



Investigating the possibility of improving low-yielding sandy soils using carboxymethyl cellulose and humic acid

Sara Talaei Khosrowshahi¹ | Alireza Raheb² | Ahmad Heidari³ | Hassan Etesami⁴ |
Hadis Khosravian Chatroodi⁵ | Mostafa Abdollahpour⁶ | Hamidreza Mokhtari
Esfidvajani⁷

1. Department of soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: S.talaei@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: araheb@ut.ac.ir
3. Department of soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ahaidari@ut.ac.ir
4. Department of soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: hassanetesami@ut.ac.ir
5. Department of soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Hadiskhosravian@ut.ac.ir
6. Institute of Earth System Sciences, Section Soil Science, Leibniz University of Hannover, Hannover, Germany. E-mail: abdollahpour@ifbk.uni-hannover.de
7. Public Administration Department, Faculty of Management and Economic, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran. E-mail: h.mokhtari74@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 17, 2024

Revised: Feb. 4, 2025

Accepted: Feb. 15, 2025

Published online: June. 2025

Keywords:

Arid Regions,
Superabsorbent,
Soil Amendment,
Soil Fertility,
Soil Production Capacity.

ABSTRACT

Sandy soils have low productivity due to a lack of organic matter (OC), cation exchange capacity (CEC), and water retention. This study aimed to determine the optimal amounts of humic acid (HA) and carboxymethyl cellulose (CMC) as soil amendments and their effectiveness in improving some physical and chemical properties of sandy soil. A completely randomized experimental design including 10 treatments including control, HA (1, 2, and 3 gkg⁻¹) in combination with CMC at (1, 2, and 5 gkg⁻¹) in three replications was used. After the incubation period (3 months), soil properties including saturated moisture (SP), bulk density (BD), texture, the electrical conductivity of saturated extract (ECe), pH, OC, and CEC were measured. Variance analysis showed that HA and CMC had a significant effect on CEC (4.58-5.31 cmol_ekg⁻¹), OC (0.28-0.41%), ECe (0.33-0.56 dSm⁻¹), BD (1.31-1.59 gcm⁻³), and SP (37.76-43.28 %). Considering the results, statistical results, and clustering of experimental treatments, it was determined that the treatment of 2 gkg⁻¹ humic acid combined with 5 gkg⁻¹ carboxymethyl cellulose had the most significant impact on soil improvement, such that organic carbon increased by 153%, cation exchange capacity by 52%, and saturation moisture by 8%, while bulk density decreased by 4%. These findings suggest the application of humic acid and carboxymethyl cellulose as an effective method for improving sandy soils in arid and semi-arid regions.

Cite this article: Talaei Khosrowshahi, S., Raheb, A., Heidari, A., Etesami, H., Khosravian Chatroodi, H., Abdollahpour, M., & Mokhtari Esfidvajani, H. (2025) Investigating the possibility of improving low-yielding sandy soils using carboxymethyl cellulose and humic acid, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (4), 851-863. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387162.669853>

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387162.669853>



EXTENDED ABSTRACT

Objectives

Global food demand is expected to increase by 56% by 2050, while the area of unconstrained land is minimal, and most agricultural land is located in arid and semi-arid regions and faces constraints such as lack of water, nutrients, and organic matter reserves. The main characteristics of soils in arid and semi-arid areas are the predominance of sand, low water holding capacity, low organic matter and cation exchange capacity, and poor nutrient availability for plant growth. A substantial portion of Iran's low-yield and desert lands (approximately 43 million hectares) consists of sandy soils with low productivity for crop production. One of the methods for improving the physical and chemical conditions of these soils is the addition of organic matter to them. The main objective of this study is to determine the optimal amounts of humic acid and carboxymethyl cellulose as soil amendments and to evaluate their effectiveness in improving some physical and chemical properties of sandy soil.

Materials and Methods

In this study, a sandy soil located on non-saline wind-blown sediments in Najmabad village, Nazarabad county, Alborz province was sampled. The soil samples were transported to the laboratory, air-dried naturally, and sieved through a 2 mm sieve. Soil treatments included humic acid at three levels (1, 2, and 3 gkg⁻¹ soil) and CMC at three levels (1, 2, and 5 gkg⁻¹ soil). Carboxymethyl cellulose was applied in the form of white sugar granules. The soil treatments were incubated for 12 weeks at a temperature of 25 degrees and a humidity of 80%. The study was conducted using a completely randomized design with 10 treatments and 3 replicates. The experimental data were analyzed using Minitab 16 software, applying statistical methods including Analysis of Variance (ANOVA), Tukey's test, Principal Component Analysis (PCA), and clustering. ANOVA and Tukey's test were used to identify significant differences between treatments, while PCA was employed for dimensionality reduction and pattern recognition. Clustering was utilized to group treatments based on similar characteristics.

Results

After the end of the incubation period, soil properties including saturated moisture content (SP), bulk density (BD), texture, saturated extract electrical conductivity (ECe), pH, organic carbon (OC), and cation exchange capacity (CEC) were measured. The research was conducted with a completely randomized experimental design including 10 treatments in three replications for humic acid and carboxymethyl cellulose and the experimental data were analyzed with Minitab 16 software.

Conclusion

Analysis of variance showed that in general, humic acid and carboxymethyl cellulose treatments had a significant effect on CEC (range of change 4.58 to 5.31 cmol_ckg⁻¹ soil), OC (range of change 0.28 to 0.41%), ECe (range of change 0.33 to 0.56 dSm⁻¹), BD (range of change 1.31 to 1.59 gcm⁻³) and SP (range of change 37.66 to 43.28%). Considering the experimental data results, statistical results and clustering of experimental treatments, the application of 2 gkg⁻¹ soil humic acid plus 5 gkg⁻¹ soil carboxymethyl cellulose was selected as the most suitable treatment for the improvement of sandy soils in arid and semi-arid regions. This treatment effectively helped in the improvement of sandy soil by improving the physical and chemical properties of the studied sandy soil, including a sharp increase in OC (by 153%), an increase in CEC (by 52%), a decrease in BD (by 4%) and an increase in SP (by 8%).

Author Contributions

Conceptualization; Alireza Raheb and Ahmad Heidari; methodology, Alireza Raheb, Ahmad Heidari, Mostafa Abdollahpour, Hassan Etesami and Hamidreza Mokhtari Esfidvajani; validation, Alireza Raheb and Ahmad Heidari ; formal analysis, Sara Talaee Khosrowshahi and Hadis Khosravian Chatroodi; investigation, Sara Talaee Khosrowshahi; writing-original draft preparation, Sara Talaee Khosrowshahi; writing-Alireza Raheb; visualization, Sara Talaee Khosrowshahi; supervision, Alireza Raheb and Ahmad Heidari; project administration, Alireza Raheb; funding acquisition, Alireza Raheb and Ahmad Heidari. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript." All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank Soil Science Department of University of Tehran for providing equipments and Facilities, and Dr. Aida Bakhshi Khorramdareh for her participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest

بررسی امکان اصلاح خاک‌های کم‌بازده شنی با استفاده از کربوکسی‌متیل سلولز و اسید هیومیک

سارا طلایی خسروشاهی^۱ | علیرضا راهب^۲ | احمد حیدری^۳ | حسن اعتصامی^۴ | حدیث خسرویان چترودی^۵ | مصطفی عبدالله پور^۶ | حمیدرضا مختاری اسفیدواجانی^۷

