



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources



Soil Science Society of Iran

(OPEN ACCESS)

**The effect of bentonite - sodium alginate - nanocellulose
hybrid composite on some physical properties and atterberg
limits of a loess soil**

**Mehran Salimi Bajestani¹, Farshad Kiani^{*2}, Soheila Ebrahimi³,
Elham Malekzadeh⁴, Aliasghar Tatari⁵**

1. Ph.D. Student of Soil Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mehran.salimi_s97@gau.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: kiani@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: sohebrahimi@gmail.com
4. Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: malekzadeh.elham@gmail.com
5. Ph.D. Graduate of Cellulose Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: a.tatari@gau.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: The increased exploitation of soil resources and the expansion of agricultural and industrial activities typically lead to structural degradation and a reduction in the physical and mechanical quality of the soil. However, reducing the use of soil due to water resource limitations can alleviate pressure on the soil, thereby slowing down the structural degradation process. This issue is of particular significance in arid and semi-arid regions, where there are constraints on both water and soil resources. One innovative solution to improve the mechanical properties of soil is the use of natural and environmentally friendly additives. In this context, hybrid composites capable of modifying soil structure and enhancing its stability have attracted considerable attention from researchers. Bentonite, due to its swelling properties and high water absorption, sodium alginate as a biopolymer, and nanocellulose for its outstanding mechanical properties and biodegradability, are among the effective materials for improving the mechanical characteristics of soil. The objective of this study is to investigate the effect of a hybrid composite consisting of bentonite, sodium alginate, and nanocellulose on certain physical properties and atterberg limits of loess soil in Golestan province. This study is conducted to enhance structural stability and increase the soil's resistance to mechanical stresses and erosion.
Article history: Received: 12.28.2024 Revised: 02.17.2025 Accepted: 02.19.2025	
Keywords: Atterberg limits, Bentonite, Coefficient of expansion and contraction (COLE), Loess soil, Soil amendment	
	Materials and Methods: In this study, various hybrid composites were used, including 50% bentonite / 30% sodium alginate / 20% nanocellulose (B50/A30/N20), 70% bentonite / 20% sodium alginate / 10% nanocellulose (B70/A20/N10), and 80% bentonite / 15% sodium alginate / 5% nanocellulose (B80/A15/N05). After sample preparation, soil moisture tests, mean weight diameter (MWD) of soil aggregates, and Atterberg limits,

including liquid limit, plastic limit, plasticity index, and coefficient of linear extensibility (COLE), were conducted to evaluate the impact of these composites. The samples were prepared and examined under controlled laboratory conditions. The obtained data from the tests were statistically analyzed to assess the improvement in the mechanical properties of the soil in response to different additive percentages.

Results: The findings of this study demonstrated that the bentonite-alginate-nanocellulose composite had significant effects on the mechanical and physical properties of soil. The results indicated that the B80/A15/N05 composite increased the liquid and plastic limits of the soil, attributed to its high water absorption capacity and enhanced structural cohesion. The plasticity index also increased with a higher proportion of bentonite and nanocellulose in the composite formulation, with the highest value (15.81 g/g) observed at a 3% application rate of the B80/A15/N05 composite. On the other hand, the application of 3% of the B50/A30/N20 composite resulted in the lowest coefficient of linear extensibility (COLE), measured at 0.02. Moreover, this formulation enhanced soil moisture and the MWD of soil aggregates, indicating improved structural stability and water-holding capacity (WHC) of the soil.

Conclusion: The findings of this research indicate that these composites can serve as effective soil amendments to improve the physical and mechanical properties of soils. Depending on functional requirements, optimizing the composite ratios can significantly enhance soil characteristics and improve its performance under various environmental conditions. This approach holds potential for diverse applications in agriculture, environment, and natural resource management. Moreover, utilizing these composites to amend weak soils (enhancing nutrient content and WHC) and boost agricultural productivity could serve as a sustainable strategy aligned with the goals of modern agriculture and sustainable development. Future research on optimizing the composition and precise application rates of these materials, as well as examining their long-term impacts on the environment and ecosystems, could provide deeper insights into their practical potential and expand their use across various fields.

Cite this article: Salimi Bajestani, Mehran, Kiani, Farshad, Ebrahimi, Soheila, Malekzadeh, Elham, Tatari, Aliasghar. 2025. The effect of bentonite - sodium alginate - nanocellulose hybrid composite on some physical properties and atterberg limits of a loess soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (3), 1-25.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2025.23122.2173

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



اثر کامپوزیت هیبریدی بتونیت - آلژینات سدیم - نانوسلولز بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و حدود اتربرگ یک خاک لسی

مهران سلیمی بجستانی¹، فرشاد کیانی^{2*}، سهیلا ابراهیمی³، الهام ملک‌زاده⁴، علی اصغر تاتاری⁵

1. دانشجوی دکتری تخصصی مدیریت منابع خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mehran.salimi_s97@gu.ac.ir
2. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: kiani@gu.ac.ir
3. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: sohebrahimi@gmail.com
4. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: malekzadeh.elham@gmail.com
5. دانش‌آموخته دکتری تخصصی صنایع سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: a.tatari@gu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی تاریخ دریافت: 1403/10/08 تاریخ ویرایش: 1403/11/29 تاریخ پذیرش: 1403/12/01 واژه‌های کلیدی: بهساز خاک، بتونیت، حدود اتربرگ، خاک لسی، ضریب انقباض و انقباض	سابقه و هدف: افزایش بهره‌برداری از منابع خاک و گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی معمولاً منجر به تخریب ساختاری و کاهش کیفیت فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود. اما کاهش استفاده از خاک به دلیل محدودیت منابع آب، می‌تواند فشار وارد بر خاک را کاهش داده و در نتیجه، روند تخریب ساختاری آن را کندتر نماید. این مسئله به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با محدودیت منابع آب و خاک مواجه هستند، اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. یکی از راهکارهای نوین برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک، استفاده از مواد افزودنی طبیعی و سازگار با محیط زیست است. در این راستا، کامپوزیت‌های هیبریدی با قابلیت اصلاح ساختمان خاک و افزایش پایداری آن، توجه بسیاری از پژوهش‌گران را به خود جلب کرده‌اند. بتونیت به دلیل خاصیت تورمی و جذب بالای آب، آلژینات به عنوان یک پلیمر زیستی و نانوسلولز به دلیل خواص مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری برجسته، از جمله مواد مؤثر در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک محسوب می‌شوند. هدف از این پژوهش، بررسی اثر کامپوزیت هیبریدی متشکل از بتونیت، آلژینات و نانوسلولز بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و حدود اتربرگ یک خاک لسی در استان گلستان است. این مطالعه به منظور بهبود پایداری ساختاری و افزایش مقاومت خاک در برابر تنش‌های مکانیکی و فرسایش انجام شده است.
مواد و روش‌ها: در این پژوهش، کامپوزیت‌های هیبریدی مختلف شامل 50 درصد بتونیت/ 30 درصد آلژینات سدیم/ 20 درصد نانوسلولز (B50/A30/N20)، 70 درصد بتونیت/ 20 درصد	

آلژینات سدیم/ ۱۰ درصد نانوسلولز (B70/A20/N10) و ۸۰ درصد بنتونیت/ ۱۵ درصد آلژینات سدیم/ ۵ درصد نانوسلولز (B80/A15/N05) به کار گرفته شد. پس از آماده سازی نمونه ها، آزمون های رطوبت خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (MWD) و حدود اتربرگ شامل حد روانی، حد خمیری، شاخص خمیری و ضریب انبساط و انقباض (COLE) به منظور ارزیابی تأثیر این کامپوزیت ها انجام شد. نمونه ها در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی آماده سازی و مورد بررسی قرار گرفتند. داده های به دست آمده از آزمون ها با استفاده از روش های آماری تحلیل شدند تا میزان بهبود ویژگی های مکانیکی خاک در پاسخ به درصدهای مختلف افزودنی ها ارزیابی شود.

یافته ها: نتایج این مطالعه نشان داد که کامپوزیت بنتونیت/ آلژینات سدیم/ نانوسلولز اثرات قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاک دارد. نتایج بررسی ها نشان داد که ترکیب B80/A15/N05 منجر به افزایش حد روانی و خمیری خاک شد که به خاصیت جذب آب بالاتر و بهبود انسجام ساختاری نسبت داده شد. شاخص خمیری نیز با افزایش سهم بنتونیت و نانوسلولز در فرمولاسیون کامپوزیت ها افزایش یافت و بیشترین مقدار (۱۵/۸۱ گرم بر گرم) با کاربرد ۳ درصد کامپوزیت B80/A15/N05 مشاهده شد. از سوی دیگر، کاربرد ۳ درصد از کامپوزیت B50/A30/N20 کمترین مقدار را در ضریب انبساط و انقباض (COLE) با مقدار ۰/۰۲ داشت. هم چنین، این ترکیب باعث افزایش رطوبت خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (MWD) گردید که بیانگر بهبود پایداری ساختار خاک و ظرفیت نگهداری آب بود.

نتیجه گیری: یافته های این پژوهش نشان می دهد که این کامپوزیت ها به عنوان اصلاح کننده های مؤثر می توانند برای بهبود ویژگی های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده قرار گیرند. بسته به نیازهای عملکردی، انتخاب درصدهای بهینه ترکیبات می تواند منجر به بهبود ویژگی های فیزیکی و مکانیکی خاک شود و کارایی آن را در شرایط مختلف محیطی افزایش دهد. این امر می تواند در کاربردهای مختلفی در کشاورزی، محیط زیست و مدیریت منابع طبیعی مفید واقع شود. علاوه بر این، استفاده از این کامپوزیت ها در اصلاح خاک های ضعیف (بهبود عناصر غذایی و ظرفیت نگهداری آب) و افزایش بهره وری کشاورزی، می تواند به عنوان یک روش پایدار در راستای تحقق اهداف کشاورزی مدرن و توسعه پایدار مورد توجه قرار گیرد. در آینده، پژوهش های بیش تر در خصوص بهینه سازی ترکیب و مقادیر دقیق این مواد، هم چنین بررسی اثرات طولانی مدت آن ها بر محیط زیست و اکوسیستم های مختلف، می تواند به درک بهتر از پتانسیل های کاربردی این کامپوزیت ها و گسترش استفاده از آن ها در حوزه های مختلف کمک کند.

استناد: سلیمی بجستانی، مهران، کیانی، فرشاد، ابراهیمی، سهیلا، ملک زاده، الهام، تاتاری، علی اصغر (۱۴۰۴). اثر کامپوزیت هیبریدی بنتونیت- آلژینات سدیم- نانوسلولز بر برخی ویژگی های فیزیکی و حدود اتربرگ یک خاک لسی. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۵ (۳)، ۱-۲۵.

DOI: 10.22069/ejsms.2025.23122.2173



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

خاک یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی برای تأمین امنیت غذایی و توسعه پایدار کشاورزی است (1). مدیریت پایدار خاک، شامل حفظ عناصر غذایی، کاهش تخریب و افزایش بهره‌وری، نقش اساسی در مقابله با چالش‌هایی مانند تغییرات اقلیمی، فرسایش، و کمبود منابع آب ایفا می‌کند (2). کشاورزی حفاظتی و روش‌های مدیریت هوشمند از نظر اقلیم، با حفظ سلامت خاک، تنوع زیستی را ارتقاء داده و عملکرد محصولات را بهبود می‌بخشد (3). این رویکردها علاوه بر کاهش آثار زیست‌محیطی، پایداری تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی را تضمین می‌کنند. به‌کارگیری روش‌های مدرن مانند شاخص‌های کیفیت خاک و نقشه‌برداری دیجیتال به بهینه‌سازی مدیریت خاک و منابع کمک می‌کند و تضمینی برای آینده‌ای پایدار به شمار می‌رود (4).

