Crop Science Research in Arid Regions

homepage: https://cropscience.uoz.ac.ir/

Research Article
Volume 7, Issue 3, 2025, P. 593-606

Biochar mitigates the adverse effects of saline water irrigation on loam and sandy loam agricultural soils in the Sistan plain

Ehsan Salari [a], Masoomeh Delbari [*b], Abdolrahman Rahimian Boogar [c], Peyman Afrasiab [b]

[a] Ph.D Student, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
[b] Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
[c] Department of Horticultural Science and Landscape Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

[*]Corresponding Author: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

Received: 27 August 2025 Accepted: 17 October 2025 **DOI: 10.22034/CSRAR.2025.545393.1512**

How to cite this article:
Salari, E., Delbari, M., Mohkami, Z., Rahimian Boogar, A. and Afrasiab, P., 2025. Biochar mitigates the adverse effects of saline water irrigation on loam and sandy loam agricultural soils in the Sistan plain. *Crop Science Research in Arid Regions*, *7*(3), 593-606.
https://doi.org/10.22034/csrar.2025.545393.1512

Abstract

Introduction: Soil and water salinity is one of the major environmental and agricultural challenges, particularly in arid and semi-arid regions, leading to reduced soil fertility and crop productivity. Increasing salinity of irrigation water significantly affects the physical and chemical properties of agricultural soils, causing changes and degradation in soil structure. This study aimed to investigate the effect of biochar as a soil amendment on mitigating the adverse impacts of saline irrigation water on the physical and chemical properties of two soil textures: loam and sandy loam, under different salinity levels.

Materials and Methods: A factorial experiment was conducted in a completely randomized block design under greenhouse conditions at the University of Zabol. The experiment included three factors: Soil texture: loam and loamy sand, Irrigation water salinity: at four levels (0.8, 4, 8, and 12 dS/m), and Biochar amendment: at four levels (0%, 1%, 3%, and 5% by volume mixed with the soil). The biochar used in this study was produced from one-year-old grapevine stems, which were crushed, sieved, and mixed with the soil. The measured parameters included electrical conductivity (EC), pH, bulk density, cation exchange capacity (CEC), saturated hydraulic conductivity, and the accumulation of sodium (Na), magnesium (Mg), and potassium (K) in the soil.

Results and Discussion: The results showed that increasing irrigation water salinity significantly raised soil EC, with a more pronounced increase in loam soil compared to sandy loam. Salinity had little effect on bulk density and pH but led to an increase in cation exchange capacity. Although sodium levels rose in both soil textures due to salinity, magnesium and potassium levels remained stable. Applying biochar reduced soil EC, especially in sandy loam, where 3% and 5% biochar treatments caused the greatest reduction, indicating decreased salt buildup due to biochar. Neither saline irrigation nor biochar application significantly changed soil pH in either soil type. However, biochar notably decreased exchangeable sodium at higher salinity levels in both loam and sandy loam soils. Additionally, biochar reduced soil bulk density and enhanced water retention. The greatest decrease

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

in bulk density of the loam texture was observed in treatments with 3% and 5% biochar under irrigation conditions using water with a salinity of 4 dS/m. Additionally, the 1% biochar treatment showed a significant reduction in density under a salinity level of 12 dS/m. The highest decrease in bulk density of the sandy loam texture occurred in the 5% biochar treatment under irrigation with water having salinity levels of 4 and 8 dS/m. Biochar significantly increased soil CEC in both soil types under various salinity levels, with more substantial effects in loam soil. Hydraulic conductivity in sandy loam was significantly affected by both salinity and biochar treatments. Rising irrigation water salinity had different impacts on sodium, magnesium, and potassium accumulation in the two soils. The application of 3% and 5% biochar markedly decreased exchangeable sodium. Magnesium accumulation was higher in loam soil at higher salinity levels, and biochar's effect on magnesium depended on salinity level, biochar amount, and soil type. Notably, at 12 dS/m salinity, 5% biochar significantly reduced magnesium buildup. In contrast, potassium accumulation was unaffected by either salinity or biochar.

Conclusion: Overall, the results of this study indicate that biochar can be considered as an effective soil amendment for improving the physical and chemical properties of soil under saline irrigation conditions. Biochar application can play a vital role in managing soil salinity and enhancing plant tolerance to salinity stress, particularly in lighter-textured soils such as sandy loam.

Keywords: Electrical conductivity, Exchangeable sodium, Sandy loam soil, Soil amendment, Soil physico-chemical properties, Water salinity

تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک/ جلد هفتم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۴، ص ۶۰۶-۵۹۳

مقاله پژوهشی

بیوچار و کاهش اثرات منفی آبیاری با آب شور در خاک‌های زراعی لوم و لوم‌شنی در دشت سیستان

احسان سالاری[۱]، معصومه دلبری*[۲]، عبدالرحمن رحیمیان بوگر[۳]، پیمان افراسیاب[۲]

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- گروه مهندسی علوم آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- گروه مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

* مسئول مکاتبه: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵ **DOI: 10.22034/CSRAR.2025.545393.1512**

چکیده

شوری آب آبیاری از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این پژوهش، اثر بیوچار بر کاهش اثرات مخرب شوری آب آبیاری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در دو بافت خاک بررسی شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و به‌صورت گلدانی در سال ۱۴۰۱ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زابل انجام شد. تیمارها شامل بافت خاک (لوم و لوم‌شنی)، شوری آب در چهار سطح (۰/۸، ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) و بیوچار در چهار سطح (۰، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی) بودند. افزایش شوری آب آبیاری هدایت الکتریکی خاک را به‌طور معنی‌داری به‌ویژه در خاک لوم افزایش داد. شوری تأثیر محسوسی بر چگالی ظاهری و pH نداشت، اما موجب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و سدیم تبادلی شد، درحالی‌که تغییر منیزیم و پتاسیم معنی‌دار نبود. بیوچار سبب کاهش هدایت الکتریکی، چگالی ظاهری و سدیم تبادلی و از طرفی افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و ظرفیت نگهداشت آب شد. کمترین هدایت الکتریکی و چگالی ظاهری در خاک لوم شنی و بیشترین ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک لوم مشاهده شد. هدایت هیدرولیکی خاک لوم‌شنی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر شوری و بیوچار قرار گرفت، اما در خاک لوم تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نداشت. تیمارهای ۳ و ۵ درصد بیوچار موجب کاهش سدیم تبادلی و در شوری بالا باعث کاهش منیزیم شدند، ولی پتاسیم تغییر معنی‌داری نداشت. طبق نتایج این پژوهش، بیوچار اصلاح‌کننده‌ای موثر برای بهبود ویژگی‌های خاک و کاهش اثرات نامطلوب شوری آب آبیاری، به‌ویژه در خاک‌های سبک‌تر مانند لوم‌شنی است.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده خاک، خاک لوم‌شنی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، سدیم تبادلی، شوری آب، هدایت الکتریکی

