



Research Article

Experimental investigation of the effect of using cement and nanosilica in improving the dispersive potential of clay soils

Elnaz Baghaliyan Zadeh¹, 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: 17 August 2025; Revised: 21 September 2025; Accepted: 27 September 2025; Published: 22 December 2025

Abstract

This study investigates the potential for controlling and reducing dispersivity in dispersive clay soils through the use of additive combinations of cement and nanosilica. The necessity of this research arises from the fact that soil dispersivity poses a serious threat to the stability of civil engineering projects, making the identification of an optimal stabilization blend crucial. To achieve the objectives of the study, laboratory tests including unconfined compressive strength (UCS), direct shear, and double hydrometer tests were conducted. The base dispersive clay was treated with three levels of cement (5%, 10%, and 15% by dry weight of soil) and three levels of nanosilica (0.4%, 0.8%, and 1.2%), resulting in nine stabilization scenarios along with a control scenario (no additive). The results indicated that even the combination of 5% cement with 1.2% nanosilica was effective in mitigating soil dispersivity. However, the optimal mix was identified as 10% cement with 0.8% nanosilica (Scenario S22), which exhibited the highest compressive and shear strength, uniform behavior, and complete non-dispersivity. Direct shear results showed a 3 to 7-fold increase in shear strength compared to the untreated soil, along with behavioral stability under increasing confining stresses. Nanosilica played a key role in reducing result variability and improving repeatability. The combined use of cement and nanosilica offers an effective, , and reliable method for stabilizing dispersive clay soils. The proposed optimal combination not only significantly improves mechanical strength but also outperforms other mixtures in terms of behavioral stability and dispersivity control. The ability of nanosilica to enhance uniformity and reduce variability is a distinct advantage of this approach.

Keywords: Dispersivity, cement, nanosilica, optimum blend

Cite this article as nohani E., Holakoei H., Baghaliyan Zadeh E. (2025). 'Experimental investigation of the effect of using cement and nanosilica in improving the dispersive potential of clay soils', *Civil and Project*, 7(10), e230565. doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.547713.1402>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2025 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 سیمان و نانوسیلیس در بهبود پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی

الناز بقالیان زاده^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: ۲۶ مرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۳۰ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۰۵ مهر ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ دی ۱۴۰۴

چکیده

این پژوهش، به بررسی قابلیت کنترل و کاهش واگرایی در خاک‌های رسی و آگرا با استفاده از ترکیب مواد افزودنی سیمان و نانوسیلیس می‌پردازد. ضرورت این مطالعه از آن جاست که واگرایی خاک‌های رسی می‌تواند پایداری پروژه‌های عمرانی را به شدت تهدید کند و یافتن ترکیبی بهینه برای بهسازی این نوع خاک‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای تحقق اهداف پژوهش، آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل آزمایش فشاری تک‌محوری، برش مستقیم، هیدرومتری مضاعف انجام گرفت. در این راستا، خاک رسی و آگری پایه با سه سطح سیمان (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به وزن خشک) و سه سطح نانوسیلیس (۰، ۰،۸ و ۱،۲ درصد) ترکیب شد و ۹ سناریوی بهسازی به همراه یک سناریوی شاهد (بدون افزودنی) طراحی گردید. نتایج نشان دادند که افزودن حتی ۰،۵٪ سیمان همراه با ۱،۲٪ نانوسیلیس نیز قادر به مهار رفتار و آگری خاک می‌باشد. با این حال، ترکیب بهینه شامل ۱،۰٪ سیمان و ۰،۸٪ نانوسیلیس (سناریوی S۲۲) است که حداکثر مقاومت فشاری و برشی، رفتار یکنواخت، و عدم واگرایی را ارائه می‌دهد. نتایج برش مستقیم حاکی از افزایش ۳ تا ۷ برابری مقاومت برشی نسبت به خاک پایه و همچنین پایداری رفتاری در برابر افزایش تنش قائم بود. همچنین، نانوسیلیس نقش کلیدی در کاهش پراکندگی نتایج و افزایش تکرارپذیری ایفا نمود. استفاده از ترکیب سیمان و نانوسیلیس می‌تواند راهکاری مؤثر، و قابل اتکا برای تثبیت خاک‌های رسی و آگرا باشد. ترکیب بهینه‌ی پیشنهادی نه تنها مقاومت مکانیکی را به شدت افزایش داده بلکه از نظر پایداری رفتاری و عدم واگرایی نیز عملکرد برتری نسبت به سایر ترکیب‌ها نشان داده است. نقش نانوسیلیس به‌ویژه در بهبود یکنواختی و کنترل پراکندگی رفتاری خاک از مزیت‌های بارز این روش محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: واگرایی، سیمان، نانوسیلیس، ترکیب بهینه.

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

در مهندسی ژئوتکنیک به خاک‌هایی که احداث سازه بر روی آنها ایمن نبوده و نیز تحت تأثیر شرایط آب و هوایی قرار دارند خاک‌های مسئله‌دار گفته می‌شود. خاک‌های مسئله‌دار در گونه‌های متفاوتی از جمله متورم شونده، جاذب آب، فرو ریزشی و سست می‌باشند (محمد، ۲۰۱۸). در مواجهه با خاک‌های مسئله‌دار، سه روش تغییر مکان ساخت و ساز، جایگزینی خاک نامطلوب محل با خاک و مصالح مناسب و بهسازی خاک موجود مورد بررسی قرار می‌گیرد که در برخی از موارد و با توجه به محدودیت‌های مالی و یا مکانی (مانند تغییر مکان پروژه یا کمبود زمین مناسب) بهترین گزینه "بهسازی" این نوع خاک‌ها است (خالقی و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار، خاک‌هایی واگرا هستند. خاک‌هایی که در معرض آب کم نمک به سهولت و به سرعت جدا و پراکنده شوند، به عنوان خاک واگرا معرفی می‌شوند. این خاک‌ها معمولاً همراه با کاتیون سدیم و دارای ضریب جذب سطحی بالا هستند. خاک‌های واگرا عموماً دارای پتانسیل بالای انقباض و تورم، نفوذپذیری کم و مقاومت اندک در برابر فرسایش هستند. وجود برخی ترکیبات شیمیایی و املاح در خاک‌های ریزدانه رسی می‌تواند موجب پدیده واگرایی و خسارات و خرابی‌های مختلف شود؛ زیرا ذرات خاک تحت شرایط خاص متفرق و به سرعت با جریان آب شسته می‌شوند. در بسیاری از پروژه‌های عمرانی وجود خاک رس به عنوان یک مشکل دیده می‌شود؛ چرا که جذب رطوبت بالا، تورم و تغییرات حجم، واگرایی، عدم زهکشی مناسب، مشکلات یخ‌زدگی در سرما و غیره شرایط طراحی و بهره‌برداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این راستا، مهندسی با استفاده از تکنیک‌های مختلف به دنبال بهبود خصوصیات رفتاری خاک بوده که در این میان تثبیت شیمیایی از روش‌های رایج، اقتصادی و مورد استقبال در اغلب پروژه‌ها می‌باشد. از جمله مواد شیمیایی مورد استفاده سیمان و آهک هستند که با واکنش شیمیایی مناسب باعث بهبود چشمگیری در کارایی، مشخصات فنی و مقاومت برشی خاک‌های رسی می‌شوند. افزودن این مواد به خاک منجر به کاهش خصوصیات خمیری، کاهش تورم و انقباض، تغییر بافت سطحی و افزایش مقاومت برشی و همچنین دوام خاک می‌گردد (باکایانگ و همکاران^۳). ترکیبات اصلی سیمان شامل کلسیم اکسید (CaO)، سیلیسیوم اکسید (SiO₂)، آهن اکسید (Fe₂O₃) و آلومینیوم اکسید (Al₂O₃) هستند و با وجود این ترکیبات در شرایط عمل‌آوری مناسب، پدیده سیمانی شدن و کسب مقاومت اتفاق می‌افتد (چيو^۴). واکنش‌های شیمیایی بین ترکیبات سیمان و آب که هیدراتاسیون نامیده می‌شود با تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) ویژگی‌های مورد نظر مخلوط را منجر می‌شود (مملوک و همکاران^۵).

سیلیس یکی از معروف‌ترین موادی است که نقش مهمی در چسبندگی و پرکردن بتن دارد. نانو سیلیس معمولاً حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر کوچکتر از کوچکترین ذرات خاک است. ذرات نانو به دلیل سطح ویژه بالای خود واکنش پذیرتر از ذرات خاک هستند که ناشی از کوچکی ذرات است و به دلیل این سطح ویژه و بارهای سطحی بسیار بالا، با استفاده از درصد کمی از این ذرات می‌توان به درصد بالایی از خواص بهبود یافته همچنین استفاده از نانوذرات باعث کاهش زیست تخریب پذیری می‌شود. این ماده به صورت ذرات پودر خشک یا معلق در محلول مایع موجود است. در این تحقیق از نانو سیلیس موجود در آزمایشگاه که به صورت پودر خشک است برای انجام آزمایشات استفاده خواهد شد. با توجه به مطالعات قبلی توصیه می‌شود برای استفاده از نانو سیلیس در ترکیب خاک یا بتن ابتدا این ماده را به مقدار آب مورد نیاز ترکیب حل کرده تا مایعی کاملاً یکنواخت به دست آید و سپس به آن اضافه شود. به ترکیب. به همین دلیل در این تحقیق برای دستیابی به محلول یکنواخت نانو سیلیس ابتدا هر درصد از این ماده با درصد رطوبت بهینه خاک مورد آزمایش برای مدت معینی در داخل دستگاه اولتراسونیک قرار داده شده و سپس آن در تهیه نمونه استفاده می‌شود (کوئرسیا^۶).

1 Mohammadi, 2018
2 Khaleghi et al, 2019
3 Bakaiyang et al, 2021
4 Chiu, 2016
5 Mamlouk et al, 2006
6 Quercia, 2010

در گذشته توصیه می شد از خاک و اگر استفاده نشود اما امروزه با توجه به گسترش روزافزون ساخت پروژه‌های خاکی (به ویژه سدهای خاکی) و مقابله با این نوع خاک در محل سدسازی یا سایت وام گرفتن، مقرون به صرفه نیست. جایگزینی منابع خاک ریزدانه و اگر با منابع غیر و اگر می‌تواند بر اهمیت و ضرورت اصلاح خاک‌های و اگر تاکید کند. تاکنون خاک‌های و اگر اغلب در آبرفت‌های رسی دشت‌های سیلابی و رسوبات دریاچه‌ای مشاهده شده است. در ایران نیز مطالعات انجام شده در دو دهه اخیر نشان دهنده وجود این نوع خاک در مناطق مختلف از جمله خوزستان، آذربایجان، خراسان و مناطق مرکزی بوده است. اصلاح خواص خاک و تثبیت آن اغلب با افزودن مواد افزودنی انجام می‌شود. در مورد خاک‌های و اگر بسته به نوع پروژه از روش‌های مختلفی استفاده شده است. آهک، سولفات آلومینیوم، گچ، سیمان، خاکستر بادی، پوزولان‌های طبیعی و... از جمله مواردی هستند که به عنوان افزودنی استفاده می‌شوند. در برخی موارد از مخلوط چند ماده استفاده شده است و کاربرد ترکیبی بیشتر در مورد خاکستر بادی است. با این حال، تأثیر ترکیب سیمان و نانو سیلیس بر تثبیت خاک و اگر هنوز بررسی نشده است.

با بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه روش‌های بهسازی خاک‌های رس، مشاهده شد که با وجود اینکه در ارتباط با تأثیر نانوسیلیس بر خواص خاک‌های رسی مسئله‌دار مطالعاتی در گذشته انجام شده اما اختصاصاً در ارتباط با تأثیر این ماده بر پتانسیل و اگرایی خاک رس تا کنون تحقیقی انجام نشده است و جنبه نوآوری این مقاله، استفاده از این ماده در ترکیب با سیمان در بهسازی خاک‌های رسی و اگر می‌باشد.

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در زمینه مطالعات انجام شده در زمینه بهسازی خاک‌های و اگر، مشاهده شد که در زمینه استفاده از ترکیب سیمان و نانوسیلیس جهت بهبود خواص خاک‌های رسی مسئله دار، تحقیقاتی انجام شده است اما در زمینه بهبود پتانسیل و اگرایی خاک‌های رسی، تحقیقی صورت نگرفته است. بر همین مبنا در این مقاله تغییر در پتانسیل و اگرایی به روش تثبیت شیمیایی با سیمان و جایگزینی بخشی از سیمان با نانوسیلیس (به عنوان یک افزودنی دوستدار محیط زیست) در تثبیت نوعی خاک رس مورد ارزیابی قرار گرفت. چرا که استفاده از سیمان مشکلات زیست محیطی متعددی دارد.