حفاظت از خاک برای حفظ بهره‌وری و توسعه پایدار کشاورزی بسیار حیاتی است. روش‌های سنتی مانند کشت تناوبی، مالچ‌پاشی طبیعی، تراس‌بندی و شخم‌زنی قرن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها باعث کاهش فرسایش خاک و حفظ رطوبت آن می‌شوند. با این حال، روش‌های سنتی به دلیل تغییرات اقلیمی و رشد جمعیت نیاز به تکمیل و بهبود دارند (5). روش‌های جدید شامل کشاورزی حفاظتی، کشاورزی دقیق، کشت بدون خاک‌ورزی و افزودن مواد شیمیایی و زیستی به خاک هستند که بهره‌وری خاک را افزایش می‌دهند. استفاده از مواد افزودنی مانند پلیمرها، اسیدهای آلی و مواد آلی بازیافتی تأثیر زیادی در بهبود ساختار و مقاومت خاک دارد (6). مواد افزودنی جدید مانند پلیمرهای زیستی، لیگنوسولفونات‌ها و ترکیبات آنزیمی نقش کلیدی در بهبود خواص مکانیکی خاک ایفا می‌کنند. این مواد باعث کاهش تراکم، افزایش مقاومت و بهبود توانایی

نفوذ آب و عناصر غذایی می‌شوند (7). افزودن مواد آلی بازیافتی و کمپوست نیز به حفظ عناصر غذایی و افزایش فعالیت میکروبی در خاک کمک می‌کند (8). بتونیت، آلزینات و نانوسلولز هر یک به طور مستقل و گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف به‌ویژه در کشاورزی و محیط زیست به‌عنوان مواد افزودنی با خواص منحصر به‌فرد مورد توجه قرار گرفته‌اند (9، 10، 11). بتونیت به‌دلیل ساختار لایه‌ای خود و قابلیت زیاد جذب آب و یونی، به‌عنوان یک اصلاح‌کننده مناسب برای خاک‌های خشک و کم‌بازده شناخته می‌شود (12، 13). این ماده می‌تواند با جذب آب، رطوبت خاک را حفظ کرده و در نتیجه بر ویژگی‌های مکانیکی خاک، مانند تراکم و مقاومت آن تأثیر بگذارد. در کنار بتونیت، آلزینات یک پلی‌ساکارید طبیعی است که از جلبک‌های دریایی استخراج می‌شود. این ماده به‌دلیل توانایی زیاد در تشکیل ژل، می‌تواند با ایجاد ساختارهای شبکه‌ای در خاک، خواص مکانیکی مانند انعطاف‌پذیری و مقاومت به تغییرات رطوبتی را بهبود دهد (14، 15). نانوسلولز، به‌عنوان یک ماده با خواص مکانیکی بسیار بالا، می‌تواند با بهبود پیوستگی ذرات خاک و افزایش مقاومت به فشار و کشش، ویژگی‌های مکانیکی خاک را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا دهد (11، 16، 17). در نتیجه، استفاده از این کامپوزیت هیبریدی می‌تواند به‌طور موثری باعث بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها به‌ویژه در مناطق با خاک‌های ضعیف و کم‌بازده شود.

با توجه به تغییرات سریع اقلیمی، کاهش کیفیت خاک و بحران‌های مربوط به منابع آب و خاک، نیاز به استفاده از روش‌های نوین برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از روش‌های جدید که در سال‌های اخیر توجه زیادی به آن معطوف شده، استفاده از

کامپوزیت‌های هیبریدی طبیعی است که ترکیبی از مواد مختلف با خواص منحصر به فرد را به منظور بهبود ویژگی‌های خاک ایجاد می‌کنند. از آنجایی که تأثیر مواد مختلف بر خواص مکانیکی خاک و تعامل آن‌ها در ساختار خاک به طور دقیق بررسی نشده است، هم‌چنان شکاف‌های زیادی در این زمینه وجود دارد که نیازمند پژوهش بیش‌تر هستند. استان گلستان با دارا بودن 22 هزار کیلومتر مربع سازندهای لسی، یکی از مناطق مستعد فرسایش خاک در کشور محسوب می‌شود. اراضی لسی این منطقه به دلیل ساختار خاص خود در برابر نیروهای ناشی از فرسایش آبی و بادی بسیار آسیب‌پذیر هستند و سهم قابل‌توجهی از هدررفت خاک را به خود اختصاص می‌دهند. این مسأله هر ساله موجب تحمیل خسارت‌های قابل‌ملاحظه‌ای به منابع طبیعی و کشاورزی منطقه می‌شود. ضرورت مقابله با این چالش و کاهش اثرات تخریبی فرسایش، یکی از دلایل اصلی انجام این مطالعه بوده است.

اگرچه، مطالعات متعددی به بررسی اثر تک‌ماده‌ای بتونیت، آلزینات سدیم یا نانوسلولز بر خواص خاک پرداخته‌اند، اما بررسی‌های کم‌تری در مورد اثرات ترکیبی این مواد در قالب یک کامپوزیت هیبریدی انجام شده است. برخی از پژوهش‌ها تنها به بررسی ویژگی‌های فیزیکی یا شیمیایی اثرات تکی این ماده‌ها پرداخته‌اند، اما تأثیرات ترکیبی آن‌ها بر بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. النگار و العز (2021) گزارش کردند که استفاده از تیمارهای ترکیبی بتونیت و کمپوست باعث افزایش معنی‌داری مواد آلی، ظرفیت نگهداری آب، ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی، آب در دسترس و منافذ نگهدارنده آب و هم‌چنین کاهش هدایت هیدرولیکی و منافذ زهکشی سریع در عمق 0-20 خاک شد (9). نگو و همکاران (2024) در بررسی اثرات نانوالیاف

سلولزی بر حفظ رطوبت خاک و پایداری خاکدانه‌ها گزارش کردند که این نانوالیاف نگهداری آب را تا 22 روز در خاک‌های لوم شنی و سیلت طولانی کرده و تشکیل خاکدانه‌های درشت و پایداری خاک را بهبود می‌دهد (10). در مطالعه‌ای، تومادونی و همکاران (2020) هیدروژل‌های مبتنی بر آلزینات ماکرو متخلخل برای کنترل رطوبت بستر خاک مورد کشت گیاه کاهو را مطالعه کردند. آنان گزارش کردند که این هیدروژل موجب افزایش ظرفیت نگهداری خاک و وزن تازه کاهو تا 80 درصد تحت تنش خشکی شده است (14). بهبودی و همکاران (2024) تأثیر نانوالیاف سلولزی و پودر شیشه بازیافتی را بر پارامترهای ژئوتکنیکی و ریزساختاری خاک پراکنده بررسی و گزارش نمودند که ترکیب نانوالیاف سلولزی و پودر شیشه بازیافتی به طور قابل‌توجهی پتانسیل پراکندگی خاک را کاهش می‌دهد. بیش‌ترین کاهش در پتانسیل پراکندگی با افزودن 1/5 درصد نانوالیاف سلولزی و 6-8 درصد پودر شیشه بازیافتی به دست آمد. آزمایش‌های حدود آتربرگ نشان‌دهنده کاهش 41/5 درصدی شاخص خمیری خاک بود (16). بنابراین، درک نحوه تعامل و اثرگذاری مواد مختلف به طور هم‌زمان، به‌ویژه در خاک‌های با ویژگی‌های متفاوت، هنوز نیاز به پژوهش بیش‌تر دارد. انتخاب ترکیبات سه‌گانه از مواد به‌ساز (بتونیت، آلزینات سدیم و نانوسلولز) بر اساس ویژگی‌های منحصر به فرد هر یک از این مواد و تأثیرات آن‌ها بر خاک در شرایط خاص این مطالعه صورت گرفته است. هر یک از این مواد به طور جداگانه به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی خاص خود می‌توانند بهبودهایی در ویژگی‌های خاک ایجاد کنند، اما ترکیب آن‌ها در قالب یک کامپوزیت می‌تواند به طور هم‌زمان اثرات مثبت بیش‌تری در بهبود ساختار خاک، نگهداری رطوبت، تقویت ویژگی‌های مکانیکی و جلوگیری از فرسایش خاک

داشته باشد. به‌ویژه، نانوسلولز به دلیل خواص ساختاری و قابلیت بالا در تشکیل شبکه‌های پایدار، بهبود بیش‌تری در ویژگی‌های مکانیکی خاک فراهم می‌آورد، در حالی‌که بتونیت و آلژینات سدیم نقش مهمی در جذب آب و تثبیت ساختار خاک دارند. در انتخاب این ترکیب سه‌گانه، شرایط اقلیمی و فیزیکی خاک نیز در نظر گرفته شده است. به‌ویژه در مناطقی که با محدودیت منابع آب و خاک روبه‌رو هستند، این ترکیب می‌تواند به‌طور مؤثری به حفظ رطوبت خاک کمک کرده و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک را بهبود بخشد.

مواد و روش‌ها

تهیه مواد اولیه: آلژینات سدیم (SA) مورد استفاده در این مطالعه از شرکت Foodchem (شانگهای، چین) تهیه شد. بتونیت مورد استفاده از شرکت ماکیان نوآور (تهران، ایران) تهیه گردید. ژل 2/5 درصد نانوسلولز تهیه شده از الیاف رنگبری شده چوب سوزنی‌برگان

به روش سوپر آسیاب دیسکی (با ابعاد 8 ± 31 نانومتر) توسط شرکت دانش بنیان نانو نوین پلیمر (گرگان، ایران) تامین گردید.

تهیه نمونه خاک: این پژوهش در سال 1403 در آزمایشگاه علوم خاک دانشکده مهندسی آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. نمونه‌برداری خاک از عمق 0-30 سانتی‌متری اراضی خاک‌های لسی در منطقه مراوه تپه استان گلستان انجام شد. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک 2 میلی‌متری عبور داده شدند. سپس، pH در عصاره گل اشباع، هدایت الکتریکی عصاره اشباع با EC سنج، کربن آلی به روش والکلی - بلک (18)، نیتروژن کل با دستگاه کج‌دال (19) و بافت خاک به روش هیدرومتری (20) اندازه‌گیری گردید. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک.

Table 1. Physicochemical properties of soil.

ویژگی‌ها (Properties)	واحد (Unit)	مقدار (Value)
بافت خاک (Soil texture)	-	لوم - سیلتی (Loamy-Silty)
کربن آلی (Organic carbon)	درصد (%)	0.46
هدایت الکتریکی (Electrical conductivity, EC)	دسی‌زینمس بر سانتی‌متر ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0.29
pH	-	7.40
ظرفیت تبادل کاتیونی (Cations exchange capacity, CEC)	سانتی‌مول بر کیلوگرم (cmol/kg)	12.67
رطوبت اشباع (Saturation percentage)	درصد وزنی (%W)	34
نیتروژن (Nitrogen)	درصد (%)	0.07
فسفر (Phosphorus)	ppm	8.10
پتاسیم (Potassium)	ppm	175

تهیه کامپوزیت هیبریدی بنتونیت- آلژینات- نانوسلولز: در ابتدا برای تهیه کامپوزیت بنتونیت- آلژینات- نانوسلولز، محلول 2 درصد وزنی- حجمی سدیم آلژینات و نانوسلولز تهیه و سپس بنتونیت به آن اضافه گردید. سوسپانسیون حاصل به مدت 3 ساعت در دمای 50 درجه سانتی گراد با سرعت 500 دور بر دقیقه مخلوط گردید. سپس، مخلوط حاصل در آون ماکروبو تحت تابش 700 وات به مدت 90 ثانیه قرار

گرفت. بعد از تشکیل کامپوزیت حاصل به منظور تشکیل فرم آلژینات کلسیم به صورت قطره ای محلول کلسیم کلراید (یک درصد وزنی/ حجمی) اضافه گردید (21، 22). کامپوزیت های هیبریدی مورد استفاده در این تحقیق با نسبت های مختلفی از بنتونیت-آلژینات سدیم- نانوسلولز مطابق جدول 2 تهیه شدند.

