Effects of Different Carbon Nanomaterials on the Shear Strength and Penetration Resistance of a Sandy Loam Soil under Different Soil Moisture Conditions

ABSTRACT

In recent years, using carbon nanomaterials as soil amendments has increased owing to their unique properties. However, the effects of carbon nanomaterials on soil properties, particularly soil shear strength and penetration resistance, remain limited. Therefore, we evaluated the effects of 0, 50, and 100 mg kg^{-1} of graphene, graphene oxide, reduced graphene oxide, multi-walled carbon nanotubes, and multi-walled carbon nanotubes-OH on the shear strength and penetration resistance of a sandy loam soil under 100, 75, and 50% field capacity (FC) moisture conditions in a six-month experiment. The effects of the different nanomaterials on shear strength and penetration resistance were different. Specifically, graphene and multi-walled carbon nanotubes-OH had no significant effect on shear strength, whereas 100 mg kg^{-1} of them increased penetration resistance by 31.4% and 22.4%, respectively, compared to the control. However, graphene oxide, reduced graphene oxide, and multi-walled carbon nanotubes increased both penetration resistance and shear strength, with this effect increasing with increasing application level. Furthermore, the interaction effect of different moisture conditions and the application levels on shear strength was statistically significant only at 50% FC and in the graphene oxide treatments, resulting in a reduction in shear strength. In contrast, penetration resistance decreased by 17.7% and 15% in reduced graphene oxide and multi-walled carbon nanotube treatments, respectively. Findings indicated that the type, application rate, and physicochemical properties of nanomaterials play decisive roles in the manner by which these nanomaterials modify soil, and that the targeted application of these materials can be an effective approach for improving soil quality.

Keywords: *Carbon nanotubes, Cone resistance, Graphene, Graphene oxide, Soil consistency*

ویرایشاری نشده

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil is the primary medium for crop production. In addition to supplying the nutritional requirements of plants, it must also possess appropriate physical and mechanical properties to withstand damage caused by tillage operations, agricultural machinery traffic, and environmental factors. Two important properties in this regard are soil shear strength and soil penetration resistance, which play decisive roles in soil structural stability, root development, and ultimately crop yield. Numerous materials have been proposed for soil amendment and enhancing its strength; however, in recent years, carbon nanomaterials have attracted considerable attention owing to their unique physical and chemical properties. Carbon nanomaterials are carbon-based materials, the most important of which are carbon nanotubes and graphene-based materials. In addition to affecting soil penetration resistance and shear strength, these materials also influence other soil properties and can be used as soil amendments. On the other hand, soil moisture content is one of the most important factors that can affect soil penetration resistance and shear strength. Therefore, investigating the combined effects of carbon nanomaterials and different soil moisture conditions provides valuable information on soil management under different conditions. Consequently, the goal

of this study was to compare the effects of five different nanomaterials on soil penetration resistance and shear strength under different soil moisture conditions in a sandy loam soil.

Materials and Method

This study was conducted as a factorial experiment based on a completely randomized design with three replicates. The experimental treatments consisted of different carbon nanomaterials (multiwalled carbon nanotubes, multiwalled carbon nanotubes-OH, graphene, graphene oxide, and reduced graphene oxide), each applied at three levels (0, 50, and 100 mg kg^{-1}), under three different soil moisture levels (100, 75, and 50% of field capacity). Before the application of the treatments, the physical and chemical properties of the soil were determined using standard methods. After the application of the nanomaterial treatments, the moisture content of the samples was adjusted to the predetermined levels, and after six months, soil shear strength and soil penetration resistance were measured. Soil shear strength was measured using a vane shear tester, whereas soil penetration resistance was measured using a handheld penetrometer. Finally, the obtained data were statistically analyzed through ANOVA and Duncan's multiple range mean comparison test at the probability level of 5%.

Results and Discussion

Results showed that the response of soil shear strength and penetration resistance to carbon nanomaterials was highly dependent on the type, morphology, chemical, and physical characteristics, as well as the application rate of the nanomaterials, and that not all nanomaterials can be expected to exhibit similar behavior in soil. The results showed that, among the nanomaterials investigated, graphene oxide and reduced graphene oxide had the greatest effects on soil shear strength, whereas carbon nanotubes had the greatest effect on soil penetration resistance. Furthermore, the application of 100 mg kg^{-1} of graphene oxide, reduced graphene oxide, and carbon nanotubes significantly enhanced the soil shear strength by 74.3, 90.1, and 53.3%, respectively. Likewise, soil penetration resistance increased by 25.7, 22.4, and 63.5%, respectively, compared with the control treatment. Overall, the nanomaterials increased both soil shear strength and penetration resistance, with these properties increasing significantly as nanomaterial concentration increased.

Conclusions

Overall, the results showed that the use of carbon nanomaterials with high specific surface area can be employed as an approach to increase soil shear strength and soil penetration resistance according to the intended application. However, selecting an appropriate type of nanomaterial and considering soil moisture conditions and other soil conditions are key factors in achieving the greatest improvement in performance of soil. Furthermore, considering that these nanomaterials are used in various fields, including agriculture and engineering, each of these nanomaterials can be utilized according to the intended objective. Moreover, since environmental stresses, including drought stress, constitute a major issue worldwide, including in Iran, nanomaterials can be used to improve soil properties under specific environmental constraints. Based on the findings of this study, it is recommended that the effects of different concentrations of carbon nanomaterials be investigated over a wider range of soil moisture conditions to determine the optimum nanomaterial concentration. It is also recommended that the effects of these nanomaterials be evaluated in soils with different textures, organic matter contents, and other properties to clarify the role of the intrinsic soil properties in the performance of these nanomaterials.

اثر نانومواد کربنی مختلف بر مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ یک خاک لوم‌شنی در شرایط رطوبتی مختلف

چکیده

بهبود کیفیت خاک و کاهش محدودیت‌های رشد ریشه، از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از نانومواد کربنی به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک، افزایش یافته است. با این حال اطلاعات موجود در مورد اثر نانومواد کربنی بر ویژگی‌های خاک به‌ویژه مقاومت‌های برشی و مقاومت به نفوذ خاک محدود است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر نانومواد کربنی مختلف (گرافن، اکسیدگرافن، اکسیدگرافن احیاشده، نانولوله‌های کربنی چندجداره و نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح شده با OH) هرکدام در سطوح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بر مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ یک خاک لوم‌شنی در شرایط رطوبتی مختلف (سطوح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) در یک آزمایش گلخانه‌ای به‌مدت شش ماه انجام شد. نتایج نشان داد اثر نانومواد مختلف بر مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ از نظر آماری متفاوت بود به‌طوری که گرافن و نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح شده با OH اثر معنی‌داری بر مقاومت برشی نداشتند در حالی مقاومت به نفوذ را در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، به‌ترتیب به میزان ۳۱/۴ و ۲۲/۴ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند. درمقابل اکسیدگرافن، اکسیدگرافن احیاشده، نانولوله‌های کربنی چندجداره سبب افزایش مقاومت به نفوذ و مقاومت برشی شدند و این اثر با افزایش سطح نانوماده افزایش یافت، این اختلاف را می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت آن‌ها نسبت داد. علاوه‌براین اثر متقابل شرایط رطوبتی مختلف و کاربرد نانومواد کربنی بر مقاومت برشی تنها برای کمترین سطح رطوبت و در تیمارهای حاوی اکسیدگرافن از نظر آماری معنی‌دار بود و سبب کاهش مقاومت برشی شد. همچنین نتایج نشان داد که مقاومت به نفوذ در نمونه‌های تیمارشده با اکسیدگرافن احیاشده و نانولوله‌های کربنی به‌ترتیب به میزان ۱۷/۷ و ۱۵ درصد کاهش یافت. این یافته‌ها بیانگر آن است که نوع، مقدار و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوماده نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه اصلاح خاک توسط این نانومواد داشته و استفاده هدفمند از این مواد می‌تواند رویکردی مؤثر در افزایش کیفیت خاک باشد.

کلیدواژه‌ها: *اکسیدگرافن، پایایی خاک، گرافن، مقاومت فروروی، نانولوله‌های کربنی*

ویرایش نشده

۱. مقدمه

کیفیت تولیدات کشاورزی به‌طور مستقیم به سلامت و کیفیت خاک وابسته است. از این رو تخریب خاک به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های زیست‌محیطی و کشاورزی در جهان تبدیل شده است (Elsayed et al., 2025). مهم‌ترین عامل تخریب خاک، تراکم خاک است که سبب محدودیت در رشد و توسعه ریشه می‌شود. تراکم خاک با افزایش عبور و مرور ماشین‌های کشاورزی با هدف افزایش بهره‌وری و سودآوری، به‌طور اجتناب‌ناپذیری افزایش یافته و با ماندگاری طولانی‌مدت، سبب کاهش سودآوری فعالیت‌های کشاورزی شده است (Stefanow & Dudziński, 2021). مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ (مقاومت نفوذی) خاک از ویژگی‌های مهم خاک هستند، که برای محاسبه و ارزیابی توانایی خاک در تحمل تردد ماشین‌های کشاورزی و کیفیت خاک و همچنین میزان نفوذ و توسعه ریشه در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقاومت به نفوذ استحکام پیوند میان ذرات خاک را توصیف می‌کند (Pham et al., 2023; Klonowski et al., 2024). مقاومت برشی نیز مهم‌ترین ویژگی مکانیکی خاک است که میزان مقاومت خاک در برابر نیروهای برشی را بیان می‌کند (El Hariri et al., 2023).

