Original Article

Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)

Spring 2026, Vol.4, No.13, pp 41 - 60

10.22077/jdcr.2025.9403.1144

Impact of Organic and Inorganic Amendments (In Nano and Non-Nano Scale) on the Improvement of Physical and Hydraulic Properties of Saline Soils

Fatemeh Hajebi[1], Navazollah Moradi[2*], Ommolbanin Bazrafshan[3], Adnan Sadeghi Lari[4]

1- Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2- Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

3- Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Natural Resources and Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

4- Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

***Corresponding Author: nvz.moradi@hormozgan.ac.ir**

Keywords:
Bulk density, Drought, Field capacity, Nanobiochar, Nanosilica.

Received:
17 May 2025

Revised:
6 Jun 2025

Accepted:
28 Jun 2025

Extended Abstract

Introduction

Due to the increasing trend of agricultural soil degradation caused by rising salinity and declining structural quality, the application of soil amendments has become essential for restoring soil physical and hydraulic balance. In this regard, nanotechnology has emerged as a promising approach, attracting considerable attention for its potential to improve soil properties. Accordingly, the present study was conducted to evaluate the effect of both organic and inorganic amendment materials at nano and conventional scales -including biochar and pomegranate peel-derived nanobiochar, nanobentonite, zeolite, microsilica, and nanosilica- on the physical and hydraulic characteristics of a saline loam soil.

Materials and Methods

In this study, the effects of various mineral and organic amendments, including both nano- and non-nano-scale materials, on saline loamy soil were evaluated. Soil samples were collected from a depth of 5–30 cm in the agricultural area of Hassanlangi village, located in the eastern part of Bandar Abbas. Following collection, the samples were transferred to the Soil and Water Laboratory at the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, and air-dried under ambient conditions. To ensure

How to cite this article:
Hajebi, F; Moradi, N; Bazrafshan, O; & Sadeghi Lari, A. (2025). Impact of Organic and Inorganic Amendments (In Nano and Non-Nano Scale) on the Improvement of Physical and Hydraulic Properties of Saline Soils. *Journal of Drought and Climate change Research* (JDCR), *4*(13), 41-60. https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9403.1144

Copyright: Authors retain the copyright and full publishing rights. Licensee Journal of Drought and Climate change Research (JDCR). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

homogeneity and prepare the samples for physicochemical analyses, they were passed through a 2 mm sieve. The soil was then treated with biochar, nanobiochar, nanobentonite, zeolite, microsilica, and nanosilica at a concentration of 4 g/L, applied in suspension form. The treated soil samples were placed into polyethylene columns (35 cm × 10 cm) arranged in a completely randomized design with three replicates. To simulate field moisture fluctuations and stabilize soil conditions, the samples were subjected to alternating wetting and drying cycles, ranging between field capacity and 50% of field capacity for 100 days, under controlled laboratory conditions at a temperature of 18–25 °C. At the end of the incubation period, the relevant physical and hydraulic parameters were measured. For statistical analysis, one-way analysis of variance (ANOVA) was performed, followed by Duncan's multiple range test at the 5% significance level to compare treatment means. All statistical computations were carried out using SPSS software (version 16).

Results and Discussion

The analysis of variance revealed that all soil amendments applied in the experiment had a statistically significant effect on the measured soil properties. These properties included the mean weight diameter of aggregates under both dry and wet conditions, the water-stable aggregate index, bulk density, field capacity, permanent wilting point, and available water capacity. The significance of these effects was confirmed at the 1% probability level ($P \leq 0.01$). The obtained results indicated that all applied amendments significantly improved the mean weight diameter of soil aggregates, enhanced the soil aggregate stability index in water, and optimized key soil moisture parameters, including field capacity, permanent wilting point, and available water capacity. The highest value of the water stable aggregate index was observed in the nanosilica treatment, which represented a 35% increase compared to the control. Additionally, the lowest bulk density (1.5 g/cm^3) was recorded in this same treatment. On the other hand, the highest field capacity was observed in the nano-silica treatment (24.61%), which showed a significant difference compared to the other treatments. The lowest permanent wilting point was associated with the micro silica treatment, showing a statistically significant difference from other treatments at the 5% probability level. Moreover, the application of both nano and non-nano scale amendments, except for biochar, resulted in a significant increase in field capacity at the 5% significance level compared to the control. Data also revealed that the incorporation of nano and non-nano amendments, excluding conventional biochar, significantly increased the available water capacity in saline conditions.

Conclusion

This study evaluated the impacts of organic, inorganic, and nanoscale soil amendments on the physical and hydraulic properties of saline loamy soils. The results demonstrated that these amendments

significantly improved soil structure, enhanced aggregate stability, increased tillage efficiency, and expanded available water capacity. Among the applied materials, nanosilica exhibited the most favorable performance, primarily due to its ultrafine particle size, high specific surface area, and suitable chemical reactivity. These characteristics promoted stronger inter-particle bonding, improved soil workability, and enhanced water field capacity features, particularly critical in arid and semi-arid regions. Nano-bentonite and zeolite also produced beneficial effects, although their performance was less pronounced than that of nanosilica. Nano-biochar outperformed conventional biochar; however, the latter may exert adverse effects on saline-alkali soils under certain conditions. Overall, the results indicate that nanotechnology, and particularly nanosilica application, holds promising potential as an innovative tool for improving water use efficiency. Findings from this study contribute to the mitigation of soil erosion and the sustainable management of saline-affected soils.

مقاله پژوهشی

مجلـه
پژوهش‌های خشکسالی و تغییر اقلیم

دوره چهارم، پیاپی ۱۳، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۶۰ - ۴۱

doi 10.22077/jdcr.2025.9403.1144

تأثیر برخی مواد اصلاح‌کننده معدنی و آلی (در مقیاس نانو و غیر نانو) بر بهبود خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های شور

فاطمه حاجبی[۱]، نوازاله مرادی[۲*]، ام البنین بذرافشان[۳]، عدنان صادقی لاری[۴]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۳- استاد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۴- دانشیار، گروه مهندسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
*نویسنده مسئول: nvz.moradi@hormozgan.ac.ir

واژه‌های کلیدی:
جرم مخصوص ظاهری؛ خشکسالی؛ ظرفیت زراعی؛ نانو سیلیس؛ نانو بیوچار.

چکیده

فناوری نانو می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد نوین در جهت بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های شور مورد استفاده قرار گیرد. برهمین اساس مطالعه‌ای با هدف بررسی تأثیر مواد اصلاح‌کننده معدنی و آلی (در مقیاس نانو و غیرنانو) بر خاک شور با بافت لومی انجام شد. نمونه‌برداری از خاک در عمق ۵ تا ۳۰ سانتی‌متری صورت گرفت و تیمارها شامل بیوچار و نانوبیوچار پوست انار، نانوبنتونیت، زئولیت، میکروسیلیس و نانوسیلیس بر روی ستون‌های خاکی (با ابعاد ۳۵ × ۱۰ سانتی‌متر) در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار اعمال شدند. نتایج نشان داد که تمامی مواد اصلاحی منجر به افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، ارتقای شاخص پایداری خاکدانه در آب و بهینه‌سازی پارامترهای رطوبتی (ظرفیت‌زراعی، نقطه‌پژمردگی‌دائم و آب‌قابل‌دسترس) شدند. بیشترین مقدار شاخص پایداری خاکدانه در آب مربوط به تیمار نانوسیلیس بود که نسبت به شاهد ۳۵ درصد افزایش داشت و کمترین جرم مخصوص ظاهری خاک (۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) نیز در این تیمار مشاهده شد. کمترین مقدار نقطه‌پژمردگی‌دائم در این پژوهش مربوط به تیمار سیلیس معمولی بود که با سایر تیمارها در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار نشان داد و همچنین افزودن مواد اصلاحی نانو و غیر نانو به خاک لومی شور، به‌جز تیمار بیوچار، سبب افزایش معنی‌دار ظرفیت‌زراعی در سطح ۵٪ نسبت به تیمار شاهد شد. داده‌ها نشان دادند که افزودن مواد اصلاحی نانو و غیر نانو (به‌استثنای بیوچار معمولی)، سبب افزایش معنی‌دار رطوبت‌قابل‌دسترس در خاک شور شد. یافته‌ها مؤید نقش مؤثر مواد اصلاحی، به‌ویژه نانوسیلیس، در بهبود کیفیت ساختاری خاک، پایداری خاکدانه‌ها و خصوصیات هیدرولیکی خاک است.