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: S.talaee@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: araheh@ut.ac.ir
۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ahaidari@ut.ac.ir
۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hassanetesami@ut.ac.ir
۵. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Hadiskhosravian@ut.ac.ir
۶. موسسه علوم زمین، بخش علوم خاک، دانشگاه لایپنیتس هانوفر، هانوفر، آلمان، رایانامه: abdollahpour@ifbk.uni-hannover.de
۷. گروه مدیریت دولتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، رایانامه: h.mokhtari74@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	خاک‌های شنی به دلیل کمبود ماده آلی (OC)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و نگهداشت آب، بهره‌وری کمی دارند. هدف این مطالعه، تعیین مقادیر بهینه اسید هیومیک (HA) و کربوکسی‌متیل سلولز (CMC) به عنوان اصلاح‌کننده‌های خاک و ارزیابی اثربخشی آن‌ها در بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شنی بود. این تحقیق به صورت یک طرح آزمایشی کاملاً تصادفی شامل ۱۰ تیمار (شاهد، اسید هیومیک در سه سطح ۱، ۲ و ۳ گرم بر کیلوگرم خاک در ترکیب با کربوکسی‌متیل سلولز در سه سطح ۱، ۲ و ۵ گرم بر کیلوگرم خاک) در سه تکرار انجام شد. پس از پایان دوره خوابانیدن (۳ ماه)، خصوصیات خاک شامل درصد رطوبت اشباع (SP)، جرم مخصوص ظاهری (BD)، بافت، قابلیت هدایت الکتریکی، عصاره گل اشباع (ECe)، pH، OC و CEC اندازه‌گیری شدند. تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای HA و CMC تأثیر معنی‌دار بر CEC (۴/۵۸ تا ۵/۳۱ سانتی مول بر کیلوگرم)، OC (۰/۲۸ تا ۰/۴۱ درصد)، ECe (۰/۳۳ تا ۰/۵۶ dSm ⁻¹)، BD (۱/۳۱ تا ۱/۵۹ gcm ⁻³) و SP (۳۷/۶۶ تا ۴۳/۲۸ درصد) داشتند. نتایج آزمایشگاهی، نتایج آماری و خوشه‌بندی تیمارها نشان داد، تیمار ۲ گرم بر کیلوگرم HA به همراه ۵ گرم بر کیلوگرم CMC بیشترین تأثیر را در بهبود خاک داشت، به طوری که نسبت به خاک شاهد، کربن آلی ۱۵۳ درصد، ظرفیت تبادل کاتیونی ۵۲ درصد و رطوبت اشباع ۸ درصد افزایش و جرم مخصوص ظاهری ۴ درصد کاهش یافت. این نتایج کاربرد HA و CMC را به عنوان روشی مؤثر برای بهبود خاک‌های شنی در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد می‌دهد.

استناد: طلایی خسروشاهی؛ سارا، راهب؛ علیرضا، حیدری؛ احمد، اعتصامی؛ حسن، خسرویان چترودی؛ حدیث، عبدالله پور؛ مصطفی، مختاری اسفیدواجانی؛ حمیدرضا، (۱۴۰۴) بررسی امکان اصلاح خاک‌های کم‌بازده شنی با استفاده از کربوکسی‌متیل سلولز و اسید هیومیک، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۴)، ۸۶۳-۸۵۱



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387162.669853>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387162.669853>

مقدمه

خاک‌های شنی دارای بافت سبک، مواد آلی و ظرفیت نگهداری آب کم هستند و وسعت آنها تنها در قاره آسیا حدود ۸۶۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد (Yost & Hartemink, 2019). به دلیل زهکشی سریع خاک‌های شنی، آب و مواد محلول به سرعت طی فرایندهای طبیعی و یا دخالت انسان از این خاک‌ها خارج می‌شوند. از نظر بهره‌وری، حفظ حاصلخیزی خاک و راندمان آبیاری در این نوع خاک‌ها، به ویژه در دماهای زیاد و میزان بارندگی زیاد در مناطق گرمسیری دشوار است. در مقایسه با دیگر خاک‌ها، خاک‌های شنی پتانسیل کمی برای ذخیره کربن دارند و نقش آنها در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار ضعیف در نظر گرفته می‌شود (Arunrat et al., 2020). برای توسعه بهره‌برداری پایدار از خاک‌های شنی تحقیقات جامعی در مورد خاک‌های شنی لازم است. اصلاح خاک‌های شنی یک استراتژی پذیرفته شده برای بهبود کیفیت و بهره‌وری چنین خاک‌هایی است (Lei et al., 2022).

محققان روش‌های مختلفی را برای اصلاح خاک‌های درشت بافت و تقویت ساختمان آنها به منظور بر طرف کردن و یا کاهش محدودیت آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند که استفاده از انواع مختلف اصلاح‌کننده‌های طبیعی و مصنوعی از جمله آن‌ها است (Asghari et al., 2011). برای بهبود کیفیت خاک و افزایش نقش مواد آلی، استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی، به ویژه اسید هیومیک، توصیه می‌شود (Hu et al., 2021). اسید هیومیک به عنوان یکی از پرکاربردترین اصلاح‌کننده‌های آلی شناخته می‌شود و می‌تواند به رشد گیاهان، جوانه‌زنی بذور، جذب مواد غذایی توسط گیاهان و مقاومت آنها در برابر خشکی و آفات کمک کند (Li et al., 2015; Rousta et al., 2019; Alharbi et al., 2021). همچنین، این ترکیبات به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مانند افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، اصلاح ساختمان خاک و تعادل یون‌ها در خاک کمک می‌کنند. با توجه به مزایای اسید هیومیک و اصلاح‌کننده‌های آلی دیگر، استفاده از آنها به عنوان یک روش مؤثر برای افزایش عملکرد محصولات کشاورزی و بهبود کیفیت خاک توصیه می‌شود (Ali et al., 2019).

در پژوهشی Zhou et al. (۲۰۱۹) دریافتند که افزودن تیمار بنتونیت-اسید هیومیک به خاک منجر به بهبود کیفیت خاک و افزایش تشکیل سریع خاکدانه‌ها شد، همچنین چگالی ظاهری خاک کاهش و ذخیره آب خاک افزایش یافت. این تغییرات باعث افزایش ۵۰ درصدی در رشد و عملکرد ذرت و کارایی مصرف آب شد. Zanin et al. (۲۰۱۹) نیز گزارش دادند که استفاده از هیومیک اسید منجر به افزایش تخلخل خاک و حفظ عناصر غذایی توسط تشکیل کمپلکس‌های فلزی-هیومیک شد و از طرفی جرم مخصوص ظاهری خاک را کاهش داد. Ma et al. (۲۰۲۲) نیز بیان نمودند که افزودن هیومیک اسید به خاک منجر به افزایش رطوبت خاک و کاهش هدایت الکتریکی، pH و چگالی ظاهری خاک به طور قابل توجهی شده و راندمان مصرف آب در گیاه نیز به میزان ۴۱ درصد افزایش یافته است. مطالعات Rekaby et al. (۲۰۲۳) نشان داد که خاک‌های شنی به دلیل کمبود مواد آلی و ظرفیت نگهداری آب، حاصلخیزی کمی دارند. کمپوست و اسیدهای هیومیک به طور قابل توجهی خواص خاک شنی و در دسترس بودن نیتروژن، فسفر و پتاسیم را بهبود بخشید و رشد کینوا و جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم را افزایش داد. علاوه بر این افزودن کمپوست و اسیدهای هیومیک توانایی گیاه کینوا را برای تحمل شوری آب آبیاری افزایش داد.