برای افزایش مقاومت و درنتیجه اصلاح تراکم خاک، استفاده از روش‌ها و ترکیبات اصلاح‌کننده مختلفی از جمله سیمان، باطله زغال‌سنگ، مواد الیافی، ذرات لاستیکی و مواد زیستی پیشنهاد شده است. این مواد سبب تقویت پیوند میان ذرات خاک شده و میزان چسبندگی خاک را افزایش می‌دهند. با این حال، بسیاری از این مواد دارای محدودیت‌ها و معایبی هستند. سیمان، آهک، باطله زغال‌سنگ و ذرات لاستیکی از دوام نسبتاً اندکی برخوردار بوده یا می‌توانند موجب آلودگی‌های زیست‌محیطی شوند، در حالی که مواد الیافی مانند الیاف کاه، مستعد تجزیه بوده و از اثربخشی بلندمدت محدودی برخوردار هستند (Wang et al., 2025). در

مقابل، مواد نانومقیاس[1]شامل نانوذرات[2]و نانولوله‌ها[3]به‌طور گسترده به‌منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی به کار گرفته شده‌اند. مواد نانومقیاس، به دلیل سطح ویژه بسیار زیاد، بارهای الکتریکی سطحی و وجود منافذ ریز، می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی ویژگی‌های فیزیکی–شیمیایی خاک را بهبود بخشند. رایج‌ترین مواد نانومقیاس مورد استفاده عبارتند از: دی‌اکسید سیلیس، اکسید آلومینیوم، گرافن‌ها و نانولوله‌های کربنی. در این میان نانولوله‌های کربنی و گرافن‌ها به‌طور گسترده برای اصلاح ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Naseri et al., 2016).

نانولوله‌های کربنی (CNTs[4]) از ورقه‌های گرافنی لوله‌ای با قطر حدود ۱ نانومتر تشکیل شده‌اند که طول آن‌ها می‌تواند به چندین میکرومتر برسد. این نانولوله‌ها شامل دو گروه اصلی نانولوله‌های کربنی تک‌جداره (SWCNTs[5]) و چندجداره (MWCNTs[6]) هستند. انواع تک‌جداره از یک لایه منفرد گرافن و انواع چندجداره از یک ساختار استوانه‌ای هم‌محور که توسط چندین لایه گرافنی احاطه شده تشکیل شده‌اند. تفاوت در قطر و تعداد دیواره‌ها تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و حوزه‌های کاربردی آن‌ها دارد اما به‌طور کلی از منظر تولید انبوه، ساخت نانولوله‌های کربنی چندجداره، نسبتاً ساده‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر است (Ijaz et al., 2023). یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در مسیر کاربرد این مواد، تمایل آن‌ها به تجمع و کلوخه‌شدن است که سبب از دست رفتن ویژگی‌های سودمند آن‌ها می‌شود. برای غلبه بر این مشکل معمولاً از مواد فعال سطحی[7]و یا انرژی فراصوت[8] به‌منظور بهبود پراکنش آن‌ها در محلول استفاده می‌شود (Figueiredo et al., 2015).

گرافن[9](G) نیز از یک شبکه شش ضلعی لانه زنبوری متشکل از اتم‌های کربن تشکیل شده که این آرایش منحصربه‌فرد سبب شده گرافن به‌عنوان یک ماده دوبعدی با ضخامت تنها یک لایه اتم شناخته شود و ویژگی‌های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی ویژه‌ای از خود نشان دهد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها پیرامون گرافن به‌طور گسترده افزایش یافته و دامنه کاربردهای آن نیز به‌طور چشمگیری گسترش یافته است. در نتیجه، خانواده‌ای از مواد مبتنی بر گرافن توسعه یافته‌اند که شامل اکسیدگرافن[10](GO) و اکسیدگرافن احیاشده[11](rGO) هستند. در مقایسه با گرافن، اکسیدگرافن، از قابلیت پراکنش‌پذیری بیشتری برخوردار است و به دلیل سطح ویژه بسیار زیاد، کاربرد آن در حوزه‌های مختلف نیز افزایش یافته است (Yang et al., 2024).

امروزه افزایش جمعیت سبب افزایش نیاز به تولید محصولات کشاورزی و درنتیجه افزایش استفاده از زمین‌های کشاورزی شده است. در نتیجه برای حفظ خاک و تداوم کشاورزی، توجه به مدیریت خاک و کشاورزی پایدار اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. کاربرد نانومواد مختلف در حوزه کشاورزی افزایش یافته و پژوهش‌های متعددی در مورد اثر نانومواد بر ویژگی‌های مختلف خاک (Riding et al., 2015; Baragaño et al., 2020; Hammerschmiedt et al., 2023; Liu et al., 2023; Sol-Magdaleno et al., 2025) و رشد و ترکیب شیمیایی گیاه (Zahedifar et al., 2016, 2019;Najafian and Zahedifar, 2018; Semenova et al., 2024; Rafieerad et al., 2026) انجام شده‌است. اما مطالعات بسیار محدودی (Saleem et al., 2023; Alsharef et al., 2020) به اثر نانومواد کربنی بر مقاومت فروروی و مقاومت برشی پرداخته و علاوه‌برآن نتایج متفاوتی نیز گزارش شده است. برخی تحقیقات افزایش و برخی دیگر کاهش (Wang et al., 2025; Park et al., 2024) را گزارش کردند . همچنین تاکنون در ارتباط با مقایسه اثر انواع نانومواد کربنی با یکدیگر بر ویژگی‌های مذکور و به‌ویژه در شرایط رطوبتی مختلف خاک، تاکنون پژوهشی انجام نشده

ویرایش استخراجی نشده

---

1. Nano-sized Materials
2. Nanoparticles
3. Nanotubes
4. Carbon Nanotubes
5. Single-Walled Carbon Nanotubes
6. Multi-Walled Carbon Nanotubes
7. Surfactants
8. Ultrasonic
9. Graphene
10. Graphene Oxide
11. Reduced Graphene Oxide

است. بنابراین مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر سطوح مختلف (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) پنج نوع نانوماده شامل نانولوله‌های کربنی چندجداره، نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح شده با *OH*، گرافن، اکسیدگرافن و اکسیدگرافن احیاشده بر مقاومت‌های فروروی و برشی یک خاک آهکی با کلاس بافت لوم‌شنی در شرایط رطوبتی مختلف (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی) انجام شد.

۲. پیشینه پژوهش

نانوفناوری به عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور، از طریق بهبود سلامت خاک، ظرفیت بسیار مناسبی برای تحقق کشاورزی پایدار دارد. از این‌رو بسیاری از پژوهشگران، نانوفناوری را به‌عنوان یکی از ارکان اصلی انقلاب سوم کشاورزی معرفی کرده‌اند. در سال‌های اخیر شواهد نشان داده است که بین استفاده از نانومواد و و بهبود سلامت خاک ارتباط مستقیمی وجود دارد و نانوذرات پتانسیل مناسبی در اصلاح ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارند (Sharma & Kumar, 2024). اثر نانولوله‌های کربنی و گرافن‌ها بر ویژگی‌های مختلف فیزیکی (Ahmadi et al., 2024; Chen et al., 2024)، شیمیایی (Correia & Rasteiro, 2024; Peña-Álvarez et al., 2024) و زیستی خاک (Qiao et al., 2025; Yasmeen et al., 2024) و رشد گیاه (Zahedifar & Zohrabi, 2016; Zahedifar & Najafian, 2017; El-Kinany et al., 2025; Zafar et al., 2026) بررسی شده است اما مطالعات محدودی به بررسی اثر این نانومواد بر مقاومت فروروی و برشی خاک پرداخته‌اند. درمورد گرافن‌ها و نانولوله‌های کربنی نتایج ضد و نقیضی وجود دارد به‌طوری که Zhou و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند افزودن غلظت‌های مختلف (۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ درصد وزنی) اکسید گرافن به خاک، مقاومت برشی را افزایش داد و با افزایش میزان آن مقدار مقاومت برشی نیز افزایش یافته به‌گونه‌ای که در غلظت ۰/۰۸ درصد وزنی به بیشترین مقدار رسید و دلیل آن را پراکندگی مناسب اکسید گرافن در خاک و تقویت پیوندهای بین ذرات خاک دانستند. Fattah و همکاران (۲۰۲۱) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. درحالی‌که Al-Homidy و Al-Amoudi (۲۰۲۵) بیان کردند در مقادیر کم اکسید گرافن می‌تواند به‌عنوان راهکاری پایدار و سازگار با محیط زیست برای بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک استفاده شود اما در مقادیر زیادتر اثر منفی داشت. البته آنان نیز بیان کردند باتوجه به نوظهور بودن این علم نیاز به پژوهش‌های گسترده‌تری در این زمینه می‌باشد. در ارتباط با اثر نانومواد کربنی بر مقاومت به نفوذ خاک نیز مطالعات اندکی انجام شده است و بیشتر مطالعات مربوط به مباحث مهندسی خاک می‌باشد به‌عنوان نمونه در مطالعه Saleem و همکاران (۲۰۲۳) گزارش شده است با افزودن اکسید گرافن با مقادیر مختلف ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد وزنی به خاک، مقاومت به نفوذ نمونه‌های اصلاح‌شده تقریباً ۱۰ برابر بیشتر از خاک تیمارنشده بود و به‌طورکلی نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد اکسید گرافن به‌عنوان یک عامل بهسازی تأثیر بسیار زیادی بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد و استفاده از آن می‌تواند در فعالیت‌های عمرانی از جمله احداث جاده‌ها، سدها و پل‌ها، بسیار سودمند باشد.