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۲/۲۷

تاریخ ویرایش:
۱۴۰۴/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۴/۰۷

مقدمه

خاک‌های شور به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی در سطح جهان شناخته می‌شوند. این نوع خاک‌ها از نظر پراکندگی جغرافیایی بیشتر در مناطق خشک و نیمه‌خشک گسترش یافته‌اند و تأثیرات منفی قابل‌توجهی بر عملکرد محصولات کشاورزی و سلامت اکوسیستم‌ها دارند (Rengasamy, 2006). شوری خاک یکی از مهم‌ترین موانع استفاده بهینه از اراضی کشاورزی در سراسر جهان محسوب می‌شود. شوری و خشکی از چالش‌های مهم مناطق خشک و نیمه خشک است (Seif et al., 2034). و نقش مؤثری بر کاهش کیفیت خاک و عملکرد گیاه در مناطق و خشک و نیمه خشک دارد (Azarmi-Atajan, 2024) به‌طوری که در حدود ۲۰ درصد از زمین‌های کشت‌شده جهان تحت تأثیر شوری قرار دارند و در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بیش از ۹۳۵ میلیون هکتار از اراضی طبیعی و کشاورزی تحت تأثیر شوری قرار گرفته‌اند (Basak et al., 2022; Hussain et al., 2019). در نتیجه شور شدن خاک ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی تحت تأثیر قرار گرفته و اثر نامطلوب فیزیولوژیکی بر گیاه گذاشته و عملکرد محصول کاهش می‌دهد (Gholami et al, 2023; Miransari and Smith, 2018). این پدیده علاوه بر کاهش بهره‌وری کشاورزی، باعث آسیب‌های جدی به محیط زیست و کاهش تاب‌آوری اکوسیستم‌ها می‌شود (Singh, 2022). و همچنین، تخمین زده شده که شوری خاک سالانه منجر به از دست رفتن ۲۷/۳ میلیارد دلار درآمد جهانی می‌گردد (Mustafa et al., 2019). از آنجا که شوری خاک با غلظت بالای نمک‌های محلول مشخص می‌شوند (Rengasamy et al., 2022). در شکل‌گیری آن عوامل مختلف طبیعی و انسانی نقش دارند. که عوامل طبیعی شامل فرسایش کانی‌ها، توپوگرافی، شرایط زمین‌شناسی و آب‌های زیرزمینی غنی از نمک است (Li et al., 2020) و عوامل انسانی شامل شیوه‌های نادرست کشاورزی، استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی، مدیریت نامناسب آبیاری و زهکشی ضعیف هستند (Majeed and Muhammad, 2019). علاوه بر این، تغییرات اقلیمی با افزایش دما، تغییر الگوهای بارشی و بالا رفتن سطح آب دریاها، شدت شوری خاک را در مناطق مختلف افزایش داده است (Al-Tawaha et al., 2021).

برای احیا خاک‌های شور-سدیمی، روش‌های متعددی وجود دارد که عموماً به سه دسته فیزیکی مانند شخم عمیق، زیرشکنی، شن‌پاشی، شیمیایی (استفاده از مواد اصلاحی مانند گچ، کلرید کلسیم، سنگ‌آهک و سولفات‌ها) و بیولوژیکی (استفاده از مواد آلی و کودهای دامی) تقسیم می‌شوند (Zaib et al., 2022). هدف اصلی این روش‌ها، کاهش غلظت نمک‌های محلول، بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش پتانسیل رشد گیاه است. مواد آلی نقش برجسته‌ای در بهبود خصوصیات خاک‌های شور-سدیمی ایفا می‌کنند. افزودن مواد آلی به خاک موجب بهبود ساختار خاک، افزایش نفوذپذیری آب، کاهش تبخیر سطحی و تسهیل آب‌شویی نمک‌ها می‌شود. همچنین، مواد آلی باعث افزایش محتوای کربن آلی خاک، پایداری خاکدانه‌ها و فعالیت میکروبی خاک می‌گردند (Naghman et al., 2023; Zhang et al., 2021). این مواد همچنین با تعدیل pH خاک و کاهش ESP شرایط لازم برای رشد گیاه را بهبود می‌دهند (Leogrande and Vitti, 2019).

در سال‌های اخیر، بیوچار به‌عنوان یک ماده آلی پایدار و مقاوم در برابر تجزیه زیستی، به‌عنوان یک اصلاح‌کننده مؤثر برای خاک‌های شور شناخته شده است. بیوچار با داشتن سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) مناسب و ساختار متخلخل، به بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک کمک می‌کند (Wang et al., 2024). نانوفناوری به‌عنوان فناوری قدرتمند قادر است که سیستم غذایی و کشاورزی را متحول کند، و اهمیت زیادی بر کیفیت خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. برهم‌کنش نانو مواد با اجزای خاک به‌شدت بر کیفیت خاک و رشد گیاه اثرگذار است (Haris et al., 2023). مطالعات نشان داده که بیشترین کاربردهای مورد انتظار نانوفناوری برای اصلاح بخش‌های محیطی مانند آب‌وخاک شامل تصفیه فاضلاب، پاک‌سازی آب‌های زیر زمینی و اصلاح خاک‌های آلوده و شور، بوده است و بیشتر این کاربردها مبتنی بر نانوذرات فلزی مهندسی شده است (Bakhshi and Abhilash, 2020). استفاده از فناوری نانو همچنین با تحریک آنزیم‌های خاک، انتقال مواد مغذی و حاصلخیزی خاک را بهبود بخشیده است. رشد گیاه و سلامت خاک هر دو می‌توانند با تعامل نانو مواد با باکتری‌های ریزوسفری بهبود یابند. نانومواد‌ها دارای خواص سطحی منحصربه‌فردی هستند که فعالیت‌های بیولوژیکی قابل‌توجهی را امکان‌پذیر می‌کند که به‌طور بالقوه برای اصلاح ویژگی‌های

فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی خاک مفید هستند (Rajput et al., 2023). همچنین، استفاده از نانوتکنولوژی در اصلاح خاک با بهره‌گیری از نانو موادی مانند نانو سیلیس، نانو بنتونیت و نانو بیوچار، به‌عنوان رویکردهای نوین، مورد توجه قرار گرفته است. این مواد با خواص سطحی ویژه، توانایی تعامل با ذرات خاک و بهبود خصوصیات هیدرولیکی و ساختاری خاک را دارند. در این زمینه مطالعات نشان داده که بنتونیت به‌عنوان یک رس طبیعی با ظرفیت تبادل کاتیونی بالا اصلاح‌کننده مؤثر بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک در نظر گرفته شده و منجر به حفاظت بهتر آب‌وخاک اراضی لسی شده (Bameri and et al., 2021). بنابراین پایداری خاک را افزایش می‌دهد. نانوسیلیس به‌دلیل اندازه ذرات بسیار کوچک و سطح ویژه بالا، قادر است ظرفیت نگهداری آب خاک، ظرفیت زراعی و ظرفیت آب قابل دسترس را افزایش داده در حالی که سبب کاهش نقطه پژمردگی دائم شده است. این تغییرات منجر به بهبود تخلخل خاک، کاهش تراکم ظاهری و افزایش هدایت هیدرولیکی خاک می‌شوند. در یک مطالعه آزمایشی در مصر، کاربرد هیدروژل نانوسیلیس در شرایط کم‌آبی باعث افزایش عملکرد برنج به میزان ۱۰/۷۶ تن در هکتار و شبدر به میزان ۵/۰۳ تن در هکتار شد که نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار بود (El-Aziz et al., 2025). از سوی دیگر، مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از ترکیبات نانو و غیر نانو اکسید سیلیسیم در یک خاک حساس به فرسایش با بافت لوم سیلتی سبب بهبود پارامترهای پایداری خاک شده است (Moradi et al., 2016). در رابطه با بیوچار نیز مطالعات نشان داده‌اند که بیوچار به‌عنوان یک ماده آلی-معدنی با خواص منحصر به فرد خود سبب بهبود خاک شور شده است. بر این اساس، مطالعات پژوهشگران نشان داده‌اند که کاربرد بیوچار حاصل از بادمجان (Moshtagh, et al, 2022) و باگاس نیشکر، سرشاخه درخت کاج و پوسته شلتوک برنج موجب کاهش شوری زه‌آب و افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع و پایداری خاک شده است (Fouladidorhani et al., 2022). در حالی که تأثیر بیوچار پوست نرم پسته و پوست سخت گردو، هرچند سبب بهبود خاکدانه‌سازی در خاک با بافت لوم رسی و لوم شنی شده است، اما بر هدایت الکتریکی تأثیری نداشته است؛ که در این خصوص نوع بیوچار و بافت خاک به‌عنوان عوامل مؤثر در اثرگذاری بر خصوصیات خاک شناسایی شده‌اند (Shekofteh et al., 2023).