در دهه‌های اخیر، فناوری‌های اصلاح خاک با استفاده از ترکیبات یونی و مواد معدنی به طور قابل توجهی در کاربردهای مهندسی نتایج موفقیت‌آمیزی داشته‌اند. با این حال، تاثیر این نوع اصلاح‌کننده‌ها معمولاً نیاز به ترکیبات آلی دارند. بنابراین، انتخاب پلیمرهای مناسب برای اصلاح خاک موضوعی است که در زمینه‌های مرتبط توجه زیادی جلب کرده است. مواد پلیمری اصلاح شده، نمونه‌ای از پلیمرهای نوآورانه هستند که با استفاده از ابزارهای بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی ساخته می‌شوند. این پلیمرها دارای ویژگی‌های کمتری در زمینه تاثیرات زیست‌محیطی و قابلیت تجدیدپذیری زیادی هستند (Qin et al., 2022). یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین اصلاح‌کننده‌های آلی کربوکسی‌متیل سلولزها^۱ (CMC) هستند. کربوکسی‌متیل سلولزها ترکیباتی (پلیمرهایی) هستند که به راحتی در آب حل می‌شوند. افزایش گرانروی و امولسیون‌کنندگی این ترکیبات، باعث شده است که این مواد در طیف وسیعی از کاربردهای تجاری، آرایشی، دارویی، کشاورزی، صنایع کاغذ، نساجی و صنایع غذایی استفاده شوند (Qin et al., 2022).

در مهندسی عمران، CMC به عنوان یک تقویت‌کننده استحکام و اصلاح‌کننده خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Shao et al., 2023). کربوکسی‌متیل سلولز اصلاح‌شده (MCMC) می‌تواند ذرات ماسه را به هم پیوند دهد و پوسته‌ای پایدار روی سطح ماسه ایجاد کند. حتی پس از خشک شدن کامل و خروج آب، پوسته سطحی مانع از فرسایش و جریان شن می‌شود و می‌تواند تبخیر آب را کاهش داده و

منجر به حفظ عناصر غذایی مورد نیاز برای رشد گیاهان شود. این اصلاح کننده باعث افزایش میزان عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و همچنین میزان کربن آلی خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می شود. علاوه بر این، خاصیت چسبندگی و ضریب نفوذپذیری خاک در اثر این اصلاح بهبود می یابد (Yang et al., 2022).

Zinchenko et al, (۲۰۲۲) اعلام کردند که ترکیب پلیمری از کربوکسی متیل سلولز به طور قابل توجهی خواص مکانیکی خاک را بهبود می بخشد. نتایج تحقیق Yang et al, (۲۰۲۲) نشان می دهد که کربوکسی متیل سلولز اصلاح شده با ترکیب کربوکسی متیل سلولز (CMC) و پلی آکریل آمید (PAM) منجر به بهبود حساسیت به آب و مقاومت برشی خاک می شود، اما باعث کاهش نرخ نفوذ آب در آن می شود. Omer et al, (۲۰۲۳) در مطالعه خود تحت عنوان ساخت سوپرجاذب کربوکسی متیل سلولز پیوندی هیدروژل برای حفظ آب در خاک شنی دریافتند که این هیدروژل های به عنوان یک سوپر جاذب کار آمد برای بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک شنی می باشند. Pu et al, (۲۰۱۹) یافتند که با استفاده از کربوکسی متیل سلولز به عنوان تثبیت کننده خاک، مقاومت در برابر فرسایش خاک افزایش می یابد. همچنین، در آزمایشی به مدت ۳۰ روز، تعداد بوته های یونجه و ارتفاع آن ها در خاک با استفاده از این ترکیبات تثبیت کننده افزایش یافت. نتایج تحقیق Yang et al, (۲۰۲۲) نشان می دهد که اصلاح خاک با استفاده از کربوکسی متیل سلولز واکنش مثبتی در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک ریشه ایجاد می کند. این اصلاح کننده باعث افزایش زیست توده گیاهی، تحمل به خشکی و میزان زنده ماندن می شود و همچنین تعداد ریشه های گیاه و شاخس های مختلف رشد ریشه را افزایش می دهد.

کشور ایران به دلیل پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی و کمبود بارش، در زمره کشورهای خشک و نیمه خشک جهان قرار دارد و با چالش کمبود منابع آبی مواجه است. گسترش بیابان ها و اثرات تغییرات اقلیمی، ضرورت اصلاح خاک های شنی و بازگرداندن آن ها به چرخه تولید را افزایش داده است. استفاده از ترکیبات آلی مانند اسید هیومیک و کربوکسی متیل سلولز به عنوان افزودنی های موثر، پتانسیل قابل توجهی برای بهبود کیفیت این خاک ها دارد. این پژوهش با هدف بررسی اثر اسید هیومیک و کربوکسی متیل سلولز بر بهبود ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های شنی و افزایش بهره وری منابع آب و خاک طراحی شده است. نتایج این مطالعه می تواند مبنای ارائه راهکارهای مدیریتی برای بهره برداری پایدار از خاک های مناطق خشک و نیمه خشک کشور قرار گیرد.

مواد و روش ها

نمونه برداری و آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی خاک

این پژوهش، در پنج مرحله انجام گردید که شامل نمونه برداری و انتقال نمونه ها به آزمایشگاه، انجام آزمایش های فیزیکی و شیمیایی خاک شاهد، اعمال تیمارهای آزمایشی و خوابانیدن خاک، آزمایش های فیزیکی و شیمیایی خاک در پایان دوره خوابانیدن و تجزیه و تحلیل داده ها می باشد که از یک خاک شنی واقع بر روی رسوبات بادی غیر شور در روستای نجم آباد شهرستان نظرآباد استان البرز با طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳۰ دقیقه و ۵۹ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۲ دقیقه و ۲۸ ثانیه نمونه برداری شد. پس از هواخشک کردن و عبور دادن نمونه ها از الک ۲ میلی متری، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه فلزی (Blake & Hartge, 1986)، درصد رطوبت اشباع (Smith & Mullins, 1991)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک (Carter & Gregorich, 2007; Sparks et al., 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم یک نرمال (Sumner & Grotzinger, 1996) و بافت خاک با توجه به قانون استوک به روش هیدرومتر اندازه گیری شدند (Carter & Gregorich, 2007).

آزمایش خوابانیدن خاک

به منظور اصلاح خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شنی، از اسید هیومیک پودری (با مقدار اسید هیومیک ۵۶ درصد وزنی و اسید فولیک ۰/۰۷ درصد وزنی و مقدار پتاسیم ۸/۹ درصد وزنی) در سه سطح ۱، ۲ و ۳ گرم بر کیلوگرم خاک در ترکیب با CMC پودری (خلوص ۹۹ درصد و چگالی ۱/۵۹ گرم بر سانتیمتر مکعب) در سه سطح ۱، ۲ و ۵ گرم بر کیلوگرم استفاده و یک تیمار نیز به عنوان شاهد در نظر گرفته شد (جدول ۱). این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۱۰ تیمار و در سه تکرار اجرا شد. برای شروع آزمایش، یک کیلوگرم خاک خشک شده را کوبیده و از الک ۲ میلی متری عبور داده و به گلدان های آزمایشی اضافه و وزن متناظر هر یک از تیمارهای آزمایشی اسید هیومیک و CMC به خاک گلدان ها افزوده شد. تیمارها با خاک به خوبی مخلوط شدند و به مدت ۱۲ هفته در گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران و در رطوبت ۸۰ درصد ظرفیت زراعی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (± 1) نگهداری شدند و رطوبت خاک از طریق وزنی به

صورت روزانه کنترل و جبران شد. پس از پایان دوره خوابانیدن، اثر تیمارهای مختلف بر خصوصیات خاک شامل درصد رطوبت اشباع (SP)، جرم مخصوص ظاهری (BD)، بافت، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (ECe)، pH عصاره اشباع، کربن آلی (OC) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) اندازه‌گیری شدند.

