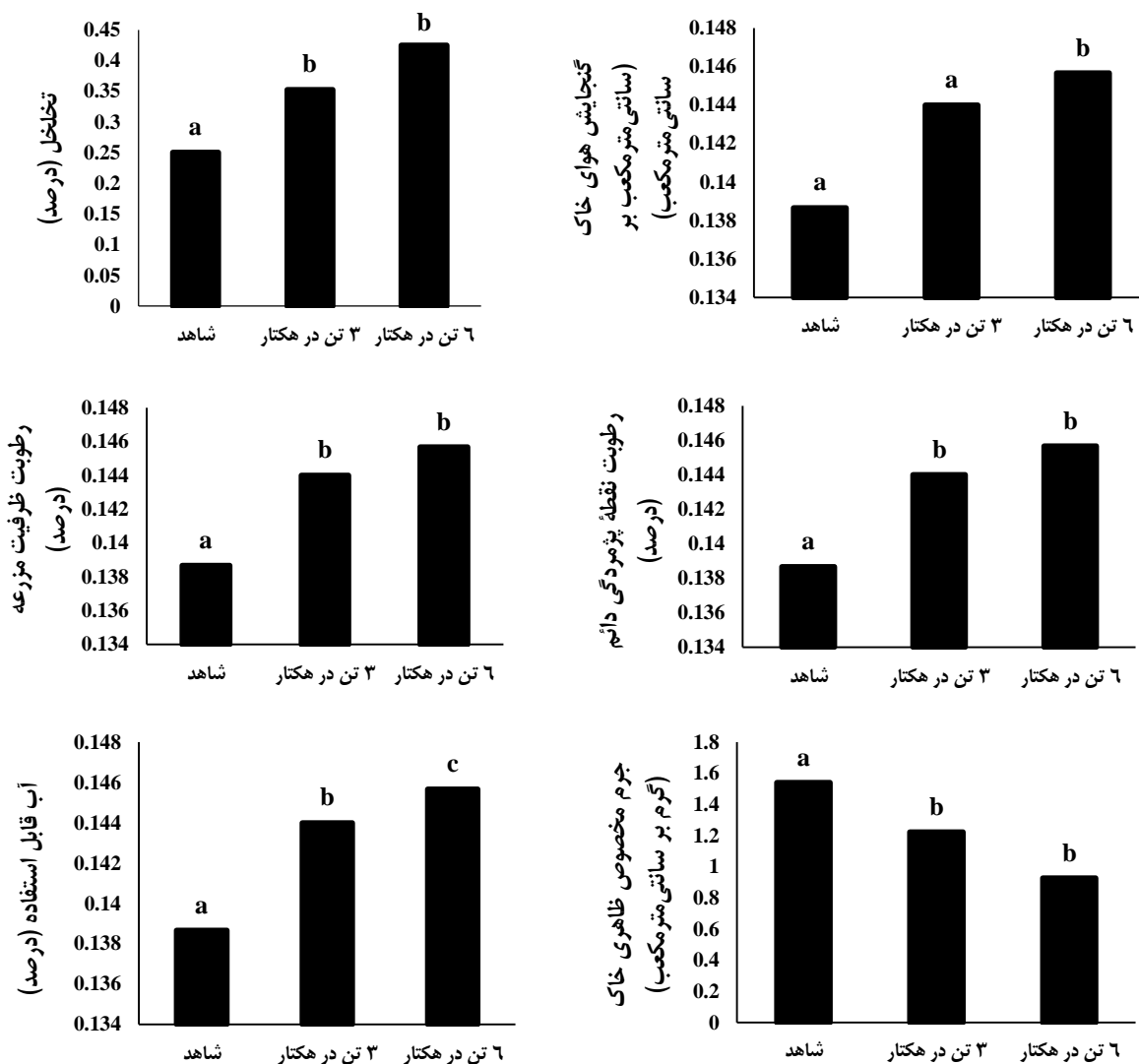
¹ Morphology

² Microorganisms

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر مقدار جرم مخصوص ظاهری، گنجایش هوای خاک، تخلخل، رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی

Table 3- The results of the analysis of variance of the effect of *Conocarpus* biochar on the amount of apparent specific gravity, soil air capacity, porosity, humidity, agricultural capacity, and wilting point

میانگین مربعات		رطوبت ظرفیت	آب قابل استفاده	تخلخل خاک	درجه آزادی	منبع تغییرات
گنجایش هوای خاک	جرم مخصوص	رطوبت	مزرعه (درصد)	(درصد)		
(سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب)	ظاهری خاک	نقطه پژمردگی (درصد)				
1.666	0.304	7.000	7.000	1.356	3.176	2 بلوک
261.816**	304.573**	13.231**	13.231**	0.777**	25.365**	2 زغال‌زیستی
0.004	0.001	1.44	1.14	0.0001	0.0001	4 خطا
1.231	1.052	0.98	1.104	0.975	0.992	- ضریب تغییرات



شکل ۳- نتایج آزمون مقایسه میانگین سطوح مختلف زغال‌زیستی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

Figure 3- The results of the comparison test of the average levels of biochar on the physical characteristics of the soil

زغال‌زیستی در رابطه با تخلخل، این پارامتر در تیمارهای سه و شش تن در هکتار، نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۴۰/۸ و ۷۰ درصد افزایش داشته است (شکل ۳). دلیل افزایش تخلخل در خاک‌های تیمار شده توسط زغال‌زیستی کنوکارپوس می‌تواند

۳-۴- تأثیر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر تخلخل خاک با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس، کاربرد سطوح مختلف زغال‌زیستی در سطح یک درصد تأثیری معنادار بر مقدار تخلخل خاک نداشته است. با وجود عدم تفاوت معنادار بین سطوح

۳-۶- تأثیر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر رطوبت ظرفیت

مزرعه، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل استفاده

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که زغال‌زیستی تأثیری معنادار بر مقدار ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل استفاده در سطح یک درصد داشته است. نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها در شکل ۳ نشان می‌دهد که بین سطوح زغال‌زیستی تفاوتی معنادار وجود ندارد؛ ولی بین این تیمارها با تیمار شاهد تفاوتی معنادار وجود دارد. کاربرد سه تن در هکتار زغال‌زیستی و شش تن در هکتار آن سبب افزایش ۵/۱۱ و ۷/۹۰ درصدی آب قابل استفاده، ۴/۲۲ و ۶/۱۹ درصدی رطوبت ظرفیت مزرعه و ۴/۳۴ و ۵/۰۷ درصدی رطوبت نقطه پژمردگی دائم نسبت به تیمارهای شاهد شد. دلیل افزایش این رطوبت‌ها در اثر کاربرد زغال‌زیستی، به احتمال زیاد به دلیل تخلخل بالای زغال‌زیستی و منافذ فراوان موجود در آن (شکل ۲) و سطح ویژه بالای آن است (جدول ۱) که به آن توانایی ذخیره و نگهداشت آب را می‌دهد. در مطالعه‌ای، Behnam et al. (2015) گزارش کردند که زغال‌زیستی تولید شده از باگاس نیشکر بر رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت نقطه پژمردگی دائم و آب قابل استفاده در خاک تأثیر معناداری نداشته است، که با نتایج فوق مطابقت ندارد. همچنین، Razzaghi et al. (2020) بیان نمودند که کاربرد زغال‌زیستی دارای تأثیری معنادار بر وضعیت رطوبتی خاک، از جمله رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس دارد. پژوهش Hardie et al. (2014) در خاک لوم-شنی نشان داد افزودن ۴۷ مگاگرم از این ماده، رطوبت اشباع خاک را افزایش داد ولی نتوانست تأثیری معنادار بر رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس داشته باشد. نتایج به‌دست آمده توسط Zhang et al. (2013) و Zhang et al. (2019) نیز با نتایج حاصل از این پژوهش در یک راستا بوده است. نتایج حاصل پژوهشی دیگر نشان داد که زغال‌زیستی تهیه شده از درخت بلوط باعث افزایش آب قابل دسترس گیاه شد (Mukherjee and Lal, 2013). همچنین، Burrell et al. (2013) در بررسی تأثیر زغال‌زیستی از خرده چوب در دمای ۵۲۵ درجه سلسیوس بر جرم مخصوص ظاهری و آب قابل دسترس در سه نوع خاک با بافت‌های لوم-شنی، لوم-سیلتی و لوم-رسی به میزان سه درصد وزنی به خاک، به این نتیجه رسیدند که افزودن زغال‌زیستی به خاک‌های لوم-شنی، لوم-سیلتی و لوم-رسی به ترتیب سبب افزایش ۹/۶، ۴/۲ و ۱/۹ درصدی آب قابل دسترس و باعث کاهش ۱۳/۳، ۱۰/۳ و ۹/۹ درصدی جرم مخصوص ظاهری شده است. نتایج پژوهش Koide et al. (2015) بر اصلاح خاک با زغال‌زیستی حاصل از شاخساره‌های درخت نشان داد که افزودن این زغال‌زیستی، نگهداشت آب در