Alsharef و همکاران (۲۰۲۰) عنوان کردند با افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی چندجداره (صفر، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی خاک خشک)، مقاومت برشی نیز به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و به ۲۵۹/۷ کیلوپاسکال رسید. آنان همچنین گزارش کردند نانومواد کربنی سبب پر شدن منافذ شده و یکپارچگی ساختار خاک را افزایش داده و در نتیجه سبب تقویت خاک می‌شوند. همچنین در یک مقاله مروری به‌طور کلی گزارش شد کاربرد نانولوله‌های کربنی در خاک موجب تشکیل ساختارهایی با استحکام و سختی بیشتری شده که این امر سبب می‌شود این مواد به‌عنوان اصلاح‌کننده به‌منظور افزایش استحکام و بهبود پایداری خاک، امروزه بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گیرند. درنتیجه این موضوع بر ضرورت انجام پژوهش‌های بیشتر برای درک بهتر عملکرد و ارزیابی پیامدهای کاربرد این مواد در خاک تأکید دارد (Alkhaza’leh et al., 2025). در مطالعه دیگری که توسط Jin و همکاران (۲۰۲۱) انجام شده بود،با افزایش مقدار نانولوله‌های کربنی مقاومت برشی، ابتدا روند افزایشی داشت اما پس از رسیدن به یک مقدار بهینه (۰/۰۱ درصد) روند کاهشی نشان داد. همچنین Abedi و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند در یک دوره ۲۸ روزه افزودن ۰/۱، ۰/۱۷ و ۰/۲۴ درصد وزنی از مخلوط نانولوله‌های کربنی و نانوصفحات گرافنی به ماسه تثبیت‌شده، موجب افزایش مقاومت به نفوذ به ترتیب به میزان ۶۵، ۳۱ و ۱۴ درصد نسبت به نمونه شاهد (بدون نانومواد) می‌شود. درحالی‌که افزایش بیش از

ویرایش شده

حد غلظت این ترکیب از ۰/۲۴ به ۰/۳۴ درصد، موجب کاهش ۱۳ درصدی مقاومت به نفوذ شد. بر اساس بررسی بعمل آمده از سوابق تحقیقاتی و باتوجه به اهمیت موضوع اثر نانومواد کربنی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌ویژه مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ، و از آنجایی که پژوهش‌های اندکی به این موضوع پرداخته‌اند، بنابراین لزوم انجام پژوهش حاضر پیش از پیش آشکار می‌شود.

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. تهیه خاک و نانومواد کربنی

برای انجام این پژوهش، خاک مورد نیاز از سری کوی اساتید (*Carbonatic, mesic, Fluventic Xerorthents*) دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه شیراز نمونه‌برداری و پس از هوا خشک شدن از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های اولیه خاک مورد مطالعه با استفاده از روش‌های استاندارد معمول آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

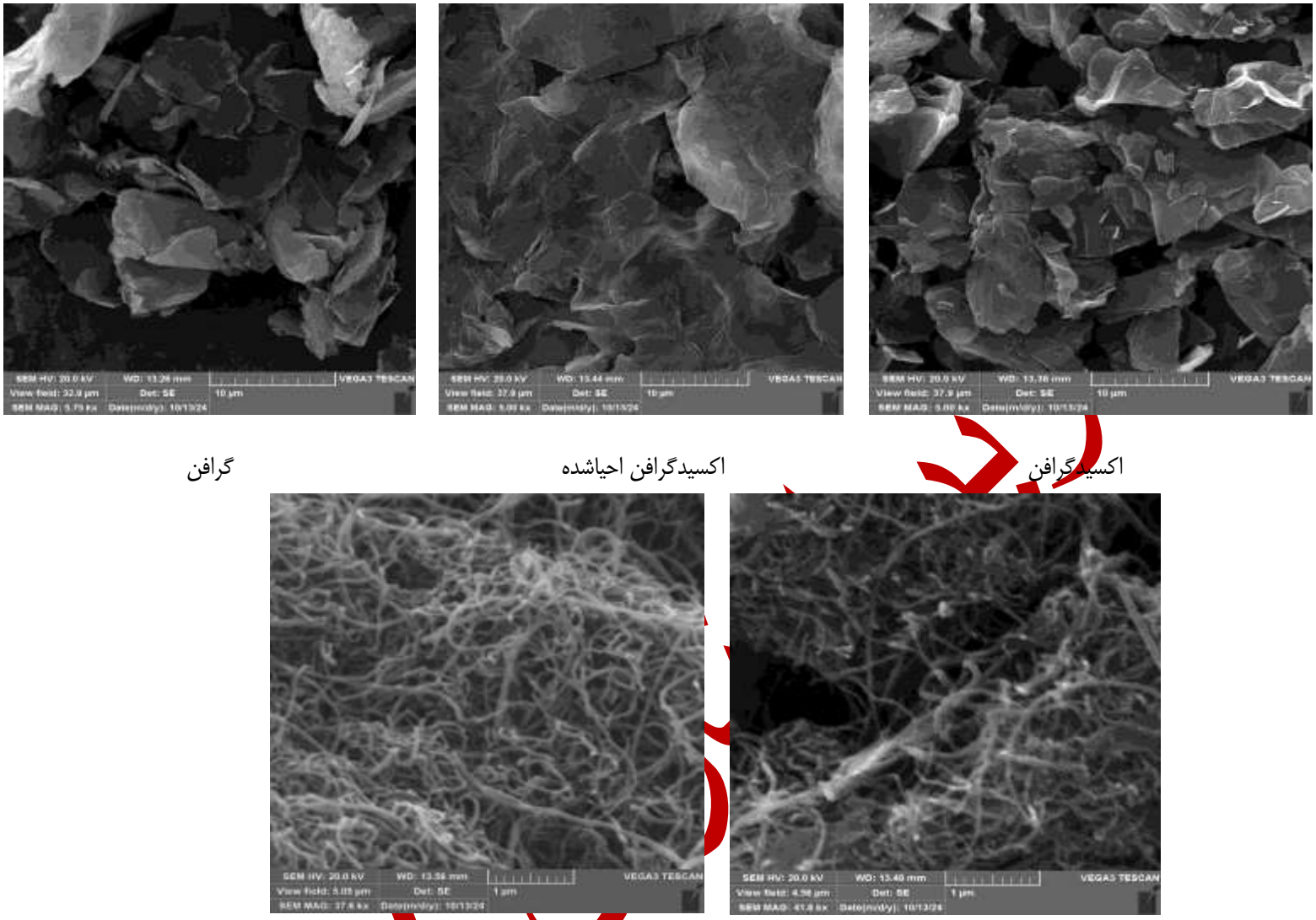
همچنین نانومواد مورد نیاز با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ از شرکت فاین نانو خریداری شدند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM[1]) نانومواد مورد استفاده نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های مربوط به خاک مورد استفاده در این پژوهش به همراه روش اندازه گیری و منابع مورد استفاده

ویژگی (واحد)	مقدار	روش	منبع
شن (درصد)	۵۵	روش هیدرومتر	Gee & Bauder (1986)
سیلت (درصد)	۳۰		
رس (درصد)	۱۵		
کلاس بافت خاک	لوم‌شنی		
رطوبت ظرفیت زراعی (درصد وزنی)	۳۰	سلول فشاری	Klute (1986)
ماده آلی (درصد)	۰/۴۹	اکسیداسیون مرطوب	Nelson & Sommers (1996)
پ‌هاش در خمیر اشباع خاک	۷/۹	پ‌هاش‌متر	Thomas (1996)
قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (دسی‌زیمنس در متر)	۰/۴۵	هدایت‌سنج الکتریکی	Rhoades (1996)

ویرایشی استاندارد نشده

1. Scanning Electron Microscopy



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نانومواد مورد استفاده در این پژوهش.

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های مربوط به نانومواد مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی‌ها (واحد)	نانومواد مورد استفاده				
	نانولوله‌های کربنی چندجداره	نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح شده با OH	اکسیدگرافن	اکسیدگرافن کاهش یافته	گرافن
ضخامت (نانومتر)	–	–	۳–۶	۳/۴–۷	۳–۶
خلوص (درصد)	۹۵<	۹۵<	۹۹	۹۸	۹۸
تعداد لایه‌ها	–	–	۸–۱۰	۶–۱۰	۲–۵
سطح ویژه (مترمربع بر گرم)	۱۱۰	۱۱۰	۲۱۰<	۲۱۰<	۱۵۵
قابلیت هدایت الکتریکی (زیمنس بر متر)	۱۰۰۰۰<	۱۰۰۰۰<	–	۵۶۰	–
محتوای گروه هیدروکسیل (OH) (درصد وزنی)	–	۱/۷۶	–	–	–

۳–۲. طرح آزمایش و آماده‌سازی نمونه‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل پنج نوع نانوماده کربنی (گرافن، اکسیدگرافن، اکسیدگرافن احیاشده، نانولوله‌های کربنی چندجداره و نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح شده با OH) هر کدام در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سه سطح رطوبت خاک شامل ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (%FC) بودند. لازم به ذکر است انتخاب سطوح گرافن در این پژوهش بر اساس مطالعات پیشین انجام شده در زمینه استفاده از نانومواد کربنی در بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک (Wang et al., 2025) و همچنین مطالعات انجام‌شده در زمینه کاربرد این مواد به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و بررسی اثر آن‌ها بر رشد و عملکرد گیاه انجام شده است. به‌طوری‌که در یک مقاله مروری به صراحت بیان شده است افزودن ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تا ۱۵۰ گرم بر کیلوگرم نانومواد کربنی به خاک، تأثیرات مثبتی بر بهره‌وری گیاه دارند (Das et al., 2023). ازاین‌رو، به‌منظور بررسی اثر مقدار نانومواد کربنی و تعیین روند تغییرات ویژگی‌های مورد مطالعه، سطوح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب به‌عنوان شاهد، سطوح متوسط و زیاد انتخاب شدند تا اثر افزایش مقدار گرافن بر ویژگی‌های مورد بررسی و همچنین وجود روند احتمالی در پاسخ خاک قابل ارزیابی باشد. همچنین، انتخاب سطوح رطوبت ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با هدف بررسی رفتار نمونه‌ها در شرایط مختلف رطوبتی به‌ترتیب در شرایط تنش رطوبتی زیاد، متوسط و بدون تنش و ارزیابی تأثیر میزان رطوبت بر اثرگذاری نانومواد‌کربنی انجام شد. این انتخاب امکان بررسی هم‌زمان اثر رطوبت و مواد مورد استفاده و همچنین بررسی اثر متقابل آنها را فراهم می‌کند. بنابراین، سطوح انتخاب‌شده ضمن پوشش دامنه مناسبی از مقادیر مورد نیاز برای ارزیابی اثر نانومواد‌کربنی، امکان مقایسه نتایج حاضر با یافته‌های مطالعات پیشین در زمینه اصلاح خاک و کاربرد مواد کربنی در محیط خاک و رشد گیاه را نیز فراهم می‌سازد.

