Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

ISSN: 2821-0549

Research Article

Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Nanoclay Addition on Excavation Stability

Maryam Haghbin[a,*], Mehdi Sabaghmoghadam[b]

[a] Assistant Professor, Department of Geotechnics, Facultyof Civil Engineering, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Islamshahr, I. R. Iran.
[b] PhD Candidate of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Islamshahr, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-08-28
Revised: 2024-12-05
Accepted: 2024-12-16

Keywords:

Excavation,
Nanoclay,
Experimental,
Numerical.

ABSTRACT

In this study, the main objective is investigating the effect of adding nanoclay on the stability of excavations. For this purpose, laboratory soil samples were prepared in two conditions: untreated and treated with different percentages of nanoclay (0%, 3%, and 5%), and subsequently tested. Then, a 10-meter-deep excavation model in the Velenjak area of Tehran was constructed at a smaller scale under both natural and nanoclay-stabilized conditions, and deformations were examined. In addition, numerical modeling of the target excavation was carried out using FLAC3D software to provide a comparison between the laboratory and numerical results. The findings indicated that the use of nanoclay significantly increases the factor of safety of excavation stability and reduces both horizontal and vertical displacements. The optimum nanoclay content was found to be 3%, as higher percentages showed no significant improvement and, in some cases, even had negative effects on soil behavior. This behavior was observed in both numerical and experimental models, with good agreement between them. Also, the influence of nanoclay on soil strength as a novel material was compared with cement as a conventional stabilizer. The advantages of nanoclay-particularly its environmentally friendly nature compared to cement-were highlighted as strong reasons to prefer nanoclay and, more generally, nanomaterials. Overall, the results demonstrated that applying nanoclay as a stabilizing additive can serve as an effective solution for urban excavation projects.

*** Corresponding author.**
E-mail address: 2295519381@iau.ir

How to cite this article: Haghbin, M., & Sabaghmoghadam, M. (2026). Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Nanoclay Addition on Excavation Stability. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 11*(4), 179-193.

https://doi.org/10.22075/jtie.2025.38845.1736

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه : https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

شاپا: 2821-0549

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر افزودن نانورس بر پایداری گودبرداری

مریم حق‌بین[1*]، مهدی صباغ مقدم[2]

[1] استاد، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران.

[2] دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

واژه‌های کلیدی:

گودبرداری،

نانورس،

آزمایشگاهی،

عددی.

چکیده

در این پژوهش، هدف اصلی، ارزیابی تأثیر افزودن نانورس بر پایداری گود می‌باشد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی خاک در دو حالت بهسازی‌نشده و بهسازی‌شده با درصدهای مختلف نانورس (صفر، ۳ و ۵ درصد) تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. سپس، نمونه گود ۱۰ متری در منطقه ولنجک تهران در مقیاس کوچک‌تر در دو حالت طبیعی و بهسازی شده با نانورس ساخته شد و تغییرشکل‌ها بررسی گردید. همچنین، با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی عددی برای گود مورد نظر انجام شد تا مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی و عددی صورت گیرد. نتایج نشان داد که استفاده از نانورس به‌طور قابل توجهی ضریب اطمینان پایداری گود را افزایش داده و جابجایی‌های افقی و قائم را کاهش می‌دهد. مقدار بهینه برای نانورس ۳ درصد به‌دست آمد و بیشتر از این مقدار بدون تأثیر و در بعضی شرایط تأثیر منفی بر رفتار خاک می‌گذارد. این موضوع در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی قابل مشاهده بود و مطابقت خوبی بین آن‌ها وجود داشت. در ادامه، تأثیر نانورس به عنوان مصالح جدید با سیمان به عنوان مصالح سنتی بر مقاومت برشی خاک مقایسه شد و نکات مثبت نانورس از جمله عدم تأثیر منفی بر محیط‌زیست نسبت به سیمان از دلایل ترجیح بر استفاده از نانورس و به طور کلی نانومواد می‌باشد. به طور کلی، نتایج نشان داد که به‌کارگیری نانورس به عنوان افزودنی پایدارساز می‌تواند راهکاری مؤثر در پروژه‌های گودبرداری شهری باشد.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: 2295519381@iau.ir

استناد به این مقاله: حق‌بین، م. و صباغ مقدم، م. (۱۴۰۴). بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر افزودن نانورس بر پایداری گودبرداری. *مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل*، ۱۱(۴)، ۱۷۹-۱۹۳.

https://doi.org/10.22075/jtie.2025.38845.1736

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱. مقدمه

با گسترش روزافزون پروژه‌های عمرانی در مناطق شهری، نیاز به گودبرداری‌های عمیق برای احداث زیرزمین ساختمان‌ها، پارکینگ‌ها و خطوط مترو افزایش یافته است. گودبرداری در خاک‌های ناپایدار، به‌ویژه در مناطق پرتراکم، مانند ولنجک تهران، با خطرات زیادی از جمله ریزش دیواره‌ها، نشست سازه‌های مجاور و خسارات اقتصادی و جانی همراه است. بنابراین، افزایش پایداری گودهای عمیق به یکی از مسائل کلیدی در مهندسی ژئوتکنیک شهری تبدیل شده است.

یکی از راهکارهای جدید در بهسازی خاک، استفاده از نانومواد است. در دهه‌های اخیر، استفاده از فناوری نانو در حوزه مهندسی ژئوتکنیک، به‌ویژه در بهسازی خاک، مورد توجه فراوانی قرار گرفته است. نانومواد به دلیل سطح ویژه بالا، واکنش‌پذیری شیمیایی زیاد، و اندازه بسیار کوچک ذرات (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) می‌توانند خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک را به صورت چشمگیری تغییر دهند. این تغییرات در مقیاس میکروسکوپی می‌تواند موجب بهبود مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری، و افزایش پایداری در سازه‌های خاکی شود.

نانورس‌ها[1] دسته‌ای از نانومواد معدنی هستند که ساختار لایه‌ای دارند و از نظر شیمیایی عمدتاً از سیلیکات‌های آلومینیوم تشکیل شده‌اند. یکی از شناخته‌شده‌ترین انواع نانورس‌ها، مونت‌موریلونیت است که دارای خاصیت تورم‌پذیری، تبادل یونی و جذب سطحی بالا است. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که نانورس‌ها بتوانند در اصلاح خواص خاک‌های ریزدانه مانند خاک رس، نقش مؤثری ایفا کنند.