مقدمه

ارتباط میان گیاه، خاک و آب نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد گیاهان و میزان تولید محصولات کشاورزی دارد (Ben Ali et al., 2021). شوری آب و خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است و تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش حاصلخیزی خاک و بهره‌وری محصولات دارد (El-Agrodi et al., 2012; Tarolli et al., 2024). شوری خاک به دو دسته اصلی شوری اولیه (طبیعی) و شوری ثانویه (ناشی از فعالیت‌های انسانی) تقسیم می‌شود (Tomaz et al., 2020). شوری اولیه به‌طور عمده تحت تأثیر عواملی مانند وجود آب‌های زیرزمینی با منشأ دریایی، رسوب نمک‌های دریایی توسط باد و یا نشت و تجمع نمک در سطح خاک شکل می‌گیرد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که میزان تبخیر بالا و بارندگی سالانه کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر است، این فرآیندهای طبیعی منجر به انباشت نمک در خاک و منابع آبی می‌شوند. درمقابل، شوری ثانویه به‌طور عمده در اثر استفاده از آب شور در آبیاری، زهکشی ناکارآمد، مدیریت نامناسب منابع آب و مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی ایجاد می‌شود. افزایش شوری خاک باعث تخریب ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک شده و رشد و نمو و عملکرد گیاهان را به شدت تحت تاثیر منفی قرار می‌دهد (Li et al., 2023). وجود مقادیر بالای سدیم سبب پراکندگی ذرات خاک و تخریب ساختار آن شده، که این فرآیند منجر به کاهش نفوذ ریشه و ذخیره آب در لایه‌های عمقی خاک می‌شود (Mohanavelu et al., 2021). شوری همچنین با تغییر در ویژگی‌های خاک، مانند افزایش هدایت الکتریکی (EC)، واکنش (pH) و غلظت یون‌های

محلول بر تخلخل، چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری خاک اثر می‌گذارد (El-Agrodi et al., 2012; Ben Ali et al., 2021). استفاده طولانی مدت از آب شور می‌تولند باعث تخریب ساختمان و کاهش هدایت هیدرولیکی خاک شود (Adhikari et al., 2012). هرچند برخی یون‌ها مانند کلسیم و منیزیم ممکن است به‌طور موقت برخی ویژگی‌های خاک را بهبود دهند، تجمع بیش از حد سدیم و منیزیم در نهایت تأثیرات منفی بر رشد گیاهان دارد (Lakhdar et al., 2023).

یکی از راهکارهای مقابله با شوری، استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک با هدف کاهش چگالی ظاهری، بهبود ساختار و تعدیل واکنش خاک است (Zhe et al., 2023). بیوچار که یک فرآورده‌ی کربنی پایدار حاصل از پیرولیز مواد آلی مانند بقایای گیاهی، کودهای دامی و لجن فاضلاب در شرایط دمای بالا و محیط بی‌هوازی است، در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به‌خود جلب کرده است. ساختار آروماتیک پایدار، سطح ویژه بالا و ظرفیت جذب قابل‌توجه بیوچار، آن را به گزینه‌ای کارآمد برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تبدیل کرده است (Muñoz et al., 2016; Parmar et al., 2014). افزودن بیوچار به خاک می‌تواند موجب کاهش چگالی ظاهری، بهبود بافت و ساختار خاک، افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها، ارتقای ظرفیت نگهداری آب و بهبود هدایت هیدرولیکی شود (Lim et al., 2016; Zanutel et al., 2024). بیوچار با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، بهبود توان نگهداری آب و کاهش فراهمی یون‌های مضر مانند سدیم، نقش بسزایی در کاهش تنش شوری ایفا می‌کند (Zhang et al., 2019). همچنین، افزودن بیوچار به خاک‌های شور و قلیا موجب بهبود ساختار خاک، افزایش فعالیت‌های میکروبی و در نهایت ارتقاء رشد و عملکرد گیاهان می‌شود (Nyambo et al., 2023). ویژگی‌هایی همچون تخلخل، غنای کربنی، ظرفیت تبادل کاتیونی و محتوای مواد مغذی، باعث شده بیوچار منحنی رطوبتی خاک را بهبود بخشیده و جذب عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش دهد (Ismail et al., 2023). مطالعات نشان داده‌اند که افزودن بیوچار به خاک می‌تواند CEC، کربن آلی، فسفر، پتاسیم و کلسیم خاک را افزایش داده و در برخی موارد، EC و سدیم قابل تبادل را کاهش دهد (Singh et al., 2022; Wang et al., 2024a). همچنین در خاک‌های اسیدی، بیوچار موجب بهبود تخلخل، تنظیم اسیدیته و ارتقای حرکت املاح شده است (Huang et al., 2023). در شرایط شور، افزایش EC، کاهش کربن آلی، کاهش توان جذب آب، و افت حاصلخیزی خاک از جمله عوامل محدودکننده رشد گیاه هستند. مطالعات متعددی نقش بیوچار را در کاهش اثرات منفی شوری خاک و افزایش مقاومت گیاهان از طریق افزایش رطوبت خاک و کاهش غلظت عناصری مانند سدیم، سولفات و کلر تأیید کرده‌اند (Wang et al., 2024b; Xu et al., 2025). با این حال، بیشتر مطالعات گذشته، تأثیر بیوچار را به‌صورت کلی در خاک شور بررسی کرده و کمتر به تأثیر آن در شرایط استفاده از آب شور در سطوح مختلف پرداخته‌اند. با توجه به ضرورت استفاده بهینه از منابع آبی با کیفیت پایین و همزمان حفظ حاصلخیزی خاک، بررسی نقش بیوچار در شرایط آبیاری با آب شور اهمیت ویژه‌ای دارد. از این‌رو، هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در شرایط کاربرد آب شور و تحلیل روابط متقابل میان این ویژگی‌ها است.

مواد و روش‌ها

مشخصات جغرافیایی و اقلیمی محل انجام پژوهش

پژوهش حاضر در سال ۱۴۰۱ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل واقع در جنوب‌شرقی کشور انجام شد. شهرستان زابل با وسعتی برابر با ۱۵۱۹۷ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۶۰ تا ۶۱ درجه و ۱۵ تا ۵۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۳۱ درجه و ۵ تا ۲۸ دقیقه در شمال استان سیستان‌وبلوچستان قرار گرفته است (KarimiNazar et al., 2010). این شهرستان از سمت شمال و شرق با کشور افغانستان، از جنوب با شهرستان زاهدان، و از غرب و شمال‌غربی با دشت لوت و شهرستان نهبندان در استان خراسان‌جنوبی هم‌مرز است. شهرستان زابل از نظر اقلیمی دارای آب‌وهوای بیابانی گرم و خشک است و رژیم رطوبتی خاک اریدریک و رژیم دمایی آن هایپرترمیک است (Sistan and Baluchestan Regional Water Joint Stock Company, 2015).

میانگین بلندمدت بارندگی سالیانه در این منطقه حدود ۵۵

میلی‌متر گزارش شده است و دمای هوا نیز در طول سال بین منفی ۱۰ تا مثبت ۵۰ درجه سلسیوس نوسان دارد (Kashki et al., 2020).