جدول ۱. مشخصات کامل تیمارهای آزمایشی

شماره تیمار	مشخصات کامل تیمارهای آزمایشی	مخفف تیمار*
۱	۱ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم خاک + ۱ گرم کربوکسی‌متیل سلولز بر کیلوگرم خاک	HA1*CMC1
۲	۱ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم خاک + ۲ گرم کربوکسی‌متیل سلولز بر کیلوگرم خاک	HA1*CMC2
۳	۱ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم خاک + ۵ گرم کربوکسی‌متیل سلولز بر کیلوگرم خاک	HA1*CMC5
۴	۲ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم خاک + ۱ گرم کربوکسی‌متیل سلولز بر کیلوگرم خاک	HA2*CMC1
۵	۲ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم خاک + ۲ گرم کربوکسی‌متیل سلولز بر کیلوگرم خاک	HA2*CMC2
۶	۲ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم خاک + ۵ گرم کربوکسی‌متیل سلولز بر کیلوگرم خاک	HA2*CMC5
۷	۳ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم خاک + ۱ گرم کربوکسی‌متیل سلولز بر کیلوگرم خاک	HA3*CMC1
۸	۳ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم خاک + ۲ گرم کربوکسی‌متیل سلولز بر کیلوگرم خاک	HA3*CMC2
۹	۳ گرم اسید هیومیک بر کیلوگرم خاک + ۵ گرم کربوکسی‌متیل سلولز بر کیلوگرم خاک	HA3*CMC5
۱۰	تیمار شاهد	HA0*CMC0

*حروف مخفف HA و CMC به ترتیب معادل اسید هیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز است

آنالیز آماری

به‌منظور تجزیه آماری داده‌های آزمایشگاهی از نرم‌افزار آماری Minitab ۱۶ استفاده شد. داده‌های آزمایشی با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA)، آزمون توکی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و خوشه‌بندی تجزیه و تحلیل شدند و در نهایت بهترین تیمار از نظر بیشترین همبستگی به‌عنوان تیمار برتر انتخاب شد. از تحلیل ANOVA برای تعیین تفاوت معنی‌دار بین گروه‌ها و آزمون توکی برای شناسایی گروه‌ها که میانگین‌هایشان به‌طور معنی‌دار از یکدیگر متمایز هستند، استفاده شد. علاوه بر این، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی الگوهای اصلی در داده‌های پیچیده به کار رفت. در ادامه، از خوشه‌بندی برای دسته‌بندی داده‌ها بر اساس ویژگی‌های مشترک به گروه‌های مشابه استفاده شد.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

در جدول ۲ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی را نشان می‌دهد. این خاک با داشتن ۸۴ درصد شن، ۵ درصد سیلت و ۱۱ درصد رس دارای بافت شن لومی و در محدوده خاک‌های غیر شور ($0/36$ دسی‌زیمنس بر متر) است. درصد زیاد شن و جرم مخصوص ظاهری $1/66$ گرم بر سانتیمتر مکعب خاک آزمایشی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تأثیر گذاشته به طوری که موجب افزایش تخلخل کل و در نتیجه کاهش ظرفیت جذب و نگهداری آب در خاک شده است. از نظر خصوصیات شیمیایی، خاک آزمایشی با pH معادل $8/03$ ، نشان‌دهنده خاکی قلیایی است که ممکن است بر در دسترس بودن برخی مواد مغذی برای گیاهان تأثیر بگذارد. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) نیز به میزان $3/32$ سانتی مول بار بر کیلوگرم خاک بود، که دلیل آن کمبود کربن آلی ($0/15$ درصد) و مقدار پایین رس (11 درصد) است (جدول ۲). با توجه به شنی بودن خاک و نیز میزان پایین ماده آلی خاک به منظور اصلاح این خاک‌ها و ایجاد شرایط بهینه برای رشد گیاهان مواد اصلاحی اسید هیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز به آن اضافه شد.

اثر اسید هیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

نتایج برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۲ ارائه شده است. داده‌های آزمایشی نشان می‌دهد جرم مخصوص ظاهری خاک پس از اعمال تیمارهای اسید هیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز کاهش یافته است. اگر چه از نظر آماری تفاوت معنی‌دار بین داده‌های آماری جرم مخصوص ظاهری خاک در پایان دوره خوابانیدن مشاهده نشد اما کوچکترین جرم مخصوص ظاهری در تیمار 3 gkg^{-1} اسید هیومیک باضافه 5 gkg^{-1} کربوکسی‌متیل سلولز مشاهده شد. چرا که با افزایش غلظت تیمارهای اصلاحی اسید هیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز، این ترکیبات به عنوان مواد آلی عمل می‌کنند و با ترکیب شدن با ذرات معدنی خاک، ایجاد خاکدانه‌ها را تقویت نموده و ساختمان خاک را بهبود می‌بخشند و با افزایش فضاهای خالی بین ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری کاهش می‌یابد. اعمال تیمارهای

آزمایشی سبب ایجاد تغییراتی در مقادیر رطوبت اشباع خاک در برخی نمونه‌ها شد، به طوری که بیشترین درصد رطوبت اشباع خاک در تیمار ۳ gkg^{-1} اسیدهیومیک باضافه ۱ gkg^{-1} کربوکسی‌متیل سلولز مشاهده شد. نتایج پژوهش بررسی اثرات ترکیب اصلاح کننده‌های آلی بیوچار و سدیم کربوکسی‌متیل سلولز (CMC) بر بهبود خواص فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های بیابانی در چین، نشان داد که کاربرد همزمان بیوچار و CMC باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک (تا ۹/۴۱ درصد)، افزایش ظرفیت نگهداری آب (تا ۳۶/۸۷ درصد)، ظرفیت رطوبت اشباع خاک (تا ۳۰/۷۴ درصد) و بهبود پایداری خاکدانه‌ها (تا ۲۵۶/۸۶ درصد) شده است (Shao et al., 2023).

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک پس از اعمال تیمارهای اسید هیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز، ۶۰-۳۸ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافته است. بیشترین ظرفیت تبادل کاتیونی در تیمارهای اسید هیومیک ۳ gkg^{-1} باضافه ۵ gkg^{-1} کربوکسی‌متیل سلولز مشاهده شد. افزایش اسید هیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز از سطح ۱ gkg^{-1} به سطح ۳ و ۵، ظرفیت تبادل کاتیونی را به طور متوسط از ۴/۷۲ به ۵/۳۱ $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ افزایش داد. علاوه بر این، نتایج آماری داده‌های آزمایشی (جدول ۲) نیز نشان می‌دهد که ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در تیمارهای آزمایشی در سطح اطمینان ۹۵ درصد تفاوت معنی‌دار با تیمار شاهد دارد. اضافه شدن اسیدهیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز به خاک آزمایشی در پایان دوره خوابانیدن موجب افزایش هدایت الکتریکی تا ۵۵ درصد نسبت به تیمار شاهد شد. کمترین هدایت الکتریکی خاک در تیمار ۱ gkg^{-1} اسیدهیومیک باضافه ۱ gkg^{-1} کربوکسی‌متیل سلولز که معادل ۰/۳۳ dSm^{-1} بود، مشاهده شد. از طرف دیگر هدایت الکتریکی خاک آزمایشی با افزایش مقدار کربوکسی‌متیل سلولز از ۱ به ۲ و ۵ gkg^{-1} ، از ۰/۳۳ به ۰/۵۶ dSm^{-1} افزایش یافت. درصد کربن آلی خاک در تیمارهای آزمایشی در سطح اطمینان ۹۵ درصد تفاوت معنی‌دار با تیمار شاهد دارد. کربن آلی خاک و پس از اعمال اسید هیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز از ۰/۲۸ تا ۰/۴۱ درصد افزایش یافت. بیشترین درصد کربن آلی در تیمارهای ۳ gkg^{-1} هیومیک اسید باضافه ۵ gkg^{-1} کربوکسی‌متیل سلولز مشاهده شد.

