



Effects of Bentonite and Nano-Bentonite on the Growth and Yield of Wheat in Sandy Soil under Greenhouse Conditions

Hadis Khosravian Chatroodi¹ | Alireza Raheb² | Ahmad Heidari³ | Mostafa Abdollahpour⁴ | Khodabakhsh Goodarzvand Chegini⁵

1. Department of soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Hadiskhosravian@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. Institute of Earth System Sciences, Section Soil Science, Leibniz University of Hannover, Hannover, Germany. E-mail: abdollahpour@ifbk.uni-hannover.de

5. Department of soil Science, Faculty of Agriculture, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: kchegini@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 18, 2025

Revised: Dec. 10, 2025

Accepted: Dec. 20, 2025

Published online: Feb. 2026

Keywords:

**Soil amendment,
Water use efficiency,
Physiological parameters,
Arid and semiarid regions,
Soil physical properties**

ABSTRACT

Sandy soils, commonly found in arid and semi-arid regions, offer poor growing conditions for crops like wheat owing to their inherently low ability to retain moisture and nutrients. Amending these soils with stable and eco-friendly conditioners is therefore essential to enhance their productivity. This study aimed to investigate the effects of bentonite and nanobentonite application, including 30 tonnes of bentonite with 0.75 tonnes of nanobentonite (B30NB0.75), 30 tonnes of bentonite with 2.5 tonnes of nanobentonite (B30NB2.5), and 60 tonnes of bentonite (B60), as well as positive and negative controls, on the physical properties of sandy soil and the physiological parameters of *Triticum aestivum* L. (Sirvan cultivar) under greenhouse conditions. The experiments were conducted in a completely randomized block design with three replications, and the results were analyzed using cluster analysis. The findings showed that the applications of bentonite and nanobentonite in sandy soil increased soil saturation water content (47%), decreased bulk density (15%), and improved soil aggregate stability (260%). The improvement of soil physical properties following bentonite and nanobentonite applications led to increased physiological parameters of wheat, including biomass weight, grain weight, grain number, spike length, and plant height. Cluster analysis indicated that the physiological parameters measured in wheat under the B30NB2.5 treatments were closely related to those observed in the positive control, while the B60 treatment exhibited a similar effect to the negative control. These results highlight the key role of nanobentonite in improving wheat yield in sandy soil. The mechanism of nanobentonite effectiveness is attributed to its ability to increase cation exchange capacity, enhance soil structure, improve water and nutrient retention, and reduce nutrient leaching. Overall, the combined application of bentonite and nanobentonite, particularly at the B30NB2.5 level, can be recommended as an effective and eco-friendly approach to improving the fertility of sandy soils and increasing wheat production in arid and semi-arid regions.

Cite this article: Khosravian Chatroodi, H., Raheb, A., Heidari, A., Abdollahpour, M., Goodarzvand Chegini, Kh., (2026) Effects of Bentonite and Nano-Bentonite on the Growth and Yield of Wheat in Sandy Soil under Greenhouse Conditions, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (12), 3237-3254. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.406519.670055>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.406519.670055>



EXTENDED ABSTRACT

Objectives

Wheat plays a crucial role worldwide, particularly in arid and semi-arid regions, where it serves as a strategic crop essential for ensuring food security. This importance becomes even more pronounced in areas affected by water scarcity and infertile soils, such as sandy soils. Due to their high permeability and low capacity to retain water and nutrients, sandy soils provide unfavorable conditions for the cultivation of wheat and other crops. These challenges result in reduced productivity and limitations to sustainable crop production. Therefore, improving the quality of sandy soils and increasing their capacity to retain water and nutrients through effective soil techniques is essential. One of the promising strategies for improving the physical and chemical properties of sandy soils is the use of mineral-based amendments such as bentonite and nano-bentonite. Owing to their high cation exchange capacity (CEC) and strong ability to absorb and retain water and nutrients, these mineral substances can significantly improve soil structure, increase soil fertility, and improve agricultural crop yield. The primary objective of this study was to evaluate the effects of different rates of bentonite and nano-bentonite as soil amendments on improving the physical and chemical properties of sandy soils and increasing wheat growth and its biological yield.

Materials and Methods

This study was conducted under greenhouse conditions using a completely randomized block design with three replications. The experimental treatments included 30 tonnes of bentonite combined with 0.75 tonnes of nano-bentonite per hectare (B30NB0.75), 30 tonnes of bentonite combined with 2.5 tonnes of nano-bentonite per hectare (B30NB2.5), and 60 tonnes of bentonite per hectare (B60). In addition, positive (C+) and negative (C-) control treatments were included for comparison. The positive control soil was collected from a high-yielding Inceptisol with a loamy texture, whereas the negative control soil was taken from sandy soil with low fertility. The wheat cultivar used in this study was *Sirvan*. Wheat seeds were first germinated in seed trays and then transplanted into pots pre-filled with C- soil. Before transplanting, the soil treatments were added to the pots. To evaluate the physical properties of the soil, samples were collected before transplanting and at the end of the incubation period to determine saturation water content, bulk density, and aggregate stability. In addition, some physiological parameters include the number of shrubs, biomass weight, harvest index, grain weight, plant height, number of nodes, flag leaf length, spike length, rootlets length, single shrub weight, total grain weight, and thousand-grain weight. The experimental data were statistically analyzed using Minitab 16 software through analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's test for mean comparison. Cluster analysis was also performed to identify natural patterns among the treatments. Ultimately, the treatment exhibiting the best yield with values comparable to the positive control was selected as the most effective sandy soil amendment.

Results

The results clearly showed the positive effects of the bentonite and nano-bentonite on both physical properties and physiological wheat parameters. The addition of bentonite and nano-bentonite significantly increased saturated moisture content, reduced bulk density, and enhanced aggregate stability. Among the treatments, B30NB2.5 showed the highest effect, increasing soil saturated moisture content and aggregate stability by 47% and 260% compared with C- soil, respectively, while bulk density decreased by 15%. The improvement of soil physical properties through the simultaneous application of bentonite and nano-bentonite led to enhanced physiological parameters of wheat, including biomass weight, grain weight, number of grains, spike length, and plant height. Cluster analysis shows that physiological parameters measured after the application of B30NB2.5 were comparable to those observed in the C+ soil. In contrast, the soil physical properties and wheat physiological parameters measured after the application of B60 were comparable to those of the C-soil. Therefore, the synergistic effect of bentonite and nano-bentonite in improving soil physical quality and promoting wheat growth was greater than the effect of bentonite alone.

Conclusion

The findings of this study indicate that the combined application of bentonite and nano-bentonite, particularly at the B30NB2.5 rate, can serve as a sustainable and eco-friendly soil amendment to enhance the biological yield of crops such as wheat in low-productive sandy soils of arid and semi-arid regions. To generalize these results to field conditions, however, further field-scale studies are required to evaluate the long-term stability of bentonite and nano-bentonite effects in soil, assess their economic feasibility, and investigate the behavior of nanoparticles within the soil environment.

Author Contributions

Conceptualization; Alireza Raheb and Ahmad Heidari; methodology, Alireza Raheb, Ahmad Heidari, Mostafa Abdollahpour and Khodabakhsh Goodarzvand Chegini; validation, Alireza Raheb and Ahmad Heidari ; formal analysis, Hadis Khosravian Chatroodi; investigation, Hadis Khosravian Chatroodi; writing-original draft preparation, Hadis Khosravian Chatroodi; writing-Alireza Raheb, Ahmad Heidari, Mostafa Abdollahpour; visualization, Hadis Khosravian Chatroodi; 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.

تأثیر بنتونیت و نانوبنتونیت بر رشد و عملکرد گندم در خاک شنی در شرایط گلخانه‌ای

حدیث خسرویان چترودی^۱ | علیرضا راهب^۲ | احمد حیدری^۳ | مصطفی عبدالله پور^۴ | خدابخش گودرزوند چگینی^۵

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

Hadiskhosravian@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

araheb@ut.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

ahaidari@ut.ac.ir۴. موسسه علوم زمین، بخش علوم خاک، دانشگاه لایپنیتس هانوفر، هانوفر، آلمان، رایانامه: abdollahpour@ifbk.uni-hannover.de

۵. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

kcgegini@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۲۹

تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

اصلاح خاک،

بهره‌وری آب،

شاخص‌های فیزیولوژیکی،

مناطق خشک و نیمه خشک،

ویژگی‌های فیزیکی خاک.

خاک‌های شنی مورد بهره‌وری در مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل ظرفیت کم نگهداشت آب و عناصر غذایی، شرایط بهینه برای کشت گیاهان زراعی نظیر گندم را ندارند. اصلاح این خاک‌ها با اصلاح‌کننده‌های پایدار و سازگار با محیط زیست به منظور افزایش بهره‌وری زراعی ضرورتی انکارناپذیر است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر کاربرد بنتونیت و نانو بنتونیت که شامل تیمارهای ۳۰ تن بنتونیت به همراه ۰/۷۵ تن نانوبنتونیت (B30NB0.75)، ۳۰ تن بنتونیت به همراه ۲/۵ تن نانوبنتونیت (B30NB2.5) و ۶۰ تن (B60) بنتونیت و تیمارهای شاهد مثبت و منفی است بر ویژگی‌های فیزیکی خاک شنی و شاخص‌های فیزیولوژیکی گندم رقم سیروان در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. آزمایش‌ها در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام و نتایج با روش خوشه‌بندی داده‌ها تحلیل شد. نتایج نشان داد که کاربرد بنتونیت و نانو بنتونیت در خاک شنی موجب افزایش ۴۷ درصدی رطوبت اشباع، کاهش ۱۵ درصدی جرم مخصوص ظاهری و افزایش ۳/۶ برابری پایداری خاکدانه‌ها شد. بهبود خصوصیات فیزیکی خاک پس از کاربرد بنتونیت و نانو بنتونیت موجب ارتقاء شاخص‌های فیزیولوژیکی گندم از جمله وزن زیست توده، وزن دانه، تعداد دانه، طول خوشه و ارتفاع بوته شد. نتایج تحلیل خوشه‌ای نشان داد که شاخص‌های فیزیولوژیکی اندازه‌گیری شده در گندم پس از کاربرد B30NB2.5 نزدیک به شاخص‌های مربوطه در شاهد مثبت بود. در حالی که تیمار B60 اثر گذری مشابه با شاهد منفی بر شاخص‌های فیزیولوژیکی گندم داشت. این نتایج بیان‌گر نقش کلیدی نانو بنتونیت در بهبود عملکرد گندم در خاک‌های شنی است. ساز و کار اثر گذاری نانو بنتونیت به افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، بهبود ساختمان خاک، افزایش نگهداشت آب و عناصر غذایی و کاهش آبشویی مواد مغذی نسبت داده شد. در مجموع، کاربرد هم‌زمان بنتونیت و نانو بنتونیت به‌ویژه در سطح B30NB2.5 می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر و سازگار با محیط‌زیست برای بهبود حاصل خیزی خاک‌های شنی و افزایش تولید گندم در مناطق خشک و نیمه خشک توصیه شود.