جدول 2- کامپوزیت های تهیه شده و جزئیات آن.

Table 2. Prepared composites and their details.

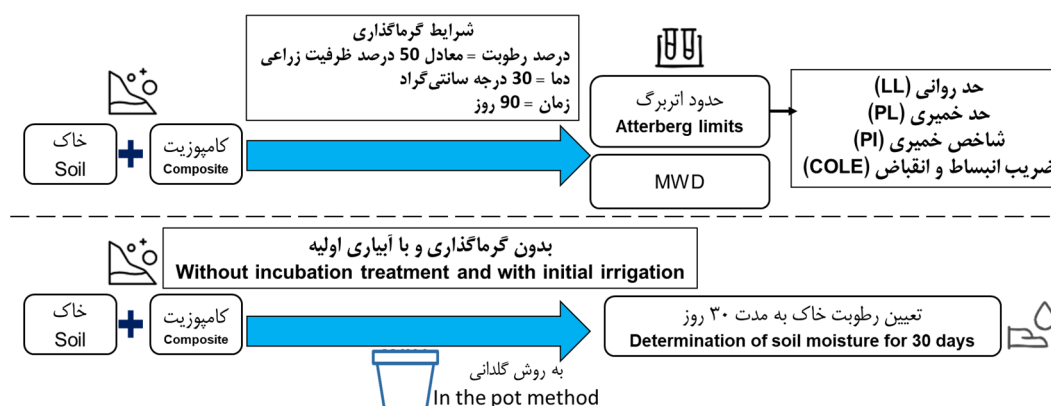
نانوسلولز (%) Nanocellulose (%)	آلژینات سدیم (%) Sodium alginate (%)	بنتونیت (%) Bentonite (%)	کد اختصاری کامپوزیت Abbreviation code of composite
20	30	50	B50/A30/N20
10	20	70	B70/A20/N10
5	15	80	B80/A15/N05

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX): مورفولوژی و ترکیب عنصری مواد اولیه و کامپوزیت ها با استفاده از تکنیک های پیشرفته میکروسکوپی و طیف سنجی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه یابی مورفولوژیکی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3 TESCAN-XMU ساخت جمهوری چک در ولتاژ 10 کیلوولت انجام شد. برای افزایش هدایت الکتریکی نمونه ها جهت تصویربرداری، نمونه ها با استفاده از دستگاه پوشش دهی اسپاتر (Quorum, Q150R ES) ساخت کشور انگلستان با لایه نازکی از طلا به ضخامت کم تر از 0/2 نانومتر پوشش داده شدند. آنالیز عنصری کامپوزیت ها با استفاده از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) مدل SAMx Numerix ساخت فرانسه که

به سیستم FESEM متصل بود، انجام شد و امکان ارزیابی دقیق توزیع عناصر در مواد را فراهم نمود. اعمال کامپوزیت های بنتونیت- آلژینات سدیم- نانوسلولز در خاک: جهت بررسی تأثیر کامپوزیت های بنتونیت- آلژینات سدیم- نانوسلولز بر ویژگی های فیزیکی خاک، این کامپوزیت ها در سه سطح (1، 2 و 3 درصد وزنی) به صورت یکنواخت با نمونه های خاک مخلوط شدند. فرآیند اختلاط تحت شرایط کنترل شده انجام گرفت تا توزیع همگنی از مواد در خاک حاصل شود. نمونه های خاک حاوی کامپوزیت های مختلف و همچنین خاک خالص (به عنوان نمونه شاهد) در شرایط کنترل شده رطوبتی (50 درصد ظرفیت زراعی) و دمایی (30 درجه سانتی گراد) گرمای گذاری شدند تا اثر بلندمدت این کامپوزیت ها بر ویژگی های خاک ارزیابی گردد. برای ارزیابی اثر این کامپوزیت ها بر حدود اتربرگ خاک (حد خمیری، حد روانی،

گرماگذاری) در زمان‌های متفاوت (روزهای 7، 14، 21 و 30) اندازه‌گیری شد تا تغییرات ناشی از افزودن کامپوزیت‌ها بررسی شود. هدف اصلی این بخش از مطالعه، بررسی توانایی خاک‌ها در حفظ رطوبت طی یک دوره زمانی کوتاه‌مدت پس از وقوع یک بارندگی یا آبیاری اولیه بوده است (شکل 1).

شاخص خمیری و ضرایب انبساط و انقباض) پس از پایان دوره 90 روزه گرماگذاری و همچنین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) نمونه‌ها در زمان‌های مختلف (روزهای 30، 60 و 90) نمونه‌گیری و آزمون‌های مربوطه بر روی آن‌ها انجام گرفت. در یک آزمایش مستقل دیگر، درصد رطوبت خاک حاوی کامپوزیت‌های مختلف (به روش گلدانی و بدون



شکل 1- شماتیک مراحل انجام آزمایش‌های مختلف در این پژوهش.

Figure 1. Schematic of the stages of conducting various experiments in this study.

روانی (LL) با دستگاه کاساگرانده² و رطوبت حد خمیری (PL) با روش تهیه فیتله اندازه‌گیری شد. شاخص خمیری (PI) از اختلاف بین LL و PL به‌دست آمد (24). برای به‌دست آوردن ضریب انبساط و انقباض‌پذیری (COLE) از آزمایش تهیه لوله یا میله‌های گلی استفاده شد. بدین‌صورت که، ابتدا نمونه خاک‌ها از الک 2 میلی‌متری عبور داده شد. سپس، خمیری از خاک با رطوبتی کمتر از حالت اشباع (به‌صورت کیفی) تهیه شده و به آرامی در سرنگ پلاستیکی با طول 25 سانتی‌متر و قطر یک سانتی‌متر قرار گرفت. سپس، به آرامی (بدون تشکیل حباب) لوله تهیه شده بر روی صفحه کاملاً صاف قرار داده شد. بلافاصله طول لوله یا میله گلی با خط‌کش مدرج اندازه‌گیری گردید. بعد از خشک شدن به مدت 72

رطوبت خاک؛ برای تعیین درصد رطوبت خاک، ابتدا نمونه خاک جمع‌آوری شده و وزن مرطوب آن (وزن نمونه به همراه ظرف) اندازه‌گیری شد. سپس نمونه در آون با دمای 103 درجه سانتی‌گراد به مدت 24 ساعت خشک گردید و پس از خنک شدن، وزن خشک ثبت شد. درصد رطوبت خاک با استفاده از رابطه 1 محاسبه گردید (23).

$$MC (\%) = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \quad (1)$$

که در آن، W_{dry} و W_{wet} به ترتیب وزن مرطوب و وزن خشک نمونه‌ها می‌باشد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی خاک (حدود اتربرگ): حدود اتربرگ¹ خاک شامل رطوبت حد

ساعت، مجدداً طول میله‌های گلی اندازه‌گیری شد (25). سپس، میزان ضریب انقباض و انبساط طبق رابطه 2 تعیین گردید.

$$COLE = \frac{Lm - Ld}{Ld} \quad (2)$$

که در آن، COLE ضریب انقباض و انبساط خطی، Lm طول میله گلی در حالت تر بر حسب سانتی‌متر و Ld طول میله گلی در حالت خشک بر حسب سانتی‌متر است.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD): در این مطالعه، برای اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) از روش مرطوب‌سازی و الک مرطوب استفاده شد. ابتدا نمونه‌های خاک هواخشک شده از الک 4/75 میلی‌متری عبور داده شدند تا ذرات درشت‌تر جدا شوند. سپس، 50 گرم از خاک عبور کرده از الک وزن شده و در الک‌های مخصوص آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ها به آرامی در آب مقطر غوطه‌ور شده و سپس با استفاده از مجموعه الک‌های با ابعاد 2، 1، 0/5، 0/25 و 0/1 میلی‌متر به مدت 10 دقیقه با سرعت ثابت تکان داده شدند. ذرات باقی‌مانده بر روی هر الک جمع‌آوری و خشک شده و وزن هر کسر اندازه‌گیری گردید (26). با توجه به اثر تصحیح شن، مقادیر MWD با استفاده از رابطه 3 محاسبه شد.

$$MDW = \sum_{i=1}^n \overline{Xi} Wi \quad (3)$$

که در آن، Wi وزن خاک باقی‌مانده بر روی هر الک و Xi میانگین قطر مش مربوطه است.

روش تجزیه و تحلیل آماری: متغیرهای این پژوهش شامل نوع کامپوزیت با فرمولاسیون مختلف شامل 50 درصد بنتونیت/ 30 درصد آلژینات سدیم/ 20 درصد نانوسلولز (B50/A30/N20)، 70 درصد بنتونیت/ 20

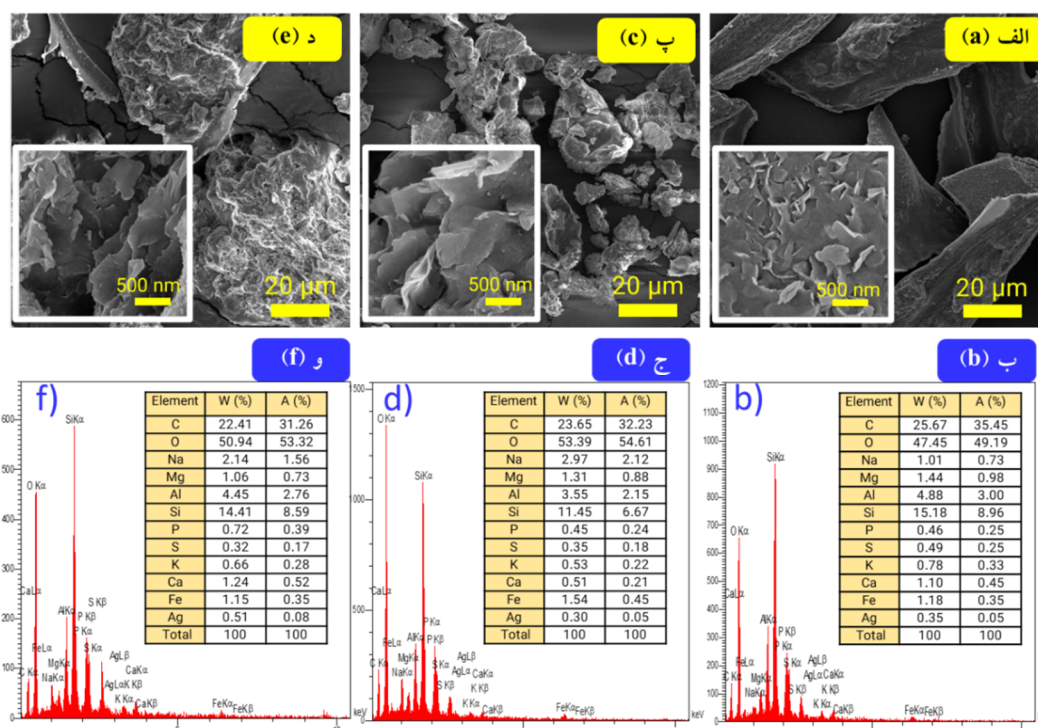
درصد آلژینات سدیم/ 10 درصد نانوسلولز (B70/A20/N10) و 80 درصد بنتونیت/ 15 درصد آلژینات سدیم/ 5 درصد نانوسلولز (B80/A15/N05) و سطح استفاده آن‌ها (1، 2 و 3 درصد) بود. آزمایش‌های این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، توسط نرم‌افزار SPSS انجام گردید. مقایسه میانگین تیمارها با آزمون دانکن در سطح احتمال 5 درصد انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی ویژگی‌های کامپوزیت تهیه‌شده (مورفولوژی و ریخت‌شناسی): شکل 2، تحلیل مورفولوژیکی (میکروگراف‌های FESEM) و آنالیز عنصری (طیف‌سنجی EDX) کامپوزیت‌های هیبریدی بنتونیت-آلژینات-نانوسلولز را نشان می‌دهد. میکروگراف‌های FESEM نشان می‌دهند که افزایش مقدار بنتونیت منجر به ساختارهای فشرده‌تر و انباشته‌تر می‌شود، در حالی که نسبت آلژینات سدیم و نانوسلولز بالاتر به مورفولوژی‌های پراکنده و لایه‌ای بیش‌تر کمک می‌کند. ساختار نامنظم و لایه‌ای بیانگر ادغام موفقیت‌آمیز بنتونیت، آلژینات سدیم و نانوسلولز است. نتایج آنالیز عنصری EDX نشان‌دهنده تأثیر تغییر نسبت اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت‌های بنتونیت/آلژینات سدیم/نانوسلولز بر ترکیب شیمیایی آن‌ها است. با کاهش سهم آلژینات سدیم و نانوسلولز در فرمولاسیون، میزان کربن (C) از 25/67 درصد به 22/41 درصد کاهش یافته است، که به دلیل سهم بیش‌تر این دو جزء در تأمین ترکیبات آلی است. اکسیژن (O) نیز در فرمولاسیون‌های مختلف تغییر کرده و در نمونه با نسبت 70:20:10 به بیش‌ترین مقدار (53/39 درصد) رسیده است که نشان‌دهنده نقش قابل‌توجه آلژینات سدیم در افزایش میزان اکسیژن است. میزان سدیم (Na) و سیلیسیم (Si) با