روش پژوهش

پژوهش حاضر به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور و سه تکرار، طی شش ماه در گلخانه دانشگاه زابل اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل ۱) شوری آب آبیاری در چهار سطح (۰/۸، ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) و ۲) بیوچار در چهار سطح (۰، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی خاک) بودند، که در دو بافت خاک لوم و لوم‌شنی به‌طور جداگانه انجام شد. برای تهیه بیوچار، ساقه‌های یک‌ساله انگور پس از خشک شدن، در کوره با دمای ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس و در شرایط بی‌هوازی پیرولیز شدند (Khaledi et al., 2023). بیوچار حاصل بدون هیچ فرآوری اضافی، به‌صورت مستقیم با خاک مخلوط گردید. دو نوع خاک لوم و لوم‌شنی، که از بافت‌های غالب اراضی کشاورزی دشت سیستان هستند، به‌عنوان بستر کشت انتخاب شدند. خاک‌ها پس از جمع‌آوری و الک شدن، در گلدان‌های پلاستیکی با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۲۲ سانتی‌متر با حجم ۷ لیتر به‌طور یکنواخت ریخته شدند. آبیاری با آب شور براساس تیمارها هر هفت روز یکبار انجام شد. مشخصات اولیه فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات اولیه فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده

Table 1- Basic physical and chemical properties of the soils used

بافت خاک Soil texture	شن Sand (٪)	سیلت Silt (٪)	رس Clay (٪)	شوری Salinity (dS/m)	واکنش خاک pH	چگالی ظاهری Bulk density (gr/cm3)	سدیم Na (mg/l)	کلسیم Ca (mg/l)	منیزیم Mg (mg/l)	پتاسیم K (mg/l)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity (cm/hr)
لوم Loam	35.6	41.6	22.8	2.78	7.95	1.72	338.55	13.03	90.56	27.78	20.79	0.87
لوم شنی Sandy-loam	70	16	14	1.92	8.62	1.4	234.89	6	34.89	26.02	12.86	2.75

سنجش خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

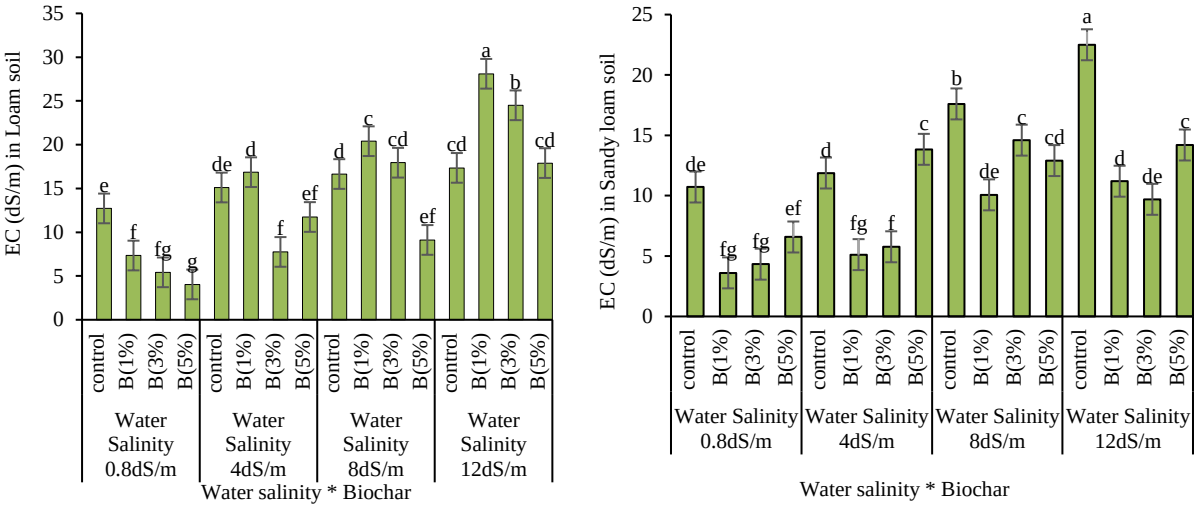
در انتهای دوره آزمایش نمونه‌های خاک از گلدان‌ها برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از تهیه عصاره‌ی اشباع، هدایت الکتریکی (EC) و واکنش خاک (pH) به‌ترتیب با استفاده از دستگاه EC متر و pH متر اندازه‌گیری شدند. ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به‌روش استاندارد محاسبه شد (Sparks et al., 1996). هدایت هیدرولیکی خاک به‌روش بار افتان در آزمایشگاه تعیین شد (Lee, 2024). چگالی ظاهری به‌روش استوانه اندازه‌گیری شد (Dane and Topp, 2002). برای اندازه‌گیری پتاسیم، سدیم و منیزیم، ابتدا عصاره اشباع خاک با محلول استات آمونیوم (نسبت ۱:۱۰) تهیه شد. سپس غلظت پتاسیم و سدیم با دستگاه فلیم‌فتومتر دیجیتال (مدل PFP7، ساخت شرکت JENWAY انگلستان) اندازه‌گیری شد (Helmke and Sparks, 1996). غلظت منیزیم با روش طیف‌سنجی جذب اتمی (مدل Shimadzu AA-7000) اندازه‌گیری شد (Suzuki et al., 1965).

تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. در ابتدا داده‌ها با آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) بررسی شدند. مقایسه میانگین تیمارها با توجه به اختلاف مقادیر صفات اولیه در دو بافت مختلف لوم و لوم‌شنی، برای هر یک از خاک‌های زراعی مورد استفاده به‌طور جداگانه انجام شد و تعیین تفاوت‌های معنی‌دار با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که افزایش سطح شوری آب آبیاری منجر به افزایش شوری خاک نسبت به مقادیر اولیه در هر دو بافت شد. این افزایش EC به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع بافت خاک و

سطح شوری آب قرار داشت (شکل ۱). مطالعات پیشین نیز گزارش کرده‌اند، تغییرات EC بستر کشت وابسته به سطح شوری آب و نوع بافت خاک است (Jahantigh and Jahantigh, 2023; Cheraghi et al., 2020; Choudhary et al., 2006). کاربرد آب شور با سطوح ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر منجر به افزایش معنی‌دار EC خاک لوم نسبت به شرایط آبیاری با آب شور ۰/۸ دسی‌زیمنس بر متر شد. کاربرد بیوچار در سطوح ۱ و ۳ درصد ترکیب بستر کشت در برخی سطوح شوری منجر به افزایش معنی‌دار EC خاک لوم شد، اما این روند کلی نبود (شکل ۱). این در حالی است که سطح ۵ درصد بیوچار در اغلب تیمارهای آب شور، شوری خاک را در خاک لوم کاهش داده است. در خاک لوم‌شنی بیشترین افزایش EC در تیمار آبیاری با آب دارای شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد، درحالی‌که کاربرد سطوح مختلف بیوچار منجر به کاهش شوری شد (شکل ۱). در این راستا در تیمار سطح شوری آب ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، کمترین مقدار EC در خاک لوم برای تیمار ۵ درصد بیوچار و شاهد به‌دست آمد، درحالی‌که برای خاک لوم‌شنی برای تیمارهای ۱ و ۳ درصد بیوچار به‌دست آمد. بررسی‌های دیگری نشان داده‌اند که استفاده از بیوچار می‌تواند EC خاک و تنش شوری را کاهش دهد (Qasim et al., 2024; Kong et al., 2021; Hammer et al., 2015). با این حال، برخی مطالعات نشان داده‌اند که مصرف بیوچار در مقادیر بالا (بیش از ۳۰ تن در هکتار) ممکن است باعث شور و سدیمی شدن خاک شود (Song and Guo, 2012; Fernandes et al., 2018). این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر همسو است. در بررسی حاضر، کاربرد ۵ درصد بیوچار در خاک لوم‌شنی تأثیر کمتری بر کاهش EC نسبت به سطوح ۱ و ۳ درصد داشت. با این وجود، در سطوح بالای شوری آب آبیاری (۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) افزایش مقدار بیوچار از ۱ درصد به ۵ درصد تأثیر مثبت و معنی‌داری در کاهش EC خاک لوم داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بیوچار لازم برای کنترل EC در خاک لوم‌شنی نسبت به خاک لوم کمتر است.