نانورس به‌دلیل دسترسی مناسب، قیمت کم، دوام زیاد و رفتار مکانیکی مؤثر، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. نانورس می‌تواند ساختار میکروسکوپی خاک را تغییر داده و موجب افزایش چسبندگی، کاهش نفوذپذیری و بهبود مقاومت برشی شود. پایداری گودبرداری‌ها یکی از چالش‌های مهم در مهندسی ژئوتکنیک، به‌ویژه در مناطق شهری با تراکم بالا، مانند منطقه ولنجک تهران، است. استفاده از مصالح نوین جهت بهسازی خاک در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته و یکی از مؤثرترین آن‌ها نانوذرات رس (نانورس‌ها) می‌باشند. مطالعات متعددی در دهه اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مواد نانویی، به‌ویژه نانورس، می‌تواند نقش قابل توجهی در بهبود ویژگی‌های مکانیکی و پایداری خاک ایفا کند. نانورس‌ها به دلیل سطح ویژه بسیار بالا، واکنش‌پذیری شیمیایی زیاد و قابلیت تبادل یونی، به‌طور مؤثری با ذرات خاک تعامل کرده و ساختار ریزبافت خاک را تغییر می‌دهند.

مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که افزودن درصد اندکی نانورس به خاک می‌تواند باعث افزایش مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و بهبود خواص مکانیکی خاک گردد. رضایی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای تجربی، به بررسی تأثیر نانورس بر خواص مکانیکی خاک‌های رسی پرداختند و مشاهده کردند که با افزودن تنها ۲ درصد نانورس، مقاومت برشی خاک تا ۳۰ درصد افزایش یافته است.

در تحقیقات انجام شده، با آزمایش‌های سه‌محوری روی خاک‌های رسی حاوی نانوذرات بنتونیت، اثر مثبت نانورس در افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش نشست گزارش شده است (مارتو و همکاران، ۲۰۱۳). در مطالعه‌ای عددی و آزمایشگاهی که روی دیواره‌های گودبرداری انجام شدند، خاک به‌وسیله نانوذرات تقویت شده بود و نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشت (میرحسینی و همکاران، ۲۰۱۸؛ حیدری، ۲۰۲۱). محققان در بررسی آزمایشگاهی نشان داده‌اند که

1- Nano-clays

افزودن ۲ درصد نانورس به خاک رس طبیعی، مقاومت تک‌محوره را تا ٤٠ درصد افزایش داده است (کریمی و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعات عددی و آزمایشگاهی روی گودبرداری‌های شهری در تهران نشان دادند که نانورس می‌تواند تغییرمکان دیواره گود را تا ۳۵ درصد کاهش دهد (موسوی و رضایی، ۲۰۲۱). نتایج یک مطالعه تجربی نشان داده است که نانورس‌ها می‌توانند موجب بهبود پایداری شیروانی‌ها و دیواره‌های گود شوند (کالکن، ۲۰۱۳). همچنین، نتایج تحقیق لی و همکاران (۲۰۱٤) نشان داده که با افزودن یک تا ۵ درصد نانورس به خاک رس نرم، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری و کاهش تراکم‌پذیری مشاهده می‌شود. پژوهش‌ها روی شیب‌های ماسه‌ای تثبیت‌شده با نانورس نشان دادند که زاویه اصطکاک داخلی تا ۱۵٪ و چسبندگی تا ۲۵٪ افزایش یافته است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). با استفاده از آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های تثبیت‌شده با نانورس گزارش شده است که تغییرشکل جانبی در شرایط بارگذاری جانبی کاهش چشمگیری دارد (گائو و همکاران، ۲۰۱۹). در آزمایش‌های مدل‌سازی عددی و فیزیکی روی گودهای با عمق ٦ متر در خاک‌های رسی، نتایج نشان داد که افزودن ۲٪ نانورس منجر به کاهش ۳۰٪ نشست و ۲۵٪ تغییرمکان جانبی دیواره می‌شود (رضایی و همکاران، ۲۰۱۸). محققان به بررسی پایداری دیوار گود ۸ متری در تهران پرداختند و اعلام کردند که استفاده از نانورس علاوه بر بهبود مقاومت برشی، موجب صرفه‌جویی اقتصادی به‌واسطه کاهش نیاز به المان‌های مهاربندی می‌شود (محمدی و همکاران، ۲۰۲۰). در مدل‌سازی با نرم‌افزار FLAC3D و آزمایش‌های آزمایشگاهی، نتایج پژوهش کریمی و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که بیشترین بهبود پایداری در محدوده ۲ تا ۳ درصد وزنی نانورس حاصل می‌شود و مقادیر بیشتر از آن اثر معکوس بر رفتار خاک دارد. روش‌های آزمایشگاهی و عددی اجرای واقعی نانورس در گودها از روش جت گروتینگ بررسی شد و نتایج با روش عددی مقایسه شد (جوهری و همکاران، ۲۰۲۲). محققان، تأثیر ترکیب نانورس با مواد افزودنی دیگر مثل الیاف برنج، بر رفتار خاک را بررسی کردند (عربانی و همکاران، ۲۰۲۳ و ۲۰۲٤). همچنین در تحقیق اکبری و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر بهسازی خاک با افزودن نانومواد بر رفتار مکانیکی و پایداری گودهای شهری مورد بررسی عددی قرار گرفته است.

تحقیقات متعددی در سال‌های اخیر به بررسی تأثیر نانومواد بر خواص مکانیکی خاک پرداخته‌اند. اما تعداد محدودی به بررسی پایداری گودبرداری‌های واقعی در شرایط بهسازی‌شده با نانورس پرداخته‌اند. در این پژوهش، یک گودبرداری ۱۰ متری واقع در منطقه ولنجک تهران، که از لحاظ زمین‌شناسی دارای خاک‌های ریزدانه با مقاومت متوسط می‌باشد، انتخاب شده و تأثیر درصدهای مختلف نانورس (صفر، ۳ و ۵ درصد) بر پایداری آن از روش آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی بررسی شده است. نوآوری اصلی این تحقیق، مقایسه سه‌بعدی نتایج آزمایشگاهی و عددی استفاده از نانورس در گودبرداری‌ها و همچنین ارائه تحلیل مقایسه‌ای افزودنی نانورس با سیمان است. ذکر این نکته لازم است که نتایج به‌دست آمده قابل تعمیم به خاکریزهای راه و بسترهای خاکریزشده نیز هست.

