



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Experimental investigation of the effect of using nanosilica, nanotitanium and nano aluminum oxide on the geotechnical behavior of collapsible soils.

Zahra Sasannejad¹, Ebrahim Nohani ^{2*}, Hamidreza Holakoei³

1- M.Sc. in Civil Engineering – Geotechnical Engineerin, Jahad University Khuzestan, Ahvaz, Iran.

*2- Department of Civil Engineering, Materials and Energy Research Center, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran.

3-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, ACECR Khouzestan Institute of Higher Education, Ahvaz, Iran.

Received: 30 August 2025; Revised: 23 July 2025; Accepted: 02 October 2025; Published: 21 January 2026.

Abstract

The aim of the present study is to investigate the laboratory effect of using three types of nanomaterials including nanosilica, nanoaluminum and nanotitanium on the geotechnical parameters of subsidence soils. To investigate the effects of using these nanomaterials, the interpretation of the results of direct shear tests and a specific type of appropriate consolidation test of subsidence soils was used. To conduct the tests, subsidence soil available at a site in Ahvaz-Hoveyzeh was used, for which minimal information such as its natural specific gravity was previously available, and this point was used as a basic indicator in the reconstruction of the test specimens. The test results show that all three nanomaterial models reduce subsidence compared to the control sample (with a subsidence potential of 21.59%). All three models of improvement with nanomaterials transferred the rupture (with different mechanisms) to higher levels, in the case of nanosilica with an increase in the internal friction angle (from 24.3 to 30 degrees in the maximum case) and nanotitanium with an increase in adhesion (from 0.13 to 0.43 kg/cm² in the maximum case). Finally, by selecting several criteria and giving specific scores, the 1.5% nanotitanium scenario was selected as the most optimal technical-economic combination with a 56% reduction in the collapse potential, also in this scenario the internal friction angle decreased by 27% and the drained adhesion increased by 300%. In fact, it seems that the 1.5% nanotitanium scenario, due to the size of the nano particles, improved the initial locking of the soil particles, although it had the opposite effect on the sliding and friction of the particles on each other

Keywords: Soil compaction, nanomaterials, compaction potential, optimal composition

Cite this article as Sasannejad,Z , Nohani,E and Holakoei,H . (2026). Experimental investigation of the effect of using nanosilica, nanotitanium and nano aluminum oxide on the geotechnical behavior of collapsible soils.. (e231144). Civil and Project, 7(11), e231144
doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2025.550219.1404>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: ebrahim.nohani@iau.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

بررسی آزمایشگاهی تاثیر استفاده از نانوسیلیس، نانوتیتانیوم و نانو اکسید آلومینیوم بر رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رمبنده

زهرا ساسان نژاد^۱، ابراهیم نوحانی^{۲*}، حمیدرضا هلاکویی^۳

۱- کارشناس ارشد عمران ژئوتکنیک، جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران.

۲- استادیار گروه عمران، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۰۸ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۰۱ مرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۰ مهر ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ بهمن ۱۴۰۴

چکیده

هدف از پژوهش پیش روی، بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از سه نوع نانو مواد شامل نانوسیلیس، نانوآلومینیوم و نانوتیتانیوم بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های رمبنده می‌باشد. برای بررسی اثرات استفاده از این نانو مواد از تفسیر نتایج آزمایشات برش مستقیم و نوع خاصی از آزمایش تحکیم مناسب خاک‌های رمبنده کمک گرفته شد. برای انجام آزمایشات از خاک رمبنده موجود در سایتی اهواز-هویزه استفاده شد که پیشتر اطلاعات حداقلی همچون وزن مخصوص طبیعی آن در اختیار بود، از این نکته به عنوان شاخصی اساسی در بازسازی آزمون‌های آزمایشی کمک گرفته شد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که هر سه مدل نانو مواد باعث کاهش رمبندگی، نسبت به نمونه شاهد (با پتانسیل رمبندگی ۲۱,۵۹٪) هستند. هر سه مدل بهسازی با نانومواد پوش گسیختگی (با مکانیسم‌های متفاوتی) را به سطوح بالاتر انتقال داده، در مورد نانوسیلیس با افزایش زاویه اصطکاک داخلی (از ۲۴,۳ به ۳۰ درجه در بیشترین حالت) و نانوتیتانیوم با افزایش چسبندگی (از ۰,۱۳ به ۰,۴۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در بیشترین حالت) اتفاق افتاد. در نهایت با انتخاب چندین معیار و امتیازدهی مشخص، سناریو نانوتیتانیوم ۱,۵٪ با کاهش ۵۶٪ پتانسیل رمبندگی به عنوان بهینه‌ترین ترکیب فنی-اقتصادی انتخاب شد، همچنین در این سناریو زاویه اصطکاک داخلی ۲۷٪ کاهش و چسبندگی زهکشی شده ۳۰٪ افزایش را نشان می‌دهد. در واقع به نظر می‌رسد سناریو نانوتیتانیوم ۱,۵٪ و به علت اندازه ذرات نانو باعث بهبود قفل‌شدگی اولیه ذرات خاک شده هرچند در مورد لغزش و اصطکاک ذرات بر روی هم اثر معکوس داشته است.

کلمات کلیدی: خاک رمبنده، نانو مواد، پتانسیل رمبندگی، ترکیب بهینه

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ebrahim.nohani@iau.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل چالش برانگیز در مهندسی عمران، مواجهه با خاک‌های مسئله‌دار در پروژه‌ها می‌باشد. خاک‌های مسئله‌دار، خاک‌هایی هستند که در حین ساخت و ساز و یا در مرحله بهره‌برداری، می‌توانند مشکل زیادی را برای سازه ایجاد کنند. از جمله این مشکلات می‌توان به روانگرایی و یا نشست نامتقارن پی سازه اشاره نمود که نتیجه آنها می‌تواند از بین رفتن کل سازه و ایجاد خطرات مالی و جانی بسیاری باشد. یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار که به خاک رمبنده یا فرو ریزی معروف است، با افزایش رطوبت (حالت تقریباً اشباع)، به دلیل سست شدن ناگهانی پیوند بین دانه‌ای دچار کاهش حجم و نشست می‌شوند (محمّدی خان آبادی). خاک‌های رمبنده معمولاً دارای ساختاری باز با پیوندهای ضعیف میان ذرات هستند. نهشته‌های سیلتی در مناطق خشک به‌ویژه در صورت اشباع‌شدن، مستعد کاهش حجم قابل‌توجه یا رمبندگی‌اند. این پدیده باعث افت ظرفیت باربری خاک در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود. چنین خاک‌هایی در بخش‌های گسترده‌ای از ایران، به‌ویژه در شمال‌شرق کشور، پراکنش دارند. (جفرسون و همکاران). با افزایش رطوبت، ساختار این خاک‌ها فرو می‌ریزد و در نتیجه، علاوه بر افت ظرفیت باربری، دچار نشست قابل‌توجهی می‌شوند. این نشست زیاد و کاهش مقاومت می‌تواند نه تنها برای سازه‌ها، بلکه برای پی سدها نیز مشکلات جدی ایجاد کند. (باسما). برای برآورد نشست ناشی از رمبندگی، لازم است عواملی چون میزان دست‌خوردگی نمونه، رطوبت اولیه، گستره و عمق نفوذ آب، پتانسیل رمبندگی بستر، حساسیت سازه نسبت به نشست و نشست‌های نسبی، و همچنین تغییرات شرایط بارگذاری به‌دقت مورد توجه قرار گیرند. (رولینز). کاهش خطرات رمبندگی در مرحله ساخت همواره هزینه‌ای کمتر از تعمیرات آتی دارد، از این‌رو باید اقدامات پیشگیرانه برای مقابله با این پدیده انجام شود. امکان بهسازی خاک در هر پروژه به عواملی مانند شرایط محل، ویژگی‌های سازه، ملاحظات اجرایی و اقتصادی، و میزان ریسک‌پذیری وابسته است. (خالقی و همکاران).

خاک‌های رمبنده ساختار لانه زنبوری داشته و محدوده نسبت تخلخل آنها حدوداً بین 0.8 تا 1.2 ، وزن مخصوص خشک بین 1.2 تا 1.5 گرم بر سانتی‌متر مکعب، حد روانی کمتر از 45 و شاخص خمیری کمتر از 25 درصد است (خالقی و همکاران). خاک‌های رمبنده را بر اساس عمق به سه دسته خاک‌های سطحی که در تنش کمتر از 0.2 مگاپاسکال، خاک‌های سطحی که در تنش 0.2 تا 0.4 مگاپاسکال عمیق که در تنش‌های بالاتر از 0.4 مگاپاسکال قرار دارند، طبقه‌بندی می‌کنند. افزایش رطوبت در خاک‌های سطحی و یا کم عمق که تنش اعمال شده در آن‌ها صرفاً وزن سربار خود است، موجب تغییر میزان رمبندگی می‌گردد (لوری و همکاران^۷، ۲۰۲۱). با توجه به مشکلات حاصل از احداث سازه بر روی این نوع خاک‌ها تثبیت آنها مورد توجه مهندسين است. جهت بهسازی خاک‌های رمبنده با توجه به شدت رمبندگی، جنبه‌های اقتصادی و ساخت، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. تراکم مرطوب می‌تواند در تثبیت لایه‌های سطحی خاک که تحت تاثیر سازه‌های سبک هستند، استفاده شود درحالی که تزریق عمیق می‌تواند یک روش موثر برای سازه‌های عمیق و یا زیرزمینی باشد. یکی دیگر از روش‌های مقابله با خاک‌های رمبنده استفاده از شالوده‌های عمیق (شمع) است که بار سازه را به لایه‌های زیرین خاک رمبنده منتقل کند. به طور عمومی و گسترده از تثبیت شیمیایی برای بهسازی خاک‌های رمبنده استفاده می‌شود (توفیق و همکاران^۸، ۲۰۲۳). همچنین با استفاده از آزمایش بزرگ مقیاس به بررسی بهبود خاک رمبنده با ستون سنگی پرداخته شده و نشان داده شده است که با استفاده

1 Mhrammadi Khan Abadi, 2018

2 Jefferson et al., 2008

3 Basma, 1992

4 Rollins, 2010

5 Htaleghi et al, 2019

6 Htaleghi et al, 2023

7 Iori et al, 2021

8 Tufigh et al., 2023

از ستون سنگی محصور شده با ژئوگرید می‌توان پتانسیل رمبندگی خاک رس با خاصیت خمیری کم را حدود ۸۰٪ کاهش داد. محققین کاهش چشمگیر پتانسیل رمبندگی را مرتبط به افزایش فشار جانبی ستون سنگی به خاک رمبند می‌دانند (قضاوی، ۲۰۱۰).