ناشی از تأثیر مثبت این ماده بر ساختمان خاک باشد. این موضوع در نهایت می‌تواند منجر به بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک شود. علاوه بر این، زغال‌زیستی به علت داشتن ساختار متخلخل خود (شکل ۳) و سطح ویژه بالا (جدول ۲) قادر است محیط مناسبی برای نگهداری رطوبت در خاک باشد. مطالعه Ajayi and Rainer. (2017) نشان داد کاربرد زغال‌زیستی حاصل از کود گاوی به میزان دو درصد وزنی در دو نوع خاک سیلتی-رسی و لوم-شنی رطوبت اشباع خاک را افزایش می‌دهد. همچنین، Razzaghi et al. (2020) و Sadowska et al. (2023) پژوهش خود به تأثیر مثبت زغال‌زیستی بر افزایش مقدار تخلخل خاک اشاره کرده‌اند. نتایج پژوهش Blanco-Canqui (2017) نیز نشان داد کاربرد زغال‌زیستی مقدار تخلخل خاک را ۱۴ تا ۶۴ درصد افزایش می‌دهد درحالی‌که Singh et al. (2022) مقدار افزایش تخلخل خاک را ۵۹ درصد گزارش کرده‌اند.

۳-۵- تأثیر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر گنجایش هوای خاک

نتایج جدول تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی بر گنجایش هوای خاک نشان داد که سطوح مختلف کاربرد زغال‌زیستی در سطح یک درصد تأثیر معناداری بر گنجایش هوای خاک گذاشته‌اند. با توجه به نتایج مقایسه میانگین که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزایش گنجایش هوای خاک در تیمارهای سه تن در هکتار و شش تن در هکتار به ترتیب ۱۰/۵۲ و ۱۳/۶۸ درصد نسبت به شاهد بوده است، که این افزایش در سطح یک درصد معنادار بوده است. اما بین سطوح مختلف زغال‌زیستی تفاوت معناداری مشاهده نشد. همان‌طور که گفته شد، زغال‌زیستی سه تن در هکتار و شش تن در هکتار به ترتیب گنجایش هوای خاک را نسبت به تیمار شاهد ۱۰/۵۲ و ۱۳/۶۸ درصد افزایش دادند. به‌طور کلی، عنوان شده است که گنجایش هوای بیش‌تر از ۰/۱ مترمکعب بر مترمکعب در محیط ریشه سبب می‌شود که گیاهان کم‌ترین آسیب و یا کاهش عملکرد را داشته باشند (Pranagal, 2017; Zorzona et al., 2012). در این پژوهش مشاهده می‌شود که مقدار گنجایش هوای خاک در تمام تیمارهای زغال‌زیستی مطلوب بوده و به حد بحرانی نرسیده است. گنجایش هوای بیش‌تر از ۰/۱۴ مترمکعب بر مترمکعب در خاک‌های لوم-شنی تا لوم-رسی برای رشد و عملکرد مطلوب گیاهان ضروری است (He et al., 2021; Mueller et al., 2008). به احتمال زیاد زغال‌زیستی با افزایش منافذ درشت خاک به تخلیه رطوبت در مکش‌های نزدیک به اشباع کمک می‌نماید. در پژوهشی، Zheng et al. (2013) نیز به تأثیر مثبت زغال‌زیستی بر این پارامتر خاک در بررسی‌های خود اشاره داشته‌اند.

داشتند افزودن اصلاح‌کننده‌های آلی سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک می‌شود و علت آن را تغییر اندازه خاکدانه‌های خاک دانستند. آن‌ها معتقد بودند افزودن زغال زیستی موجب هم‌آوری خاکدانه‌های میکرو شده و در نتیجه جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای که توسط Hemmat et al. (2010) انجام شد، مشخص شد که افزودن انواع مختلف مواد آلی (کود دامی، لجن فاضلاب و کمپوست فاضلاب شهری) هر کدام با مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ مگا گرم در هکتار اثر چشم‌گیری بر جرم مخصوص ظاهری خاک داشته است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در مقادیر کم جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی خاک بیش‌تر شده است. بررسی اثر سطوح مختلف زغال زیستی (۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار) بر ویژگی‌های فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف توسط Razzaghi and Rezaie (2017) نشان داد که این سطوح، جرم مخصوص حقیقی را به ترتیب ۱۳/۸، ۲۵/۴ و ۳۳ درصد کاهش داده است. همچنین، Lu et al. (2014)، Blanco-Canqui (2017) و Sadowska et al. (2023) گزارش کردند که کاربرد زغال زیستی خصوصیات فیزیکی خاک مانند جرم مخصوص ظاهری را بهبود بخشید.

۳-۸- تأثیر زغال زیستی بر ویژگی‌های مکانیکی خاک

نتایج تجزیه واریانس تأثیر کاربرد زغال زیستی بر ویژگی‌های مکانیکی خاک شامل مقاومت برشی خاک، ضریب انبساط و انقباض‌پذیری و حدود آتربرگ (رطوبت حد روانی، رطوبت حد خمیری و شاخص خمیری) در جدول ۴ آمده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود زغال زیستی تأثیری معنادار بر ویژگی‌های مکانیکی مورد مطالعه در سطح معناداری یک درصد داشته است. همچنین، نتایج آزمون مقایسه میانگین سطوح مختلف زغال زیستی در شکل ۴ ارائه شده است.

خاک را افزایش داده و مقدار رطوبت ظرفیت زراعی خاک افزایش یافت. در پژوهش Liu et al. (2014) نیز نتایج مشابهی گزارش شده است. طی پژوهشی، Sadowska et al. (2023) دریافتند کاربرد ۶۰ تن در هکتار زغال زیستی گاه و گلیش آفتابگردان سبب افزایش FC و AWC به ترتیب به مقدار ۹/۴ و ۱۸/۷۱ درصد شد.