نشان داد که تنظیم نسبت اجزای تشکیل دهنده می تواند ترکیب عنصری کامپوزیت را به طور قابل توجهی دچار تغییر نماید و در طراحی خواص نهایی مؤثر باشد. تغییرات جزئی در درصد عناصر منعکس کننده تغییرات در فرمولاسیون کامپوزیت ها است.

افزایش نسبت بتونیت در ترکیب افزایش نشان داده اند که تأثیر مستقیم حضور بتونیت در ساختار را نشان می دهد. مقادیر عناصر فلزی مانند کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) نیز الگوهای متفاوتی دارند که به تغییر نسبت اجزای معدنی مرتبط است. به طور کلی، نتایج



شکل 2- ویژگی های مورفولوژیکی (FESEM) و آنالیز عنصری EDX کامپوزیت های بتونیت - آلژینات - نانوسلولز در نسبت های مختلف. (الف، ب) کامپوزیت B50/A30/N20، (پ، ج) کامپوزیت B70/A20/N10 و (د، و) کامپوزیت B80/A15/N05.

Figure 2. Morphological characteristics (FESEM) and EDX analysis of bentonite-alginate-nanocellulose composites in different ratios. (a, b) B50/A30/N20, (c, d) B70/A20/N10 and (e, f) B80/A15/N05.

سطح 1 درصد ($P < 0/01$) داشته، اما تأثیر آن بر شاخص خمیری و ضریب انبساط و انقباض خاک غیرمعنی دار بوده است ($P > 0/05$). اثر متقابل نوع کامپوزیت و سطح استفاده از آن ($A \times B$) بر حد روانی و حد خمیری در سطح 1 درصد ($P < 0/01$) معنی دار، و بر ضریب انبساط و انقباض خاک در سطح 5 درصد ($P < 0/05$) معنی دار بوده است، در حالی که تأثیر آن بر شاخص خمیری غیرمعنی دار گزارش شده است. میانگین مربعات خطا در تمامی

جدول 3، نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای بررسی تأثیر نوع کامپوزیت و سطح استفاده از آن بر حدود اتربرگ خاک را نشان می دهد. تأثیر نوع کامپوزیت (A) بر تمامی پارامترها از جمله حد روانی، حد خمیری، شاخص خمیری و ضریب انبساط و انقباض خاک در سطح 1 درصد معنی دار بوده است ($P < 0/01$)، که بیانگر تأثیر قوی نوع کامپوزیت بر این ویژگی هاست. سطح استفاده از کامپوزیت (B) نیز اثر معنی داری بر حد روانی و حد خمیری خاک در

پارامترها پایین بوده و نشان‌دهنده دقت قابل قبول آزمایش است. این نتایج نشان می‌دهد که نوع کامپوزیت نقش عمده‌ای در تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک داشته، در حالی که اثر سطح استفاده محدودتر بوده و بیش‌تر در برخی پارامترها مشاهده شده است.

جدول 3- نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای حدود اتربرگ خاک.

Table 3. Results of analysis of variance (ANOVA) for atterberg limits of soil.

میانگین مربعات (Mean square)				درجه آزادی (DF)	منبع تغییرات (S.O.V)
ضریب انبساط و انقباض (COLE)	شاخص خمیری (Plasticity index)	حد خمیری (Plastic limit)	حد روانی (Liquid limit)		
0.0001**	27.327**	53.257**	154.946**	2	نوع کامپوزیت (A) Composite type (A)
1.559E-5 ^{ns}	0.352 ^{ns}	4.060**	6.667**	2	سطح استفاده (B) Level (B)
5.343E-5*	0.115 ^{ns}	0.494**	0.970**	4	A×B
1.293E-5	0.172	0.079	0.079	20	خطا (Error)

ns، *، ** به ترتیب بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم متفاوت معنی‌دار می‌باشد

ns، * and ** represent significant effect at $P<0.01$, $P<0.05$ and no significant effect, respectively

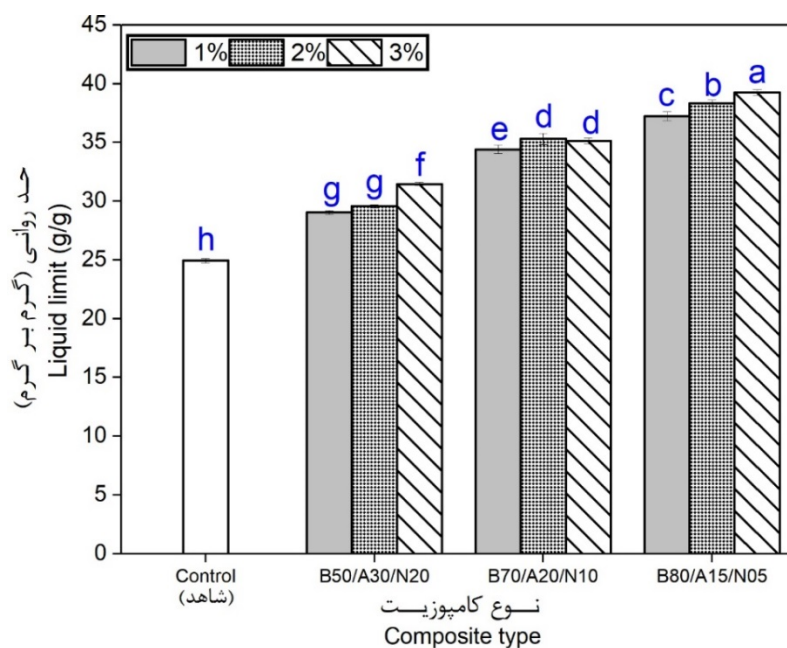
بالتر (2 و 3 درصد) نسبت به گروه اول نشان می‌دهد. کامپوزیت B80/A15/N05 بیش‌ترین مقادیر را در بین تمام تیمارها، با روند افزایشی واضح با افزایش سطح مصرف نشان داد. این امر بیانگر این است که فرمول‌بندی‌هایی با نسبت بالاتری از بنتونیت و حداقل ترکیبات آلژینات سدیم و نانوسلولز مؤثرترین در افزایش پارامتر حد روانی خاک هستند. افزایش حد روانی در خاک، بسته به هدف تحقیق و نوع خاک مورد بررسی، می‌تواند نتیجه مثبتی تلقی شود. در پژوهش حاضر، افزایش حد روانی خاک لسی به دلیل استفاده از کامپوزیت‌های بنتونیت/آلژینات سدیم/نانوسلولز، نشان‌دهنده بهبود ظرفیت نگهداری آب و ارتقای پایداری خاک در برابر تغییرات رطوبتی است. این تغییر به‌ویژه در خاک‌های لسی، که به دلیل ساختار سبک و تخلخل زیاد معمولاً دچار مشکلاتی مانند ظرفیت پایین نگهداری آب و

اثر کامپوزیت بنتونیت - آلژینات - نانوسلولز بر حد روانی: نتایج بررسی اثر کامپوزیت بنتونیت - آلژینات - نانوسلولز بر حد روانی خاک در شکل 3 ارائه شده است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمارهای با نسبت‌های بالاتر بنتونیت بیش‌ترین مقدار حد روانی خاک را نشان می‌دهند، در حالی که خاک شاهد کم‌ترین مقدار را دارا است (جدول 3) ($P<0/05$). کامپوزیت B50/A30/N20 با درصدهای متفاوت (1، 2 و 3 درصد) مقادیر نسبتاً متوسطی را نشان می‌دهد که با افزایش سطح مصرف، روند صعودی دارد. این روند نشان داد که افزایش سطح استفاده این فرمولاسیون موجب افزایش حد روانی خاک گردید. اگرچه، تغییرات در این گروه همان‌طور که توسط مقادیر انحراف معیار نشان داده شده است نسبتاً کوچک باقی‌مانده است. گروه دوم، کامپوزیت B70/A20/N10 بهبود بارزتری را به ویژه در سطوح

حساسیت به فرسایش بادی و آبی هستند، بسیار کاربردی و مفید بوده است. مزیت افزایش حد روانی در این پژوهش، بهبود رفتار خاک در شرایط تغییرات رطوبتی و کاهش سرعت تبخیر آب از سطح خاک است، که برای کشاورزی و مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک اهمیت زیادی دارد. مشکل اصلی خاک لسی مورد بررسی در این پژوهش، کمبود ظرفیت نگهداری آب و حساسیت بالا به تغییرات محیطی بود، که با افزایش حد روانی، این مشکلات تا حد قابل توجهی کاهش یافت و خاک برای کاربردهای کشاورزی بهینه تر شد. بنابراین، افزایش حد روانی در این پژوهش به عنوان نتیجه ای مثبت در جهت دستیابی به اهداف پژوهش ارزیابی می شود. علاوه بر این، تغییرپذیری کم تر مشاهده شده در این گروه در مقایسه با سایرین به معنای سازگاری و قابلیت اطمینان بیش تر است و آن را به یک نامزد امیدوارکننده برای کاربردهای عملی تبدیل می کند. در مقابل، خاک شاهد، عاری از هرگونه تغییر، به طور مداوم کم ترین مقادیر را نشان می دهد، که بر اهمیت تیمارها در بهبود حد روانی خاک تأکید می کند. بافت خاک لوم سیلتی به دلیل محتوای بالای سیلت و تخلخل نسبتاً زیاد، معمولاً با مشکلاتی نظیر ظرفیت پایین نگهداری آب، حساسیت به تراکم پذیری و آسیب پذیری در برابر فرسایش آبی و بادی مواجه است. این ویژگی ها باعث می شود که این نوع خاک در شرایط تغییرات رطوبتی شدید، ثبات مکانیکی خود را از دست بدهد و کارایی لازم برای کاربردهای کشاورزی یا سازه ای را نداشته باشد. در پژوهش ما، افزایش حد روانی این نوع خاک با استفاده از کامپوزیت های بتونیت / آلزینات سدیم / نانوسولز، باعث بهبود ظرفیت نگهداری آب و پایداری خاک در برابر تغییرات رطوبتی شده است. این تغییر نه تنها توانایی خاک را در حفظ رطوبت افزایش داده، بلکه

به کاهش حساسیت به تراکم و جلوگیری از فرسایش نیز کمک کرده است. بنابراین، افزایش حد روانی به ارتقای کارایی عملی این نوع خاک برای کاربردهای کشاورزی و تثبیت خاک در پروژه های مدیریت اراضی منجر شده و مشکل اصلی آن یعنی ناپایداری و کمبود ظرفیت نگهداری آب را برطرف کرده است.