استناد: خسرویان چترودی؛ حدیث، راهب؛ علیرضا، حیدری؛ احمد، عبدالله پور؛ مصطفی، گودرزوند چگینی؛ خدابخش، (۱۴۰۴) تأثیر بنتونیت و نانوبنتونیت بر رشد و عملکرد گندم در خاک شنی در شرایط گلخانه‌ای، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۲)، ۳۲۳۷-۳۲۵۴.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.406519.670055>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.406519.670055>

مقدمه

افزایش دما، کاهش بارندگی و خشکسالی‌های پی‌درپی از پیامدهای مهم تغییرات اقلیمی در جهان و به‌طور ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این شرایط محدودیت‌های خاکی را تشدید می‌کند (Janmohammadi & Sabaghnia, 2023) و نهایتاً موجب کاهش عملکرد محصولات زراعی و باغی می‌شود (Rosenzweig et al., 2014). علاوه‌براین، افزایش دما به‌ویژه در دوره حساس گل‌دهی، اثرات منفی قابل‌توجهی بر عملکرد ارقام زراعی دارد (Zabel et al., 2021). قرارگیری گیاه در معرض گرمای شدید در این مرحله باعث کاهش عملکرد نهایی دانه می‌شود (Asseng et al., 2013; Rosenzweig et al., 2014).

کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نه تنها به مقدار و بهره‌وری مصرف آب بستگی دارد، بلکه ظرفیت خاک برای نگهداری آب نیز نقش مهمی در ارتقا کمیت و کیفیت آن‌ها ایفا می‌کنند (Banedjschafie & Durner, 2015). نزدیک به ۹۰۰ میلیون هکتار از اراضی دنیا را خاک‌های شنی تشکیل داده‌است که به‌دلیل حاصلخیزی کم و نفوذپذیری زیاد آب و آب‌شویی مواد مغذی، عملکرد محصولات زراعی در این خاک‌ها بسیار پایین است. به همین دلیل، لزوم به کارگیری راه حلی جدید برای اصلاح این خاک‌ها ضروری است (Driessen et al., 2001). از زمین‌های شنی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و ایران در صورت تأمین آب آبیاری با کیفیت مناسب می‌توان در تولید بهینه محصولات کشاورزی و در نتیجه برای تأمین امنیت غذایی بهره‌برداری کرد (Aleem et al., 2000).

کشت محصولات کشاورزی در خاک‌های با بافت درشت، مانند خاک‌های شنی، در بسیاری از نقاط جهان رایج است (Bell & Seng, 2007). از جمله روش‌های بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این نوع خاک‌ها می‌توان به استفاده از تکنیک‌های خاک‌ورزی حفاظتی برای حفظ ساختمان و کاهش فرسایش، افزودن مواد آلی به منظور ارتقاء کیفیت خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان اشاره کرد (Motavalli et al., 2003). علاوه‌براین، به‌کارگیری اصلاح‌کننده‌های خاکی مانند افزودن بیوپار (ذغال زیستی)، پلیمرهای فوق‌جاذب رطوبت و کانی‌های رسی نظیر بتونیت نقش مؤثری در بهبود کارایی خاک‌های شنی دارند (Abel et al., 2007; Suzuki et al., 2007; Benkhelifa et al., 2008; al., 2013). با این حال، شرایط نامساعد اقلیمی نظیر دمای بالا، خشکی هوا و کمبود بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کارایی اصلاح‌کننده‌های خاک را کاهش می‌دهد. به‌عنوان مثال، افزودن مواد آلی به خاک در این مناطق موجب تسریع تجزیه میکروبی آن‌ها می‌شود. بنابراین، استفاده از مواد آلی به‌منظور اصلاح خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست، بلکه از نظر زیست محیطی هم می‌تواند با افزایش انتشار گاز دی‌اکسیدکربن، به تشدید پدیده گرمایش جهانی منجر شود (Mubarak et al., 2009). علاوه‌براین، استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند زباله‌های شهری، کود دامی و کمپوست ممکن است حاوی آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین (سرب، نیکل، روی، کادمیوم، کروم و مس) و ترکیبات آلی خطرناک (بی‌فیل‌های پلی‌کلرینه و دی‌اکسین‌ها) باشند که می‌توانند منجر به آلودگی خاک شوند (Chimuka et al., 2009).

استفاده از کانی‌های رسی به‌ویژه رس بتونیت به‌عنوان راهکاری پایدار و بلند مدت برای بهبود کارایی و پایداری سیستم‌های کشاورزی در خاک‌های شنی شناخته شده‌است (Bell & Seng, 2007). رس بتونیت با افزایش ظرفیت نگهداری آب (Lazányi, 2005; Suzuki et al., 2007; Stoicescu et al., 1996)، بهبود پایداری ساختمان خاک (Suzuki et al., 2007) و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (Churchman et al., 2014; Czaban & Siebielec, 2013)، نقش مؤثری در اصلاح خاک‌های شنی دارد. ذرات رس با افزایش سطح ویژه و جذب سطحی مواد آلی باعث کاهش تجزیه و افزایش تجمع مواد آلی در خاک می‌شوند (Czaban et al., 2014). علاوه‌براین، افزودن رس بتونیت با تقویت تشکیل خاکدانه‌ها از طریق همآوری ذرات خاک، از مواد آلی در برابر تجزیه میکروبی حفاظت می‌کند (Šimanský et al., 2019).

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در حوزه نانو ذرات و تمرکز روزافزون پژوهشگران به کاربرد آن در بخش کشاورزی، مشخص شده‌است که نانوفناوری روشی مناسب برای کاهش برخی از محدودیت‌های خاکی است. از این‌رو، کاربرد نانو رس در سیستم‌های کشاورزی به‌عنوان یک راهکار نوین و کارآمد برای مقابله با چالش‌های زیست محیطی نظیر فرسایش خاک (Padidar et al., 2016)، بهبود دسترسی گیاهان به عناصر غذایی (Khan et al., 2022; Šimanský et al., 2019) و ارتقاء کیفیت خاک (Churchman et al., 2014; Czaban & Siebielec, 2013; Suzuki et al., 2007) پیشنهاد شده‌است. نانو رس‌ها به‌دلیل برخورداری از سطح ویژه بالا، هنگام ترکیب با آب به شدت متورم شده و ساختاری ژل مانند ایجاد می‌کنند. صفحات آن به‌واسطه خاصیت قطبی مولکول‌های آب، به راحتی در محیط آبی پراکنده می‌شوند و در



مقایسه با سوسپانسیون رس، مایعی غلیظتر و با گرانیوی بیش‌تر تشکیل می‌دهند (Mohamadian et al., 2018). کاربرد نانو رس - مونوموریلونیت در خاک‌های شنی، منجر به افزایش ظرفیت نگهداری آب به مقدار بیش از ۱۹ درصد شده‌است (M Padidar et al., 2016; Marjan Padidar et al., 2016). افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک به‌واسطه استفاده از نانو رس‌ها، موجب افزایش دور آبیاری و در نتیجه کاهش تعداد دفعات آبیاری محصولات کشاورزی در سطح مزرعه می‌شود (Abd-Elsalam et al., 2024). افزایش نگهداشت آب و ارتقاء ذخیره رطوبتی در خاک پس از افزودن نانو رس‌ها، احتمالاً ناشی از افزایش سطح ویژه ذرات خاک، افزایش میزان خلل‌وفرج ریز و ایجاد تعادل در توزیع اندازه ذرات خاک است (Marjan Padidar et al., 2016). علاوه‌براین، نانو رس‌ها با جذب مواد غذایی از هدر رفت آن‌ها از پروفیل خاک نیز جلوگیری می‌کنند (Abd-Elsalam et al., 2024).

با توجه به روند فزاینده بیابان‌زایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان و از جمله در ایران، فراوانی اراضی شنی و کمبود منابع آبی در کشور که تحت تأثیر تغییرات اقلیمی شدت یافته‌است، دستیابی به مقدار و نسبت بهینه نانو رس‌ها برای کاربرد در خاک‌های شنی و متعاقباً استقرار و افزایش عملکرد گیاهان زراعی و کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ موضوعی که تاکنون کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌است. از این‌رو، با توجه به مزایای بالقوه نانو رس‌ها به‌عنوان یک افزودنی نوظهور برای حفاظت از منابع خاک و آب و افزایش بهره‌وری از اراضی کشاورزی، ضرورت اصلاح خاک‌های شنی و بازگرداندن آن‌ها به چرخه تولید به شدت احساس می‌شود. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر رس بنتونیت و نانوبنتونیت در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شنی و ارزیابی اثر آن‌ها بر رشد و عملکرد گندم در شرایط گلخانه‌ای است. فرضیه این تحقیق بر این پایه استوار است که استفاده از رس بنتونیت و نانوبنتونیت می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های شنی را بهبود بخشد و در نتیجه رشد و عملکرد گندم رقم سیروان را در شرایط گلخانه‌ای افزایش دهد. علاوه‌بر این، انتظار می‌رود که استفاده هم‌زمان رس بنتونیت با نانوبنتونیت، در مقایسه با استفاده مجزای بنتونیت، به‌طور معناداری موجب بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش عملکرد گندم شود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و تعیین تیمارهای آزمایشی

در این تحقیق، از یک خاک شنی که در اراضی حاوی رسوبات بادی غیرشور در روستای نجم‌آباد، شهرستان نظرآباد، استان البرز واقع شده‌است، به‌عنوان خاک شاهد منفی (خاک شنی با عملکرد بسیار پایین و از نوع انتی سول که دارای حدود ۸۴ درصد شن بوده و به‌عنوان خاک کم‌بازده و محدودکننده رشد گیاه) نمونه‌برداری شد. موقعیت جغرافیایی این خاک و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن پیش‌تر توسط حیدری و همکاران (Heidari et al., 2024) و خسروی‌انچترودی و همکاران (Khosravian Chatroodi et al., 2025) گزارش شده‌است. همچنین، نمونه خاک شاهد مثبت (خاک زراعی با عملکرد بالای ۱۰ تن در هکتار گندم، از نوع اینسپتی سول و دارای حاصل‌خیزی بالا) از اراضی زراعی تحت کشت گندم در شهرستان قزوین نمونه‌برداری شد. خاک‌ها به آزمایشگاه گروه خاک‌شناسی دانشگاه تهران منتقل و پس از هوا خشک‌شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل پایداری خاکدانه به روش الک خشک (Kemper & Chepil, 1965)، جرم مخصوص ظاهری (BD) به روش استوانه (Blake, 1986)، رطوبت اشباع، pH و هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC) با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی تعیین شدند (Carter & Gregorich, 2007). ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم یک نرمال (Sumner & Grotzinger, 1996)، درصد کربن آلی به روش هضم تر (Carter & Gregorich, 2007)، توزیع اندازه ذرات شن، رس و سیلت و جداسازی آن‌ها بر اساس قانون استوکس انجام شد (Bronick & Lal, 2005).