۳-۷- تأثیر زغال زیستی بر جرم مخصوص ظاهری خاک

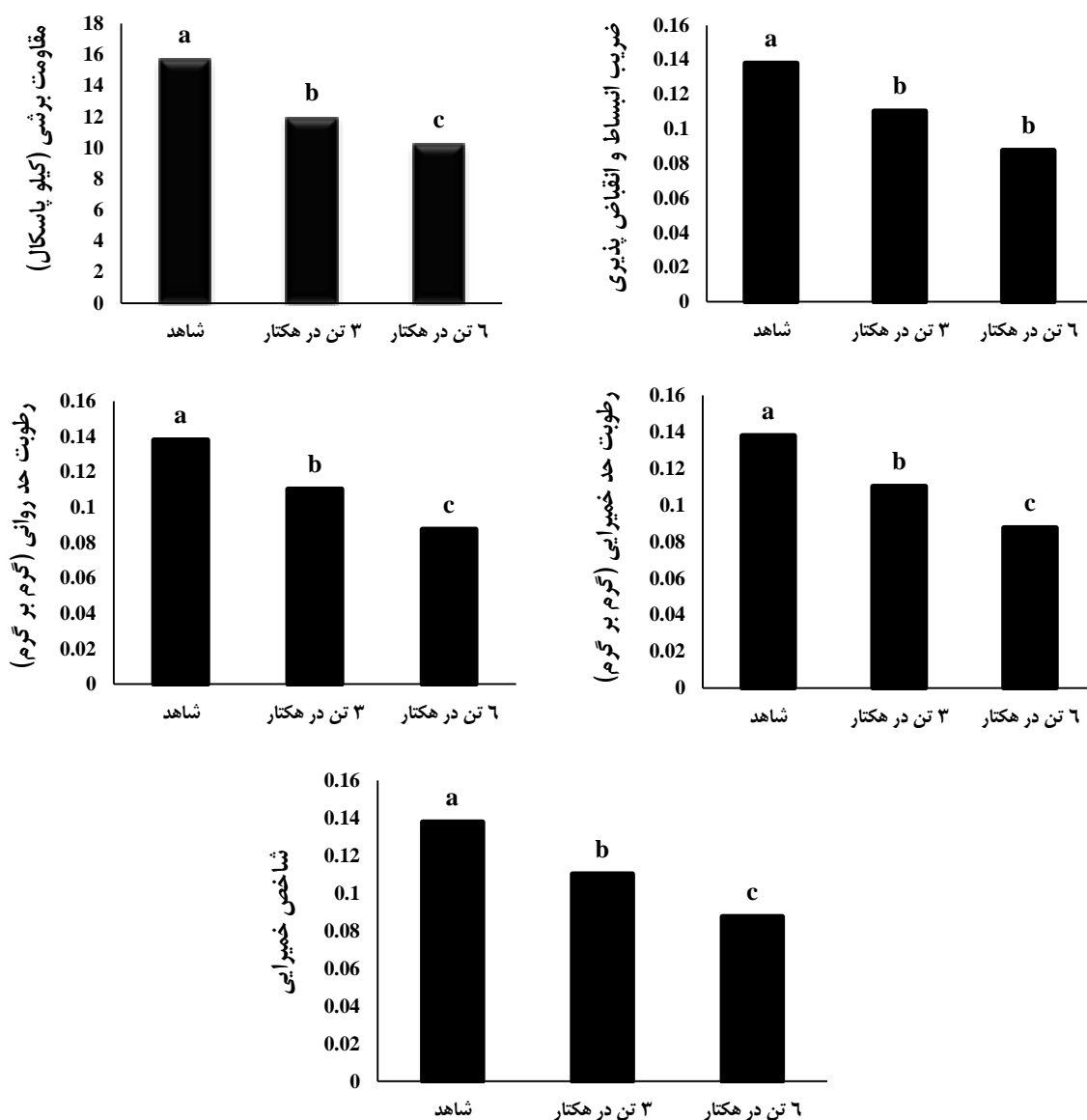
نتایج تجزیه واریانس ارائه شده در جدول ۳ بیان‌گر تأثیر معنادار زغال زیستی بر جرم مخصوص ظاهری خاک است. تیمار سه تن در هکتار زغال زیستی و شش تن در هکتار آن نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۲۰/۵۸ و ۳۹/۸۰ درصد جرم مخصوص ظاهری خاک را افزایش داده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کاربرد زغال زیستی دارای تأثیر معناداری بر جرم مخصوص ظاهری در سطح یک درصد است. کم‌ترین مقدار جرم مخصوص ظاهری متعلق به تیمار زغال زیستی شش تن در هکتار بود که نسبت به زغال زیستی سه تن در هکتار و تیمار شاهد کم‌تر بود. کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک می‌تواند به این دلیل باشد که مخلوط شدن خاک با ماده‌ای با جرم مخصوص کم‌تر و ناشی از تأثیرات غیرمستقیم ماده آلی است. در واقع ماده آلی سبب بهبود ساختمان خاک می‌شود و از این طریق جرم مخصوص ظاهری را کاهش می‌دهد. در پژوهشی، Wu et al. (2013) گزارش دادند کاربرد زغال زیستی حاصل از چوب درخت به میزان ۲/۵ و پنج درصد جرم مخصوص ظاهری خاکی با بافت رس سیلتی را به طور معناداری کاهش داد. آن‌ها دلیل این موضوع را به افزایش کربن آلی خاک در اثر افزودن زغال زیستی ارتباط دادند. در پژوهش دیگری، Suliman et al. (2017) اعتقاد دارند که عامل اصلی کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک بهبود ساختمان و افزایش تخلخل خاک است. همچنین، Busscher et al. (2011) اظهار

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر زغال زیستی بر مقاومت برشی خاک، ضریب انبساط و انقباض‌پذیری و حدود آتربرگ

Table 4 - Results of variance analysis of biochar effect on soil shear strength, coefficient of expansion and contraction, and Atterberg limits

میانگین مربعات						
منبع تغییرات	درجه آزادی	مقاومت برشی (KPa)	انبساط و انقباض‌پذیری	حد روانی (g.g ⁻¹)	حد خمیری (g.g ⁻¹)	شاخص خمیری
تکرار	2	4.984	5.135	0.198	1.055	0.235
زغال زیستی	2	134.527**	128.288**	44.450**	18.242**	3.408**
خطا	4	0.174	0.02	0.01	0.01	0.001
ضریب تغییرات	-	1.22	0.993	1.36	1.18	1.243

** سطح معناداری یک درصد



شکل ۴- تأثیر سطوح مختلف زغال‌زیستی بر مقاومت برشی خاک، ضریب انبساط و انقباض پذیری و حدود آتربرگ (رطوبت حد روانی، رطوبت حد خمیری و شاخص خمیری)

Figure 4- The effect of different levels of biochar on soil shear strength, coefficient of expansion and contraction, and Atterberg's limits (liquid limit moisture, pasting limit humidity and pasting index)

در جدول ۴ آورده شده است. همان طوری که کاربرد این ماده در سطح یک درصد تأثیر معناداری بر مقاومت برشی خاک داشته است. نتایج آزمون مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف زغال‌زیستی کنوکارپوس بر مقاومت برشی در شکل ۴ آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد، بین سطوح مختلف زغال‌زیستی کنوکارپوس و تیمار شاهد تفاوت معناداری وجود داشته و با افزایش مقدار زغال‌زیستی کنوکارپوس مقدار مقاومت برشی کاهش پیدا می‌کند. این کاهش نسبت به تیمار شاهد، در سطوح سه و شش تن در هکتار به ترتیب ۲۳/۹۴ و ۳۴/۷۵ درصد است. در پژوهشی، Ohu et al. (2009) گزارش کردند کاربرد ماده آلی در خاک می‌تواند با کاهش جرم