باوجود مطالعات متعدد در زمینه اصلاح خاک‌های شور، اکثر تحقیقات تاکنون بر بهبود خصوصیات شیمیایی خاک مانند کاهش هدایت الکتریکی[1] و نسبت جذب سدیم[2] تمرکز داشته‌اند. در مقابل، اطلاعات موجود درباره تأثیر مواد اصلاحی بر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های شور به‌ویژه پارامترهایی مانند ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، آب قابل‌دسترس و پایداری خاکدانه‌ها بسیار محدود است. این شکاف دانشی، اهمیت انجام مطالعاتی را برجسته می‌کند که به‌طور مستقیم نقش مواد اصلاحی نانو و معمولی را در بهبود خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های شور بررسی شود؛ بنابراین، هدف از این پژوهش مقایسه اثربخشی مواد نانو (نانو سیلیس، نانو بنتونیت، نانوبیوچار) و شکل معمولی سیلیس، زئولیت و بیوچار در بهبود پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های شور است. این پارامترها شامل جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه‌ها و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها درصد رطوبت در ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و مقدار آب قابل دسترس گیاه می‌شوند. همچنین، هدف دیگر این تحقیق، شناسایی ترکیب بهینه از این مواد برای حداکثرسازی بهبود خصوصیات خاک و کاهش اتلاف آب در شرایط شوری است. نتایج این مطالعه نه‌تنها به درک بهتر مکانیسم عمل نانو مواد در محیط‌های شور کمک خواهد کرد، بلکه پایه‌ای برای استفاده از راهکارهای نوین و پایدار در مدیریت منابع خاک و آب در مناطق تحت تأثیر شوری فراهم خواهد کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، به‌منظور بررسی تأثیر برخی مواد اصلاح‌کننده معدنی و آلی (در مقیاس نانو و غیر نانو) بر خاک شور با بافت لومی، نمونه‌برداری از خاک از عمق ۵ تا ۳۰ سانتی‌متری در منطقه‌ی زراعی روستای حسنلنگی واقع در شرق شهرستان بندرعباس انجام شد. پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها به آزمایشگاه آب و خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه هرمزگان انتقال و در شرایط محیطی هوا خشک شدند و به‌منظور یکنواخت‌سازی و آماده‌سازی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی با الک ۲ میلی‌متری غربال‌گری شد و پارامترهای هدایت الکتریکی، اسیدیته، سدیم، کلسیم و

1. EC
2. SAR

منیزیم خاک (Page and et al., 1982) و بافت خاک به‌روش هیدرومتری (Gee and Bauder., 1986) و جرم مخصوص ظاهری به‌روش کلوخه‌ای (Grossman and Reinsch. 2002) اندازه‌گیری شد. و ویژگی‌های اولیه خاک مطابق جدول ۱ اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. نتایج تجزیه ویژگی‌های اولیه نمونه خاک مورد مطالعه

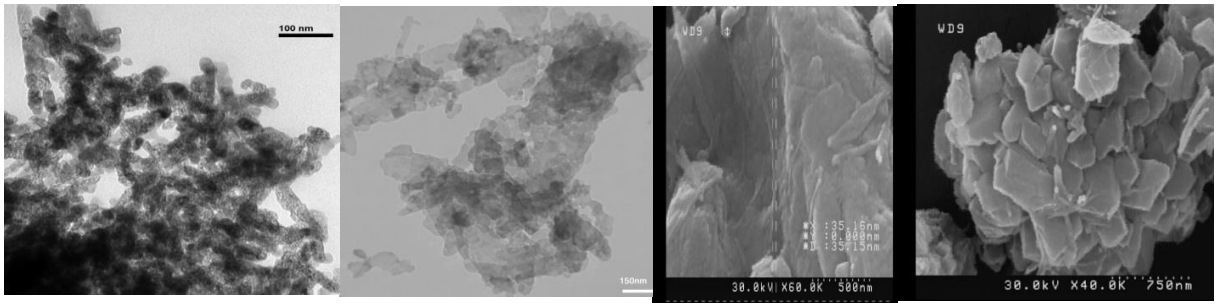
Table 1. Results of Analysis of Initial Soil Properties

Texture بافت	Silt (%) سیلت	Clay (%) رس	Sand (%) شن	CEC (meq/100g) ظرفیت تبادل کاتیونی	SAR۲ نسبت جذب سدیم	BD (g/cm^3) جرم مخصوص ظاهری	pH اسیدیته	EC۱ (ds/m) هدایت الکتریکی
loam	32	16	52	10.51	22.27	1.58	7.84	22.1

1 - Electrical Conductivity
2 - Sodium Adsorption Ratio

تیمارهای آزمایشی

برای تهیه مواد آلی به‌صورت بیوچار به‌روش Khanmohammadi و همکاران (۲۰۱۶) از ضایعات پوست انار استفاده گردید. در ابتدا پوست انار شستشو داده شده و سپس در آون با دمای ۸۰ درجه سلسیوس خشک و قبل از استفاده به‌صورت پودر یکنواخت با ابعاد ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر آسیاب شد. پوست انار پودر شده برای تولید بیوچار از طریق روش پیرولیز بدون اکسیژن درون بشر پیرکس قرار داده شد و سپس فویل آلومینیومی پوشانده شد و در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی قرار داده شد. نمونه‌های بیوچار تهیه شده برای حذف ناخالصی‌ها چندین بار با آب مقطر شستشو و در آون خشک شده و در ظروف دربسته برای مراحل بعدی آزمایش نگهداری شدند. نانوبیوچار حاصل از بیوچار با اندازه متوسط ۲۰±۶۰ نانومتر در آزمایشگاه شیمی دانشگاه اصفهان با استفاده از آسیاب گلوله‌ای براساس روش (Boateng and et al., 2015) تولید شد (جدول ۲). علاوه بر بیوچار مواد معدنی مورد استفاده شامل زئولیت کشاورزی و سیلیس بود که از شرکت پارس اور خریداری گردید. همچنین، مواد نانو بنتونیت و نانو سیلیکا از شرکت معتبر پیشگامان نانو مواد ایرانیان با درجه خلوص ۹۹/۵ درصد ساخت شرکت امریکایی US Nano (us3437)تهیه شد.



شکل ۱. تصاویر SEM از نانو بنتونیت

Fig 1. The SEM images of nano-bentonite

شکل ۲. تصاویر TEM از نانو سیلیکا

Fig 2. The TEM images of nano-silica

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های شیمیایی زغال زیستی مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Several chemical characteristics of the biochar used in this study

ویژگی‌ها Characteristics	بیوچار پوست انار Pomegranate peel biochar
ظرفیت تبادل کاتیونی Cation Exchange Capacity (CEC)	63.42 cmol/kg
اسیدیته pH	9.8
سطح ویژه Specific Surface Area	18.1 m^2/g

اعمال تیمار

به‌منظور بررسی تأثیر مواد اصلاحی معدنی و آلی نانو و غیر نانو بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک شور مورد مطالعه بعد از نمونه‌برداری و یکنواخت نمودن خاک مورد مطالعه (شکل ۲)، نمونه‌های خاک بعد اعمال تیمار با غلظت ۴ گرم در لیتر سوسپانسیون ترکیبات بیوچار و نانو بیوچار، نانوبنتونیت و زئولیت و میکرو سیلیس و نانو سیلیس نمونه‌ها به‌طور جداگانه در قالب طرح کاملاً تصادفی در ستونی‌های از جنس پلی اتیلن با ارتفاع و قطر ۳۵ و ۱۰ سانتی‌متر در سه تکرار قرار داده شدند. به‌منظور تثبیت شرایط خاک، به‌مدت ۱۰۰ روز در شرایط خشک وتر شدن در محدوده ظرفیت زراعی و ۵۰ درصد آن در آزمایشگاه آب و خاک دانشگاه هرمزگان در دمای ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

تجزیه آزمایشگاهی

بعد از گذشت دوره استراحت ۱۰۰ روزه به‌منظور تأثیر مواد اصلاحی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، نمونه‌برداری از تیمارهای مورد نظر به آهستگی و کمترین دست‌خوردگی انجام شد. سپس نمونه‌ها در معرض هوا آزاد قرار گرفتند و به‌صورت طبیعی خشک شدند. در ادامه جهت تعیین تغییرات در خصوصیات فیزیکی خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از روش کلوخه (Grossman and Reinsch, 2002)، اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت الک خشک وتر، خاک‌های هوا خشک شده از الک ۴ میلی‌متری عبور داده و از خاکدانه‌های باقی‌مانده بین الک ۴ و ۸ میلی‌متری برای اندازه‌گیری MWD_{wet} و MWD_{dry}[1] از سری الک‌های با قطر ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد و بر اساس فرمول محاسبه شد (Kemper and Rosenau, 1986). و برای الک‌تر خاکدانه‌های باقیمانده روی هر الک در آون در دمای ۱۰۵ درجه خشک و بعد از وزن کردن و تصحیح شن بر اساس رابطه (۱) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت‌تر محاسبه شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^{k} W_i \bar{x}_i \quad (۱)$$

$\bar{X}_i$: میانگین قطر منافذ دو الک متوالی

W_i: مانده روی هر الک به جرم کل خاک‌نسبت جرم توده خاک باقی

بر اساس اندازه گیری پارامتر MWD در حالت خشک وتر (Kemper and Rosenau, 1986) پارامتر دیگر مورد ارزیابی شاخص پایداری در آب (WSI[2]) که از درصد نسبت MWDwet به MWDdry تعیین شد که هر چه به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد خاکدانه‌ها پایدارتر و کمتر از ۵۰ درصد بسیار ناپایدار و مستعد فرسایش است.

در این پژوهش، مقدار ظرفیت آب قابل‌استفاده توسط گیاه[3] با تعیین محتوای رطوبتی نمونه‌های خاک در دو سطح فشار ماتریکی استاندارد ۳۳۰- هکتوپاسکال ظرفیت زراعی و ۱۵،۰۰۰- هکتوپاسکال نقطه پژمردگی دائمی[4] به‌دست آمد (Flury and Bittelli, 2009). برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت در سطح ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم از دستگاه صفحه فشاری (Klute, 1986) مجهز به غشای سرامیکی متخلخل استفاده شد. این دستگاه امکان اعمال فشارهای کنترل‌شده بر روی نمونه‌های خاک را فراهم کرده و تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک را در شرایط آزمایشگاهی ممکن می‌سازد. تفاوت بین مقدار رطوبت اندازه‌گیری‌شده در دو سطح مکش فوق‌الذکر، معیاری مناسب برای ارزیابی آب قابل دسترسی گیاهی در خاک مطالعه‌شده به‌شمار می‌رود.

تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل آماری داده‌ها و مقایسه میانگین‌های حاصل از آزمایش‌ها، ابتدا از روش تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده شد. سپس، جهت تعیین اختلاف معنی‌دار بین تیمارها، آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد به کار گرفته شد. تمامی محاسبات و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ انجام پذیرفت.

نتایج

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که کاربرد مواد اصلاحی معدنی، آلی، نانو و معمولی اثر معناداری (در سطح ۱٪) بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک داشته است. این مواد اصلاحی باعث بهبود میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شرایط خشک و مرطوب، افزایش شاخص پایداری خاکدانه[5]، و بهینه‌سازی پارامترهای رطوبتی خاک شامل ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس

1. Mean Weight Diameter.

2. Water stability index
3. Available Water Capacity
4. PWP
5. Water Stability Index

شده‌اند. علاوه بر این، جرم مخصوص ظاهری خاک نیز تحت تأثیر قرار گرفته و به‌سمت مقادیر مطلوب‌تری حرکت کرده است. این یافته‌ها بیانگر نقش مؤثر این مواد اصلاحی در ارتقای کیفیت ساختاری خاک، افزایش پایداری خاکدانه‌ها و بهبود روابط آب-خاک است.

جدول ۳. تجزیه واریانس میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک

Table 3. Analysis of variance of measured soil properties

منابع تغییر Sources of variations	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (Mean squares)						
		MWDdry میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک	MWD_{wet} میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت‌تر	WSI شاخص پایداری در آب	FC ظرفیت زراعی	PWP نقطه پژمردگی دائم	AWC ظرفیت آب قابل دسترس	BD جرم مخصوص ظاهری
تیمار treatment	6	0.162**	0.735**	231.565**	1.856**	0.128**	2.152**	0.062**
خطا (Error)	14	0.001	0.003	0.984	0.004	0.001	0.018	0.001
ضریب تغییرات CV (%)		0.846	2.024	1.566	0.27	0.425	0.83	1.904

**, *, ns به ترتیب غیر معنیدار و معنیدار در سطح ۵ و ۱ درصد

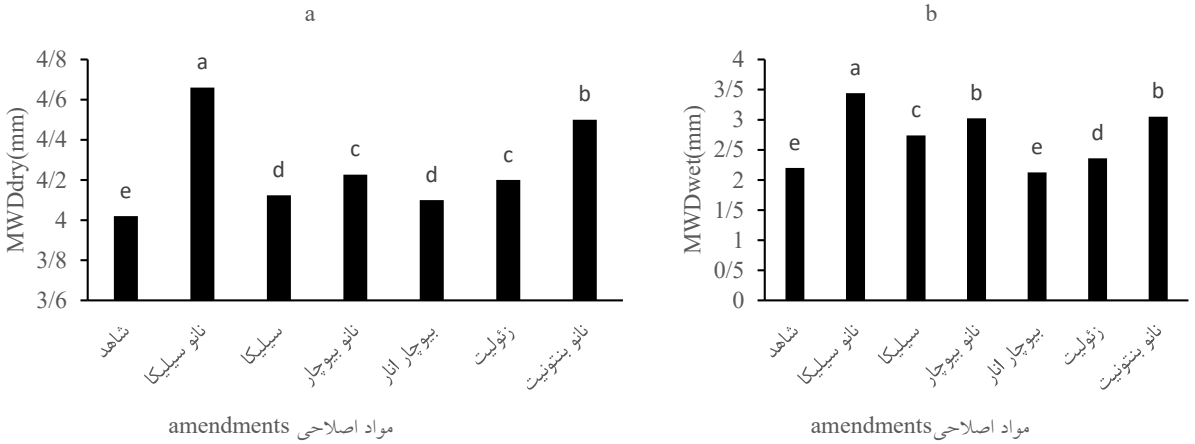
ns, *, **: non significant and significant at P <0.05 and P <0.01, respectively.

تأثیر مواد اصلاحی بر MWD در حالت خشک و مرطوب

نتایج آزمون دانکن نشان داد که کاربرد مواد اصلاحی نانو و غیر نانو، شامل سیلیس، بیوچار، زئولیت و نانو بنتونیت، در خاک موجب افزایش معنادار شاخص MWDdry در مقایسه با تیمار شاهد شد (شکل ۳). این بهبود بیانگر ارتقای قابل‌توجه پایداری ساختمان خاک در شرایط خشک است. بااین‌حال، بررسی وضعیت خاکدانه‌ها در شرایط مرطوب (MWDwet) نشان داد که تمامی تیمارها به‌جز بیوچار معمولی انار، موجب افزایش معنادار این شاخص شدند. این یافته‌ها بیانگر آن است که بیوچار معمولی در شرایط رطوبتی تأثیر محسوسی بر ثبات خاکدانه‌ها ندارد، درحالی‌که سایر اصلاح‌کننده‌ها، از جمله نانو سیلیس، بیوچار نانو، زئولیت و نانو بنتونیت، پایداری خاکدانه‌ها را در محیط مرطوب بهبود بخشیده است. نانو سیلیس برترین عملکرد را در افزایش هر دو شاخص MWD_{dry} و MWD_{wet} نشان داد که بیانگر نقش مؤثر این ماده در تقویت ساختار خاک است. این برتری احتمالاً ناشی از اندازه نانومتری ذرات و ظرفیت بالای آن در ایجاد پیوندهای فیزیکی - شیمیایی بین ذرات خاک است که منجر به تشکیل خاکدانه‌های بزرگ‌تر و مقاوم‌تر در برابر تخریب می‌شود. از طرف دیگر، مقایسه بین شکل نانو و معمولی بیوچار، نانوبنتونیت و زئولیت نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار در سطح ۵ درصد برای شکل نانو نسبت به‌شکل معمولی این مواد بود. این افزایش در مورد نانوبیوچار ۴۲ درصد و در مورد نانوبنتونیت ۲۴ درصد گزارش شد.

مقایسه مواد نانو و غیر نانو در سه گروه رس‌ها، مواد معدنی و آلی نیز نشان داده که فرمولاسیون‌های نانو به‌ویژه نانو سیلیس، به‌دلیل سطح ویژه بالا و اندازه ذرات ریزتر، تأثیر چشمگیری در افزایش MWD داشتند. در میان گروه‌های مختلف، اکسید سیلیسیم بیشترین تأثیر را بر پایداری خاکدانه‌ها نشان داد، درحالی‌که گروه آلی (بیوچار نانو و معمولی) و رس‌ها (نانو بنتونیت و زئولیت) نیز مقادیر قابل‌توجهی از بهبود را ایجاد کردند، هرچند از سیلیس کمتر است. به نظر می‌رسد مواد اصلاح‌کننده دلیل افزایش قطر خاکدانه به‌عنوان شاخصی از بهبود ساختمان خاک، را می‌توان به کربن آلی بیوچار نسبت داد. کربن آلی به‌عنوان عامل پیونددهنده ذرات عمل کرده و در نتیجه سبب ایجاد خاکدانه‌هایی با میانگین وزنی قطر بیشتر می‌شود (Dong et al., 2016) . Yang et al., 2016 نیز بیان کردند که بیوچار به‌علت کربن زیاد موجب تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها به‌طرز چشمگیری شده است. همچنین بیوچار به‌دلیل داشتن ساختار متخلخل، شبکه منافذ و ساختمان خاک را باگذشت مدت‌زمان پس از کاربردش تقویت می‌کند و بر جریان آب‌وهوا تأثیر می‌گذارد. نتایج تحقیقات Kumar et al., 2021 نیز نشان داد که افزودن بیوچار به خاک، از طریق تسهیل اتصال ذرات خاک، منجر به افزایش جرم و حجم خاکدانه‌ها شده و در نتیجه مقاومت برشی خاک در برابر تنش‌های مکانیکی افزایش می‌یابد. می‌توان اظهار داشت که بیوچار حتی در صورت استفاده به مقدار کم، قادر

است پیوندهای مؤثری با ذرات خاک، به‌ویژه در خاک‌های دارای درصد شن بالاتر، ایجاد کند. بااین‌حال، تأثیر بیوچار بر افزایش قطر خاکدانه‌ها تحت‌تأثیر عوامل مختلفی مانند بافت خاک، میزان کاربرد بیوچار و دوره زمانی گذشته از زمان کاربرد آن قرار دارد در مطالعه‌ای انجام‌شده توسط Liu et al., 2012 گزارش شد که بیوچار می‌تواند به‌طور معنی‌داری قطر خاکدانه‌ها را در خاک‌هایی با درصد شن بیشتر افزایش دهد. این یافته نشان می‌دهد که خاک‌های دارای درصد شن بالاتر ممکن است نیازمند مقدار بیشتری بیوچار برای ایجاد تغییرات قابل‌توجه در اندازه خاکدانه‌ها باشند و در خاک‌های با شن زیاد تا سطح یک درصد بیوچار سبب افزایش قطر خاکدانه شده است (Liu et al., 2018). همچنین نتایج تحقیقات نشان داده است که ذرات بیوچار می‌تواند مقدار قطر خاکدانه را در طولانی‌مدت بهبود دهد. به‌این‌علت که ذرات بیوچار در طولانی‌مدت اکسید شده و با ذرات خاک واکنش داده و موجب افزایش مقدار قطر خاکدانه می‌شود (Joseph et al., 2010). بررسی مشابه دیگری در رابطه با اثر نانوذرات اکسید آلومینیم و سیلیسم بر خاک لوم سیلتی نشان داده نانوذرات اکسید سیلیس و آلومینیم با بهبود شرایط خاک میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک و مرطوب افزایش داده است (Moradi et al., 2016) که این نتایج با یافته‌های حاصل از این تحقیق در خاک با بافت لومی شور همخوانی داشته است که نشان‌دهنده اثر ترکیبات اصلاحی در شرایط مختلف شوری و بافتی خاک است.