کامپوزیت های بتونیت - آلزینات - نانوسولز باعث افزایش حد روانی خاک به دلیل تغییر در ساختار نانویی، فشردگی لایه های دوگانه الکتریکی (پخشیده) و بهبود خواص مکانیکی می شوند. این ترکیبات می توانند عملکرد خاک را در برابر شرایط خشکسالی بهبود بخشند و برای تثبیت خاک در کاربردهای مهندسی مفید باشند. افزودن نانوسولز به آلزینات باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت و حفظ آب در منافذ نانویی کامپوزیت می شود. این ویژگی به علت سطح ویژه بالا و ساختار متخلخل نانوسولز است که باعث افزایش نفوذپذیری آب در ساختار کامپوزیت می شود (27). بتونیت دارای کاتیون های قابل تعویض است که می تواند باعث تشکیل لایه های دوگانه الکتریکی (پخشیده) در حضور آب شود. بتونیت با افزایش ظرفیت نگهداری آب در شکاف های نانویی این لایه ها را فشرده تر کرده و منجر به افزایش حد روانی می شوند (28، 29). در این خصوص، نانوسولز نیز به دلیل وجود گروه های آبدوست فراوان در ساختار خود به عنوان عامل جاذب سطحی، فضای بیش تری برای جذب آب در ماتریس خاک ایجاد می کند. این خاصیت باعث می شود آب بیش تری در خاک جذب و ذخیره شود که حد روانی را افزایش می دهد. هم چنین، آلزینات به دلیل خاصیت هیدروژلی خود، در تماس با آب متورم شده و شبکه ای انعطاف پذیر ایجاد می کند که آب بیش تری را حفظ می کند. این خاصیت باعث افزایش حد روانی خاک می شود (30).



شکل 3- اثر کامپوزیت بنتونیت- آلژینات- نانوسلولز بر حد روانی خاک.

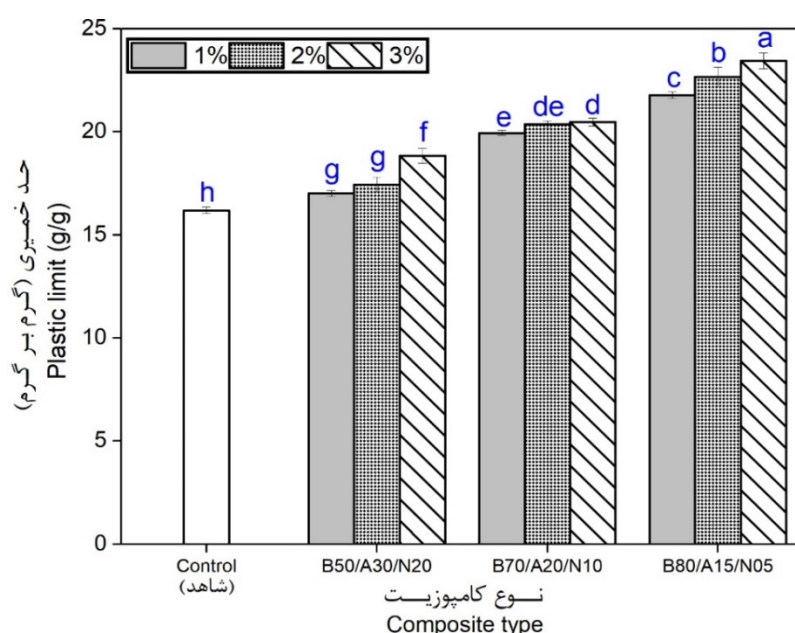
Figure 3. Effect of bentonite-alginate-nanocellulose composite on soil liquid limit.

20/65 گرم بر گرم قرار دارد، که نشان می‌دهد این ترکیب نسبت به گروه اول تأثیر قوی‌تری بر خاصیت خمیری خاک دارد. به نظر می‌رسد این مسأله به توزیع اندازه ذرات در این گروه مرتبط باشد. در گروه سوم با کامپوزیت B80/A15/N05، بیش‌ترین افزایش مشاهده شده است، به‌طوری که حد خمیری به ترتیب به 21/71، 22/8 و 23/87 گرم بر گرم رسیده است. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش درصد کامپوزیت‌ها از 1 به 3 درصد به‌طور مداوم موجب افزایش حد خمیری خاک شده است، که این امر احتمالاً به افزایش سطح تماس و ظرفیت جذب آب کامپوزیت‌ها مربوط می‌شود. ترکیب‌های با ذرات ریزتر و درصد بالاتر ترکیبات کلئیدی، مانند کامپوزیت B80/A15/N05، به دلیل ساختار متخلخل‌تر و قابلیت جذب آب بیش‌تر، بیش‌ترین تأثیر را بر حد خمیری خاک نشان داده‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کامپوزیت‌ها می‌توانند به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های مؤثر برای بهبود ویژگی‌های خمیری خاک عمل کنند و در کاربردهای مهندسی خاک و کشاورزی پایدار مؤثر باشند. در

اثر کامپوزیت بنتونیت- آلژینات- نانوسلولز بر حد خمیری: نتایج به‌دست‌آمده از حد خمیری خاک با استفاده از کامپوزیت‌های مختلف بیانگر تأثیر معنی‌دار این مواد بر ویژگی‌های خمیری خاک است (جدول 3) ($P < 0/05$). به‌طورکلی، نتایج نشان داد که افزودن کامپوزیت‌ها در تمامی ترکیب‌ها منجر به افزایش حد خمیری در مقایسه با خاک شاهد شده است (شکل 4). مقدار حد خمیری برای خاک شاهد در محدوده 16/06 تا 16/35 گرم بر گرم گزارش شد، که نشان‌دهنده رفتار اولیه خاک بدون هیچ‌گونه افزودنی است. با افزودن کامپوزیت‌های مختلف در درصدهای 1، 2 و 3، حد خمیری به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. در گروه اول با ترکیب کامپوزیت B50/A30/N20، حد خمیری از 16/06 به 17/15، 17/42 و 18/94 گرم بر گرم در سطح بالاتر (1، 2 و 3 درصد) رسیده است که بیانگر تأثیر افزایشی متناسب با افزایش مقدار کامپوزیت است. در گروه دوم با کامپوزیت B70/A20/N10، حد خمیری خاک حتی بیش‌تر افزایش یافته و در محدوده 19/85 تا

ذرات خاک شده و به بازآرایی ساختاری منجر می‌شود که به افزایش حد خمیری خاک می‌انجامد (31). آلژینات و نانوسلولز به دلیل ساختار شبکه‌ای، ظرفیت جذب رطوبت خاک را افزایش می‌دهند (10، 16) که باعث بهبود حد خمیری خاک می‌شود. نانوسلولز باعث تغییر در ساختار منافذ خاک شده و ظرفیت نگهداری آب را افزایش می‌دهد (23) که باعث افزایش حد خمیری خاک می‌شود.

حالی که ترکیبات با درصد پایین‌تر ممکن است برای شرایطی که نیاز به تغییرات محدودتری دارند مناسب باشند. مکانیسم‌های علمی مختلفی برای تبیین اثر افزایشی این کامپوزیت‌ها بر حد خمیری خاک مطرح است. بنتونیت به دلیل خاصیت تورمی بالا، در ترکیب با آلژینات و نانوسلولز، خاصیت انعطاف‌پذیری خاک را تقویت کرده و حد خمیری خاک را افزایش می‌دهد (28). بنتونیت باعث افزایش نیروهای جاذبه بین



شکل 4- اثر کامپوزیت بنتونیت - آلژینات - نانوسلولز بر حد خمیری خاک.

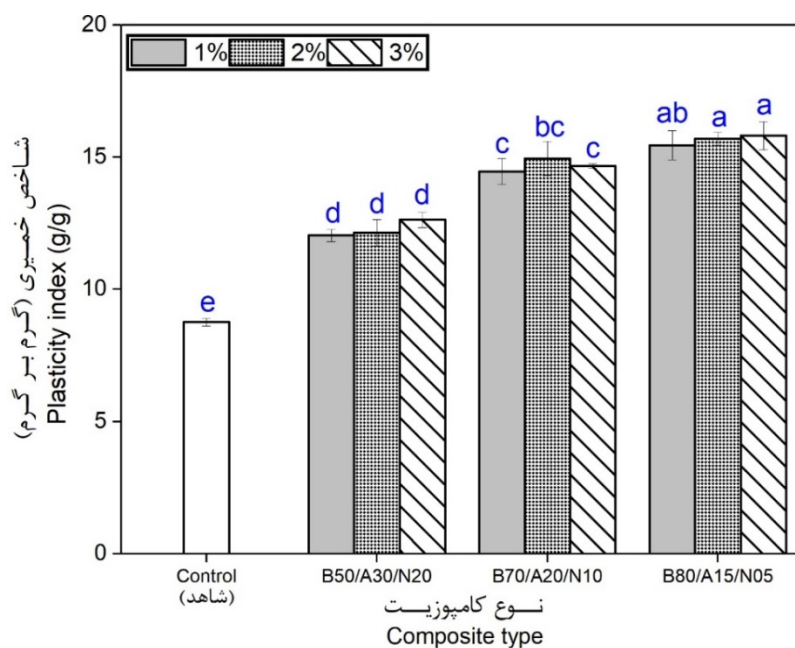
Figure 4. Effect of bentonite-alginate-nanocellulose composite on soil plastic limit.

با کامپوزیت B50/A30/N20، شاخص خمیری با افزایش درصد کامپوزیت از 1 به 3 درصد روند افزایشی دارد و از 11/89 به 12/91 گرم بر گرم می‌رسد. این روند بیانگر اثر مثبت افزایش مقدار کامپوزیت در بهبود رفتار خمیری خاک است. با این حال، تغییرات در این گروه نسبت به سایر گروه‌ها کمتر است، که ممکن است ناشی از ترکیب اندازه ذرات و نسبت پایین‌تر مواد ریزدانه باشد. در گروه دوم، با B70/A20/N10، شاخص خمیری خاک بالاتر از گروه اول بوده و در محدوده 13/92 تا 15/63 گرم بر گرم قرار دارد. این افزایش قابل توجه

اثر کامپوزیت بنتونیت - آلژینات - نانوسلولز بر شاخص خمیری: نتایج شاخص خمیری خاک در حضور کامپوزیت‌های مختلف بیانگر تأثیر معنی‌دار این افزودنی‌ها بر افزایش قابلیت تغییر شکل‌پذیری خاک است (جدول 3) ($P < 0/05$) (شکل 5). در مقایسه با خاک شاهد که دارای شاخص خمیری نسبتاً پایین و در محدوده 8/61 تا 8/90 است، تمام ترکیب‌های اصلاح‌شده با کامپوزیت‌ها به‌طور معنی‌داری شاخص خمیری بالاتری نشان داده‌اند. این افزایش می‌تواند به بهبود انسجام و ظرفیت نگهداری آب در خاک‌های اصلاح‌شده نسبت داده شود. در گروه اول

باشد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کامپوزیت‌های مورد آزمایش به‌طور مؤثری شاخص خمیری خاک را بهبود می‌بخشد، به‌ویژه کامپوزیت B80/A15/N05 که بالاترین مقادیر را ثبت کرده است. همچنین، درصد‌های بالاتر کامپوزیت‌ها به‌ویژه در گروه‌های دوم و سوم نشان‌دهنده عملکرد بهتری در بهبود خواص خمیری هستند. با این حال، در برخی موارد، افزایش درصد کامپوزیت‌ها ممکن است به نقطه اشباع برسد و کارایی بیشتر را محدود کند، که این موضوع نیاز به بررسی‌های بیشتر برای بهینه‌سازی ترکیب و میزان مصرف کامپوزیت‌ها دارد. دوتا و یاداو (2022) گزارش کردند که با کاربرد کامپوزیت بنتونیت- گچ، شاخص خمیری خاک افزایش یافته است (28). بهبود و همکاران (2024) نیز در مطالعه‌ای کاهش 41/5 درصدی شاخص خمیری خاک را با کاربرد نانوالیاف سلولزی و پودر شیشه بازیافتی گزارش کردند (16) که به‌نظر می‌رسد به دلیل اثرات تکی نانوالیاف سلولزی و تعامل آن با پودر شیشه باشد.

