

Research Article

Vol. 39, No. 6, Feb.-Mar. 2026, p. 611-626

Impact of Biochar and Compost Application on Soil Physical and Chemical Characteristics and Water Availability for Sugarcane

A. Karimi^{1*}, E. Zangeneh-Yusefabadi²

1- Department of Agronomy Research, Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: akbar.karimi84@yahoo.com)

2- Department of Irrigation and Drainage Research, Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute, Ahvaz, Iran

Received: 18 February 2026

Revised: 10 May 2026

Accepted: 11 May 2026

Available Online: 11 May 2026

How to cite this article:

Karimi, A., & Zangeneh-Yusefabadi, E. (2026). Impact of biochar and compost application on soil physical and chemical characteristics and water availability for the sugarcane plant. *Journal of Water and Soil*, 39(6), 611-626. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97933.1528>

Introduction

One of the main challenges of agricultural soils in arid and semi-arid regions is the low amount of organic matter, which has a negative effect on the physical and chemical properties of the soil. Soil organic matter plays a role in various soil properties and processes, including soil water retention capacity, soil water distribution, soil microbial activity, water and nutrient availability to plants, and subsequently plant nutrition and yield. The application of biochar as an organic amendment is one of the strategies that has received attention in recent years for increasing soil organic matter and improving the physical and chemical attributes of the soil. Another way to improve soil organic matter is compost application to the soil as an organic amendment. The low organic matter in the soils of sugarcane fields in Khuzestan Province and also the optimal amount of biochar and compost application to improve the physical and chemical properties of these soils, have not been studied. Therefore, this study was carried out to investigate the effect of applying different levels of biochar and compost derived from sugarcane green harvest residues on the physical and chemical properties of soil and water availability for sugarcane plants under field condition.

Materials and Methods

This study was conducted under field conditions at Research Station No. 1 of the Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute. This experiment was conducted in a randomized complete block design with seven treatments, including control, biochar application at three levels of 5 (B5), 10 (B10), and 15 (B15) t ha⁻¹, and compost application at three levels of 15 (CO15), 30 (CO30), and 45 (CO45) t ha⁻¹, with three replications. For the application of biochar and compost treatments prior to sugarcane planting, the required amounts of each treatment were weighed, manually distributed and incorporated into the soil to an approximately 30 cm depth. Subsequently, sugarcane setts were planted. Soil sampling was conducted at the end of the growth period in different treatments and the physical and chemical properties of the soil were determined. In this study, the effects of different treatments on the soil chemical characteristics (soil pH, EC and organic carbon), soil phosphorus and potassium availability, physical properties (soil bulk density and mean weight diameter of soil aggregates), field capacity, and permanent wilting point (PWP) were measured and water availability for the sugarcane plant was determined.

Results and Discussion

The results indicated that the application of biochar treatments (B10 and B15) and compost treatments (CO30 and CO45) decreased soil pH and bulk density, while significantly increasing mean weight diameter, soil organic



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97933.1528>

carbon, available phosphorus, available potassium, and plant-available water. The mean weight diameter of soil aggregates in the CO30, CO45, B5, B10, and B15 treatments was 15.8%, 23.7%, 20.2%, 32.5%, and 36.0% higher than that of the control, respectively. The greatest increases in mean weight diameter of soil aggregates and field capacity plant water availability were observed in the B10 and B15 treatments. The amount of plant-available water in B10 and B15 was 38.9% and 37.5% higher than the control, respectively. In addition, the results also indicated a greater effect of biochar treatments on increasing plant-available water compared with compost treatments. Plant available water in B10 treatment was 21.7% higher than CO45 and 26.3% higher than CO30 treatment. The results indicated that there were no significant differences among B10, B15, and CO45 with respect to soil pH, organic carbon, and phosphorus availability. However, the biochar treatments (B10 and B15) were significantly more effective than CO45 in enhancing soil potassium availability, improving soil physical properties, and increasing plant-available water.

Conclusion

Overall, it can be concluded that biochar application at 10 t ha^{-1} and compost application at 45 t ha^{-1} represent the optimal rates for improving soil chemical properties in calcareous soils of sugarcane fields. Furthermore, biochar at 10 t ha^{-1} was the most effective treatment for improving soil physical properties and enhancing water availability for sugarcane.

Keywords: Bulk density, Nutrient availability, Organic amendments, Sugarcane residues, Water availability

تأثیر کاربرد بیوپچار و کمپوست بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و فراهمی آب برای گیاه نیشکر

اکبر کریمی^{۱*} - الهام زنگنه یوسف‌آبادی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

چکیده

اصلاح‌کننده‌های آلی خاک می‌توانند در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و فراهمی آب برای گیاه مؤثر باشند. این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد سطوح مختلف بیوپچار و کمپوست تهیه شده از بقایای برداشت سبز نیشکر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و فراهمی آب برای گیاه نیشکر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با هفت تیمار شامل شاهد، کاربرد بیوپچار در سه سطح ۵ (B5)، ۱۰ (B10) و ۱۵ (B15) تن در هکتار و کاربرد کمپوست در سه سطح ۱۵ (CO15)، ۳۰ (CO15) و ۴۵ (CO45) تن در هکتار و در سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که کاربرد تیمارهای بیوپچار (B10 و B15) و کمپوست (CO30 و CO45) سبب کاهش pH و چگالی ظاهری خاک و افزایش معنی‌دار میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک و فراهمی آب برای گیاه شدند. تفاوت معنی‌داری میان تأثیر تیمارهای B10، B15 و CO45 بر pH، کربن آلی و فراهمی فسفر در خاک مشاهده نشد، در حالی که تأثیر تیمارهای بیوپچار B10 و B15 در افزایش فراهمی پتاسیم در خاک، بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش فراهمی آب برای گیاه به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار CO45 بود. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که سطح ۱۰ تن در هکتار بیوپچار و سطح ۴۵ تن در هکتار کمپوست، مقدار مناسب کاربرد آن‌ها به‌منظور بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک در خاک‌های آهکی مزارع نیشکر بود. همچنین کاربرد بیوپچار در سطح ۱۰ تن در هکتار به‌عنوان مناسب‌ترین تیمار جهت بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش فراهمی آب برای گیاه نیشکر بود.

واژه‌های کلیدی: آب قابل دسترس، اصلاح‌کننده‌های آلی، بقایای نیشکر، چگالی ظاهری، فراهمی عناصر غذایی

مقدمه

آلی برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که ماده آلی کمی دارند، ضروری به‌نظر می‌رسد (Sharma et al., 2025).

کاربرد بیوپچار و کمپوست به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های آلی، از جمله راه‌کارهایی است که در سال‌های اخیر برای افزایش ماده آلی خاک و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مورد توجه قرار گرفته است (Wang et al., 2024; Haufiku et al., 2025; Adetunji & Blanco-Canqui, 2026). بیوپچار یک ماده متخلخل و غنی از کربن

یکی از چالش‌های اصلی خاک‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود ماده آلی می‌باشد که اثرات منفی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد (Azim et al., 2024). ماده آلی خاک بر ویژگی‌ها و فرآیندهای مختلف خاک از جمله ظرفیت نگهداشت آب در خاک، توزیع آب در خاک، فعالیت میکروبی خاک، فراهمی عناصر غذایی برای گیاه و به‌دنبال آن در بهبود تغذیه و عملکرد گیاه، نقش دارد (Piccolo & Drosos, 2025). بنابراین کاربرد اصلاح‌کننده‌های

۱- گروه تحقیقات به‌زراعی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، اهواز، ایران
(* نویسنده مسئول: Email: akbar.karimi84@yahoo.com)

۲- گروه تحقیقات آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، اهواز، ایران

خوزستان (Karimi et al., 2024a) و اثرات منفی ناشی از آن، بررسی تأثیر کاربرد بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و فراهمی آب برای گیاه نیشکر ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی که تاکنون مطالعات چندانی در زمینه مقایسه تأثیر کاربرد سطوح مختلف بیوپچار و کمپوست تهیه شده از بقایای برداشت سبز نیشکر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های آهکی ایران، در شرایط مزرعه‌ای انجام نشده است و همچنین مقدار بهینه کاربرد کمپوست و بیوپچار، در خاک‌های آهکی مزارع نیشکر تعیین نشده است، بنابراین این پژوهش به منظور بررسی تأثیر کاربرد سطوح مختلف بیوپچار و کمپوست بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و فراهمی آب برای گیاه نیشکر در شرایط مزرعه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها

تهیه بیوپچار و کمپوست و اندازه‌گیری ویژگی‌های آن‌ها

در این پژوهش از زیست‌توده بقایای برداشت سبز نیشکر (پوشال و سرنی) تهیه شده از کشت و صنعت امام خمینی (ره) خوزستان برای تهیه بیوپچار استفاده شد. بقایای برداشت سبز تهیه شده ابتدا هوا خشک شده و سپس در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند (Singh et al., 2017). فرآیند پیرولیز در کوره الکتریکی در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس با نرخ افزایش دمای ۵ درجه سلسیوس در دقیقه، به مدت ۳ ساعت در شرایط حداقل اکسیژن انجام شد (Karimi et al., 2020; Karimi et al., 2026). کمپوست بقایای برداشت سبز نیشکر در سایت تولید کمپوست کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان تهیه شد. سپس ویژگی‌های بیوپچار و کمپوست مورد استفاده در این پژوهش، اندازه‌گیری شد (Singh et al., 2017) که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در نمونه‌ها

این پژوهش در شرایط مزرعه‌ای در ایستگاه تحقیقاتی شماره یک مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان واقع در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۲ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی با ارتفاع ۶/۶۰۳ متر از سطح دریا، انجام شد. نمونه‌برداری اولیه از خاک محل انجام آزمایش به روش مرکب از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد. نمونه خاک جمع‌آوری شده، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شد (Kroetsch & Wang, 2008). نتایج آنالیز ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است. خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی، pH قلیایی، غیر شور، آهکی و دارای ماده آلی کم بود (جدول ۲).