شکل ۳. اثر نوع مواد اصلاحی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه خشک و مرطوب

Fig 3. Effects of type of amendment materials on MWD_{dry} (a), and MWD_{wet}.(b)

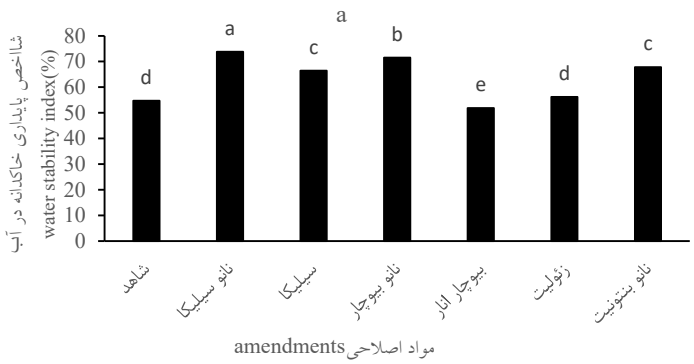
مقادیر دارای حروف مشترک از نظر آماری در سطح ۵ درصد اختلافی ندارند.

Values that have the same letters are not statistically different at P <0.05.

تأثیر مواد اصلاحی بر شاخص پایداری خاکدانه در آب

بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، کاربرد مواد اصلاحی سیلیس نانو و میکرو، نانو بیوچار، زئولیت و نانو بنتونیت منجر به افزایش شاخص پایداری خاک نسبت به تیمار شاهد شدند (شکل ۴). این افزایش در مورد سیلیس نانو، نانو بیوچار و نانو بنتونیت در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود؛ در حالی که در تیمار بیوچار معمولی، کمترین مقدار شاخص پایداری مشاهده شد که از لحاظ آماری نیز با تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری داشت. همچنین، بیشترین مقدار شاخص پایداری خاک مربوط به تیمار حاوی نانوسیلیس بود. که افزایش ۳۵ درصد نسبت به شاهد نشان داده است. نتایج همچنین نشان داد که مواد نانو در مقایسه با فرم معمولی خود، تأثیر بیشتری بر بهبود شاخص پایداری خاک داشته‌اند. به نظر می‌رسد که نانو سیلیکا در حالت سوسپانسیون به‌دلیل داشتن ویسکوزیته نزدیک به آب، قابلیت نفوذ و حرکت در منافذ ریز خاک را داشته و قادر است به سطوح عمیق‌تری از خاک نفوذ کند. در نهایت، این ذرات در واکنش با یون‌های کلسیم موجود در محیط خاک، تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) داده و منجر به ایجاد پیوندهای قوی بین ذرات خاک و افزایش مقاومت مکانیکی و پایداری خاک می‌شوند. بنابراین، نانو سیلیکا به‌عنوان یکی از مواد اصلاحی نوین و مؤثر در زمینه بهسازی خاک‌های رسی و شنی مطرح است. این ماده نه‌تنها باعث بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود، بلکه به‌عنوان یک افزودنی سازگار با محیط‌زیست

نیز شناخته می‌شود (Safargholi Tabar Marzooni et al., 2021). در مطالعه حاضر نانوبنتونیت موجب افزایش ۲۴ درصدی پایداری خاکدانه‌ها در مقایسه با شاهد شده است، که نشان‌دهنده بهبود ساختمان خاک و افزایش پایداری شده است، می‌توان گفت ماده معدنی بنتونیت به‌عنوان یک عامل چسبنده سبب چسبندگی بیشتر ذرات در سطح خاک و افزایش پایداری خاکدانه‌های سطحی شده است (Barari Shahidani et al., 2024). نکته قابل تأمل اینکه بیوچار معمولی بر خلاف سایر پژوهش‌های انجام شده در کاربرد بیوچار در پایداری خاک شور سدیمی مربوطه اثر منفی داشته و مقدار پایداری خاکدانه در آب را کاهش داده همان‌طور که مقدار MWDwet کاهش داده است که برای فهم دقیق این مطلب نیاز به بررسی‌های تخصصی بیشتری دارد با این حال می‌توان احتمال داد به‌علت بالا بودن غلظت سدیم افزودن بیوچار تعادل کاتیونی در خاک مربوطه به هم زده و باعث پراکنده شدن رس و تخریب خاک شده است. بیوچار موجب افزایش pH، قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، ظرفیت تبادل کاتیونی و بازه ای تبادلی می‌گردد. که موجب بر هم زدن عادل یونی در آن شد و بر تخریب خاک می‌تواند اثرگذار باشد (Khadem et al., 2017)



شکل ۴. اثر نوع مواد اصلاحی بر مقدار شاخص پایداری خاکدانه در آب

Fig 4. Effects of type of amendment materials on water stability index (WSI)

مقادیر دارای حروف مشترک از نظر آماری در سطح ۵ درصد اختلافی ندارند.

Values that have the same letters do not have a statistically significant difference at P <0.05.

تأثیر مواد اصلاحی بر جرم مخصوص ظاهری خاک

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن مواد اصلاح‌کننده به خاک شور مورد مطالعه در تمام تیمارهای مورد بررسی منجر به کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری خاک نسبت به نمونه شاهد (۱/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) شده است (شکل ۵). کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری مربوط به تیمار نانوسیلیس (۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) دست آمد. مقایسه بین مواد نانو و غیر نانو نیز روشنگر اثر مؤثرتر مواد نانو در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری بود. این یافته‌ها نقش قابل توجه نانو مواد را در اصلاح ساختار خاک‌های شور تأیید می‌کند. کاهش مشاهده شده در جرم مخصوص ظاهری خاک پس از اعمال مواد اصلاحی، ناشی از بازسازی ساختار تخریب‌یافته خاک شور تحت تأثیر این مواد است. براساس نتایج حاصل از مطالعات، ترکیبات مورد آزمون با افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شرایط خشک و مرطوب (به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴) و همچنین بهبود شاخص پایداری خاکدانه‌ها، سبب تشکیل خاکدانه‌های درشت‌تر و پایدارتری شده‌اند. این بهبود در ساختار خاک، علاوه بر کاهش جرم مخصوص ظاهری، منجر به افزایش تخلخل خاک شده و در بلندمدت می‌تواند به‌طور غیرمستقیم عملکرد هیدرولوژیکی خاک و شرایط رشد گیاهی را بهبود بخشد. همچنین، بررسی‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که ترکیبات نانو از طریق بهبود وضعیت منافذ و ساختار خاک، موجب کاهش بیشتر جرم مخصوص ظاهری نسبت به مواد غیرنانو می‌شوند (El-Aziz et al., 2025). در زمینه مطالعه اثر نانوبیوچار هسته و ساقه خرما در یک خاک شنی نشان داده که کاربرد نانوبیوچار سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک مربوطه شده است (Abbasnasab et al., 2025) که این یافته‌ها با نتایج حاضر همسویی مناسبی دارد و تأییدی بر اثر مثبت نانو مواد در اصلاح خصوصیات فیزیکی خاک‌های شور است.

شکل ۵. اثر نوع مواد اصلاحی بر مقدار جرم مخصوص ظاهری

Fig 5. Effects of type of amendment materials on bulk density

مقادیر دارای حروف مشترک از نظر آماری در سطح ۵ درصد اختلافی ندارند.

Values that have same letters do not have statistically difference at P <0.05.