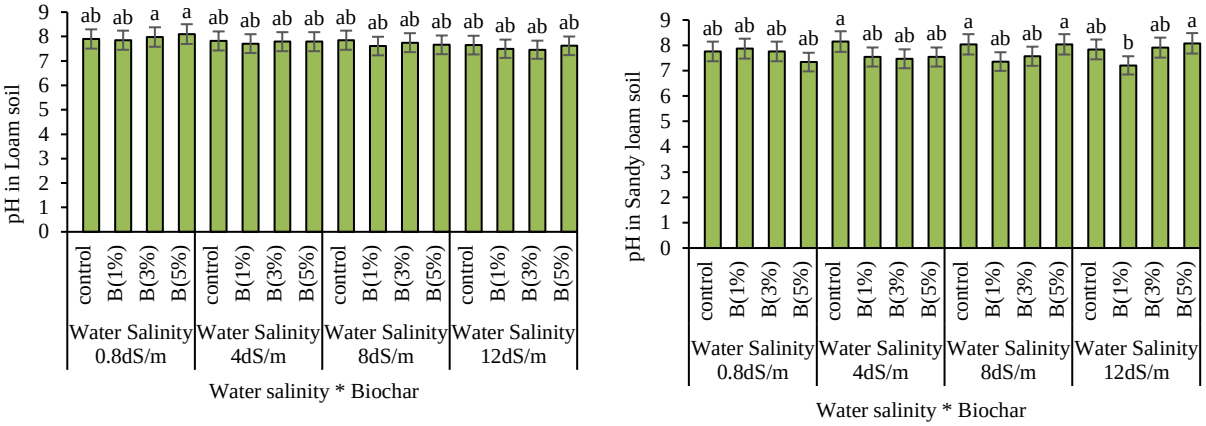
شکل ۱- تاثیر مقادیر مختلف بیوچار بر هدایت الکتریکی(EC) خاک‌های لوم و لوم‌شنی تحت شرایط مختلف شوری آب آبیاری

Figure 1- The effect of different biochar amounts on the electrical conductivity (EC) of loam and sandy loam soils under various irrigation water salinity conditions

نتایج بررسی حاضر نشان داد که شوری آب آبیاری و کاربرد بیوچار اثر معنی‌داری بر pH خاک لوم نداشتند (شکل ۲)، درحالی‌که pH خاک لوم‌شنی در شرایط کاربرد آب دارای شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و تیمار ۱ درصد بیوچار نسبت به سایر تیمارها کاهش معنی‌داری نشان داد و بین تأثیر سایر سطوح شوری و تیمارهای بیوچار بر pH خاک لوم‌شنی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۲). یافته‌های پژوهش‌های پیشین نیز بیانگر آن است که ویژگی pH خاک معمولا تحت تأثیر مصرف بیوچار قرار نمی‌گیرد، هر چند استفاده از بیوچار می‌تولند اثرات منفی شوری خاک را کاهش دهد (Wang et al., 2024b). تأثیر بیوچار بر pH زمانی قابل‌توجه و معنی‌دار است که خاک در محدوده اسیدی قرار داشته باشد

(Hailegnaw et al., 2019). درحالی‌که در خاک‌های شور که اغلب دارای pH اولیه بالا هستند، تأثیر بیوچار بر تغییرات pH محدود گزارش شده است (Gupta and Gupta, 2014).

توضیح دیگر این است که خاک‌های شور معمولاً ظرفیت بافری بالایی دارند و در برابر تغییرات pH ناشی از عوامل خارجی مانند بیوچار مقاومت می‌کنند (Zheng et al., 2018).



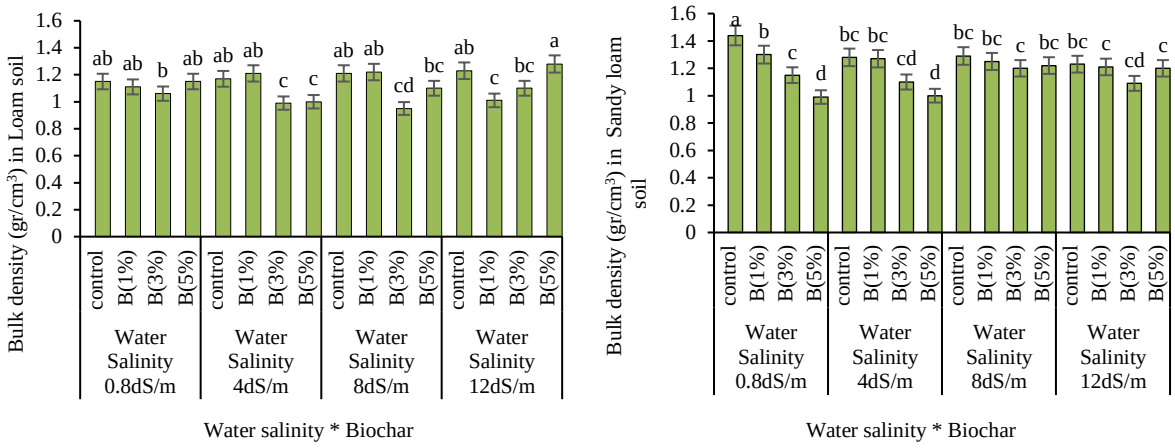
شکل ۲- تاثیر مقادیر مختلف بیوچار بر pH خاک‌های لوم و لوم شنی تحت شرایط مختلف شوری آب آبیاری

Figure 2- The effect of different biochar amounts on the pH of loam and sandy loam soils under various irrigation water salinity conditions

نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار اثر معنی‌داری بر کاهش چگالی ظاهری در هر دو بافت لوم و لوم‌شنی دارد، که دلیل آن را می‌توان ناشی از کم‌چگال‌تر بودن ذرات بیوچار نسبت به خاک و افزایش تخلخل کل خاک در نتیجه تجمع ذرات بیوچار و بهبود ساختار خاک دانست. بیشترین کاهش چگالی در بافت لوم در تیمار ۳ درصد و ۵ درصد بیوچار در شرایط آبیاری با آب دارای شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر و تیمار ۱ درصد بیوچار در شرایط شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌دست آمد (شکل ۳). بیشترین کاهش چگالی ظاهری در بافت لوم‌شنی در تیمار ۵ درصد بیوچار در شرایط کاربرد آب دارای سطوح شوری ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر به‌دست آمد (شکل ۳). مطالعات پیشین نیز بیان کرده‌اند که استفاده از بیوچار در خاک‌های شنی و لوم‌شنی سبب کاهش چگالی ظاهری و افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک می‌شود (Verheijen et al., 2019). در این پژوهش‌ها مشخص شده است که در خاک شنی، کاربرد بیوچار در مقادیر کم (۱ درصد) و با ذرات ریز اثرات قابل‌توجهی بر کاهش چگالی دارد، درحالی‌که در خاک لوم‌شنی، این اثرات به‌طور عمده در کاربرد بیوچار با مقادیر بالاتر (۵ درصد) و ذرات درشت آشکار می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش چگالی ظاهری خاک در اثر مصرف بیوچار، به عواملی مانند تغییرات ساختاری خاک و ویژگی‌های ذاتی بیوچار وابسته است. این تغییرات موجب بهبود تخلخل و کاهش چگالی ظاهری خاک در شرایط کاربرد آب شور می‌شود (Ben Ali et al., 2021).