تهیه و استخراج نانوبنتونیت

نانوبنتونیت با استفاده از فرآیندهای پراکنده‌سازی و ترسیب متوالی در ظروف یک لیتری و در بازه‌های زمانی هشت ساعت تهیه شد. بر اساس قانون استوکس (۱۸۵۰)، برداشت ۱۰ سانتی‌متر بالایی محلول پس از گذشت هشت ساعت، شامل ذراتی کوچک‌تر از یک میکرون (رس) خواهد بود که حداقل در یکی از ابعاد خود دارای اندازه نانویی هستند (Srasra & Trabelsi-Ayedi, 2000).

برای تهیه نانو رس بنتونیت، ابتدا ۱۰۰ گرم رس بنتونیت استخراج شده از معادن استان زنجان (با مقدار کربنات کلسیم معادل CCE) ۱/۱۵ درصد و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) برابر با ۴۲/۹۵ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم (Khosravian Chatroodi et al.,)

(2025) به استوانه مدرج یک لیتری اضافه شد. به منظور بهبود پراکندگی ذرات، ۱۵ میلی لیتر محلول پنج درصد هگزامتافسفات سدیم نیز به آن افزوده و حجم محلول با آب مقطر به یک لیتر رسانده شد. سپس، سوسپانسیون حاصل با هم زن برقی به طور مکانیکی مخلوط شد تا ذرات رس به خوبی پراکنده شوند. پس از گذشت هشت ساعت، لایه رویی سوسپانسیون (ارتفاع ۱۰ سانتی متر بالایی) که حاوی ذرات رس کوچک تر از دو میکرون بود، جمع آوری شد. این فرآیند با افزودن مجدد آب مقطر و تکرار مراحل جداسازی ادامه یافت تا مقدار کافی نانو رس تولید شود. در مرحله بعد، محلول کلرید منیزیم ۰/۱ مولار به عنوان عامل رسوب دهنده، به سوسپانسیون جمع آوری شده اضافه شد (Kunze & Dixon, 1986; Soukup et al., 2008). پس از گذشت زمان لازم و تشکیل رسوب کامل، محلول شفاف رویی با سیفون جدا و نانو رس ته نشین شده جمع آوری شد. در نهایت، نانو رس به دست آمده در آون در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد خشک و برای مراحل بعدی آزمایش نگهداری شد (Khosravian Chatroodi et al., 2025).

به منظور بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شنی (Khosravian Chatroodi et al., 2025)، ترکیبات مختلف رس بنتونیت در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار و نانورس بنتونیت در سه سطح ۰/۲۵، ۰/۷۵ و ۲/۵ تن در هکتار به کار گرفته شد. آزمایش انکوباسیون به مدت ۱۲ هفته به صورت فاکتوریل و در سه تکرار با ۳۰ تیمار آزمایشی انجام شد. هدف از این آزمایش بررسی اثرات بنتونیت و نانوبنتونیت بر ویژگی های خاک قبل از کشت گندم بود. نتایج نشان داد که تیمار بنتونیت در سطح ۳۰ تن و نانوبنتونیت در سطوح ۲/۵ و ۰/۷۵ تن در هکتار تأثیر مثبت و معنی داری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک داشتند. تجزیه واریانس داده ها نیز تأثیرات مثبت این تیمارها بر ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اشباع خاک را تأیید کرد.

بر همین اساس، افزودن بنتونیت و نانو بنتونیت به خاک شنی، تیمارهای ۳۰ تن در هکتار بنتونیت + ۲/۵ تن در هکتار نانو بنتونیت (B30*NB2.5) و ۳۰ تن در هکتار بنتونیت + ۰/۷۵ تن در هکتار نانو بنتونیت (B30*NB0.75) به عنوان مؤثرترین اصلاح کننده های خاک برای کشت گندم در گلخانه انتخاب شدند (جدول ۱). علاوه بر این، به منظور بررسی کاربرد سطوح بیش تر و منفرد رس بنتونیت بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، تیمار ۶۰ تن در هکتار بنتونیت (B60) انتخاب شد. بر این اساس، برای هر تیمار، نمونه هایی به میزان پنج کیلوگرم از خاک شاهد منفی در سه تکرار توزین و آماده شدند. پس از آن، تیمارهای منتخب به طور یکنواخت به خاک ها اضافه شدند. نمونه ها به مدت چهار هفته تحت شرایط انکوباسیون در محیط آزمایشگاهی قرار گرفتند تا امکان تثبیت و برهم کنش اصلاح کننده ها با خاک و فعال شدن ریز موجودات خاکی فراهم شود. در تیمارهای B30NB0.75 و B30NB2.5، به ترتیب ۰/۱۵ گرم و ۰/۵ گرم نانو بنتونیت توزین و در بالن حجمی ۲۵۰ میلی لیتر حاوی آب مقطر اضافه و پس از تشکیل سوسپانسیون به حجم رسانده شد. سوسپانسیون های حاوی تیمار آزمایشی مربوطه در سه نوبت متوالی تهیه و به صورت متناوب به خاک اضافه شد.

اضافه شدن تیمارهای آزمایش به صورت سوسپانسیون این امکان را فراهم می کند تا نانو ذرات رس به طور یکنواخت در پروفیل خاک توزیع شود و در نتیجه اثربخشی جذب و عملکرد نانوبنتونیت در خاک افزایش یابد. افزودن نانوبنتونیت در طول دوره انکوباسیون و هم زمان با آبیاری های منظم نمونه ها ادامه داشت؛ این آبیاری ها با هدف جبران رطوبت از دست رفته و حفظ سطح رطوبت نزدیک به رطوبت ظرفیت زراعی خاک انجام شد تا شرایط یکنواخت برای اثرگذاری مطلوب تیمار فراهم شود.

کشت گندم در گلخانه

کشت گندم در گلخانه های پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران در اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۳ انجام شد. در پایان دوره انکوباسیون، از نمونه های تیمار شده، جهت ارزیابی اثر اصلاح کننده ها بر برخی از ویژگی های فیزیکی خاک نمونه برداری انجام گرفت. ویژگی هایی از جمله جرم مخصوص ظاهری، میزان رطوبت اشباع و پایداری خاکدانه ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از انجام این آنالیزها، گلدان های پنج کیلوگرمی با خاک های تیمار شده پر شده و برای انجام آزمایش گلدانی آماده شدند. سپس مراحل کاشت نشا گندم و آماده سازی گلدان ها انجام شد. برای کشت گندم از رقم سیروان استفاده شد. برای آماده سازی بستر کاشت گندم رقم سیروان، در هر سلول از سینی های نشا، مخلوطی از کوکوپیت و پرلیت با نسبت مساوی اضافه و سپس تعداد پنج عدد بذر تیمار شده با قارچ کش کاربندازیم کشت شد. به منظور حفظ رطوبت لازم برای جوانه زنی، سینی ها با پارچه پوشانده و به صورت قطره ای آبیاری شدند. برای تسریع جوانه زنی، سینی ها در طول شب در دماهای ۲ درجه سانتی گراد و در طول روز در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. پس از گذشت ۱۴ روز و رشد مطلوب نشاها، گلدان ها با خاک های تیمار شده حاوی رس بنتونیت در سطوح ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار و نانو بنتونیت در سطوح ۰/۷۵ و ۲/۵ تن در هکتار، شاهد منفی و شاهد مثبت در سه تکرار آماده شدند (جدول ۱). برای تأمین مواد غذایی گندم، کود NPK با نسبت ۵:۱۰:۵ به گلدان ها اضافه و تا عمق ۵ سانتی متر با خاک مخلوط شد. نشاها در شرایط کنترل شده گلخانه ای و با تعداد ۳ نشا در هر گلدان کاشته شدند.

در مدت زمان آزمایش، آبیاری بر اساس وزن گلدان‌ها انجام شد. برای کنترل آفات، از سم کنفیدور همراه با مایع ظرفشویی استفاده شد (شکل ۱).

جدول ۱- تیمارهای آزمایشی برای کشت گندم در گلخانه

شماره	تیمار آزمایشی	علامت اختصاری
۱	۳۰ تن بنتونیت در هکتار + ۲/۵ تن نانو بنتونیت در هکتار	B30*NB2.5
۲	۳۰ تن بنتونیت در هکتار + ۰/۷۵ تن نانو بنتونیت در هکتار	B30*NB0.75
۳	۶۰ تن بنتونیت در هکتار	B60
۴	شاهد مثبت (خاک قزوین با بافت لومی)	C+
۵	شاهد منفی (خاک نظرآباد با بافت لوم شنی)	C-

بیست روز پس از ظهور خوشه‌ها، تمامی گیاهان وارد مرحله رسیدگی فیزیولوژیک و زردی کامل شدند. به‌منظور تسریع در فرآیند خشک‌شدن اندام‌های هوایی، سیستم تهویه (فن و پد) غیرفعال شد و آبیاری و تغذیه گیاهان به‌طور کامل متوقف شد. پس از تکمیل دوره رشد سه ماهه و رسیدگی کامل، عملیات برداشت گیاهان انجام گرفت. در هر گلدان، پارامترهای فیزیولوژیکی شامل تعداد بوته، وزن زیست توده و شاخص برداشت اندازه‌گیری شدند. علاوه بر این، ویژگی‌های هر بوته شامل وزن دانه، ارتفاع بوته، تعداد گره، تعداد برگ، تعداد دانه، طول برگ پرچم، طول خوشه، طول ریشه‌چه، وزن تک بوته، وزن کل دانه و وزن هزار دانه به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شدند. پس از برداشت گندم، نمونه خاک از هر یک از گلدان‌ها تهیه و برخی از پارامترهای فیزیکی خاک، نظیر رطوبت اشباع، جرم مخصوص ظاهری و میزان پایداری خاکدانه اندازه‌گیری شد (Abd El-Hady & Eldardiry, 2016).



شکل ۱- مراحل کاشت، داشت و برداشت در کشت گندم در گلخانه

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 انجام شد. آزمایش بر اساس طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. داده‌های آزمایشی با استفاده از روش تحلیل واریانس (ANOVA)، مقایسه میانگین به روش آزمون توکی و خوشه‌بندی داده‌ها تحلیل شدند. تجزیه و تحلیل خوشه‌ای یک روش آماری چند متغیره است که تشابهات بین نمونه‌ها را ارزیابی می‌کند (Frades & Matthiesen, 2009).