امروزه برای تثبیت شیمیایی خاک‌های مسئله‌دار علاوه بر مواد سنتی متداول مانند سیمان و آهک، از مواد نانو نیز استفاده می‌شود. فناوری نانو به تمام فناوری‌های پیشرفته در زمینه کار با مقیاس نانو (ابعاد حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) اطلاق می‌شود. این فناوری موجب ساخت مصالحی با خواص و عملکردهای نوین می‌شود. امروزه، پرمصرف‌ترین نوع مواد نانو در زمینه بهسازی خاک‌های مسئله‌دار، نانو آهک^۱، نانوسیلیس^{۱۱}، نانو بنتونیت^{۱۲}، نانو ژئولیت^{۱۳}، نانو مونت‌موریلونیت^{۱۴} و نانو آلومینیوم^{۱۵} می‌باشند (ژنگ، ۲۰۰۷).

با بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه روش‌های بهسازی خاک‌های رمبند، مشخص شد که تا کنون به بررسی تاثیر استفاده از نانومواد بر خواص خاک‌های رمبند پرداخته نشده است. در این پایان‌نامه تأثیر استفاده از نانوسیلیس، نانوتیتانوم و نانو اکسید آلومینیوم بر پتانسیل رمبندگی خاک‌های رمبند بررسی شده است. بدین منظور، خاک با پتانسیل رمبندگی شدید انتخاب و تأثیر افزودنی‌های نانو با درصدهای مختلف بر رفتار تغییر حجمی خاک، پتانسیل رمبندگی و مقاومت برشی مطالعه شد. در این تحقیق از سه مواد نانو ذکر شده با درصدهای ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲٪ برای بهبود خاک استفاده شد. همچنین نمونه خاک تثبیت نشده نیز، به عنوان نمونه شاهد به منظور مقایسه با نمونه‌های بهسازی شده و بررسی اثربخشی استفاده از نانومواد در نظر گرفته شد. در این پژوهش از آزمایش پتانسیل رمبندگی به عنوان یکی از معیارهای اصلی بررسی عملکرد نانومواد بر خاک رمبند استفاده شد. دیگر معیار در نظر گرفته شده برای بررسی عملکرد نانومواد بر خاک رمبند مورد مطالعه، آزمایش برش مستقیم است. جهت تعیین مقاومت برشی خاک در سطح گسیختگی معلوم، تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک، تعیین میزان چسبندگی خاک و مقاومت برشی زهکشی نشده از آزمایش برش مستقیم استفاده شد.

۲- مرور ادبیات

در بررسی انجام شده توسط بلوری بزاز (۱۳۹۳) که به بررسی روش‌های مقابله با خاک‌های رمبند در شمال شرق مشهد پرداخته است، آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی نشان دادند خاک مورد مطالعه حساسیت بالایی به افزایش رطوبت دارد و در صورت اشباع شدن، نشست قابل توجه و سریعی ایجاد می‌کند؛ بنابراین این خاک پتانسیل رمبندگی دارد. با توجه به وجود سازه‌های ریلی و ساختمانی در منطقه و اثرات مخرب نشست ناشی از ارتعاشات قطار و مرطوب شدن خاک، اصلاح و بهسازی خاک ضروری است. روش‌های مختلفی مانند جلوگیری از نفوذ رطوبت، تراکم، جایگزینی مصالح، استفاده از پی‌های عمیق و تثبیت با مصالح مختلف بررسی شدند که در نهایت، با توجه به ویژگی‌های خاک، شرایط اجرایی، اقتصادی و محدودیت‌های شهری، تثبیت خاک با آهک به عنوان بهترین روش انتخاب شد. این روش علاوه بر افزایش مقاومت خاک در کوتاه‌مدت و بلندمدت، باعث کاهش تورم و نفوذپذیری می‌شود و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است. (معروف و بلوری بزاز، ۱۳۹۳).

9 Qazavi, 2010

1 Nano lime 0

1 Nano Silica 1

1 Nano bentonite 2

1 Nano zeolite 3

1 Nano Montmorillonite 4

1 Nano Aluminum 5

1 Zhang, 2007 6

خدابنده و همکاران در سال ۱۳۹۸ در بررسی خود به ارزیابی پتانسیل رمبندگی و پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های رمبنده در اثر اشباع شدگی ناشی از نفوذ آلاینده‌هایی از قبیل شیرابه‌ها و پساب‌ها و مواد شیمیایی به خاک پرداختند. خاک مورد استفاده در این پژوهش خاک لس منطقه کلالة استان گلستان می‌باشد که در رده CL قرار می‌گیرد. از آنجا که امکان تفکیک اجزای شیرابه مخصوصا در عمرهای مختلف و با pH های متفاوت وجود نداشت، بنابراین از دو عامل اسید سولفوریک و سدیم هیدروکسید به عنوان نمایندگان شیرابه و در pH های مختلف استفاده شد و آزمایش‌های فروریزش و برش مستقیم بر روی نمونه‌های خاک و در شرایط اشباع با شیرابه‌ها انجام گردید. همچنین تاثیر درصد آلودگی بر میزان فروریزش خاک بررسی شد. نتایج آزمایش‌های فروریزش نشان می‌دهند که شیرابه‌های با pH پایین و اسیدی باعث افزایش پتانسیل رمبندگی خاک شده و شیرابه‌های با pH بالا و قلیایی، رمبندگی کمتری را ایجاد می‌کنند به نحوی که در pH=۱ مقدار ۵/۰۸ درصد افزایش فروریزش و در pH=۱۴ مقدار ۲/۰۴ درصد کاهش فروریزش نسبت به pH=۷ در خاک مشاهده می‌شود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دامنه تغییرات پتانسیل رمبندگی خاک در pH های پایین و اسیدی بسیار بیشتر از pH های بالا و قلیایی است. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان می‌دهند که با کاهش pH شیرابه چسبندگی خاک افزایش یافته و با افزایش pH چسبندگی خاک کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در pH=۱ مقدار ۸۲٪ افزایش چسبندگی و در pH=۱۴ مقدار ۴۴٪ کاهش چسبندگی نسبت به pH=۷ مشاهده می‌شود. در خصوص زاویه اصطکاک داخلی عکس این مطلب صادق است یعنی با کاهش pH شیرابه زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش یافته و با افزایش pH شیرابه زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در pH=۱ مقدار ۲/۴۶ درجه کاهش و در pH=۱۴ مقدار ۶/۳۹ درجه افزایش در زاویه اصطکاک داخلی نسبت به pH=۷ مشاهده می‌شود (خدابنده و همکاران، ۱۳۹۸).

در بررسی زمانیان و قهرمانی در سال ۱۳۹۹ تثبیت خاک فروریزشی منطقه سرکوبر سمنان که از نوع الی با پیوندهای ضعیف رسی است، توسط سیمان پرتلند و نانو رس مورد مطالعه قرار گرفت. سیمان به مقدار ۵/۰، ۱۰ و ۲/۵ و نانو رس به مقدار ۵/۰، ۱۰ و ۲/۵ درصد وزنی خاک خشک، به خاک فروریزشی اضافه شدند. نمونه‌ها با دانسیته نسبی ۱۴ کیلونیوتون بر متر مکعب و درصد رطوبت ۵٪ آماده شدند. با انجام آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های به‌سازی شده پس از ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، شاخص فروریزش مطابق با استاندارد ASTM D 5333 تعیین شد. نتایج نشان داد که هر دو ماده سیمان و نانو رس می‌توانند پتانسیل فروریزش را کاهش دهند. عملکرد بهسازی به‌طور قابل توجهی به مقدار ماده افزودنی و نیز زمان عمل‌آوری وابسته بود. بهترین عملکرد بهسازی در مقادیر پائین نانو رس مشاهده شد و با افزایش مقدار نانو رس، بازده بهسازی کاهش یافت. برخلاف سیمان، فرآیند سریع بود و با تبخیر آب درون خاک، تکمیل شد. علاوه بر این، در این تحقیق با تثبیت با نانو رس نسبتا عکس‌برداری میکروسکوپی از نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده، رفتار خاک از دیدگاه میکرومکانیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت (زمانیان و قهرمانی، ۱۳۹۹).