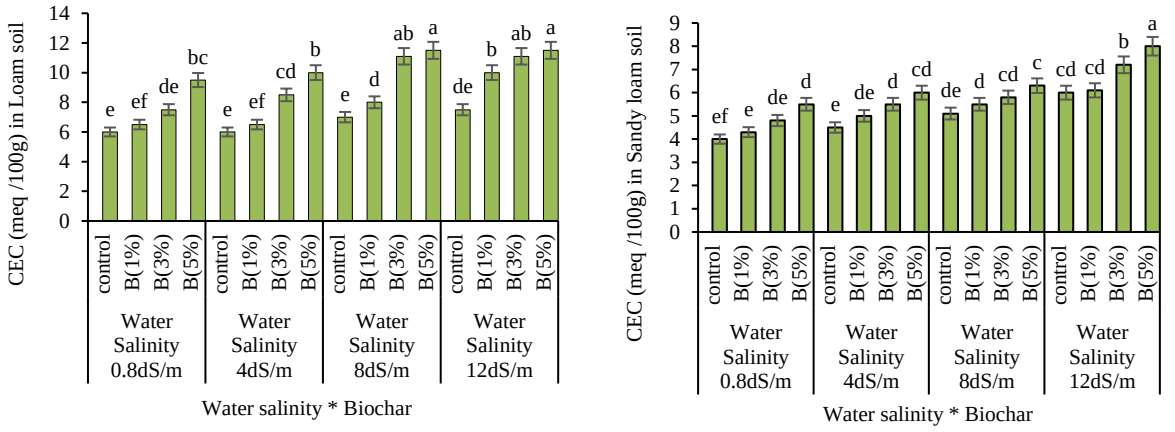
کاربرد بیوچار به‌طور معنی‌داری موجب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) در هر دو نوع خاک و تحت شرایط مختلف شوری آب آبیاری شد (شکل ۴). نتایج نشان داد که با افزایش سطح بیوچار از ۱ درصد به ۵ درصد، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار CEC برای بافت لوم در تیمار ۵ درصد بیوچار و در شرایط شوری ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و برای بافت لوم‌شنی در تیمار ۵ درصد و شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌دست آمد (شکل ۴). این نتایج نشان می‌دهد افزودن بیوچار چوب ساقه انگور با درصد خاکستر متوسط با افزایش سطح ویژه و گروه‌های عاملی دارای بار منفی، CEC خاک را به‌ویژه در شرایط آبیاری با آب شور افزایش می‌دهد؛ با این حال، به‌دلیل CEC اولیه بالاتر و پایداری بیشتر خاک لوم، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک لوم محسوس‌تر از خاک لوم‌شنی بوده است. یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد. به‌عنوان نمونه، ارزیابی بیوچارهای حاصل از کود مرغی، پوسته قهوه، خاک اره اکالیپتوس و باگاس نیشکر در خاک های آکسی‌سول

با بافت رسی و متوسط نشان داد که بیوچارهای کود مرغی و پوسته قهوه به‌دلیل دارا بودن خاکستر بالا نقش مهمی در افزایش CEC داشتند، درحالی‌که بیوچارهای خاک اره اکالیپتوس و باگاس نیشکر علی‌رغم افزایش محتوی کربن آلی خاک، تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت تبادل کاتیونی نشان ندادند (Domingues et al., 2020). در پژوهشی دیگر نیز گزارش شد که کاربرد بیوچار حاصل از گیاه چمن ترکه (*Panicum virgatum*) با خاکستر پایین (۴/۴ درصد) به‌طور متوسط تا ۲۷ درصد موجب کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی شد، درحالی‌که بیوچار بستر پرندگان با خاکستر بالا (۴۵/۹ درصد) ظرفیت تبادل کاتیونی را تا ۹۱ درصد افزایش داد (Antonangelo et al., 2024). در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که نوع مواد اولیه تولید بیوچار و مقدار خاکستر آن نقش تعیین‌کننده‌ای بر ویژگی‌های شیمیایی بیوچار داشته و اثرگذاری آن بر دینامیک ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را مشخص می‌کند.



شکل ۳- تاثیر مقادیر مختلف بیوچار بر چگالی ظاهری خاک‌های لوم و لوم شنی تحت شرایط مختلف شوری آب آبیاری

Figure 3- The effect of different biochar amounts on the bulk density of loam and sandy loam soils under various irrigation water salinity conditions

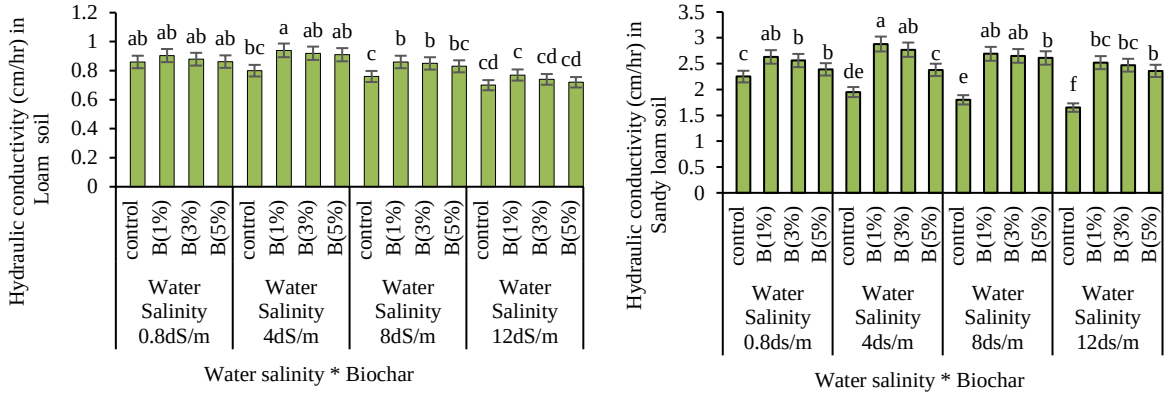


شکل ۴- تأثیر مقادیر مختلف بیوچار بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های لوم و لوم‌شنی تحت شرایط مختلف شوری آب آبیاری

Figure 4- The effect of different biochar amounts on the cation exchange capacity (CEC) of loam and sandy loam soils under various irrigation water salinity conditions