۲- مرور ادبیات

میدلتون برای اولین بار در سال ۱۹۳۰ پدیده و اگرایی را به عنوان یکی از عوامل موثر در فرسایش خاک‌های ریزدانه معرفی کرد و درصد بالای نمک‌های سدیم در خاک‌های و اگر را از مهمترین ویژگی‌های آنها دانست. به طور کلی، برای اولین بار در استرالیا، مشکل تخریب، فرسایش و ایجاد حفره‌های بزرگ در بسیاری از سدهای خاکی کوتاه، انجمن حفاظت از خاک استرالیا را بر آن داشت تا مطالعات گسترده‌ای در مورد روش حفاظت و پیشگیری از ادامه روند فرسایش ناشی از آن انجام دهد. (مختار و همکاران^۷).

پس از آن گزارش موارد مشابه در آمریکا، کانادا، برزیل، مکزیک و ... بررسی‌های جامع و آزمایشات دقیق و مطالعه کامل این پدیده نسبتاً جدید را به اثبات رساند. در ایران نیز مطالعات انجام شده در دو دهه اخیر نشان دهنده وجود این نوع خاک در مناطق مختلف از جمله خوزستان، آذربایجان، خراسان و مرکزی بوده است. ولک در سال‌های ۱۹۳۵ تا ۱۹۳۸ و اگرایی خاک‌ها را دلیل اصلی بسیاری از خرابی‌ها دانست که در سدهای خاکی کوچک و سدها و خاکریزهای طراحی شده در سازمان حفاظت از خاک آمریکا (SCS) مشاهده شد (حائری و همکاران^۸). خاکی کوتاه انجام شد، منجر به درک بهتر خاک‌هایی شد که به راحتی از بین می‌رفتند. در سال ۱۹۷۴، مهندسان هنگام پر کردن مخزن یک سد تازه ساخته شده در سنگال، واقع در جنوب آفریقا، متوجه خرابی لوله در سد شدند. تحقیقات زمین شناسی برای بررسی علت شکست توسط جونز و واگنر در سال ۱۹۷۵ آغاز شد و نتایج آن در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. وجود خاک‌های و اگر بود. مطالعات قبلی نیز این ادعا را تایید کرد که پدیده لوله کشی و

7 El Mohtar et al, 2015

8 Haeri et al, 2015

فرسایش خاک دلیل شکست بسیاری از سدهای کوچک در آفریقای جنوبی بوده است. شکست ناشی از لوله کشی و فرسایش در سد سنگال و بسیاری از سدهای مشابه دیگر نیاز به اتخاذ تدابیری برای شناسایی و بهبود خاک واگرا را آشکار کرد^۱.

در بررسی حسنلوراد و خبازی (۱۳۹۷) تاثیر نفت خام به عنوان یک اثر جنبی آلودگی (احتمالاً مثبت) بر میزان واگرایی خاک پرداخته شد. بدین منظور ابتدا خاک به صورت مصنوعی با اضافه نمودن محلول هگزامتاسفات سدیم واگرا گردیده و سپس تعدادی آزمایش پین هول بر روی نمونه‌های خاک واگرا شده با مقادیر مختلف نفت خام (۱، ۳، ۵ و ۷ درصد) انجام گردید. علاوه بر این، اثر آلاینده نفت خام بر روی مقاومت برشی خاک به کمک آزمایش تک محوری انجام شد. نتایج بدست آمده نشان داد که با حضور نفت و افزایش درصد آن و زمان تماس نفت و خاک، واگرایی خاک کاهش می‌یابد بدین صورت که با افزایش تدریجی نفت، خاک کاملاً واگرا به خاک غیر واگرا تبدیل شد. همچنین آزمایش‌های تک محوری نشان داد که ابتدا مقاومت نمونه‌ها تا مقدار نفت ۳٪ افزایش می‌یابد و مقادیر نفت بیشتر باعث کاهش مقاومت خاک شدند (حسنلوراد و خبازی، ۱۳۹۷).

در مطالعه‌ای که توسط زمردیان و مومن (۱۳۹۷)، از آزمایش فرسایش حفره (HET) استفاده و با افزودن نانوسیلیس به نمونه‌ی خاک واگرا، فرسایش‌پذیری خاک با در نظر گرفتن دو متغیر زمان عمل‌آوری در دوره‌های ۱، ۷ و ۱۴ روزه و درصد وزنی ۱، ۲ و ۳ درصد نانوسیلیس ارزیابی شده است. طبق نتایج، فرسایش‌پذیری خاک‌های واگرا با نانوسیلیس در درصدهای ۲ و ۳ نسبت به ۱٪، ۲ تا ۱۴ درصد افزایش یافته و با افزایش دوره‌ی زمانی، باعث عملکرد بهتر نانوسیلیس و افزایش ۴ تا ۷ درصدی شاخص نرخ فرسایش در خاک‌های واگرا شده است (زمردیان و مومن، ۱۳۹۷).

در تحقیق سامانی و همکاران (۱۴۰۰)، از افزودنی‌های آهک و سیمان برای تثبیت خاک رس به منظور کاهش نشست در پی‌های عریض و بهبود پارامترهای مقاومت استفاده شده است. ترکیب آهک و سیمان با خاک رس و تأثیر استفاده از این دو افزودنی بر تثبیت خاک رسی ریزدانه (CL) در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های خاک در حالت طبیعی خود و همچنین در حالت اختلاط با درصدهای مختلف آهک و سیمان معادل ۳٪، ۶٪ و ۸٪ وزن خشک خاک جهت آزمایشات آزمایشگاهی شامل تست حدی آتربرگ، تست دانه بندی، تست چگالی استاندارد، تست مقاومت فشاری و نسبت بار تست کالیفرنیا و همچنین تست‌های سه محوری زهکشی نشده (CU) و برش مستقیم استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده کاهش پلاستیسیته و حداکثر وزن واحد حجمی خاک و افزایش درصد رطوبت بهینه، مقاومت فشاری و همچنین نسبت باربری خاک رس کالیفرنیا با افزودن این دو ماده است. نرخ چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده (CU) و برش مستقیم با افزایش درصد سیمان و آهک افزایش می‌یابد. به منظور تأیید اعتبار تحقیق، آزمون بارگذاری صفحه نیز در محل انجام شده است. پس از انجام آزمایشات آزمایشگاهی، اثرات استفاده از خاک اصلاح شده در عمق‌های ۱، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر به کمک نرم افزار Plaxis2D مورد ارزیابی عددی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق بهسازی، میزان نشست کاهش یافته است که نسبت به نشست به دست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه در حالت عادی تفاوت زیادی دارد. اما تفاوت بین نتایج بدست آمده از نرم افزار و آزمون بارگذاری پس از بهبود ناچیز است (سامانی و همکاران، ۱۴۰۰).

در مطالعه‌ی آذینی و همکاران (۱۴۰۲)، تزریق‌پذیری روی خاک رسی کربناته‌ی خلیج فارس (بوشهر) با محلول نانوسیلیس با ساخت نمونه‌های یک متری بررسی شده است. نمونه‌های رس کربناته با ۵ ترکیب مختلف لای با درصدهای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) و ۳ غلظت محلول با درصدهای (۱۰، ۲۰ و ۳۰) تزریق شده‌اند، تا بتوان اثر عواملی، مانند: غلظت محلول، درصد ریزدانه و فشار تزریقی در میزان تزریق‌پذیری، نفوذ، و ارتباط آنها با یکدیگر را بررسی کرد. همچنین به منظور به دست آوردن غلظت بهینه‌ی تزریق، آزمایش‌های تک‌محوری با مقادیر مختلف درصد لای، ۳ درصد مختلف غلظت و در ۳ دوره‌ی عمل‌آوری انجام و مشاهده شد که تثبیت مؤثر و تمامی غلظت‌ها تزریق‌پذیر بوده است؛ به نحوی که غلظت ۳۰٪، بهینه‌ی غلظت تزریقی است، که بهترین نتیجه را در افزایش مقاومت داشته است. همچنین غلظت ۳۰٪ نسبت به غلظت ۱۰٪، به طور میانگین ۴۰٪ افزایش مقاومت را در پی داشته است (آذینی و همکاران، ۱۴۰۲).

در مطالعه جهرمی و همکاران (۱۴۰۲) تغییر در پتانسیل واگرایی به روش تثبیت شیمیایی با سیمان و جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت (به عنوان یک افزودنی دوستدار محیط زیست) در تثبیت نوعی خاک رس مورد ارزیابی قرار گرفته است چرا که استفاده از سیمان مشکلات زیست محیطی متعددی دارد. نتایج این بررسی نشان داد با جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت، حداکثر وزن مخصوص خشک افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد که روند متفاوتی در مقایسه با تثبیت سیمانی است. همچنین رفتار نمونه در آزمایش تک محوری تحت تاثیر درصد جایگزینی سیمان با زئولیت است. نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف نیز نشان داد ترکیب ۵٪ سیمان و جایگزینی ۳۰٪ زئولیت پتانسیل واگرایی خاک را کاهش می‌دهد. همچنین در آزمایش‌های تهنشینی مشاهده شد با افزایش نسبت جایگزینی زئولیت، میزان تهنشینی افزایش می‌یابد که با کاهش ضخامت لایه دوگانه رس قابل توجیه است و کاهش پتانسیل واگرایی را تایید می‌نماید. آنالیزهای ریزساختاری SEM نیز بیانگر تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته در مخلوط بوده که باعث بهبود مشخصات مکانیکی و مقاومتی و کاهش پتانسیل واگرایی خاک رس متورم‌شونده شده است.

نوحانی و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی با عنوان «بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانوسیلیس و نانو رس بر مشخصات مکانیکی بتن پلاستیک در محیط‌های متخلخل» منتشر کردند. هدف این مطالعه، بررسی نقش نانوذرات در بهبود خواص مکانیکی بتن پلاستیک و کاهش مصرف سیمان بود؛ موضوعی که در راستای توسعه پایدار و افزایش دوام سازه‌ها اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، نمونه‌های بتن پلاستیک با درصدهای مختلفی از نانوسیلیس (۰،۰۵٪، ۰،۱٪، ۰،۵٪ و ۱٪ وزنی سیمان) و همچنین نانو رس ساخته شده و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در سنین مختلف (۷، ۱۴ و ۲۸ روز) طبق استانداردهای ASTM قرار گرفتند. علاوه بر آن، برای تحلیل ریزساختار بتن از میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد تا تأثیر نانوذرات بر ساختار داخلی بتن به‌طور دقیق‌تری بررسی شود. نتایج نشان داد که افزودن نانوسیلیس به میزان ۰،۵٪ وزنی سیمان می‌تواند مقاومت فشاری بتن را بین ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش دهد. همچنین استفاده از نانو رس باعث بهبود ۱۰ تا ۱۲ درصدی در این مقاومت شد. مقاومت کششی نمونه‌ها نیز به‌طور متوسط بین ۸ تا ۱۰ درصد افزایش یافت. نکته قابل توجه این بود که نانوسیلیس تأثیر قابل توجه‌تری بر مقاومت فشاری داشت، در حالی که نانو رس با کاهش تخلخل، عملکرد بتن در شرایط محیطی مرطوب را بهبود بخشید. در پایان، نویسندگان به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوذرات می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد مکانیکی بتن پلاستیک باشد، اما به چالش‌هایی مانند هزینه بالای تولید نانوذرات و نبود روش‌های استاندارد اختلاط نیز باید توجه شود. آن‌ها همچنین پیشنهاد کردند که در تحقیقات آینده، ترکیب این نانوذرات با مصالح جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی و استفاده از فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی برای پیش‌بینی رفتار بتن مورد بررسی قرار گیرد (نوحانی و همکاران^۹).

تورکوز و همکارانش (۲۰۱۳) با اضافه کردن ترکیبی از زئولیت و سیمان به خاک رس متورم شونده دریافتند که با افزودن ۳٪ سیمان و زئولیت بین ۶ تا ۱۰٪ وزن خشک خاک، پتانسیل تورمی و همچنین واگرایی خاک کاهش چشم‌گیری یافته و مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد (تورکوز و همکاران^{۱۰}).

سهیلا شجاع مقدم و همکاران^{۱۱} که بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف و ترکیب آن‌ها بر خصوصیات تحکیم خاک‌های رسی بود. در این مقاله مطالعه‌ای جامع درباره تأثیر افزودن تثبیت‌کننده‌های مختلف مانند خاکستر بادی (FA^{۱۲})، خاکستر آتشفشانی (VA^{۱۳})، پودر مرمر (MP^{۱۴})، سیمان و آهک با درصدهای مختلف (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) و ترکیبات آن‌ها بر رفتار کنسولیداسیون خاک رسی انجام شد. برخلاف مواد صنعتی مانند سیمان و آهک، FA، VA و MP فعالیت و واکنش‌پذیری کافی ندارند. در حالی که VA و FA عمدتاً سرشار از سیلیس هستند، MP غنی از اکسید کلسیم است. بنابراین، این مواد پایدار نیازمند فرآیندهای

9 Nohani et al., 2024

10 Turkoz et al., 2013

11 Soheila Shoja Moghadam et al.

12 Fly Ash

13 Volcanic Ash

14 Marble Powder

تکمیلی مانند ژئوپلیمرسازی یا ترکیب با سیمان و آهک برای ایجاد پیوندهای قوی هستند. سیمان و آهک موثرترین تثبیت‌کننده‌ها بودند، اما نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با آن‌ها ما را به جستجوی جایگزین‌ها سوق داده است. آزمون‌های استاندارد کمپاکت پروکتور برای مطالعه رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر نمونه‌های مختلف انجام شد، آزمون‌های SEM و EDS برای تحلیل میکروساختار خاک و افزودنی‌ها به کار رفت و آزمایش‌های کنسولیداسیون یک‌بعدی روی نمونه‌های تثبیت‌شده با زمان‌های عمل‌آوری ۷ تا ۹۰ روز برای تعیین ضرایب کنسولیداسیون انجام شد.