اصلاح خاک شنی مورد بررسی با استفاده از ترکیبات آلی نشان داد که در پایان دوره خوابانیدن جرم مخصوص ظاهری خاک پس از اعمال تیمارهای اسیدهیومیک و کربوکسی‌متیل سلولز، اگر چه از نظر آماری تفاوت معنی‌دار بین داده‌های آماری مشاهده نشد، ۲۱-۵ درصد کاهش یافته است. کاربرد ترکیبی بیوچار و CMC چگالی ظاهری خاک (BD) را ۹/۴-۱/۳ درصد کاهش داد و این امر منجر به بهبود قابل توجهی در پایداری خاک بیابانی شنی در برابر فرسایش آبی شد (Shao et al., 2023). پس از تماس با آب، CMC به سرعت گسترش می‌یابد و یک ساختار شبکه‌ای پایدار را تشکیل می‌دهد (Zhang et al., 2022). بار منفی بزرگ CMC آن را قادر می‌سازد تا ذرات خاک را پس از جذب آب، تثبیت کند و اثر انبساط آن به طور موثری چگالی ظاهری خاک را کاهش می‌دهد (Li et al., 2024). در مطالعات متعدد مشخص شده است که کاربرد ۰/۶ تا ۴ gkg^{-1} کربوکسی‌متیل سلولز باعث کاهش نفوذپذیری آب و افزایش توان تولیدی خاک‌های شنی، افزایش ظرفیت نگهداشت آب و افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (Wu et al., 2015; Ning et al., 2019).

جدول ۲. نتایج میانگین تکرارهای برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در نمونه تیمارهای آزمایشی و شاهد

تیمار	جرم مخصوص ظاهری (gcm^{-3})	رطوبت اشباع (درصد)	شن رس سیلت (درصد)	pHe	ECe (dS m^{-1})	کربن آلی (درصد)	ظرفیت تبادل کاتیونی ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)
HA1*CMC1	۱/۵۶ ^a	۳۸/۷۰ ^{ab}	۸۵/۸۵ ^a	۱۰/۵۹ ^a	۳/۵۵ ^a	۷/۹۰ ^a	۴/۷۳ ^{ab}
HA1*CMC2	۱/۴۵ ^a	۳۹/۳۱ ^{ab}	۸۲/۲۵ ^a	۱۲/۱۲ ^a	۵/۶۱ ^a	۷/۹۵ ^a	۴/۵۸ ^b
HA1*CMC5	۱/۵۰ ^a	۳۷/۶۶ ^{ab}	۸۴/۰۵ ^a	۱۱/۶۱ ^a	۴/۳۳ ^a	۸/۰۷ ^a	۴/۹۸ ^{ab}
HA2*CMC1	۱/۳۱ ^a	۳۸/۷۰ ^{ab}	۸۴/۰۵ ^a	۱۲/۶۲ ^a	۳/۳۳ ^a	۷/۹۳ ^a	۴/۷۶ ^{ab}
HA2*CMC2	۱/۴۳ ^a	۳۴/۸۹ ^b	۸۵/۰۵ ^a	۱۱/۱۱ ^a	۳/۸۲ ^a	۷/۸۹ ^a	۴/۹۰ ^{ab}
HA2*CMC5	۱/۵۹ ^a	۴۲/۳۴ ^{ab}	۸۲/۶۷ ^a	۱۰/۶۹ ^a	۶/۶۳ ^a	۸/۱۱ ^a	۵/۰۵ ^{ab}
HA3*CMC1	۱/۵۴ ^a	۴۳/۲۸ ^a	۸۴/۸۴ ^a	۱۱/۶۱ ^a	۳/۵۴ ^a	۷/۹۴ ^a	۴/۸۳ ^{ab}
HA3*CMC2	۱/۶۵ ^a	۳۹/۵۷ ^{ab}	۸۵/۸۵ ^a	۱۰/۵۹ ^a	۳/۵۵ ^a	۸/۰۱ ^a	۵/۲۴ ^a
HA3*CMC5	۱/۵۲ ^a	۳۹/۰۵ ^{ab}	۸۵/۸۵ ^a	۱۱/۰۹ ^a	۳/۰۵ ^a	۸/۰۷ ^a	۵/۳۱ ^a
HA0*CMC0	۱/۶۶ ^a	۳۹/۱۳ ^{ab}	۸۴/۰۵ ^a	۱۱/۰۹ ^a	۴/۸۵ ^a	۸/۰۳ ^a	۳/۳۳ ^c
حداقل	۱/۳۱	۳۷/۶۶	۸۲/۲۵	۱۰/۵۹	۳/۰۵	۷/۹۳	۴/۵۸
حداکثر	۱/۵۹	۴۳/۲۸	۸۵/۸۵	۱۲/۶۲	۶/۶۳	۸/۱۱	۵/۳۱
میانگین	۱/۵۳	۳۹/۲۶	۸۴/۴۵	۱۱/۳۱	۴/۲۲	۷/۹۹	۴/۷۷

*در هر تیمار، میانگین‌هایی که دارای حروف کوچک مشترک هستند براساس آزمون توکی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با هم ندارند. توصیف تیمار در جدول ۱ آورده شده است.

افزودن تیمار اسید هیومیک و کربوکسیل متیل سلولز در تمامی سطوح به طور کلی باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی شده است که در این میان، تیمار 3 gkg^{-1} اسید هیومیک باضافه 5 gkg^{-1} کربوکسی متیل سلولز موجب افزایش 60% درصدی CEC نسبت به نمونه‌ی شاهد نشان شده است. کربوکسی متیل سلولز به عنوان یک اصلاح کننده خاک شنی، باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می شود. کربوکسی متیل سلولزها، از دیگر عوامل موثر در اصلاح خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک هستند، که به صورت مستقیم یا غیر مستقیم در این امر موثر هستند، به طوری که گروه کربوکسی متیل با بار منفی در زنجیره اصلی خود می تواند با کاتیون‌های محلول خاک از طریق جاذبه الکترواستاتیکی تعامل داشته باشد، به عنوان یک عامل اتصال قوی عمل کند و از سوی دیگر کربوکسی متیل سلولز به عنوان یک پلیمر پلی کربوکسیلات، ظرفیت تبادل کاتیونی زیادی دارد. در نتیجه جذب عناصر غذایی در خاک را افزایش می دهد و دسترسی به عناصر غذایی موثر را تقویت می کند (Wang et al., 2023). مکانیسم کلی افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی توسط CMC و هیومیک اسید تحت تاثیر افزایش تعداد سایت‌های تبدالی، کاهش اتلاف کاتیون‌ها و بهبود پایداری خاکدانه‌ها و در نتیجه آن بهبود ساختمان خاک می باشد. این اثرات به ویژه در خاک‌های فقیر از ماده آلی و دارای ظرفیت تبادل کاتیونی پایین، بسیار قابل توجه است. هر دو ماده از طریق افزودن گروه‌های عاملی کربوکسیل (COOH -) و فنولیک (OH -) به خاک، تعداد سایت‌های فعال برای جذب کاتیون‌ها را افزایش می دهند. از طرف دیگر هیومیک اسید و CMC به دلیل توانایی در تشکیل کمپلکس‌ها، از شسته شدن کاتیون‌ها جلوگیری کرده و آن‌ها را در محدوده ریشه حفظ می کنند و همچنین این مواد با تثبیت ذرات ریز خاک و بهبود ساختار آن، سطح بیشتری برای تبادل کاتیونی فراهم می کنند (Qingwen et al., 2022).