برای مخلوط کردن نانومواد با خاک، ابتدا نانومواد در آب دیونیزه به مدت ۳۰ دقیقه و با قدرت ۵۰ هرتز با دستگاه التراسونیک، پراکنده شدند. سپس هرکدام از سطوح مختلف نانومواد به خوبی با ۷۰۰ گرم خاک مخلوط شده و به ظروف آلومینیومی مکعبی شکل با طول، عرض و ارتفاع به‌ترتیب ۱۹، ۱۲/۵ و ۴ سانتی‌متر منتقل شده و در به مدت شش ماه در شرایط گلخانه (با حداقل و حداکثر دما به‌ترتیب ۹ و ۴۰ درجه سلسیوس و حداقل و حداکثر رطوبت نسبی ۱۳ و ۵۸ درصد) نگهداری شدند. همچنین برای اعمال تیمارهای رطوبتی مورد نظر، ابتدا نمونه‌ها وزن و برای اولین مرتبه تا ظرفیت زراعی آبیاری شدند. پس از گذشت ۱۰ روز مجدد ظروف وزن شدند و کمبود آب تا رسیدن به رطوبت ظرفیت زراعی و سایر سطوح رطوبتی ذکر شده، با افزودن آب مقطر به میان لازم جبران شد. پس از آن نیز نمونه‌ها هر ۱۰ روز یک بار وزن شده و شرایط مختلف رطوبتی مدنظر به شکل گفته شده اعمال شد. برای دستیابی به شرایط کاملا تصادفی و افزایش دقت، در طول آزمایش، چندین مرتبه موقعیت قرارگیری واحدهای آزمایشی (ظروف خاک) تغییر داده شد.

۳–۳. اندازه‌گیری مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ

پس از گذشت یک دوره شش ماهه، مقاومت به نفوذ و مقاومت برشی در خاک مربوط به هر یک از تیمارها، به‌ترتیب با دستگاه نفوذسنج دستی (مدل ELE) و مقاومت‌سنج برش‌پره‌ای اندازه‌گیری شدند (Liang et al., 2025) (شکل ۲). در آزمایش مقاومت به نفوذ، میله استوانه‌ای شکل دستگاه نفوذسنج (به قطر ۶ میلی‌متر و طول ۵/۷ سانتی‌متر)، تا قسمت علامت‌گذاری شده به داخل خاک فشار داده شد و مقدار فشار لازم برای نفوذ از شاخص کناری دستگاه یادداشت شد. این آزمایش برای هرکدام از نمونه‌ها با ۳ تکرار انجام شد.

همچنین در اندازه‌گیری مقاومت برشی، ابتدا پره‌برشی چهارتیغه دستگاه به آرامی و تا جایی که پره‌ها کاملاً در خاک قرار بگیرد، وارد خاک شد. سپس پره‌ها با سرعت یکنواخت در جهت عقربه‌های ساعت چرخانده شد، تا خاک اطراف آن تحت تنش برشی قرار گیرد. زمانی که خاک در سطح دچار گسیختگی شد (تقریباً ۵ تا ۱۰ ثانیه بعد)، حداکثر مقدار تنش وارد شده، از روی صفحه مدرج در بالای دستگاه ثبت شد.

ویرایش شده



(الف) (ب) (ج)

شکل ۲. نمایی از دستگاه‌های: الف) مقاومت‌سنج برش پره‌ای، ب) نفوذسنجی دستی و ج) شماتیک اندازه‌گیری مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ در خاک مورد مطالعه

۳-۴. آنالیز آماری داده‌ها

به‌منظور بررسی معنی‌داری اثر تیمارها، از آزمون واریانس دو طرفه (ANOVA) استفاده شد. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شد. تمامی محاسبات آماری به کمک نرم‌افزار SAS و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

۴. یافته‌های پژوهش و بحث

۴-۱. مقاومت برشی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی نانومواد و میزان رطوبت، همچنین اثر متقابل آن‌ها، بر مقاومت برشی خاک از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). با این حال، بررسی جداگانه هر یک از انواع نانومواد نشان داد که پاسخ مقاومت برشی به سطوح مختلف نانومواد در شرایط رطوبتی مختلف در بین انواع نانومواد متفاوت است.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مورد بررسی بر مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ خاک (مگاپاسکال) مورد مطالعه

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		مقاومت برشی	مقاومت به نفوذ
رطوبت	۲	۰/۷۱**	۰/۱۱*
نانومواد	۴	۱/۹۰**	۰/۲۳**
سطوح مختلف نانومواد	۲	۲/۶۳**	۱/۴۸**
اثر متقابل نانومواد و رطوبت	۸	۰/۳۲*	۰/۰۸**
اثر متقابل سطوح نانومواد و رطوبت	۴	۰/۶۸**	۰/۰۹**
خطا	۹۰	۰/۱۵	۰/۰۳

** و * به‌ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد می‌باشند.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد اثرات اصلی سطوح نانومواد گرافن و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با OH و همچنین رطوبت بر مقاومت برشی از نظر آماری معنی‌دار نبود، اما اثر متقابل سطوح این نانومواد و رطوبت معنی‌دار بود که نشان می‌دهد تأثیر این

ویراستاری نشده

نانومواد بر مقاومت برشی به میزان رطوبت خاک وابسته است. در مورد گرافن، بیشترین میانگین مقاومت برشی در سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و رطوبت ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و کمترین آن مربوط به همین سطح از گرافن اما در رطوبت ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب با مقادیر ۲/۱۷ و ۰/۵ مگاپاسکال به دست آمد. همچنین در مورد نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با OH، بیشترین میانگین مقاومت برشی در سطح ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و رطوبت ۷۵ درصد ظرفیت زراعی و کمترین مقدار در همین میزان از این ماده اما در رطوبت ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب با مقادیر ۱/۳۳ و ۰/۵ مگاپاسکال مشاهده شد (جدول ۴).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش غلظت اکسیدگرافن، اکسیدگرافن احیاشده و نانولوله‌های کربنی،مقاومت برشی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری که کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم اکسیدگرافن، اکسیدگرافن احیاشده و نانولوله‌های کربنی، به‌ترتیب سبب افزایش ۶۳/۸، ۵۴/۹ و ۱۰/۵ درصدی مقاومت برشی نسبت به شاهد (تیمار بدون نانومواد) شدند (هرچند افزایش مشاهده شده در اثر کاربرد نانولوله‌های کربنی از نظر آماری معنی‌دار نبود). همچنین کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از نامواد ذکر شده، مقاومت برشی خاک را به‌طور معنی‌داری به ترتیب به میزان ۷۴/۳، ۹۰/۱ و ۵۳/۳ درصد افزایش داد. علاوه بر این بیشترین میانگین مقاومت برشی خاک در تیمارهای اکسیدگرافن و اکسیدگرافن احیاشده در شرایط کاربرد بیشترین غلظت این مواد و کمترین رطوبت و به‌ترتیب به میزان ۳ و ۲/۸۳ مگاپاسکال مشاهده شد.

در مورد اثرات اصلی سطوح رطوبتی مختلف بر مقاومت برشی خاک لازم به ذکر است که تنها در خاک‌های تیمارشده با اکسیدگرافن و در کمترین میزان رطوبت (۵۰ درصد ظرفیت زراعی)، تأثیر معنی‌داری نسبت به شاهد دیده شد و مقاومت برشی نیز به‌طور معنی داری به میزان ۴۸ درصد در مقایسه با شاهد (تیمار بدون محدودیت رطوبتی) افزایش یافت (جدول ۴). باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول (۴) بیشترین میانگین کلی مقاومت برشی به ترتیب با مقادیر ۱/۵۴ و ۱/۶۴ مگاپاسکال مربوط به خاک‌های تیمار شده با اکسیدگرافن و اکسیدگرافن احیاشده بود. که این رفتار را می‌توان به سطح ویژه زیادتر این مواد، سطح تماس بیشتر با خاک و ایجاد چسبندگی و مقاومت برشی بیشتر در خاک نسبت به سایر نانومواد کربنی، نسبت داد (جدول ۲).