تأثیر مواد اصلاحی بر ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم خاک

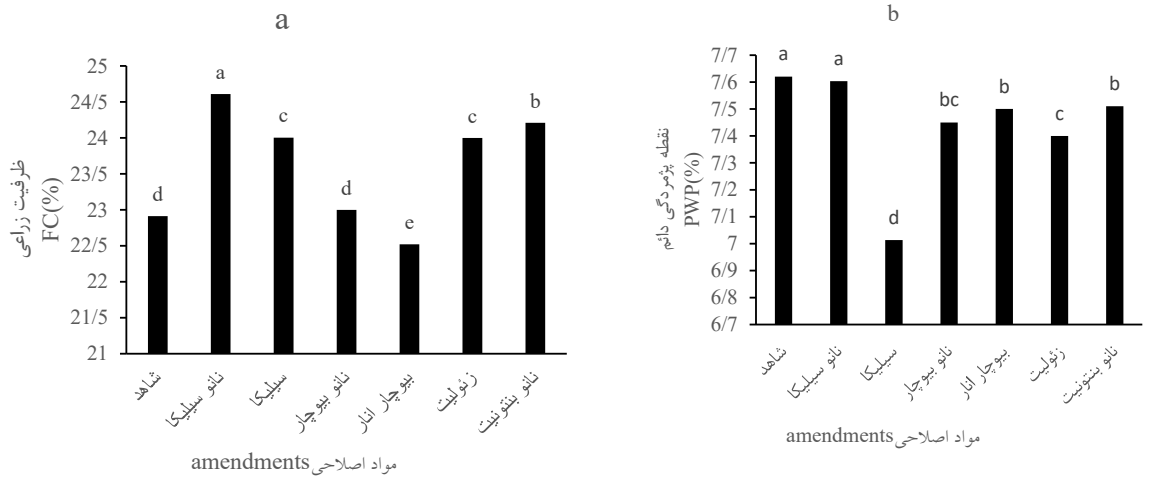
نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن مواد اصلاحی نانو و غیر نانو به خاک لومی شور، به‌جز تیمار حاوی بیوچار، سبب افزایش معنی‌دار ظرفیت زراعی در سطح ۵٪ نسبت به تیمار شاهد شده است (شکل ۶). بیشترین مقدار ظرفیت زراعی مربوط به نانو سیلیس (۲۴/۶۱ درصد) و کمترین مقدار مربوط به بیوچار معمولی (۲۲/۳۱ درصد) بود. مقایسه تیمارهای نانو و غیر نانو نشان داد که مواد نانو ظرفیت زراعی بالاتری ایجاد کرده‌اند. همچنین، ترکیبات اکسید سیلیس نسبت به ترکیبات رسی و آلی اثرگذاری بیشتری بر افزایش ظرفیت زراعی داشته‌اند. این یافته‌ها اهمیت انتخاب نوع و خصوصیات مواد اصلاحی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های شور را به‌خوبی برجسته می‌کند. مطالعه حاضر در این زمینه نشان داده که مواد نانو، به‌ویژه نانو سیلیس، عملکرد بهتری در بهبود ظرفیت زراعی خاک داشته این یافته‌ها بر اهمیت استفاده از فناوری نانو در مدیریت خاک‌های شور تأکید دارند.

افزودن مواد اصلاح‌کننده مانند نانو اکسید سیلیسیم، سیلیسیم معمولی، بنتونیت، زئولیت و نانو بیوچار موجب افزایش درصد رطوبت ظرفیت زراعی می‌شود که عمدتاً ناشی از بهبود ساختار خاک و افزایش تخلخل است. این مواد با ایجاد خاکدانه‌های پایدارتر و درشت‌تر، شبکه‌ای از منافذ متصل‌به‌هم را تشکیل داده و ظرفیت نگهداری آب در خاک را بهبود می‌بخشند (Liu et al., 2019). به‌ویژه، نانو اکسید سیلیسیم و سیلیسیم معمولی با تشکیل پیوندهای سیلیکاتی با ذرات رس، موجب افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شوند. در مقابل، بنتونیت و زئولیت به‌دلیل ساختار لایه‌ای خود، قابلیت جذب و نگهداری آب در بین لایه‌ها را دارند (Zhang et al., 2020). همچنین، نانو بیوچار به‌دلیل سطح ویژه بالا و تخلخل‌های متعدد، نقش چشمگیری در افزایش قابلیت جذب آب ایفا می‌کند.(Lehmann et al., 2011)

این بهبود در ساختار خاک با کاهش چگالی ظاهری، افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شرایط خشک و مرطوب و تقویت شاخص پایداری خاکدانه‌ها همراه است که همگی به افزایش ظرفیت نگهداری آب کمک می‌کنند. در مقابل، بیوچار معمولی به‌دلیل اندازه ذرات بزرگ‌تر و تخلخل کمتر، تأثیر ضعیف‌تری در افزایش پایداری خاک داشته و در نتیجه، قابلیت نگهداری آب را نسبت به سایر مواد اصلاح‌کننده کمتر افزایش می‌دهد (Spokas et al., 2012). در مجموع، تفاوت در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد اصلاح‌کننده نقش مهمی در بهبود رطوبت ظرفیت زراعی و عملکرد هیدرولوژیکی خاک دارد و استفاده صحیح از این مواد می‌تواند کیفیت و پایداری خاک را به‌طور قابل توجهی ارتقا دهد.

افزودن مواد اصلاحی به خاک، مقدار نقطه پژمردگی دائم را به‌طورکلی کاهش داد، هرچند تغییرات در این پارامتر متفاوت بود. بیشترین مقدار نقطه پژمردگی دائم مربوط به تیمار شاهد و نانو اکسید سیلیسیم بود که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین آنها مشاهده نشد. کمترین مقدار نقطه پژمردگی دائم نیز مربوط به تیمار سیلیس معمولی بود که با سایر تیمارها در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار نشان داد (شکل ۶). قابل‌توجه است که در بیوچار، شکل معمولی مقدار نقطه پژمردگی دائم بیشتری نسبت به‌شکل نانو بیوچار داش که نشان‌دهنده ناهمگن ذرات درشت‌تر است. همچنین، مواد نانو سیلیس و نانو بنتونیت نسبت به‌شکل غیر نانوی ترکیبات

معدنی و رسی، رطوبت بیشتری حفظ کردند. در مجموع، از نظر عددی، تفاوت بین تیمارها کمتر از ۱ درصد بود که نشان‌دهنده تأثیر ناچیز مواد اصلاحی بر مقدار نقطه پژمردگی دائم است، هرچند از نظر آماری تفاوت معنی‌دار وجود داشت. ترکیبات نانو به‌علت اندازه منافذ کوچک‌تر نانوذرات، سطح ویژه بزرگ‌تری را فراهم می‌کند و آنها را قادر می‌سازد آب بیشتری را نگه دارند و در افزایش و نگهداری آب خاک مؤثرتر باشند (Li et al., 2007). بررسی انجام شده در رابطه با ترکیبات سلیکا نشان داده که کاربرد ترکیب نانو سیلیکا سبب افزایش ظرفیت زراعی و کاهش نقطه پژمردگی دائم در خاک شده است (El-Aziz et al., 2025) که با نتایج حاصل این بررسی همخوانی داشته است.



شکل ۶. اثر نوع مواد اصلاحی بر مقدار ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم

Fig 6. Effects of type of amendment materials on field capcity (FC) (a) and Permanent Wilting Point (PWP) (b)

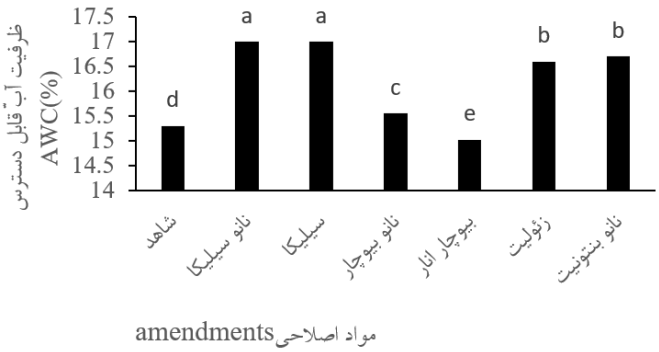
مقادیر دارای حروف مشترک از نظر آماری در سطح ۵ درصد اختلافی ندارند.

Values that have same letters do not have statistically difference at P <0.05.

تأثیر مواد اصلاحی بر آب قابل‌دسترس خاک (AWC)

نتایج داده‌ها نشان دادند که افزودن مواد اصلاحی نانو و غیر نانو (به‌استثنای بیوچار معمولی) در سایر تیمارها، سبب افزایش معنی‌دار رطوبت قابل‌دسترس در خاک شور شده است (شکل ۷). در این میان، بیشترین مقدار رطوبت قابل‌دسترس مربوط به تیمارهای نانو و غیر نانو سیلیس بود که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها نشان دادند. در مرحله بعد، تیمارهای نانو بنتونیت و زئولیت مقادیر بالایی از رطوبت قابل‌دسترس را به خود اختصاص دادند. همچنین، در مورد بیوچار، نانو بیوچار رطوبت قابل‌دسترس بیشتری نسبت به‌شکل معمولی آن نشان داد. در مجموع، تیمارهای نانو در این پارامتر نیز اثرگذاری بیشتری نسبت به مواد غیر نانو داشتند؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار آب قابل‌دسترس مربوط به تیمار بیوچار معمولی بود. لازم به ذکر است، مطالعات مشابه قبلی در خصوص کاربرد بیوچار در خاک‌های شور گزارش کرده‌اند که این ماده می‌تواند سبب افزایش معنی‌دار آب قابل‌دسترس در خاک شود (Zhang et al, 2021). که این یافته با نتایج حاصل از این پژوهش مغایرت دارد. به نظر می‌رسد که نوع بیوچار و نوع خاک نقش مؤثری در این اتفاق داشته که در مطالعه حاضر بیوچار معمولی دارای ذرات درشت‌تر نسبت به نانو و داری اسیدیته بالاتر داشته و از طرفی خاک مورد مطالعه هم پی اچ قلیایی داشته به‌عنوان خاک سدیمی عمل کرده و باعث پرکنده کردن ذرات رس موجود در خاک شده و پارامترهای MWD خشک (شکل 3 a)، شاخص پایداری خاکدانه (شکل ۲) و ظرفیت زراعی (شکل 6 a) کاهش داده و از طرفی نقطه پژمردگی دائم و جرم مخصوص ظاهری (شکل‌های 6 b و ۵) افزایش داده که سبب کاهش سبب کاهش منافذ و خاکدانه‌های پایدار شده در نتیجه کاهش آب قابل دسترس گیاه شده است از طرفی، با کاهش اندازه ذرات از حالت معمولی به نانو، مقدار آب قابل دسترس در خاک افزایش یافته‌است. در همین راستا، مطالعات مشابهی نیز در خصوص کاربرد بیوچار با اندازه‌های مختلف در خاک‌های با بافت لوم سیلتی انجام شده که نشان داده است با کاهش اندازه ذرات بیوچار، رطوبت قابل استفاده خاک به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2021). در