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شاهد مثبت و منفی

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک شاهد مثبت و شاهد منفی در جدول ۲ ارائه شده‌است. خاک شاهد مثبت یک خاک این‌سپتی‌سول با بافت لومی بوده که عملکرد زراعی آن بیش از ۱۰ تن در هکتار گندم (ثبت عملکرد در مزرعه) است. خاک شاهد مثبت با جرم مخصوص ظاهری ۱/۲۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت اشباع ۴۵/۸ درصد، دارای تخلخل مناسب و توانایی بالا در حفظ رطوبت است. در مقابل، خاک شاهد منفی با جرم مخصوص ۱/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت اشباع ۲۲/۱ درصد، دارای تخلخل و توانایی نگهداشت آب کم‌تری است که منجر به بروز محدودیت‌های آبی و خاکی در طی دوره رشد گندم می‌شود. ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بیش‌تر در خاک شاهد مثبت (۵/۵۰ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) در مقایسه با خاک شاهد منفی (۳/۳۲ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) (جدول ۲)، بیان‌گر توانایی نسبی بیش‌تر خاک شاهد مثبت در نگهداشت عناصر غذایی مورد نیاز گندم است. در مجموع، ویژگی‌های مطلوب‌تر فیزیکی و شیمیایی در خاک شاهد مثبت در مقایسه با شاهد منفی، شرایط بهتری را برای رشد و افزایش عملکرد گندم فراهم می‌کند.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شاهد مثبت و منفی

تیمار	جرم مخصوص ظاهری	رطوبت اشباع	شن رس سیلت	بافت	کربن آلی	pHe	ECe	ظرفیت تبادل کاتیونی
	(g cm ⁻³)		(درصد)			-	(μS cm ⁻¹)	(cmol(c) kg ⁻¹)
شاهد مثبت	۱/۲۳	۴۲/۸	۴۳/۷	۱۸/۸	۳۷/۵	Loam	۷/۹	۲۶۳
شاهد منفی	۱/۶۶	۳۲/۱	۸۴/۰	۱۱/۱	۴/۹	Sandy Loam	۸/۰	۳۵۰

* pH_e: اسیدیته عصاره اشباع خاک، *EC_e: هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (μS cm⁻¹).

خصوصیات فیزیکی خاک گلدان‌ها

کاربرد رس بنتونیت و نانوبنتونیت موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک در مقایسه با تیمار شاهد منفی شد (جدول ۳). با افزودن تیمارهای رس شامل ۳۰ تن بنتونیت و ۰/۷۵ تن نانو بنتونیت در هکتار (B30*NB0.75)، جرم مخصوص ظاهری خاک از ۱/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در شاهد منفی به ۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافت. در تیمار B30*NB2.5 که ترکیبی از ۳۰ تن بنتونیت و ۲/۵ تن نانو بنتونیت بود، مقدار جرم مخصوص ظاهری به ۱/۲۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافت. همچنین، در تیمار B60 که تنها شامل ۶۰ تن بنتونیت بدون کاربرد نانوبنتونیت بود، جرم مخصوص ظاهری به ۱/۳۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافت. به‌طور کلی، جرم مخصوص ظاهری خاک در طی انکوباسیون اولیه (پیش از کشت گندم) به‌صورت شاهد منفی < B30NB2.5 < B30NB0.75 < B60 کاهش یافت.

در پایان دوره کشت، جرم مخصوص ظاهری در خاک شاهد منفی از ۱/۶۶ به ۱/۵۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافت. علاوه‌بر این، با افزودن تیمارهای B30*NB2.5، B60 و B30*NB0.75، جرم مخصوص ظاهری خاک شنی ۱/۵۰، ۱/۴۴ و ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد، که به‌ترتیب معادل ۱۲، ۱۸ و ۱۲ درصد کاهش نسبت به شاهد منفی است. از میان تیمارهای آزمایشی، کم‌ترین جرم مخصوص ظاهری در پایان دوره کشت در تیمار B30*NB2.5 و شاهد مثبت با مقدار ۱/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب مشاهده شد. در آزمایش مشابه (بدون کشت گندم)، کاربرد بنتونیت و نانو بنتونیت با نسبت‌های مختلف به خاک شنی باعث کاهش میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک به میزان ۱۷/۵ درصد شد. کاربرد ۳۰ تن بنتونیت با ۲/۵ تن نانو بنتونیت در هکتار با کاهش ۲۳ درصدی نسبت به تیمار شاهد، به‌طور مشابه با نتایج این تحقیق، بهترین تأثیر را در کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شنی نشان داد (Khosravian Chatroodi).



(et al., 2025). کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک پس از کاربرد بنتونیت را می‌توان به افزایش حجم توده خاک، بازآرایی ذرات و بهبود ساختمان خاک ناشی از افزایش پیوند میان ذرات نسبت داد که در نهایت به ایجاد فضای بیش‌تر بین ذرات و کاهش چگالی منجر می‌شود (Weijing et al., 2025). در همین راستا، کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک نظیر زئولیت-بنتونیت به میزان ۱/۵، ۲/۰ و ۲/۵ تن در هکتار، به‌ترتیب موجب کاهش ۳/۰، ۴/۲ و ۷/۲ درصدی جرم مخصوص ظاهری در مقایسه با شاهد شده‌است که علت آن، افزایش تخلخل کل و بهبود ساختار خاک از طریق خاصیت پیونددهندگی ذرات خاک توسط اصلاح‌کننده‌های خاک است (Omran et al., 2002). افزودن بنتونیت به خاک‌های شنی باعث افزایش درصد ذرات ریز در خاک شده و در نتیجه، بهبود معنی‌داری در خصوصیات فیزیکی نظیر جرم مخصوص ظاهری و ساختمان خاک شنی ایجاد می‌کند (Lei et al., 2022; Wahba et al., 2020). نانو بنتونیت با ویژگی‌هایی چون یکنواختی بیش‌تر، سطح ویژه بزرگ‌تر، تخلخل بیش‌تر، ساختار با پیوندهای مستحکم‌تر و تعداد بیش‌تری از سطوح فعال جذب، ماده‌ای بسیار کارآمد برای اصلاح خاک‌های شنی محسوب می‌شود (Hend et al., 2016).

افزایش نسبی جرم مخصوص ظاهری بعد از کشت نسبت به جرم مخصوص اندازه‌گیری شده طی انکوباسیون اولیه می‌تواند به‌دلیل تغییرات فیزیکی ناشی از آبیاری و فشردگی ناچیز خاک تحت تأثیر ریشه‌ها باشد، ولی این افزایش به اندازه‌ای نبوده که به مقدار جرم مخصوص خاک شاهد منفی قبل از کشت (۱/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب) برسد. تغییرات مشاهده‌شده در جرم مخصوص ظاهری در پایان دوره کشت را می‌توان ناشی از فشردگی جزئی خاک در اثر نفوذ آب بعد از آبیاری و نیز توسعه ریشه‌ها دانست (Kumari & Mohan, 2021). در طول دوره‌ی کشت و پس از آن، تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی خاک مشاهده می‌شود که می‌توان آن‌ها را به چند عامل کلیدی نسبت داد. نخست، فشردگی طبیعی خاک در گلدان‌های کشت‌شده، پدیده‌ای متداول است (Kumari & Mohan, 2021). این فشردگی به‌دلیل فضای محدود گلدان، تکرار آبیاری، رشد ریشه‌ها، و تغییرات حجمی خاک (انقباض و انبساط) در اثر تغییرات رطوبتی، رخ می‌دهد و منجر به کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش جرم مخصوص ظاهری می‌شود. عامل مهم دیگر، شست‌وشو ذرات بنتونیت و نانو بنتونیت جذب سطحی نشده در محلول خاک است که در اثر نفوذ آب رخ می‌دهد. زیرا به‌دلیل اندازه بسیار ریز این مواد، امکان شست‌وشوی ذرات رس در فضای بین ذرات درشت‌تر افزایش می‌یابد. این فرآیند می‌تواند منجر به پر شدن فضاهای خالی بین ذرات درشت‌تر در لایه‌های زیرین خاک و در نتیجه افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک شود. از سوی دیگر، ریشه‌های نازک و فیبری گیاهان می‌توانند با نفوذ به درون خاک یا اشغال خلل‌و‌فرج درشت، موجب فشردگی بیش‌تر خاک و در نتیجه افزایش تراکم در ناحیه ریزوسفر شوند (Bruand et al., 1996). همچنین، چرخه‌های متناوب خیس و خشک شدن که بر اثر آبیاری و تبخیر و تعرق ایجاد می‌شوند، ممکن است نیروهای فشاری در خاک وارد کرده و باعث کاهش خلل‌و‌فرج خاک شوند (Jin et al., 2017).

کاربرد $B30*NB2.5$ و $B30*NB0.75$ ، رطوبت اشباع خاک را از ۳۲ درصد در خاک شاهد منفی به‌ترتیب به ۳۶ و ۳۷ درصد افزایش داد (جدول ۳). همچنین، پس از کاربرد $B60$ ، مقدار رطوبت خاک ۳۴ درصد اندازه‌گیری شد. بیش‌ترین رطوبت اشباع در شاهد مثبت معادل ۴۶ درصد اندازه‌گیری شد. به‌طور کلی، رطوبت اشباع خاک به‌صورت شاهد منفی $B30*NB0.75 > B30*NB2.5 > B60$ شاهد مثبت افزایش یافت. در پایان دوره کشت گندم، رطوبت اشباع شاهد منفی از ۳۲ به ۳۸ درصد افزایش یافت. علاوه‌بر این، با کاربرد $B30*NB0.75$ و $B30*NB2.5$ ، رطوبت اشباع خاک به‌ترتیب از ۳۶ و ۳۷ درصد (قبل از کشت گندم) به ۴۲ و ۴۷ درصد افزایش یافت. با کاربرد $B60$ ، مقدار رطوبت اشباع خاک از ۳۴ درصد (قبل از کشت گندم) به ۳۹ درصد افزایش یافت. در خاک شاهد مثبت، رطوبت اشباع خاک پس از کشت معادل ۶۰ درصد اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج در پایان دوره کشت گندم با انکوباسیون اولیه نشان می‌دهد که در تمامی تیمارهای آزمایشی، رطوبت اشباع خاک افزایش یافته‌است. بیش‌ترین افزایش رطوبت اشباع خاک مربوط به شاهد مثبت با ۳۰ درصد افزایش بوده‌است. در تیمار شاهد منفی نیز مقدار رطوبت اشباع خاک از ۳۲ درصد به ۳۸ درصد افزایش پیدا کرد که برابر با ۱۹ درصد افزایش نسبت به مقدار اولیه است. مطابق با جدول ۳ در بین تیمارهای آزمایشی، $B30NB2.5$ بیش‌ترین افزایش رطوبت اشباع خاک را با ۳۰ درصد داشته که بیان‌گر اثربخشی بالای این ترکیب در افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک پس از رشد گیاه است. تیمار $B60$ و $B30NB0.75$ نیز هر دو با ۱۷ و ۱۵ درصد افزایش، اثرات نسبتاً مثبتی را بر رطوبت اشباع خاک نشان می‌دهند. افزایش رطوبت اشباع خاک در تیمارهای مختلف را می‌توان به بهبود ساختار خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب نسبت داد. بنتونیت و نانو بنتونیت با دارا بودن ویژگی تورم‌پذیری و سطح ویژه بالا، موجب افزایش تخلخل خاک و تشکیل خاک‌دانه‌های پایدارتر شده‌اند که در نتیجه توانایی خاک در نگهداری آب در حالت اشباع بهبود یافته‌است. از سوی دیگر، کشت گندم نیز می‌تواند نقش مؤثری در افزایش رطوبت اشباع خاک ایفا کند. رشد ریشه‌ها و ترشحات ریشه‌ای در طول فصل رشد موجب افزایش فعالیت میکروبی و نهایتاً موجب افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها می‌شود (Chen et al., 2019).