نتایج این پژوهش نشان داد که بین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر هدایت هیدرولیکی خاک در دو بافت لوم و لوم‌شنی تحت شرایط آبیاری با آب شور، اختلاف معنی‌داری وجود دارد (شکل ۵). افزایش سطح شوری موجب کاهش معنی‌دار هدایت

هیدرولیکی خاک شد، درحالی‌که افزودن بیوچار با بهبود ساختار و تخلخل خاک، هدایت هیدرولیکی را به طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۵). افزودن بیوچار در سطوح شوری متوسط (۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر) هدایت هیدرولیکی را نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش داد، ولی در شوری بسیار بالا (۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) اثر مخرب نمک به‌ویژه در خاک لوم با منافذ ریز و تمرکز نمک در فضای میان‌دانه‌ای، تا حدی مزایای بیوچار را خنثی کرد. تفاوت مشاهده شده بین خاک لوم و لوم‌شنی ناشی از تفاوت توزیع اندازه منافذ و نحوه‌ی انتقال و تجمع املاح در این دو بافت است. در همین راستا، گزارش شده است که آبیاری با آب شور یا سدیمی موجب کاهش هدایت هیدرولیکی و پراکندگی ذرات رس می‌شود (Adhikari et al., 2012). همچنین تحقیقات نشان داده است که کاربرد بیوچار با کاهش مقاومت نفوذ خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع را به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش می‌دهد (Jia et al., 2024).

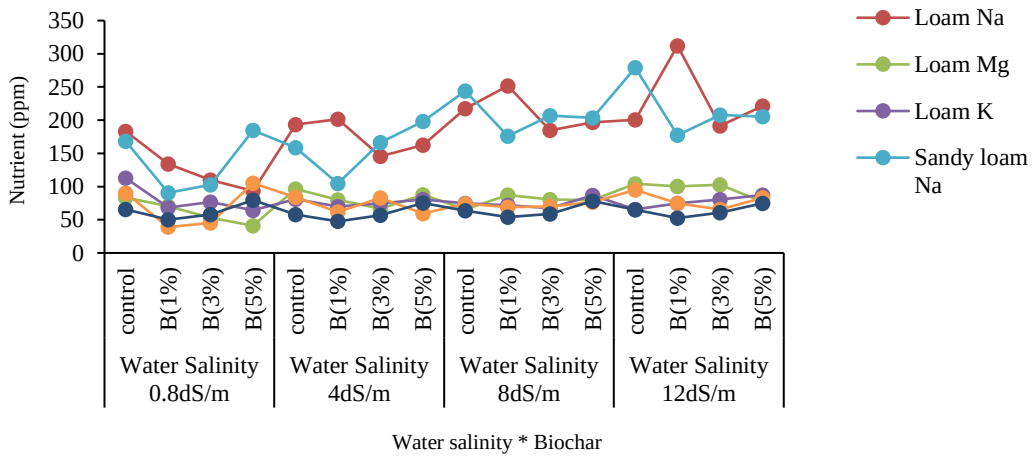


شکل ۵- تأثیر مقادیر مختلف بیوچار بر هدایت هیدرولیکی خاک‌های لوم و لوم شنی تحت شرایط مختلف شوری آب آبیاری

Figure 5- The effect of different biochar amounts on hydraulic conductivity of loam and sandy loam soils under various irrigation water salinity conditions

بررسی حاضر نشان داد که شوری آب آبیاری و بافت خاک اثر معنی‌داری بر تجمع کاتیون‌های تبادلی (سدیم، منیزیم و پتاسیم) دارند. در شرایط آبیاری با آب غیرشور (۰/۸ دسی‌زیمنس بر متر)، کاربرد بیوچار در خاک لوم منجر به کاهش تجمع هر سه کاتیون شد که احتمالا ناشی از افزایش زهکشی، رقابت کاتیونی و جذب موقت کاتیون‌ها توسط بیوچار است. درمقابل، در خاک لوم‌شنی با CEC کمتر، تیمار ۵ درصد بیوچار موجب افزایش تجمع سدیم، منیزیم و پتاسیم تبادلی شد (شکل ۶) که می‌تواند در نتیجه افزایش ظرفیت تبادلی ناشی از بیوچار و آزادسازی کاتیون‌های خاکستر آن باشد. با افزایش شوری آب آبیاری، سدیم تبادلی روند متفاوتی از منیزیم و پتاسیم نشان داد؛ به‌گونه‌ای که تیمارهای ۳ و ۵ درصد بیوچار در هر دو بافت، کاهش معنی‌دار سدیم تبادلی نسبت به شاهد را موجب شدند (شکل ۶). درمقابل، اثر شوری و بافت بر تجمع منیزیم بیشتر بود؛ به‌طوری‌که در خاک لوم و در شوری بالا، تجمع منیزیم افزایش یافت، اما در تیمار ۵ درصد بیوچار کاهش معنی‌دار منیزیم نسبت به شاهد مشاهده شد، که می‌تواند ناشی از بهبود نفوذپذیری و شست‌وشوی جزئی یون‌ها توسط بیوچار باشد. این نتایج نشان می‌دهد که اثر بیوچار بر کاتیون‌های تبادلی به ترکیب بافت، شوری و سطح کاربرد آن بستگی دارد و در هر بافت و سطح شوری، مکانیسم غالب ممکن است متفاوت باشد. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که استفاده از بیوچار می‌تواند منجر به افزایش غلظت کاتیون‌هایی مانند پتاسیم، منیزیم و سدیم و در نتیجه افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شود (Huang et al., 2023). در مطالعه حاضر، تغییرات پتاسیم تبادلی نسبت به دو عنصر دیگر (سدیم و منیزیم) کمتر بوده و اثر تیمارهای شوری و بیوچار بر آن معنی‌دار نبود (شکل ۶). این نتایج با یافته‌های سایر محققان که گزارش کردند افزایش شوری خاک موجب افزایش تجمع املاحی مانند سدیم و منیزیم می‌شود، همخوانی دارد (Lakhdar et al., 2023). همچنین در تحقیقی گزارش شده است که افزودن بیوچار پوسته برنج به بستر کشت با نسبت حجمی ۳۰ درصد، جذب سدیم را به‌طور معنی‌داری کاهش داده و نسبت پتاسیم به سدیم در گیاه را افزایش می‌دهد (Sudratt and Faiyue,

2023). افزون بر این، پژوهش‌های متعددی استفاده از بیوچار را به‌عنوان اصلاح‌کننده‌ای مؤثر برای تعدیل اثرات منفی شوری معرفی کرده‌اند؛ به‌طوری‌که افزودن بیوچار موجب افزایش پتاسیم محلول و تبادلی و بهبود حاصلخیزی خاک شده است (Nguyen et al., 2018; Phuong et al., 2020). در مواردی موجب کاهش سدیم و کلر محلول و تبادلی شده است (Huang et al., 2022; Zhang et al., 2019). بنابراین، کاربرد بیوچار می‌تواند از طریق کاهش دسترسی سدیم و کلر و افزایش پتاسیم تبادلی، نقش مهمی در کاهش اثرات منفی تنش شوری بر گیاهان ایفا کند.