خاک رمبنده به عنوان یک نمونه از خاک‌های مسئله‌دار می‌تواند در بسیاری از سازه‌ها مشکل ایجاد کند. خاک رمبنده بدون حضور آب، پایدار است، اما پس از ورود آب به این خاک، دچار نشست‌های قابل توجه و ناگهانی می‌شود. مهم‌ترین موضوع در برخورد با این خاک‌ها پیش‌بینی میزان نشست آن‌ها است. تا به امروز آزمایش‌های مختلفی به صورت آزمایشگاهی یا درجا برای تعیین پتانسیل رمبندگی طراحی شده است که متداول‌ترین آن‌ها آزمایش ادنومتر است. مهم‌ترین نقص آزمایش‌های موجود عدم امکان شبیه‌سازی نوع نشست آب در خاک است. در مطالعه محمودی و پورحسینی در سال ۱۴۰۱ دستگاهی با قالب به قطر ۱۴ و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر طراحی و ساخته شد که دارای امکان شبیه‌سازی نوع نشست آب است و می‌تواند بر اساس منشاء ورود آب، میزان پتانسیل رمبندگی را اندازه‌گیری نماید. این دستگاه الگوهای نشست آب را بر اساس جهت حرکت آب (از بالا به پایین یا از پایین به بالا) و توزیع نشست (نقطه‌ای یا گسترده) به چهار دسته کلی تقسیم‌بندی و شبیه‌سازی می‌کند. نتایج آزمایشگاهی این دستگاه بر روی یک خاک رمبنده نمونه نشان می‌دهد که پتانسیل رمبندگی وابسته به الگو نشست آب در خاک است و نمی‌توان از یک پتانسیل رمبندگی برای تمام الگوهای نشست آب استفاده کرد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی بیشترین پتانسیل رمبندگی مربوط به الگوی نشست آب از بالا به پایین و به صورت گسترده و کمترین آن مربوط به الگو نشست آب از پایین به بالا و به صورت نقطه‌ای است (محمودی و پورحسینی، ۱۴۰۱).

سلطانی نژاد و همکاران در سال ۱۴۰۲ به بررسی تأثیر مواد نانو بر پتانسیل رمبندگی خاک پرداختند. بدین منظور، خاک با پتانسیل رمبندگی شدید از منطقه الله‌آباد کرمان انتخاب و تأثیر افزودنی‌های نانوسیلیس، نانورس، نانو اکسید آلومینیوم و نانوکربنات کلسیم با درصدهای مختلف بر رفتار تغییر حجمی خاک، پتانسیل رمبندگی و مقاومت برشی مطالعه گردیده است. نتایج نشان داد که به دلیل تغییر ساختار و اسکلت خاک افزودن نانوسیلیس و نانورس کاهش قابل ملاحظه پتانسیل رمبندگی را به همراه دارد و لی دو ماده دیگر یعنی نانوکربنات کلسیم و نانو اکسید آلومینیوم تأثیر کمتری دارند. از طرفی نانوسیلیس و نانو رس باعث افزایش ضریب چسبندگی بیشتری می‌شوند در حالی که نانوکربنات کلسیم و نانوسیلیس بیشترین تأثیر بر زاویه اصطکاک داخلی خاک دارند. همچنین عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که خاک رمبند دارای حفرات میکروسکوپی بوده و با افزودن نانومواد، خلل و فرج خاک کمتر و بافت خاک متراکم تر شده و در نتیجه کاهش پتانسیل رمبندگی را به همراه دارد (سلطانی نژاد و همکاران، ۱۴۰۲).

خاک‌های رمبند در زمان خیس شدن، نشست‌های قابل توجهی را تجربه می‌کنند. میزان رس به عنوان یک عامل مهم در رفتار خاک رمبند در نظر گرفته می‌شود. آب از منابع مختلف وارد خاک می‌شود، اما آزمایش‌های موجود برای اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی، قابلیت مدل‌سازی نحوه نفوذ آب در خاک را ندارند. در مطالعه‌ی محمودی و پورحسینی در سال ۱۴۰۲، از دستگاهی استفاده شده است که نحوه ورود آب به خاک را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که در همه‌ی آزمایش‌ها با افزایش میزان رس، پتانسیل رمبندگی افزایش یافته است؛ اما میزان افزایش یکسان نبوده است. میزان افزایش پتانسیل رمبندگی، در آزمایش‌های ادنومتر بیشتر از آزمایش‌های با شبیه‌سازی الگوی نفوذ آب بوده است. در بین الگوهای مختلف نفوذ آب در خاک، با افزایش ۱/۹ درصد رس، بیشترین افزایش پتانسیل رمبندگی مربوط به نفوذ آب از بالا به صورت نقطه‌یی و کمترین افزایش مربوط به نفوذ آب از پایین به صورت گسترده بوده است. اما با افزایش ۲۳ درصد رس، بیشترین افزایش مربوط به نفوذ آب از بالا به صورت گسترده و کمترین افزایش مربوط به نفوذ آب از پایین به صورت گسترده بوده است (محمودی و پورحسینی، ۱۴۰۲).

خاک رمبند در حالت خشک پایداری خوبی از خود نشان می‌دهد اما با ورود آب دچار نشست‌های قابل توجه می‌گردد. پارامترهای زیادی می‌توانند بر میزان نشست رمبندگی تأثیر بگذارند. میزان سربار در زمان خیس شدن یکی از مهمترین پارامترهای تأثیر گذار بر روی نشست و رفتار خاک رمبند است. اشباع شدن خاک رمبند از طریق منابع مختلفی مانند سیلاب، بارندگی، آبیاری، نشت لوله‌های مدفون و ... انجام می‌شود اما در آزمایش‌هایی که برای بررسی رفتار خاک رمبند استفاده می‌شود، تأثیر این منابع قابل بررسی نیست. در تحقیق محمودی و پورحسینی در سال ۱۴۰۳ یک دستگاه با قابلیت شبیه‌سازی الگوهای مختلف نفوذ آب در خاک ساخته شد و با استفاده از سه سربار اشباع شدگی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال تأثیر سربار در هر الگو نفوذ آب به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که برای خاک رمبند استفاده شده، در هر سه سربار میزان پتانسیل رمبندگی آزمایش ادنومتر با آزمایش‌های الگوهای نفوذ آب اختلاف دارد و بیشترین اختلاف با مقدار ۱۶ درصد مربوط به سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال است و در بین الگوهای مختلف نفوذ آب، الگوی نفوذ آب نقطه‌ای از بالا بیشترین پتانسیل رمبندگی را ایجاد می‌کند. تغییرات پتانسیل رمبندگی در مقابل تغییرات سربار اشباع شدگی نشان می‌دهد در تمام الگوهای نفوذ آب با افزایش سربار اشباع شدگی، پتانسیل رمبندگی کاهش می‌یابد اما میزان تغییرات برای هر الگو متفاوت است. به عنوان مثال با افزایش سربار از ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال، بیشترین کاهش پتانسیل رمبندگی با مقدار ۲/۲۷ درصد در الگو نفوذ آب نقطه‌ای از پایین ایجاد می‌گردد (محمودی و پورحسینی، ۱۴۰۳).

۳- روش انجام تحقیق

برنامه آزمایشگاهی

سه ماده افزودنی اصلی نانوسیلیس، نانوتیتانیوم و نانو اکسید آلومینیوم را در یک سیکل مشابه و جداگانه مورد آزمایش قرار داده شد. به این صورت که درصدهای مشخص ماده افزودنی (۰.۵٪، ۱٪، ۵٪ و ۲٪ جرم خاک) در ترکیب با خاک آزمون‌سازی نموده و مورد آزمایش قرار می‌دهیم، باید توجه داشت که خاک خالص (پایه) نیز پیشتر مورد آزمایش قرار خواهد گرفت.

برش مستقیم : اختلاط مصالح افزودنی در رطوبت طبیعی (به طور میانگین ۵٪) خاک انجام پذیرفت و در سطوح تنش (kg/cm^2) ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۶ آزمایش برش مستقیم تحکیم یافته زهکشی شده بر روی آزمون انجام گردید، عمل آوری آزمون به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۲۵ درجه آزمایشگاه به صورت ثابت انجام شد.

تحکیم ویژه : برای تحکیم آزمون‌ها از نظر ترکیب مشابه برش مستقیم اختیار شد و پس از فشرده سازی اولیه (در رطوبت طبیعی و به مدت یک ساعت) در سطح تنش ۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع به مدت ۲۴ ساعت نیز در حالت غرقاب بارگذاری و اعداد گنج با توالی مرسوم آزمایش تحکیم قرائت می‌گردد. بارگذاری مراحل بعد نیز در شرایط اشباع قابل انجام و قرائت است.

مصالح مصرفی

خاک پایه

مهم است از خاکی که به عنوان مبنای آزمایشات قرار می‌گیرد از پیشتر اطلاعاتی موجود باشد تا بتوان به کمک آن به بازسازی هدفمند خاک طبیعی پرداخت. واقعیت این است که اخذ نمونه کاملاً دست نخورده از خاک‌های رمبنده غیر واقعی جلوه می‌کند چراکه بافت و سطح چسبندگی خاک رمبنده به گونه‌ای نیست که ساختار خود را تحت جابجایی یا فشار و کشش در حین و پس از نمونه‌گیری حفظ کند.

خاک پایه از محلی که پیشتر به واسطه انجام تراکم صحرایی اطلاعاتی از آن موجود بود برداشت گردید رطوبت طبیعی خاک حدوداً ۵٪ و وزن مخصوص آن ۱٫۱-۱٫۱۵ گرم بر سانتیمتر مکعب گزارش شده است. این اطلاعات صحرایی به عنوان مرجع در ادامه جهت بازسازی در آزمایشگاه بسیار مفید است، چراکه خاک پایه رمبنده سه پارامتر اصلی دارد :

۱. چگالی مشخص
۲. رطوبت مشخص
۳. ساختار باز
۴. رطوبت مشخص
۵. ساختار باز

نانو موادهای مصرفی

۱. نانو اکسید آلومینیوم : نانو پودر اکسید آلومینیوم ($\text{Nano Al}_2\text{O}_3$) ماده‌ای معدنی، سفیدرنگ، با ذرات بسیار ریز (در مقیاس نانومتر) و سطح ویژه بالا است که به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی خاص، می‌تواند در تقویت مصالح ژئوتکنیکی و اصلاح خاک‌های ضعیف به کار می‌رود. این ماده معمولاً به صورت متخلخل و با چگالی پایین‌تر نسبت به فرم‌های میکرومتری تولید می‌شود. در ادامه این ماده را به اختصار نانو آلومینیوم و به نشان A معرفی می‌کنیم.