۲. روش تحقیق

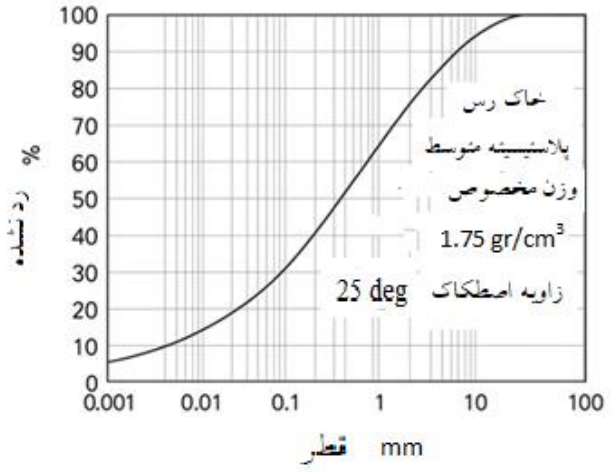
۲-۱. مدل‌سازی آزمایشگاهی

برای بررسی تأثیر نانورس بر پایداری گود، ابتدا خاک نمونه‌برداری‌شده از محل پروژه (منطقه ولنجک تهران) تهیه و در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. سپس، خاک پایه با درصدهای مختلف نانورس (صفر، ۳ و ۵ درصد وزنی) ترکیب شد. بر اساس مطالعات معتبر، بیشترین بهبود خواص برشی در بازه یک تا ۳ درصد

گزارش شده است و به همین دلیل این مقادیر برای درصدهای نانورس در نظر گرفته شده است.

آزمایش‌های انجام شده روی خاک طبیعی و بهسازی شده شامل دانه‌بندی، درصد رطوبت، تراکم و برش مستقیم مطابق استاندارد ASTM می‌باشد. برای هر درصد نانورس (صفر، ۳ و ۵) تعداد ۳ *نمونه تکراری* مطابق استاندارد ASTM D3080 ساخته و آزمایش‌های برش مستقیم و تراکم روی آنها انجام شد.

خاک رسی طبیعی منطقه ولنجک دارای چسبندگی اولیه متوسط و نفوذپذیری کم و با پلاستیسیته متوسط و وزن مخصوص خشک ۱/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، رطوبت طبیعی ۱۸ درصد، زاویه اصطکاک داخلی ۲۵ درجه و تراکم نسبی حدود ۹۰ درصد می‌باشد. نمودار دانه‌بندی خاک طبیعی در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه خاک طبیعی و بهسازی شده و همچنین نانورس در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱. دانه‌بندی نمونه خاک پایه

شکل ۲. نمونه خاک طبیعی و بهسازی شده

شکل ۳. نمونه نانورس به‌کار رفته در تحقیق

نانورس صنعتی با خلوص بالای مونت‌موریلونیت و درصد وزنی نسبت به خاک خشک: ۱٪، ۲٪ و ۳٪ می‌باشد. در تحقیقات، درصدهای کم (۰/۵–۵٪) اغلب به‌دلیل سطح ویژه بالای نانوذرات و اثرات شدید آنها در مقادیر کم انتخاب می‌شوند. از جمله دلایل دیگر استفاده از این درصدهای نانورس شامل موارد زیر است:

– کارایی اقتصادی: افزایش درصد نانورس هزینه‌ها را بالا می‌برد و ممکن است تأثیر افزایشی قابل توجهی نداشته باشد.

– اجتناب از اثرات منفی: درصدهای خیلی بالا می‌تواند باعث بروز شکنندگی یا مشکلات پردازش (آب‌بُردن، شکل‌پذیری) شود.

– یافته‌های تجربی: بسیاری از مطالعات، بیشترین بهبود را در بازه یک تا ۳ درصد مشاهده کرده‌اند.

۲-۲. برداشت و آماده‌سازی اولیه خاک

از محل پروژه (ولنجک) نمونه‌های دست‌نخورده و نیز نمونه‌های دست‌خورده برای آزمایش‌های مختلف از جمله دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم و برش مستقیم برای تعیین مقاومت برشی خاک تهیه می‌شود. برای آماده‌سازی نانورس، نانورس را در آب مقطر ریخته و با همزن مغناطیسی به مدت ۳۰– ۶۰ دقیقه پراکنده می‌شود.

نسبت آب برای پراکنش باید به حدی باشد که بعد از اختلاط با خاک رطوبت بهینه حاصل شود (معمولاً ۲–٤ برابر وزن نانورس به‌عنوان آب پراکنش). روش به‌کار گرفته شده (مخلوط خشک + محلول پراکنده): نانورس که در آب مقطر مخلوط شده است به همراه خاک خشک در مخلوط‌کن ریخته می‌شود تا رطوبت یکنواخت شود. مدت زمان لازم حدود ۱۰ تا ۱۵ دقیقه می‌باشد. نمونه‌ها به مدت ۳ تا ۷ روز در دمای کنترل‌شده (۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس) و رطوبت ثابت (پوشاندن با پلاستیک مرطوب) نگه داشته می‌شود تا واکنش‌ها کامل‌تر انجام شوند. برای ترکیب‌های خاص گاهی ١٤ یا ۲۸ روز نیاز است (بسته به مکانیسم تعامل نانوذرات با رس). از نظر اقتصادی، استفاده از نانورس در بهسازی خاک می‌تواند مزایای قابل توجهی داشته باشد، به‌خصوص در پروژه‌های پایدارسازی گودبرداری‌های عمیق، که در این تحقیق مد نظر است. از جمله مزایای آن کاهش هزینه‌های ناشی از گسیختگی و تعمیرات، صرفه‌جویی در ابعاد و هزینه المان‌های نگهبان، کاهش زمان اجرای پروژه ، طول عمر بالاتر سازه نگهبان به دلیل آنکه تغییرات رطوبتی و شستشوی ذرات ریز کمتر رخ می‌دهد و در نتیجه عملکرد سیستم پایدارسازی برای مدت طولانی‌تری حفظ می‌شود و نیازی به تعمیرات مکرر

نیست. هرچند نانورس نسبت به مصالح متداول گران‌تر است، ولی مقدار مصرف آن بسیار کم (در حد ۱ تا ۵ درصد وزنی خاک خشک) بوده و در مقایسه با هزینه کل پروژه، سهم ناچیزی دارد. در مقابل، افزایش ظرفیت باربری و ضریب اطمینان گود، باعث کاهش مجموع هزینه‌ها می‌شود.