پویان پورنوری و همکاران^{۱۵} برای کمک به ساخت سازه‌های پایدار، دانشمندان از مواد زائد موجود در محیط زیست به‌عنوان جایگزینی برای منابع سنتی در صنعت ساخت‌وساز استفاده کرده‌اند. آن‌ها تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام داده‌اند. در این مطالعه خاص، از شیشه سکوریت شده به‌عنوان سنگ‌دانه درشت حاصل از شیشه ضایعاتی (WGCA^{۱۶}) به جای سنگ‌دانه درشت طبیعی (NCA^{۱۷}) در نسبت‌های مختلف ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ در ترکیب بتن خودتراکم سازگار با محیط زیست (SCC^{۱۸}) استفاده شد، که همچنین با الیاف فولادی قلاب‌دار (SF^{۱۹}) در حجم‌های متفاوت ترکیب شد. در این تحقیق، قابلیت روانی بتن، نفوذپذیری، مقاومت فشاری و پارامترهای شکست در سنین ۲۸ و ۵۶ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. در مجموع، ۲۴۰ نمونه دیسک شکاف‌دار با لبه (ENDB^{۲۰}) برای بررسی مقاومت شکست و ۶۰ نمونه مکعبی (۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر) برای آزمون مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش مقدار SF و WGCA باعث کاهش قطر جریان اسلامپ و نسبت انسداد شد، به‌ویژه در سطوح بالاتر. ویژگی‌های سخت‌شده‌ی تمام نمونه‌های حاوی SF و WGCA، نسبت به نمونه مرجع بهبود یافته بود. در میان تمامی نمونه‌ها، دو ترکیب WG15SF0.5 و WG30SF0.5 بهترین عملکرد را نشان دادند و به‌طور میانگین افزایش ۲۰٫۲۹٪ و ۲۷٫۶۳٪ در مقاومت فشاری و سختی شکست را در دوره‌های مختلف عمل‌آوری از خود نشان دادند. الیاف فولادی (SF) بیشترین تأثیر را در رفتار پس از ترک‌خوردگی داشت و با ایجاد مکانیسم پل‌زنی بین ترک‌ها، ظرفیت باربری بتن را افزایش داد. با مقایسه تأثیر SF و WGCA بر سختی شکست در حالت خالص Mode III، مشاهده شد که افزودن SF به نمونه‌هایی با ۳۰٪ جایگزینی WGCA، به‌طور متوسط باعث افزایش حدود ۱۵٫۴۸٪ در روز ۲۸ و ۱۱٫۱٪ در روز ۵۶ نسبت به نمونه کنترل شد.

آرش رجایی و همکاران^{۲۱} در بررسی استفاده نوآورانه از تراشه چوب به عنوان یک ماده جایگزین پایدار در بتن می‌پردازد که هم به چالش‌های زیست‌محیطی و هم ساختاری پاسخ می‌دهد. مطالعه اثرات وارد کردن تراشه چوب در نسبت‌های مختلف (۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪) به مخلوط‌های بتن را بررسی می‌کند، با هدف کاهش انتشار کربن و ترویج ساخت و ساز سبک وزن. با توجه به تأثیر منفی پودر شیشه بازیافتی (WGP^{۲۲}) بر مقاومت بتن، این تحقیق دود سیلیس (SF^{۲۳})، متاکائولین (MK^{۲۴}) و پودر مرمر (MP^{۲۵}) را به عنوان افزودنی‌های بالقوه برای افزایش مقاومت فشاری و کاهش وزن مخصوص بتن تراشه چوب معرفی می‌کند. افزودن تراشه چوب به طور مداوم چگالی بتن را کاهش داد، به طوری که از ۲۳۹۹ کیلوگرم بر متر مکعب در نمونه کنترل به ۲۰۹۱ کیلوگرم بر متر مکعب در ۳۵٪ تراشه چوب رسید SF. باعث کاهش بیشتر چگالی شد، در حالی که MK و MP باعث

15 Pooyan Pournoori et al.

16 Waste Glass Coarse Aggregate

17 Natural Coarse Aggregate

18 Self-Compacting Concrete

19 Steel Fiber

20 Edge-Notched Disc Bending

21 Arash Rajaei et al.

22 Waste Glass Powder

23 Silica Fume

24 Metakaolin

25 Marble Powder

افزایش چگالی شدند. این مطالعه نتیجه می‌گیرد که استفاده از $10\% SF$ یا $5\% MK$ برای بهبود خواص بتن با تراشه چوب بهینه است و تعادلی بین افزایش مقاومت و کاهش وزن ارائه می‌دهد.

با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تحقیق حاضر، مشاهده شد که با وجود انجام مطالعات گسترده در زمینه بهسازی خاک‌های رسی به روش‌ها و با مواد افزودنی مختلف، در هیچ‌کدام از تحقیقات گذشته به بررسی اثر استفاده از سیمان و نانوسیلیس بر پتانسیل واگرایی خاک رسی پرداخته نشده است، لذا انجام این تحقیق در راستای بررسی تاثیر این مواد بر خواص خاک‌های رسی واگرا می‌باشد.

۳- روش انجام تحقیق

خاک واگرا

خاک به‌عنوان لایه‌ی سطحی و سست پوسته‌ی زمین، از ترکیب مواد معدنی، آلی، و ذرات متلاشی‌شده‌ی سنگ‌ها تشکیل می‌شود. فرآیند تشکیل خاک از سنگ‌ها به زمان طولانی—گاه بیش از ۵۰۰ سال—نیاز دارد و عوامل محیطی چون آب، باد و واکنش‌های شیمیایی در این فرسایش نقش دارند. در میان انواع خاک، رس دارای کوچک‌ترین اندازه‌ی ذرات، نفوذپذیری پایین، ظرفیت بالای نگه‌داری آب، و رفتار چسبنده در حالت خیس است. این ویژگی‌ها سبب می‌شود تا رس یکی از مهم‌ترین و در عین حال چالش‌برانگیزترین انواع خاک در پروژه‌های ژئوتکنیکی باشد.

در این میان، خاک‌های رسی واگرا به دلیل رفتار خاص خود، خطرات جدی برای پایداری سازه‌ها به‌ویژه سدهای خاکی، خاکریزها و کانال‌ها ایجاد می‌کنند. ذرات این نوع خاک‌ها در حضور آب با غلظت پایین املاح، بدون نیاز به جریان قوی، به‌سادگی متفرق می‌شوند. واگرایی ناشی از غالب بودن یون سدیم تک‌ظرفیتی در ساختار خاک است که باعث افزایش ضخامت لایه دوگانه و کاهش نیروی چسبندگی بین ذرات می‌شود. در نتیجه، آب حتی با سرعت کم نیز قادر است ذرات را جدا و حمل کند.

خاک‌های واگرا اغلب دارای جذب سدیم بالا، نفوذپذیری پایین و مقاومت اندک در برابر فرسایش هستند. بررسی‌های کانی‌شناسی با استفاده از پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد که مونتموریلونیت (از خانواده اسمکتیت) از اجزای اصلی این نوع خاک است، اگرچه وجود این کانی به‌تنهایی نشان‌دهنده واگرایی نیست.

در طبقه‌بندی سیستم متحد (USCS)، خاک‌های واگرا معمولاً در گروه‌های CL و گاه CH، SC و SM قرار می‌گیرند. برخی خاک‌های سیلتی (ML) نیز به‌ویژه در صورت دارا بودن ذرات رس واگرا، مستعد فرسایش‌اند. این دسته بهتر است تحت عنوان "سیلت با ذرات رس واگرا" شناخته شوند تا از رس‌های کاملاً واگرا تمییز داده شوند.

عدم شناسایی به‌موقع خاک‌های واگرا در مراحل مطالعات ژئوتکنیکی می‌تواند منجر به پدیده‌هایی نظیر رگاب و فرسایش در بدنه سد یا هسته‌ی نفوذناپذیر آن شده و شکست سازه‌ی را به‌دنبال داشته باشد. از این رو، تشخیص، ارزیابی و بهسازی این نوع خاک‌ها برای تضمین ایمنی پروژه‌های عمرانی ضروری است.



تصویر ۱-۲. سطح خاک واگرا

مناطق مستعد وجود خاک‌های واگرا

واگرایی در خاک‌های تشکیل شده در آب و هوای خشک یا نیمه خشک و در مناطق با قلیایی بالا شناسایی شد. اخیراً مشکلات مرتبط با واگرایی در آب و هوای مرطوب در مکان‌های جغرافیایی مختلف مانند استرالیا، تاسمانی، مکزیک، ویتنام، آفریقای جنوبی، تایلند، اسرائیل، غنا، برزیل، ونزوئلا و بسیاری از بخش‌های جنوب ایالات متحده مشاهده شده است. طبق گفته الگز^{۲۶}، خاک‌های واگرا در مناطق زیر یافت می‌شوند:

مناطق کم ارتفاع که در آن آب تراوش دارای SAR (نسبت جذب سدیم) بالا است. مناطقی که در آن، رسوبات اصلی حاوی ایلیتیک بالا یا سایر مواد معدنی ۲:۱ با ESP بالا (مقادیر درصد سدیم قابل تعویض) هستند.

مناطقی که در آن شستشوی زیاد وجود دارد تا نمک‌های اضافی موجود در خاک‌های با SAR بالا شسته شود.

معمولاً، کانی‌های رسی ۲:۱ عمدتاً مونت موریلونیت، عنصر اصلی در رس‌های واگراست (بل و همکاران^{۲۷}). مطالعات اخیر بل و همکاران^{۲۸} نیز نشان داده است که برخی از ایلیت‌ها نیز بسیار واگرا هستند.

مکانیسم واگرایی

درک مکانیسم واگرایی در خاک‌ها برای غلبه بر مشکلات خاک‌های واگرا ضروری است. از این رو بسیاری از مطالعات به منظور درک مکانیسم واگرایی خاک‌ها در سراسر جهان انجام شده است. توده خاک واگرا به دانه‌های جداگانه خاک تقسیم می‌شود و حتی در آب آرام به حالت معلق درمی‌آیند. آنها به راحتی و به سرعت در آب‌های جاری با غلظت کم نمک جابجا می‌شوند و از این رو لازم است آنها را شناسایی کرده و میزان واگرایی ایجاد شده را از قبل تعیین نمود تا بتوان از تخریب ناشی از آن جلوگیری کرد.

اساساً دو نوع خاک مستعد واگرایی وجود دارد، خاک‌های سیلتی و خاک‌های رسی. در خاک‌های سیلتی چون چسبندگی کمتر است، تنش برشی ناشی از جریان سیال بیشتر از مقاومت ارائه شده توسط وزن غوطه ور شده رسوب است. بنابراین خاک را واگرا می‌کند. آب هنگام تماس با خاک وارد منافذ می‌شود و بر دانه‌های خاک فشار وارد می‌کند. از آنجایی که حداقل نیروی انسجامی بین ذرات خاک در خاک‌های سیلتی وجود دارد، فشار اعمال شده توسط مولکول‌های آب به راحتی بر نیروی جاذبه

26 Elges, 1985

27 Bell et al., 1994

28 Bell et al., 2000

غالب می‌شود که در نهایت منجر به واگرایی می‌شود. از دست دادن انسجام بر اثر اشباع شدن به عنوان دلیل اصلی واگرایی در خاک‌های سیلتی شناخته شده است (اومش و همکاران^{۲۹}).

از طرف دیگر دلیل واگرایی در خاک رس عمدتاً به وجود سدیم قابل تعویض در خاک نسبت داده می‌شود. هنگامی که خاک‌هایی با محتوای سدیم بالا یا درصد سدیم قابل تعویض بالا در تماس با آب قرار می‌گیرند، بخش‌های رسی به عنوان پلاکت‌های رسی منفرد عمل می‌کنند. یعنی جاذبه بین ذرات خاک رس به حداقل می‌رسد و در نتیجه با دیگر ذرات خاک پیوند نزدیکی برقرار نمی‌کند. هنگامیکه یک خاک حاوی سدیم با آب با غلظت کم نمک تعامل می‌کند، مولکول‌های آب بین پلاکت‌های رسی قرار می‌گیرند که باعث می‌شود خاک رس به حدی متورم شود که ذرات منفرد از سنگ دانه‌ها جدا شوند. مولکول‌های آب در بین پلاکت‌های رسی وار می‌شوند که باعث هیدراته شدن این یون‌ها می‌شود و ذرات رس را مجبور می‌کند از یکدیگر دور شوند. نیروی جاذبه به حداقل کاهش می‌یابد و باعث می‌شود خاک رس به حدی متورم شود که پلاکت‌های رسی منفرد از سنگدانه جدا شوند.