جدول مشخصات نانوالومینیوم مصرفی

نام	نانوپودر اکسید آلومینیوم
فرمول شیمیایی	Al_2O_3
شکا ظاهری	پودر
رنگ	سفید مایل به خاکستری
چگالی دانه جامد	$\text{gr/cm}^3 3,97$
اندازه ذرات	۸۰-۶۰ نانومتر
سطح ویژه	$\text{m}^2/\text{gr } 300$

۲. نانو اکسید تیتانیوم : نانو پودر اکسید تیتانیوم (TiO_2) ماده‌ای معدنی با اندازه ذرات در مقیاس نانومتر است که به واسطه خواص نوری، شیمیایی و فیزیکی منحصر به فرد، در بسیاری از صنایع و همچنین در زمینه‌های مهندسی عمران نوین کاربرد دارد. این نانوذرات بسته به روش تولید، می‌توانند دارای ساختار متفاوت و رفتار فتوکاتالیستی باشند. افزودن نانو TiO_2 به مخلوط خاک-سیمان می‌تواند مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها را به طور چشمگیری افزایش دهد.^۷ در ادامه این ماده را به اختصار نانوتیتانیوم و به نشان T معرفی می‌کنیم.

جدول مشخصات نانوتیتانیوم مصرفی

نام	نانوپودر اکسید تیتانیوم
فرمول شیمیایی	TiO_2
شکا ظاهری	پودر
رنگ	سفید
چگالی دانه جامد	$\text{gr/cm}^3 4,62$
اندازه ذرات	۸۰-۶۰ نانومتر
سطح ویژه	$\text{m}^2/\text{gr } 10-45$

۳. نانو اکسید سیلیسیوم : نانو سیلیکا (SiO_2) ذراتی معدنی در مقیاس نانو هستند که از ترکیب سیلیسیوم و اکسیژن تشکیل شده‌اند. این ذرات در دو ساختار اصلی وجود دارند: نوع S با ذرات کروی و نوع P با ساختار متخلخل و سطح ویژه بالا. نوع P به واسطه تخلخل بیشتر، ظرفیت جذب بالاتر و چگالی کمتری دارد، در حالی که نوع S بازتابش فرابنفش بیشتری از خود نشان می‌دهد. در اصلاح خصوصیات خاک‌های ریزدانه به کار رفته و می‌تواند باعث افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک شود^۸. در ادامه این ماده را به اختصار نانوسیلیس و به نشان S معرفی می‌کنیم. سایر مشخصات نانوسیلیس پودری مصرفی از قرار زیر است

جدول مشخصات نانوسیلیس مصرفی

نام	نانوپودر اکسید سیلیس
فرمول شیمیایی	SiO_2
شکا ظاهری	پودر
رنگ	سفید/خاکستری
چگالی دانه جامد	$\text{gr/cm}^3 2,4$
اندازه ذرات	۶۰-۸۰ نانومتر
سطح ویژه	$\text{m}^2/\text{gr } 180-600$

آزمایشات

آزمایش برش مستقیم (مطابق ASTM D3080)

به منظور تعیین مقاومت برشی خاک در امتداد یک سطح مشخص، تحت شرایط کنترل شده‌ی تنش نرمال و سرعت برش، اجرا می‌شود. استاندارد ASTM D3080 برای انجام این آزمایش و به صورت کلی برای تعیین مقاومت برشی خاک‌ها در شرایط کنترل شده استفاده می‌شود و می‌تواند در سه حالت انجام شود :

- برش زهکشی شده (CD – Consolidated Drained)
- برش زهکشی نشده (CU – Consolidated Undrained)
- برش سریع زهکشی نشده (UU – Unconsolidated Undrained)

اما در نسخه‌های به روز ASTM D3080 تمرکز بیشتر روی برش زهکشی شده (CD) دارد. روش اجرای آزمایش CD :
 مجله در ویرایش و اصلاح مقالات، آزاد است.

. آماده سازی نمونه:

- تهیه آزمون با قالب استاندارد.
- قرار دادن نمونه در جعبه برش، بین دو نیمه جعبه با سطح برش افقی.

۲. اعمال تنش نرمال و تحکیم:

- تنش نرمال مشخصی به مدت ۲۴ ساعت و به صورت ثابت به نمونه اعمال می شود.
- زمان کافی برای زهکشی و تحکیم کامل نمونه فراهم می شود. در این مدت، کاهش کرنش محوری یا نشست صفحه بالا به عنوان شاخص پایان تحکیم ثبت می شود.

۳. مرحله برش:

- اعمال جابجایی افقی با سرعت بسیار کم به گونه ای که آب درون حفرات بتواند خارج شود و فشار آب حفره ای ایجاد نشود.
- بار برشی (τ) و جابجایی افقی (Δx) ثبت می گردد تا نمودار تنش برشی-کرنش برشی ترسیم شود.

در مرحله برش، سرعت برش باید براساس گسیختگی و نوع خاک در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه در اینجا رمبنده بوده و گسیختگی این نوع خاک در ۲-۳ درصد کرنش اتفاق می افتد، لذا گسیختگی برابر ۲,۵٪ جابجایی (حدوداً ۱,۴ میلیمتر جابجایی) لحاظ شده است. نوع خاک نیز سیلت (دامنه خمیری ناچیز) بوده، لذا زمان برش در مواردی که نگرانی از تحکیم و مسئله زهکشی (در حین برش) وجود دارد می بایست باید ۲۰۰ دقیقه لحاظ می گردید. اما باید توجه داشت که این زمان برای نمونه اشباع یا رطوبت بالا و محدودیت زمان تحکیم است درحالی که در آزمون ما، با رطوبت ۵٪ عملاً مسئله تحکیم (خروج آب از نمونه) مطرح نیست و آبی نیز جهت نگرانی مسئله زهکشی (در حین برش) در بافت خاک وجود ندارد. لذا مرحله برش آزمایش در حدوداً ۱۰ دقیقه با سرعت ۰,۵ میلیمتر بر دقیقه انجام شد.

روش اصلی تفسیر: مدل خطی موهر-کولمب

با توجه به محدود بودن تعداد داده ها (معمولاً سه سطح تنش نرمال)، روش اصلی و قابل اتکای تفسیر، استفاده از مدل خطی موهر-کولمب است:

$$\tau = c + \sigma * \tan(\varphi)$$

که در آن:

τ : تنش برشی در گسیختگی

σ' : تنش نرمال (موثر) اعمال شده

c : چسبندگی (در اینجا زهکشی شده)

ϕ : زاویه اصطکاک داخلی (در اینجا زهکشی شده)

تمامی مقادیر این متغیرها از طریق برآزش خطی بر داده‌های تجربی بدست آمده از آزمایش به دست می‌آیند.



آزمونه خاک بهسازی شده با نانوالومینیوم پس از برش مستقیم

آزمایش تحکیم ویژه (مطابق ASTM D5333)

این آزمایش اساساً با آزمایش تحکیم معمولی صرفاً در شیوه اجرا تفاوت دارد، همین امر سبب می‌شود بتوان از آن تفسیرهای تفاوت اخذ کرد هرچند همچنان قابلیت معادل سازی و تفسیر مشابه آزمایش تحکیم معمولی را دارا است. مراحل اجرای آزمایش :

۱. آماده سازی نمونه :

- انتخاب نمونه خاک با رطوبت طبیعی و شکل دهی در قالب ثابت.
- مشخص کردن بار تحکیم اولیه که نمایانگر تنش پیش‌بینی شده در شرایط کاربرد است.

۲. تحکیم مقدماتی :

- اعمال بار تحکیم (بهتر است به صورت گام به گام) به نمونه (به مدت ۱ ساعت) و ثبت تغییرات کرنش تا رسیدن به تعادل (کاهش نشست تدریجی یا ثابت شدن نرخ نشست).

۳. اشباع سریع :

- در حالی که بار تحکیم برقرار است، نمونه ناگهان با آب پر می‌شود.
- پس از اشباع، نمونه تحت همان تنش ثابت به نشست مجدد ادامه می‌دهد.

۴. اندازه‌گیری کرنش:

- اختلاف کرنش مجموع پس از اشباع نسبت به حالت قبل از آن، به صورت درصد کرنش فروریزش گزارش می‌شود.
- معمولاً کرنش فروریزش در تنش مشخصی مانند ۲۰۰ kPa محاسبه و به عنوان شاخص I_e یا گزارش می‌شود.