رابطه با ترکیبات نانو و معمولی سیلیس نیز مطالعات برخی از پژوهشگران حاکی از آن است که استفاده از این ترکیبات می‌تواند به‌طور قابل توجهی موجب افزایش آب قابل استفاده خاک شود. این امر عمدتاً ناشی از افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود خصوصیات فیزیکی خاک در حضور ذرات نانو است (El-Aziz et al., 2025).



شکل ۷. اثر نوع مواد اصلاحی بر مقدار ظرفیت آب قابل دسترس

Fig 7. Effects of type of amendment materials on Available water capacity (AWC)

مقادیر دارای حروف مشترک از نظر آماری در سطح ۵ درصد اختلافی ندارند.

Values that have same letters do not have statistically difference at P <0.05.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش ضمن بررسی تأثیر انواع مواد اصلاحی آلی، معدنی و نانو بر خواص فیزیکی و هیدرولیکی خاک لومی شور، نقش چشمگیر این مواد را در بهبود ساختمان خاک، افزایش پایداری خاکدانه‌ها و بهینه‌سازی تعادل آب-خاک نشان داد. یافته‌ها نشان داده که استفاده از این مواد موجب بهبود معنی‌دار شاخص‌هایی چون قطر متوسط وزنی خاکدانه، شاخص پایداری خاکدانه)، ظرفیت زراعی، و مقدار آب قابل دسترس شده و در عین حال، منجر به کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک گردید. در میان مواد مورد استفاده، نانوسیلیس برجسته‌ترین عملکرد را داشت. این ماده با اندازه ذرات بسیار ریز، سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری مناسب، به‌خوبی توانست اتصالات قوی بین ذرات خاک را ایجاد کند و منجر به تشکیل خاکدانه‌های مقاوم‌تر و پایدارتری شود. همچنین، نانوسیلیس با بهبود شبکه منافذ خاک، ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش داد و به‌طور مؤثری در بهینه‌سازی وضعیت رطوبتی خاک نقش داشت. این موضوع از اهمیت ویژه‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک برخوردار است که بهره‌برداری بهینه از منابع آبی و حفظ رطوبت خاک یکی از چالش‌های اصلی مدیریت کشاورزی است. مواد دیگر مانند نانوبنتونیت و زئولیت نیز به‌دلیل ساختار لایه‌ای و ظرفیت جذب بالای خود، تأثیرات مثبتی در افزایش نگهداری آب و بهبود ساختمان خاک ایجاد کردند. اما عملکرد آنها در مقایسه با نانوسیلیس کمتر بود. بیوچار نیز در فرم نانویی خود، اثرات قابل توجه‌تری نسبت به‌شکل معمولی خود داشت؛ این موضوع نشان از اهمیت اندازه ذرات و سطح تماس مواد اصلاحی با ذرات خاک دارد. با این حال، مشخص شد که بیوچار معمولی در خاک‌های شور با pH قلیایی ممکن است تأثیر منفی بر برخی خصوصیات خاک داشته‌باشد، که نشان از ضرورت انتخاب دقیق و متناسب مواد اصلاحی با شرایط خاص خاک دارد. یکی دیگر از یافته‌های مهم این پژوهش، کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک در حضور مواد نانویی بود. این کاهش نشان از بهبود تخلخل و بازسازی ساختار خاک دارد که می‌تواند در بلندمدت منجر به افزایش نفوذپذیری آب، کاهش رواناب، بهبود شرایط رشد ریشه و در نتیجه افزایش بهره‌وری کشاورزی شود.

به‌طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان دادند که استفاده از فناوری نانو، به‌ویژه نانوسیلیس، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار نوآورانه و پایدار در مدیریت خاک‌های شور مطرح شود. این مواد قادرند ضمن بهبود خواص فیزیکی و هیدرولیکی خاک، به کاهش فرسایش، افزایش راندمان مصرف آب و بهبود حاصل‌خیزی خاک کمک کنند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در برنامه‌های توسعه کشاورزی پایدار و مدیریت منابع خاک و آب، استفاده از مواد اصلاحی نانویی به‌ویژه نانوسیلیس به‌عنوان یک ابزار نوین با توجه به ملاحظات و بررسی‌های بیشتر مورد توجه قرار گیرد و زمینه‌های لازم برای گسترش کاربرد آن‌ها در عملیات اصلاح خاک فراهم شود.

منابع

Abbasnasab, Z., Moradi, N., Esmaeilpour, Y., Gholami, H., & Biniaz, M. (2025). Investigation of the effect of nano-scale and organic polymer amendments on some sandy soil properties. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, *32*(1), 91-107 (In Persian). https://doi.org.ir/10.22092/ijrdr2025.133487.

Al-Tawaha, A. R. M., Samarah, N., Ranga, A. D., Darvhankar, M. S., Saranraj, P., Pour-Aboughadareh, A.,... & Al-Taey, D. K. (2021). Soil Salinity and Climate Change. In *Sustainable Soil and Land Management and Climate Change* (pp. 83-93). CRC Press. http://dx.doi.org/10.1007/s42729-021-00481-5

Azarmi-Atajan, F. (2024). Isolation of Salinity and Drought-Tolerant Bacteria from the Rhizosphere of Plants Province Area Using Remote Sensing Technique. *Journal of Drought and Climate Change Research*, *2*(3), 85-96 (In Persian). https://doi.org.ir/Doi:10.22077/jdcr.2024.8513.1091

Bameri, M., khormali, F., & kheirabadi, H. (2021). Effect of Bentonite Clay and Slope on Sediment Concentration and Some Hydraulic Characteristics of Flow in the Loess Soil. *Agricultural Engineering*, *44*(2), 159-174 (In Persian). https://doi.org.ir/10.22055/agen.2021.30253.1499.

Barari Shahidani, Z., Gholami, L., & Kavian, A. (2024). Effect of Bentonite Mineral Conditioner on Soil Surface Aggregates Stability. *Watershed Management Research*, *37*(3), 128-143 (In Persian). https://doi.org.ir/10.22092/wmrj.2024.364343.1561

Basak, N., Rai, A. K., Barman, A., Mandal, S., Sundha, P., Bedwal, S.,... & Sharma, P. C. (2022). Salt-affected soils: Global perspectives. In *Soil health and environmental sustainability: Application of geospatial technology* (pp. 107-129). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09270-1_6

Bian, H., Boguta, P., Huang, J., Deng, C., Kong, D., Zhou, H., & Su, X. (2024). management: embracing humification for sustainable resource recovery. *ACS Sustainable Resource Management*, *1*(2), 181-198. https://doi.org.ir/10.1021/acssusresmgt.3c00080

Bittelli, M., & Flury, M. (2009). Errors in water retention curves determined with pressure plates and their effect on soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*. *73*(5), 1453–1460. https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0082.

Dong, X., Guan, T., Li, G., Lin, Q., & Zhao, X. (2016). Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions. *Journal of Soils and Aediments*, *16*(5), 1481-1497. https://doi.org.ir/10.1007/s11368-015-1338-5

El-Aziz, M. A. A., Elbagory, M., Arafat, A. A., Aboelsoud, H. M., El-Nahrawy, S., Khalifa, T. H., & Omara, A. E. D. (2025). Evaluating the impact of nano-silica and silica hydrogel amendments on soil

Jin, Q., & Zhang, J. (2019). Salinity stress in arid and semi-arid climates: Effects and management in field crops. In *Climate change and agriculture*. IntechOpen. https://doi.org.ir/10.5772/intechopen87982

Joseph, S. D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C. H., Hook, J.,... & Amonette, J. E. (2010). An investigation into the reactions of biochar in soil. *Soil Research*, *48*(7), 501-515 https://doi.org.ir/10.1071/SR10009

Khadem, A., Raiesi, F., & Besharati, H. (2017). A Review of Biochar Effects on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Land Management Journal*, *5*(1), 13-30 (In Persian). https://doi.org.ir/10.22092/lmj2017.113291

Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 425-442. https://doi.org.ir/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17

Khatoon, H., Solanki, P., Narayan, M., Tewari, L., Rai, J. P. N., & Hina Khatoon, C. (2017). Role of microbes in organic carbon decomposition and maintenance of the soil ecosystem. *International Journal of Chemical Studies*, *5*(6), 1648-1656. http://dx.doi.org/10.1007/s42729-021-00481-5

Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed. *American Society of Agronomy*, Madison, Wisconsin, pp. 635–662. https://doi.org.ir/10.2136/water retention and crop yield in rice and clover under variable irrigation conditions. *Agronomy, 15*(3), 652. https://doi.org.ir/10.3390/agronomy15030652

Fouladidorhani, M., shayannejad, M., Shariatmadari, H., & Mosaddeghi, M. R. (2022). Application of different organic residues and their biochars for amending a saline-sodic soil. *Iranian Water Research Journal*, *16*(2), (In Persian). https://doi.org.ir/10.22034/iwrj.2022.13797.2387

Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 383-411.