است که از تجزیه حرارتی زیست‌توده‌های مختلف طی فرآیند گرماکافت، در شرایط بدون اکسیژن و یا حداقل اکسیژن تولید می‌شود (Khajavi-Shojaei et al., 2024). نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که کاربرد بیوپچار در خاک‌های آهکی سبب افزایش مقدار کربن آلی خاک و فراهمی عناصر غذایی از جمله فسفر و پتاسیم برای گیاه می‌شود (Karimi et al., 2020; Khaji et al., 2025). کاربرد بیوپچار به عنوان یک منبع کربن در خاک به دلیل ساختار متخلخل آن، سبب تشکیل منافذ ثانویه و تغییر اندازه منافذ خاک شده و با بهبود کربن آلی، تخلخل و سطح ویژه خاک، خاکدانه‌سازی خاک را تحت تأثیر قرار داده و منجر به بهبود ساختمان خاک و همچنین افزایش نگهداشت آب در خاک شود (Enebe et al., 2025). کاربرد کمپوست نیز با تأثیر بر ویژگی‌ها و فرآیندهای گوناگون خاک می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار داده و در بهبود رشد و عملکرد گیاهان مؤثر باشد (Haufigu et al., 2025). کاربرد کمپوست، می‌تواند از طریق مکانیسم‌های مختلف، فراهمی فسفر و پتاسیم را برای گیاه افزایش دهد (Wang et al., 2024). کمپوست همچنین می‌تواند منبع عناصر غذایی ضروری برای گیاه باشد و آزادسازی عناصر غذایی موجود در ساختار کمپوست در خاک، در بهبود وضعیت عناصر غذایی مؤثر است. کاربرد کمپوست همچنین می‌تواند در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از جمله کاهش چگالی ظاهری، خاکدانه‌سازی، افزایش میانگین قطر خاکدانه‌ها، افزایش فراهمی آب برای گیاه، نیز مؤثر است (Ghorbani et al., 2023).

تأثیر کاربرد بیوپچار و کمپوست بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به عوامل مختلفی از جمله نوع و ویژگی‌های آن‌ها، مقدار کاربرد آن‌ها و همچنین ویژگی‌های خاک بستگی دارد (Ghorbani et al., 2023; Albalasmeh et al., 2024; Xiao et al., 2024). ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2026) با بررسی تأثیر کاربرد سطوح بیوپچار ۴/۵ و ۹ تن در هکتار بر فراهمی فسفر در یک خاک آهکی گزارش کردند که کاربرد بیوپچار در سطح ۹ تن در هکتار سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل دسترس خاک شد، در حالی که سطح ۴/۵ تن در هکتار بیوپچار اثر معنی‌داری بر فسفر قابل دسترس خاک نداشت. قربانی و امیراحمدی (Ghorbani & Amirahmadi, 2024) گزارش کردند کاربرد بیوپچار در مقادیر کم‌تر از ۵ تن در هکتار و بیش‌تر از ۳۰ تن در هکتار، در مقایسه با کاربرد بیوپچار در سطح ۱۰ تا ۲۰ تن در هکتار تأثیر کم‌تری در افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک دارد.

بقایای برداشت سبز نیشکر (سرنی و برگ) از پسماندهای مهم کشاورزی در استان خوزستان می‌باشد. یکی از راهکارهای مدیریت این بقایا تبدیل آن‌ها به بیوپچار طی فرآیند پیرولیز و یا تبدیل آن‌ها به کمپوست می‌باشد (Khaji et al., 2025). از این‌رو این زیست‌توده جهت تولید بیوپچار و کمپوست استفاده شد. از طرف دیگر با توجه به کمبود ماده آلی در خاک‌های مزارع تحت کشت نیشکر در استان

جدول ۱- برخی ویژگی‌های بیوچار و کمپوست مورد استفاده در این پژوهش
Table 1- Selected properties of the biochar and compost used in this study

نسبت مولی Molar ratio H/C	هیدروژن Hydrogen (%)	پتاسیم Potassium (%)	فسفر Phosphorus (%)	نیتروژن Nitrogen (%)	کربن Carbon (%)	سطح ویژه Specific surface area	چگالی ظاهری Bulk density	هدایت الکتریکی Electrical conductivity (1:10)	pH (1:10)	ویژگی Property
واحد Unit	%	%	%	%	%	m ² g ⁻¹	g cm ⁻³	dS m ⁻¹	-	
0.32	1.43	5.42	1.21	1.79	53.2	56.7	0.23	4.23	6.95	بیوچار Biochar
-	-	2.34	1.08	1.12	26.2	14.7	0.82	3.38	6.82	کمپوست Compost

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه
Table 2- Selected physical and chemical properties of the studied soil

بافت خاک Soil texture	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	BD	K _{Ava}	P _{Ava}	نیتروژن کل Total N	CCE	OC	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	pH	ویژگی Property
-	%	%	%	g cm ⁻³	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	%	%	dS m ⁻¹	-	واحد Unit
Clay loam	22.5	38.5	39	1.58	124.5	5.24	0.51	46.5	0.43	2.56	7.82	مقدار Value

EC: هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع؛ OC: کربن آلی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل؛ P_{Ava}: فسفر قابل دسترس؛ K_{Ava}: پتاسیم قابل دسترس؛ BD: چگالی ظاهری

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و آب قابل دسترس برای گیاه

نمونه‌برداری خاک در پایان دوره رشد رویشی گیاه (۱۳ ماه پس از کشت) در تیمارهای مختلف انجام شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شدند. pH و هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک (Rhoades, 1996)، اندازه‌گیری شدند. کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1996)، فسفر قابل دسترس خاک به روش استخراج با بی‌کربنات سدیم (Olsen et al., 1954)، عصاره‌گیری و غلظت آن به روش رنگ‌سنجی (Murphy & Riley, 1962) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Apel PD-303 UV)، اندازه‌گیری شد. غلظت پتاسیم قابل دسترس خاک به روش عصاره‌گیری با اسات آمونیوم (Helmke & Sparks, 1996) و با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (Corning 410) اندازه‌گیری شد.

برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک، شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک‌تر و با استفاده از مجموعه‌ای از الک‌های با قطر ۲، ۱، ۰.۵، ۰.۲۵ و ۰.۱ میلی‌متر (از بالا به پایین) اندازه‌گیری شد. سپس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (Le Bissonnais, 1996):

تیمارهای آزمایشی و روش اجرای پژوهش

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۷ تیمار شامل ۱- شاهد (C: بدون کاربرد کمپوست و بیوچار)، ۲- کاربرد کمپوست بقایای نیشکر در سطح ۱۵ تن در هکتار (CO15)، ۳- کاربرد کمپوست بقایای نیشکر در سطح ۳۰ تن در هکتار (CO30)، ۴- کاربرد کمپوست بقایای نیشکر در سطح ۴۵ تن در هکتار (CO45)، ۵- کاربرد بیوچار بقایای نیشکر در سطح ۵ تن در هکتار (B5)، ۶- کاربرد بیوچار بقایای نیشکر در سطح ۱۰ تن در هکتار (B10)، ۷- کاربرد بیوچار بقایای نیشکر در سطح ۱۵ تن در هکتار (B15) و در سه تکرار (در مجموع ۲۱ کرت آزمایشی) انجام شد. اندازه هر کرت آزمایشی ۲۷/۵ متر مربع (۵×۵ متر) بود. برای کاربرد تیمارهای بیوچار و کمپوست قبل از کشت گیاه نیشکر، مقدار هر یک از تیمارها با توجه به مساحت کرت‌های آزمایشی وزن شد و به صورت دستی در کف جویچه توزیع شدند و با خاک تا عمق حدود ۳۰ سانتی‌متری مخلوط شدند. سپس کشت قلمه نیشکر به صورت دوردیفه، در کف جویچه در اول شهریور ماه انجام شد (Karimi et al., 2024b; Zanganeh-Yusefabadi et al., 2024). در دوره داشت آبیاری تیمارها به روش سطحی جویچه‌ای انتهابسته انجام شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (1)$$

که در این رابطه $\bar{x}_i$ میانگین قطر خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی الک i (میانگین قطر سوراخ‌های الک بالایی و پایینی)، n تعداد الک‌ها و w_i نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاک به کار برده شده در ابتدای آزمایش پس از کسر ذرات شن و سنگ‌ریزه می‌باشد.