۵. دسته‌بندی پتانسیل ریزش:

جدول استاندارد یا طبقه‌بندی بر اساس I_e

- ریزش جزئی
- متوسط
- نسبتاً شدید
- بسیار شدید



آزمونه فشرده شده بهسازی شده با نانوالومینیوم پس از آزمایش تحکیم

مقایسه تحکیم معمولی و تحکیم ویژه

ویژگی	تحکیم کلاسیک (D2435)	تحکیم ویژه (D5333)
هدف	تعیین ضریب تحکیم، فشار پیش تحکیم، ضریب نفوذپذیری عمودی	ارزیابی ریزش (collapse) ساختار خاک پس از اشباع ناگهانی
شرایط اشباع	از ابتدا اشباع کامل (drained)	ابتدا غیر اشباع، سپس اشباع ناگهانی
نوع خاک مناسب	خاک‌های ریزدانه اشباع‌شدنی مانند رس و سیلت	خاک‌های سست، غیر اشباع، دارای ساختار شکننده
پارامتر کلیدی	$e-\log \sigma, n, C_c, C_v$	Collapse Index (CI)
نوع نشست	نشست تدریجی و قابل پیش‌بینی	نشست ناگهانی پس از اشباع
تحلیل بار-کرنش	$e-\log \sigma'$ و زمان-نشست	مقدار نشست لحظه‌ای پس از اشباع در تنش ثابت

اگرچه آزمایش ASTM D5333 صرفاً یک شاخص (CI) را گزارش می‌کند، اما تحلیل دقیق داده‌های نشست-زمان، تغییرات کرنش و وابستگی به تنش اعمالی، امکان برداشت‌های مهندسی گسترده‌تری را فراهم می‌سازد.

روش اختلاط و نمونه‌سازی

با توجه به آنکه تمامی مواد مورد بررسی خشک بوده یا نزدیک به خشک و همچنین عمل‌آوری ویژه‌ای نیز برای مصالح لازم نیست عمل اختلاط مصالح صرفاً با توجه به وزن و درصد هدف انجام شد. همچنین خاک پایه تا پیش از اختلاط به صورت پوشیده شده در دمای نرمال محیط نگهداری شد.

برای آزمون سازی نیز با توجه به حجم قالب، و وزن مخصوص هدف ۱،۱-۱،۱۵ گرم بر سانتیمتر مکعب اقدام شد. آزمون‌ها به صورت ریزش طبیعی خاک(مصلح)، ضربات محدود به بدنه قالب(جهت تراکم یکنواخت) و فشرده‌گی آرام در یک لایه ساخته شد. پس از ساخت آزمون آن را به مدت ۲۴ ساعت به حال خود رها نموده تا قدری بافت طبیعی آن بازسازی و ترمیم شود.

جدول سناریوهای آزمایشی

درصد جرمی نانوتیتانیوم	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
درصد جرمی نانوالومینیوم	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
درصد جرمی نانوسیلیس	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
نام سناریو	Base	A0.5	A1	A1.5	A2	T0.5	T1	T1.5	T2	S0.5	S1	S1.5	S2
شماره	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲

تحکیم ویژه

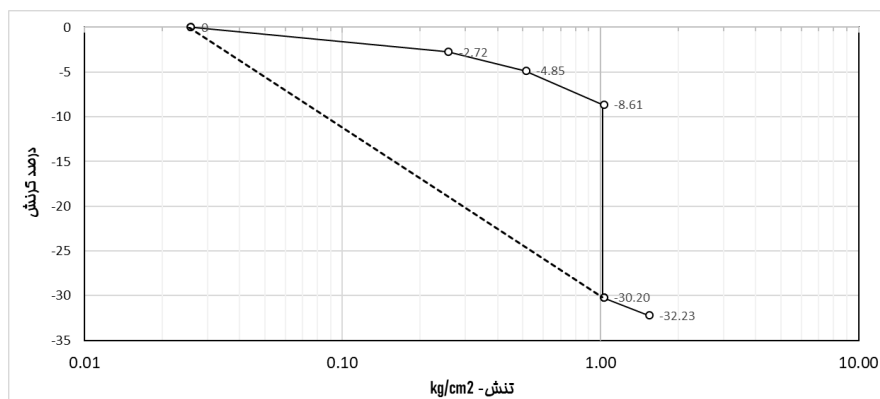
برای آنکه مشخصات نمونه شاهد جهت مقایسه بدست آید در این فصل در ابتدا آزمایشات بر روی نمونه شاهد از خاک پایه انجام و نتایج آن ارائه می‌شود. در ادامه تمامی سناریوها تحقیق و شرایط و مواد بهینه احتمالی مشخص می‌گردد.

• سناریو شمار صفر- *Base*

نمونه شاهد از خاک پایه

جدول خلاصه نتایج آزمایش تحکیم رمبندگی نمونه شاهد(سناریو Base)

قطر نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)	وزن مخصوص طبیعی (gr/cm^3)	پتانسیل رمبندگی، I_c (%)	شدت مسئله	میانگین مدول مقید، قبل غرقاب (kg/cm^2)	مدول مقید کلی (kg/cm^2)
۵۰	۲۰،۲	۱،۱۰	۲۱،۵۹	فوق العاده شدید	۱۰،۵۶	۴،۰۶

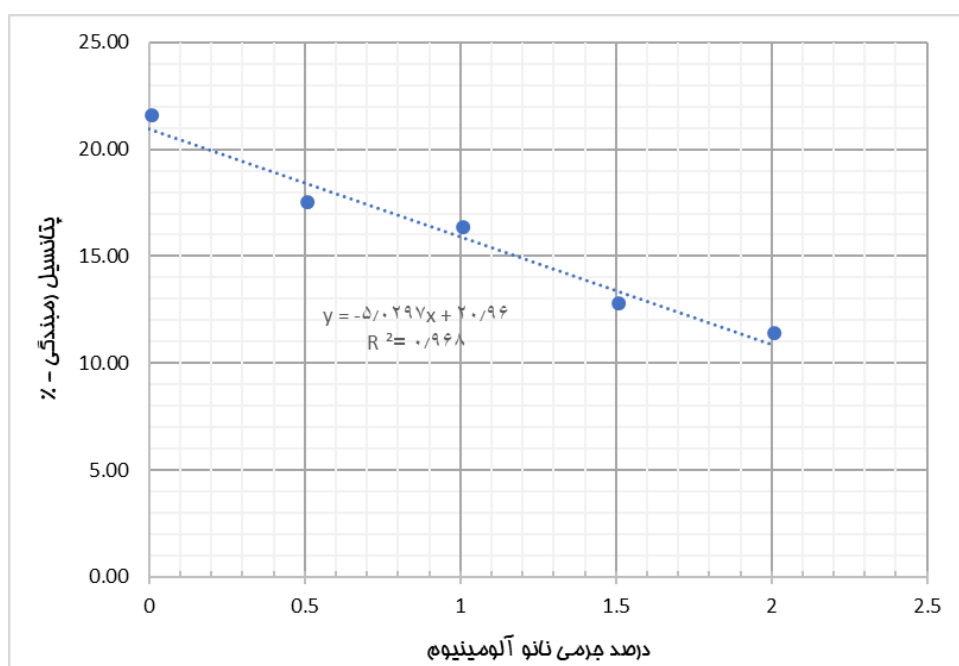


نمودار تحکیم نمونه شاهد

نانوآلومینیوم

جدول خلاصه نتایج بهسازی با نانو آلومینیوم

نام سناریو	پتانسیل رمبندگی، I_c (%)	شدت مسئله	مدول مقید (kg/cm^2)	درصد کاهش رمبندگی به نسبت نمونه شاهد
Base	۲۱,۵۹	فوق العاد شدید	۴,۰۶	-
A0.5	۱۷,۵۲	بسیار شدید	۴,۵۴	۱۹%
A1	۱۶,۳۹	بسیار شدید	۴,۶۹	۲۴%
A1.5	۱۲,۷۷	بسیار شدید	۵,۴	۴۱%
A2	۱۱,۳۸	بسیار شدید	۵,۶	۴۷%

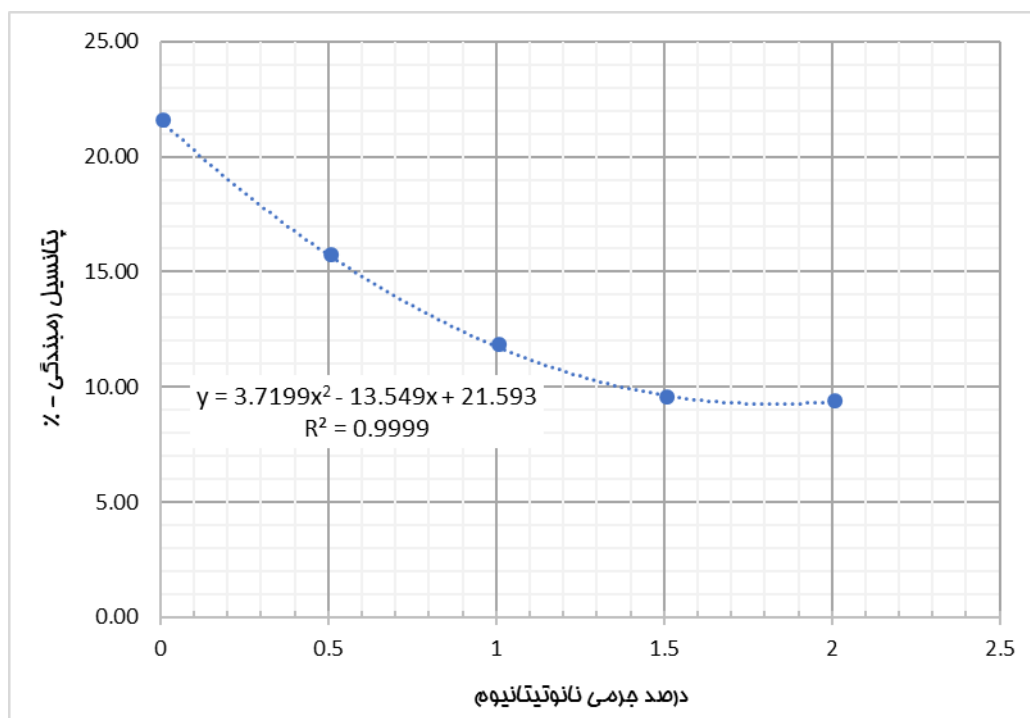


نمودار رابطه بین میزان نانو آلومینیوم و پتانسیل رمبندگی

نانو تیتانیوم

جدول خلاصه نتایج بهسازی با نانو تیتانیوم

نام سناریو	پتانسیل رمبندگی، I_c (%)	شدت مسئله	مدول مقید کلی (kg/cm^2)	درصد کاهش رمبندگی به نسبت نمونه شاهد
Base	۲۱,۵۹	فوق العاده شدید	۴,۰۶	-
T0.5	۱۵,۷۴	بسیار شدید	۵,۲۰	۲۷%
T1	۱۱,۸۳	بسیار شدید	۶,۲۹	۴۵%
T1.5	۹,۵۵	شدید	۸,۰۷	۵۶%
T2	۹,۴۱	شدید	۸,۴۱	۵۶%