در خاک، به جای سدیم، اگر یون‌های جذب شده دارای طبیعت دو ظرفیتی مانند کلسیم یا منیزیم باشند، واگرایی حاصل در خاک رس به حداقل می‌رسد. این به این دلیل است که در خاک‌های غیر سدیمی، دافعه ناشی از هیدراتاسیون یونها (مثلاً کلسیم) به اندازه‌ای نیست که به طور کامل بر نیروی جاذبه تسلط یابد.

بنابراین، خاک رس ممکن است به دلیل نفوذ آب متورم شود، اما لزوماً موجب واگرایی نمی‌شود.

با در نظر گرفتن مکانیسم‌های واگرایی، به نظر می‌رسد که تنها تفاوت عمده در واگرایی در خاک‌های رسی، دافعه بین ذرات رسی به دلیل وجود سدیم است و در خاک‌های سیلتی به دلیل از دست دادن انسجام به دلیل شکستن اشباع اتصال ذرات سیلتی است.

اندازه‌گیری واگرایی

اگرچه تعدادی آزمایش‌ها برای شناسایی خاک‌های واگرا استفاده شده‌اند، اما نمی‌توان به هیچ آزمایش واحدی برای تعیین کمیت میزان واگرایی تحت همه شرایط اعتماد کرد. با این وجود آزمایش پین هول بهترین عملکرد را بین تمامی آزمایش‌ها دارد. مروری بر رویه‌های تحلیلی برای شناسایی رفتار واگرایی در خاک توسط بل و ماد (۱۹۹۴) و همچنین بل و واکر (۲۰۰۰) ارائه شده است. آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی وجود دارد که در تعیین میزان واگرایی خاک مفید است. تست‌های فیزیکی شامل آزمایش‌هایی مانند آزمایش کرامپ امرسون، آزمایش پین هول و آزمایش هیدرومتری دوگانه است. برای تخمین میزان واگرایی احتمالی در خاک از تعیین ویژگی‌های شیمیایی مانند ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد سدیم قابل تعویض و نسبت جذب سدیم استفاده می‌شود. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که آزمایش‌های آزمایشگاهی مانند مقاومت فشاری محدود شده و حد انقباض نیز می‌توانند برای تعیین کمیت واگرایی استفاده شوند. آزمایش‌های مختلف میزان واگرایی را از طریق اندازه‌گیری جنبه‌های مختلف واگرایی تخمین می‌زنند.

برنامه آزمایشگاهی

ابتدا بر روی خاک پایه آزمایش (بدون افزودنی) تمامی آزمایشات از قبیل حد روانی، حد خمیری، دانه‌بندی، تراکم استاندارد، تک محوری، برش مستقیم و هیدرومتری دوگانه انجام می‌پذیرد. در ادامه با افزودن ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ سیمان تیپ دو خوزستان

سه مخلوط سیمانی اولیه ساخته می‌شود(به جهت کنترل رطوبت تمامی اختلاطها به صورت خشک انجام شده است) و به هر مخلوط سیمانی به ترتیب ۰.۴٪، ۰.۸٪ و ۱.۲٪ نانوسیلیس افزوده و ترکیب نهایی آماده گردید.

برای تمامی مخلوط‌های نهایی دو نمونه استوانه‌ای ساخته و به مدت ۲۸ روز و به صورت و کیوم شده زیر آب عمل‌آوری صورت پذیرفته است. پس گذشت ۲۸ روز بر روی تک تک نمونه‌ها آزمایش تک محوری انجام و نتایج آن ترسیم و استخراج شد. با مقایسه نتایج درصد بهینه سیمان و نانوسیلیس مشخص و سایر آزمایشات نیز جهت مقایسه حالت خاک پایه با مخلوط بهسازی شده نهایی انجام پذیرفت.

مصالح مصرفی

خاک پایه

خاک پایه از محدوده مرکز استان اهواز(کوی رمضان) به صورت دست‌خورده برداشت گردید و بر روی آن تمامی آزمایشات مطابق استاندارد مربوطه انجام شد.

نانوسیلیس مصرفی

نانوسیلیس، اکسید سیلیسیوم یا نانوسیلیکا ماده معدنی که از ۵۳٪ اکسیژن و ۴۷٪ سیلیسیوم تشکیل شده است. این ماده برای بافت‌های بدن غیر سمی است و ماده همانند میکروسیلیس بر پایه ترکیبات پوزولانی تشکیل شده است. نوع استفاده شده در این بررسی داری مشخصات زیر است.

جدول ۱. مشخصات نانوسیلیس مصرفی

CAS No	۷۶۳۱-۸۶-۹
فرمول شیمیایی	SiO ₂
ساختار	Amorphous/آمورف
رنگ	سفید
نوع	آبدوست/Hydrophilic
چگالی	۲,۴ gr/cm ³
جرم مولکولی	۶۰,۰۸ gr/mol
اندازه ذرات	۲۰-۳۰ نانومتر
درصد خلوص	بالای ۹۹٪
سطح ویژه	۱۸۰-۶۰۰ m ² /gr
نقطه ذوب	۱۶۱۰ درجه سانتیگراد
نقطه جوش	۲۲۳۰ درجه سانتیگراد

سیمان مصرفی

سیمان مصرفی از نوع ۲ پرتلندی کارخانه خوزستان می‌باشد و در مواقعی که در مقابل تاثیر سولفات‌ها احتیاط لازم باشد از این نوع سیمان استفاده می‌شود. این نوع سیمان در زمان گیرش حرارت کمتری تولید می‌کند و در برابر تهاجم مواد شیمیایی بخصوص در آب دریا بیشتر از سیمان معمولی می‌باشد.

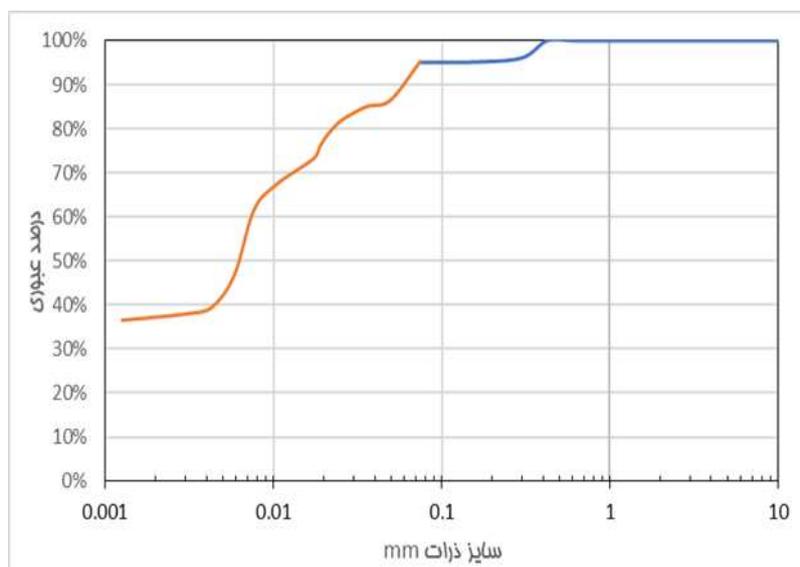
ابتدا بر روی خاک پایه آزمایش (بدون افزودنی) تمامی آزمایشات از قبیل حد روانی، حد خمیری، دانه‌بندی، تراکم استاندارد، تک محوری، برش مستقیم و هیدرومتری دوگانه انجام می‌پذیرد. در ادامه با افزودن ۰.۵٪، ۱.۰٪ و ۱.۵٪ سیمان تیپ دو خوزستان سه مخلوط سیمانی اولیه ساخته می‌شود (به جهت کنترل رطوبت تمامی اختلاط‌ها به صورت خشک انجام شده است) و به هر مخلوط سیمانی به ترتیب ۰.۴٪، ۰.۸٪ و ۱.۲٪ نانوسیلیس افزوده و ترکیب نهایی آماده گردید.

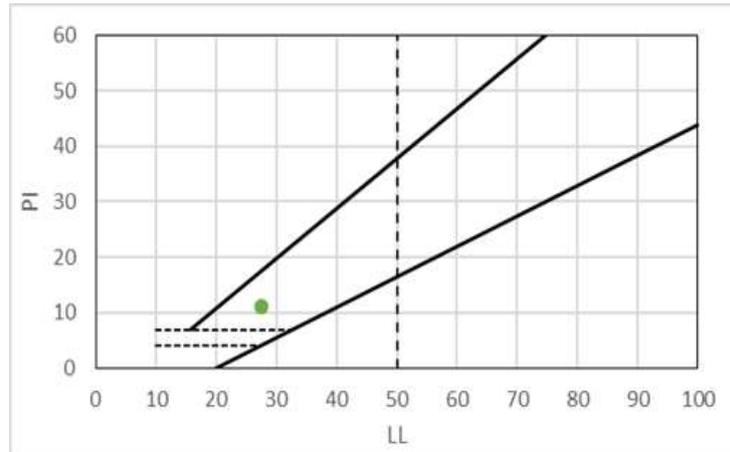
برای تمامی مخلوط‌های نهایی دو نمونه استوانه‌ای ساخته و به مدت ۲۸ روز و به صورت وکیوم شده زیر آب عمل‌آوری صورت پذیرفته است. پس گذشت ۲۸ روز بر روی تک تک نمونه‌ها آزمایش تک محوری انجام و نتایج آن ترسیم و استخراج شد. با مقایسه نتایج درصد بهینه سیمان و نانوسیلیس مشخص و سایر آزمایشات نیز جهت مقایسه حالت خاک پایه با مخلوط بهسازی شده نهایی انجام پذیرفت.

دانه‌بندی و حدود اتربرگ خاک پایه

جدول ۱-۳. خلاصه نتایج دانه‌بندی خاک پایه

D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	LL	PI	درصد واگرایی	طبقه‌بندی متحد
۰.۰۲	۰.۰۲۵	۲۷	۱۱	۵۰	CL





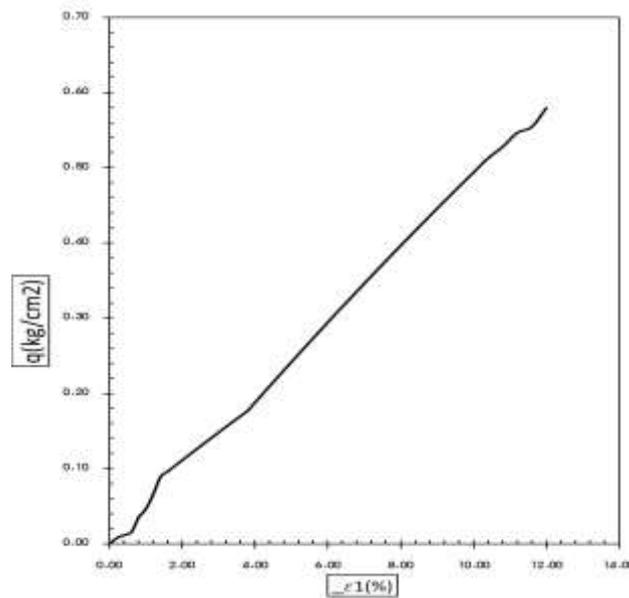
نمودار ۱-۳. دانه بندی خاک پایه

نحوه آماده سازی نمونه ها

تک محوری

جدول ۳-۴. خلاصه نتایج آزمایش تک محوری نمونه خاک پایه

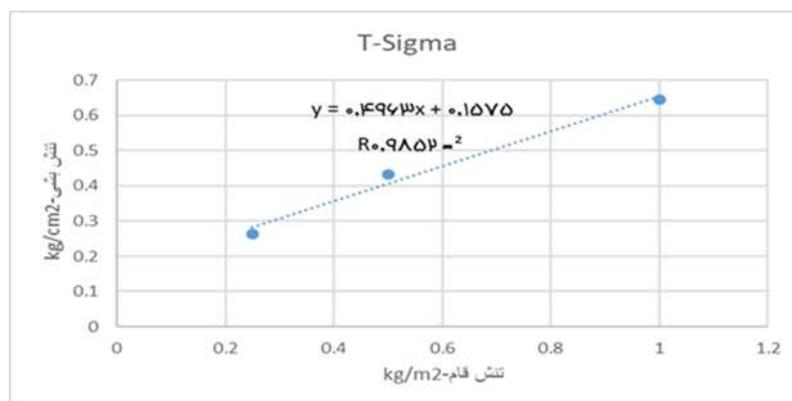
قطر (cm)	ارتفاع (cm)	نرخ بارگذاری (mm/min)	شرایط رطوبتی	درصد رطوبت (%)	دانشسته خشک (g/cm ³)	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm ²)	S _u (kg/cm ²)
5.7	12.5	1	مرطوب	16.7	1.41	0.58	0.29