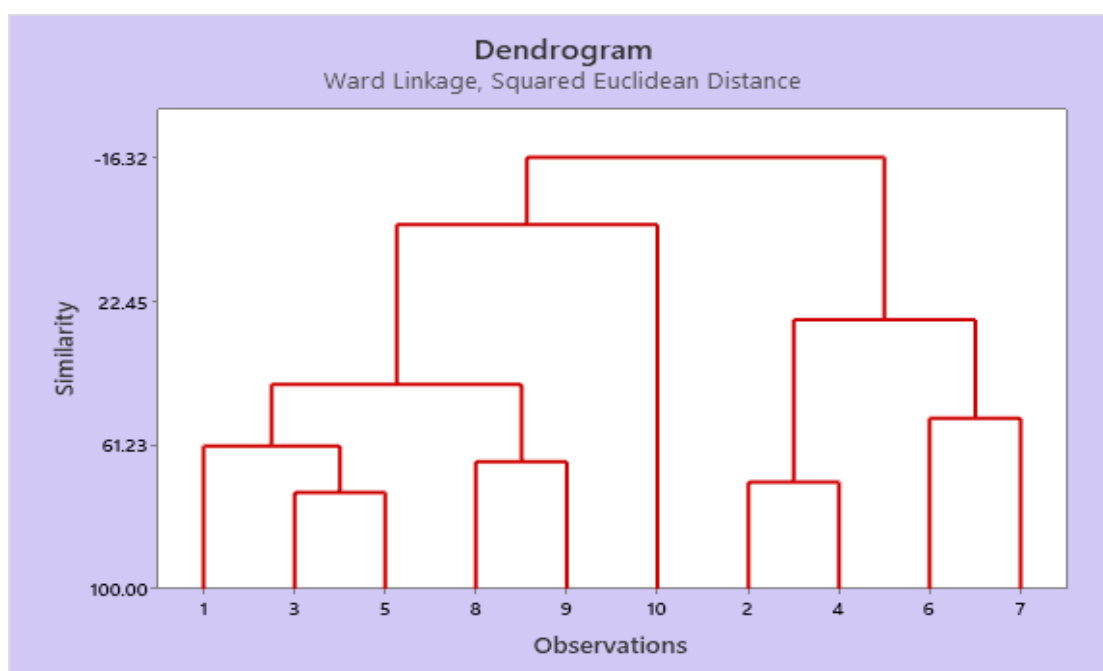
در خصوص سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نظیر درصد کربن آلی، تیمار شماره ۹ (HA3*CMC5) به میزان 173% درصد بیشترین تأثیر را در افزایش درصد کربن آلی نسبت به تیمار شاهد داشته است. نتایج نشان داد که روند قابل قبولی بین افزایش غلظت تیمارهای اصلاحی و مقدار ماده آلی اندازه گیری شده وجود دارد به طوری که کمترین میزان کربن آلی (0.28% درصد) مربوط به حداقل مقدار اسید هیومیک و CMC (HA1*CMC1) و بیشترین میزان کربن آلی (0.41% درصد) نیز مربوط به حداکثر مقدار اسید هیومیک و CMC (HA3*CMC5) است. نکته جالب توجه این است که میزان خروجی کربن آلی در تیمارهای مورد مطالعه کمتر از میزان اولیه کربن آلی خاک و هیومیک اسید و CMC خواهد بود که نقش تجزیه میکروبی را اثبات می کند. کربوکسی متیل سلولزها علاوه بر خصوصیات ذکر شده، به عنوان منبع کربن، تکثیر و تولید میکروارگانیسم‌های خاک را تحریک می کند. این میکروارگانیسم‌ها نقش اساسی در تجزیه مواد آلی خاک و آزادسازی متعاقب عناصر غذایی ایفا می کنند. در نتیجه کربوکسی متیل سلولز میزان مواد آلی خاک و عناصر غذایی موجود در خاک مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب در خاک را در لایه $40\text{--}0$ سانتی متری خاک به طور قابل توجهی افزایش می دهد (Wang et al., 2023). ماده آلی از یک سو به عنوان یک عامل پیوند دهنده در نگهداری ذرات خاک برای تشکیل خاکدانه عمل کرده و ساختمان را حفظ می کند و از سوی دیگر بر جمعیت و فعالیت میکروبی خاک می افزاید که آن هم به نوبه خود سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت بیشتر در برابر عوامل فرساینده مانند آب و باد هستند (Dianat Maharlui et al., 2020).

با توجه به نتایج جدول ۲ و تحلیل آماری می توان نتیجه گرفت که افزودن اصلاح کننده‌های اسید هیومیک و کربوکسی متیل سلولز در تمامی سطوح موجب افزایش میزان شوری خاک شنی شده است (به جز تیمار HA1*CMC1 و HA1*CMC2)، که در این میان تیمار 1 gkg^{-1} اسید هیومیک باضافه 1 gkg^{-1} کربوکسی متیل سلولز به میزان 8% درصد میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک را نسبت به تیمار شاهد کاهش داده است. به طور معمول می توان بیان کرد که کربوکسی متیل سلولز در حضور آب قابلیت تورم زیادی دارد که سبب می شود خاکدانه سازی بهتر صورت پذیرد و نتیجه آن افزایش تخلخل کل و فضای خالی بین ذرات خاک می باشد. اثر انبساط آن به طور موثری جرم مخصوص ظاهری خاک را کاهش و حجم منافذ خاک را افزایش می دهد (Shao et al., 2023). بدین صورت با افزایش در میزان تخلخل خاک، حرکت آب و نمک‌های محلول افزایش پیدا یافته و در نتیجه هدایت الکتریکی خاک افزایش پیدا می کند (Wilson, 2012) (شکل ۱). نتایج تغییرات میزان شوری خاک در استفاده ترکیبی از اصلاح کننده‌های اسید هیومیک و CMC در تناقض با یافته‌های برخی محققین می باشد که از CMC به تنهایی استفاده نمودند (Fu et al., 2023; Zhang et al., 2022). نتایج آن‌ها نشان داد که CMC با ایجاد تعادل در نفوذ آب و فرآیند شستشوی نمک، ضمن کاهش مقدار نمک موجود در خاک، سبب بهبود کیفیت خاک‌های شور و قلیایی شده و بهره‌وری آب را افزایش می دهد.