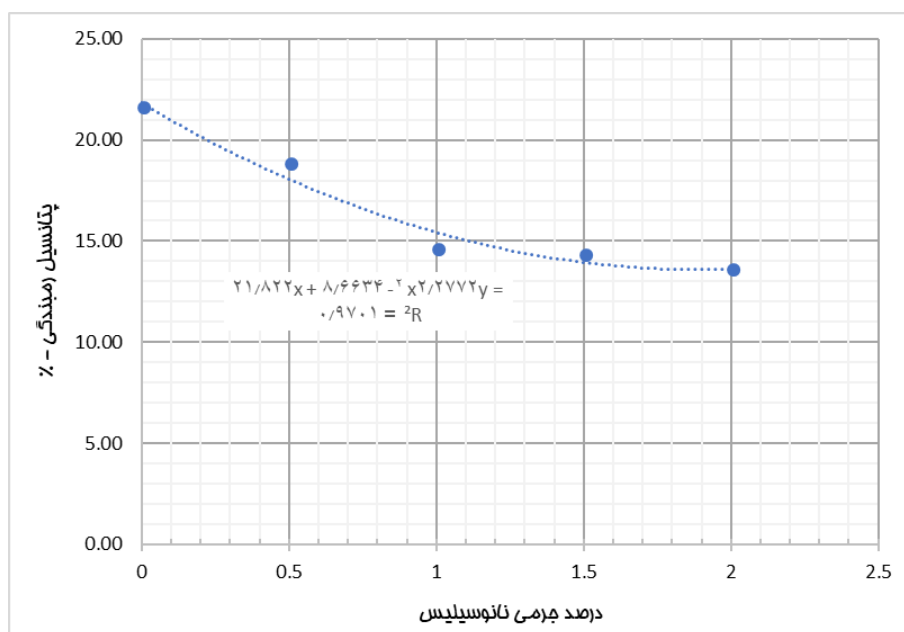


نمودار رابطه بین میزان نانوتیتانیوم و پتانسیل رمبندگی

نانو سیلیس

جدول خلاصه نتایج بهسازی با نانوسیلیس

نام سناریو	پتانسیل رمبندگی، I_c (%)	شدت مسئله	مدول مقید کلی (kg/cm^2)	درصد کاهش رمبندگی به نسبت نمونه شاهد
Base	۲۱,۵۹	فوق العاده شدید	۴,۰۶	-
S0.5	۱۸,۸۱	بسیار شدید	۴,۷۵	۱۳%
S1	۱۴,۶۰	بسیار شدید	۶,۱۲	۳۲%
S1.5	۱۴,۳۱	بسیار شدید	۶,۲۹	۳۴%
S2	۱۳,۵۶	بسیار شدید	۶,۷۰	۳۷%



نمودار رابطه بین میزان نانوسیلیس و پتانسیل رمبندگی

جدول مقایسه نهایی سه نانوذره در سناریوی پیشینه (دوز ۲٪)

ویژگی	نانو آلومینیوم (A2)	نانو تیتانیوم (T2)	نانوسیلیس (S2)
درصد کاهش I_c	۴۷%	۵۶%	۳۷%
I_c نهایی (%)	۱۱.۳۸	۹.۴۱	۱۳.۵۶
شدت مسئله نهایی	بسیار شدید	شدید ✓	بسیار شدید
مدول مقید نهایی (kg/cm^2)	۵.۶۰	۸.۴۱	۶.۷۰
افزایش مدول نسبت به Base	٪+۳۸	٪+۱۰۷	٪+۶۵

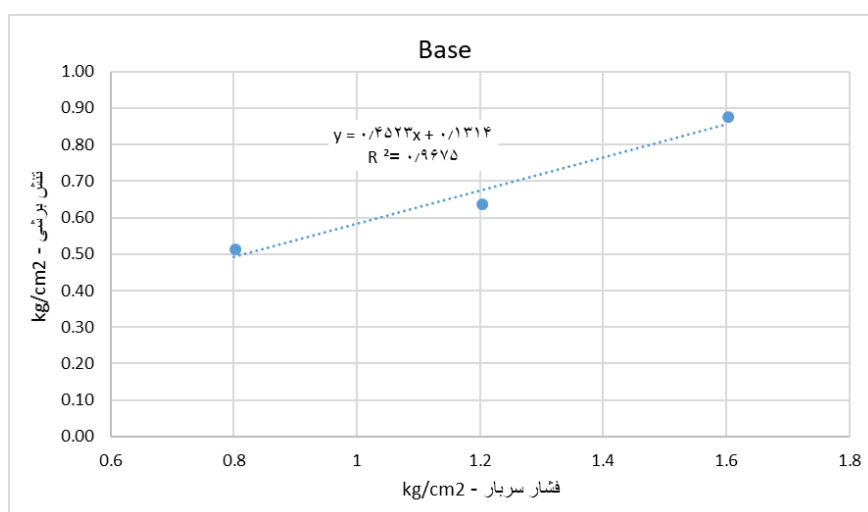
برش مستقیم

برای رسیدن به پارامترهای گسیختگی استفاده از آزمایش برش مستقیم انتخاب کاربردی خواهد بود.

• سناریو صفر - Base

خلاصه نتایج آزمایش برش مستقیم سناریو شماره ۰ (سناریو Base)

قطر نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)	وزن مخصوص طبیعی (gr/cm ³)	درصد رطوبت	زاویه اصطکاک داخلی (°)	چسبندگی زهکشی شده (kg/cm ²)
۵۷	۲۸,۵	۱,۱۵	۶	۲۴,۳	۰,۱۳

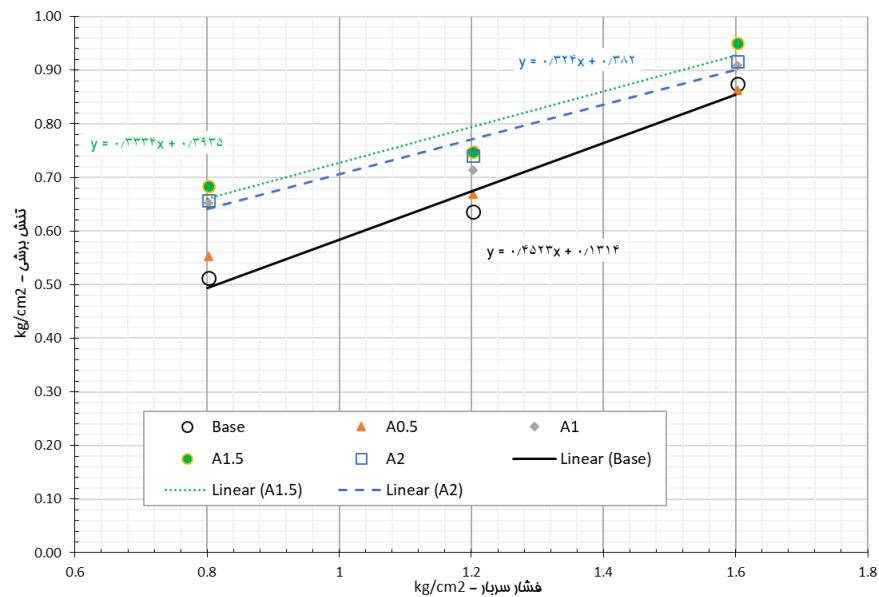


نمودار برش مستقیم روی نمونه شاهد (Base)

• سناریوهای افزودنی نانو آلومینیوم

خلاصه نتایج آزمایش برش مستقیم افزودنی نانو آلومینیوم

سناریو	قطر نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)	وزن مخصوص طبیعی (gr/cm ³)	درصد رطوبت	زاویه اصطکاک داخلی (°)	چسبندگی زهکشی شده (kg/cm ²)
Base	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۵	۶	۲۴,۳	۰,۱۳
بهینه - A1.5	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۴	۵	۱۸,۴	۰,۳۹
A0.5	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۲	۵	۲۱,۲	۰,۲۳
A1	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۴	۴	۱۷,۷	۰,۳۷۵
A2	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۱	۵	۱۸,۹	۰,۳۸

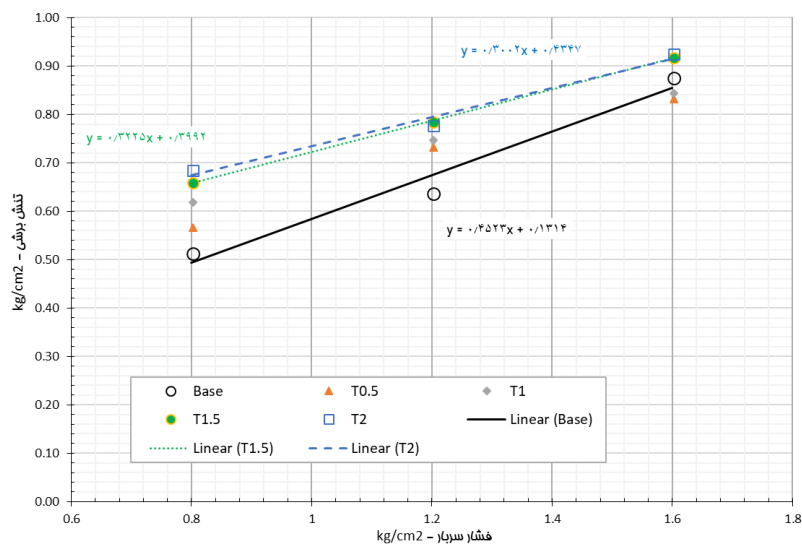


نمودار برش مستقیم روی ترکیبات حاصل از افزودنی نانوالومینیوم و مقایسه با نمونه شاهد