ویرایشاری نشده

جدول ۴. اثر نانومواد کربنی و شرایط رطوبتی مختلف بر مقاومت برشی خاک (مگاپاسکال)

سطح رطوبت (درصد رطوبت ظرفیت مزرعه)	غلظت نانومواد (میلی‌گرم در کیلوگرم) ۰	۵۰	۱۰۰	میانگین
	گرافن (میانگین: B ۱/۲۹)			
۱۰۰	۰/۸۳ cb	۱/۵۰ ab	۱/۵۰ ab*	**۱/۲۷ AB**
۷۵	۱/۱۷ cb	۰/۵۰ c	۱/۵۰ ab	**۱/۰۵ B**
۵۰	۱/۱۶ bc	۲/۱۷ a	۱/۳۳ b	**۱/۵۵ A**
میانگین	**۱/۰۵ A**	**۱/۳۹ A**	**۱/۴۴ A**	
	اکسیدگرافن (میانگین: A ۱/۵۴)			
۱۰۰	۰/۸۳ d	۱/۳۳ cd	۱/۶۶ c	**۱/۲۷ B**
۷۵	۱/۱۶ cd	۲/۳۳ b	۰/۸۳ d	**۱/۴۴ B**
۵۰	۱/۱۶ cd	۱/۵۰ c	۳/۰۰ a	**۱/۸۸ A**
میانگین	**۱/۰۵ B**	**۱/۷۲ A**	**۱/۸۳ A**	
	اکسیدگرافن احیاشده (میانگین: A ۱/۶۴)			
۱۰۰	۰/۸۳ c	۲/۰۰ ab	۱/۸۳ b	**۱/۵۵ A**
۷۵	۱/۱۶ bc	۱/۶۶ bc	۱/۶۶ bc	**۱/۵۰ A**
۵۰	۱/۳۳ bc	۱/۵۰ bc	۲/۸۳ a	**۱/۸۸ A**
میانگین	**۱/۱۱ B**	**۱/۷۲ A**	**۲/۱۱ A**	
	نانولوله‌های کربنی (میانگین: B ۱/۲۷)			
۱۰۰	۰/۶۶ cd	۱/۵۰ ab	۱/۵۰ ab	**۱/۲۲ A**
۷۵	۱/۳۳ b	۱/۵۰ ab	۱/۳۳ b	**۱/۳۹ A**
۵۰	۱/۱۶ bc	۰/۵۰ d	۲/۰۰ a	**۱/۲۲ A**
میانگین	**۱/۰۵ B**	**۱/۱۶ B**	**۱/۶۱ A**	
	نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با OH (میانگین: C ۰/۹۶)			
۱۰۰	۰/۸۳ bcd	۰/۸۳ bcd	۱/۱۶ ab	**۰/۹۴ A**
۷۵	۱/۱۶ ab	۱/۳۳ a	۰/۶۶ cd	**۱/۰۵ A**
۵۰	۱/۱۶ ab	۰/۵۰ d	۱/۰۰ abc	**۰/۸۸ A**
میانگین	**۱/۰۵ A**	**۰/۸۸ A**	**۰/۹۴ A**	

* در مورد هر ماده، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف کوچک مشترک هستند از نظر آماری بر اساس آزمون چنددامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

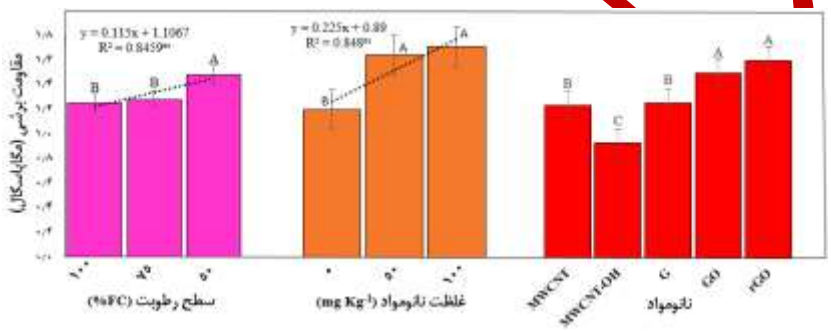
ویراستاری شده

تفاوت مشاهده‌شده در عملکرد نانومواد را می‌توان به تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها مرتبط دانست. این ویژگی‌ها بر میزان پراکنش نانومواد، برهم‌کنش آن‌ها با ذرات خاک و در نهایت ویژگی‌های مختلف خاک به‌ویژه مقامت برشی تأثیرگذارند. عدم تاثیر معنی‌دار گرافن بر مقاومت برشی خاک را می‌توان به تمایل ورقه‌های آن به تجمع ناشی از آب‌گریزی آن نسبت داد که سبب می‌شود سطح ویژه مؤثر و برهمکنش با ذرات خاک کاهش یابد (Texter, 2014). در مقابل اکسید گرافن احیاشده به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی اکسیژنی و پراکنش بهتر در محیط‌های آبی، برهم‌کنش بیشتری با ذرات خاک برقرار کرده و سبب کاهش تخلخل و کوچک‌تر شدن اندازه منافذ شده و انسجام خاک را افزایش می‌دهد (Ciawi et al., 2023). Naseri و همکاران (۲۰۱۶) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند.

نانولوله‌های کربنی نیز به دلیل نسبت طول به قطر زیاد و ساختار رشته‌ای، توانایی زیادی برای ایجاد شبکه‌های تقویت‌کننده در بین ذرات خاک دارند و سبب افزایش مقاومت برشی شده و پایداری داخلی خاک را بهبود می‌بخشند (Tiwari & Sorum,

2026). یافته‌های این پژوهش همچنین با نتایج مطالعه مروری Liu و همکاران (۲۰۲۰) هم‌خوانی داشت. آنان با بررسی مطالعات انجام شده گزارش کردند نانولوله‌های کربنی با پر کردن فضای خالی بین منافذ خاک، ساختار خاک را متراکم کرده و درنتیجه مقاومت برشی را افزایش می‌دهند و با افزایش میزان نانولوله‌های کربنی این اثر نیز افزایش می‌یابد. Alsharef و همکاران (۲۰۲۰) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. در مقابل، نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با OH با وجود اصلاح سطحی، در شرایط این آزمایش نتوانست اثر معنی‌داری بر مقاومت برشی خاک داشته باشد. این رفتار احتمالاً به‌دلیل نوع اصلاح شیمیایی، مقدار مصرف و یا برهم‌کنش محدود با ذرات خاک می‌باشد. زیرا عملکرد نانولوله‌های کربنی، به ویژگی‌های سطحی، میزان مصرف و میزان پراکنش نانومواد در محیط خاک وابسته است (Correia et al., 2023; Jin et al., 2022).

علاوه‌براین به‌طور کلی نتایج نشان داد با افزایش سطح نانومواد و کاهش میزان رطوبت خاک، میانگین مقاومت برشی خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. اگرچه ضریب تعیین (R^2) محاسبه شد اما نتایج آزمون رگرسیون نشان داد رابطه بین رطوبت و غلظت نانومواد با مقاومت برشی از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۳). افزایش رطوبت منجر به کاهش ارتباط بین ذرات خاک شده و درنتیجه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته و بنابراین مقاومت برشی نیز کاهش می‌یابد (Kang et al., 2022).



شکل ۳. اثرات اصلی نانومواد (نانولوله‌های کربنی چندجداره، MWCNT، نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با OH، MWCNT-OH، گرافن، G، اکسیدگرافن، GO و اکسیدگرافن احیاشده، rGO)، غلظت نانومواد (میلی‌گرم در کیلوگرم) و سطوح رطوبتی خاک (درصد رطوبت ظرفیت مزرعه) بر مقاومت برشی (مگاپاسکال) خاک مورد مطالعه (در مورد هر تیمار، ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری بر اساس آزمون چنددامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

۴-۲. مقاومت به نفوذ

باتوجه به جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی نانومواد در شرایط رطوبتی مختلف بر مقاومت به نفوذ خاک از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. همچنین، نتایج نشان داد که برهمکنش عوامل نیز از نظر آماری معنی‌دار بوده و پاسخ متغیر مورد مطالعه به هر عامل به سطح عامل دیگر وابسته است. با این حال زمانی که اثر هر یک از نانومواد به‌صورت جداگانه بررسی شد، مشخص شد اثر متقابل شرایط رطوبتی و سطوح مختلف برخی از نانومواد بر مقاومت به نفوذ خاک معنی‌دار نبود.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد با افزایش غلظت نانومواد، مقاومت به نفوذ خاک نیز افزایش معنی‌داری داشته به‌طوری که با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از نانومواد گرافن، اکسیدگرافن، اکسیدگرافن احیاشده، نانولوله‌های کربنی و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با OH مقاومت به نفوذ به ترتیب به میزان ۲۰/۶، ۹/۲، ۴۲، ۳۱/۸ و ۱۱/۲ درصد نسبت به شاهد (تیمار بدون نانومواد) افزایش یافت (هرچند افزایش مشاهده شده در اثر کاربرد اکسیدگرافن و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با OH از نظر آماری معنی‌دار نبود). همچنین در غلظت زیادتر این نانومواد (۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز مقاومت به نفوذ خاک در نمونه‌های تیمارشده با گرافن، اکسیدگرافن، اکسیدگرافن احیاشده، نانولوله‌های کربنی و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با OH به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به