نشان می‌دهد که این ترکیب به‌دلیل توزیع ذرات متفاوت و نسبت بالاتر مواد فعال سطحی، تأثیر قوی‌تری بر خاصیت خمیری خاک دارد. همچنین، روند افزایشی شاخص خمیری با افزایش درصد کامپوزیت تا 2 درصد مشاهده شده، اما در 3 درصد تغییر چشمگیری مشاهده نمی‌شود، که ممکن است به اشباع شدن ظرفیت جذب آب در این درصد مربوط باشد. در گروه سوم با کامپوزیت B80/A15/N05، بیش‌ترین شاخص خمیری ثبت شده است. مقادیر این گروه از 14/86 تا 16/39 گرم بر گرم متغیر است که بالاترین مقادیر شاخص خمیری را نشان می‌دهد. این امر می‌تواند به نسبت بالای ذرات ریزتر و سطح تماس بالاتر این ترکیب نسبت داده شود، که موجب افزایش قابل‌توجه در ظرفیت جذب آب و انسجام خاک شده است. علاوه‌بر این، تغییرات با افزایش درصد کامپوزیت در این گروه تقریباً خطی بوده و افزایش یکنواختی را نشان می‌دهد، که می‌تواند بیانگر توزیع مناسب یکنواخت‌تر و تأثیر آن بر ساختار خاک



شکل 5- اثر کامپوزیت بنتونیت- آلژینات- نانوسلولز بر شاخص خمیری خاک.

Figure 5. Effect of bentonite-alginate-nanocellulose composite on soil plasticity index.

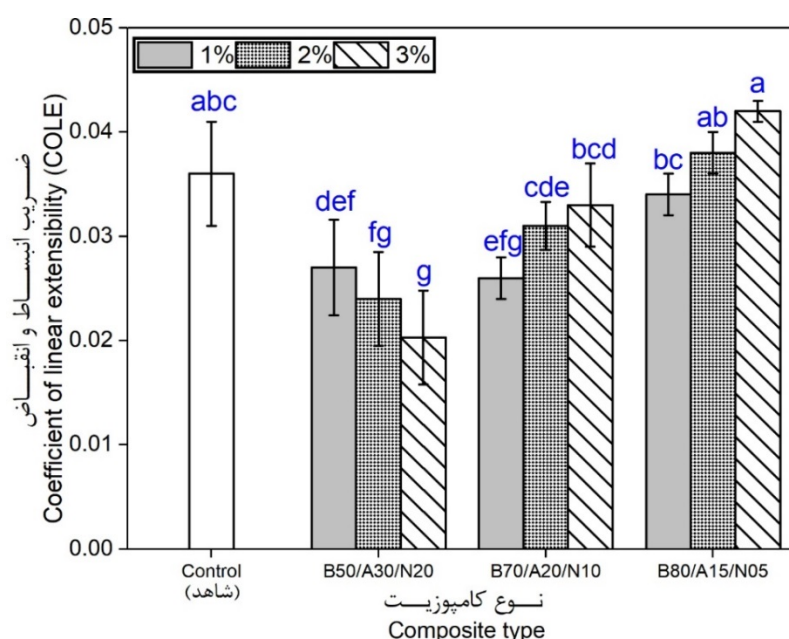
اثر کامپوزیت بتونیت - آلزینات-نانوسلولز بر ضریب انبساط و انقباض (COLE): نتایج تغییرات ضریب انبساط و انقباض خاک در اثر استفاده از کامپوزیت‌های مختلف معنی‌دار بود (جدول 3) ($P < 0/05$) (شکل 6). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که خاک شاهد دارای ضرایب انبساط و انقباض در محدوده 0/033 تا 0/042 است، که بیانگر حساسیت بالای آن به تغییرات رطوبتی و احتمال افزایش ترک‌خوردگی و کاهش پایداری ساختاری در شرایط نوسانات رطوبتی است. در مقابل، افزودن کامپوزیت‌ها تأثیر متفاوتی بر این ضریب داشته است. در برخی ترکیب‌ها، کاهش ضریب مشاهده شده، به‌ویژه در درصدهای کمتر کامپوزیت‌ها بیانگر بهبود پایداری حجمی و کاهش حساسیت به تغییرات رطوبت است. به عنوان مثال، در کامپوزیت B50/A30/N20 با مقادیر 2 و 3 درصد، مقادیر 0/02 و 0/016 ثبت شده که کم‌ترین مقادیر در بین همه نمونه‌ها هستند و بیانگر پایداری بیش‌تر خاک اصلاح‌شده با این ترکیب است. از سوی دیگر، کامپوزیت‌های B70/A20/N10 و B80/A15/N05 به‌ویژه در درصدهای بالاتر (2 و 3 درصد) دارای ضرایب بالاتری (حداکثر 0/042) هستند که نشان می‌دهد این ترکیبات ممکن است منجر به افزایش ظرفیت انبساط و انقباض شوند. این افزایش می‌تواند ناشی از توانایی بیش‌تر این کامپوزیت‌ها در جذب و حفظ آب باشد که به افزایش حجم و حساسیت به تغییرات رطوبتی منجر می‌شود. چنین رفتاری می‌تواند در شرایط خاص مفید باشد، مانند افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی آب در خاک‌های کم‌بازده یا خشک، اما ممکن است در شرایطی که پایداری سازه‌ای اهمیت دارد، نیاز به بررسی‌های بیش‌تری داشته باشد. به‌طورکلی، نتایج بیانگر آن است که ترکیبات با درصدهای کم‌تر و نسبت‌های متعادل از مواد، مانند کامپوزیت B50/A30/N20 با 2 و 3 درصد، گزینه مناسبی برای کاهش انبساط و انقباض و

افزایش پایداری خاک هستند. در مقابل، ترکیباتی با درصد بالاتر مواد ریزدانه، مانند B80/A15/N05 به‌دلیل افزایش ظرفیت جذب آب و رفتار منبسط‌شونده، ممکن است برای کاربردهایی که به جذب و نگهداری رطوبت بیش‌تر نیاز دارند، مناسب‌تر باشند. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب نوع و درصد مناسب کامپوزیت‌ها متناسب با کاربرد موردنظر تأکید دارد، زیرا رفتار حجمی خاک اصلاح‌شده می‌تواند به‌طور مستقیم بر عملکرد آن در پروژه‌های کشاورزی، مهندسی و مدیریت آب تأثیر بگذارد.

یکی از دلایل اصلی مؤثر بر رفتار انبساطی و انقباضی خاک، کانی‌شناسی آن است (32). اما عوامل دیگری در این خصوص نیز نقش قابل‌توجهی دارند. هنگامی که بتونیت به خاک اضافه می‌شود، ظرفیت نگهداری آب و پتانسیل تورم خاک را افزایش می‌دهد. ظرفیت بالای نگهداری آب بتونیت به آن اجازه می‌دهد تا ساختاری ژل مانند ایجاد کند و به‌عنوان مخزن رطوبت در خاک عمل کند (12). جالب توجه است که اثر بتونیت بر کشش‌پذیری خاک را می‌توان با افزودن مواد دیگر تعدیل کرد. به عنوان مثال، سلاف و بالو (2023) گزارش کردند که افزودن پودر ضایعات پلاستیکی به مخلوط‌های بتونیت و سیمان، پتانسیل واکشیدگی و فشار را کاهش داده است (33). به‌طور مشابه، بابو و میرشا (2023) نیز گزارش نمودند که الیاف لاستیک مخلوط شده با خاک چرنوزوم، که خواصی مشابه بتونیت دارد و تورم را کاهش داده است (34). بتونیت، یک کانی رسی با پتانسیل تورم بالا، به‌طور قابل‌توجهی بر مقادیر COLE خاک تأثیر می‌گذارد. به‌طورکلی، افزودن بتونیت به خاک به دلیل توانایی بتونیت در جذب آب و انبساط، مقدار COLE آن را افزایش می‌دهد (35، 36). علت افزایش ضریب انبساط و انقباض خاک در اثر استفاده از کامپوزیت‌های B80/A15/N05 را نسبت به شاهد این گونه می‌توان تبیین کرد که ماده معدنی مونت

B80/A15/N05 به عنوان یکی از غنی‌ترین نمونه‌ها از نظر مقدار بنتونیت، بیش‌ترین میزان انبساط و انقباض را در مقایسه با سایر تیمارها به‌ویژه شاهد به خود اختصاص داده است.

موریلونیت، هنگامی که با آب تماس پیدا می‌کند، خاصیتی متورم‌کننده از خود بروز می‌دهد. بنتونیت، که عمدتاً از 85 درصد مونت موریلونیت تشکیل شده، به همین دلیل در اثر رطوبت دستخوش تغییرات قابل‌توجهی می‌شود. به همین علت تیمار کامپوزیت



شکل 6- اثر کامپوزیت بنتونیت - آلژینات - نانوسلولز بر ضریب انبساط و انقباض (COLE) خاک.

Figure 6. Effect of bentonite-alginate-nanocellulose composite on soil COLE.

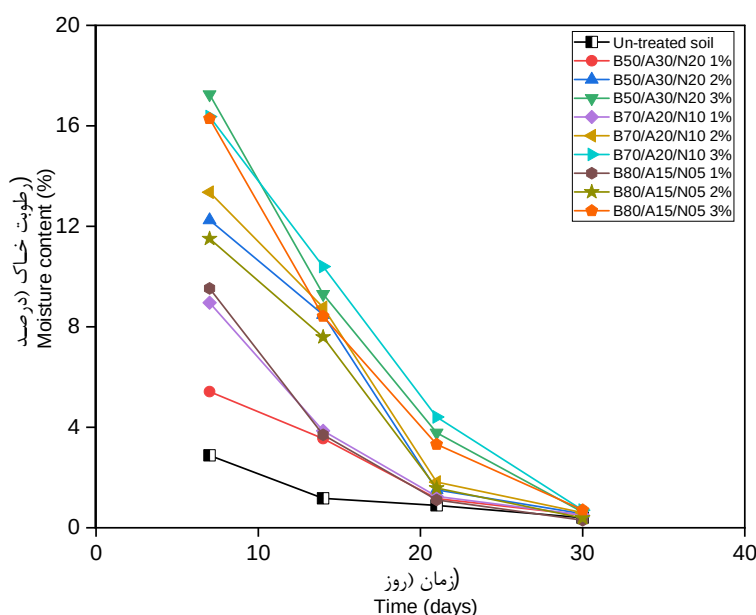
تیمار B50/A30/N20 در سطح 3 درصد هم‌چنان با 9/3 درصد رطوبت عملکرد بهتری داشت. در مقایسه، خاک‌های تیمارنشده فقط 1/17 درصد رطوبت حفظ کردند. در روز 21، اختلاف‌ها کم‌تر شدند، اما تیمارهایی با سطوح بالاتر هم‌چنان رطوبت بیشتری حفظ کردند؛ به عنوان مثال، تیمار B70/A20/N10 در سطح 3 درصد، 4/41 درصد رطوبت داشت، در حالی‌که خاک تیمارنشده فقط 0/89 درصد رطوبت داشت. در روز 30، رطوبت در تمام نمونه‌ها به کم‌ترین میزان خود رسید، اما تیمارهای کامپوزیتی هم‌چنان عملکرد بهتری نسبت به خاک تیمار نشده نشان دادند. برای مثال، تیمار B80/A15/N05 در سطح 3 درصد، 0/71 درصد رطوبت حفظ کرد، در حالی‌که خاک تیمار نشده فقط 0/4 درصد رطوبت