نمودار ۳-۴. نتایج تک محوری خاک پایه

جدول ۴-۴. ریز نتایج آزمایش برش مستقیم خاک پایه

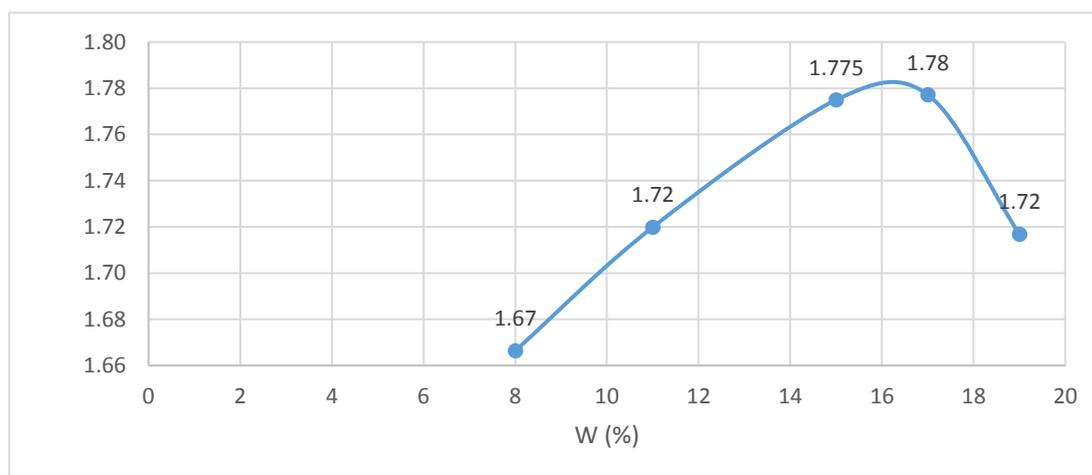
دانسیتة خشک (gr/cm ³)	درصد رطوبت	ϕ (°)	C (kg/cm ²)	جعبه برش
۱,۴۵	۱۷	۲۶,۵	۰,۱۵	مربعی ۱۰ در ۱۰



نمودار ۴-۴. نتایج برش مستقیم خاک پایه

تراکم آزمایشگاهی

پس از انجام پنج آزمایش تراکم استاندارد درصد رطوبت بهینه ۱۶,۲ و حداکثر وزن مخصوص بهینه ۱,۷۸ گرم بر سانتیمتر مکعب گزارش می‌گردد.



جدول ۲-۳. سناریوهای ترکیب اختلاط مورد استفاده

خاک پایه										
درصد سیمان (نسبت به خاک خشک)	۵			۱۰			۱۵			سناریو
	۰	۰٫۸	۱٫۲	۰٫۴	۰٫۸	۱٫۲	۰٫۴	۰٫۸	۱٫۲	
درصد نانوسیلیس (نسبت به خاک خشک)	۰٫۴	۰٫۸	۱٫۲	۰٫۴	۰٫۸	۱٫۲	۰٫۴	۰٫۸	۱٫۲	۰
سناریو	S11	S12	S13	S21	S22	S23	S31	S32	S33	S00

جدول ۸-۴ الف. تفسیر و انتخاب ترکیب بهینه جهت آزمایشات

سناریو	درصد سیمان	درصد نانوسیلیس	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	تحلیل عملکرد
S00	0%	0%	0.58	خاک خام، فاقد هرگونه تقویت؛ عملکرد بسیار ضعیف
S11	5%	0.40%	2.71	بهبود اولیه مقاومت با سیمان کم و نانوسیلیس محدود
S12	5%	0.80%	2.96	بهبود تدریجی؛ هنوز فاصله زیاد با سطوح بالاتر دارد
S13	5%	1.20%	2.88	نوسان جزئی نسبت به S12؛ نشان دهنده اشباع نسبی تأثیر نانو
S21	10%	0.40%	5.97	جهش محسوس نسبت به سری ۰٫۵٪؛ نقش کلیدی سیمان
S22	10%	0.80%	6.38	ترکیب بهینه: تعادل مؤثر بین سیمان و نانوسیلیس، مقاومت بالا با صرف مصالح کمتر نسبت به سری ۱۵٪
S23	10%	1.20%	6.26	افت جزئی نسبت به S22؛ احتمال کاهش کارایی نانوسیلیس در این سطح
S31	15%	0.40%	5.5	افزایش سیمان بدون رشد مناسب مقاومت؛ کارایی کمتر
S32	15%	0.80%	7.65	مقاومت بالا، اما با هزینه بیشتر مصالح؛ بهینه اقتصادی نیست
S33	15%	1.20%	8.01	بالاترین مقاومت، اما نیاز به مصرف بالای سیمان و نانوسیلیس؛ صرفه جویی کمتر

تجزیه و تحلیل داده ها

تک محوری

پس از ۲۸ روز عمل آوری نمونه‌های وکیوم شده در زیر آب، آزمایش تک محوری روی تمامی نمونه‌ها صورت پذیرفت و با میانگین‌گیری از نتایج بدست آمده (هر حالت یک جفت نمونه) روند کلی استفاده مناسب از مصالح مشخص شد.

به صورت کلی به نظر می‌رسد کنترل کننده نتایج عمدتاً سیمان مخلوط است تا نانوسیلیس این مورد، در درصد سیمان‌های پائین مشهودتر به نظر می‌رسد (توجه به حالت ۱). به نظر می‌رسد با اضافه شدن سیمان در مخلوط اهمیت درصد نانوسیلیس نیز افزایش می‌یابد، هرچند ممکن است این تفاوت صرفاً مربوط به نحوی اختلاط، قالب‌گیری و یا عمل آوری نمونه باشد.

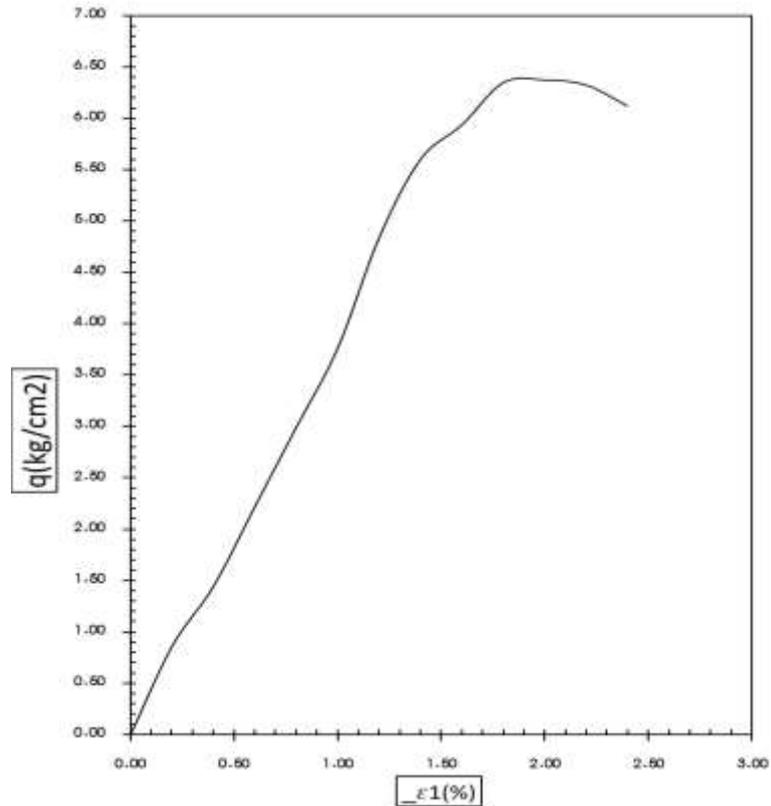
این مورد که با افزایش سیمان مخلوط، مقاومت آن افزایش می‌یابد در نتایج به وضوح مشخص است، در اغلب موارد عملی رسیدن به مقاومت ۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برای خاک بسیار مناسب است و با فرض ضریب اطمینان ۳ با حاشیه اطمینان خوبی تمامی موارد پاسخگو شرایط خواهند بود. در این بین چنانچه نیاز پروژه خاص باشد حالت ۳

می‌تواند مناسب باشد اما در اغلب موارد نیازی به چنین حد از محافظه کاری نمی‌باشد و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها (در اجرا و...) به نظر همان "حالت ۲" مناسبترین و بهینه‌ترین حالت است، در هر حالت برای تعیین بهینه‌ترین حالت باید شرایط صورت مسئله سنجیده شود.

جدول ۴-۵. خلاصه نتایج آزمایش تک محوری خاک بهسازی شده

.	۱۵			۱۰			۵			درصد سیمان (نسبت به خاک خشک)
	۱,۲	۰,۸	۰,۴	۱,۲	۰,۸	۰,۴	۱,۲	۰,۸	۰,۴	درصد نانوسیلیس (نسبت به خاک خشک)
.	۸,۰۱	۷,۶۵	۵,۵۰	۶,۲۶	۶,۳۸	۵,۹۷	۲,۸۸	۲,۹۶	۲,۷۱	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm^2)
<i>S00</i>	<i>S33</i>	<i>S32</i>	<i>S31</i>	<i>S23</i>	<i>S22</i>	<i>S21</i>	<i>S13</i>	<i>S12</i>	<i>S11</i>	نام سناریو
.	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	شاخه
.	۳			۲			۱			حالت

در تمامی نمونه‌های آزمایش شده با ۱,۲٪ نانوسیلیس (شاخه ۳ در هر سه حالت) اختلاف مقاومتی ۲ نمونه شکسته شده بسیار کمتر از شاخه استفاده از ۰,۴٪ نانوسیلیس بوده است و در کل به نظر می‌رسد استفاده از نانوسیلیس اثرات مثبتی بر یکنواختی نتایج داشته باشد، بنابراین استفاده از ترکیب حداقل ۰,۸٪ نانوسیلیس و ۱۰٪ سیمان در مخلوط مناسب به نظر می‌رسد. در ادامه ریز نتایج آزمایش بهینه (حالت ۲ شاخه ۲) آمده است.

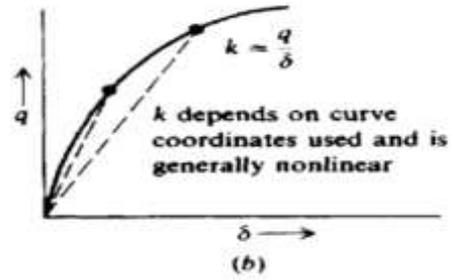


نمودار ۴-۶. نتایج تک محوری خاک با ترکیب بهینه (۱۰٪ سیمان و ۰٫۸٪ نانوسیلیس)

جدول ۴-۶. ریز نتایج آزمایش تک محوری خاک با ترکیب بهینه

قطر (cm)	ارتفاع (cm)	نرخ بارگذاری (mm/min)	شرایط	درصد رطوبت	دانسیته خشک (kg/cm ³)	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm ²)	Su (kg/cm ²)
۵٫۸	۱۲٫۶	۱	مرطوب	۱۹	۱٫۴۱	۶٫۳۸	۳٫۱۹

بنابراین در حالت بهینه مقاومت فشاری تک محوری از ۰٫۵۸ در حالت عادی خاک به ۶٫۱۶ (kg/cm²) افزایش می‌یابد، نکته دیگر کرنش حد شکستگی است که از ۱۲٪ حالت عادی به حدوداً ۲٪ کاهش داشته است. از تجمیع این دو نکته افزایش قابل توجه مدول خاک (توجه به دو شکل ۴-۳ و ۴-۶) استنتاج می‌شود که در کنترل مسئله مهم نشست نیز بسیار اهمیت دارد. برای کنترل ساده از این مسئله پارامتر ks می‌تواند کمک کننده باشد، طبق تعریف این پارامتر برابر تنش به تغییر شکل قرار داده می‌شود.