برای بهسازی گودهای واقعی با نانورس معمولاً یکی از سه روش اصلی استفاده می‌شود که انتخاب آن به شرایط پروژه (ابعاد گود، جنس خاک، سطح آب زیرزمینی و امکانات اجرایی) بستگی دارد. روش اول، اختلاط درجا (جت گروتینگ)، روش دوم، پیش مخلوط‌سازی و جایگزینی و روش سوم تزریق دوغاب[1] نانورس است.

ذکر این نکته لازم است که نانومواد از جنبه‌های مختلف بر مصالح سنتی برتری دارند. به عنوان نمونه، دوغاب نانورس و دوغاب سیمان هر دو برای بهسازی و پایدارسازی خاک استفاده می‌شوند، اما از نظر ترکیب، عملکرد و حوزه کاربرد تفاوت‌های مهمی دارند (جدول ۱). از همه مهمتر، باید به این نکته اشاره شود که سیمان تأثیر مخرب بر محیط‌زیست دارد، در حالی که نانومواد، از جمله نانورس، این ویژگی را ندارند.

جدول ۱. تفاوت سیمان و نانورس از نظر ترکیب و ساختار

ویژگی	دوغاب نانورس	دوغاب سیمان
مواد اصلی	ذرات رس با ابعاد نانومتری (معمولاً مونتموریلونیت یا کائولینیت که به روش مکانیکی یا شیمیایی به نانو تبدیل شده‌اند)	کلینکر سیمان پرتلند شامل C_3S،CaO، C_4AF ،C_3A ،C_2S
ابعاد ذرات	در حد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر	محلول یونی/مولکولی، فاقد ذرات جامد نانویی مشخص
ماهیت	سوسپانسیون فیزیکی ذرات نانورس در آب	محلول شیمیایی واکنش‌زا در محیط خاک

جدول ۲. تفاوت کاربردی سیمان و نانورس

دوغاب نانورس	دوغاب سیمان
بهسازی گودها، سدها، لایه‌های عایق، کاهش نشست، پایدارسازی شیروانی‌ها	تزریق در ماسه‌ها و شن‌ها برای کاهش نفوذپذیری، کنترل نشت در سد و تونل، تزریق در ترک‌ها
مناسب خاک‌های ریزدانه (رس، سیلت)	مناسب خاک‌های دانه‌درشت و نیمه‌دانه‌ریز (ماسه، شنی)
مؤثر حتی در درصد رطوبت طبیعی زیاد	نیاز به شرایط خاص تزریق و واکنش شیمیایی

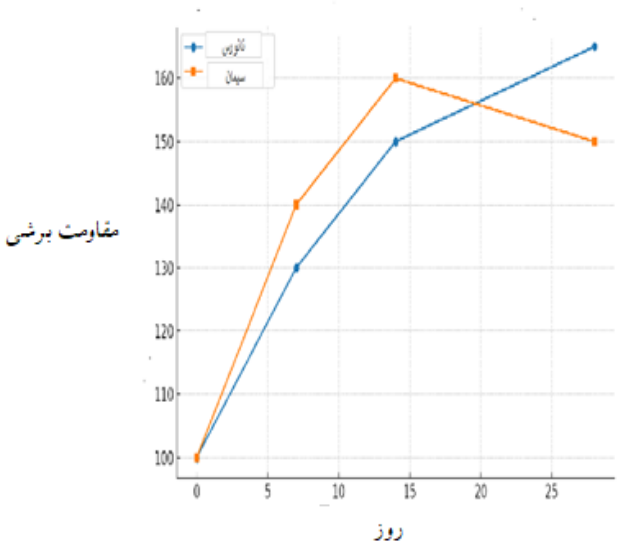
تفاوت سیمان و نانورس از نظر مکانیزم عملکرد در خاک به این صورت است که ذرات نانورس با پر کردن حفرات و افزایش چسبندگی بین ذرات خاک، مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری را ایجاد می‌کنند. همچنین، با پر کردن حفرات باعث افزایش چسبندگی بین ذرات خاک می‌شوند. در واقع با جذب آب توسط صفحات رس، پیوند فیزیکی– شیمیایی بین ذرات خاک ایجاد می‌شود. اما در دوغاب سیمان، ترکیبات کلینکری به‌ویژه

1- Grouting

C_3Sو C_2S در تماس با آب هیدراته شده و ژل‌های C–S–H (کلسیم سیلیکات هیدرات) تشکیل می‌دهند که موجب پرشدن خلل‌وفرج و افزایش مقاومت خاک شده و باعث سیمانی شدن ذرات خاک و ایجاد توده سخت‌تر می‌شود. بیشتر این مکانیزم شیمیایی- معدنی است. تفاوت نانورس و سیمان از نظر کاربردها در جدول ۲ نشان داده شده است.

تفاوت سیمان و نانورس از نظر مزایا و محدودیت‌ها به این صورت می‌باشد که دوغاب نانورس باعث افزایش چسبندگی و کاهش نفوذپذیری حتی در رطوبت زیاد می‌شود. همچنین، باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام می‌شود و مشکلی برای محیط‌زیست ایجاد نمی‌کند. از جمله محدودیت‌ها هزینه بیشتر نانومواد و نیاز به پخش یکنواخت ذرات برای جلوگیری از تجمع می‌باشد. اما ذکر این نکته لازم است که مصرف نانورس باعث کاهش در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد مصرف المان نگهبان می‌شود. همچنین، هزینه واحد نانورس نسبت به سیمان حدود دو تا سه برابر است. ولی از طرف دیگر مصرف آن کمتر است. در نتیجه، هزینه کل پروژه با نانورس ۵ تا ۱۰ درصد کمتر می‌شود. از جمله محدودیت‌های دیگر سیمان، دوام کمتر در محیط‌های اسیدی یا بسیار شور و کارایی محدود در خاک‌های ریزدانه بسیار چسبنده است. همچنین، فرایند تولید سیمان اثر منفی بر محیط‌زیست دارد.