ویرایش نشده

میزان۳۱/۴، ۲۵/۷، ۲۲/۴، ۶۳/۵ و ۲۲/۴ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد در بین نانومواد کربنی مورد استفاده، نانولوله‌های کربنی بیشترین اثر را بر مقاومت به نفوذ داشتند (جدول ۵). نتایج این پژوهش با یافته‌های مروری *Haji* و *Mir (2026)* که بر پایه ۵۵۰ مطالعه انجام شده بود، مطابقت دارد؛ این پژوهشگران گزارش کردند که اثر نانومواد بر مقاومت به نفوذ خاک به نوع و غلظت ماده بستگی دارد و کاربرد آن‌ها در مقادیر بهینه، از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تقویت پیوندهای بین‌ذره‌ای، موجب افزایش انسجام و مقاومت خاک می‌شود. Wong و همکاران (۲۰۲۰) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و گزارش کردند نانومواد به‌دلیل اینکه ابعاد بسیار کوچک و سطح ویژه زیادی دارند، سریع‌تر و کامل‌تر در واکنش‌های شیمیایی شرکت کرده و حتی در مقادیر بسیار کم نیز سبب بهبود قابل توجهی در ویژگی‌های مهندسی خاک می‌شوند. Sorum و Sorum (۲۰۲۶) نیز به مطالعه ۱۳۶ مقاله علمی پرداختند و نتایج مشابهی را گزارش کردند. آنان بیان کردند نانومواد از طریق پر کردن منافذ خاک و ایجاد ژل سیلیکاته سبب افزایش مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ می‌شوند. علاوه‌براین، کاربرد این مواد سبب افزایش استحکام خاک در برابر چرخه‌های یخزدگی–ذوب و چرخه‌های تر و خشک شدن می‌شود. البته محدودیت‌هایی مانند خطرات زیست‌محیطی، هزینه‌های زیاد تولید و محدودیت استفاده در پروژهای بزرگ، استفاده از نانومواد را با چالش مواجه کرده است.

علاوه‌براین، بررسی اثر شرایط رطوبتی مختلف نشان داد که تغییر شرایط رطوبتی تأثیر مستقیمی بر رفتار مقاومت به نفوذ برخی تیمارهای مورد بررسی دارد. به‌طوری که مقاومت به نفوذ در نمونه‌های تیمارشده با اکسیدگرافن احیاشده و نانولوله‌های کربنی و رطوبت ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به میزان ۱۷/۷ و ۱۵ درصد نسبت به شاهد (تیمار بدون محدودیت رطوبتی) کاهش یافت. البته در تیمارهای حاوی اکسیدگرافن احیاشده در رطوبت کمتر (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) نیز مقاومت به نفوذ به‌طور معنی‌داری به میزان ۱۶/۳ درصد کاهش یافت. از آنجایی که افزایش مقاومت خاک سبب کاهش تخلخل خاک، ایجاد محدودیت برای رشد ریشه، کاهش جذب عناصر غذایی توسط ریشه و کاهش فعالیت موجودات ریز خاک شده و در نهایت منجر به کاهش رشد گیاه و عملکرد محصول می‌شود (Obour et al., 2023)، استفاده از این مواد در شرایط خشکی که خود عامل محدودکننده برای رشد گیاه است می‌تواند سودمند باشد.

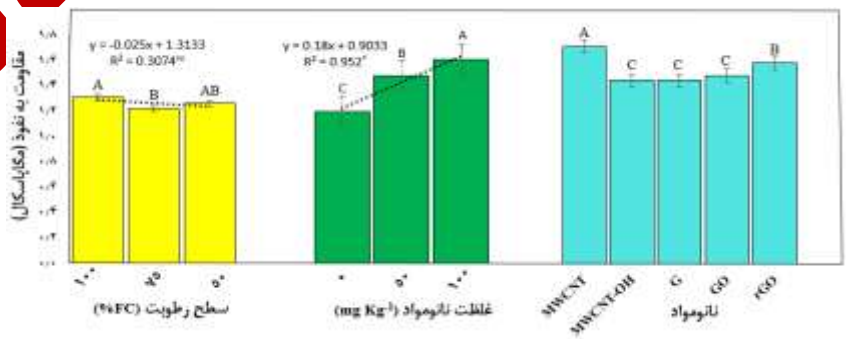
باتوجه به نتایج این پژوهش تفاوت در اثر نانومواد بر مقاومت به نفوذ را می‌توان به تفاوت در ویژگی‌های ظاهری، شیمیایی و نحوه برهمکنش آن‌ها با ماتریس خاک دانست. اکسیدگرافن احیاشده و نانولوله‌های کربنی باتوجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی که دارند مانند سطح ویژه زیاد، وجود گروه عاملی اکسیژن‌دار و ساختار رشته‌ای، قادر به حفظ آب در اطراف ذرات بوده و از افزایش شدید مکش ماتریک در شرایط رطوبت کم، جلوگیری می‌کنند و سبب کمتر شدن مقاومت به نفوذ می‌شوند. در حالی که گرافن بیشتر تمایل به جمع شدن دارد و همین موضوع سبب توانایی محدود آن در اصلاح خاک می‌شود (Geim & Novoselov, 2007; Compton & Nguyen, 2010; Jiříčková et al., 2022). نداشتن اثر معنی‌دار این مواد در شرایط رطوبتی مختلف بر مقاومت برشی (جدول ۴) احتمالاً به این دلیل است که علاوه‌بر میزان آب در خاک عواملی دیگری مانند مکش ماتریک، چگالی ظاهری و ساختمان خاک نیز بر مقاومت به نفوذ مؤثر هستند (Bengough et al., 2011). احتمالاً نانومواد در شرایط رطوبتی مختلف توانسته‌اند بر این عوامل بیشتر اثرگذار باشند تا عوامل مؤثر بر مقاومت برشی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی). علاوه براین نتایج به‌طور کلی نشان داد افزایش غلظت نانومواد کربنی سبب افزایش معنی‌دار مقاومت به نفوذ در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب به‌میزان ۲۳/۶ و ۳۳/۷ درصد نسبت به شاهد (نمونه بدون نانومواد) شد. در حالی که اثر میزان رطوبت بر مقاومت به نفوذ تنها در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی سبب کاهش آن به میزان ۶/۹ درصد شد. همچنین نتایج تحلیل رگرسیون نشان داد تنها رابطه بین غلظت نانومواد و مقاومت به نفوذ از نظر آماری معنی‌دار بود ($P<0/05$). بر این اساس، ۹۵ درصد از تغییرات مقاومت برشی با تغییرات رطوبت قابل توضیح است (شکل ۴).

ویرایش اولیه برگزده

جدول ۵. اثر نانومواد کربنی و شرایط رطوبتی مختلف بر مقاومت به نفوذ خاک (مگاپاسکال)

سطح رطوبت (درصد رطوبت ظرفیت مزرعه)	غلظت نانومواد (میلی‌گرم در کیلوگرم) ۰	۵۰	۱۰۰	میانگین
	گرافن (میانگین: ۱/۱۹ C)			
۱۰۰	۱/۰۴ c	۱/۲۰ bc	۱/۱۲ c*	**۱/۱۲ A**
۷۵	۰/۹۳ c	۱/۰۳ c	۱/۷۷ a	**۱/۲۴ A**
۵۰	۱/۰۸ c	۱/۴۷ b	۱/۱۳ c	**۱/۲۳ A**
میانگین	**۱/۰۲ B**	**۱/۲۳ A**	**۱/۳۴ A**	
	اکسیدگرافن (میانگین: ۱/۲۲ BC)			
۱۰۰	۱/۱۳ bc	۱/۲۷ bc	۱/۳۳ bc	**۱/۲۴ AB**
۷۵	۰/۹۷ c	۱/۱۴ bc	۱/۲۳ cd	**۱/۱۲ B**
۵۰	۱/۱۸ bc	۱/۱۶ bc	۱/۵۵ a	**۱/۲۹ A**
میانگین	**۱/۰۹ B**	**۱/۱۹ B**	**۱/۳۷ A**	
	اکسیدگرافن احیاشده (میانگین: ۱/۳۰ B)			
۱۰۰	۱/۰۴ cd	۱/۹۷ a	۱/۳۹ b	**۱/۴۷ A**
۷۵	۱/۰۰ d	۱/۳۳ b	۱/۲۸ b	**۱/۲۱ B**
۵۰	۱/۱۸ bcd	۱/۲۴ bc	۱/۲۶ bc	**۱/۲۳ B**
میانگین	**۱/۰۷ C**	**۱/۵۲ A**	**۱/۳۱ B**	
	نانولوله‌های کربنی (میانگین: ۱/۴۱ A)			
۱۰۰	۱/۰۵ de	۱/۴۴ bc	۲/۰۹ a	**۱/۵۳ A**
۷۵	۱/۰۰ e	۱/۴۳ bc	۱/۴۸ bc	**۱/۳۰ B**
۵۰	۱/۱۵ cde	۱/۳۶ cd	۱/۷۰ b	**۱/۴۱ AB**
میانگین	**۱/۰۷ C**	**۱/۴۱ B**	**۱/۷۵ A**	
	نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با OH (میانگین: ۱/۱۹ C)			
۱۰۰	۱/۰۴ bcd	۱/۱۹ abcd	۱/۴۰ a	**۱/۲۱ A**
۷۵	۰/۹۸ d	۱/۳۹ a	۱/۲۸ ab	**۱/۲۲ A**
۵۰	۱/۱۸ abcd	۱/۰۰ cd	۱/۲۶ abc	**۱/۱۵ A**
میانگین	**۱/۰۷ B**	**۱/۱۹ AB**	**۱/۳۱ A**	

* در مورد هر ماده، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف کوچک مشترک هستند از نظر آماری بر اساس آزمون چنددامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.