شکل ۶- تأثیر مقادیر مختلف بیوچار بر تجمع عناصر سدیم، منیزیم و پتاسیم در خاک‌های لوم و لوم شنی تحت شرایط مختلف شوری آب آبیاری

Figure 6- The effect of different biochar amounts on the accumulation of sodium, magnesium, and potassium elements in loam and sandy loam soils under various irrigation water salinity conditions

نتیجه‌گیری کلی

بررسی حاضر نشان داد که شوری آب آبیاری به‌طور معنی‌داری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و میزان این اثرگذاری بسته به بافت خاک و شاخص‌های مورد بررسی متغیر است. بیشترین تأثیر شوری بر هدایت الکتریکی خاک (EC) و کمترین آن بر واکنش خاک (pH) مشاهده شد. نتایج نشان داد که خاک لوم‌شنی نسبت به خاک لوم حساسیت بیشتری به شوری آب آبیاری دارد. کاربرد بیوچار به‌طور معنی‌داری اثرات منفی تنش شوری را بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک کاهش داد. هرچند میزان کارایی بیوچار در این زمینه وابسته به نوع خاک و مقدار مصرف بیوچار بود؛ به‌طوری‌که در مقادیر پایین‌تر، بیوچار توانست نقش مؤثرتری در تعدیل اثرات منفی شوری ایفا کند. در مجموع، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده بهینه از بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کارآمد در مدیریت خاک‌های زراعی تحت تنش شوری عمل‌کرده و علاوه بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، به تعادل عناصر غذایی در خاک‌های با بافت مختلف کمک نماید.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل (کد پژوهانه UOZ-GR-6621) انجام شد که بدین وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌شود.

References

Antonangelo, J.A., Culman, S. and Zhang, H., 2024. Comparative analysis and prediction of cation exchange capacity via summation: influence of biochar type and nutrient ratios. *Frontiers in Soil Science*, *4*. https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1371777

Adhikari, P., Shukla, M.K. and Mexal, J.G., 2012. Spatial Variability of Hydraulic Conductivity and Sodium Content of Desert Soils: Implications for Management of Irrigation Using Treated Wastewater. *Transactions of the ASABE, 55*(5), pp.1711-1721. https://doi.org/10.13031/2013.42362

Ben Ali, A.R., Yang, H. and Shukla, M., 2021. Brackish groundwater and reverse osmosis concentrate influence soil physical and thermal properties and pecan evapotranspiration. *Soil Science Society of America Journal, 85*(5), pp.1519-1533. https://doi.org/10.1002/saj2.20281

Cheraghi, S.A.M., Dehghanisanij, H., Enayati, K. and Shajar, S., 2020. The long term impact of drip irrigation on soil salinity Case Study: Pistachio orchards in Sarvestan plain. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 14*(1), pp.24-38.

Choudhary, O.P., Ghuman, B.S., Josan, A.S. and Bajwa, M.S., 2006. Effect of alternating irrigation with sodic and non-sodic waters on soil properties and sunflower yield. *Agricultural Water Management, 85*, 151-156. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.017

Dane, J.H. and Topp, G.C. (eds)., 2002. *Methods of soil analysis. Part 4: Physical methods*. Soil Science Society of America Books Series: 5. Madison, WI: Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4

Domingues, R.R., Sánchez-Monedero, M.A., Spokas, K.A., Melo, L.C.A., Trugilho, P.F., Valenciano, M.N. and Silva, C.A., 2020. Enhancing Cation Exchange Capacity of Weathered Soils Using Biochar: Feedstock, Pyrolysis Conditions and Addition Rate. *Agronomy, 10*(6), 824. https://doi.org/10.3390/agronomy10060824

El-Agrodi, M.W.M., Ahmed, G.L. and El-Hamad, M.A., 2012. Effect of different soil salinity levels on some soil properties and wheat plant. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering, 3*(2), pp.175-188. https://doi.org/10.21608/jssae.2012.53851

Fernandes, J.D., Chaves, L.H.G., Mendes, j.de S., Chaves, I.de B. and Tito, G.A., 2018. Soil Chemical Amendments and the Macronutrients Mobility Evaluation in Oxisol Treated With Biochar. *Journal of Agricultural Science, 10*, 238-238. https://doi.org/10.5539/jas.v10n10p238

Gupta, S.K. and Gupta, I. C., 2014. *Salt affected soils: reclamation and management*. Scientific Publishers.

Hammer, E.C., Forstreuter, M., Rillig, M.C. and Kohler, J., 2015. Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress. *Applied Soil Ecology, 96*, 114-121. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.07.014

Huang, K., Li, M., Li, R., Rasul, F., Shahzad, S., Wu, C., Shao, J., Huang, G., Li, R., Almari, S., Hashem, M. and Aamer, M., 2023. Soil acidification and salinity: the importance of biochar application to agricultural soils [Review]. *Frontiers in Plant Science, 14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1206820

Huang, J., Zhu, C., Kong, Y., Cao, X., Zhu, L., Zhang, Y., Ning, Y., Tian, W., Zhang, H., Yu, Y. and Zhang, J., 2022. Biochar application alleviated rice salt stress via modifying soil properties and regulating soil bacterial abundance and community structure. *Agronomy, 12*(2), 409. https://doi.org/10.3390/agronomy12020409

Helmke, P.A. and Sparks, D.L., 1996. Lithium, Sodium, Potassium and Rubidium. In D.L. Sparks et al. (eds), *Methods of soil analysis, Part 3* (pp. 551-574). ASA-SSA, Madison, WI, USA. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c19

Huang, K. Li, M., Li, R., Rasul, F., Shahzad, S., Wu, C., ... and Aamer, M., 2023. Soil acidification and salinity: the importance of biochar application to agricultural soils. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1206820. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1206820

Ismail, S. A., Badawi, T.A.M.A. and ElSharawy, A.A., 2023. Effect of Applying Biochar on some Soil Chemical Properties, Pathogenic Fungi and Tomato Productivity in North Sinai. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, *14*(1), pp.1-9. https://doi.org/10.21608/jssae.2023.182929.1125

Jahantigh, M. and Jahantigh, M., 2023. The effect of saline water and type of irrigation on soil moisture and physico-chemical properties Mansour. *Integrated Watershed Management, 2*(4), pp.67-78. https://doi.org/10.22034/iwm.2023.1988382.1059

Jia, A., Song, X., Li, S., Liu, Z., Liu, X., Han, Z., Gao, H., Gao, Q., Zha, Y., Liu, Y., Wu, X., Wang, G., 2024. Biochar enhances soil hydrological function by improving the pore structure of saline soil. *Agricultural Water Management*, *306*, 109170. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109170

Hailegnaw, N.S., Mercl, F., Praˇcke, K., Sz'akov' a, J. and Tlustoˇs, P., 2019. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments, 19*, pp.2405-2416. https://doi.org/10.1007/s11368-019-02264-z

KarimiNazar, M., Moghaddam Nia, A. and Mosaedi, A., 2010. Investigation of climatic factors affecting occurrence of drought (Case study: Zabol Region). *Journal of Water and Soil Conservation, 17*(1), pp.145-158. [In Persian].

Kashki, A., Karami, M., Baaghideh, M. and Alimoradi, M.R., 2020. Statistical Analysis of Zabol Heat Waves. *Climate Change and Climate Disaster, 1*(1), pp.80-97. [In Persian].