رطوبت خاک؛ نتایج نشان داد که استفاده از کامپوزیت‌های مختلف تأثیر معنی‌دار بر حفظ رطوبت خاک در طول زمان دارد ($P < 0/05$). در روز هفتم، خاک‌های تیمارنشده دارای کم‌ترین میزان رطوبت (2/88 درصد) بودند، در حالی‌که تیمارهای مختلف با ترکیب‌های متفاوت نسبت‌های بنتونیت، آلژینات سدیم و نانوسلولز به‌طور قابل‌توجهی رطوبت بیش‌تری را در خاک حفظ کردند. به‌ویژه، تیمار B50/A30/N20 در سطح 3 درصد، بیش‌ترین درصد رطوبت (17/25 درصد) را نشان داد. این روند بیانگر اثر مثبت سطوح بالاتر کامپوزیت‌ها در بهبود حفظ رطوبت است. با گذشت زمان، میزان رطوبت در تمام نمونه‌ها کاهش یافت، اما این کاهش در تیمارهای حاوی کامپوزیت به مراتب کندتر بود. در روز 14،

مطالعات نشان می‌دهند که ترکیبات بنتونیت با پلیمرهایی مانند آلژینات سدیم باعث تشکیل ژل‌هایی با ظرفیت بالای جذب آب می‌شوند که تبخیر آب را کاهش داده و زمان نگهداری رطوبت خاک را افزایش می‌دهد (39). کامپوزیت‌های آلژینات - بنتونیت به دلیل خاصیت هم افزایی آلژینات و بنتونیت سرعت جذب آب را تسهیل می‌کنند (10). نانوسلولز به دلیل ساختار متخلخل، سطح ویژه بسیار زیاد و ظرفیت جذب آب بالا از طریق پیوندهای هیدروژنی، به عنوان جاذب آب عمل می‌کند و باعث بهبود حفظ آب خاک در طول زمان می‌شود (11). ترکیب بنتونیت، آلژینات سدیم و نانوسلولز موجب هم‌افزایی میان اجزای کامپوزیت شده و باعث ایجاد ساختاری متخلخل و هیدروفیلیک می‌شود که آب را به طور مؤثری در خود ذخیره کرده و به تدریج در دسترس خاک قرار می‌دهد. علاوه بر این، این ترکیبات با کاهش تبخیر سطحی و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، به بهبود پایداری رطوبتی و کاهش تنش خشکی کمک می‌کنند. نتایج مشابهی توسط ملک‌زاده و همکاران (2024) گزارش شده است (23).

داشت (شکل 7). این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کامپوزیت‌های حاوی مواد مختلف می‌تواند به طور مؤثری ظرفیت حفظ رطوبت خاک را به ویژه در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر افزایش دهد. همچنین، افزایش درصد کامپوزیت‌ها تأثیر مثبتی بر حفظ رطوبت داشت و ترکیبات حاوی مقادیر بیشتری از نانوسلولز و آلژینات سدیم عملکرد بهتری از خود نشان دادند.

حفظ آب در خاک تحت تأثیر ترکیبی از ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی آن است. در حالی که نیروهای جذبی مربوط به نوع خاک نقش مهمی ایفا می‌کنند، نیروی موینگی در فضاها، منافذ، بسته به اندازه ذرات خاک و ابعاد منافذ، در درجه اول بر حفظ آب از نظر فیزیکی حاکم است (11). افزایش درصد رطوبت خاک با استفاده از کامپوزیت بنتونیت، آلژینات سدیم و نانوسلولز به دلیل خواص منحصر به فرد این ترکیبات در جذب و نگهداری آب است. بنتونیت در درجه اول یک خاک رس مونتوریلونیت قابل انبساط، با سطح ویژه بالا و ساختار لایه‌ای است. این ماده قادر است حجم زیادی از آب را در فضای بین لایه‌ای خود جذب کرده و به صورت ژل پایدار نگه دارد (37، 38).



شکل 7- اثر کامپوزیت بنتونیت - آلژینات - نانوسلولز بر درصد وزنی رطوبت خاک.

Figure 7. Effect of bentonite-alginate-nanocellulose composite on soil moisture content.

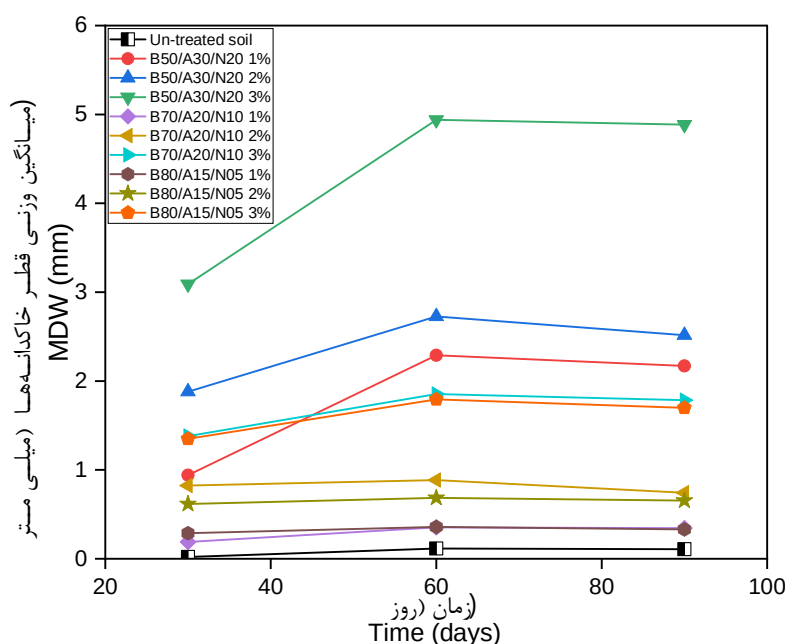
اثر در بازه‌های زمانی طولانی‌تر بیش‌تر مشهود گردیده است.

افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از کامپوزیت بنتونیت، آلزینات سدیم و نانوسلولز به دلیل تأثیر مثبت این ترکیبات بر پایداری و انسجام ساختاری خاک است. بنتونیت به‌عنوان یک ماده رسی با خاصیت چسبندگی بالا و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، موجب بهبود پیوندهای بین ذرات خاک و تشکیل خاکدانه‌های پایدارتر می‌شود (37، 38). آلزینات سدیم، با خاصیت ژل‌سازی و ایجاد شبکه‌های سه‌بعدی، نقش چسباننده طبیعی را ایفا کرده و به تقویت اتصال بین ذرات خاک و حفظ ساختار خاکدانه‌ها کمک می‌کند (40). نانوسلولز نیز با داشتن ساختار فیبری و سطح ویژه زیاد، قابلیت ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی با ذرات خاک و دیگر اجزای کامپوزیت را دارد که این امر موجب تقویت پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. این ترکیبات، با بهبود چسبندگی و افزایش مواد آلی در خاک، مانع از فروپاشی سریع خاکدانه‌ها در اثر رطوبت شده و به تثبیت ساختار خاک کمک می‌کنند. در نتیجه، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها افزایش یافته و ساختار خاک بهبود می‌یابد که این امر به افزایش نفوذپذیری و بهبود شرایط خاک منجر می‌شود. در این خصوص، نتایج مشابهی توسط ملک‌زاده و همکاران (2024) گزارش شده است (23). جاوید و همکاران (2023) نیز گزارش کردند که کاربرد مالچ برپایه بنتونیت منجر به ایجاد ذرات و خاکدانه‌های بزرگ‌تر شد و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه (GMD)² خاک را افزایش داده است (35). سلیمی بجستانی و همکاران (2025) نیز بهبود پایداری خاکدانه‌ها را با کاربرد کامپوزیت بنتونیت-آلزینات سدیم-نانوسلولز گزارش کردند (41).

2- Mean diameter of aggregates (GMD)

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)¹: در این آزمون، داده‌های ارائه‌شده برای خاک تیمار نشده و خاک تیمار شده با کامپوزیت‌های مختلف در بازه‌های زمانی 30، 60 و 90 روز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که تیمارهای مختلف منجر به بهبود معنی‌دار در شاخص پایداری ساختمان خاک (MWD) نسبت به خاک تیمار نشده شده‌اند ($P < 0/05$). در روز 30، مقدار MWD برای خاک تیمار نشده 0/02 میلی‌متر بود که در تمامی تیمارها افزایش قابل‌توجهی مشاهده شد. به‌ویژه کامپوزیت B50/A30/N20 در سطح 3 درصد بیش‌ترین مقدار (3/09 میلی‌متر) را نشان داد، در حالی‌که تیمار B80/A15/N05 در سطح 1 درصد کم‌ترین بهبود (0/288 میلی‌متر) را داشت. در روز 60، روند افزایش MWD ادامه یافت و کامپوزیت B50/A30/N20 در سطح 3 درصد هم‌چنان بیش‌ترین مقدار (4/94 میلی‌متر) را به خود اختصاص داده است. هم‌چنین، تیمارهای دیگر نیز بهبود قابل‌ملاحظه‌ای را نسبت به روز 30 نشان دادند. در این زمان، کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار B80/A15/N05 در سطح 1 درصد (0/358) بود. در روز 90، مقدار MWD نسبت به روز 60 تغییرات کم‌تری داشت که بیانگر تثبیت نسبی ساختار خاک است. تیمار B50/A30/N20 در سطح 3 درصد مقدار بالایی (4/88 میلی‌متر) را حفظ کرد، در حالی‌که تیمار B80/A15/N05 در سطح 1 درصد هم‌چنان کم‌ترین مقدار (0/33 میلی‌متر) را ثبت نمود (شکل 8). این نتایج بیانگر آن است که سطوح بالاتر کامپوزیت‌ها به‌طور معنی‌داری پایداری خاک را بهبود بخشیده‌اند و تیمار B50/A30/N20 به دلیل ترکیب بهینه اجزای خود، بیش‌ترین تأثیر را داشته است. به‌طورکلی، نتایج بیانگر آن است که افزایش درصد کامپوزیت‌ها موجب افزایش پایداری خاک شده و این

1- Mean weight diameter (MWD)



شکل 8- اثر کامپوزیت بتونیت - آلژینات - نانوسلولز بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD).