(Zarebanadkouki et al., 2016). همچنین، توسعه شبکه ریشه‌ای در خاک به ایجاد فضاهای خالی بیش‌تر کمک کرده که در افزایش تخلخل مؤثر بوده و ظرفیت نگهداری آب افزایش یافته‌است (Grassmann et al., 2020). بنابراین، ترکیب اثرات تیمارهای اصلاحی با اثرات بیولوژیکی ناشی از کشت گندم، موجب بهبود قابل توجه رطوبت اشباع خاک پس از پایان دوره رشد شده‌است. گیاهان با رشد ریشه و بهره‌گیری از صفات عملکردی نظیر میزان انشعاب ریشه و توانایی نفوذ به لایه‌های متراکم خاک، موجب تغییر در ساختار فیزیکی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک می‌شوند (Benard et al., 2016; Bengough, 2012; Carminati et al., 2010; Gregory et al., 2010). هنگامی که ریشه به درون خاک نفوذ می‌کند، در ناحیه تماس ریشه و خاک به‌طور مداوم تغییر در آرایش ذرات و خاکدانه‌های خاک ایجاد می‌شود و بر فرآیندهایی مانند تجمع ذرات، ایجاد تخلخل و ظرفیت نگهداری آب تأثیر می‌گذارند (Gregory et al., 2010; Hinsinger et al., 2009; Mueller et al., 2019).

مقایسه نتایج پایداری خاکدانه در انکوباسیون اولیه خاک و پس از کشت گندم نسبت به شاهد منفی نشان داد که پایداری خاک‌دانه‌ها در تمامی تیمارها افزایش یافته‌است. در بین تیمارهای رسی، بیش‌ترین پایداری خاکدانه در B30NB0.75 مشاهده شد. به‌طور کلی، پایداری خاکدانه طی انکوباسیون اولیه و پس از دوره کشت گندم به‌صورت شاهد مثبت < B30*NB0.75 < B30*NB2.5 < B60 < شاهد منفی کاهش یافت.

جدول ۳- برخی از پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده خاک گلدان‌ها برای انکوباسیون اولیه (قبل) و پس از دوره کشت گندم (بعد).

تیمار	جرم مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)			رطوبت اشباع (درصد)			پایداری خاکدانه (میلی‌متر)		
	قبل	بعد	P-Value	قبل	بعد	P-Value	قبل	بعد	P-Value
B30*NB0.75	۱/۳۲	۱/۵۰	۰/۰۰۲	۳۶	۴۲	۰/۰۰۴	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۱۱۳
B30*NB2.5	۱/۲۸	۱/۴۴	۰/۰۲۹	۳۷	۴۷	۰/۰۰	۰/۳۷	۰/۴۰	۰/۰۹۳
B60	۱/۳۷	۱/۴۷	۰/۰۰۱	۳۴	۳۹	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۰۵۴
شاهد مثبت	۱/۲۳	۱/۳۸	۰/۰۰۱	۴۶	۶۰	۰/۰۰۱	۱/۰۸	۱/۵۳	*
شاهد منفی	۱/۶۶	۱/۵۳	۰/۰۱۷	۳۲	۳۸	۰/۰۵۷	۰/۱۱	۰/۳۱	*

خصوصیات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گندم در کشت گلخانه‌ای

نتایج اثر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیکی گندم در شرایط گلخانه‌ای در جدول ۴ ارائه شده‌است. کاربرد ۳۰ تن بنتونیت در هکتار و ۰/۷۵ تن نانو بنتونیت در هکتار به خاک آزمایشی، وزن زیست‌توده گندم را ۶۷ درصد نسبت به شاهد منفی افزایش داد. مطابق با جدول ۴، با افزایش مقدار نانو بنتونیت از ۰/۷۵ به ۲/۵ تن بر هکتار، در مقدار ثابت بنتونیت (یعنی ۳۰ تن بر هکتار)، وزن زیست‌توده از ۱۰۸۴ گرم به ۱۴۳۵ رسید که این مقدار ۲/۲۱ برابر بیش‌تر از شاهد منفی است. افزایش مقدار بنتونیت از ۳۰ به ۶۰ تن در هکتار بدون عدم کاربرد نانو بنتونیت منجر به کاهش وزن زیست‌توده گندم از ۱۴۳۵ گرم به ۵۹۸ گرم شد که معادل با کاهش ۶۰ درصدی نسبت به شاهد منفی است. بیش‌ترین وزن زیست‌توده گندم در شاهد مثبت به مقدار ۲۰۷۷ مشاهده شد. کاربرد ۳۰ تن بنتونیت در هکتار و ۰/۷۵ تن نانو بنتونیت در هکتار موجب افزایش وزن دانه در متر مربع از ۵۸ گرم در شاهد منفی به ۱۱۶ گرم شد که معادل با ۲ برابر شاهد منفی است. با افزایش مقدار نانو بنتونیت از ۰/۷۵ به ۲/۵ تن در هکتار با کاربرد برابر رس بنتونیت (۳۰ تن در هکتار)، وزن دانه در هر متر مربع گلدان به‌ترتیب از ۱۱۶ به ۱۱۱ گرم کاهش یافت، اما همچنان ۹۱ درصد بیش‌تر از شاهد منفی است. در تیمار حاوی ۶۰ تن بنتونیت در هکتار و در عدم کاربرد نانو بنتونیت، وزن دانه در هر متر مربع گلدان به ۷۶ گرم کاهش یافت که تنها ۳۱ درصد افزایش نسبت به شاهد منفی را نشان می‌دهد. بیش‌ترین وزن دانه در شاهد مثبت یعنی ۱۷۹ گرم در متر مربع مشاهده شد (جدول ۴).

کاربرد ۳۰ تن بنتونیت و ۰/۷۵ تن نانو بنتونیت در هکتار تعداد دانه‌ها در هر بوته را به ۱۰ عدد افزایش داد که ۲۵ درصد افزایش نسبت به شاهد منفی (یعنی ۸ دانه در هر بوته) است. با افزایش نانو بنتونیت به ۲/۵ تن در هکتار همراه با ۳۰ تن بنتونیت بر هکتار، تعداد دانه‌ها در هر بوته به ۱۷ عدد افزایش یافت که معادل با ۲/۱۲ برابر افزایش نسبت به شاهد منفی است. در کاربرد ۶۰ تن بنتونیت در هکتار بدون کاربرد نانو بنتونیت، تعداد دانه‌ها به ۶ عدد در هر بوته کاهش یافت که معادل ۲۵ درصد کم‌تر از شاهد منفی است. بیش‌ترین تعداد دانه در هر بوته معادل ۱۷ دانه بود که به‌طور هم‌زمان در شاهد مثبت و کاربرد ۳۰ تن بنتونیت بر هکتار و ۲/۵ تن نانو بنتونیت بر هکتار مشاهده شد. افزودن ۳۰ تن بنتونیت و ۰/۷۵ تن نانو بنتونیت بر هکتار، همراه با افزایش نانو بنتونیت به ۲/۵ تن بر هکتار و ۶۰ تن بنتونیت در هکتار، وزن تک بوته را از ۰/۶ گرم در شاهد منفی به ۱ گرم افزایش داد که نشان‌دهنده ۶۷ درصد افزایش نسبت به شاهد منفی است.



بیشترین وزن تک بوته در شاهد مثبت با ۲ گرم مشاهده شد (جدول ۴).

از نظر طول خوشه، کاربرد ۳۰ تن بنتونیت و ۰/۷۵ تن نانو بنتونیت منجر به افزایش طول خوشه به ۶ سانتی متر شد که نسبت به شاهد منفی (۵ سانتی متر) حدوداً ۲۰ درصد افزایش را نشان داد. کاربرد ۳۰ تن بنتونیت و ۲/۵ تن نانوبنتونیت طول خوشه را از ۵ سانتی متر در شاهد منفی به ۷ سانتی متر (۴۰ درصد) افزایش داد. کاربرد ۶۰ تن در هکتار بنتونیت تغییری در طول خوشه ایجاد نکرد و بیشترین افزایش طول خوشه در شاهد مثبت (۸ سانتی متر) مشاهده شد. در ارتباط با پارامتر وزن هزار دانه، کاربرد B320NB0.75 منجر به دستیابی به مقدار ۱۹ گرم شد که نسبت به شاهد منفی (۲۳ گرم) حدود ۱۷ درصد کاهش را نشان داد. تیمار B30NB2.5 با وزن هزار دانه ۱۴ گرم نسبت به شاهد منفی ۳۹ درصد کاهش داشت. بیشترین وزن هزار دانه در تیمار B60 با مقدار ۴۶ گرم مشاهده شد که نسبت به شاهد منفی ۱۰۰ درصد افزایش را در جدول ۴ نشان داد. در برخی از پارامترها مانند ارتفاع بوته، تعداد گره، تعداد برگ، وزن دانه، وزن کل دانه تک بوته، وزن کل دانه‌ها و شاخص برداشت، تفاوت معنی‌داری بین تیمارها مشاهده نشد. این نتایج نشان می‌دهد اثرگذاری تیمارهای آزمایشی روی صفات زراعی و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گندم یکسان بوده‌است. کاربرد B30*NB0.75 و B30*NB2.5، ارتفاع بوته به ۷۷ و ۶۴ سانتی متر افزایش داد که به ترتیب ۲۲ و ۹ سانتی متر بیش‌تر از ارتفاع بوته در شاهد منفی (۵۵ سانتی متر) است. کاربرد B60 نیز با ارتفاع ۵۷ سانتی متر موجب افزایش جزئی ارتفاع بوته نسبت به شاهد منفی شد. ارتفاع بوته در شاهد مثبت ۷۸ سانتی متر مشاهده شد. در تیمار B30*NB0.75، تعداد گره ۴ عدد بود که نسبت به شاهد منفی تغییری نداشت. کاربرد B30*NB2.5 و B60 موجب کاهش تعداد گره از ۴ در شاهد منفی به ۳ شد. در مقابل، بیشترین تعداد گره در شاهد مثبت (یعنی ۵ گره) مشاهده شد. تعداد برگ در تیمار کاربرد ۳۰ تن بنتونیت به همراه ۰/۷۵ تن نانو بنتونیت در هکتار (B30NB0.75) به ۵ عدد رسید که نسبت به شاهد منفی (۴ عدد) افزایش ۲۵ درصدی را نشان داد. در تیمار B30NB2.5، تعداد برگ با مقدار ۴ مشابه شاهد منفی بود. در مقابل، در B60 و شاهد مثبت تعداد برگ به ۶ عدد افزایش یافت. مطابق با جدول ۴ وزن کل دانه در هر بوته در پایان دوره کشت گندم نیز تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت. با کاربرد B30NB0.75، وزن کل دانه در هر بوته یک گرم بود که نسبت به شاهد منفی (۰/۵ گرم) افزایش قابل توجه‌ای نشان داد. وزن کل دانه در هر بوته با کاربرد B30NB2.5 و B60 به ترتیب به ۲ و ۸ گرم افزایش یافت. بیشترین وزن کل دانه در هر بوته در تیمار B60 با مقدار ۸ گرم ثبت شد. در نهایت، شاخص برداشت در تیمار B30NB0.75 برابر با ۱۴ درصد بود که کاهش قابل توجهی نسبت به شاهد منفی (۲۷ درصد) داشت. تیمار B30NB2.5 نیز با مقدار ۱۹ درصد هم‌چنان مقدار کم‌تری نسبت به شاهد منفی نشان داد. در مقابل، تیمار B60 با ثبت مقدار ۳۶ درصد، افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به شاهد منفی داشت. شاخص برداشت در شاهد مثبت نیز با مقدار ۱۸ درصد، نسبت به شاهد منفی کاهش نشان داد.