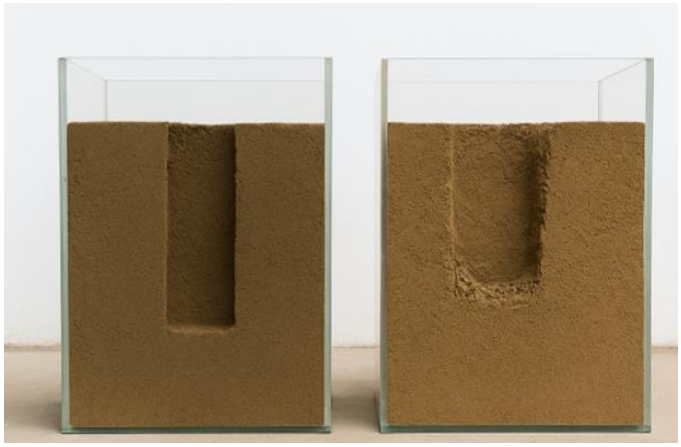
شکل ٤، تغییرات مقاومت برشی برای دوغاب نانورس و سیمان را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نانورس در بلندمدت دوام و افزایش مقاومت بیشتری دارد. اما سیمان در کوتاه‌مدت رشد سریع‌تری نشان می‌دهد.



شکل ٤. تغییرات مقاومت برشی سیمان و نانورس با زمان

در تحقیق حاضر، یک مدل فیزیکی از گودبرداری به عمق ۱۰ متر با مقیاس ۱:۱۰ در آزمایشگاه ساخته شد. خاک با و بدون نانورس در داخل مدل قرار داده شد و پایداری دیواره‌ها، نشست کف گود و تغییر مکان جانبی مورد بررسی قرار گرفت. مدل آزمایشگاهی به طول ۱/۵ و عرض یک متر و گودبرداری به عمق ۱۰ سانتی‌متر در مرحله اول و تا ۳۰ سانتی‌متر در مرحله نهایی ساخته شد. همچنین، تجهیزات مورد استفاده جعبه مدل شیشه‌ای

مقاوم، ابزار سنجش جابه‌جایی جانبی دیواره گود، کرنش‌سنج برای ثبت کرنش قائم و افقی و دوربین دیجیتال برای ثبت نشست‌های سطحی می‌باشد. در روند اجرا، در ابتدا خاک در سه لایه متراکم و به صورت دستی گودبرداری شد. سپس، تغییرشکل‌ها در نقاط مختلف ثبت شده و برای خاک با درصدهای مختلف نانورس تکرار می‌شود. همچنین، بررسی میکروسکوپی SEM برای بررسی ساختار خاک بهسازی شده انجام شد (شکل ۵).



شکل ۵. نمونه مدل‌های واقعی ساخته شده در دو حالت طبیعی و بهسازی شده

۲-۳. مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار FLAC3D

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مدلی عددی از گودبرداری در نرم‌افزار FLAC3D طراحی شد. ویژگی‌های مدل عددی عبارت است از : ابعاد گود :عمق ۱۰ متر، عرض ۲۰ متر، طول ۳۰ متر و مدل رفتاری خاک موهر کولمب می‌باشد و شرایط مرزی به صورت ثابت بودن مرزهای پایین و جانبی و اعمال وزن سربار می‌باشد. مدل در دو حالت بدون نانورس (خاک طبیعی) و با نانورس (۳ و ۵ درصد) ساخته شد و در هر حالت پارامترهای مقاومتی اصلاح شده (آزمایش) به مدل وارد شد و تحلیل پایداری و جابه‌جایی انجام شد (جدول ۳).

جدول ۳. مشخصات مدل

ویژگی	مقدار
عمق گود	۱۰ متر
نوع خاک	(CL خاک ریزدانه با خاصیت خمیری متوسط)
مدول الاستیسیته	۱۸ تا ۲۵ مگاپاسکال (با نانورس)
وزن مخصوص	۱۸ کیلونیوتن بر متر مکعب
زاویه اصطکاک داخلی	۲۹ تا ۳٤ درجه
چسبندگی	۸ تا ۱۸kPa
شرایط مرزی	ثابت در کف، لغزشی در دیواره‌ها
تحلیل پایداری	تحلیل تنش-کرنش و محاسبه FS

۳. تحلیل نتایج عددی و آزمایشگاهی

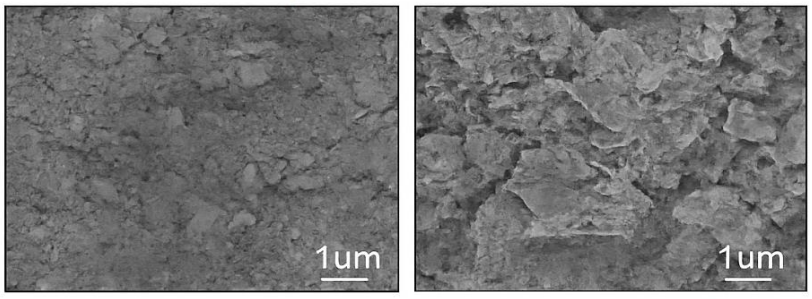
۳-۱. نتایج آزمایشگاهی

مقایسه نتایج آزمایش برش مستقیم روی خاک طبیعی و خاک بهسازی‌شده با نانورس در جدول ٤ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که افزایش نانورس به‌طور واضح موجب افزایش مقاومت برشی خاک شده است. همچنین، با افزایش نانورس، زاویه اصطکاک داخلی خاک از ۲۹ به ۳٤ درجه افزایش یافت و چسبندگی از حدود ۸ kPa به بیش از ۱۸ kPa رسید و ساختار خاک در تصاویر SEMهمگن‌تر و متراکم‌تر شد. در حالت عادی، افزودن رس معمولاً چسبندگی را افزایش می‌دهد اما اثر آن بر φ محدود یا ناچیز است. برخلاف رس معمولی، نانورس‌ها رفتار متفاوتی دارند. نانوذرات مونتموریلونیت در مقیاس نانو، فضاهای خالی بین ذرات خاک را پر می‌کنند. این عمل باعث کاهش نسبت تخلخل، تشکیل پل‌های نانویی بین دانه‌ها، افزایش تراکم موضعی و قفل‌شدگی اصطکاکی مؤثر می‌شود. بنابراین، بخشی از افزایش φ ناشی از افزایش چسبندگی مکانیکی بین ذرات است، نه افزایش اصطکاک واقعی.