چگالی ظاهری خاک در تیمارهای مختلف، به روش استوانه‌های نمونه‌برداری (Danielson & Sutherland, 1986) اندازه‌گیری شد. رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC) و رطوبت نقطه پژمردگی دایم (PWP) در تیمارهای مختلف با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین شد (Kirkham, 2014) و آب قابل دسترس برای گیاه (PAW) از اختلاف رطوبت بین رطوبت حد ظرفیت مزرعه و حد پژمردگی دایم با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$PAW = FC - PWP \quad (2)$$

در این رابطه PAW آب قابل دسترس برای گیاه (درصد)، رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) (درصد) و رطوبت نقطه پژمردگی دایم (PWP) (درصد) است.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تجزیه آماری داده‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نمودارها نیز در محیط نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمارهای بیوچار و کمپوست بر pH، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک معنی‌دار بود بوده و این در حالی بود که اثر سطوح این ترکیبات بر هدایت الکتریکی خاک معنی‌دار نبود (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در اثر کاربرد تیمارهای بیوچار و کمپوست، pH خاک کاهش (۰/۰۹ تا ۰/۲۱ واحد) یافت (جدول ۴). بدین ترتیب که بیش‌ترین مقدار pH خاک مربوط به تیمار شاهد (بدون کاربرد بیوچار یا کمپوست) (۷/۸۴) و کم‌ترین مقدار pH خاک مربوط به تیمارهای کاربرد کمپوست در سطح ۴۵ تن در هکتار (۷/۶۷) و کاربرد بیوچار در سطح ۱۵ تن در هکتار (۷/۶۷) بود (جدول ۴). همچنین تفاوت معنی‌داری بین مقدار pH خاک در تیمارهای کاربرد کمپوست در سطح ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار و کاربرد بیوچار در سطح ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار مشاهده نشد. به‌طور کلی تغییرات تغییرات pH خاک در اثر کاربرد بیوچار و کمپوست قابل توجه نبود، اگرچه از نظر آماری معنی‌دار بود (جدول ۴).

کاهش pH خاک در تیمارهای کاربرد بیوچار و کمپوست می‌تواند به این دلیل باشد که بیوچار و کمپوست دارای گروه‌های عاملی اسیدی بوده و اکسیداسیون آن‌ها در خاک می‌تواند سبب آزاد شدن گروه‌های عاملی اسیدی و به‌دنبال آن کاهش جزئی pH خاک شود (Karimi et al., 2020).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارها بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

Table 3- ANOVA (mean squares) for the effects of treatments on soil chemical characteristics

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean squares				
		په‌اش خاک Soil pH	هدایت الکتریکی خاک Soil lectrical conductivity	کربن آلی خاک Soil organic carbon	فسفر قابل دسترس خاک Soil available P	پتاسیم قابل دسترس خاک Soil available K
بلوک Block	2	0.004 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.11 ^{ns}	86.3 ^{ns}
تیمار Treatment	6	0.018 ^{**}	0.002 ^{ns}	0.072 ^{**}	42.5 ^{**}	1699 ^{**}
خطا Error	12	0.002	0.005	0.001	0.25	37.2
ضریب تغییرات C.V. (%)		1.61	9.24	5.58	7.86	8.37

^{ns} و ^{**}: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

^{ns} and ^{**}: non-significant and significant at $p \leq 0.01$, respectively

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر اصلی تیمارهای کاربرد بیوجار و کمپوست بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

Table 4- Comparison of the average main effect of biochar and compost application treatments on soil chemical properties

تیمار	په‌اش خاک	هدایت الکتریکی	کربن آلی
Treatment	Soil pH	EC	Organic carbon
C	7.88 ^a	2.60 ^a	0.45 ^e
CO ₁₅	7.79 ^b	2.50 ^a	0.59 ^d
CO ₃₀	7.74 ^{bcd}	2.79 ^a	0.77 ^{bc}
CO ₄₅	7.67 ^d	2.68 ^a	0.88 ^a
B ₅	7.76 ^{bc}	2.72 ^a	0.75 ^c
B ₁₀	7.69 ^{cd}	2.60 ^a	0.82 ^{ab}
B ₁₅	7.67 ^d	2.43 ^a	0.86 ^a

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

C, CO₁₅, CO₃₀ و CO₄₅: به ترتیب شاهد (بدون کاربرد کمپوست و بیوجار) و تیمارهای سطوح ۱۵، ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار کمپوست و B₅، B₁₀ و B₁₅ به‌ترتیب تیمارهای سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بیوجار می‌باشند.

Means with similar letter (s) are not significantly different according to the Duncan's test ($p < 0.05$).

C, CO₁₅, CO₃₀ and CO₄₅ are control and compost treatments at 15, 30 and 45 t ha⁻¹ levels respectively and B₅, B₁₀ and B₁₅ are biochar treatments at 5, 10 and 15 t ha⁻¹ levels respectively.

مشاهده نشد. افزایش کربن آلی خاک در اثر کاربرد بیوجار و کمپوست به‌دلیل مقدار نسبتاً بالای کربن آن‌ها (جدول ۱) و اضافه شدن آن به خاک است که در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است. بدین‌ترتیب که مقدار کربن آلی خاک به‌دلیل تأثیرپذیری از کربن بیوجار و کمپوست، افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که بخشی از کربن آلی موجود در بیوجار و کمپوست به ذخیره کربن در خاک پیوسته و سبب افزایش کربن آلی خاک خواهد شد و بخشی دیگر از آن پس از افزوده شدن به خاک اکسید می‌شود (Moradi & Karimi, 2020; Karimi et al., 2026).

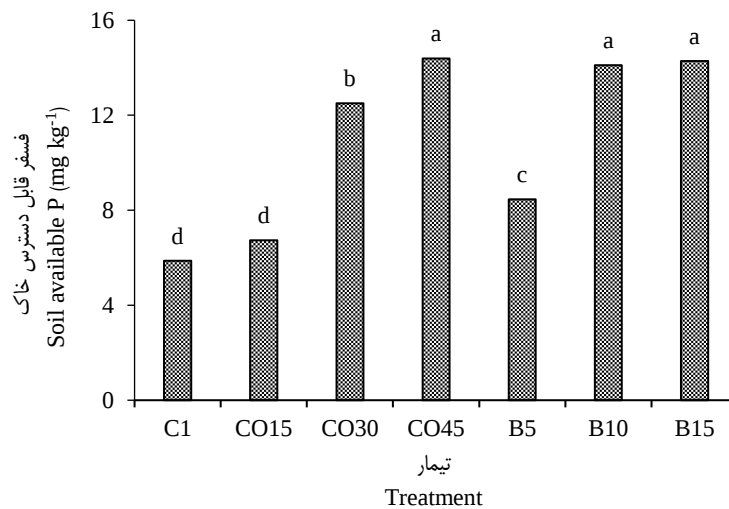
فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در همه تیمارهای کاربرد بیوجار و کمپوست به‌جز تیمار کاربرد کمپوست در سطح ۱۵ تن در هکتار، غلظت فسفر قابل دسترس خاک به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۱). اگرچه بیش‌ترین غلظت فسفر قابل دسترس خاک مربوط به تیمار کاربرد کمپوست در سطح ۴۵ تن در هکتار بود، با این حال تفاوت غلظت فسفر قابل دسترس خاک در این تیمار با تیمارهای کاربرد بیوجار در سطح ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۱). افزایش غلظت فسفر قابل دسترس خاک در سه سطح ۱۵، ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار کمپوست در مقایسه با شاهد به‌ترتیب ۱۴/۷، ۱۱۳/۱ و ۱۴۵/۱ درصد بوده و این مقدار افزایش در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بیوجار نیز به‌ترتیب ۴۴/۱، ۴۴/۴ و ۱۴۳/۳ درصد بود.