۳-۸-۱- مقاومت برشی خاک

مقاومت برشی خاک یک شاخص مناسب جهت بررسی فرسایش‌پذیری خاک محسوب می‌شود. مقاومت برشی سطح خاک، همان مقاومت اصطکاکی ناشی از لغزیدن ذرات روی یکدیگر است. و حرکت غلتک مانند بین دانه‌های مجاور است که در هم قفل می‌شوند (Arthur et al., 2020). همچنین، Alumer (2017) بیان نمودند که کاربرد زغال‌زیستی حاصل از بقایای خرد شده نیشکر، بقایای خرد شده نیشکر و خاکستر منجر به کاهش هر دو پارامتر مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بین ذرات خاک) شد. نتایج جدول تجزیه واریانس تأثیر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر مقاومت برشی خاک

مطابقت دارد. این پژوهش‌گران گزارش کرده‌اند که یکی از دلایل تغییر پتانسیل انبساط و انقباض‌پذیری خاک تیمار شده با زغال‌زیستی می‌تواند این موضوع باشد که ذرات زغال‌زیستی سطوح کانی‌های رسی را پوشانده و فضای منافذ خاک را پر کنند؛ که در نهایت کاهش ضریب COLE می‌تواند سبب جلوگیری از ترک‌خوردگی خاک شود. علاوه بر این، کاهش در میزان COLE می‌تواند ناشی از تغییر در انبساط و انقباض‌پذیری کانی‌های رسی به علت تأثیر ذرات کربن موجود در زغال‌زیستی تولید شده از کنوکارپوس باشد. در واقع تماس بین رس و ذرات کربن سبب افزایش مقاومت در برابر انبساط‌پذیری خاک می‌شود (Singh et al., 2022; Palansooriya et al., 2019). در حقیقت، افزایش تماس بین ذرات رس و ذرات کربن موجود در زغال‌زیستی کنوکارپوس افزوده شده به خاک سبب افزایش مقاومت خاک در برابر انبساط و انقباض‌پذیری خاک می‌شود که می‌تواند از ایجاد درز و ترک در خاک جلوگیری کند و در بهبود و حفظ ساختمان خاک بسیار مؤثر است. کاهش انبساط و انقباض‌پذیری می‌تواند به دلیل قرارگیری ذرات زغال‌زیستی در فضاهای رس‌های انبساط‌پذیر با زغال‌زیستی غیرانبساط‌پذیر باشد (Palansooriya et al., 2019). این باعث موارد اصلاحی گفته شده در بالا شود.

۳-۸-۳- حدود آتربگ

پایایی و قوام خاک، از ویژگی‌های خاک است که رفتار و یا مقاومت خاک را در مقابل نیروهای وارده بر آن در یک محدوده رطوبتی نشان داده و از خواص خاک‌های ریزدانه (متوسط و ریزبافت) به شمار می‌رود. حدود پایایی خاک به عواملی مانند میزان رس و ماده آلی بستگی دارد (Garg et al., 2019).

۳-۸-۳-۱- رطوبت حد روانی (LL)

نتایج تجزیه واریانس تأثیر ماده اصلاح‌کننده زغال‌زیستی کنوکارپوس بر حد روانی در جدول ۳ ارائه شده است. همان طوری که ملاحظه می‌شود زغال‌زیستی کنوکارپوس در سطح یک درصد تأثیری معنادار بر حد روانی داشته است. در خاک تیمار شده با زغال‌زیستی حد روانی نسبت به تیمار شاهد افزایش داشته است. این افزایش در تیمار سه تن در هکتار زغال‌زیستی کنوکارپوس و شش تن در هکتار آن به ترتیب ۴۰/۳۲ و ۷۷/۷۴ درصد بوده است. نتایج این پژوهش با یافته‌های Arthur et al. (2020) هم‌خوانی دارد. این پژوهش‌گران دریافتند افزودن ۳۰ تن در هکتار زغال‌زیستی بقایای برنج مقدار رطوبت حد روانی را ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. افزایش مواد آلی در خاک با افزایش جذب رطوبت، سبب افزایش حد روانی و حد خمیرایی خاک

مخصوصاً ظاهری سبب کاهش مقاومت برشی خاک شود. از این طریق انرژی لازم جهت سست کردن خاک در حین عملیات کشاورزی کاهش یافته و این موضوع، سبب سهولت مدیریت خاک می‌شود. همچنین، Burrell et al. (2016) نشان دادند، افزودن ۱۱ و ۱۷ درصد وزنی پیت به خاک لومی-شنی در شرایط گلخانه‌ای باعث کاهش معنادار مقاومت برشی خاک می‌شود. آن‌ها علت این کاهش را به کم شدن جرم مخصوص ظاهری در اثر افزودن پیت نسبت دادند. از طرفی Sun et al. (2021) در پژوهش خود بیان کردند که کاربرد ماده آلی سبب کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود. پس از کاربرد زغال‌زیستی در خاک، بخش زیادی از سطوح کانی توسط ذرات کربن پوشیده می‌شود و این امر سبب جلوگیری از تماس سطوح کانی به یک‌دیگر شده که در نهایت باعث کاهش چسبندگی و مقاومت برشی خاک می‌شود (Zong et al., 2014; Gao et al., 2014). این مسأله سبب کاهش نیروی لازم جهت نفوذ ریشه در خاک می‌شود که یک مورد مناسب جهت رشد محصولات کشاورزی است. از طرفی با افزودن زغال‌زیستی به خاک مقدار زیادی از ذرات کربن تشکیل کمپلکس کربن-رس می‌دهند و برخی به‌صورت ذرات جداگانه کربن باقی می‌مانند. بنابراین، بخشی از سطوح مواد کانی با کربن با انرژی کم، پوشیده می‌شوند. این پوشش کربنی می‌تواند سبب کاهش چسبندگی بین فاز جامد و مایع شده و در این حالت مقاومت برشی خاک کاهش خواهد یافت (Juriga et al., 2018; Yang and Lu, 2021). این امر منجر به بهبود خصوصیات خاک جهت دسترسی به کشاورزی پایدار خواهد شد.

۳-۸-۲- انبساط و انقباض‌پذیری خاک

نتایج تجزیه واریانس اثر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر ضریب انبساط و انقباض‌پذیری خاک در جدول ۴ آمده است. همان طوری که مشاهده می‌شود که تأثیر زغال‌زیستی تولید شده از کنوکارپوس بر این ضریب در سطح یک درصد معنادار بوده است. با توجه به نتایج آزمون مقایسه میانگین‌های ارائه شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در سطوح سه و شش تن در هکتار زغال‌زیستی کنوکارپوس به ترتیب ۲۰/۲۸ و ۳۶/۹۵ نسبت به شاهد کاهش ضریب انبساط و انقباض‌پذیری (COLE) وجود دارد و بین سطح سه و شش تن در هکتار تفاوت معناداری وجود ندارد. کاربرد این ماده به‌عنوان یک اصلاح‌کننده می‌تواند سبب کاهش ضریب انبساط و انقباض‌پذیری و در نهایت کاهش درز و ترک در خاک شود. این امر همان‌طور که به آن اشاره شد، می‌تواند ناشی از افزایش مقدار کربن آلی در خاک باشد. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با نتایج Juriga et al. (2018)

علاوه‌براین، (Behnam et al., 2015) گزارش دادند که افزودن زغال‌زیستی تولید شده از باگاس نیشکر سبب کاهش رطوبت خمیری در خاک‌های مورد آزمایش شده است. از سوی دیگر (Qu et al., 2014) گزارش دادند استفاده از خاکستر سیوس برنج به میزان ۲۰ و ۳۰ درصد (حجمی/حجمی) تحت شرایط گلخانه موجب افزایش معنادار رطوبت حد خمیری در خاک‌های با بافت لوم سیلتی و لوم رسی سیلتی شده است. این پژوهش‌گران این افزایش را ناشی از افزایش سطح ویژه خاک در اثر کاربرد زغال‌زیستی در خاک عنوان کردند. در پژوهشی دیگر، (Arthur et al., 2020) نیز گزارش کردند که افزودن زغال‌زیستی به خاک سبب افزایش سطح ویژه خاک شده است.