Gholami, A., Tahmasebi Shamansouri, M., Babaeinejad. T., Payandeh, K., & Goosheh, M. (2023). Distribution of Soil Salt and Pollution of Nitrate and Boron of Different Depths Affecting Wheat and Rice Yields in the Khuzestan province. *Journal of Drought and Climate Change Research*, *1*(3), 105-124 (In Persian). https://doi.org.ir/10.22077/jdcr.2023.6523.1030

Dane, J. H., & Topp, C. G. (Eds.). (2020). Methods of soil analysis, Part 4: Physical methods. John Wiley & Sons.

Guo, L., Nie, Z., Zhou, J., Zhang, S., An, F., Zhang, L.,... & Wang, Z. (2022). Effects of different organic amendments on soil improvement, bacterial composition, and functional diversity in saline–sodic soil. *Agronomy*, *12*(10), 2294. https://doi.org.ir10.3390/agronomy12102294

Hussain, S., Shaukat, M., Ashraf, M., Zhu, C.,

Chemical Science Review and Letters. 9 (35), 777-785. https://doi.org.ir/10.37273/chesci.CS205108196

Majeed, A., & Muhammad, Z. (2019). Salinity: a major agricultural problem—causes, impacts on crop productivity, and management strategies. *Plant abiotic stress tolerance: Agronomic, molecular and biotechnological approaches*, 83-99. https://doi.org.ir/10.1007/978-3-030-06118-0_3

Miransari, M., & Smith, D. (2019). Sustainable wheat (*Triticum aestivum* L.) production in saline fields: a review. Crit Rev Biotechnol. 39(8):999-1014. https://doi.org.ir/10.1080/07388551.2019.1654973.

Moradi, N., Emami, H., Astraei, A.L., Fotovat, A., & Gharaman, B. (2016). The effect of nanoparticles of Aluminum oxide and Silicon oxide on soil structural stability indicators. *Journal of Water and Soil Conservation*, *23*(5), 253-265 (In Persian). https://doi.org.ir/10.22069/jwfst.2017.10568.2499

Moshtagh, R., Moradi, N., & Gholami, H.2022)). Investigation of the role of biochar from eggplant plant residues and shrimp waste on some soil stability characteristics. *Environmental Erosion Research*; 12 (1):1-17 (In Persian). https://doi.org.ir/10.22034/jdmal.2022.563479.1398

Mustafa, G., Akhtar, M. S., & Abdullah, R. (2019). Global concern for salinity in various agro-ecosystems. *Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Causes and Solutions: 1*, 1-19. https://doi.org.ir/10.1007/978-981-13-8801-9_1

sssabookser5.1.2ed.c26

Kumar, H., Huang, S., Mei, G., & Garg, A. (2021). Influence of feedstock type and particle size on efficiency of biochar in improving tensile crack resistance and shear strength in lean clayey soil. *International Journal of Damage Mechanics*, *30*(4), 646-661. http://dx.doi.org/10.1007/s42729-021-00481-5

Leogrande, R., & Vitti, C. (2019). Use of organic amendments to reclaim saline and sodic soils: a review. *Arid Land Research and Management*, *33*(1), 1-21. https://doi.org/10.1080/15324982.2018.1498038

Li, C., Gao, X., Li, S., & Bundschuh, J. (2020). A review of the distribution, sources, genesis, and environmental concerns of salinity in groundwater. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 41157-41174. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10354-6

Li, X., Li, Z., Xia, Q., & Xi, H. (2007). Effects of pore sizes of porous silica gels on desorption activation energy of water vapour. *Applied Thermal Engineering*, 27, 869–876. https://doi.org.ir/10.1016/j.applthermaleng.2006.09.010

Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C. A., Wahab, L. M., Gonnermann, H. M., & Nittrouer, J. A. (2018). Effect of freeze-thaw cycling on grain size of biochar. *PLoS One*, *13*(1), e0191246. https://doi.org.ir/10.1371/journal.pone.0191246

Louhar, G., Devi, S., and Dahiya, G. 2020. Zeolites: A potential source of soil amendments to improve soil properties.

Climate Change Research, *2*(3), 33-48 (In Persian). https://doi.org.ir/10.22077/jdcr.2024.7645.1069

Shekofteh H, Nabizadeh Rafsanjani A., & Jalali G. (2023). Effects of Biochar Derived from Various Feedstock Sources on Some Physical and Chemical Properties of Soil. *Environmental Erosion Research*. 13 (3):148-172 (In Persian). https://doi.org.ir/20.1001.1.22517812.1402.13.3.8.4

Singh, V. K., Malhi, G. S., Kaur, M., Singh, G., & Jatav, H. S. (2022). Use of organic soil amendments for improving soil ecosystem health and crop productivity. *Ecosystem Services*.

Wang, M., Zhao, Z., & Zhang, Y. (2021). Magnetite-containing biochar derived from Fenton sludge modulated the electron transfer of microorganisms in anaerobic digestion. *Journal of Hazardous Materials*, *403*, 123972. https://doi.org.ir/10.1016/j.jhazmat.2020.123972

Wu, L., Wang, Y., Zhang, S., Wei, W., Kuzyakov, Y., & Ding, X. (2021). Fertilization effects on microbial community composition and aggregate formation in saline-alkaline soil. *Plant and Soil*, *463*, 523-535. https://doi.org.ir/10.1007/s11104-021-04909-w

Xu, X., Guo, L., Wang, S., Wang, X., Ren, M., Zhao, P.,... & Lin, A. (2023). Effective strategies for reclamation of saline-alkali soil and response mechanisms of the soil-plant system. *Science of The Total Environment*, *905*, 167179. https://doi.org.ir/10.1016/j.scitotenv.2023.167179

Yang, F., Zhao, L., Gao, B., Xu, X., & Cao, X.

Naghman, R., Bhatti, M. T., Najabat, Z., Hyder, S., Rizvi, Z. F., Gondal, A. S.,... & Marc, R. A. (2023). Organic amendments: a natural way to suppress phytopathogens: a sustainable approach to go green. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *47*(5), 602-622. https://doi.org.ir/10.55730/1300-011X.3113

Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). Methods of Soil Analysis, Part 2, second edition, *American Society of Agronomy-Soil Science Society of America,* Madison, USA, 1159p.

Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017–1023. https://doi.org.ir/10.1093/jxb/erj108

Rengasamy, P., de Lacerda, C. F., & Gheyi, H. R. (2022). Salinity, sodicity, and alkalinity. In *Subsoil constraints for crop production* (pp. 83-107). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org.ir/10.1007/978-3-031-00317-2_4

Safargholi Tabar Marzooni, S., Fadaei, M., Bahmanpoor, A., & Derakhshandi, M. (2021). Investigating the effect of colloidal nanosilica in the passive improvement method on the liquefaction potential and changes in the pore water pressure of sandy silt. 2023. *Journal of Engineering Geology, Kharazmi University*. 15(4). 143-168. (In Persian)

Seif, Z., Etemad, V., & Javanmiri Pour, M. (2024). Effect of Drought and Salinity Stress on Chlorophyll and Carotenoid Content in Russian Olive Leaves (Elaeagnus angustifolia L.). *Journal of Drought and*

(2016). The interfacial behavior between biochar and soil minerals and its effect on biochar stability. *Environmental science & technology*, *50*(5), 2264-2271. httos://doi.org.ir/10.1021/acs.est.5b03656

Zaib, M., Farooq, U., Adnan, M., Sajjad, S., Abbas, Z., Haider, K.,... & Muhay-Ul-Din, M. F. (2022). Remediation of saline soils by application of biochar: a review. *Journal of Environmental and Agricultural Sciences*, *24*, 29-36.

Zhang, J., Amonette, J.E., & Flury, M. (2021). Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil. *Soil and Tillage Research*, 312, 104992. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104992

Zhang, W., Zhao, Y., Wang, S., Li, Y., Liu, J., Zhuo, Y., & Zhang, W. (2021). Combined application of flue gas desulfurization gypsum and straw pellets to ameliorate sodicity, nutrient content, and aggregate stability of sodic soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *21*, 1806-1816. http://dx.doi.org/10.1007/s42729-021-00481-5