شکل ۱. تغییرات ظاهری نگهداشت آب در خاک تحت تیمار با اصلاح کننده‌های اسید هیومیک و کربوکسی متیل سلولز در مقایسه با تیمار شاهد

نتایج خوشه‌بندی مطابق با شکل ۲ نشان داد که داده‌ها دارای الگوهای ساختار قابل گروه‌بندی هستند. با استفاده از تحلیل خوشه‌ای بدست آمده، متغیرهای خاک براساس همبستگی آن‌ها گروه‌بندی شدند. با تحلیل خوشه‌ها می‌توان تأثیر ترکیبات مختلف اسید هیومیک و کربوکسی متیل سلولز بر پارامترهای مختلف خاک را مقایسه نمود. علاوه بر این، با شناسایی تیمارهای بهینه در هر خوشه، می‌توان ترکیبات مؤثرتری از این تیمارها برای بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک پیدا کرد. نمودار خوشه‌ای ارائه شده در شکل ۲ که نمایانگر روند ادغام خوشه‌ها بر اساس فاصله اقلیدسی می‌باشد، به وضوح نشان می‌دهد که تیمارها چگونه در طی مراحل مختلف تحلیل خوشه‌ای گروه‌بندی شده و تغییرات در شباهت‌ها و تفاوت‌ها را به تصویر می‌کشد. مطابق با شکل ۲ تیمار شماره ۱۰ (شاهد) به‌طور قابل توجهی از سایر تیمارها جدا شده است و در یک خوشه‌ی مجزا قرار دارد. این نتایج نشان می‌دهند که تیمار شاهد از نظر ویژگی‌های مورد بررسی تفاوت قابل توجهی با سایر تیمارها دارد. بر اساس شباهت و فاصله‌ی اقلیدسی و تحلیل خوشه‌بندی، تیمارهای ۲، ۴، ۶ و ۷ به‌طور مجزا و با تفاوت‌های بارز از سایر تیمارها در یک خوشه قرار گرفتند. این تیمارها که به‌طور واضح در خوشه‌های مجزا قرار گرفتند، از نظر ویژگی‌های مختلف مورد بررسی، بهترین عملکرد را داشتند و همچنین طبق تجزیه و تحلیل داده‌ها دارای ویژگی‌هایی بودند که آن‌ها را از سایر تیمارها متمایز می‌کند.



شکل ۲. نمودار خوشه‌بندی تیمارهای آزمایشی روی خاک شنی

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که افزودن کربوکسی‌متیل سلولز و اسید هیومیک به خاک‌های شنی کم‌بازده می‌تواند به طور معنی‌دار ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها را بهبود بخشد. نتایج آزمایش‌ها بیانگر افزایش قابل توجهی در ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد کربن آلی و رطوبت اشباع بود. به ویژه، ترکیب 2 gkg^{-1} اسید هیومیک به همراه 5 gkg^{-1} کربوکسی‌متیل سلولز به عنوان بهترین ترکیب برای بهبود کیفیت خاک شنی مورد مطالعه شناسایی شد. این ترکیب نه تنها باعث افزایش ۱۵۳ درصدی کربن آلی شد، بلکه ظرفیت تبادل کاتیونی را نیز تا ۵۲ درصد افزایش داد و جرم مخصوص ظاهری خاک را کاهش داد. استفاده از کربوکسی‌متیل سلولز (CMC) و اسید هیومیک می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر روی ماده آلی خاک در کوتاه و بلند مدت داشته باشد. در کوتاه مدت، به کارگیری CMC و اسید هیومیک می‌تواند منجر به افزایش فعالیت میکروبی در خاک شود. این افزایش فعالیت میکروبی می‌تواند باعث تجزیه سریع‌تر مواد آلی در خاک شده و در نتیجه افزایش تولید نیتروژن شود. همچنین، این ترکیبات می‌توانند باعث افزایش ثبات ماده آلی و جلوگیری از اکسیداسیون سریع آنها شوند. از سوی دیگر، در طولانی مدت، استفاده از CMC و اسید هیومیک می‌تواند بهبود حاصلخیزی خاک را تقویت کرده و ساختار خاک را بهبود بخشد. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل زیاد این اصلاح‌کننده‌ها در بهبود شرایط خاک‌های شنی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. با توجه به نتایج مثبت این مطالعه، تحقیقات آینده می‌تواند بر روی جنبه‌های مختلفی از جمله بررسی بلندمدت اثرات استفاده از کربوکسی‌متیل سلولز و اسید هیومیک بر روی کیفیت خاک و تولید محصولات کشاورزی در شرایط واقعی مزرعه، مقایسه اثرات ترکیبات دیگر اصلاح‌کننده‌های آلی و غیرآلی بر ویژگی‌های خاک شنی و تأثیرات آنها بر روی رشد گیاهان، تحلیل اقتصادی هزینه و مزیت استفاده از این اصلاح‌کننده‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی اصلاح خاک، مطالعه تأثیر این اصلاح‌کننده‌ها بر روی گونه‌های مختلف گیاهی و تعیین بهترین ترکیب برای هر گونه و توسعه مدل‌های شبیه‌سازی برای پیش‌بینی تأثیرات استفاده از این اصلاح‌کننده‌ها بر روی ویژگی‌های خاک و عملکرد گیاهان در شرایط مختلف اقلیمی متمرکز شود. این جنبه‌های تحقیقاتی می‌تواند به بهبود مدیریت خاک و افزایش تولید کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک کند و به توسعه پایدار منابع طبیعی در این مناطق منجر شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- اصغری، شکرالله؛ عباسی، فریبرز؛ نیشابوری، محمدرضا؛ اوستان، شاهین و علی اصغرزاد، ناصر (۱۳۹۰). اثرات ۴ اصلاح‌کننده آلی خاک بر پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در یک خاک لوم شنی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۸(۲)، ۱۷۷-۱۹۴.
- شکوهی‌فر، مرضیه؛ برومند نسب، سعید؛ سلطانی محمدی، امیر و هوشمند، عبدالرحیم (۱۳۹۵). بررسی اثر شوری آب آبیاری و سوپر جاذب بر بعضی خصوصیات هیدرولیکی و فیزیکی خاک لوم شنی. مجله علمی-پژوهشی علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹(۲)، ۱۰۳-۱۱۳.
- یکزبان، عباس؛ موسوی، سید علی اکبر؛ ثامن، عبدالمجید و رضایی، مهروز (۱۴۰۱). اثر اندازه ذرات، مقدار و نوع بیوجار بر هدایت هیدرولیکی اشباع در دو نوع خاک با بافت متفاوت. نشریه علمی پژوهش‌های خاک، ۳۶(۳)، ۳۲۱-۳۳۴.

REFERENCES

- Alharbi, S., Majrashi, A., Ghoneim, A. M., Ali, E. F., Modahish, A. S., Hassan, F. A., & Eissa, M. A. (2021). A new method to recycle dairy waste for the nutrition of wheat plants. *Agronomy*, 11(5), 840.
- Ali, K., Wang, X., Riaz, M., Islam, B., Khan, Z. H., Shah, F., ... & Haq, S. I. U. (2019). Biochar: An eco-friendly approach to improve wheat yield and associated soil properties on sustainable basis. *Pak. J. Bot*, 54, 1255-1261.
- Arunrat, N., Kongsurakan, P., Sereenonchai, S., & Hatano, R. (2020). Soil organic carbon in sandy paddy fields of Northeast Thailand: A review. *Agronomy*, 10(8), 1061.
- Asghari, S., Abbasi, F., Neyshabouri, M. R., Oustsan, S., & Aliasgharzad, N. (2011). Effects of four organic soil conditioners on some hydraulic and solute transport parameters in a sandy loam soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(2), 177-194. (In Persian).
- Blake, G., & Hartge, K. (1986). Particle density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 377-382.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
- Dianat Maharluei, Z., Safarzadeh, S., & Moosavi, A. A. (2020). Effect of Two Organic Amendments on Some