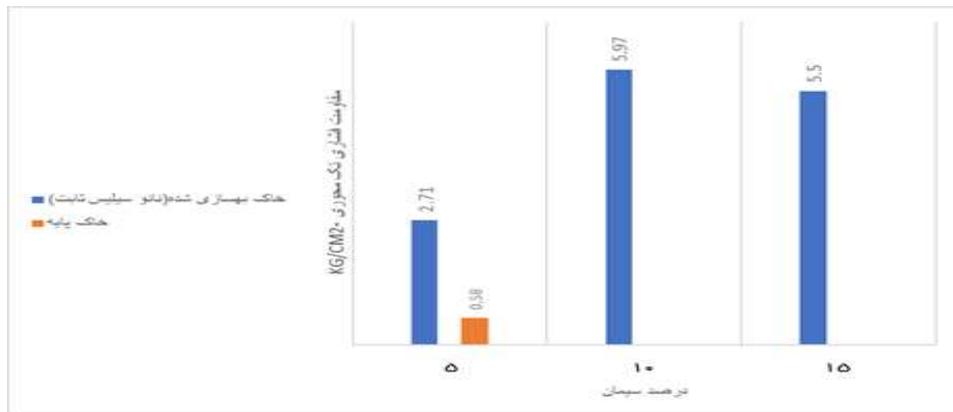
تصویر ۳-۴. تعریف k_s

بنابراین از مقایسه نتایج خاک پایه و خاک بهسازی شده (حالت بهینه) می‌توان گفت :

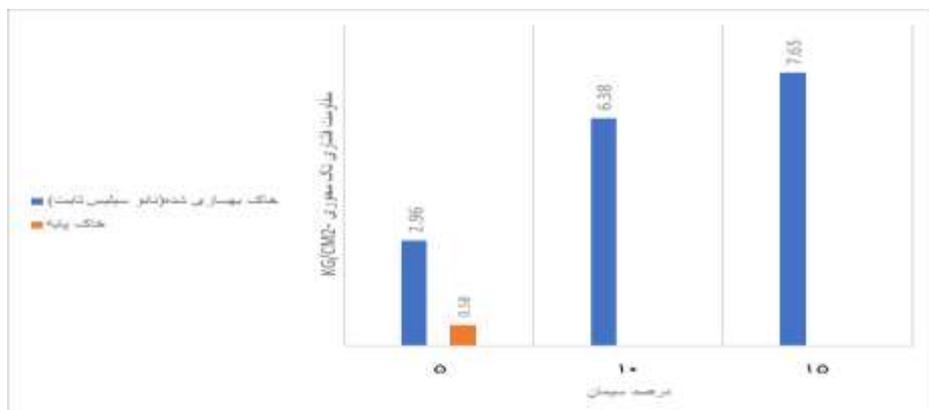
$$k_{s-\text{خاک پایه}} = \frac{q}{\delta} = \frac{0.58 \text{ kg/cm}^2}{0.12 \times 12.5 \text{ cm}} = 0.38 \text{ kg/cm}^2/\text{cm} \text{ (or kg/cm}^3\text{)}$$

$$k_{s-\text{خاک بهسازی}} = \frac{q}{\delta} = \frac{6.38 \text{ kg/cm}^2}{0.02 \times 12.6 \text{ cm}} = 25.3 \text{ kg/cm}^2/\text{cm} \text{ (or kg/cm}^3\text{)}$$

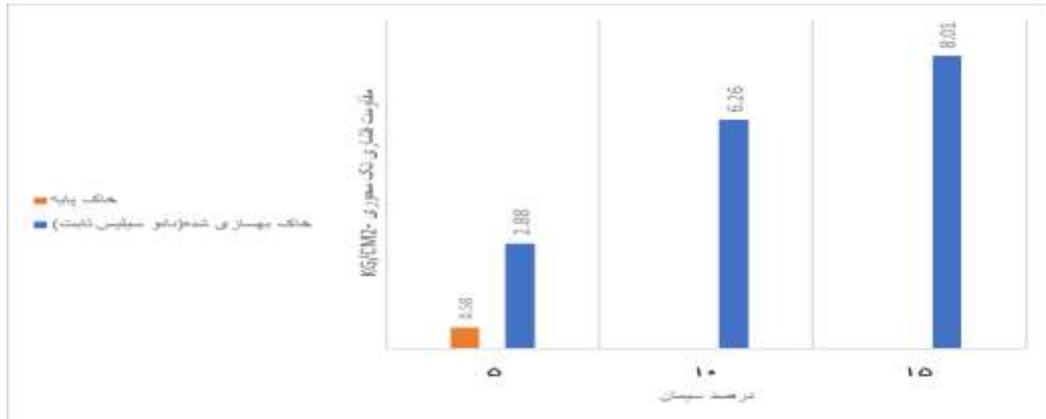
لذا عملاً دو مسئله عمده خاک حذف خواهد شد، یکی نشست تحکیمی (حذف ترم خمیری خاک مطابق بند بعد) و دیگری احتمال نشست خارج از محدوده مجاز و به هر فرم دیگری است.



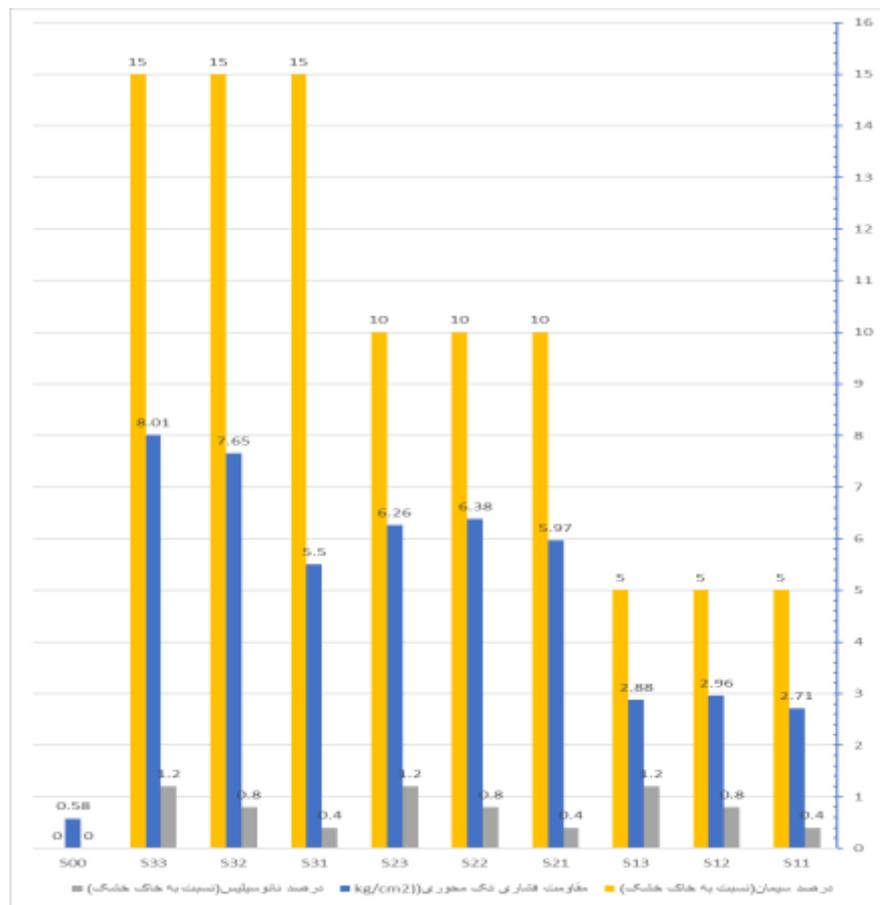
نمودار ۷-۴. اثر افزایش سیمان بر مقاومت فشاری تک محوری با ثابت ماندن مقدار نانو سیلیس (۰,۴ درصد نانوسیلیس)



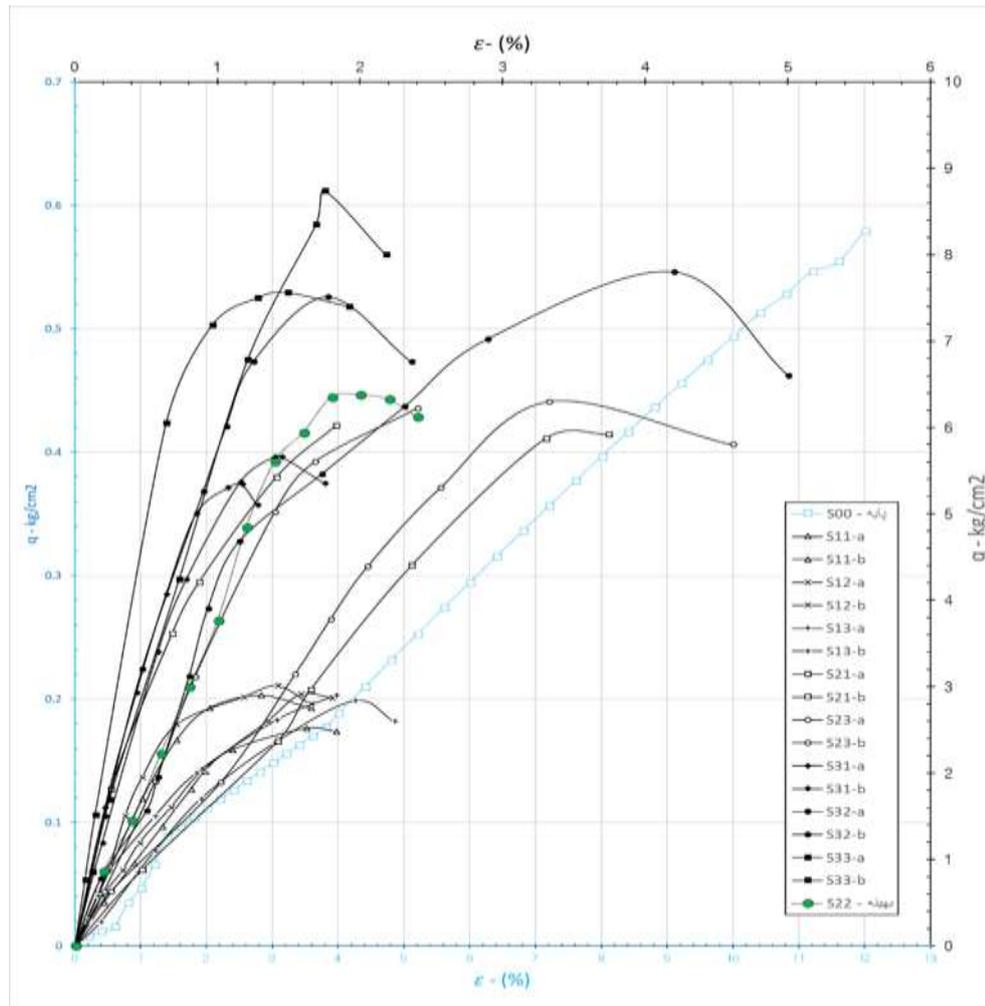
نمودار ۸-۴. اثر افزایش سیمان بر مقاومت فشاری تک محوری با ثابت ماندن مقدار نانو سیلیس (۰,۸ درصد نانوسیلیس)



نمودار ۹-۴. اثر افزایش سیمان بر مقاومت فشاری تک محوری با ثابت ماندن مقدار نانو سیلیس (۱,۲ درصد نانوسیلیس)



نمودار ۱۰-۴. مقایسه نتایج سناریوهای مختلف از آزمایش تک محوری



نمودار ۱۱-۴. مقایسه نتایج سناریوهای مختلف از آزمایش تک محوری، حالت بهینه و خاک پایه (نمونه شاهد)

تفسیر کیفی رفتار تنش-کرنش :

خاک پایه S00

- دارای رفتار خطی تقریباً یکنواخت است (منحنی به رنگ آبی روشن در شکل قبل).
- فاقد نقطه اوج مشخص است خاک پلاستیک و نسبتاً نرم، بدون گسیختگی در کرنش پائین.
- رفتار نرم با کرنش زیاد ولی تنش پایین (حداکثر $\sim 0.58 \text{ kg/cm}^2$).

نمونه‌های بهسازی شده (S11 تا S33)

- همه سناریوهای با سیمان و نانوسیلیس، رفتار شبه-شکننده (semi-brittle) نشان می‌دهند.
- اغلب منحنی‌ها دارای نقطه اوج (Peak Strength) و سپس افت ناگهانی هستند گسیختگی مشخص.
- نمونه‌هایی مثل S32 و S33 تنش‌های بالا و کرنش محدودتری دارند رفتار مستحکم‌تر و کمتر داکتیل.

جدول ۸-۴ الف. تفسیر و انتخاب ترکیب بهینه جهت آزمایشات

سناریو	درصد سیمان	درصد نانوسیلیس	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	تحلیل عملکرد
S00	0%	0%	0.58	خاک خام، فاقد هرگونه تقویت؛ عملکرد بسیار ضعیف
S11	5%	0.40%	2.71	بهبود اولیه مقاومت با سیمان کم و نانوسیلیس محدود
S12	5%	0.80%	2.96	بهبود تدریجی؛ هنوز فاصله زیاد با سطوح بالاتر دارد
S13	5%	1.20%	2.88	نوسان جزئی نسبت به S12؛ نشان‌دهنده اشباع نسبی تأثیر نانو
S21	10%	0.40%	5.97	جهش محسوس نسبت به سری ۵٪؛ نقش کلیدی سیمان
S22	10%	0.80%	6.38	ترکیب بهینه: تعادل مؤثر بین سیمان و نانوسیلیس، مقاومت بالا با صرف مصالح کمتر نسبت به سری ۱۵٪
S23	10%	1.20%	6.26	افت جزئی نسبت به S22؛ احتمال کاهش کارایی نانوسیلیس در این سطح
S31	15%	0.40%	5.5	افزایش سیمان بدون رشد مناسب مقاومت؛ کارایی کمتر
S32	15%	0.80%	7.65	مقاومت بالا، اما با هزینه بیشتر مصالح؛ بهینه اقتصادی نیست
S33	15%	1.20%	8.01	بالاترین مقاومت، اما نیاز به مصرف بالای سیمان و نانوسیلیس؛ صرفه‌جویی کمتر

جدول ۸-۴ ب. تفسیر و انتخاب ترکیب بهینه جهت آزمایشات

نتیجه	تفسیر
مقاومت	به شدت تابع درصد سیمان است؛ نانوسیلیس عملکرد آن را تقویت می‌کند.
رفتار مکانیکی	از رفتار نرم (S00) به رفتار سخت و شکننده (S33) تغییر یافته است.
بهینه‌سازی	سناریو S22 ترکیب بهینه‌ای از مقاومت و انعطاف‌پذیری را ارائه می‌دهد.