۳-۳-۸-۳- شاخص خمیریایی

نتایج تجزیه واریانس تأثیر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر شاخص خمیریایی خاک در جدول ۴ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، زغال‌زیستی کنوکارپوس در سطح یک درصد تأثیری معنادار بر شاخص خمیریایی خاک داشته است. شکل ۶ نشان می‌دهد که کاربرد زغال‌زیستی کنوکارپوس در سطح سه تن در هکتار و شش تن در هکتار موجب افزایش ۳۸/۳۳ و ۷۱/۶۶ شاخص خمیریایی نسبت به تیمار شاهد شده است. نتایج به‌دست آمده از پژوهش (Sundarakannan et al., 2020) نشان داد با افزودن خاکستر سیوس برنج به خاک‌های لومی-رسی-سیلتی و لوم-سیلتی، میزان شاخص خمیریایی در تمام سطوح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی افزایش معنادار داشت. شایان ذکر است که در خاک‌هایی که شاخص خمیریایی بالایی دارند، نفوذ کاهش یافته و بنابراین هدررفت خاک و آب در آن‌ها بیش‌تر اتفاق می‌افتد (Aup-Ngoen and Noipitak, 2020). کاربرد زغال‌زیستی کنوکارپوس می‌تواند تا حدودی این معضل را کاهش داده و سبب بهبود کیفیت رشد و کیفیت محصولات شده و پایداری طولانی‌مدت خاک را به‌دنبال داشته باشد. این مسأله برای رشد گیاه و بهبود کیفیت خاک از اهمیت بالایی برخوردار است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کاربرد زغال‌زیستی تولید شده از کنوکارپوس در خاک آهکی تحت کشت ذرت، می‌تواند باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله افزایش نگهداشت رطوبت در خاک شده است. زغال‌زیستی به‌دلیل ساختار متخلخل و سطح ویژه بالایی خود می‌تواند به‌عنوان یک اصلاح‌کننده مناسب، تأثیری مناسب بر بهبود نگهداشت آب در خاک و مدیریت بهینه مصرف آب در کشاورزی و کیفیت و کمیت رشد محصولات کشاورزی داشته باشد. علاوه‌براین، زغال‌زیستی با مدیریت

می‌شود (Qu et al., 2014). همان‌گونه که در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دیده می‌شود (شکل ۲)، زغال‌زیستی تولید شده از کنوکارپوس دارای حفراتی است که احتمالاً توانایی جذب و نگهداری آب و در نتیجه افزایش حد روانی خاک را دارا هستند. با توجه به بزرگنمایی تصویر مشخص است که این ماده دارای منافذ بسیار ریز و در حد ۲۵ تا ۳۰ میکرون است، که معادل مکشی برابر با ۱۰۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر است. بدیهی است این منافذ می‌توانند با کمک در بهبود حفظ و نگهداشت رطوبت در درون خود، رطوبت حد روانی خاک را افزایش دهند. در پژوهشی، (Bordoloi et al., 2019) گزارش داد که کاربرد ۷۵ و ۱۰۰ تن در هکتار لجن فاضلاب در یک خاک لوم در شرایط گلخانه‌ای سبب افزایش معنادار LL و PL می‌شود که این مسأله علاوه‌بر بهبود خصوصیات خاک، مدیریت پسماندهای آلی از جمله فاضلاب را به دنبال دارد. مشاهده شده است که کاربرد زغال‌زیستی سیوس برنج به میزان ۴ و ۶ درصد وزنی در یک خاک رسی در سطح گلخانه‌ای باعث افزایش معنادار رطوبت حد روانی می‌شود (Zhang et al., 2019).

۳-۳-۸-۳- رطوبت حد خمیری (PL)

رطوبت حد خمیری یک شاخص مناسب جهت بیان کیفیت فیزیکی خاک است (Aup-ngoan and Noipitak, 2020). رطوبت حد خمیری به‌عنوان یکی از حساس‌ترین پارامترها برای تخمین بیش‌ترین میزان رطوبت مورد نیاز جهت شخم بهینه محسوب می‌شود (Li et al., 2018). نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای زغال‌زیستی کنوکارپوس بر رطوبت حد روانی در جدول ۴ آورده شده است. مشاهده می‌شود که افزودن سطوح مختلف زغال‌زیستی کنوکارپوس در سطح احتمال یک درصد موجب افزایش معنادار حد خمیری خاک شدند. در شکل ۵ نتایج آزمون مقایسه میانگین تأثیر سطوح مختلف زغال‌زیستی کنوکارپوس بر مقدار رطوبت حد خمیری خاک آمده است. مشاهده می‌شود که در تیمارهای سه و شش تن در هکتار زغال‌زیستی کنوکارپوس میزان این پارامتر به‌ترتیب ۴۰/۸ و ۷۰ نسبت به تیمار شاهد افزایش پیدا کرده است. که این افزایش در سطح یک درصد معنادار بوده است. با توجه به میزان بالا بودن سطح ویژه زغال‌زیستی کنوکارپوس (جدول ۲) افزودن این ماده به خاک سبب افزایش سطح ویژه کل خاک و جذب رطوبت در خاک می‌شود؛ که به این ترتیب رطوبت حد خمیری افزایش خواهد یافت. نتایج پژوهش (Zhong et al., 2014) نیز نشان داده است که کاربرد زغال‌زیستی حاصل از تراشه‌های چوب به میزان دو، چهار و شش درصد سبب افزایش معنادار رطوبت حد خمیری نسبت به تیمار شاهد در یک خاک رسی شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

احمد فرخیان فیروزی: ایده و طراحی آزمایش‌ها، نظارت بر پروژه، تحلیل و تفسیر داده‌ها، تهیه مواد و تجهیزات آزمایش/ابزار تحلیل، نگارش و ویرایش مقاله؛ میلاد بی‌ریا: انجام آزمایش‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نگارش مقاله؛ عبدالامیر معزی: مفهوم‌سازی، تحلیل و تفسیر داده‌ها، تهیه مواد و تجهیزات آزمایش/ابزار تحلیل، نگارش و ویرایش مقاله؛ افراسیاب رهنما: مفهوم‌سازی، تحلیل و تفسیر داده‌ها، تهیه مواد و تجهیزات آزمایش/ابزار تحلیل، نگارش و ویرایش مقاله.