- Soils Physical Properties with Different Texture. *Applied Soil Research*, 7(4), 137-147.
- Fu, X., Wu, X., Wang, H., Chen, Y., Wang, R., & Wang, Y. (2023). Effects of fertigation with carboxymethyl cellulose potassium on water conservation, salt suppression, and maize growth in salt-affected soil. *Agricultural Water Management*, 287, 108436.
- Hu, Y. W., Li, Q. K., Song, C. J., & Jin, X. H. (2021). Effect of humic acid combined with fertilizer on the improvement of saline-alkali land and cotton growth. *Applied Ecology and Environmental Research*, 19(2), 1279-1294.
- Lei, Z. H. O. U., Xu, S. T., Monreal, C. M., Mclaughlin, N. B., Zhao, B. P., Liu, J. H., & Hao, G. C. (2022). Bentonite-humic acid improves soil organic carbon, microbial biomass, enzyme activities and grain quality in a sandy soil cropped to maize (*Zea mays* L.) in a semi-arid region. *Journal of Integrative Agriculture*, 21(1), 208-221.
- Li, G., Shan, Y., Nie, W. B., Sun, Y., Su, L., Mu, W., ... & Wang, Q. (2024). Effects of Carboxymethyl Cellulose Sodium (Cmc) on Hydraulic Properties, Water-Salt Distribution and Crop Growth in a Maize–Wheat Cropping System (Mwcs) in Coastal Saline-Alkali Soil. *Water-Salt Distribution and Crop Growth in a Maize–Wheat Cropping System (Mwcs) in Coastal Saline-Alkali Soil*.
- Li, Z., Qi, X., Fan, X., Wu, H., Du, Z., Li, P., & Lü, M. (2015). Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(12), 119-124.
- Ma, B., Bao, Y., Ma, B., McLaughlin, N. B., Li, M., & Liu, J. (2022). Residual Effect of Bentonite-Humic Acid Amendment on Soil Health and Crop Performance 4–5 Years after Initial Application in a Dryland Ecosystem. *Agronomy*, 12(4), 1-16.
- Ning, S., Jumai, H., Wang, Q., Zhou, B., Su, L., Shan, Y., & Zhang, J. (2019). Comparison of the effects of polyacrylamide and sodium carboxymethylcellulose application on soil water infiltration in sandy loam soils. *Advances in Polymer Technology*, 2019(2), 1-7.
- Omer, A. M., Tamer, T. M., Hassan, M. E., Khalifa, R. E., Abd El-Monaem, E. M., Eltaweil, A. S., & Mohy Eldin, M. S. (2023). Fabrication of grafted carboxymethyl cellulose superabsorbent hydrogel for water retention and sustained release of ethephon in sandy soil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(1), 561-572.
- Pu, S., Hou, Y., Ma, J., Zou, Y., Xu, L., Shi, Q., ... & Pei, X. (2019). Stabilization behavior and performance of loess using a novel biomass-based polymeric soil stabilizer. *Environmental & Engineering Geoscience*, 25(2), 103-114.
- Qin, C. C., Abdalkarim, S. Y. H., Zhou, Y., Yu, H. Y., & He, X. (2022). Ultrahigh water-retention cellulose hydrogels as soil amendments for early seed germination under harsh conditions. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133602.
- Qin, C.-C., Abdalkarim, S. Y. H., Zhou, Y., Yu, H.-Y., & He, X. (2022). Ultrahigh water-retention cellulose hydrogels as soil amendments for early seed germination under harsh conditions. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133602.
- Qingwen, Y., Xiangjun, P. & Cheng, F. (2022). Effect of Polymer Mixtures on Physical-Chemical Properties of Sandy Soil and Plant Growth. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10 (3389), 1-14.
- Rekaby, S. A., AL-Huqail, A. A., Gebreel, M., Alotaibi, S. S., & Ghoneim, A. M. (2023). Compost and humic acid mitigate the salinity stress on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd L.) and improve some sandy soil properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-11.
- Rousta, M. J., & Enayati, K. (2019). The effects of humic acid application on yield and yield components of wheat and some chemical properties of a saline-sodic soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(4), 95-109.
- Shao, F., Zeng, S., Wang, Q., Tao, W., Wu, J., Su, L., ... & Lin, S. (2023). Synergistic effects of biochar and carboxymethyl cellulose sodium (CMC) applications on improving water retention and aggregate stability in desert soils. *Journal of Environmental Management*, 331(2), 1-15.
- Shokouhi far, M., Broomand nasab, S., Soltani Mohammadi, A. and Hooshmand, A. R. (2016). The Effect of Salinity of Irrigation Water and Super Absorbent Polymer on Some Hydraulic and Physical Properties of Sandy Loam Soil. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(2), 101-113. (In Persian).
- Smith, K., & Mullins, C. (1991). *Soil analysis*. Marcel Decker.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods* (Vol. 14). John Wiley & Sons.
- Sumner, D. Y., & Grotzinger, J. P. (1996). Were kinetics of Archean calcium carbonate precipitation related

- to oxygen concentration? *Geology*, 24(2), 119-122.
- Wang, Y., Gao, M., Chen, H., Chen, Y., Wang, L., & Wang, R. (2023). Fertigation and carboxymethyl cellulose applications enhance water-use efficiency, improving soil available nutrients and maize yield in salt-affected soil. *Sustainability*, 15(12), 9602.
- Wilson, A. (2012). Preliminary test results of nano-based fluids reveal benefits for field application. *Journal of Petroleum Technology*, 64(11), 104-108.
- Wu, J., Tao, W., Wang, H., & Wang, Q. (2015). Influence of sodium carboxyl methyl cellulose on soil aggregate structure and soil water movement. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(2), 117-123.
- Yekzaban, A., Moosavi, S. A. A., Sameni, A. and Rezaei, M. (2022). Effect of Particle Size, Amounts, and Sources of Biochar on Saturated Hydraulic Conductivity in Two Texturally Different Soils. *Iranian Journal of Soil Research*, 36(3), 321-334. (In Persian).
- Yang, Q. W., Pei, X. J., & Huang, R. Q. (2019). Impact of polymer mixtures on the stabilization and erosion control of silty sand slope. *Journal of Mountain Science*, 16(2), 470-485.
- Yang, Q., Pei, X., & Fu, C. (2022). Effect of Polymer Mixtures on Physical-Chemical Properties of Sandy Soil and Plant Growth. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 889357.
- Yost, J. L., & Hartemink, A. E. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Advances in agronomy*, 158, 217-310.
- Zanin, L., Tomas, N., Cesco, S., Varanini, Z., Pinton, R. (2019). Humic substances contribute to plant iron nutrition acting as chelators and biostimulants. *Front Plant Sci*, 10(675), 1-12.
- Zhang, J., Wang, Q., Shan, Y., Guo, Y., Mu, W., Wei, K., & Sun, Y. (2022). Effect of sodium carboxymethyl cellulose on water and salt transport characteristics of saline-alkali soil in Xinjiang, China. *Polymers*, 14(14), 2884.
- Zhou, L., Monreal, C. M., Xu, S., McLaughlin, N. B., Zhang, H., Hao, G., & Liu, J. (2019). Effect of bentonite-humic acid application on the improvement of soil structure and maize yield in a sandy soil of a semi-arid region. *Geoderma*, 338, 269-280.
- Zinchenko, A., Sakai, T., Morikawa, K., & Nakano, M. (2022). Efficient stabilization of soil, sand, and clay by a polymer network of biomass-derived chitosan and carboxymethyl cellulose. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 107084.