حدود اتربرگ

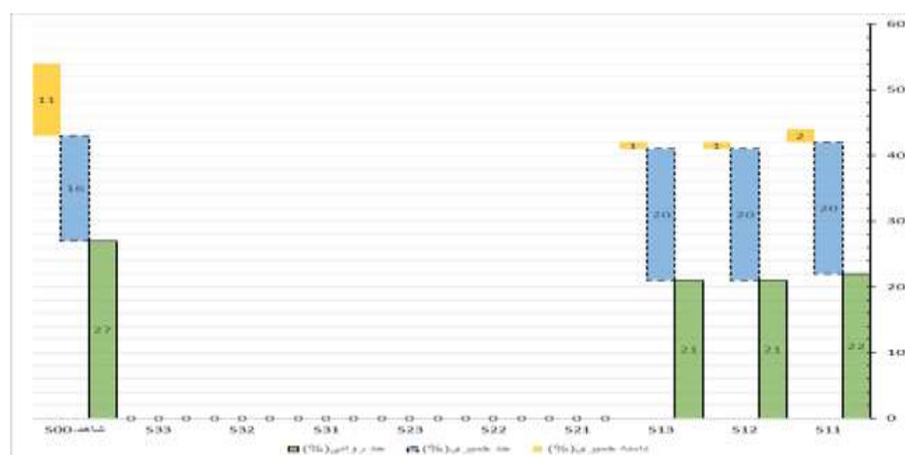
به یاد داشته باشید که حد روانی خاک پایه ۲۷، حد خمیری آن ۱۶ و دامنه خمیری آن ۱۱ بوده است. لذا از ابتدا امر خاک رس مورد آزمایش چسبندگی بالایی نداشته است.

.	۱۵			۱۰			۵			درصد سیمان (نسبت به خاک خشک)
	۱,۲	۰,۸	۰,۴	۱,۲	۰,۸	۰,۴	۱,۲	۰,۸	۰,۴	درصد نانوسیلیس (نسبت به خاک خشک)
۲۷	-	-	NLL	NLL	NLL	NLL	۲۱	۲۱	۲۲	حد روانی (%)
۱۶	-	-	NPL	NPL	NPL	NPL	۲۰	۲۰	۲۰	حد خمیری (%)
۱۱	-	-	NPI	NPI	NPI	NPI	۱	۱	۲	دامنه خمیری (%)
S00	S33	S32	S31	S23	S22	S21	S13	S12	S11	نام سناریو
.	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	شاخه
.	۳			۲			۱			حالت

جدول ۹-۴. حدود اتربرگ خاک بهسازی شده

نانوسیلیس تاثیر ملموسی بر حدود اتربرگ نداشته است چراکه با ثابت ماندن میزان سیمان در ترکیب و افزایش مقدار نانوسیلیس نتایج تغییر نداشته است.

همچنین با اضافه شدن ۱۰٪ سیمان به مخلوط عملاً خاک حالت خمیری خود را از دست داده و کاملاً رفتار دانه‌ای از خود بروز داده است و در این حد از سیمان نیز با تغییر میزان نانوسیلیس تغییر رفتار مشاهده نشد، با توجه به محدودیت میزان نانوسیلیس در اختیار از آزمایشات اضافه صرف نظر شد.



نمودار ۱۲-۴. مقایسه نتایج سناریوهای مختلف حدود اتربرگ و خاک پایه (نمونه شاهد)

در مورد موارد بدون حدود اتربرگ می توان گفت :

احتمالاً به دلیل عدم شکل گیری حد روانی و خمیری، این خاک‌ها بسیار پایدار و غیرفعال از نظر خمیری شده‌اند، این اتفاق خوبی است برای کاربردهای ژئوتکنیکی، چون نشانه‌ای از بهسازی شدید خاک است.

نتیجه گیری کمی:

- کاهش حد روانی از ۲۷٪ به ۲۱-۲۲٪ کاهش تمایل خاک به رفتار خمیری در حالت اشباع
- افزایش حد خمیری: از ۱۶٪ به ۲۰٪ خاک دیرتر وارد فاز خمیری می‌شود.
- کاهش شدید دامنه خمیری: از ۱۱٪ به ۱-۲٪ کاهش پتانسیل تورم و روانگرایی.

تحلیل کیفی تغییرات :

سیمان ساختار خاک را پایدار و دانه‌ای می‌کند باعث کاهش خاصیت خمیری و جذب آب.

نانوسیلیس در کنار سیمان، با پر کردن ریزفضاها و واکنش پوزولانی، باعث کاهش خمیری شدن خاک می‌شود.

اصلاح رفتاری خاک در جهت کاهش تورم، افزایش پایداری حجمی، کاهش حساسیت به رطوبت و بهبود رفتار سازه‌ای.

واگرایی خاک بهسازی شده :

با توجه به آنکه پس از اضافه شدن سیمان و نانوسیلیس در مخلوط عملاً بافت خاک تغییر کرده (سیمانی شده) برای کنترل واگرایی در این مرحله مناسبتر دیده شد در کنار استفاده از آزمایش هیدرومتری مضاعف از آزمایش ساده کرامپ نیز کمک گرفته شود.

درصد سیمان (نسبت به خاک خشک)	۱۵			۱۰			۵			
	۰	۱،۲	۰،۸	۰،۴	۱،۲	۰،۸	۰،۴	۱،۲	۰،۸	۰،۴
درصد نانوسیلیس (نسبت به خاک خشک)	۰	۱،۲	۰،۸	۰،۴	۱،۲	۰،۸	۰،۴	۱،۲	۰،۸	۰،۴
توصیف نتایج کرامپ	-	غیر واگرا	واگرایی ضعیف	واگرایی ضعیف						
هیدرومتری مضاعف (درصد)		غیر واگرا	غیر واگرا							
نام سناریو	S00	S33	S32	S31	S23	S22	S21	S13	S12	S11
شاخه	۰	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱
حالت	۰	۳			۲			۱		

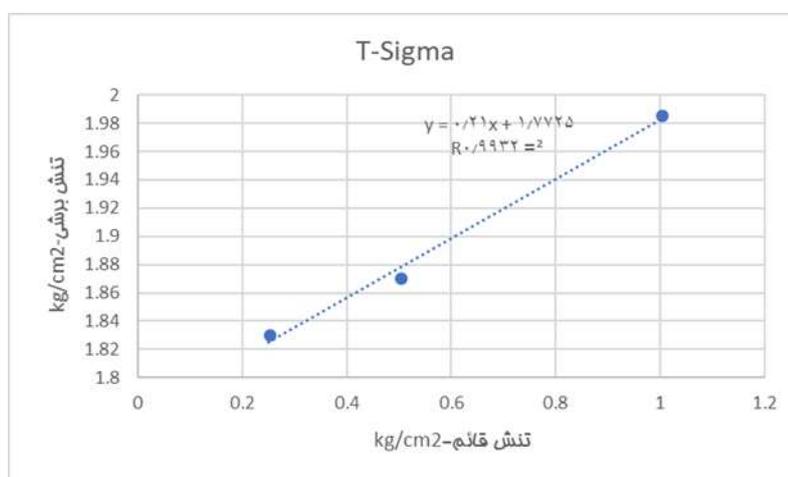
آنچه به نظر قابل استناد می‌رسد این است که افزایش نانوسیلیس در مخلوط باعث کاهش واگرایی آن خواهد شد، این مهم ممکن است برای خاک‌های با درصد واگرایی مختلف، متفاوت باشد. استفاده از ۱۰٪ سیمان و ۰٫۸٪ نانوسیلیس به دلیل عوامل زیر بهینه به نظر می‌رسد :

- قطعیت در کنترل واگرایی
- قطعیت در افزایش مقاومت خاک پایه
- تکرارپذیری نتایج و کنترل عدم اختلاط مناسب احتمالی
- کاهش هزینه استفاده از نانوسیلیس

برش مستقیم

جدول ۱۱-۴. نتایج آزمایش برش مستقیم روی خاک بهسازی شده بهینه (۱۰٪ سیمان و ۰٫۸٪ نانوسیلیس)

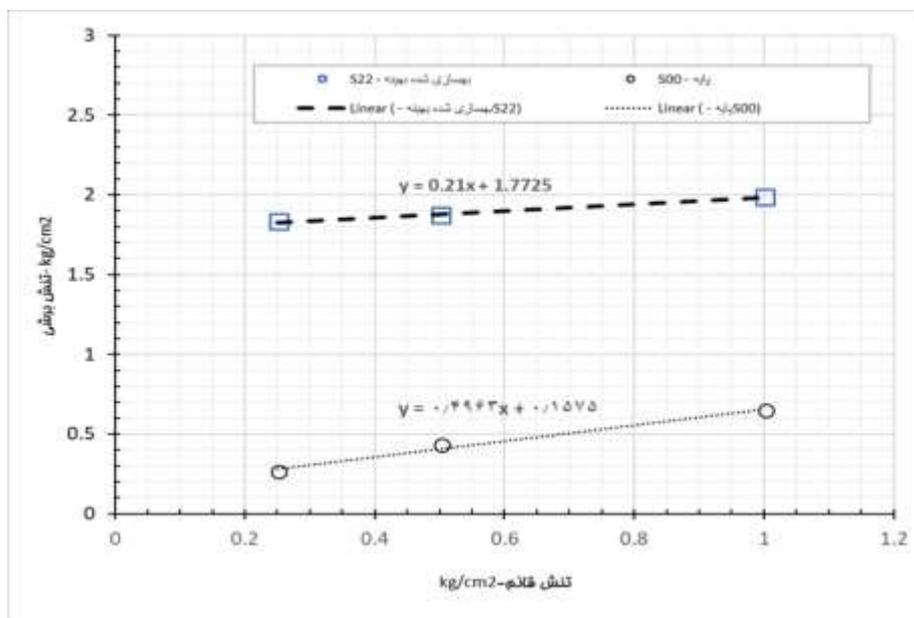
دانشیه خشک (gr/cm ³)	درصد رطوبت	ϕ' (°)	C' (kg/cm ²)	جعبه برش
۱٫۴۵	۱۷	۱۲	۱٫۷۷	مربعی ۱۰ در ۱۰



نمودار ۱۴-۴. نتایج برش مستقیم خاک بهسازی شده بهینه (S22)

جدول ۱۲-۴. زمان تا گسیختگی برای خاک‌های مختلف در طبقه‌بندی متحد

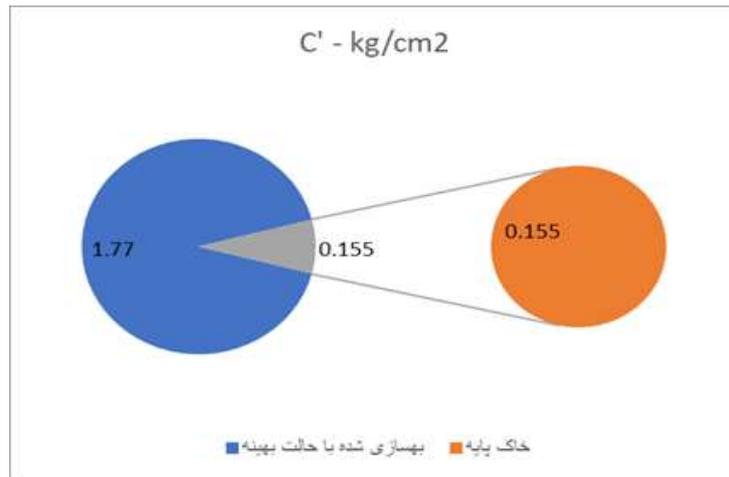
طبقه‌بندی USCS مطابق با استاندارد ASTM D2487	حداقل زمان تا گسیختگی (t_f)
SW, SP (ریزانه < ۵٪)	۱۰ min
SW-SM, SP_SM, SM (ریزانه > ۵٪)	۶۰ min
SC, ML, CL, SP-SC	۲۰۰ min
MH, CH	۲۴ h



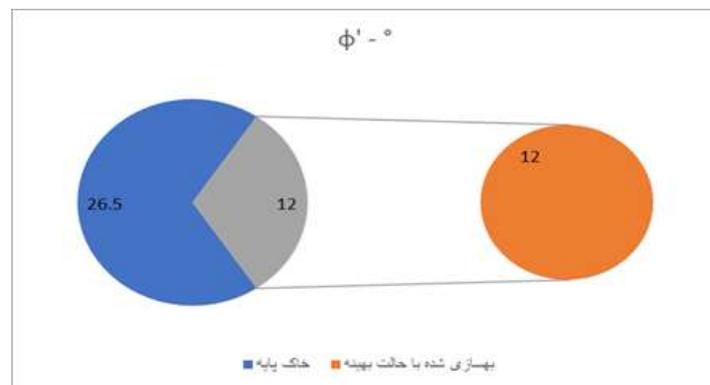
نمودار ۱۵-۴. مقایسه سطح گسیختگی خاک پایه (نمونه شاهد) و خاک بهسازی شده در حالت بهینه (۱۰٪ سیمان و ۰٫۸٪ نانوسیلیس)