جدول ۴- پارامترهای فیزیولوژیک گندم در پایان دوره کشت

پارامترهای گیاهی (واحد)	تیمارهای آزمایشی			
	B30*NB0.75	B30*NB2.5	B60	شاهد مثبت
وزن زیست توده در متر مربع	۱۰۸ ^{bc}	۱۴۳ ^b	۵۹ ^c	۲۰۷ ^a
وزن دانه در مترمربع (g)	۱۱۶ ^b	۱۱۱ ^b	۷۶ ^{bc}	۱۷۹ ^a
ارتفاع بوته (cm)	۷۷ ^a	۶۴ ^a	۵۷ ^a	۷۸ ^a
*تعداد گره (n)	۴ ^a	۳ ^a	۳ ^a	۵ ^a
*تعداد برگ (n)	۵ ^a	۴ ^a	۶ ^a	۶ ^a
*تعداد دانه در یک بوته (n)	۱۰ ^b	۱۷ ^a	۶ ^b	۱۷ ^a
طول خوشه (cm)	۶ ^{bc}	۷ ^{ab}	۵ ^d	۸ ^a
وزن تک بوته (g)	۱ ^b	۱ ^b	۱ ^{bc}	۲ ^a
وزن دانه (g)	۰/۳ ^a	۰/۳ ^a	۰/۳ ^a	۰/۳ ^a
وزن کل دانه تک بوته (g)	۱ ^a	۲ ^a	۸ ^a	۲ ^a
وزن کل دانه‌ها (g)	۱ ^a	۲ ^a	۸ ^a	۲ ^a
وزن هزار دانه (g)	۱۹ ^{ab}	۱۴ ^b	۴۶ ^a	۲۰ ^{ab}
شاخص برداشت (%)	۱۴ ^a	۱۹ ^a	۳۶ ^a	۱۸ ^a

*اعداد اعشاری هر یک از پارامترهای گیاهی بر اساس میانگین نتایج تکرارها ارائه شده‌است.

*اعداد در هر ستون با حروف کوچک نشان‌دهنده نتایج آزمون توکی هستند؛ مقادیر دارای حروف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی‌داری ندارند.

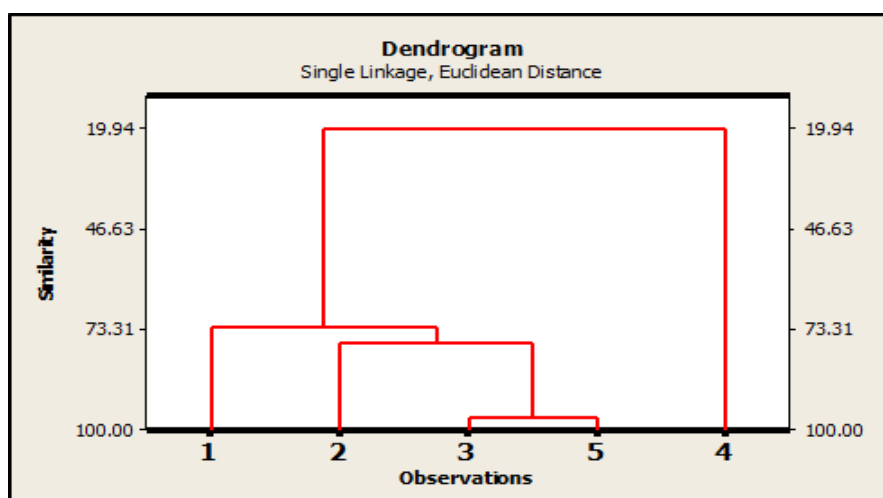
نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب بنتونیت و نانو بنتونیت تأثیر مثبتی بر رشد گندم داشته‌است، به‌گونه‌ای که در مقایسه با شاهد منفی، موجب ارتقاء پارامترهای فیزیولوژیکی گندم شده‌است. این اثرات مطلوب احتمالاً ناشی از بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند افزایش ظرفیت نگهداشت آب و بهبود ساختمان خاک است. با این حال، کاربرد بنتونیت به‌تنهایی در تیمار B60 تأثیر کاهشی بر برخی از صفات فیزیولوژیکی مانند وزن زیست توده در هر مترمربع، وزن دانه در مترمربع، تعداد گره، تعداد دانه در یک بوته و طول خوشه نسبت به شاهد منفی داشت. بنابراین، کاربرد آن به تنهایی در خاک یک عامل محدودکننده برای رشد گندم است. از سوی دیگر، نانو بنتونیت با داشتن خاصیت تورم‌پذیری بالا، می‌تواند ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش داده و شرایط زیستی بهتری برای گیاه و نیز برای فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید فراهم آورد (Mi et al., 2018). که در نهایت با افزایش تولید هورمون‌های رشد، به بهبود هدایت روزنه‌ای و افزایش شاخص سطح برگ (LAI) و غلظت کلروفیل و بهبود عملکرد دانه منجر می‌شود (Zaheer et al., 2019).

مطابق گزارش El Nagar et al. (۲۰۲۱)، کاربرد نانو بنتونیت و بنتونیت سبب افزایش اجزای عملکردی گندم شده‌است که این موضوع عمده‌تأ ناشی از بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک و بهینه‌سازی مدیریت تغذیه گیاه است. این اثر به‌ویژه در خاک‌های شنی به دلیل افزایش دسترسی به عناصر پرمصرف مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم است. کانی‌های رسی از طریق جذب سطحی، عناصر غذایی را در خاک نگه می‌دارند (Abdolahpour et al., 2014). این ویژگی امکان آزادسازی تدریجی مواد غذایی همگام با نیازهای گیاه را فراهم کرده و موجب افزایش کارایی جذب عناصر در ناحیه ریشه می‌شود (El Nagar et al., 2021).

تجزیه خوشه‌ای

گروه‌بندی اثربخشی بنتونیت و نانو بنتونیت بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

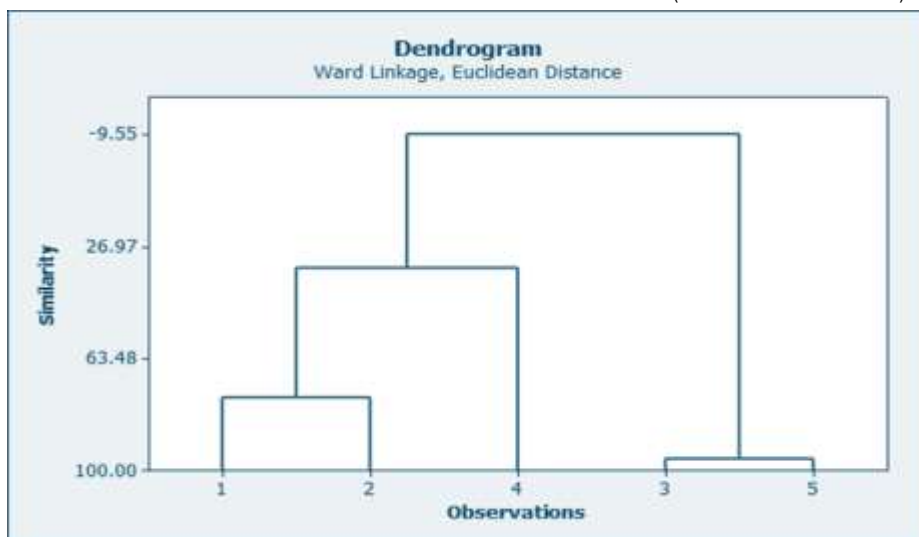
به‌منظور گروه‌بندی اثربخشی تیمارهای آزمایشی بنتونیت و نانو بنتونیت بر ویژگی‌های فیزیکی خاک از تحلیل خوشه‌ای به روش وارد (Ward) استفاده شد (شکل ۲). در این تحلیل، تیمارهای آزمایشی با اعداد ۱ تا ۵ مشخص شده‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌است. بر اساس تجزیه و تحلیل خوشه‌ای تیمارهای آزمایشی به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل شاهد مثبت (تیمار ۴) است و گروه دوم شامل B30NB0.75 (تیمار ۱)، B30NB2.5 (تیمار ۲) و B60 (تیمار ۳) و شاهد منفی (تیمار ۵) است. تیمارهای حاوی ترکیب بنتونیت و نانو بنتونیت (تیمارهای ۱ و ۲) بیش‌ترین شباهت را به یکدیگر داشتند. این موضوع بیان‌گر آن است که کاربرد هم‌زمان بنتونایت و نانو بنتونیت می‌تواند خصوصیات فیزیکی خاک شنی از جمله درصد رطوبت اشباع، جرم مخصوص ظاهری و پایداری خاک را بهبود بخشد و شرایط فیزیکی خاک را به سمت عملکرد بیش‌تر گندم سوق دهد. در مقابل، تیمار بنتونیت ۶۰ (تیمار ۳) در کنار شاهد منفی (تیمار ۵) در یک زیرگروه مجزا قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده شباهت زیاد این دو تیمار و اثرگذاری کم کاربرد منفرد بنتونیت در مقادیر زیاد بر اصلاح خاک شنی است. به عبارت دیگر، کاربرد منفرد بنتونیت با غلظت زیاد توانسته ویژگی‌های فیزیکی خاک را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد.



شکل ۲- دندروگرام خصوصیات فیزیکی خاک در پایان دوره کشت گلدان‌ها پس از افزودن تیمارهای آزمایشی و مقایسه عملکرد هر یک از تیمارها با یکدیگر. اعداد ۱ تا ۵ نشان‌دهنده تیمارهای آزمایشی است که جزئیات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌است. روش مورد استفاده در این تحلیل، نزدیک‌ترین همسایگی (Single Linkage) با فاصله اقلیدسی (Euclidean Distance) است.