جدول ٤. نتایج آزمایش برش مستقیم

درصد نانورس	زاویه اصطکاک داخلی (°)	چسبندگی (kPa)
صفر (طبیعی)	۲۹	۸
٪۳	۳۳	۱۳
٪۵	۳٤	۱۸

در شکل ٦، عکس میکروسکوپی در دو حالت بهسازی‌شده و بهسازی‌نشده مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در خاک رس طبیعی، فضاهای خالی (تخلخل زیاد) بین ذرات مشاهده می‌شود. ذرات خاک معمولاً به صورت صفحه‌ای یا پولکی شکل کنار هم قرار گرفته‌اند اما اتصال قوی بین آن‌ها وجود ندارد و در بسیاری از موارد، ذرات ریزتر (لای و رس) به‌خوبی سطح ذرات درشت‌تر (ماسه) را نپوشانده‌اند. این حالت باعث می‌شود خاک نفوذپذیرتر و در برابر نشست و گسیختگی برشی آسیب‌پذیر باشد. در تصویر SEM خاکی که با درصد بهینه نانورس (۳ درصد) بهسازی شده، مشاهده می‌شود که تخلخل به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. ذرات نانورس به دلیل اندازه بسیار کوچک (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) وارد فضاهای خالی بین ذرات اصلی شده و آن‌ها را پر می‌کنند. پل‌های نانویی[1] بین دانه‌ها تشکیل شده و باعث افزایش چسبندگی و قفل‌شدگی مکانیکی می‌شود. سطح ذرات به صورت یکنواخت با لایه‌های نانورس پوشیده شده و این امر باعث افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری می‌گردد. در حالت بهسازی‌شده، ذرات خاک منسجم‌تر و متراکم‌تر دیده می‌شوند. بنابراین، تصاویر SEM به‌وضوح نشان می‌دهند که نانورس با پر کردن فضاهای خالی و ایجاد پیوند بین ذرات باعث تغییر ساختار داخلی خاک و بهبود خواص مکانیکی آن می‌شود.



شکل ٦. مقایسه تصویر SEM در دو حالت طبیعی و بهسازی شده

1- Nano-bridges

۳-۲. نتایج عددی FLAC3D

در جدول ۵ نشان داده شده که با افزایش مقدار نانورس، مقادیر ضریب اطمینان افزایش و بیشینه جابه‌جایی کاهش می‌یابد.

جدول ۵. مقایسه ضریب اطمینان (FS) و جابجایی قائم (Uz)

حالت مدل‌سازی	ضریب اطمینان FS	بیشینه جابجایی قائم (cm)
بدون نانورس	۱/۱۱	٦/۸
با ۳٪ نانورس	۱/۳٤	٤/۱
با ۵٪ نانورس	۱/۵۲	۳/۳

همچنین، خروجی مدل FLAC3Dنشان داد که نانورس باعث کاهش قابل توجه در نشست کف گود و تغییرمکان جانبی دیواره‌ها شده است (جدول ٦). بهینه‌ترین مقدار نانورس برای افزایش پایداری، ٪۳ وزنی تعیین شد. نتایج آزمایشگاهی و عددی هم‌خوانی خوبی دارند و پایداری سازه‌ای گودبرداری در حضور نانورس به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد. همانطور که در جداول ۵ و ٦ دیده می‌شود، با اضافه شدن ۳ درصد نانورس، تغییرمکان افقی ٥٤ درصد، بیشینه نشست کف گود ۳۷ درصد و بیشینه جابه‌جایی قائم ۵۷ درصد کاهش پیدا کرده است.

جدول ٦. تأثیر نانورس بر تغییر مکان افقی دیواره گود و نشست کف گود

درصد نانورس	بیشینه نشست کف گود (cm)	بیشینه تغییرمکان افقی دیواره (cm)
صفر	٤.۳	٤.۸
۱	٤.۱	۳.۲
۲	۳.۲	۲.۰
۳	۲.۷	۲.۱

در جدول ۷، بیشینه جابه‌جایی دیواره گود و نشست کف گود در شرایط ازمایشگاهی و عددی با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که اختلاف بین دو روش قابل توجه نمی‌باشد و نتایج نزدیک هستند. اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی در تمام پارامترها کمتر از ۵٪ بوده که نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی FLAC3Dو صحت روش آزمایشگاهی است. اختلافات جزئی ممکن است به دلیل تقریب مدل (Mohr-Coulomb)، شرایط مرزی مدل و اختلافات در نحوه ثبت نتایج آزمایشگاهی (مقیاس مدل) ایجاد شوند.

جدول ۷. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی

شاخص پایداری / حالت مدل	نتایج آزمایشگاهی (نمونه واقعی)	نتایج عددی (FLAC3D)
بیشینه جابه‌جایی دیواره (mm) قبل از افزودن نانورس	٤٦.۲	٤۸
بیشینه جابه‌جایی دیواره (mm) بعد از افزودن ۳٪ نانورس	۱۹.۸	۲۱
نشست قائم قبل از افزودن نانورس (mm)	۳۲	٤۳
نشست قائم بعد از افزودن نانورس (mm)	۲۱	۲۷

در شکل ۷، کانتور تغییرشکل[1] اطراف گود در دو حالت طبیعی و بهسازی با نانورس مقایسه شده است. نتایج در ادامه آورده شده است:

خاک طبیعی:

بیشترین تغییرشکل‌ها معمولاً در لبه گود و دیواره‌ها رخ می‌دهد.

1- Deformation contour

دیواره‌های گود به سمت داخل دچار حرکت جانبی می‌شوند[1].