همچنین به‌دلیل اکسیداسیون شیمیایی و زیستی و تجزیه مولکول‌های آلی کوچک اصلاح‌کننده‌های آلی مانند بیوجار و کمپوست، کربن آلی محلول خاک افزایش یافته و به‌دنبال آن افزایش فعالیت میکروبی و تولید اسیدهای آلی، می‌تواند در کاهش جزئی pH خاک تیمار شده با اصلاح‌کننده‌های آلی، مؤثر باشد (Amin et al., 2020; Mihoub et al., 2022). انحلال کربنات‌ها و محدود شدن هیدرولیز آن‌ها نیز می‌تواند از دیگر دلایل کاهش pH خاک‌های آهکی تیمار شده با اصلاح‌کننده‌های آلی باشد (Karimi et al., 2026). سایر پژوهشگران نیز کاهش pH خاک‌های آهکی را در اثر کاربرد کمپوست (Luo et al., 2022) و بیوجار (Karimi et al., 2020; Mihoub et al., 2022) گزارش کردند.

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد تفاوت معنی‌داری بین EC خاک در تیمارهای مختلف وجود نداشت. با وجود این که EC خاک در برخی تیمارها تا حدی کاهش و یا افزایش یافت، اما این تغییرات از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۴). با وجود این که در برخی پژوهش‌های پیشین کاهش و یا افزایش EC خاک در اثر کاربرد کمپوست و بیوجار گزارش شده است، اما در این پژوهش تغییرات معنی‌داری مشاهده نشد. این تفاوت در نتایج می‌تواند به‌دلیل شرایط متفاوت پژوهش از جمله ویژگی‌های خاک و اصلاح‌کننده‌های مورد استفاده باشد.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر کاربرد همه تیمارهای بیوجار و کمپوست بر کربن آلی خاک نشان داد که کربن آلی خاک در تیمارهای کاربرد بیوجار و کمپوست به‌طور معنی‌داری بیش‌تر (۱/۳۷-۱/۹۶ برابر) از تیمارهای بدون کاربرد بیوجار و کمپوست بود (جدول ۴). تفاوت معنی‌داری بین مقدار کربن آلی خاک در سه تیمار کاربرد کمپوست در سطح ۴۵ تن در هکتار و کاربرد بیوجار در سطح ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر فسفر قابل دسترس خاک

Figure 1- Mean comparison of treatments effect on soil available P

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

C, CO₁₅, CO₃₀ و CO₄₅: به ترتیب شاهد (بدون کاربرد کمپوست و بیوچار) و تیمارهای سطوح ۱۵، ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار کمپوست و B₅, B₁₀ و B₁₅ به ترتیب تیمارهای سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بیوچار می‌باشند.

Means with similar letter (s) are not significantly different according to the Duncan's test ($p < 0.05$).

C, CO₁₅, CO₃₀ and CO₄₅ are control and compost treatments at 15, 30 and 45 t ha⁻¹ levels respectively and B₅, B₁₀ and B₁₅ are biochar treatments at 5, 10 and 15 t ha⁻¹ levels respectively.

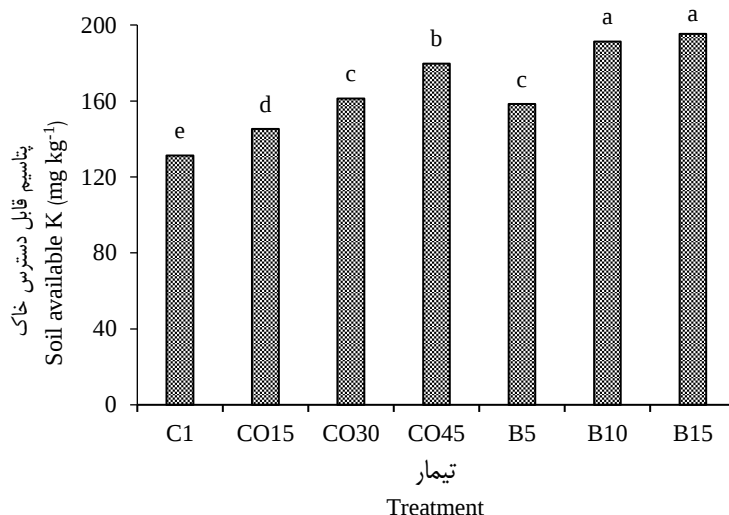
کردند کاربرد کمپوست سبب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر معدنی قابل دسترس خاک شد. یوان و همکاران (Yuan et al., 2025)، نیز افزایش غلظت فسفر قابل دسترس خاک در اثر کاربرد بیوچارهای تهیه شده از کاه گندم و ذرت در یک خاک آهکی را گزارش کردند.

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در همه سطوح بیوچار و کمپوست غلظت پتاسیم قابل دسترس خاک به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۲). بیش‌ترین غلظت پتاسیم قابل دسترس خاک مربوط به دو تیمار سطوح ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بود که در این دو تیمار پتاسیم قابل دسترس خاک به ترتیب ۴۵/۶ و ۴۸/۷ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۲). یکی از دلایل افزایش پتاسیم قابل دسترس خاک در اثر کاربرد بیوچار و کمپوست می‌تواند به دلیل آزاد شدن پتاسیم از بیوچار و کمپوست و اضافه شدن آن به خاک باشد. بیش‌تر بودن پتاسیم قابل دسترس خاک در تیمارهای کاربرد بیوچار در مقایسه با تیمارهای کمپوست می‌تواند به دلیل بیش‌تر بودن مقدار پتاسیم بیوچار در مقایسه با کمپوست و احتمالاً اثر بیش‌تر بیوچار بر فعالیت میکروارگانیسم‌های حل‌کننده پتاسیم باشد (جدول ۱). افزایش کربن آلی خاک در اثر کاربرد تیمارهای کمپوست (جدول ۳) و افزایش احتمالی تشکیل اسیدهای آلی و همچنین افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های حل‌کننده پتاسیم در خاک تیمار شده با بیوچار و

به‌طور کلی نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت و چشم‌گیر کاربرد بیوچار (به‌ویژه تیمارهای B₁₀ و B₁₅) و کمپوست (CO₃₀ و CO₄₅) در افزایش فراهمی فسفر در خاک بود. کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی در خاک، می‌تواند از طریق مکانیسم‌های مختلف فراهمی فسفر را در خاک افزایش دهد (Estrada-Bonilla et al., 2021; Yuan et al., 2025; Adnan et al., 2025). از جمله این‌که مولکول‌های آلی می‌توانند به‌طور اختصاصی توسط مواد معدنی خاک جذب شوند و با فسفر برای مکان‌های جذب رقابت کنند، ماده آلی همچنین می‌تواند روی مکان‌های جذب غیراختصاصی کلوتیدها جذب شود و بار منفی سطح ذرات را افزایش دهد، این عمل، جاذبه الکترواستاتیکی فسفر به خاک را کاهش داده و سبب افزایش غلظت فسفر محلول در خاک می‌شود. مواد آلی در خاک‌های آهکی در اثر واکنش با دی‌کلسیم فسفات رشد کریستال‌های این ترکیب را کاهش داده و سرعت تشکیل اکتاکلسیم فسفات (Ca₈-P) را کاهش می‌دهد. افزون بر این اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم (حاصل از تجزیه بیوچار و کمپوست)، می‌توانند از طریق ایجاد کلات با کلسیم، از رسوب فسفر به شکل آپاتیت جلوگیری کنند (Adnan et al., 2025). به‌طور مشابه با نتایج این پژوهش، استرادا-بانیلا و همکاران (Estrada-Bonilla et al., 2021) با انجام مطالعه‌ای در یک خاک تحت کشت نیشکر در برزیل گزارش

از بقایای ذرت در خاک‌های آهکی خوزستان را گزارش کردند. به‌طور مشابه اتر و همکاران (Athar et al., 2025) با انجام پژوهشی گزارش کردند کاربرد کمپوست سبب افزایش پتاسیم قابل دسترس در یک خاک قلیایی شد.

کمپوست و در نتیجه انحلال ترکیبات نامحلول پتاسیم خاک می‌تواند از دیگر دلایل افزایش پتاسیم قابل دسترس خاک در تیمارهای کاربرد بیوجار و کمپوست باشند. کرمی و همکاران (Karimi et al., 2020) نیز افزایش پتاسیم قابل دسترس خاک در اثر کاربرد بیوجار تهیه شده



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر پتاسیم قابل دسترس خاک

Figure 2- Mean comparison of treatments effect on soil available K

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

C, CO₁₅, CO₃₀ و CO₄₅: به ترتیب شاهد (بدون کاربرد کمپوست و بیوجار) و تیمارهای سطوح ۱۵، ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار کمپوست و B₅، B₁₀ و B₁₅ به ترتیب تیمارهای سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بیوجار می‌باشند.

Means with similar letter (s) are not significantly different according to the Duncan's test ($p < 0.05$).

C, CO₁₅, CO₃₀ and CO₄₅ are control and compost treatments at 15, 30 and 45 t ha⁻¹ levels respectively and B₅, B₁₀ and B₁₅ are biochar treatments at 5, 10 and 15 t ha⁻¹ levels respectively.

جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

Table 5- ANOVA (mean squares) for the effects of treatments on soil physical characteristics

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares				
		چگالی ظاهری Bulk density	میانگین وزنی قطر خاکدانه Mean weight diameter of aggregates (MWD)	رطوبت ظرفیت مزرعه Field capacity (FC)	رطوبت پژمردگی دائم Permanent wilting point (PWP)	آب قابل دسترس گیاه Plant available water
بلوک Block	2	0.001 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.003 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.006 ^{ns}
تیمار Treatment	6	0.029 ^{**}	0.068 ^{**}	0.068 ^{**}	0.06 ^{ns}	3.798 ^{**}
خطا Error	12	0.001	0.002	0.002	0.011	0.028
ضریب تغییرات C.V (%)		4.72	6.23	5.23	4.12	6.94

^{ns} و ^{**}: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

^{ns} and ^{**}: non-significant and significant at $p \leq 0.01$, respectively.

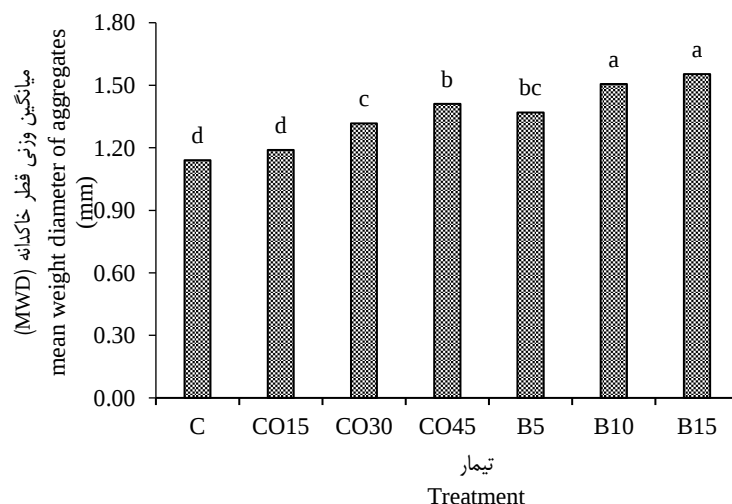
ویژگی‌های فیزیکی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمار بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک شامل چگالی ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه، رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل دسترس برای گیاه معنی‌دار بود، در حالی که اثر تیمار بر رطوبت پژمردگی دایم از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۵).

میانگین وزنی قطر خاکدانه

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در تمامی سطوح بیوپچار و کمپوست، به جز تیمار کاربرد کمپوست در سطح ۱۵ تن در هکتار، میانگین وزنی قطر خاکدانه به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۳). بیش‌ترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه مربوط به دو تیمار B₁₀ و B₁₅ بود و تفاوت معنی‌داری بین این دو تیمار مشاهده نشد. مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه در تیمارهای CO₄₅، CO₃₀، B₅، B₁₀ و B₁₅، به ترتیب ۱۵/۸، ۲۳/۷، ۲۰/۲، ۳۲/۵ و ۳۶/۰ درصد بیش‌تر از این مقدار در تیمار شاهد بود. تأثیر تیمارهای بیوپچار (B₁₀ و B₁₅) در افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای کاربرد کمپوست بود (شکل ۳).

تشکیل خاکدانه و پایداری آن، به‌عنوان عوامل مهم در تعیین ساختمان خاک، از جنبه‌های مهم کیفیت فیزیکی خاک هستند



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD)

Figure 3- Mean comparison of treatments effect on mean weight diameter of aggregates (MWD)

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

C، CO₁₅، CO₃₀ و CO₄₅: به ترتیب شاهد (بدون کاربرد کمپوست و بیوپچار) و تیمارهای سطوح ۱۵، ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار کمپوست و B₅ و B₁₀ و B₁₅ به‌ترتیب تیمارهای سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بیوپچار می‌باشند.

Means with similar letter (s) are not significantly different according to the Duncan's test ($p < 0.05$).

C, CO₁₅, CO₃₀ and CO₄₅ are control and compost treatments at 15, 30 and 45 t ha⁻¹ levels respectively and B₅, B₁₀ and B₁₅ are biochar treatments at 5, 10 and 15 t ha⁻¹ levels respectively.

(Wang et al., 2024). به‌طور کلی کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی در خاک به‌دلایل مختلف از جمله تشکیل خاکدانه‌های پایدار در افزایش پایداری ساختمان خاک مؤثرند. بیوپچار می‌تواند با افزایش کربن آلی خاک از طریق سازوکارهای مختلف سبب افزایش فعالیت میکروبی خاک، افزایش هیف‌های قارچی و تشکیل گلومالین (گلیکوپروتئین مؤثر در پایداری خاکدانه‌ها) توسط قارچ‌های میکوریز و اتصال خاکدانه‌ها در خاک شود. کاربرد بیوپچار می‌تواند خاکدانه‌های درشت (با قطر بیش‌تر از ۲ میلی‌متر) را در خاک افزایش داده و خاکدانه‌های ریز (با قطر کوچک‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر) را در خاک کاهش دهد و بدین ترتیب سبب افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه شود. افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه در اثر کاربرد بیوپچار و کمپوست در خاک‌های با بافت متفاوت توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Ibrahim et al., 2021; Akpinar et al., 2023). آکپینار و همکاران (Akpinar et al., 2023) با بررسی تأثیر کاربرد بیوپچار تهیه شده از چوب درختان گزارش کردند کاربرد بیوپچار سبب افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه در خاک شد. تأثیر بیوپچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه به ویژگی‌های مختلف خاک، ویژگی‌های بیوپچار و مقدار کاربرد بیوپچار بستگی دارد.

چگالی ظاهری بیوجار مورد استفاده (۰/۲۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در مقایسه با کمپوست باشد (جدول ۱). بنابراین، افزودن بیوجار به خاک از طریق افزایش سهم ذرات آلی نسبت به معدنی در فاز جامد خاک، سبب کاهش چگالی ظاهری خاک می‌شود. دلیل دیگر کاهش چگالی ظاهری خاک در تیمارهای کاربرد بیوجار و کمپوست، افزایش ماده آلی خاک در اثر کاربرد این تیمارها می‌باشد که سبب بهبود ساختمان خاک، تشکیل خاکدانه‌ها و پایداری آن‌ها می‌گردد و از این طریق چگالی ظاهری خاک کاهش می‌یابد (da Silva Mendes et al., 2021). به‌طور کلی مکانیسم‌های کاهش چگالی ظاهری خاک در اثر کاربرد بیوجار شامل افزایش منافذ درشت خاکدانه‌ها و افزایش حجم منافذ کل در خاک، نفوذ ذرات بیوجار به داخل خاکدانه‌ها و کاهش جرم آن‌ها در واحد حجم و همچنین تشکیل منافذ جدید در خاک در بین ذرات بیوجار و خاک، می‌باشند (Wang et al., 2024). سینگ و همکاران (Singh et al., 2022) با بررسی تأثیر کاربرد بیوجارهای مختلف بر تغییرات چگالی ظاهری خاک گزارش کردند که کاربرد بیوجارهای تهیه شده در دماهای پیرولیز کم و زیاد، به‌طور میانگین چگالی ظاهری خاک را به‌ترتیب ۳۶ و ۱۹ درصد کاهش داد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که میان تأثیر بیوجارهای تهیه شده از زیست‌توده‌های مختلف بر چگالی ظاهری خاک، تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. کاهش چگالی ظاهری خاک در اثر کاربرد کمپوست را می‌توان به افزایش حجم منافذ و تخلخل خاک و برهمکنش بین مواد آلی و ذرات خاک نسبت داد، چرا که چگالی کمپوست کم‌تر از خاک می‌باشد (Wang et al., 2024). همچنین بهبود ساختمان خاک و افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه (شکل ۳) از دیگر دلایل کاهش چگالی ظاهری در تیمارهای کاربرد کمپوست باشد. دانگ و همکاران (Dong et al., 2022) با بررسی تأثیر کاربرد کمپوست تهیه شده از بقایای ذرت و کود دامی در یک خاک با بافت لوم گزارش کردند کاربرد کمپوست سبب کاهش معنی‌دار چگالی ظاهری خاک شد.

ضرایب رطوبتی خاک و آب قابل دسترس برای گیاه

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در همه تیمارهای کاربرد بیوجار و کمپوست، به‌جز تیمار کاربرد کمپوست در سطح ۱۵ تن در هکتار، رطوبت ظرفیت مزرعه به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۵). بیش‌ترین مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه مربوط به دو تیمار B₁₀ و B₁₅ بود که به‌ترتیب ۱۵/۰ و ۱۳/۹ درصد بیش‌تر از این مقدار در تیمار شاهد بود. نتایج این پژوهش همچنین نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر تیمارهای بیوجار بر افزایش رطوبت ظرفیت مزرعه، در مقایسه با تیمارهای کمپوست بود (شکل ۵).