گروه‌بندی اثربخشی بنتونیت و نانو بنتونیت بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گندم

بر اساس تجزیه و تحلیل خوشه‌ای اثربخشی تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گندم، تیمارها به دو گروه اصلی تفکیک شدند (شکل ۳). گروه اول شامل B30NB0.75 (تیمار ۱)، B30NB2.5 (تیمار ۲) و شاهد مثبت (تیمار ۴)، در حالی که گروه دوم شامل B60 (تیمار ۳) و شاهد منفی (تیمار ۵) بودند. بر این اساس، تیمارهای B30NB0.75 و B30NB2.5 در مرحله نخست با یکدیگر یک زیرگروه را تشکیل داده‌اند که نشان‌دهنده شباهت زیاد آن‌ها در اثرگذاری بر شاخص‌های فیزیولوژیکی گندم است. در ادامه، این دو تیمار همراه با شاهد مثبت در یک گروه ادغام شدند که نشان‌دهنده هم‌راستایی نسبی این سه تیمار در بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی گندم است. در مقابل، تیمار B60 با شاهد منفی در یک گروه قرار گرفته‌اند و فاصله زیادی از تیمارهای حاوی نانو بنتونیت و شاهد مثبت دارند. گروه‌بندی متمایز تیمارهای آزمایشی بیان‌گر نقش تعیین‌کننده نانو بنتونیت در بهبود رشد و عملکرد گندم در خاک‌های شنی است. اثر مثبت نانو بنتونیت بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گندم به‌ویژه در تیمار B30NB2.5 مشهود بود، به گونه‌ای که این تیمار کم‌ترین فاصله را با شاهد مثبت نشان داد. اگرچه مقدار بنتونیت در B30NB0.75 و B30NB2.5 یکسان بود (یعنی ۳۰ تن در هکتار)، اما افزایش سطح نانو بنتونیت در تیمار B30NB2.5 موجب بهبود عملکرد گندم شده‌است. افزودن نانو رس مایع به خاک شنی موجب بهبود ساختمان خاک، افزایش نگهداشت آب و عناصر غذایی و کاهش فرسایش می‌شود، عواملی که همگی در نهایت به افزایش رشد و عملکرد گیاهان زراعی کمک می‌کنند (El Nagar et al., 2021; Indira et al., 2021). علاوه بر این، کاربرد نانو رس مایع با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک از هدر رفت آب و عناصر غذایی از پروفیل خاک جلوگیری کرده و نیاز به آبیاری مداوم را کاهش می‌دهد (Kananizadeh et al., 2011). واکنش شبدر مصری (Gmmiza1) به کاربرد نانورس در خاک‌های شنی و تحت آبیاری بارانی نشان داد که هرچند در مرحله گلدهی و با دوره آبیاری ۷ روزه همراه با تیمار ۱۷ کیلوگرم در هکتار، نیاز آبی گیاه افزایش می‌یابد، اما افزودن نانورس در نهایت باعث کاهش معنادار مصرف آب می‌شود (El-Nagar & Sary, 2021). همچنین اولسن و همکاران با اعمال ۵۰۰ کیلوگرم نانوبنتونیت در هر هکتار خاک و کشت گندم (*Triticum aestivum*) در شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای، به نتایج قابل توجهی دست یافتند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که نانوبنتونایت علاوه بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله افزایش ظرفیت نگهداشت آب باعث افزایش معنی‌دار عملکرد بیولوژیکی گندم در هر دو محیط آزمایش شد. بر اساس نتایج، تیمار ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار نانوبنتونایت بهترین عملکرد را نشان داد و پس از آن تیمار ۱۰ تن بنتونیت خام در هکتار قرار گرفت (Olesen et al., 2016).



شکل ۳- دندروگرام (به روش وارد) ویژگی‌های فیزیولوژیکی گندم در پایان دوره کشت در خاک شنی پس از افزودن تیمارهای آزمایشی و مقایسه عملکرد هر یک از تیمارها با یکدیگر. اعداد ۱ تا ۵ نشان‌دهنده تیمارهای آزمایشی (تیمارهای آزمایشی در این تحقیق با اعداد ۱ تا ۵ مشخص شده‌اند که جزئیات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده‌است). روش مورد استفاده در این تحلیل، نزدیک‌ترین همسایگی (Single Linkage) با فاصله اقلیدسی (Euclidean Distance) است.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن نانو رس به خاک اثرات مثبت قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن دارد. از جمله این اثرات می‌توان به بهبود ظرفیت نگهداشت آب، کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش پایداری خاکدانه‌ها و بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه اشاره کرد، که در نهایت موجب ارتقای رشد و عملکرد گندم رقم سیروان می‌شود. بنابراین، استفاده از اصلاح‌کننده‌های معدنی بنتونیت و نانو بنتونیت می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر و پایدار برای بهبود کیفیت خاک‌های شنی و افزایش بهره‌وری کشاورزی مطرح گردد. افزودن بنتونیت و نانو بنتونیت موجب بهبود معنی‌دار شاخص‌های فیزیکی خاک از جمله افزایش رطوبت اشباع، کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش پایداری خاکدانه‌ها شد. از میان تیمارهای مورد بررسی، تیمار B30*Nb2.5 (۳۰ تن در هکتار بنتونیت + ۲/۵ تن در هکتار نانو بنتونیت) بهترین عملکرد را از خود نشان داد؛ به طوری که نسبت به شاهد منفی، رطوبت اشباع خاک و پایداری خاکدانه را به ترتیب ۱/۴۷ و ۳/۶ برابر افزایش و جرم مخصوص ظاهری را ۱۵ درصد نسبت به شاهد منفی کاهش داد. بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک در اثر کاربرد هم‌زمان بنتونیت و نانو بنتونیت موجب ارتقاء شاخص‌های فیزیولوژیکی گندم از جمله وزن زیست توده، وزن دانه، تعداد دانه، طول خوشه و ارتفاع بوته شد، به طوری که شاخص‌های فیزیولوژیکی اندازه‌گیری شده در کاربرد تیمار B30*Nb2.5 نزدیک به شاخص‌های مربوطه در شاهد مثبت بود. در مقابل، ویژگی‌های فیزیکی خاک و شاخص‌های فیزیولوژیکی گندم اندازه‌گیری شده در تیمار ۶۰ تن در هکتار بنتونیت مشابه با خاک شاهد منفی بود. بنابراین، اثر هم‌افزایی بنتونیت و نانو بنتونیت در بهبود کیفیت فیزیکی خاک و افزایش رشد گندم، بیش‌تر از اثر کاربرد منفرد بنتونیت است. اثرات مثبت در کاربرد هم‌زمان بنتونیت و نانو بنتونیت در خاک می‌تواند ناشی از افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، بهبود توزیع اندازه ذرات در خاک شنی، افزایش سطح ویژه خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و کاهش تراکم خاک باشد که به طور مستقیم بر فراهمی عناصر غذایی و تأمین آب مورد نیاز گیاه در طول فصل رشد و تهویه خاک تأثیر می‌گذارد. یافته‌های این پژوهش بیان‌گر آن است که کاربرد توأم بنتونیت و نانوبنتونیت، به ویژه در نسبت B30*Nb2.5، می‌تواند به عنوان یک اصلاح‌کننده پایدار و سازگار با محیط زیست برای ارتقاء عملکرد محصولات زراعی نظیر گندم در خاک‌های شنی کم بازده مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد. با وجود این، به منظور تعمیم نتایج به مقیاس مزرعه، انجام پژوهش‌های مزرعه‌ای با هدف ارزیابی پایداری اثرات بنتونیت و نانو بنتونیت در خاک، کارایی اقتصادی و بررسی رفتار نانو ذرات در محیط خاکی ضروری است.

منابع

- امانی، الهام؛ قاسمی، احمد رضا؛ نوری امامزاده‌ای، محمدرضا و متقیان، حمیدرضا (۱۴۰۰). تأثیر ورمی‌کولیت، بنتونیت و زئولیت بر میزان تبخیر و منحنی رطوبتی خاک. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۸(۲)، ۸۳-۱۰۱.
- حیدری، احمد؛ کردپور کرمانشاهی، عباس و راهب، علیرضا (۱۴۰۲). منشأ یخچالی کربنات‌ها در افق‌های کلسیک و پتروکلسیک خاک‌های تشکیل شده بر روی نهشته‌های یخچالی دامنه جنوبی رشته کوه البرز. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴(۱۲)، ۱۹۷۹-۱۹۶۳.
- خسرویان چترودی، حدیث؛ راهب، علیرضا؛ حیدری، احمد؛ طلایی خسروشاهی، سارا؛ گودرزوند چگینی، خدابخش؛ عبدالله پور، مصطفی و مختاری اسفیدواجانی، حمیدرضا (۱۴۰۴). اصلاح برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شنی کم بازده با استفاده از بنتونیت و نانوبنتونیت. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶(۱): ۱۸۶-۱۷۱.
- عبدالله پور، مصطفی؛ راهنمایی، رسول؛ طالبی، ملیحه و آقامیر، فاطمه (۱۳۹۳). بررسی رفتار باری کانی کائولینایت در محلول الکترولیت کلرید سدیم. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۵(۱): ۹۵-۱۰۱.

REFERENCES

- Abd-El salam, K. A., Mehmood, M. A., Ashfaq, M., Abdelkhalek, T. E., Hassan, R. K., & Ravichandran, M. (2024). Liquid Nanoclay: Synthesis and Applications to Transform an Arid Desert into Fertile Land. *Soil Systems*, 8(3), 73.
- Abd El-Hady, M., & Eldardiry, E. I. (2016). Effect of different soil conditioners application on some soil characteristics and plant growth III-Effect on saturated and unsaturated water flow. *Int. J. ChemTech Res*, 9, 135-143.
- Abdolahpour, M., Rahnemaie, R., Talebi-Atouei, M. and Aghamir, F. (2014). Investigating Kaolinite Charging Behavior in NaCl Electrolyte Solution. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(1), 95-101. (In persian).
- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., & Wessolek, G. (2013). Impact of biochar and



- hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202, 183-191.
- Aleem, M., Hanna, N., & Sabry, S. (2000). Relationship between wheat root characteristics and grain yield in sandy and clay soils.
- Amani, E., Ghasemi, A. R., Nouri, M. R. & Motaghian, H. R. (2021). Effect of Vermiculite, Bentonite and Zeolite on Evaporation and Soil Characteristic Moisture Curve. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28(2), 83-101. (In persian).
- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P. J., Rötter, R. P., & Cammarano, D. (2013). Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature climate change*, 3(9), 827-832.
- Banedjschafie, S., & Durner, W. (2015). Water retention properties of a sandy soil with superabsorbent polymers as affected by aging and water quality. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(5), 798-806.
- Bell, R., & Seng, V. (2007). The management of agroecosystems associated with sandy soils. Management of tropical sandy soils for sustainable development: proceedings of the International Conference on the Management of Tropical Sandy Soils, Khon Kaen, Thailand,
- Benard, P., Kroener, E., Vontobel, P., Kaestner, A., & Carminati, A. (2016). Water percolation through the root-soil interface. *Advances in Water Resources*, 95, 190-198.
- Bengough, A. (2012). Water dynamics of the root zone: rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology. *Vadose Zone Journal*, 11(2), vzj2011. 0111.
- Benkhelifa, M., Belkhodja, M., Daoud, Y., & Tessier, D. (2008). Effects of Maghnian bentonite on physical properties of sandy soils under semi-arid Mediterranean climate. *Pakistan journal of biological sciences: PJBS*, 11(1), 17-25.
- Blake, G. (1986). Bulk density. *Methods of Soil Analysis. Part, 1*.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.
- Bruand, A., Cousin, I., Nicoulaud, B., Duval, O., & Begon, J. C. (1996). Backscattered electron scanning images of soil porosity for analyzing soil compaction around roots. *Soil Science Society of America Journal*, 60(3), 895-901.
- Carminati, A., Moradi, A. B., Vetterlein, D., Vontobel, P., Lehmann, E., Weller, U., Vogel, H.-J., & Oswald, S. E. (2010). Dynamics of soil water content in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 332(1), 163-176.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
- Chen, C., Wu, L., & Harbottle, M. (2019). Influence of biopolymer gel-coated fibres on sand reinforcement as a model of plant root behaviour. *Plant and Soil*, 438(1), 361-375.
- Chimuka, L., Manungufala, T. E., & Martín-Gil, J. (2009). Sources, bioavailability and fate of heavy metals and organic contaminants in compost manure. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, 3(1), 32-38.
- Churchman, G. J., Noble, A., Bailey, G., Chittleborough, D., & Harper, R. (2014). Clay addition and redistribution to enhance carbon sequestration in soils. *Soil Carbon*, 327-335.
- Czaban, J., Czyz, E., Siebielec, G., & Niedzwiecki, J. (2014). Long-lasting effects of bentonite on properties of a sandy soil deprived of the humus layer. *International Agrophysics*, 28(3).
- Czaban, J., & Siebielec, G. (2013). Effects of bentonite on sandy soil chemistry in a long-term plot experiment (II); effect on pH, CEC, and macro-and micronutrients. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(6).
- Driessen, P., Deckers, J., Spaargaren, O., & Nachtergaele, F. (2001). *Lecture notes on the major soils of the world*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- El-Nagar, D. A., & Sary, D. H. (2021). Synthesis and characterization of nano bentonite and its effect on some properties of sandy soils. *Soil and Tillage Research*, 208, 104872.
- El Nagar, A., Osorio, D., Zylinski, S., & Sait, S. M. (2021). Visual perception and camouflage response to 3D backgrounds and cast shadows in the European cuttlefish, *Sepia officinalis*. *Journal of Experimental Biology*, 224(11), jeb238717.
- Frades, I., & Matthiesen, R. (2009). Overview on techniques in cluster analysis. *Bioinformatics methods in clinical research*, 81-107.
- Grassmann, C. S., Mariano, E., Rocha, K. F., Gilli, B. R., & Rosolem, C. A. (2020). Effect of tropical grass and nitrogen fertilization on nitrous oxide, methane, and ammonia emissions of maize-based rotation systems. *Atmospheric Environment*, 234, 117571.
- Gregory, A., Webster, C., Watts, C., Whalley, W., Macleod, C. J., Joynes, A., Papadopoulos, A., Haygarth, P. M., Binley, A., & Humphreys, M. W. (2010). Soil management and grass species effects on the hydraulic properties of shrinking soils. *Soil Science Society of America Journal*, 74(3), 753-761.
- Heidari, A., Kordpour Kermanshahi, A., & Raheb, A. (2024). The glacial origin of carbonates in the calcic and

- petrocalcic horizons of the soils developed on glacial deposits in the southern Alborz Mountain slope. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(12), 1963-1979. (In persian).
- Hend, H., Somia, B., Mohamed, A., Saeda, A., & Eman, R. (2016). Dynamic removal of cumulative toxic heavy metals Pb (II) and Cd (II) from aqueous solutions via activated nano-sized bentonite adsorbents. *Int. J. Contemp. Appl. Sci*, 3, 67-82.
- Hinsinger, P., Bengough, A. G., Vetterlein, D., & Young, I. M. (2009). Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. In: Springer.
- Indira, M., Krupanidhi, S., Venkateswarulu, T., Pallavi, G., & Peele, K. A. (2021). Current Aspects of Nanotechnology: Applications in Agriculture. *Biobased Nanotechnology for Green Applications*, 73-99.
- Janmohammadi, M., & Sabaghnia, N. (2023). Strategies to alleviate the unusual effects of climate change on crop production: a thirsty and warm future, low crop quality. A review. *Biologija*, 69(2).
- Jin, K., White, P. J., Whalley, W. R., Shen, J., & Shi, L. (2017). Shaping an optimal soil by root-soil interaction. *Trends in Plant Science*, 22(10), 823-829.
- Kananizadeh, N., Ebadi, T., Khoshniat, S. A., & Mousavirizi, S. E. (2011). The positive effects of nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 39(7), 605-611.
- Kemper, W., & Chepil, W. (1965). Size distribution of aggregates. Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling, 9, 499-510.
- Khan, W. U. D., Wei, X., Ali, H. H., Zulfikar, F., Chen, J., Iqbal, R., Zaheer, M. S., Ali, B., Ghafoor, S., & Rabiya, U. E. (2022). Investigating the role of bentonite clay with different soil amendments to minimize the bioaccumulation of heavy metals in *Solanum melongena* L. under the irrigation of tannery wastewater. *Frontiers in Plant Science*, 13, 958978.
- Khosravian Chatroodi, H., Raheb, A., Heidari, A., Talaei Khosrowshahi, S., Goodarzvand Chegini, K., Abdollahpour, M., & Mokhtari Esfidvajani, H. (2025). Modification of some physical and chemical properties of low productivity sandy soils using bentonite and nano-bentonite. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(1), 171-186. (In persian).
- Kumari, N., & Mohan, C. (2021). Basics of clay minerals and their characteristic properties. *Clay Clay Miner*, 24(1).
- Kunze, G., & Dixon, J. (1986). Pretreatment for mineralogical analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 91-100.
- Lazányi, J. (2005). Effects of bentonite on the water budget of sandy soil. Culture Technology for Wheat and Corn. Symp. Int., July,
- Lei, Z., 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.
- Mi, J., Gregorich, E. G., Xu, S., McLaughlin, N. B., & Liu, J. (2018). Effects of a one-time application of bentonite on soil enzymes in a semi-arid region. *Canadian Journal of Soil Science*, 98(3), 542-555.
- Mohamadian, N., Ghorbani, H., Wood, D. A., & Hormozi, H. K. (2018). Rheological and filtration characteristics of drilling fluids enhanced by nanoparticles with selected additives: an experimental study. *Advances in Geo-Energy Research*, 2(3), 228-236.
- Motavalli, P., Stevens, W., & Hartwig, G. (2003). Remediation of subsoil compaction and compaction effects on corn N availability by deep tillage and application of poultry manure in a sandy-textured soil. *Soil and Tillage Research*, 71(2), 121-131.
- Mubarak, A., Ragab, O. E., Ali, A. A., & Hamed, N. E. (2009). Short-term studies on use of organic amendments for amelioration of a sandy soil. *African Journal of Agricultural Research*, 4(7), 621-627.
- Mueller, C. W., Carminati, A., Kaiser, C., Subke, J.-A., & Gutjahr, C. (2019). Rhizosphere functioning and structural development as complex interplay between plants, microorganisms and soil minerals. *Frontiers in environmental science*, 7, 130.
- Olesen, K., Shehata, S., Bondok, A., M El Nahrawy, S., & El-Kerdany, A. (2016). Response of Egyptian clover to Nano Clay Flakes in Newly Reclaimed Sandy Soils under Sprinkler Irrigation System. *Alexandria Science Exchange Journal*, 37(October-December), 759-770.
- Omran, A., Falatah, A., & Al-Harbi, A. (2002). The use of natural deposits as an alternative for polymers on water management in arid calcareous sandy soils of Saudi Arabia. 17th World Congress of Soil Science.
- Padidar, M., Jalalian, A., Abdouss, M., Najafi, P., Honarjoo, N., & Fallahzade, J. (2016). Effects of nanoclay on some physical properties of sandy soil and wind erosion. *International Journal of Soil Science*, 11(1),



9-13.

- Padidar, M., Jalalian, A., Asgari, K., Abdouss, M., Najafi, P., Honarjoo, N., & Fallahzade, J. (2016). The impacts of nanoclay on sandy soil stability and atmospheric dust control. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 81(4), 193-196.
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., & Khabarov, N. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the national academy of sciences*, 111(9), 3268-3273.
- Šimanský, V., Juriga, M., Jonczak, J., Uzarowicz, Ł., & Stępień, W. (2019). How relationships between soil organic matter parameters and soil structure characteristics are affected by the long-term fertilization of a sandy soil. *Geoderma*, 342, 75-84.
- Soukup, D., Buck, B., & Harris, W. (2008). Preparing soils for mineralogical analyses. *Methods of soil analysis part 5—mineralogical methods*, 5, 13-31.
- Srasra, E., & Trabelsi-Ayedi, M. (2000). Textural properties of acid activated glauconite. *Applied Clay Science*, 17(1-2), 71-84.
- Stoicescu, J., Haug, M., & Fredlund, D. (1996). The soil-water characteristics and pore size distribution of a sand bentonite mixture. Proc. 49th Canadian Geotechnical Conference, St. John's Newfoundland, September,
- Sumner, D. Y., & Grotzinger, J. P. (1996). Were kinetics of Archean calcium carbonate precipitation related to oxygen concentration? *Geology*, 24(2), 119-122.
- Suzuki, S., Noble, A. D., Ruaysoongnern, S., & Chinabut, N. (2007). Improvement in water-holding capacity and structural stability of a sandy soil in Northeast Thailand. *Arid Land Research and Management*, 21(1), 37-49.
- Wahba, M., Amal, M., Ebtisam, I. E., & Abd El-Hady, M. (2020). Improvement of sandy soil properties by using clay minerals. *Plant Archives*, 20(1), 2869-2874.
- Weijing, L., Jiaxi, T., Yu, L., Sizhu, S., Xiaoyu, J., Liyu, H., Shuyu, T., & Miaomiao, H. (2025). Biochar and bentonite application improves aeolian sandy soil health and enhances soil carbon sequestration and emission reduction potential. *Scientific Reports*, 15(1), 2205.
- Whittig, L., & Allardice, W. (1986). X-ray diffraction techniques. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 331-362.
- Zabel, F., Müller, C., Elliott, J., Minoli, S., Jägermeyr, J., Schneider, J. M., Franke, J. A., Moyer, E., Dury, M., & Francois, L. (2021). Large potential for crop production adaptation depends on available future varieties. *Global Change Biology*, 27(16), 3870-3882.
- Zaheer, M. S., Raza, M. A. S., Saleem, M. F., Khan, I. H., Ahmad, S., Iqbal, R., & Manevski, K. (2019). Investigating the effect of Azospirillum brasilense and Rhizobium pisi on agronomic traits of wheat (Triticum aestivum L.). *Archives of Agronomy and Soil Science*.
- Zarebanadkouki, M., Ahmed, M. A., & Carminati, A. (2016). Hydraulic conductivity of the root-soil interface of lupin in sandy soil after drying and rewetting. *Plant and Soil*, 398(1), 267-280.