شکل ۴. اثرات اصلی نانومواد (نانولوله‌های کربنی چندجداره، MWCNT، نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با OH، MWCNT-OH، گرافن، G، اکسیدگرافن، GO و اکسیدگرافن احیاشده، rGO)، غلظت نانومواد (میلی‌گرم در کیلوگرم) و سطوح رطوبتی خاک (درصد رطوبت ظرفیت مزرعه) بر مقاومت به نفوذ (مگاپاسکال) خاک مورد مطالعه (در مورد هر تیمار، ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری بر اساس آزمون چنددامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

ویراستاری نشده

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ خاک به نانومواد کربنی به‌شدت به نوع، ویژگی‌های ظاهری، شیمیایی، فیزیکی و میزان نانومواد وابسته بوده و نمی‌توان انتظار داشت همه نانومواد در خاک یک رفتار مشابه نشان دهند. علاوه بر این برهمکنش و اثر این ترکیبات در خاک‌های با ویژگی‌های مختلف نیز ممکن است متفاوت باشد. در مجموع، نتایج نشان داد که استفاده از نانومواد کربنی با سطح ویژه زیاد می‌تواند به عنوان یک راهکار برای افزایش مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ متناسب با هدف از کاربرد، مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، انتخاب نوع مناسب نانوماده و توجه به شرایط رطوبتی و سایر شرایط خاک، از عوامل کلیدی در دستیابی به بیشترین میزان بهبود عملکرد خواهد بود. همچنین باتوجه به اینکه این نانومواد در زمینه‌های مختلف از جمله کشاورزی و مهندسی استفاده می‌شوند بنابراین می‌توان از هرکدام از این نانومواد بر اساس هدف مورد نظر استفاده نمود. همچنین از آنجایی که تنش محیطی از جمله تنش خشکی یک موضوع مهم در سرتاسر جهان و از جمله ایران است می‌توان از نانومواد در بهبود ویژگی‌های خاک در محیط‌های با محدودیت خاص استفاده نمود. نتایج نشان داد که در بین نانومواد مورد مطالعه، اکسیدگرافن و اکسیدگرافن احیاشده بیشترین اثر را بر مقاومت برشی و نانولوله‌های کربنی بیشترین اثر را بر مقاومت به نفوذ داشتند. علاوه براین نمونه‌های تیمارشده با اکسیدگرافن احیاشده و نانولوله‌های کربنی توانستند در رطوبت‌های کم بر مقاومت به نفوذ و اکسیدگرافن بر مقاومت برشی نیز مؤثر باشند که تفاوت در عملکرد نانومواد به ویژگی‌های مختلف آن‌ها نسبت داده‌شد. با این حال، به‌طور کلی نانومواد سبب افزایش مقاومت برشی و مقاومت به نفوذ شدند و با افزایش غلظت نیز این ویژگی‌ها افزایش معنی‌داری نشان دادند. این افزایش می‌تواند بیانگر تغییر در برهم‌کنش و آرایش ذرات خاک و تقویت رفتار مکانیکی آن باشد. زیرا مقاومت بیشتر در برابر نفوذ و برش می‌تواند نیروی کششی و توان موردنیاز ادوات خاک‌ورزی و در نتیجه مصرف انرژی را افزایش دهد. بنابراین، افزایش مقاومت مشاهده‌شده در این پژوهش را نمی‌توان صرفاً به‌عنوان یک ویژگی مطلوب برای خاک کشاورزی در نظر گرفت. بر این اساس، کاربرد نانومواد گرافنی در خاک‌های کشاورزی باید با در نظر گرفتن همزمان اثرات مکانیکی و پیامدهای احتمالی آن بر انرژی موردنیاز ماشین‌های کشاورزی ارزیابی شود.

براساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود اثر غلظت‌های مختلف نانومواد کربنی در دامنه وسیع‌تری از رطوبت خاک نیز بررسی و مقدار بهینه نانومواد تعیین شود. همچنین پیشنهاد می‌شود اثر این نانومواد در خاک‌هایی با بافت، ماده آلی و سایر ویژگی‌های متفاوت نیز ارزیابی شود تا نقش ویژگی‌های ذاتی خاک در عملکرد نانومواد مشخص شود.

ویرایش اولیه

۶. منابع

References

Abedi, M., Fangueiro, R., & Correia, A. G. (2021). Development of a novel multifunctional cementitious-based geocomposite by the contribution of CNT and GNP. *Nanomaterials*, *11*(4), 1-26. https://doi.org/10.3390/nano11040961

Ahmadi, H., Satyanaga, A., Orazayeva, S., Kalimuldina, G., Rahardjo, H., Qian, Z., & Kim, J. (2024). Carbon nanotubes for slope stabilization of silty soil. *Infrastructures*, *9* (12), 232. https://doi.org/10.3390/infrastructures9120232

Al-Homidy, A. A., & Al-Amoudi, O. B. (2025). Advanced soil stabilization of expansive clays using graphene oxide nanocomposites. *Geotechnical and Geological Engineering*, *43*(8), 427. https://doi.org/10.1007/s10706-025-03378-7

Alkhaza'leh, H., Rahbeh, M., Hamadneh, I., AL-Mashakbeh, H., & Albalawna, Z. (2025). Nanoparticles in soil reclamation: a review of their role in reducing soil compaction. *Air, Soil and Water Research*, *18*, 1-13. https://doi.org/10.1177/11786221241311725

Alsharef, J. M., Taha, M. R., Govindasamy, P., Firoozi, A. A., & Al-Mansob, R. A. (2020). Effect of nanocarbons on physical and mechanical properties of soils. *Carbon Nanomaterials for Agri-Food and Environmental Applications*, 459-485. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819786-8.00020-7

Baragaño, D., Forján, R., Welte, L., & Gallego, J. L. R. (2020). Nanoremediation of As and metals polluted soils by means of graphene oxide nanoparticles. *Scientific Reports*, *10*(1), 1-10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58852-4

Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental*

Botany, *62*(1), 59-68. https://doi.org/10.1093/jxb/erq350
Chen, Q., Huang, H., Li, X., Pan, L., Chen, Y., Zhong, Q., ... & Yang, S. T. (2024). Raman spectroscopic quantification of graphene oxide in soil: Transport, surficial enrichment and environmental effects. *Environmental Pollution*, *357*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124412
Ciawi, Y., Supariarta, M. A., Hidayati, A. M., & Tonyes, S. G. (2023). Graphene Oxide in Construction: A Comprehensive Review on the Prospects, Challenges, and Sustainable Cement Reinforcement. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, *29*(1), 70-83. https://doi.org/10.14710/mkts.v29i1.55906
Compton, O. C., & Nguyen, S. T. (2010). Graphene oxide, highly reduced graphene oxide, and graphene: versatile building blocks for carbon-based materials. *Small*, *6*(6), 711-723. https://doi.org/10.1002/smll.200901934
Correia, A. A. S., Figueiredo, D., & Rasteiro, M. G. (2023). An experimental design methodology to evaluate the key parameters on dispersion of carbon nanotubes applied in soil stabilization. *Applied Sciences*, *13*(8), 1-15. https://doi.org/10.3390/app13084880
Correia, A. A., & Rasteiro, M. G. (2024). Effect of multiwall carbon nanotubes and surfactants characteristics on immobilization of heavy metals in contaminated soils. *Discover Applied Sciences*, *6*(4), 205. https://doi.org/10.1007/s42452-024-05827-z
Das, P., Penton, C. R., Westerhoff, P., & Perreault, F. (2023). Prospects of 2D graphene nanomaterials in plant-based agriculture and their fate in terrestrial soil: a critical review. *Environmental Science: Nano*, *10*(11), 2936-2956. https://doi.org/10.1039/d3en00511av
El Hariri, A., Ahmed, A. E. E., & Kiss, P. (2023). Sandy loam soil shear strength parameters and its colour. *Applied Sciences*, *13*(6), 1-14. https://doi.org/10.3390/app13063847
El-Kinany, R. G., Ahmed, M. A., Shan, Q., Sun, D., Alzoheiry, A. M., & Swedan, E. A. (2025). Effect of nano-silicon particles spraying on carnation (*Dianthus c aryophyllus* L.) plants grown in soilless culture and irrigated with saline water. *Plant Production Science*, *28*(1), 79-91. https://doi.org/10.1080/1343943X.2025.2451345
Elsayed, M. E., Ayoub, H. A., Helal, M. I., Sang, W., Shen, Z., & Abdelhafeez, I. A. (2025). Nanotechnology-enabled soil management for sustainable agriculture: interactions, challenges, and prospects. *Environmental Science: Nano*, *12*(4), 2128-2153. https://doi.org/10.1039/d4en00943f
Fattah, M. Y., Al-Haddad, S. A., Shahoobe, A. A., & Al-Khafaji, K. R. (2021). Characteristics of soft clays enhanced by graphene oxide. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 856* (1), 1-10. https://doi.org/10.1088/1755-1315/856/1/012018
Figueiredo, D. T., Correia, A. A. S., Hunkeler, D., & Rasteiro, M. G. B. (2015). Surfactants for dispersion of carbon nanotubes applied in soil stabilization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *480*, 405-412. http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.12.027
Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, *5*, 383-411. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15
Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, *6*(3), 183-191. https://doi.org/10.1038/nmat1849
Haji, T. R., & Mir, B. A. (2026). Hybrid soil stabilisation using cement and nanomaterials: a systematic review and meta-analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, *44*(2), 1-36. https://doi.org/10.1007/s10706-026-03652-2
Hammerschmiedt, T., Holatko, J., Zelinka, R., Kintl, A., Skarpa, P., Bytesnikova, Z., ... & Brtnicky, M. (2023). The combined effect of graphene oxide and elemental nano-sulfur on soil biological properties and lettuce plant biomass. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1-10. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1057133
Ijaz, H., Mahmood, A., Abdel-Daim, M. M., Sarfraz, R. M., Zaman, M., Zafar, N., ... & Benguerba, Y. (2023). Review on carbon nanotubes (CNTs) and their chemical and physical characteristics, with particular emphasis on potential applications in biomedicine. *Inorganic Chemistry Communications*, *155*, 1-16. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111020
Jin, W., Tao, Y., & Cheng, R. (2022). Coupled effect of carbon nanotubes and crushing on shear strength and compression of calcareous sand seeped by colloidal silica. *Geofluids*, *2022*(1), 1-17. https://doi.org/10.1155/2022/9335126
Jin, W., Tao, Y., Wang, X., & Gao, Z. (2021). The effect of carbon nanotubes on the strength of sand seeped by colloidal silica in triaxial testing. *Materials*, *14*(20), 1-17. https://doi.org/10.3390/ma14206119
Jiříčková, A., Jankovský, O., Sofer, Z., & Sedmidubský, D. (2022). Synthesis and applications of graphene oxide. *Materials*, *15*(3), 1-21. https://doi.org/10.3390/ma15030920
Kang, Q., Xia, Y., Li, X., Zhang, W., & Feng, C. (2022). Study on the effect of moisture content and dry density on shear strength of silty clay based on direct shear test. *Advances in Civil Engineering*, *2022*(1), 1-9. https://doi.org/10.1155/2022/2213363
Klonowski, J., Lisowski, A., Dąbrowska, M., Chlebowski, J., Sypuła, M., & Zychowicz, W. (2024). The usefulness of soil penetration resistance measurements for improving the efficiency of cultivation