Khaledi, S., Delbari, M., Galavi, H., Bagheri, H. and Chari, M.M., 2023. Effects of biochar particle size, biochar application rate, and moisture content on thermal properties of an unsaturated sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, *226*, 105579. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105579

Kong, C., Camps-Arbestain, M., Clothier, B., Bishop, P. and Vázquez, F.M., 2021. Use of either pumice or willow-based biochar amendments to decrease soil salinity under arid conditions. *Environmental Technology & Innovation*, *24*, 101849. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101849

Lakhdar, A., Trigui, M. and Montemurro, F., 2023. An Overview of Biostimulants' Effects in Saline Soils. *Agronomy*, *13*(8), pp.2092. https://doi.org/10.3390/agronomy13082092

Lee, B.J., 2024. Improvement of field falling-head test and determination of hydraulic conductivity using Darcy's equation. *Scientific Reports*, *14*, 17928. https://doi.org/10.1038/s41598-024-68887-6

Li, C., Wang, Z., Xu, Y., Sun, J., Ruan, X., Mao, X., Hu, X. and Liu, P., 2023. Analysis of the Effect of Modified Biochar on Saline-Alkali Soil Remediation and Crop Growth. *Sustainability*, *15*(6), pp.5593. https://doi.org/10.3390/su15065593

Lim, T.J., Spokas, K.A., Feyereisen, G., Novak, J.M., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere, 142*, 136-144. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.069

Mohanavelu, A., Naganna, S.R. and Al-Ansari, N., 2021. Irrigation Induced Salinity and Sodicity Hazards on Soil and Groundwater: An Overview of Its Causes, Impacts and Mitigation Strategies. *Agriculture, 11*(10), 983. https://doi.org/10.3390/agriculture11100983

Muñoz, C., Góngora, S. and Zagal, E., 2016. Use of biochar as a soil amendment: a brief review. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Science, 32(Special Issue 1)*,37-47.

Nguyen, B.T., Trinh, N.N., Le, C.M.T., Nguyen, T.T., Tran, T.V., Thai, B.V. and Le, T.V., 2018. The interactive effects of biochar and cow manure on rice growth and selected properties of salt-affected soil. *Archives of Agronomy and Soil Science, 64*(12), pp.1744-1758. https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1455186

Nyambo, P., Motsi, H., Chiduza, C. and Malobane, M.E., 2023. Biochar ageing improves soil properties, growth and yield of red radish (*Raphanus sativus*) in a Haplic Cambisol. *PLOS One, 18*(7), e0288709. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288709

Parmar, A., Nema, P.K. and Agarwal, T., 2014. Biochar Production from Agro-Food Industry Residues: A Sustainable Approach for Soil and Environmental Management. *Current Science, 107*, pp.1673-1682. https://www.jstor.org/stable/24107941

Phuong, N.T.K., Khoi, C.M., Ritz, K., Linh, T.B., Minh, D.D., Duc, T.A., Sinh, N.V., Linh, T.T. and Toyota, K., 2020. Influence of Rice Husk Biochar and Compost Amendments on Salt Contents and Hydraulic Properties of Soil and Rice Yield in Salt-Affected Fields. *Agronomy, 10*(8), 1101. https://doi.org/10.3390/agronomy10081101

Qasim, S., Gul, S., Buriro, A.H., Shafiq, F. and Ismail, T., 2024. Biochar-based organic fertilizers: Influence on yield and concentration of antioxidants in the stigma of saffron and rhizosphere bacterial diversity of slightly saline and non-saline soils. *Saudi Journal of Biological Sciences, 31(3)*, 103922. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103922

Singh, H., Northup, B.K., Rice, C.W. and Prasad, P.V.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

Sistan and Baluchestan Regional Water Joint Stock Company., 2015. Report on the Status of Water Resources in Sistan and Baluchestan Province, 41 p. [In Persian].

Song, W. and Guo, M., 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 94*, pp.138-145. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018

Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., et al. (eds)., 1996. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3

Sudratt, N. and Faiyue, B., 2023. Biochar Mitigates Combined Effects of Soil Salinity and Saltwater Intrusion on Rice (*Oryza sativa* L.) by Regulating Ion Uptake. *Agronomy*, *13*(3), 815. https://doi.org/10.3390/agronomy13030815

Suzuki, M., Yanagisawa, M. and Takeuchi, T., 1965. Determination of magnesium by atomic-absorption spectrophotometry after extraction. *Talanta*, *12*, pp.989-996. https://doi.org/10.1016/0039-9140(65)80198-9

Tarolli, P., Luo, J., Park, E., Barcaccia, G. and Masin, R., 2024. Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. *iScience*, *27*(2), 108830. https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108830

Tomaz, A., Palma, P., Alvarenga, P. and Gonçalves, M.C., 2020. Soil Salinity Risk in a Climate Change Scenario and Its Effect on Crop Yield. In M.N.V. Prasad & M. Pietrzykowski (Eds.), *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 351-396). Elsevier, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00013-8

Verheijen, F.G.A., Zhuravel, A., Silva, F.C., Amaro, A., Ben-Hur, M. and Keizer, J. J., 2019. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma*, *347*, 194-202. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.044

Wang, Z., He, M., Lu, X., Meng, Z., Liu, J. and Mo, X., 2024a. Biochar addition can negatively affect plant community performance when altering soil properties in saline-alkali wetlands. *Frontiers in Plant Science*, *15*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1347658

Wang, X., Ding, J., Han, L., Tan, J., Ge, X. and Nan, Q., 2024b. Biochar addition reduces salinity in salt-affected soils with no impact on soil pH: A meta-analysis. *Geoderma*, *443*, 116845. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116845

Xu, Q., Xu, Y., Xia, H., Han, H., Li, M., Gong, P., Wang, C., Li, Y., Li, P. and Liu, H., 2025. Mitigation of soil salinity by biochar and halophytes. *Geoderma*, *454*, 117191. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117191

Zanutel, M., Garré, S., Sanglier, P. and Bielders, C., 2024. Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. *Vadose Zone Journal*. *23 (1)*, e20301. https://doi.org/10.1002/vzj2.20301digital object identifier

Zhang, J., Bai, Z., Huang, J., Hussain, S., Zhao, F., Zhu, C., Zhu, L., Cao, X. and Jin, Q., 2019. Biochar alleviated the salt stress of induced saline paddy soil and improved the biochemical characteristics of rice seedlings differing in salt tolerance. *Soil and Tillage Research*, *195*, 104372. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104372

Zhe, P., Li, J., Wang, Q. and Shen, J., 2023. Effects of Different Soil Amendments on Soil Physical and Chemical Properties, Rice Yield, and Economic Benefits in Low-lying Saline Alkali Land in Northern Shaanxi. *Research Square*, 1-15. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2713554/v1

Zheng, H., Wang, X., Chen, L., Wang, Z., Xia, Y., Zhang, Y., Wang, H., Luo, X. and Xing, B., 2018. Enhanced growth of halophyte plants in biochar-amended coastal soil: roles of nutrient availability and rhizosphere microbial modulation. *Plant, Cell and Environment*, *41*, pp.517–532. https://doi.org/10.1111/pce.12944