در اعماق بیشتر، تغییرشکل کاهش پیدا می‌کند.

در خاک‌های نرم و بدون بهسازی، کانتور تغییرشکل‌ها گسترده‌تر بوده و به سطح زمین اطراف گود نیز منتقل می‌شود که باعث نشست سطحی می‌گردد.

با افزودن نانورس:

– تغییرشکل دیواره‌ها و کف گود به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

– کانتور تغییرشکل‌ها محدودتر و در نزدیکی دیواره‌ها متمرکز می‌شود.

– به دلیل افزایش چسبندگی و کاهش نفوذپذیری، خاک اطراف گود مقاومت بیشتری در برابر لغزش و تغییرشکل نشان می‌دهد.

به همین ترتیب، کانتور تنش[2] اطراف گود در دو حالت طبیعی و بهسازی با نانورس مقایسه شده است (شکل‌های ۸ و ۹).

خاک طبیعی:

– پس از گودبرداری، تنش‌های قائم و افقی در اطراف گود دچار **بازتوزیع** می‌شوند.

– در دیواره‌ها ناحیه‌ای با **تمرکز تنش برشی** شکل می‌گیرد.

– در کف گود نیز معمولاً افزایش تنش موضعی دیده می‌شود.

– تنش‌ها در خاک‌های بدون بهسازی به‌طور ناهمگن توزیع شده و امکان ایجاد گسیختگی موضعی یا کلی بالا می‌رود.

با افزودن نانورس:

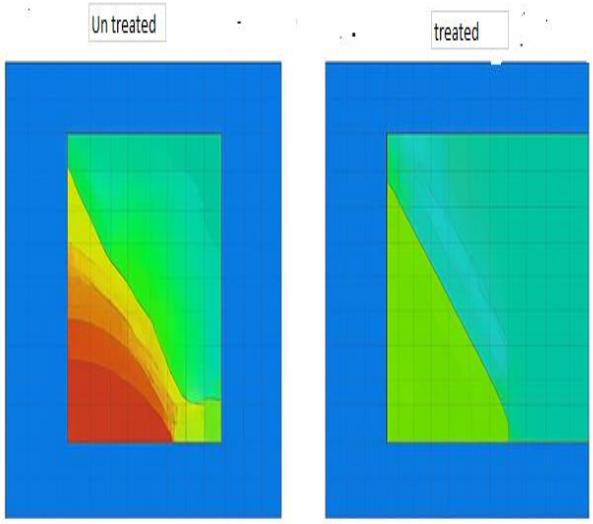
– کانتور تنش‌ها یکنواخت‌تر می‌شود.

– تنش برشی بحرانی در دیواره‌ها کمتر و در عمق بیشتری متمرکز می‌گردد.

– مقاومت برشی افزایش یافته و بنابراین ضریب اطمینان گود بالا می‌رود.

– به دلیل کاهش تغییرشکل، تنش‌های اضافی به سطح زمین منتقل نمی‌شوند و نشست اطراف گود نیز کمتر است.

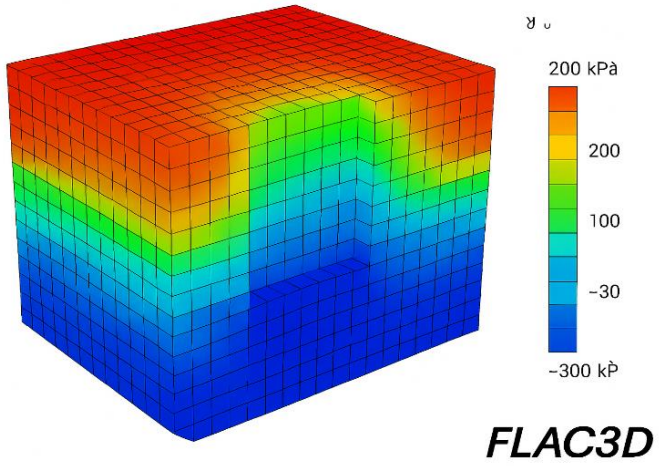
به طور خلاصه، نانورس باعث می‌شود کانتور تغییرشکل اطراف گود کوچکتر و متمرکزتر شود و کانتور تنش نیز یکنواخت‌تر گردد. در نتیجه، پایداری گود افزایش پیدا می‌کند.



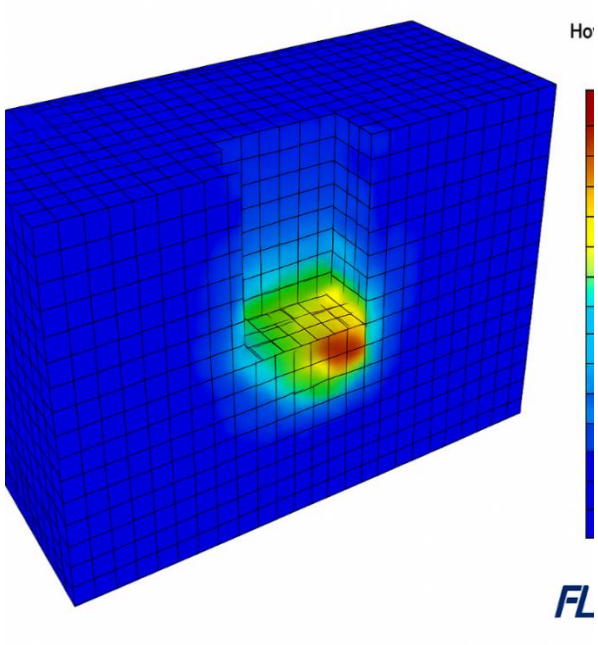
شکل ۷. مقایسه کانتور تغییرشکل افقی در دو حالت بهسازی شده و طبیعی

1- Lateral displacement

2- Stress contour



شکل ۸. تغییرات تنش قائم در خاک بهسازی نشده



شکل ۹. تغییرات تنش افقی بعد از بهسازی با نانورس

٤. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی، تأثیر افزودن نانورس بر پایداری یک گودبرداری ۱۰ متری در منطقه ولنجک تهران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن نانورس می‌تواند نقش مؤثری در بهبود رفتار مکانیکی خاک و افزایش پایداری گودبرداری ایفا کند. بررسی‌های آزمایشگاهی بیانگر آن بود که با افزایش درصد نانورس تا مقدار بهینه ۳ درصد، مقادیر مقاومت فشاری، چسبندگی و مدول برشی خاک به طور قابل توجهی افزایش یافته و در مقابل، نفوذپذیری و میزان تغییرشکل نمونه‌ها کاهش می‌یابد. تصاویر میکروسکوپی نیز نشان دادند که نانورس با پر کردن فضاهای خالی و ایجاد ساختار متراکم‌تر، موجب بهبود انسجام ذرات و کاهش گسیختگی می‌شود.