technologies. *Sustainability*, *16*(16), 1-18. https://doi.org/10.3390/su16166962
Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, *5*, 635-662.
Liang, Y., Sun, G., & Zhao, Y. (2025). Optimization and experimental study of penetration depth of pocket penetrometer. *Applied Sciences*, *15*(2), 1-16. https://doi.org/10.3390/app15020711
Liu, G., Zhang, C., Zhao, M., Guo, W., & Luo, Q. (2020). Comparison of nanomaterials with other unconventional materials used as additives for soil improvement in the context of sustainable development: A review. *Nanomaterials*, *11*(1), 15. https://doi.org/10.3390/nano11010015
Liu, X., Chen, Z., & Qi, L. (2023). Evaluating the potential of multi-walled carbon nanotube-modified clay as a landfill liner material. *Materials*, *16*(24), 1-17. https://doi.org/10.3390/ma16247705
Najafian, S., & Zahedifar, M. (2018). Productivity, essential oil components and herbage yield, of sweet basil as a function of biochar and potassium-nano chelate. *Journal of essential oil bearing plants*, *21*(4), 886-894. https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1510793
Naseri, F., Irani, M., & Dehkhodarajabi, M. (2016). Effect of graphene oxide nanosheets on the geotechnical properties of cemented silty soil. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *16*, 695–701. https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.04.008
Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, *5*, 961-1010. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34
Obour, P. B., Kumi, F., & Arthur, E. (2023). Quantifying root-induced soil strength, measured as soil penetration resistance, from different crop plants and soil types. *Soil and Tillage Research*, *233*. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105811
Park, K., Kim, J. H., Shin, J., Lee, H., & Nam, B. H. (2024). A study on the effect of graphene oxide on geotechnical properties of soil. *Materials*, *17*(24), 1-14. https://doi.org/10.3390/ma17246199
Peña-Álvarez, V., Baragaño, D., Prosenkov, A., Gallego, J. R., & Peláez, A. I. (2024). Assessment of co-contaminated soil amended by graphene oxide: effects on pollutants, microbial communities and soil health. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *272*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116015
Pham, T. A., Sutman, M., & Medero, G. M. (2023). Validation, reliability, and performance of shear strength models for unsaturated soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, *41*(7), 4271-4309. https://doi.org/10.1007/s10706-023-02520-7
Qiao, J., Liu, J., Chen, X., He, X., Zhao, J., & Ma, G. (2025). Effects of graphene oxide plus external bacterial agents on accelerating poplar leaf-litter decomposition in saline–alkali soil. *Frontiers in Soil Science*, *5*, 1694914. https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1694914
Rafieerad, A., Amiri, A., Böhmer, M., & Khanahmadi, S. (2026). The first review on nano-agricultural applications of mxene and mbene-based materials for plant-immunoengineering, controlled protection, and inducing biostimulation mechanisms. *Advanced Materials*, *38*(5), e10350.https://doi.org/10.1002/adma.202510350
Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, *5*, 417-435. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14
Riding, M. J., Martin, F. L., Jones, K. C., & Semple, K. T. (2015). Carbon nanomaterials in clean and contaminated soils: environmental implications and applications. *Soil*, *1*(1), 1-21. https://doi.org/10.5194/soil-1-1-2015
Saleem, A., ur Rehman, Z., Qamar, S., Katubi, K. M., Khan, A. H., Akhtar, M. N., ... & Al-Buriahi, M. S. (2023). Investigations of graphene oxides and cement on strength performance of soil. *Journal of Building Engineering*, *73*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106857
Semenova, N. A., Burmistrov, D. E., Shumeyko, S. A., & Gudkov, S. V. (2024). Fertilizers based on nanoparticles as sources of macro-and microelements for plant crop growth: A review. *Agronomy*, *14*(8), 1646. https://doi.org/10.3390/agronomy14081646
Sharma, R., & Kumar, V. (2024). Nano-enabled agriculture for sustainable soil. *Waste Management Bulletin*, *2*(1), 152-161. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.01.002
Sol-Magdaleno, M., Aguilar-Aguilar, J. I., Beltrán-Naturi, E., Valencia-Ordóñez, L. D., Díaz-González, A., Trejo-Flores, P., ... & González-Moscoso, M. (2025). Carbon nanomaterials as an environmental technology in the remediation of agricultural soils contaminated with heavy metals: a review. *Discover Soil*, *2*(1), 1-19. https://doi.org/10.1007/s44378-025-00054-3
Sorum, M. G., & Sorum, N. G. (2026). Use of nanomaterials in underlying and subgrade soil stabilisation: a review. *Road Materials and Pavement Design*, *27*(4), 919-963. https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2505985
Stefanow, D., & Dudziński, P. A. (2021). Soil shear strength determination methods–State of the art. *Soil and Tillage Research*, *208*, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104881
Texter, J. (2014). Graphene dispersions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *19*(2), 163-174. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.04.004

Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, *5*, 475-490. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16

Tiwari, A., & Sorum, N. G. (2026). Investigation of carbon nanotube effect on subgrade soil properties. *Nigerian Journal of Technology*, *45*(1), 10-22. https://dx.doi.org/10.4314/njt.v45i1.2

Wang, Z., Lu, H., Li, Z., Wu, Y., & Ren, J. (2025). Elucidating the role of graphene oxide surface architecture and properties in loess soil remediation efficacy. *Nanomaterials*, *15*(14), 1-15. https://doi.org/10.3390/nano15141098

Wang, E., Zhou, T., Jiang, H., Liu, X., & Wu, C. (2025). Effects of carbon nanotubes treatment on engineering properties of sandy fine-grained soils subject to freeze-thaw cycles. *Research in Cold and Arid Regions 17*(6), 383-392. https://doi.org/10.1016/j.rcar.2025.03.003

Wong, J. K. H., Kok, S. T., & Wong, S. Y. (2020). Fibers, geopolymers, nano and alkali-activated materials for deep soil mix binders. *Civil Engineering Journal*, *6*(5), 830-847. http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091511

Yang, K., Wu, C., & Zhang, G. (2024). A state of review for graphene-based materials in preparation methods, characterization, and properties. *Materials Science and Engineering: B*, *310*, 1-35. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117698

Yasmeen, S., Mandal, N., Ganguly, P., Kumar, S., & Rakshit, R. (2024). Resistance and resilience of soil biological indicators: A case study with multi-walled carbon nanotube. *Pedosphere*, *34*(3), 664-675. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.04.005

Zafar, M. J., Shafiq, M., & Rana, M. A. (2026). A review on nanoparticles: classification and roles in plant systems. *Journal of Bioresource Management*, *13*(2), 13.

Zahedifar, M., & Najafian, S. (2017). *Ocimum basilicum* L. growth and nutrient status as influenced by biochar and potassium-nano chelate fertilizers. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *63*(5), 638-650. https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1233323

Zahedifar, M., & Zohrabi, S. (2016). Germination and seedling characteristics of drought-stressed corn seed as influenced by seed priming with potassium nano-chelate and sulfate fertilizers. *Acta Agriculturae Slovenica*, *107*(1), 113-128. https://doi.org/10.14720/aas.2016.107.1.12

Zahedifar, M., Moosavi, A. A., Shafigh, M., Zarei, Z., & Karimian, F. (2016). Cadmium accumulation and partitioning in *Ocimum basilicum* as influenced by the application of various potassium fertilizers. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *62*(5), 663-673. https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1074187

Zahedifar, M., Moosavi, A. A., Zarei, Z., Shafigh, M., & Karimian, F. (2019). Heavy metals content and distribution in basil (*Ocimum basilicum* L.) as influenced by cadmium and different potassium sources. *International Journal of Phytoremediation*, *21*(5), 435-447. https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1537253

Zhou, G. X., Zhong, J., Zhang, H., Hu, X., Wu, J., Koratkar, N., & Shi, X. (2017). Influence of releasing graphene oxide into a clayey sand: physical and mechanical properties. *Royal Society of Chemistry*, *7*(29), 18060-18067. https://doi.org/10.1039/c7ra01539a

ویرایش شده