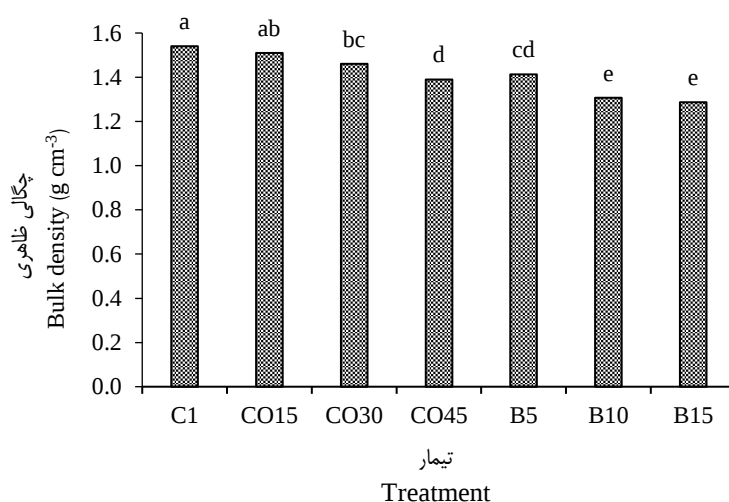
قربانی و امیراحمدی (Ghorbani & Amirahmadi, 2024) با انجام یک بررسی متا آنالیز گزارش کردند بیش‌ترین تأثیر بیوجار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه مربوط به سطح کاربرد ۱۰ تا ۲۰ تن در هکتار بوده است و تأثیر کاربرد سطوح بیش‌تر از ۴۰ تن در هکتار در افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه، کم‌تر از سطوح ۵ تا ۲۰ تن در هکتار بوده است. نتایج این پژوهش نیز نشان داد تیمارهای کاربرد تیمارهای ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بیوجار، بیش‌ترین تأثیر را در افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه داشتند.

کمپوست به‌عنوان یک اصلاح‌کننده از مواد هیومیکی و پلی‌ساکاریدهای برون‌سلولی تشکیل شده است، بنابراین کاربرد کمپوست در خاک، از طریق ایجاد اتصال ذرات معدنی سبب افزایش تشکیل خاکدانه‌های پایدار و کاهش شکستگی و ناپایداری خاکدانه‌ها می‌شود (Sayara et al., 2020; Dong et al., 2022). در واقع تغییرات خاکدانه‌های خاک در اثر کاربرد کمپوست، به‌دلیل سطح ویژه بسیار فعالی است که سبب ایجاد برهمکنش بین میکروآرگانیزم‌های خاک و ریشه‌های موئین گیاه در شرایط بهینه از جمله از نظر رطوبت شده و به‌دنبال آن سبب افزایش پایداری خاکدانه‌های خاک و بهبود ساختمان خاک می‌شود (Sayara et al., 2020). به‌طور مشابه، العمران و همکاران (Al-Omran et al., 2021) با بررسی تأثیر سطوح مختلف کمپوست و بیوجار تهیه شده از برگ‌های نخل بر میانگین وزنی قطر خاکدانه گزارش کردند که کاربرد سطوح مختلف کمپوست و بیوجار سبب افزایش معنی‌دار میانگین وزنی قطر خاکدانه شد. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد تأثیر تیمارهای کاربرد بیوجار در افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای کاربرد کمپوست بود.

چگالی ظاهری خاک

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در تمامی سطوح بیوجار و کمپوست، چگالی ظاهری خاک کاهش یافت. این کاهش فقط در تیمار کاربرد کمپوست در سطح ۱۵ تن در هکتار از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۴). کم‌ترین مقدار چگالی ظاهری مربوط به دو تیمار B₁₀ و B₁₅ بود و تفاوت معنی‌داری بین این دو تیمار مشاهده نشد. مقدار چگالی ظاهری در تیمارهای CO₄₅، CO₃₀، B₅، B₁₀ و B₁₅، به‌ترتیب ۵/۲، ۹/۷، ۸/۴، ۱۴/۹ و ۱۶/۲ درصد کم‌تر از این مقدار در تیمار شاهد بود (شکل ۴).

نتایج این پژوهش نشان داد تیمارهای بیوجار در کاهش چگالی ظاهری خاک، مؤثرتر از تیمارهای کاربرد کمپوست بودند. یکی از دلایل این نتیجه می‌تواند ساختار متخلخل، سطح ویژه زیاد و کم بودن مقدار



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر چگالی ظاهری خاک

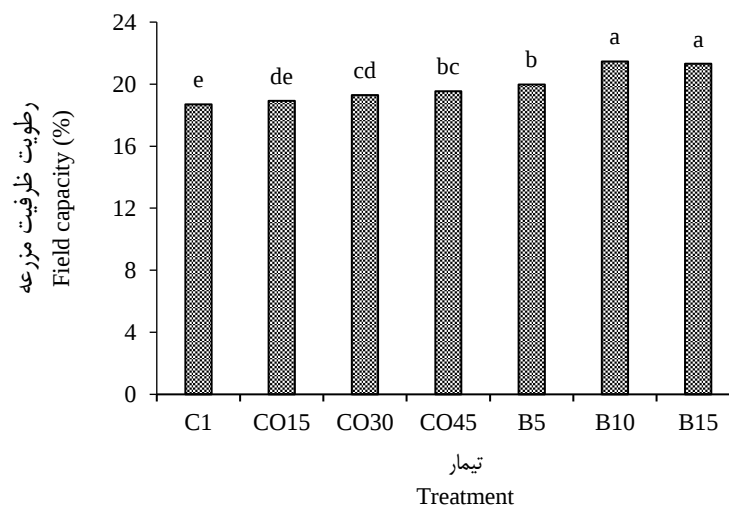
Figure 4- Mean comparison of treatments effect on soil bulk density

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

C, CO₁₅, CO₃₀ و CO₄₅: به ترتیب شاهد (بدون کاربرد کمپوست و بیوچار) و تیمارهای سطوح ۱۵، ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار کمپوست و B₅، B₁₀ و B₁₅ به ترتیب تیمارهای سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بیوچار می‌باشند.

Means with similar letter (s) are not significantly different according to the Duncan's test ($p < 0.05$).

C, CO₁₅, CO₃₀ and CO₄₅ are control and compost treatments at 15, 30 and 45 t ha⁻¹ levels respectively and B₅, B₁₀ and B₁₅ are biochar treatments at 5, 10 and 15 t ha⁻¹ levels respectively.



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر رطوبت ظرفیت مزرعه خاک

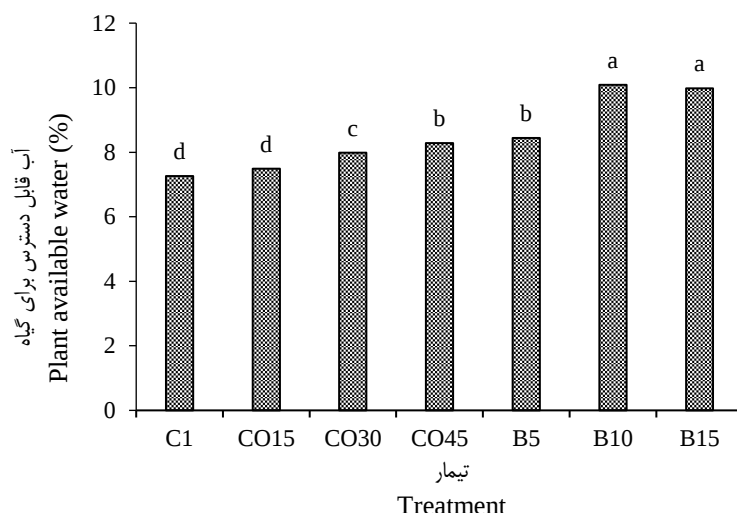
Figure 5- Mean comparison of treatments effect on soil water content at field capacity (FC)

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

C, CO₁₅, CO₃₀ و CO₄₅: به ترتیب شاهد (بدون کاربرد کمپوست و بیوچار) و تیمارهای سطوح ۱۵، ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار کمپوست و B₅، B₁₀ و B₁₅ به ترتیب تیمارهای سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بیوچار می‌باشند.

Means with similar letter (s) are not significantly different according to the Duncan's test ($p < 0.05$).

C, CO₁₅, CO₃₀ and CO₄₅ are control and compost treatments at 15, 30 and 45 t ha⁻¹ levels respectively and B₅, B₁₀ and B₁₅ are biochar treatments at 5, 10 and 15 t ha⁻¹ levels respectively.



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر آب قابل دسترس برای گیاه
Figure 6- Mean comparison of treatments effect on plant available water (PAW)

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند. C، CO₁₅، CO₃₀ و CO₄₅: به ترتیب شاهد (بدون کاربرد کمپوست و بیوجار) و تیمارهای سطوح ۱۵، ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار کمپوست و B₅، B₁₀ و B₁₅ به‌ترتیب تیمارهای سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار بیوجار می‌باشند.