منابع

- اداره کل هواشناسی استان خوزستان (۱۳۹۶). خبرنامه فنی هواشناسی. خوزستان، اهواز. ۳۵ صفحه. doi:10.22059/ijswr.2019.277426.668143
- اصولی، حسن، کریمی، احمد، و شیرانی، حسین (۱۴۰۰). اثر زغال‌زیستی حاصل از منابع مختلف بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۵(۴)، ۳۵۷-۳۷۲. doi:10.22092/jwra.2021.354825.873
- بهنام، هدیه، فرخیان فیروزی، احمد، و معزی، عبدالامیر (۱۳۹۶). تاثیر زغال‌زیستی و کمپوست باگاس نیشکر بر برخی ویژگی‌های مکانیکی خاک. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۴)، ۲۵۰-۲۳۰. doi:10.22069/jwfst.2016.9777.2407
- بهنام، هدیه (۱۳۹۴). امکان‌سنجی بهبود برخی خصوصیات فیزیکی خاک با استفاده از زغال‌زیستی و کمپوست نیشکر. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- بیگی‌هرچگانی، حبیب‌اله، حق‌شناس‌گرگابی، رضیه (۱۳۹۱). اثر متقابل ژئولیت میانه و پلیمر طراوت A200 بر ظرفیت نگهداری آب و ضرایب مدل منحنی رطوبتی در یک بافت خاک سبک. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۹(۴)، ۶۷۹-۶۹۲. doi:10.22092/ijrdr.2013.3055
- بی‌ریا، میلاد، معزی، عبدالامیر، و عامری خواه، هادی (۱۳۹۶). تأثیر زغال‌زیستی باگاس نیشکر بر رشد گیاه ذرت در خاک آلوده به

ضایعات کشاورزی، به بهبود محیط‌زیست کمک نموده و هزینه‌های مربوط به بخش کشاورزی و نگهداری و حفاظت خاک را کاهش می‌دهد. در کل، استفاده از زغال‌زیستی کنوکارپوس می‌تواند برای اصلاح خاک و بهبود میزان رطوبت، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک و استان خوزستان که با مسأله کمبود منابع آب مواجه است یک راه‌کار بسیار مناسب و کارآمد برای مدیریت و بهبود منابع آب و خاک باشد.

در این مطالعه تأثیر زغال‌زیستی (سه و شش تن در هکتار) تهیه شده از کنوکارپوس بر بهبود برخی شاخص‌های مکانیکی خاک بعد از شش ماه انکوباسیون (نگهداری در شرایط مزرعه) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد، کاربرد زغال‌زیستی کنوکارپوس سبب کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود و از این جهت نیروی لازم جهت نفوذ ریشه به خاک کاهش پیدا می‌کند. همچنین، نتایج بررسی‌ها نشان داد افزودن زغال‌زیستی کنوکارپوس به خاک مزرعه تحت کشت ذرت، ضریب انبساط و انقباض‌پذیری را کاهش داده و از این طریق مانع از ترک‌خوردگی خاک حاوی کانی‌های انبساط و انقباض‌پذیر می‌شود که این مورد، یک مسأله مهم در بحث مدیریت پایدار منابع خاک است. استفاده از زغال‌زیستی کنوکارپوس سبب افزایش حد روانی و حد خمیری می‌شود. در نهایت می‌توان گفت که زغال‌زیستی تولید شده از کنوکارپوس این پتانسیل را دارد که عاملی جهت بهبود شاخص‌های مکانیکی خاک و حفظ آن در بلندمدت باشد. البته این پژوهش باید در مقیاس مزرعه‌ای وسیع‌تر و بازه زمانی طولانی‌تر (چندین ساله) انجام شود تا بتوان مدیریت لازم را در جهت کاربرد زغال‌زیستی کنوکارپوس و مقدار مصرفی آن به کار برد. علاوه‌براین توصیه می‌شود پس از افزودن مواد اصلاحی به خاک، فرصت کافی به خاک داده شود تا تغییرات ملایم در ساختار خاک ایجاد شده و باعث بهبود کیفی و پایداری آن در طولانی‌مدت شود. در این پژوهش اثر زغال‌زیستی کنوکارپوس بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک آهکی با بافت سنگین مطالعه شد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی این زغال‌زیستی در دماهای مختلف گرماکافت تهیه و اثر آن بر ویژگی‌های خاک‌های سبک بافت به‌ویژه ویژگی‌های زیستی بررسی شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت مالی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌کنند (طرح پژوهشی شماره ۱۲۶۸).

مرادی، ندا، رسولی صدقیانی، میرحسن، و سپهر، ابراهیم (۱۳۹۶). تأثیر نوع و مقدار زغال‌زیستی بر برخی ویژگی‌های خاک و قابلیت استفاده بعضی عناصر غذایی در یک خاک آهکی. آب و خاک، ۳۱(۴)، ۱۲۳۲-۱۲۴۶. doi:10.22067/jsw.v31i4.61298

یکزبان، عباس، موسوی، علی‌اکبر، ثامن، عبدالمجید، و رضایی، مهروز (۱۴۰۲). تأثیرگذاری زغال‌زیستی برگ نخل و تفاله لیموترش بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی یک خاک لوم شنی. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۱)، ۸۳-۶۹. doi:10.22098/mmws.2022.11264.1111

References

- Abbasi, T.F., Ghobadina, M., Abbasi, F., & Motamedi, A. (2020). Changes of soil moisture profile in the application of biochar and water with microbial pollution under subsurface drip irrigation. *Iranian Water Research Journal*, 16(44), 113-127. doi:10.22034/iwrj.2022.10156.2373. [In Persian]
- Abed Hussein, B., Mahdi, A.B., Emad Izzat, S., Acwin Dwijendra, N.K., Romero Parra, R.M., Barboza Arenas, L.A. & Kianfar, E. (2022). Production, structural properties nano biochar and effects nano biochar in soil: a review. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(12), 607-618. doi: 10.21608/ejchem.2022.131162.5772
- Ajayi, A.E., & Rainer, H.O.R.N. (2017). Biochar-induced changes in soil resilience: effects of soil texture and biochar dosage. *Pedosphere*, 27(2), 236-247. doi:10.1016/S1002-0160(17)60313-8
- Alumer, S. (2017). Effect of sugarcane, coconut, and ash on crushed leaves and engineering on engineering properties and shear strength of two soils with different texture. Master's Thesis, Isfahan University of Technology- Faculty of Agriculture and Natural Resources. doi:10.47176/jwss.26.3.34462
- Andrenelli, M.C., Maienzab, A., Genesiob, L., Migliettab, F., Pellegrini, S., Vaccari, F.P., & Vignozzi, N. (2016). Field application of pelletized biochar: Short-term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. *Journal of Agricultural Water Management*, 163, 190-196. doi:10.1016/j.agwat.2015.09.017
- Arthur, E., Oppong Danso, E., Beiranvand, M., Pouladi, N., Yakubu, A., Abenney-Mickson, S., & Sabi, E.B. (2020). Rice straw biochar effects on Atterberg limits and aggregate characteristics of an Acrisol in Ghana. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(13), 1861-1872. doi:10.1080/03650340.2019.1699240
- کادمیوم و سرب. آب و خاک، ۳۱(۲)، ۶۰۹-۶۲۶. doi:10.22067/jsw.v31i2.55832
- رزاقی، فاطمه، و رضایی، ناهید (۱۳۹۶). اثر سطوح مختلف زغال‌زیستی بر خواص فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف. حفاظت منابع آب و خاک، ۷(۱)، ۷۵-۸۸.
- عباسی، فروغ، قبادی‌نیا، مهدی، عباسی، فریبرز و معتمدی، عبدالرحمن (۱۴۰۱). تغییرات پروفیل رطوبتی خاک در شرایط کاربرد بیوجار و آب دارای آلودگی میکروبی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. پژوهش آب ایران، ۶ (۴۴)، ۱۱۳-۱۲۷. doi:10.22034/iwrj.2022.10156.2373
- Aup-Ngoen, K., & Noipitak, M. (2020). Effect of carbon-rich biochar on mechanical properties of PLA-biochar composites. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 15, 100204. doi:10.1016/j.scp.2019.100204
- Behnam, H, Farrokhian Firouzi, A., & Moezzi, A.A. (2017). Effect of sugarcane bagasse biochar and compost on some soil mechanical properties. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(4), 235-250. doi:10.22069/jwfst.2016.9777.2407 [In Persian]
- Behnam, H. (2015). Feasibility of improving some soil physical properties by using biochar and compost of sugarcane. Master's Thesis, Agriculture Faculty. Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. [In Persian]
- Beigi Harchegani, H.A., & Haghshenas Gorgabi, M. (2013). Interaction effect of Mianeh Zeolite and Taravat A200 polymer on water retention and available water in a coarse-textured soil. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 19(4), 679- 692. doi:10.22092/ijrdr.2013.3055. [In Persian]
- Biria, M., Moezzi, A.A., & AmeriKhah, H. (2017). Effect of sugarcane bagasse made biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soil. *Journal of Water and Soil*, 31(2), 609-626. doi:10.22067/jsw.v31i2.55832. [In Persian]
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687-711. doi:10.2136/sssaj2017.01.0017
- Bordoloi, S., Gopal, P., Boddu, R., Wang, Q., Cheng, Y.F., Garg, A., & Sreedeeep, S. (2019). Soil-biochar-water interactions: role of biochar from *Eichhornia crassipes* in influencing crack propagation and suction in unsaturated soils. *Journal of Cleaner Production*, 210, 847-859. doi:10.1016/j.jclepro.2018.11.051