• سناریوهای افزودنی نانوتیتانیوم

جدول خلاصه نتایج آزمایش برش مستقیم افزودنی نانوتیتانیوم

سناریو	قطر نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)	وزن مخصوص طبیعی (gr/cm^3)	درصد رطوبت	زاویه اصطکاک داخلی (°)	چسبندگی زهکشی شده (kg/cm^2)
Base	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۵	۶	۲۴,۳	۰,۱۳
بهینه - T1.5	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۳	۵	۱۷,۸	۰,۳۹
T0.5	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۱	۴	۱۸,۴	۰,۳۱
T1	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۰	۵	۱۵,۸	۰,۳۹
T2	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۲	۴	۱۶,۷	۰,۴۳

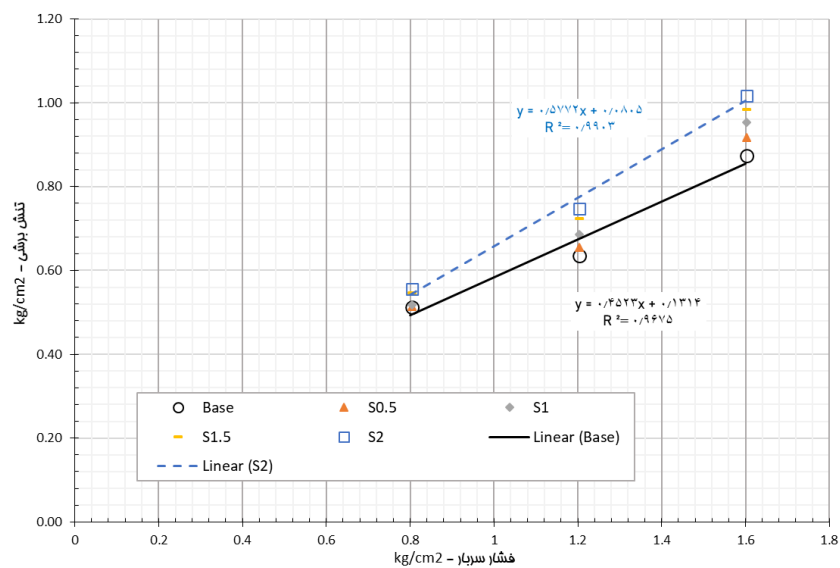


نمودار برش مستقیم روی ترکیبات حاصل از افزودنی نانوتیتانیوم و مقایسه با نمونه شاهد

• سناریوهای افزودنی نانوسیلیس

جدول خلاصه نتایج آزمایش برش مستقیم افزودنی نانوسیلیس

سناریو	قطر نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)	وزن مخصوص طبیعی (gr/cm ³)	درصد رطوبت	زاویه اصطکاک داخلی (°)	چسبندگی زهکشی شده (kg/cm ²)
Base	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۵	۴	۲۴,۳	۰,۱۳
بهینه - S2	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۱	۵	۳۰	۰,۰۸
S0.5	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۰	۵	۲۶,۷	۰,۰۹
S1	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۳	۴	۲۸,۵	۰,۰۶
S1.5	۵۷	۲۸,۵	۱,۱۲	۵	۲۸,۷	۰,۰۹



نمودار برش مستقیم روی ترکیبات حاصل از افزودنی نانو سیلیس و مقایسه با نمونه شاهد

تجزیه و تحلیل داده ها

تحکیم

۱. نانوتیتانیوم (*T-series*):

- بیشترین کاهش پتانسیل رمبندگی (56%) و تنها افزودنی‌ای که خاک را از وضعیت "فوق‌العاده شدید" به "شدید" می‌رساند.
- همچنین بیشترین افزایش مدول مقید (بیش از دو برابر) را فراهم می‌کند.
- مؤثرترین افزودنی در بهسازی جامع رفتار خاک رمبنده از منظر هم رمبندگی و هم مقاومت.

۲. نانوآلومینیوم (*A-series*):

- کاهش قابل توجه پتانسیل رمبندگی (47%) اما هنوز در محدوده "شدید" باقی می‌ماند.
- اثر متوسط بر مدول مقید.
- مناسب برای کاهش پتانسیل رمبندگی بدون نیاز به افزایش سفتی زیاد.

۳. نانوسیلیس (*S-series*):

- کمترین پتانسیل کاهش رمبندگی (37%) اما اثر قوی بر افزایش مدول مقید (65% افزایش).
- گزینه‌ای مناسب برای افزایش سختی خاک بدون اثرگذاری حداکثری بر رمبندگی.

جدول پیشنهاد کاربرد مهندسی نانو ذرات آزمایش شده

افزودنی پیشنهادی	هدف اصلی پروژه
(T2 یا T1.5) نانوتیتانیوم	کنترل پتانسیل رمبندگی
(A2) نانوآلومینیوم	بهبود متوسط در رمبندگی
(S2) نانوسیلیس	افزایش سفتی و سختی بدون تمرکز بر رمبندگی

برش مستقیم

. افزایش زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) :

- ϕ از 24.3° (Base) به 26.7° - 30° افزایش یافته (تا 23%).
- بیشترین افزایش در $S2$ (30°)، سپس $S1.5$ و $S1$.

تفسیر: نانوسیلیس موجب افزایش زبری سطحی و اصطکاک بین ذره‌ای شده و ساختار را پایدارتر کرده است.

۲. کاهش چسبندگی زهکشی شده (C):

- c از 0.13 (Base) به 0.06 - 0.09 کاهش یافته (تا 54% افت).
- کمترین چسبندگی در $S1$ ، بیشترین در $S0.5$ و $S1.5$ (0.09).

تفسیر: نانوسیلیس باعث ایجاد چفت و بست بهتر در تماس ذرات شده، اما باند و پیوندهای چسبنده را کاهش داده است.

۳. موازنه برشی τ (با فرض $\sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$): مقاومت برشی افزایش یافته، اما وابسته به ϕ است، نه چسبندگی.

۴. روند تغییرات:

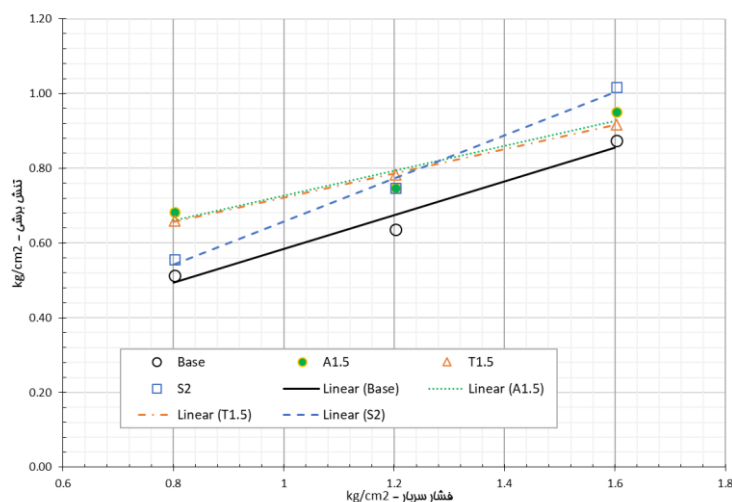
- ϕ پیوسته و صعودی است.
- c کاهش یافته اما در حد قابل قبول تثبیت شده (0.08 - 0.09).

تحلیل: رفتار نانوسیلیس اصطکاک محور و خشک تر است.

۵. گزینه بهینه - $S2$:

- بالاترین ϕ (30°)، c معقول (0.08)، بهترین عملکرد برشی.

$S2$ به عنوان گزینه بهینه سری S انتخاب می شود.



نمودار مقایسه پوش گسیختگی حالات بهینه نانو مواد و نمونه شاهد

تفسیر تجمیعی

برای تحلیل کلی نتایج از روش تحلیل چندمعیاره با وزن دهی استفاده می‌کنیم، برای استفاده از این روش ابتدا باید معیارها و وزن هر معیار را مشخص کنیم، لذا در این خصوص در ابتدا از معیارهای "فنی" زیر استفاده می‌کنیم:

۱. کاهش پتانسیل رمبندگی (وزن ۲۵٪)
۲. مدول مقید (وزن ۲۰٪)
۳. زاویه اصطکاک داخلی (وزن ۲۵٪)
۴. چسبندگی (وزن ۲۰٪)
۵. وزن مخصوص (۱۰٪)

همچنین برای نرمال سازی به شیوی خطی عمل شد، به این صورت که برای بهترین حالت حداکثر امتیاز اختصاص داده شد و برای بقیه موارد به نسبت آن مقدار و به صورت خطی امتیاز تعدیل شد.