نتیجه‌گیری کمی و کیفی مهندسی، بهسازی با ۱۰٪ سیمان و ۰٫۸٪ نانوسیلیس (S22) منجر به:

- افزایش ۳ تا ۷ برابری مقاومت برشی در مقایسه با خاک پایه (نمونه شاهد)
- کاهش وابستگی به تنش قائم رفتار پایدارتر در شرایط تنش‌های متغیر
- مناسب برای کاربردهای مقاوم‌سازی در شرایط برشی (مثل پاشنه دیوار، زیر فونداسیون و لایه‌های ضد واگرایی)

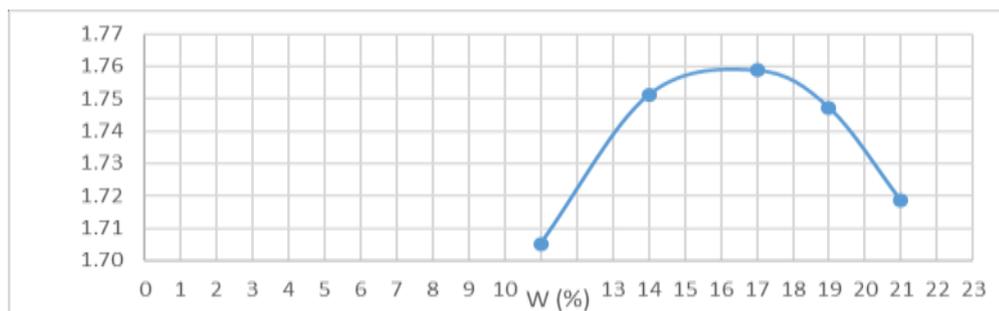


نمودار ۱۶-۴. مقایسه چسبندگی زهکشی شده خاک پایه (نمونه شاهد) و خاک بهسازی شده در حالت بهینه (۱۰٪ سیمان و ۸٪ نانوسیلیس)



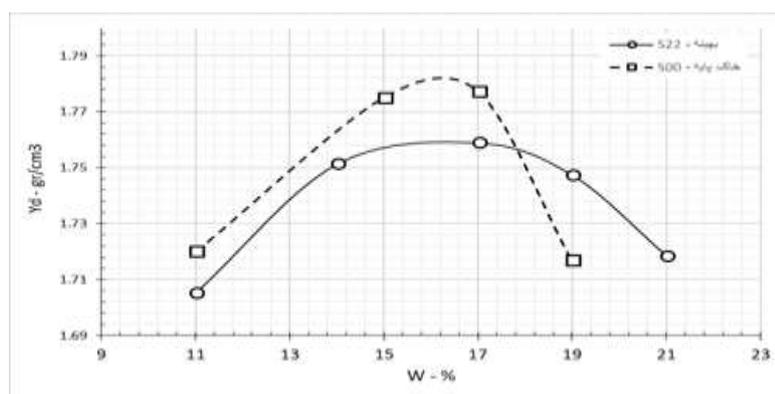
نمودار ۱۷-۴. مقایسه زاویه اصطکاک داخلی بلند مدت خاک پایه (نمونه شاهد) و خاک بهسازی شده در حالت بهینه (۱۰٪ سیمان و ۸٪ نانوسیلیس)

تراکم استاندارد خاک بهسازی شده



نمودار ۴-۱۸. نتایج آزمایش تراکم استاندارد خاک بهسازی شده بهینه (S22)

با اضافه شدن سیمان و نانوسیلیس به ترکیب خاک پایه، قدری رطوبت بهینه مخلوط افزایش یافت، همچنین وزن مخصوص خشک حداکثر از حدوداً ۱,۷۸ به ۱,۷۶ کاهش یافت. به صورت کلی اضافه نمودن مصالح سیمان و نانوسیلیس به خاک در مورد وزن مخصوص خشک حداکثر آن تغییر محسوسی ایجاد نموده است هرچند به وضوح در زمان کوبش آن چسبندگی پیشین مشاهده نشد و فرآیند کوبش خاک با یکنواختی بهتری قابل اجرا بود، این نکته در مسائلی از جمله راهسازی ممکن است بسیار کمک کننده باشد.



نمودار ۴-۱۹. نتایج آزمایش تراکم استاندارد خاک بهسازی شده بهینه و نمونه شاهد

جدول ۴-۱۳. مقایسه کمی نتایج آزمایش تراکم استاندارد

تغییرات	خاک بهبود یافته (S22)	خاک پایه (S00)	پارامتر
بدون تغییر	16%	16%	رطوبت بهینه (OMC)
کاهش ۱%	1.76 gr/cm ³	1.78 gr/cm ³	حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD)
—	کمی پهن تر	نسبتاً تند	شکل منحنی تراکم

جدول ۱۴-۴. خلاصه تحلیل نتایج بهسازی براساس تراکم استاندارد

جنبه	نتیجه
مقاومت مکانیکی بالقوه	با وجود کاهش چگالی خشک، اگر افزودنی‌ها موجب افزایش چسبندگی یا سیمان‌سازی در خاک شده باشند، مقاومت نهایی ممکن است افزایش یابد (نتایج آزمایش تک محوری این امر را تأیید می‌کند)
پایداری حجمی	خاک S22 احتمالاً پایداری حجمی بهتری در برابر تغییرات رطوبت خواهد داشت.
کارایی در اجرا	ثابت ماندن OMC و پهن تر بودن منحنی، اجرای عملیات تراکم را برای S22 آسان تر و با ریسک کمتر در شرایط متغیر محیطی می‌سازد.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

۱. چه سیمان و چه نانوسیلیس هر دو باعث کاهش واگرایی خاک پایه شده‌اند.
۲. با افزایش استفاده از نانوسیلیس در ترکیب با سیمان تکرارپذیری نتایج بیشتر شده و اختلاف نتایج آزمایشات کاهش یافته است، این مورد به خصوص در زمان استفاده از ۱,۲٪ نانوسیلیس در ترکیب کاملاً مشهود است.
۳. چنانچه صرفاً هدف کنترل واگرایی خاک باشد به نظر استفاده از ۱,۲٪ نانوسیلیس در ترکیب با ۵٪ سیمان کفایت کند، اما به جهت اطمینان و بحث اقتصاد مناسب‌تر است از ۱۰٪ سیمان در کنار ۰,۸٪ نانوسیلیس استفاده گردد.
۴. اثر استفاده از سیمان بسیار بیش از استفاده از نانوسیلیس بوده است و لازم است جداگانه به این موضوع پرداخته شود.
۵. به نظر بهینه‌ترین ترکیب که چه از منظر مقاومتی و چه با توجه به کنترل واگرایی مناسب باشد، استفاده از ۱۰٪ سیمان و ۰,۸٪ نانوسیلیس است، اهمیت استفاده از نانوسیلیس بیشتر به جهت تکرار نتایج است چراکه اختلاط رس و سیمان در عمل زمانبر و در حجم‌های بالا احتمالاً غیر یکنواخت خواهد بود.
۶. استفاده از ترکیب بهینه نانوسیلیس و سیمان تأثیر محسوسی بر رطوبت بهینه-وزن مخصوص خشک حداکثر آزمایش تراکم نداشته است.
۷. با افزایش سیمان و نانوسیلیس، حد روانی خاک کاهش و حد خمیری آن (نامحسوس‌تر از حد روانی) افزایش می‌یابد.
۸. استفاده از ترکیب سیمان و نانوسیلیس باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت تک محوری و پارامترهای گسیختگی می‌گردد. هر چند چسبندگی مخلوط نسبت با حالت خاک پایه به شدت افزایش می‌یابد اما زاویه اصطکاک آن کاهش می‌یابد.
۹. استفاده از ۰,۴٪ نانوسیلیس عملاً اثر خاصی در ترکیب ایجاد نمی‌کند.

۱۰. در سطح نانوسیلیس ثابت (مثلاً ۰,۴٪)، با افزایش سیمان از ۵ به ۱۰ درصد مقاومت ۱۲۰٪ افزایش یافته درحالیکه، با افزایش سیمان از ۱۰ به ۱۵ درصد مقاومت ۸٪ کاهش یافته. این نشان می‌دهد که در حضور ۰,۴٪ نانوسیلیس، عملکرد سیمان از ۱۰٪ به بالا دیگر بهبود مقاومت را تضمین نمی‌کند.

۱۱. در سطح ثابت سیمان (مثلاً ۱۵٪)، افزایش نانوسیلیس از ۰,۴٪ به ۰,۸٪ موجب رشد چشمگیر مقاومت از ۵,۵۰ به ۷,۶۵ (kg/cm^2) شده، اما ادامه افزایش تا ۱,۲٪ تنها افزایش جزئی مقاومت تا ۸,۰۱ (kg/cm^2) را در پی داشته که نشان‌دهنده اشباع‌شدگی نسبی نانوسیلیس در این ترکیب است؛ در سطوح پایین سیمان (۵٪)، این روند ضعیف‌تر و تأثیر نانوسیلیس کمتر بوده است.

پیشنهادات برای تحقیقات آتی

۱. به نظر می‌رسد در مقادیر پائین سیمان، درصد نانوسیلیس بسیار اهمیت پیدا می‌کند، پیشنهاد می‌گردد این موضوع جداگانه بررسی گردد.
۲. اثر مدت زمان اختلاط خاک (رسی) با دوغاب سیمان به نظر بسیار تعیین‌کننده می‌رسد، لذا شبیه‌سازی این مسئله در کنار مسائل اجرایی آن می‌تواند مفید باشد.
۳. اثر تغییر بافت و دانه‌بندی خاک با ترکیب سیمان و ماسه به چه صورت خواهد بود، استفاده از ماسه به جهت ارزانی مصالح و کمک به اختلاط مناسب می‌تواند مفید باشد.

مراجع

- آذینی، ا، ضیایی موید، ر، نائینی، ا، ۱۴۰۲، تزریق پذیری محلول نانو سیلیس کلئیدی در رس کربناته‌ی بو شهر با درصد لای مختلف، مجله علمی پژوهشی عمران شریف، دوره ۳۹، شماره ۱، شماره پیاپی ۱، صفحه ۳۸-۲۹.
- جهرمی، غ، پایان، م، امرایی، ز، ۱۴۰۲، تاثیر افزودنی‌های ژئولیت و سیمان بر رفتار مکانیکی و شاخص واگرایی خاک رسی، نشریه علمی و پژوهشی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۸، صفحه ۱۶۶۰-۱۶۴۵.
- حسنلو، م، خبازی، ه، ۱۳۹۷، اثر آلاینده‌های نفتی بر خاصیت واگرایی و مقاومت برشی خاک‌های رسی واگرا، نشریه علمی و پژوهشی عمران امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۲، صفحه ۴۰۸-۴۰۱.
- زمردیان، م، مومن، م، ۱۳۹۷، مطالعه آزمایشگاهی تأثیر افزودنی نانوسیلیس در فرسایش داخلی خاک‌های واگرا، نشریه علمی و پژوهشی عمران شریف، دوره ۳۴، شماره ۱، شماره پیاپی ۲، صفحه ۱۴۸-۱۴۳.
- سامانی، م، دریاباری، م، دریاباری، ا، میرحبیبی، ع، ۱۴۰۰، بررسی عددی و آزمایشگاهی میزان بهینه بهسازی خاک رس فیروز بهرام با آهک و سیمان و تأثیر آن در کاهش نشست‌پذیری خاک بستر تصفیه‌خانه فاضلاب غرب تهران، نشریه علمی و پژوهشی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۷، صفحه ۲۹۵۶-۲۹۳۷.

Firouz Karamshahi, Ebrahim Nohani, Mohammad Hossein Noorolah Dezfouli, Experimental investigation of the effect of nano-silica and nano-clay on the mechanical characteristics of plastic concrete in porous environments, Civil and Project, 2024.

C. El Mohtar, J. Clarke, A. Bobet, M. Santagata, V. Drnevich, C. Johnston, Cyclic response of a sand with thixotropic pore fluid, in: Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics IV, 2008, pp. 1-10.

Nhung, H., Ha, V., Anh, T.Q., Minh, N., Nanosized spent coffee grounds can increase soil clay dispersibility, Soil and Tillage Research, 237, 2024, 105979.

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, 2015, pp. 1820-1827.

Turkoz, M., & Vural, P. (2013). The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils. Science and Engineering of Composite Materials, 20(4), 395-405.

Impact of various additives and their combinations on the consolidation characteristics of clayey soil. Scientific Reports, 14(1), 31907,2024.

Enhancing the Mechanical Properties of Sawdust Concrete with Silica Fume, Metakaolin, and Marble Powder. Journal of Civil Aspects and Structural Engineering, 2(1), 1-13, 2025.

Experimental exploration of fracture behavior (pure mode III) in eco-friendly steel fiber-reinforced self-compacting concrete with waste tempered glass as coarse aggregates. Scientific Reports, 14(1), 9043, 2024.