Means with similar letter (s) are not significantly different according to the Duncan's test ($p < 0.05$).

C, CO₁₅, CO₃₀ and CO₄₅ are control and compost treatments at 15, 30 and 45 t ha⁻¹ levels respectively and B₅, B₁₀ and B₁₅ are biochar treatments at 5, 10 and 15 t ha⁻¹ levels respectively.

نیمه خشک که دارای محدودیت آب هستند حائز اهمیت است (Bhat *et al.*, 2022).

بیش‌تر بودن تأثیر تیمارهای بیوجار در مقایسه با تیمارهای کمپوست در افزایش آب قابل دسترس برای گیاه (شکل ۶) را می‌توان به سطح ویژه و تخلخل بیش‌تر بیوجار نسبت به کمپوست، نسبت داد (جدول ۲). به‌طور مشابه، کاستلینی و همکاران (Castellini *et al.*, 2025) با بررسی تأثیر کاربرد سه اصلاح‌کننده آلی شامل بیوجار، کمپوست و ورمی‌کمپوست تهیه شده از بقایای گیاهی و کود دامی بر رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل دسترس برای گیاه گزارش کردند که همه اصلاح‌کننده‌های آلی سبب افزایش رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل دسترس برای گیاه شدند. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد تأثیر کاربرد بیوجار در افزایش رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل دسترس برای گیاه به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از اثر کمپوست و ورمی‌کمپوست بود. به‌طور مشابه لیانگ و همکاران (Liang *et al.*, 2021) تأثیر کاربرد بیوجار (در سطوح، صفر، ۱۰ و ۲۵ تن در هکتار) بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک لوم رسی سیلتی را در شرایط مزرعه‌ای بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد کاربرد سطوح مختلف بیوجار سبب افزایش معنی‌دار رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل دسترس برای گیاه شد. الفادیل و همکاران (Alfadil *et al.*, 2021) نیز با انجام مطالعه مزرعه‌ای گزارش کردند کاربرد سطوح مختلف بیوجار تهیه شده از بقایای ذرت سبب افزایش تخلخل کل خاک و افزایش آب قابل دسترس

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها همچنین نشان داد که در همه تیمارهای کاربرد بیوجار و کمپوست، بجز تیمار کاربرد کمپوست در سطح ۱۵ تن در هکتار، آب قابل دسترس برای گیاه (PAW) به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۶). بیش‌ترین مقدار آب قابل دسترس برای گیاه مربوط به دو تیمار B₁₀ و B₁₅ بود که به‌ترتیب ۳۸/۹ و ۳۷/۵ درصد بیش‌تر از این مقدار در تیمار شاهد بود. نتایج این پژوهش همچنین نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر تیمارهای بیوجار در افزایش آب قابل دسترس برای گیاه، در مقایسه با تیمارهای کمپوست بود. به‌طوری‌که آب قابل دسترس برای گیاه در تیمار B₁₀، ۲۱/۷ درصد بیش‌تر از تیمار CO₄₅ و ۲۶/۳ درصد بیش‌تر از تیمار CO₃₀ بود (شکل ۶).

با توجه به این‌که بیوجار ماده‌ای متخلخل و غنی از کربن است که سطح ویژه بالایی دارد، کاربرد آن در خاک می‌تواند با بهبود شبکه منفذی و ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک سبب افزایش آب قابل دسترس خاک برای گیاه شود (Gao *et al.*, 2020; Acharya *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024). سه ویژگی تعیین‌کننده کارایی بیوجار در بهبود مقدار آب قابل دسترس برای گیاه، اندازه ذرات، سطح ویژه و تخلخل هستند، به‌طوری‌که هر چه تخلخل بیوجار بیش‌تر باشد، تأثیر آن بر مقدار آب قابل دسترس برای گیاه افزایش می‌یابد. افزایش آب قابل دسترس برای گیاه در اثر کاربرد بیوجار در خاک، می‌تواند تعداد دورهای آبیاری در مزارع را کاهش دهد. این ویژگی به‌ویژه در مناطق

برای گیاه شد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان دهنده تأثیر مثبت کاربرد تیمارهای بیوچار (در سطح ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار) و کمپوست (در سطح ۳۰ و ۴۵ تن در هکتار) بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و فراهمی آب و عناصر غذایی فسفر و پتاسیم برای گیاه بود. به‌طور کلی تیمارهای کمپوست (سطح ۴۵ تن در هکتار) و بیوچار (سطوح ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار) اثر مثبت مشابهی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک داشتند، اما تیمارهای بیوچار (در سطح ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار) در بهبود وضعیت رطوبتی خاک، فراهمی آب و پتاسیم در خاک برای گیاه بسیار مؤثرتر از تیمارهای کاربرد کمپوست بودند. مقایسه دو تیمار کاربرد بیوچار در سطح ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار، نشان داد تفاوت معنی‌داری بین این دو سطح کاربرد بیوچار مشاهده نشد و هر دو تیمار اثرات مثبت مشابهی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، فراهمی آب برای گیاه داشتند.

به‌طور کلی بر اساس نتایج این پژوهش، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که سطح ۱۰ تن در هکتار بیوچار و سطح ۴۵ تن در هکتار کمپوست، مقادیر مناسبی برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک در خاک‌های آهکی مزارع نیشکر استان خوزستان هستند. همچنین سطح ۱۰ تن در هکتار بیوچار به‌عنوان مناسب‌ترین تیمار برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش فراهمی آب برای گیاه نیشکر است. با توجه به کم بودن کربن آلی خاک در مزارع نیشکر و خاک مورد مطالعه و متفاوت بودن ویژگی‌های بیوچار و کمپوست (به‌ویژه ویژگی‌های فیزیکی و ساختار کربن پایداری آن) نیاز است اثرات بلندمدت تیمارها در پژوهش‌های مزرعه‌ای بررسی شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان برای حمایت مالی و مساعدت در مراحل مختلف اجرای این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

- Acharya, B.S., Dodla, S., Wang, J.J., Pavuluri, K., Darapuneni, M., Dattamudi, S., Maharjan, B., & Kharel, G. (2024). Biochar impacts on soil water dynamics: knowns, unknowns, and research directions. *Biochar*, 6(1), 34. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00323-4>
- Adetunji, A.T., & Blanco-Canqui, H. (2026). Soil health response to biochar combined with other amendments: a review. *Biochar*, 8(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00531-6>
- Adnan, M., Fahad, S., Saleem, M.H., & Lal, R. (2025). Sustainable phosphorus management in calcareous soils: problems and prospects. *Journal of Plant Nutrition*, 48(13), 2179-2200. <https://doi.org/10.1080/01904167.2025.2477269>
- Akpınar, D., Tian, J., Shepherd, E., & Imhoff, P.T. (2023). Impact of wood-derived biochar on the hydrologic performance of bioretention media: Effects on aggregation, root growth, and water retention. *Journal of Environmental Management*, 339, 117864. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117864>
- Albalasmeh, A.A., Quzaih, M.Z., Gharaibeh, M.A., Rusan, M., Mohawesh, O.E., Rababah, S.R., Alqudah, A., Alghamdi, A.G., & Naserin, A. (2024). Significance of pyrolytic temperature, application rate and incubation period of biochar in improving hydro-physical properties of calcareous sandy loam soil. *Scientific Reports*, 14(1), 7012. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57755-y>
- Alfakil, A.A., Shaghaleh, H., Alhaj Hamoud, Y., Xia, J., Wu, T., Hamad, A.A.A., Wang, Y., Oumarou Abdoulaye, A., & Sheteiwy, M.S. (2021). Straw biochar-induced modification of the soil physical properties enhances growth, yield and water productivity of maize under deficit irrigation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(16), 1. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1901913>
- Al-Omran, A., Ibrahim, A., & Alharbi, A. (2021). Effects of biochar and compost on soil physical quality indices. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(20), 2482-2499. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1949461>
- Amin, A.E.E.A.Z. (2020). Carbon sequestration, kinetics of ammonia volatilization and nutrient availability in alkaline sandy soil as a function on applying calotropis biochar produced at different pyrolysis temperatures. *Science of the Total Environment*, 726, 138489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138489>
- Athar, M., Fatima, S., Zahra, A., Shah, M.A., Bashir, S., Seleiman, M.F., & Ali, N. (2025). Optimizing wheat growth and zinc uptake with compost and rice husk in alkaline conditions. *BMC Plant Biology*, 25(1), 502. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06537-3>
- Azim, R., Wang, Q., Sadiq, M., Zhou, X., Zhang, D., Zhao, X., Xu, Y., Sun, Y., Qi, W., Zhu, J., & Ahmed, S. (2024). Exploring the potential of straw and biochar application on soil quality indicators and crop yield in semi-arid regions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 1907-1923. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01668-2>
- Bhat, A.S., Kuriqi, A., Dar, M.U.D., Bhat, O., Sammen, S.S., Towfiqul Islam, A.R.M., Elbeltagi, A., Shah, O., Ai-Ansari, N., Ali, R., & Heddad, S. (2022). Application of biochar for improving physical, chemical, and hydrological