جدول رتبه بندی فنی بهترین سناریوها

رتبه فنی	سناریو	امتیاز نهایی (از ۱۰۰)
1	T2	88.66
2	T1.5	86.96
3	A2	77.38
4	T1	75.92
5	A1.5	74.53
6	S2	70.82

67.98	S1.5	7
65.21	S1	8
63.97	A1	9
63.82	T0.5	10
57.38	A0.5	11
53.10	S0.5	12
45.95	Base	13

با توجه به آنکه همه مصالح از نظر قیمتی یکسان بوده، ترم قیمت از این طریق قابل ورود نیست (اثرگذار نیست)، همچنین در مورد حجم مصالح نیز برای هر پروژه می‌تواند متفاوت باشد، اما به صورت کلی و با توجه به نزدیکی دو سناریو رتبه یک و رتبه دو، چنانچه اثر اقتصادی نیز دیده شود احتمالاً بهترین سناریو "فنی-اقتصادی" قابل بیان **T1.5** خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

۱. افزودن نانو مواد، فرای نوع آن (نانو سیلیس، نانو تیتانیوم یا نانو آلومینیوم) باعث کاهش پتانسیل رمبندگی خاک می‌شود.
۲. مدول مقید خاک در تمام سناریوهای اصلاحی افزایش یافت و حداکثر آن 8.41 kg/cm^2 در ۲٪ نانوتیتانیوم مشاهده شد.
۳. انتخاب نوع و درصد بهینه نانوافزودنی می‌تواند به شکل مؤثری پایداری و خواص مکانیکی خاک رمبنده را بهبود دهد.
۴. راه حل نهایی جهت کنترل کامل رمبندگی فوق‌العاده شدید نمی‌تواند صرفاً استفاده از نانومواد باشد.
۵. افزودن هر سه مدل نانو مواد، آلومینیوم، تیتانیوم و سیلیس باعث انتقال سطح گسیختگی به مقادیر بالاتر می‌شود. نانو آلومینیوم و نانوسیلیس این کار را از طریق افزایش چسبندگی و نانوسیلیس از آن را از طریق افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک انجام می‌دهند.
۶. تحلیل چندمعیاره نشان داد نانوتیتانیوم ۱.۵٪ بالاترین امتیاز ترکیبی فنی-اقتصادی را کسب کرد، لذا به صورت کلی ترکیب بهینه خواهد بود.
۷. بیشترین زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده (درجه) متعلق به سناریو نانوسیلیس ۲٪ با ۳۰ و کمترین آن برای نانوتیتانیوم ۱٪ با ۱۵.۸.
۸. بیشترین چسبندگی زهکشی شده (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) برای نانوتیتانیوم ۲٪ و و کمترین آن برای نانوسیلیس ۱٪ خواهد بود.
۹. انتخاب نوع و درصد نانوذره باید بر اساس هدف پروژه (افزایش اصطکاک یا افزایش چسبندگی) انجام شود.

پیشنهادهای برای تحقیقات آتی

۱. استفاده نانومواد با درصدهای پائین از مصالح سنتی‌تر مثل سیمان.
۲. بررسی اثرات بارهای سیکلیک و دینامیکی بر خاک رمبنده بهسازی شده با ترکیب‌های مختلف نانومواد و مصالح سنتی.
۳. توسعه مدل‌های عددی برای پیش‌بینی رفتار خاک‌های رمبنده بهسازی شده با نانوذرات بر اساس نتایج آزمایشگاهی.

مراجع

- معروف، م، بلوری بزاز، ج، ۱۳۹۳، اصلاح و بهسازی خاک‌های رمبنده، نشریه زمین شناسی مهندسی، دوره ۸، شماره ۴، صفحه ۲۵۱۳-۲۵۳۶.
- خدابنده، م، کرامتی، م، حسینی، م، نوکنده، ص، ۱۳۹۸، بررسی تاثیر pH شیرابه بر میزان فروریزش و پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های رمبنده، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۱، شماره ۱، صفحه ۴۵-۵۸.
- زمانیان، م، قهرمانی، ف، ۱۳۹۹، بررسی تأثیر سیمان پرتلند و نانو رس بر پتانسیل فروریزش و شاخص‌های تحکیم خاک فروریزشی، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۶، صفحه ۱۴۵۴-۱۴۳۹.
- محمودی، م، پورحسینی، ر، ۱۴۰۱، دستگاه بزرگ مقیاس ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک با امکان شبیه‌سازی نوع نشت آب، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۱۲، صفحه ۴۸۲۶-۴۸۰۹.
- سلطانی نژاد، ع، مخبری، م، مرندی، م، ۱۴۰۲، مطالعه آزمایشگاهی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رمبنده بهسازی شده با مواد نانو، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱۰، صفحه ۲۰۹۱-۲۱۱۲.
- محمودی، م، پورحسینی، ر، ۱۴۰۲، برآورد تأثیر رس در پتانسیل رمبندگی خاک در روش‌های مختلف نفوذ آب، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۳۹، شماره ۳، شماره پیاپی ۳، صفحه ۱۱۱-۱۲۱.
- محمودی، م، پورحسینی، ر، ۱۴۰۳، برآورد تاثیر شدت سربار بر پتانسیل رمبندگی خاک در الگوهای مختلف نفوذ آب، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، مقالات آماده انتشار.

A.A. Basma, E.R.J.J.o.G.E. Tuncer, Evaluation and control of collapsible soils, 118(10) (1992) 1491-1504.

Abood, A., Y. Fattah, M., Al-Adili, A., Effect of saturation on dynamic characteristics of collapsible gypseous soil using cyclic triaxial testing, Case Studies in Construction Materials, 19, (2023), e02502.

A.H.H. S. Mohammadi Khan Abadi, Laboratory study of soil improvement using nanomaterials (case study on the soil of Sardareh-Garmsar region), Technical and Engineering Faculty, Garmsar University, 2018.

A. Johari, H. Golkarfard, F. Davoudi, A.J.B.o.E.G. Fazeli, t. Environment, A predictive model based on the experimental investigation of collapsible soil treatment using nano-clay in the Sivand Dam region, Iran, 80 (2021) 6725-6748.

Bull, W.B. "1964", "Alluvial fans and near-surface subsidence in Western Fresno County, California", Geological Survey Professional Paper 437-A, Washington, 71.

G. Zhang, Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils, in: Advances in measurement and modeling of soil behavior, 2007, pp. 1-13.

Huat, B.B.K., AL Aziz, A., Faisal, H. A. and Azmi, N. A. (2020), “Effect of Wetting on Collapsibility and Shear Strength of Tropical Residual Soils”, *Ele. Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, Vol. 13, Bund. G. PP. 1-14.

I.S. Lori, M.M. Toufigh, V.J.C. Toufigh, B. Materials, Improvement of poorly graded sandy soil by using copper mine tailing dam sediments-based geopolymer and silica fume, 281 (2021) 122591.

I. Jefferson, D. Evstatiev, D. Karastanev, The treatment of collapsible loess soils using cement materials, in: *GeoCongress 2008: Geosustainability and geohazard mitigation*, 2008, pp. 662-669.

J.N.A. M. Qazawi, Design and implementation methods of stone columns, Khajeh Nasir Toosi University of Technology Publications, 2010.

K.M. Rollins, J.J.J.o.G. Kim, G. Engineering, Dynamic compaction of collapsible soils based on US case histories, 136(9) (2010) 1178-1186.

Khodabandeh, M.A., Gabor, N., Akos, T., (2023), “Stabilization of collapsible soils with nanomaterials, fibers, polymers, industrial waste, and microbes: Current trends”, *Construction and Building Materials*, Volume 368.

Macedo, J., Sotelo, G., Orellana, S., Vergaray, L., Liu, F., Jaffal, H., El Mohtar, C., Geotechnical characterization of collapsible salty sands subjected to monotonic and cyclic loadings – A case study for areas with high seismicity, *Soils and Foundations*, 63(1) (2023), 101252.

M. Khaleghi, M.J.S. Rowshanzamir, T. Research, Biologic improvement of a sandy soil using single and mixed cultures: A comparison study, 186 (2019) 112-119.

M. Khaleghi, M.A.J.J.o.C. Rowshanzamir, E. Engineering, Impact of Biologic Single and Mixed Medium on Mechanical-Hydraulic properties of Dune Sand, 52(109) (2023) 91-100.

M.M. Abbas, A. Nazir, A.M. Nasr, M.A.J.J.o.E.R. Darweish, Utilization of Industrial Wastes for Improving Geotechnical Properties of Collapsible Soil, 5(1) (2021) 15-19.

Scheffe, K. F. (2005), “Collapsible soils in the Rio Grande Valley of central New Mexico”, *Geological Society of America(GSA)*, Vol. 37, Issue 7, pp. 327.

S.M. Haeri, A.M. Hosseini, M.M. Shahrabi, S. Soleymani, Comparison of strength characteristics of Gorgan loessial soil improved by nano-silica, lime and Portland cement, in: *From Fundamentals to Applications in Geotechnics*, IOS Press, 2020, pp. 1820-1827.

Seiphoori, A., Zamanian, M., Improving mechanical behaviour of collapsible soils by grouting clay nanoparticles, *Engineering Geology*, 298, (2022), 106538.

Shengang, L., Zhang, C., Zhang, T., Wentao, L., Jia, P., Experimental study on the strength, collapsibility, and microstructure of cement and micro-silica-stabilized saline soil under freeze-thaw cycles, *Case Studies in Construction Materials*, 19, (2023), e02518.

V. Toufigh, R. Baghban Shokatabad, I. Sheikhhosseini Lori, A.M. Namjoo, M.M.J.I.G.J. Toufigh, Mechanical Behavior's Enhancement of Sandy Soil by a Natural Pozzolan-Based Geopolymer and Nanomaterial, 53(2) (2023) 394-408.

Yuan, Z.X. and Wang, L.M. (2020), "Collapsibility and seismic settlement of loess", *Engineering Geology*, 105, PP. 119–123.