تحلیل‌های عددی نیز این نتایج را تأیید کرد، به‌طوری که مدل‌های حاوی خاک تقویت‌شده با نانورس کاهش محسوس جابه‌جایی دیواره گود، توزیع یکنواخت‌تر تنش

و افزایش ضریب ایمنی را نشان دادند. بیشترین بهبود مربوط به ۳ درصد نانورس بود و مقادیر بیشتر از این محدوده کارایی معناداری ایجاد نکردند.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانورس به‌عنوان یک ماده تقویت‌کننده کارآمد، امکان افزایش پایداری گودبرداری را فراهم می‌کند و می‌تواند به‌عنوان جایگزین یا مکمل روش‌های سنتی تثبیت خاک مورد توجه قرار گیرد. با این حال، توصیه می‌شود در پروژه‌های واقعی، انتخاب درصد بهینه نانورس با توجه به نوع خاک، شرایط محیطی و الزامات اجرایی انجام شود. همچنین، انجام مطالعات میدانی و ارزیابی رفتار بلندمدت خاک تثبیت‌شده برای تکمیل یافته‌های حاضر ضروری است.

۵. تقدیر و قدرردانی

بدین‌وسیله از حمایت‌ها و همکاری‌های علمی و پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر در انجام این تحقیق صمیمانه قدردانی و تشکر می‌گردد

٦. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان این مقاله متعهد می‌گردند که پژوهش حاضر حاصل کار اصیل ایشان بوده و تاکنون به‌صورت کامل یا جزئی در هیچ نشریه، همایش یا مجله علمی دیگری منتشر نشده و هم‌زمان نیز برای انتشار در جای دیگری ارسال نشده است.

۷. مشارکت‌های نویسندگان

کلیه نویسندگان در طراحی پژوهش، گردآوری داده‌ها، تحلیل نتایج و نگارش مقاله مشارکت داشته‌اند. سهم هر نویسنده متناسب با میزان مشارکت علمی ایشان در مراحل مختلف تحقیق تعیین شده و تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید نموده‌اند.

۸. منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی از سازمان‌های دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی انجام شده است.

۹. تعارض منافع

. نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، علمی، سازمانی یا شخصی که بتواند بر نتایج، تحلیل‌ها یا تفسیر داده‌های پژوهش حاضر تأثیرگذار باشد، وجود ندارد.

۱۰. مراجع

Akbari, S., & Colleagues. 2022. “Numerical modeling of urban excavation stability using nano-materials”. University of Tehran.

ASTM D3080. (n.d.). “Standard test method for direct shear test of soils”. ASTM International.

Arabani, M., Shalchian, M. M., & Rahimabadi, M. 2023. “The influence of rice fiber and nanoclay on mechanical properties and mechanisms of clayey soil stabilization”. Constr. Build. Mater., 407*:* 133542. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133542

Arabani, M., Rahimabadi, M. M., & Shalchian, M. M. 2024. “Combined effects of barley fibers and nanoclay on clayey soil stabilization”. Geotech. Geolog. Eng., 42(8).

Gao, L., Xu, W., & Zhang, Y. 2019. “Direct shear test on nanoclay-reinforced soils under lateral loading. Soils Found., 59(4), 927–938.

Heidari, M. 2021. “Investigation of the effect of nanoparticles on the mechanical properties of fine-grained soils”. Iran. J. Geotech. Eng., 12(3), 45–58.

Johari, A., Golkarfard, H., & Mesbahi, M. 2022. The effect of nano-clay stabilizing treatment on the real excavation wall failure: A case study”. Scientia Iran., 29(3 A): 1006–1023.

Kalkan, E. 2013. “Influence of nanoclay on stabilization of slopes and excavation walls”. Appl. Clay Sci., 80–81*:* 85–92.

Karimi, H., et al. 2020. “Laboratory investigation of nanoclay effect on unconfined compressive strength of natural clay soils”. J. Mater. Civ. Eng., 32(7): 04020121.

Karimi, H., et al. 2022. “Numerical modeling with FLAC3D and laboratory study of nanoclay-stabilized soils”. Int. J. Geomech., 22(2): 0402120.

Li, X., Wang, Y., & Chen, Z. 2014. “Mechanical behavior of soft clay stabilized with nanoclay”. Constr. Build. Mater., 66: 323–328.
Marto, A., Latifi, N., & Eisazadeh, A. 2013. “Effect of nanoclay on geotechnical properties of soft clay”. J. Civ. Eng. Manag., 19(2): 1–8.
Mirhosseini, S. M., Ahmadi, M., & Khosravi, A. 2018. “Numerical and experimental study on excavation walls reinforced with nanomaterials”. Comput.Geotech., 98: 126–138.
Mohammadi, S., et al. 2020. “Stability analysis of 8-m deep excavation in Tehran using nanoclay: Experimental and economic evaluation”. J. Rock Mech. Geotech. Eng., 12(6): 1194–1203.
Mousavi, M., & Rezaei, M. 2021. “Numerical and experimental study of nanoclay effect on stability of urban excavations in Tehran”. Geomech. Geoeng., 16(5): 433–445.
Rezaei, M., et al. 2019. “Experimental study on the effect of nanoclay on the mechanical properties of clay soils”. Iran. J. Geotech. Eng., 11(3): 45–56.
Rezaei, M., Hosseini, A., & Mohammadi, S. 2018. “Numerical and physical modeling of deep excavations stabilized with nanoclay”. Iran. J. Civ. Eng., 22(4): 95–106.
Zhang, J., Liu, H., & Huang, B. 2017. “Improvement of sandy slopes stabilized with nanoclay”. Eng. Geol., 223: 20–28.