- soil properties: a systematic review. *Sustainability*, 14(17), 11104. <https://doi.org/10.3390/su141711104>
12. Castellini, M., Bondi, C., Leogrande, R., Giglio, L., Vitti, C., Mastrangelo, M., & Bagarello, V. (2025). Evaluating the effects of compost, vermicompost, and biochar on physical quality of sandy-loam soils. *Applied Sciences*, 15(6), 3392. <https://doi.org/10.3390/app15063392>
13. Da Silva Mendes, J., Fernandes, J.D., Chaves, L.H.G., Guerra, H.O.C., Tito, G.A., & de Brito Chaves, I. (2021). Chemical and physical changes of soil amended with biochar. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(8), 338. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05289-8>
14. Danielson, R.E., & Sutherland, P.L. (1986). Porosity. In: A. Klute, (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 1, Physical and Mineralogical Methods SSSA and ASA, Madison, WI, 443–461. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c18>
15. Dong, L., Zhang, W., Xiong, Y., Zou, J., Huang, Q., Xu, X., Ren, P., & Huang, G. (2022). Impact of short-term organic amendments incorporation on soil structure and hydrology in semiarid agricultural lands. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.10.003>
16. Enebe, M.C., Ray, R.L., & Griffin, R.W. (2025). The impacts of biochar on carbon sequestration, soil processes, and microbial communities: A review. *Biochar*, 7(1), 107. <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00499-3>
17. Estrada-Bonilla, G.A., Durrer, A., & Cardoso, E.J. (2021). Use of compost and phosphate-solubilizing bacteria affect sugarcane mineral nutrition, phosphorus availability, and the soil bacterial community. *Applied Soil Ecology*, 157, 103760. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103760>
18. 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. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107763>
19. Ghorbani, M., & Amirahmadi, E. (2024). Insights into soil and biochar variations and their contribution to soil aggregate status—A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 244, 106282. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106282>
20. Ghorbani, M., Neugschwandtner, R.W., Konvalina, P., Asadi, H., Kopecký, M., & Amirahmadi, E. (2023). Comparative effects of biochar and compost applications on water holding capacity and crop yield of rice under evaporation stress: A two-years field study. *Paddy and Water Environment*, 21(1), 47–58. <https://doi.org/10.1007/s10333-022-00912-8>
21. Haufiku, A.M., Ausiku, P.A., & Huttunen, S. (2025). The role of organic and inorganic soil amendments on soil physicochemical properties and wheat (*Triticum aestivum* L.) agronomic performance in Semi-arid North-Central Namibia: A Review. *Discover Agriculture*, 3(1), 215. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00383-5>
22. Helmke, P.A., & Sparks, D.L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In: D.L. Sparks (ed.), *Methods of soil analysis: Part 3, chemical methods*, SSSA and ASA, Madison, WI, 5, 551–574. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c19>
23. Ibrahim, A., Marie, H.A.M., & Elfaki, J. (2021). Impact of biochar and compost on aggregate stability in loamy sand soil. *Agricultural Research Journal*, 58(1), 34–44. <https://doi.org/10.5958/2395-146X.2021.00005.3>
24. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2020). Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 450–459. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00129-5>
25. Karimi, A., Zakavi, N., Safirzadeh, S., Noroozi, H., & Ariz, A. (2024a). Evaluation of sugarcane nutritional status by deviation from optimum percentage (DOP) method in Khuzestan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(3), 449–466. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371718.669657>
26. Karimi, A., Zanganeh-Yusefabadi, E., & Safirzadeh, S. (2024b). Comparison of availability and uptake of phosphorus and potassium in sugarcane under subsurface drip irrigation and furrow irrigation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(3), 57–67. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/jise.2024.43784.2078>
27. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2026). Impact of acidified biochar on soil fertility, growth and nutrient uptake of maize in calcareous soil. *Discover Soil*, 3, 23. <https://doi.org/10.1007/s44378-026-00183-3>
28. Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., & Taghavi, M. (2024). Characteristics of conocarpus wastes and common reed biochars as a predictor of potential environmental and agronomic applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 10414–10431. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1783396>
29. Khaji, P., Moezzi, A., Enayatizamir, N., Moradi, N., & Karimi, A. (2025). Effects of modified biochars on some biological and chemical properties of calcareous soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(2), 373–388. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.384714.669826>
30. Kirkham, M. (2014). Field capacity, wilting point, available water, and the non-limiting water range. In: K. Sonnack, (ed.). *Principles of Soil Plant Water Relations*. Dana Dreibelbisplace. Kansas State University, pp. 101–115. <https://doi.org/10.1016/B978-012409751-3/50008-6>
31. Kroetsch, D., & Wang, C. (2008). Particle Size Distribution. In: M.R. Carter, & E.G. Gregorich (ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 713–725. <https://doi.org/10.1201/9781420005271.ch55>

32. Le Bissonnais, Y.L. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crust ability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47(4), 425-437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
33. Liang, J., Li, Y., Si, B., Wang, Y., Chen, X., Wang, X., Chen, H., Wang, H., Zhang, F., Bai, Y., & Biswas, A. (2021). Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils. *Science of the Total Environment*, 771, 144802. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144802>
34. Luo, T., Lu, W., Chen, L., Min, T., Ru, S., Wei, C., & Li, J. (2022). The effects of acidic compost tea on activation of phosphorus, Fe, Zn, and Mn in calcareous soil and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) growth in Xinjiang, China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(3), 3822-3834. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00933-6>
35. Mihoub, A., Amin, A.E.E.A.Z., Motaghian, H.R., Saeed, M.F., & Naeem, A. (2022). Citric acid (CA)-modified biochar improved available phosphorus concentration and its half-life in a P-fertilized calcareous sandy soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 465-474. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00662-2>
36. Moradi, N., & Karimi, A. (2020). Effect of corn stover-modified biochar on some biological properties of a Cd-contaminated calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(4), 127-144. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejsms.2020.16591.1888>
37. Murphy, J.A.M.E.S., & Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
38. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2, chemical and microbiological properties, SSSA and ASA*, Madison, WI, 539-579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
39. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, E.S., & Dean, L.A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. United States Department of Agriculture Circular, 939, 1-18.
40. Piccolo, A., & Drosos, M. (2025). The essential role of humified organic matter in preserving soil health. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 12(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s40538-025-00730-0>
41. Rayment, G.E., & Higginson, F.R. (1992). *Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods*. Inkata Press: Melbourne.
42. Rhoades, J. (1982). Soluble salts. In: A.L. Page (ed.), *Methods of soil analysis*, Part 2, Chemical and microbiological properties, SSSA and ASA, Madison, WI, 167-179. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c10>
43. Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F., & Sánchez, A. (2020). Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. *Agronomy*, 10(11), 1838. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838>
44. Sharma, S., Yost, M.A., & Reeve, J.R. (2025). Roles of organic agriculture for water optimization in arid and semi-arid regions. *Sustainability*, 17(12), 5452. <https://doi.org/10.3390/su17125452>
45. Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann, J. (2017). *Biochar: a guide to analytical methods*. Csiro Publishing. <https://doi.org/10.1071/9781486305100>
46. 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. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1>
47. Wang, D., Li, S., Sun, X., Hao, D., Li, Y., & Wang, H. (2024). Effects of compost application of green waste on soil properties: A meta-analysis. *Sustainability*, 16(20), 8877. <https://doi.org/10.3390/su16208877>
48. Xiao, L., Lin, Y., Chen, D., Zhao, K., Wang, Y., You, Z., Zhao, R., Xie, Z., & Liu, J. (2024). Maximizing crop yield and water productivity through biochar application: A global synthesis of field experiments. *Agricultural Water Management*, 305, 109134. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109134>
49. Yuan, Q., Gao, Y., Ma, G., Wu, H., Li, Q., Zhang, Y., Liu, S., Jie, X., Zhang, D., & Wang, D. (2025). The long-term effect of biochar amendment on soil biochemistry and phosphorus availability of calcareous soils. *Agriculture*, 15(5), 458. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4440742>
50. Zanganeh-Yusefabadi, E., Karimi, A., Sheini-Dashtegol, A., Naseri, A., & Zarei, S. (2024). Changes in soil salinity and sodicity under subsurface drip irrigation and furrow irrigation of sugarcane. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 24(93), 59-43. <https://doi.org/10.31579/2637-8914/089>
51. Zhang, Y., Liu, Q., Du, Z., Wang, Z., Chen, Y., Li, Y., Jin, J., & Sun, K. (2026). Decadal straw and biochar amendments in calcareous soils: Contrasting abiotic retention and biotic mineralization processes shape phosphorus availability. *Soil and Tillage Research*, 257, 106931. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106931>