- Bower, C.A., Reitmeir, R.F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73, 251 - 261. doi:10.1097/00010694-195204000-00001
- 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. doi:10.1016/j.geoderma.2016.07.019
- Busscher, W., Novak, J.M. & Ahmedna, M. (2011). Physical effects of organic matter amendment of a southeastern US coastal loamy sand. *Soil Science Society of American Journal*, 176, 661 - 667. doi:10.1097/SS.0b013e3182357ca9
- De Melo Carvalho, M.T., Maia, A.D.H.N., Madari, B.E., Bastiaans, L., Van Oort, P.A.J., Heinemann, A.B., Da Silva, M.S., Petter, F.A., Marimon Jr, B.H. & Meinke, H. (2014). Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. *Solid Earth*, 5(2), 939. doi:10.5194/se-5-939-2014
- Duncan, D.B. (1955). Multiple range and multiple F tests. *Biometrics*, 11(1), 1-42. doi:10.2307/3001478
- Farrell M., Kuhn T.K., Macdonald L.M., Maddern T.M., Murphy D.V., Hall P.A., Singh B.P., Baumann K., Krull E.S., & Baldock J.A. (2013). Microbial utilisation of biochar derived carbon. *Science of the Total Environment*, 465, 288-297. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.03.090
- Franti, T.G., Laflen, J.M., & Watson, D.A. (1999). Predicting soil detachment from high-discharge concentrated flow. *Transactions of the ASAE*, 42, 329-335. doi:10.13031/2013.13363
- Gao Lu, S., Fang, S.F., and Tong, Z.Y. (2014). Effect of rice husk biochar and charcoal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*, 114, 37-44. doi:10.1016/j.catena.2013.10.014
- Gao Y., Shao G., Lu J., Zhang K., Wu S., & Wang Z. (2020). Effects of biochar application on crop water use efficiency depend on experimental conditions: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 249, 107763. doi:10.1016/j.fcr.2020.107763
- Garg, A., Bordoloi, S., Ni, J., Cai, W., Maddibiona, P. G., Mei, G., & Lin, P. (2019). Influence of biochar addition on gas permeability in unsaturated soil. *Géotechnique Letters*, 9(1), 66-71. doi:10.1680/jgele.18.00190
- Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986) Particle-Size Analysis. In: Klute, A., Ed., *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph No. 9, 2nd Edition, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison, WI, 383-411.
- Gimenez, R., & Govers, G. (2002). Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society American of Journal*, 66, 1475-1483. doi:10.2136/sssaj2002.1475
- Gondim, R.S., Muniz, C.R., Lima, C.E.P., & Santos, C.L.A.D. (2018). Explaining the water-holding capacity of biochar by scanning electron microscope images. *Revista Caatinga*, 31, 972-979. doi:10.1590/198321252018v31n420rc
- Ghebreiyessus, Y.T., Gantzer, C.J., Alberts, E. E., & Lentz R.W. (1994). Soil erosion by concentrated flow: shear stress and bulk density. *Transactions of the ASAE*, 37(6), 1791-1797. doi: 10.13031/2013.28268
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., & Close, D. (2014). Does biochar influence soil physical properties and soil water availability?. *Plant Soil*, 376, 347-361. doi: 10.1007/s11104-013-1980-x
- He, M., Xiong, X., Wang, L., Hou, D., Bolan, N. S., Ok, Y.S., & Tsang, D.C. (2021). A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils. *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125378. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.125378
- Hemmat, A., Aghilinategh, N., & Sadeghi, M. (2010). Shear strength of repacked remoulded samples of a calcareous soil as affected by long-term incorporation of three organic manures in central Iran. *Biosystems Engineering*, 107, 257-261. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.08.009
- Herath, H.M.S.K., Camps-Arbestian, M., & Hedley, M. (2013). Effect of biochar on soil properties in two contrasting soils. *An Alfisol and an Andisol Geoderma*, 209, 188-197. doi:10.1016/j.geoderma.2013.06.016
- Jeffery, S., Meinders, M.B.C., Stoof, C.R., Bezemer, T.M. & Van de Voorde, T.F.J. (2015). Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma*, 251-52, 47-54. doi:10.1016/j.geoderma.2015.03.022
- Juriga, M., Šimanský, V., Horák, J., Kondrlová, E., Igaz, D., Polláková, N., & Balashov, E. (2018). The effect of different rates of biochar and biochar in combination with N fertilizer on the parameters of soil organic matter and soil structure. *Journal of Ecological Engineering*, 19(6).153-161. doi:10.12911/22998993/92894
- Karami, N., Clemente, R., Jimenez, E.M., Lepp N.W., & Beesley L. (2011). Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for

- reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *Journal of Hazardous Materials*, 191, 41–48. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.04.025
- Koide, R.T., Nguyen, B.T., Skinner, R.H., Dell, C.J., Peoples, M.S., Adler, P.R. & Drohan, P.J. (2015). Biochar amendment of soil improves resilience to climate change. *Gcb Bioenergy*, 7(5), 1084-1091. doi: 10.1111/gcbb.12191
- Khuzestan Meteorological Organization, (2018). Technical Meteorological Newsletter. doi: 10.22059/ijswr.2019.277426.668143. [In Persian]
- Langeroodi, A.R.S., Campiglia, E., Mancinelli, R., & Radicetti E. (2019). Can biochar improve pumpkin productivity and its physiological characteristics under reduced irrigation regimes? *Scientia Horticulturae*, 247, 195-204. doi:10.1016/j.scienta.2018.11.059
- Li, C., Bair, D.A., & Parikh, S.J. (2018). Estimating potential dust emissions from biochar amended soils under simulated tillage. *Science of the Total Environment*, 625, 1093-1101. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.249.
- Liu, Z., Chen, X., Jing, Y., Li, Q., Zhang, J., & Q. Huang. (2014). Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil. *Catena*, 123, 45-51. doi: 10.1016/j.catena.2014.07.005
- Lu, S.G., Sun, F.F. & 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. doi:10.1016/j.catena.2013.10.014
- Lusiba, S., Odhiambo J., & Ogola J. (2017). Effect of biochar and phosphorus fertilizer application on soil fertility: soil physical and chemical properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(4), 477-490. doi:10.1080/03650340.2016.1218477
- Moradi, N., Rasouli-Sadaghiani, M.H., & Sepehr, E. (1996). Effect of Biochar types and rates on some soil properties and nutrients availability in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 31(4), 1232-1246. doi:10.22067/jsw.v31i4.61298. [In Persian]
- Mueller, L., Kay, B.D., Been, B., Hu, C., Zhang, Y., Wolff, M., Eulenstein, F., & Schindler, U. (2008). Visual assessment of soil structure: Part II. Implications of tillage, rotation and traffic on sites in Canada, China and Germany. *Soil and Tillage Research*, 103, 188-196. doi:10.1016/j.still.2008.09.010
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3, 313–39. doi:10.3390/agronomy3020313
- Ohu, J.O., Mamman, E., & Mustapha, A.A. (2009). Impact of organic material incorporation with soil in relation to their shear strength and water properties. *International Agrophysics*, 23, 155-162. doi:10.1515/intag-2015-0059.
- Osooli, H., Karimi, A., Shirani, H. (2022). Effect of biochar obtained from different sources on yield and water use efficiency of wheat. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Sci.)*, 35(4), 357-372. doi:10.22092/jwra.2021.354825.873. [In Persian]
- Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L., & Zhang, R. (2013). Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(4), 991-1002. doi:10.4067/S071895162013005000078
- Pahlavan-Rad, M.R., Dahmardeh, K., Hadizadeh, M., Keykha, G., Mohammadnia, N., Gangali, M., & Brungard, C. (2020). Prediction of soil water infiltration using multiple linear regression and random forest in a dry flood plain, eastern Iran. *Catena*, 194, 104715. doi:10.1016/j.catena.2020.104715
- Palansooriya, K.N., Wong, J.T.F., Hashimoto, Y., Huang, L., Rinklebe, J., Chang, S.X., & Ok, Y. S. (2019). Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. *Biochar*, 1(1), 3-22.
- Pranagal, J., Oleszczuk, P., Tomaszewska-Krojańska, D., Kraska, P., & Różyło, K. (2017). Effect of biochar application on the physical properties of Haplic Podzol. *Soil and Tillage Research*, 174, 92-103. doi:10.1016/j.still/2017.06.007
- Qayyum, M.F., Steffens, D., Reisenauer, H.P. & Schubert, S. (2014). Biochars influence differential distribution and chemical composition of soil organic matter. *Plant Soil and Environment*, 60, 337-343. doi:10.17221/768/2013-PSE
- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A.R., & Lehmann, J. (2011). 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. doi:10.1007/s00374-011-0624-7
- Razzaghi, F., & 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), 75-88. [In Persian]
- Razzaghi, F., Obour, P.B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A

- systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055. doi:10.1016/j.geoderma.2019.114055
- Sadowska, S., Zaleski, T., Kuboń, M., Latawiec, A., Klimek-Kopyra, A., Sikora, J., Gliniak, M., Kobylecki, R., & Zarzycki, R. (2023). Effect of the application of sunflower biochar and leafy trees biochar on soil hydrological properties of fallow soils and under soybean cultivation. *Materials*, 16(4), 1737. doi:10.3390/ma16041737
- Singh, H., Northup, B.K., Rice, C.W., & Prasad, P.V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar*, 4(1), 8. doi:10.1007/s42773-022-00138-1
- Smith, C.W., Hadas, A., Dan, J., & Koyumdjisky, H. (1985). Shrinkage and Atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel. *Geoderma*, 35, 47-65. doi:10.1016/0016-7061(85)90055-2
- Sparrevik, M., Adam, C., Martinsen, V., Jubaedah, & Cornelissen, G. (2015). Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved "retort" kilns. *Biomass and Bioenergy*, 72, 65-73. doi:10.1016/j.biombioe.2014.11.016
- Suliman, W., Harsh, J.B., Abu-Lail, N.I., Fortuna, A., M., Dallmeyer, I., & Garcia-Pérez, M. (2017). The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of the Total Environment*, 574, 139-147. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.025
- Sun, Y., Xiong, X., He, M., Xu, Z., Hou, D., Zhang, W., & Tsang, D.C. (2021). Roles of biochar-derived dissolved organic matter in soil amendment and environmental remediation: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 424, 130387. doi:10.1016/j.cej.2021.130387
- Sundarakannan, R., Arumugaprabu, V., Manikandan, V., & Vigneshwaran, S. (2020). Mechanical property analysis of biochar derived from cashew nut shell waste reinforced polymer matrix. *Materials Research Express*, 6(12), 125349. doi:10.1088/2053-1591/ab6197
- Toková, L., Igaz, D., Horák, J., & Aydin, E. (2020). Effect of biochar application and re-application on soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam Haplic Luvisol. *Agronomy*, 10(7), 1005. doi:10.3390/agronomy10071005
- Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., & Nishihara E. (2011). Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9, 1137-1143. doi:10.2136/vzj2018.05.0101
- Varghese, R., Chandrakaran, S., & Rangaswamy, K. (2021). Influence of type of organic substances on the strength and consolidation behaviour of inorganic clay soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(9), 1165-1176. doi:10.1080/19386362.2019.1591739
- Verheijen, F.G., Zhuravel, A., Silva, F.C., Amaro, A., Ben-Hur, M., & Keizer, J.J. (2019). The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma*, 347, 194-202. doi:10.1016/j.geoderma.2019.03.044
- Walkly, A., & Black, I.A. (1934). An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Science*, 37, 29-38. doi:10.1097/00010694-193401000-00003
- Wang A., Lam S.K., Hao X., Li F.Y., Zong Y., Wang H., & Li P. (2018). Elevated CO₂ reduces the adverse effects of drought stress on a high-yielding soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Cultivar by increasing water use efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 660-665. doi:10.1016/j.plaphy.2018.10.016
- Wang, L., Ok, Y.S., Tsang, D.C., Alessi, D.S., Rinklebe, J., Wang, H., & Hou, D. (2020). New trends in biochar pyrolysis and modification strategies: feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns and implications for soil amendment. *Soil Use and Management*, 36(3), 358-386. doi:10.1111/sum.12592
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261. doi:10.1016/j.fuel.2017.12.054
- Wolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1, 1-9. doi:10.1038/ncomms1053
- Wu, F., Jia, Z., Wang, S., Chang, S.X., & Startsev, A. (2013). Contrasting effects of wheat straw and its biochar on greenhouse gas emission and enzyme activities in a chernozemic soil. *Biolog and Fertility of Soils*, 49(5), 555-565. doi:10.1007/s00374-012-0745-7
- Yang, C.D., & Lu, S.G. (2021). Effects of five different biochars on aggregation, water

- retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. *Soil and Tillage Research*, 205, 104798. doi:10.1016/j.still.2020.104798
- Yang, X., Chen, X., & Yang, X. (2019). Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 187, 85-91. doi:10.1016/j.still.2018.11.016
- Yekzaban, A., Moosavi, A.A., Sameni, A., & Rezaei, M. (2023). Effect of palm leaf and lemon peel biochar on some physical and mechanical properties of a sandy loam soil. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 69-83. doi:10.22098/mmws.2022.11264.1111. [In Persian]
- Zhang, C., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Chen, M., Cheng, M., & Wang, R. (2019). Biochar for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts. *Chemical Engineering Journal*, 373, 902-922. doi:10.1016/j.cej.201
- Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Zhao, J., Luo, Y., Novak, J., Herbert, S., & Xing, B. (2013). Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures. *Bioresource Technology*, 13, 463-471. doi:10.1016/j.biortech.2012.12.044. Epub 2012 Dec 17.
- Zong, Y., Chen, D., & Lu, S. (2014). Impact of biochars on swell-shrinkage behavior, mechanical strength, and surface cracking of clayey soil. *Journal Plant Nutrition and Soil Science*. 177, 920-926. doi:10.1002/jpln.201300596
- Zorzona, R., Faz, A., Carmona, D.M., Kabas, S., Martinez-Martinez, S., & Acosta, J.A. (2012). Plant cover and soil biochemical properties in a mine tailing pond five years after application of marble wastes and organic amendments. *Pedosphere*, 22, 22-32. doi:10.1016/S1002-0160(11)60188-4