Figure 8. Effect of bentonite-alginate-nanocellulose composite on soil MDW.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به‌دست‌آمده از بررسی ویژگی‌های مکانیکی خاک در اثر استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی مختلف بتونیت- آلژینات سدیم- نانوسلولز نشان‌دهنده تأثیر مثبت این افزودنی‌ها بر برخی ویژگی‌های فیزیکی (رطوبت و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) و حدود اتربرگ خاک است. افزایش حد خمیری و شاخص خمیری در تمامی ترکیبات و درصدهای مورد آزمایش، بیانگر افزایش ظرفیت جذب آب و انسجام بیش‌تر خاک بوده که می‌تواند به بهبود پایداری و کاهش فرسایش منجر شود. در عین حال، ضریب انبساط و انقباض خاک با افزودن کامپوزیت‌ها رفتار متفاوتی نشان داده است؛ به‌طوری‌که درصدهای پایین‌تر کامپوزیت‌ها، مانند B50/A30/N20 با 2 و 3 درصد منجر به کاهش انبساط و افزایش پایداری حجمی شده‌اند، در حالی‌که درصدهای بالاتر، به‌ویژه در کامپوزیت B80/A15/N05 با افزایش ظرفیت جذب آب، رفتار منبسط‌شونده‌تری

از خود نشان داده‌اند. هم‌چنین، کامپوزیت‌های مورد استفاده باعث افزایش رطوبت خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) گردید که بیانگر بهبود پایداری ساختار خاک و ظرفیت نگهداری آب بود. این نتایج به‌طورکلی بر توانایی کامپوزیت‌ها در بهبود ویژگی‌های مکانیکی و رطوبتی خاک تأکید دارد و نشان می‌دهد که انتخاب نوع و درصد مناسب کامپوزیت‌ها بسته به کاربرد موردنظر می‌تواند نقش مهمی در افزایش عملکرد خاک در مصارف کشاورزی، مهندسی و مدیریت منابع آب ایفا کند. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب بتونیت- آلژینات- نانوسلولز می‌تواند به‌طور مؤثری حدود اتربرگ خاک را بهبود بخشد. افزایش حدود اتربرگ (حد روانی و حد خمیری) در خاک‌ها می‌تواند کاربردهای مثبتی در زمینه‌های مختلف مهندسی و کشاورزی داشته باشد. افزایش حدود اتربرگ می‌تواند در برخی خاک‌ها به کاهش نفوذپذیری و افزایش قدرت نگهداری آب منجر شود

نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنای اولیه برای بررسی اثرات مشابه در سایر انواع خاک‌ها استفاده شود، نتایج آن نیاز به تأیید و بررسی‌های بیشتر در خاک‌های مختلف و تحت شرایط متفاوت دارند تا قابلیت تعمیم پیدا کنند.

که در کاربردهای کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مفید است. با این حال، استفاده از این ویژگی باید متناسب با نیاز خاک و اهداف خاص پروژه مهندسی یا کشاورزی باشد، زیرا در خاک‌هایی با بافت درشت‌تر، افزایش حدود اتربرگ ممکن است اثرات منفی بر زهکشی و تهویه خاک داشته باشد.

منابع

1. Mugandani, R., Mwadzingeni, L., & Mafongoya, P. (2021). Contribution of conservation agriculture to soil security. *Sustainability*, 13(17), 9857. <https://doi.org/10.3390/su13179857>.
2. Hou, D. (2023). Sustainable soil management for food security. *Soil Use & Management*, 39(1), 1-7. <https://doi.org/10.1111/sum.12883>.
3. Meena, D. K., Lamani, H. D., Yadav, R., Saikanth, R. K., Singh, O., Yerasi, S., & Rai, S. (2023). Soil science and sustainable farming: paving the way for food security. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(10), 2419-2424. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i102907>.
4. Taghipour, K., Heydari, M., Kooch, Y., Fathizad, H., Heung, B., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2022). Assessing changes in soil quality between protected and degraded forests using digital soil mapping for semiarid oak forests, Iran. *CATENA*, 213, 106204. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106204>.
5. Ahamefule, H. E., Eifediyi, E. K., Amana, M. S., Olaniyan, J. O., Ihem, E., Ukelina, C. U., Adepoju, S., Ridwan, T., & Fatola, F. O. (2020). Comparison of traditional and modern approaches to soil conservation in a changing climate: a review. *Bulgarian Journal of Soil Science, Agrochemistry and Ecology*, 54(1), 44-62.
6. Marto, A., Latifi, N., & Eisazadeh, A. (2014). Effect of non-traditional additives on engineering and microstructural characteristics of laterite soil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 6949-6958. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1286-1>.
7. Blanck, G., Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2014). Soil treatment with organic non-traditional additives for the improvement of earthworks. *Acta Geotechnica*, 9, 1111-1122. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0251-6>.
8. Barthod, J., Rumpel, C., & Dignac, M. F. (2018). Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2), 17. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0491-9>.
9. El-Ngar, D. A., & Abu El-Ezz, A. F. (2021). Attempting rice cultivation in sandy soil improved with compost and bentonite under drip irrigation system. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 12(12), 883-891. <https://dx.doi.org/10.21608/jssae.2021.107848.1039>.
10. Wang, N., Wang, B., Wan, Y., Gao, B., & Rajput, V. D. (2023). Alginate-based composites as novel soil conditioners for sustainable applications in agriculture: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 348, 119133. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119133>.
11. Ngo, A. T., Mori, Y., & Bui, L. T. (2024). Effects of cellulose nanofibers on soil water retention and aggregate stability. *Environmental Technology & Innovation*, 35, 103650. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103650>.
12. Al-Taey, D. K., Hussain, A. J., & Kadhum, H. J. (2023). Bentonite Impact

- on Soil Properties and Biological Activity in the Face of Drought: A Review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1262, No. 4, p. 042058). IOP Publishing.
13. 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.014>.
 14. Tomadoni, B., Salcedo, M. F., Mansilla, A. Y., Casalongué, C. A., & Alvarez, V. A. (2020). Macroporous alginate-based hydrogels to control soil substrate moisture: Effect on lettuce plants under drought stress. *European polymer journal*, 137, 109953. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109953>.
 15. Zhang, S., He, F., Fang, X., Zhao, X., Liu, Y., Yu, G., Zhou, Y., Feng, Y., & Li, J. (2022). Enhancing soil aggregation and acetamiprid adsorption by ecofriendly polysaccharides hydrogel based on Ca^{2+} -amphiphilic sodium alginate. *Journal of Environmental Sciences*, 113, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.05.042>.
 16. Behboudi, M., Zad, A. A., Yazdi, M., & Tohidi, A. (2024). Effect of cellulose nanofibers and recycled glass powder on the geotechnical and microstructural parameters of dispersive soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(7), 290. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03785-9>.
 17. Takahashi, H., Omori, S., Asada, H., Fukawa, H., Gotoh, Y., & Morikawa, Y. (2021). Mechanical properties of cement-treated soil mixed with cellulose nanofibre. *Applied Sciences*, 11(14), 6425. <https://doi.org/10.3390/app11146425>.
 18. De Vos, B., Lettens, S., Muys, B., & Deckers, J. (2007). Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use and Management*, 23(3), 221-229. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00084.x>.
 19. Wallinga, I., Van Vark, W., Houba, V. J. G., & Van der Lee, J. J. (1989). Soil and plant analysis, series of syllabi part 7, plant analysis procedure. Wageningen Agriculture University, Wageningen, 7, 197-200.
 20. Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 383-411.
 21. Fabryanty, R., Valencia, C., Soetaredjo, F. E., Putro, J. N., Santoso, S. P., Kurniawan, A., Ju, Y., & Ismadiji, S. (2017). Removal of crystal violet dye by adsorption using bentonite-alginate composite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5677-5687. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.10.057>.
 22. Oussalah, A., Boukerroui, A., Aichour, A., & Djellouli, B. (2019). Cationic and anionic dyes removal by low-cost hybrid alginate/natural bentonite composite beads: adsorption and reusability studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 854-862. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.197>.
 23. Malekzadeh, E., Tatari, A., & Dehghani Firouzabadi, M. (2024). Effects of biodegradation of starch-nanocellulose films incorporated with black tea extract on soil quality. *Scientific Reports*, 14(1), 18817. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69841-2>.
 24. Mirkhani, R., Saadat, S., Shabanpour, S. M., Aria, P. V., & Yegane, M. (2008). Estimation of soil consistency limits by using readily available characteristics. *Journal of Soil Science*, 21(2), 201-207. <https://doi.org/10.22092/ijsr.2018.127087>.
 25. Schafer, W. M., & Singer, M. J. (1976). A new method of measuring shrinkswell potential using soil pastes. *Soil Science Society of America Journal*, 40(5), 805-806. <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000050050x>.

26. Rieke, E. L., Bagnall, D. K., Morgan, C. L. S., Flynn, K. D., Howe, J. A., Greub, K. L. H., Mac Bean, G., Cappellazzi, S. B., Cope, M., Liptzin, D., Norris, C. E., Tracy, P. W., Aberle, E., Ashworth, A., Tavarez, O. B., Bary, A. I., Baumhardt, R. L., Borbón Gracia, A., Brainard, D. C., Brennan, J. R., & Honeycutt, C. W. (2022). Evaluation of aggregate stability methods for soil health. *Geoderma*, 428, 116156. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116156>.
27. Smyth, M., M'bengue, M. S., Terrien, M., Picart, C., Bras, J., & Foster, E. J. (2018). The effect of hydration on the material and mechanical properties of cellulose nanocrystal-alginate composites. *Carbohydrate Polymers*, 179, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.002>.
28. Dutta, R. K., & Yadav, J. S. (2022). The impact of variation of gypsum and water content on the engineering properties of expansive soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 9(5), 631-652. <https://doi.org/10.1007/s40515-021-00192-5>.
29. Ying, Z., Cui, Y. J., Duc, M., Benahmed, N., Bessaies-Bey, H., & Chen, B. (2021). Salinity effect on the liquid limit of soils. *Acta Geotechnica*, 16(4), 1101-1111. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01092-7>.
30. Fernández-Pérez, M., Villafranca-Sanchez, M., Gonzalez-Pradas, E., Martinez-Lopez, F., & Flores-Cespedes, F. (2000). Controlled release of carbofuran from an alginate-bentonite formulation: water release kinetics and soil mobility. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(3), 938-943. <https://doi.org/10.1021/jf981296j>.
31. Vitale, E., Deneele, D., & Russo, G. (2020). Microstructural investigations on plasticity of lime-treated soils. *Minerals*, 10(5), 386. <https://doi.org/10.3390/min10050386>.
32. Mishra, A. K., Rao, S. M., & Dhawan, S. (2007). Analysis of swelling and shrinkage behavior of compacted clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(3), 289-298. <https://doi.org/10.1007/s10706-007-9165-0>.
33. Sellaf, H., & Balegh, B. (2023). An experimental study on the effect of plastic waste powder on the strength parameters of tuff and bentonite soils treated with cement. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(2), 10322-10327. <https://doi.org/10.48084/etasr.5580>.
34. Babu, N. M., & Mishra, A. K. (2023). Influence of salt permeants on the swelling and strength behavior of fibre treated black cotton soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(6), 2392-2402. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1453-6>.
35. Javiz, E., Jalalian, A., Mosaddeghi, M. R., Chavoshi, E., & Honarjoo, N. (2023). Assessment of wind erosion and physical and mechanical properties of bentonite clay mulch in an arid region. *Journal of Arid Environments*, 213, 104974. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104974>.
36. Soltaninejad, S., Bp, N., & Marandi, S. M. (2023). Performance evaluation of clay plastic concrete of cement and epoxy resin composite as a sustainable construction material in the durability process. *Sustainability*, 15(11), 8987. <https://doi.org/10.3390/su15118987>.
37. Alexander, J. A., Ahmad Zaini, M. A., Surajudeen, A., Aliyu, E. N. U., & Omeiza, A. U. (2019). Surface modification of low-cost bentonite adsorbents-a review. *Particulate Science and Technology*, 37(5), 538-549. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1438548>.
38. Mi, J., Gregorich, E. G., Xu, S., McLaughlin, N. B., & Liu, J. (2020). Effect of bentonite as a soil amendment on field water-holding capacity, and millet photosynthesis and grain quality. *Scientific Reports*, 10(1), 18282. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75350-9>.
39. Zhang, H., Chen, W., Zhao, B., Phillips, L. A., Zhou, Y., Lapen, D. R., & Liu, J. (2020). Sandy soils amended with

- bentonite induced changes in soil microbiota and fungistasis in maize fields. *Applied Soil Ecology*, 146, 103378. [https:// doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103378](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103378).
40. Wade, E., Zowada, R., & Foudazi, R. (2021). Alginate and guar gum spray application for improving soil aggregation and soil crust integrity. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100114>.
41. Salimi Bajestani, M., Kiani, F., Ebrahimi, S., Malekzadeh, E., & Tatari, A. (2025). Effect of bentonite/ alginate/ nanocellulose composites on soil and water loss: An response surface methodology (RSM)-based optimization approach. *International Journal of Biological Macromolecules*, 403(1), 140815. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140815>.

