



Civil and Project Journal

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

Improving the Mechanical Properties of Clay Soils Using Nanosilica in Jolfa Region(East Azarbaijan province)

Mehdi Mohammadrezaei ¹, Farhad Pirmohammadi Alishah ^{2*}

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tasuj Branch, Islamic Azad University, Tasuj, Iran

*2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran

Received: 14 April 2024; Revised: 24 April 2024; Accepted: 06 May 2024; Published: 22 August 2024

ABSTRACT

Nowadays, improving problematic soils is considered as one of the geotechnical engineering challenges. Since the problematic soils have a secondary origin that are the results of chemical weathering, they have a wide range of dispersive characteristics. One of these types of soils is clay that causes many problems in the engineering project. These problems are related to their specifications, such as weak strength, settlement, and dispersivity problems. One of the treatment methods of the mentioned problems is chemical soil stabilization. One of the ways to improve soil quality is to use additives. Due to the widespread use of nanomaterials in different sciences, the impact of these materials as a novel additive can be investigated. In this study, the effect of nanosilica additive on bond strength of clay soils was investigated. In this study, we investigated the effect of nanosilica on unconfined compressive strength of clay soils in Jolfa region using in vitro and uniaxial experiments. Cohesive soil samples were tested by adding different percentages of nanosilica. The results indicate that nanosilica increased the uniaxial compressive strength of the clay soil. The results showed that the percentage of nanosilica additive for optimum compressive strength in clay soil was about 0.8%. Comparison of three series of clay compressive strengths in different percentages of nanosilica additives shows a minimum resistance of about 6 kg / cm² and maximum resistance of about 9 kg / cm².

Keywords: Clay soils, Nano silica, Compressive strength, Uniaxial test, Soil improvement.

Cite this article as Pirmohammadi Alishah, F and Mohammadrezaei, M. (2024). Improving the Mechanical Properties of Clay Soils Using Nanosilica in Jolfa Region(East Azarbaijan province). (e195650). Civil and Project journal, 6(6), e195650 doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2024.452423.1270>
ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2024 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: petrofarhad@iaushab.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

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

بهسازی خواص مکانیکی خاک‌های رسی با استفاده از نانوسیلیس در منطقه جلفا (استان آذربایجان شرقی)

مهدی محمدرضایی^۱، فرهاد پیرمحمدی علیشه^{۲*}

۱- استادیار، گروه عمران، واحد تسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، تسوج، ایران
۲* - استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

تاریخ دریافت: ۲۶ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۰۵ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ شهریور ۱۴۰۳

چکیده

امروزه بهسازی خاک‌های مسئله‌دار به عنوان یکی از چالش‌های مهندسان ژئوتکنیک مورد توجه زیادی قرار گرفته است. از آنجا که خاک‌های مسئله‌دار، منشأ ثانویه دارند و حاصل هوازدگی شیمیایی هستند؛ معمولاً پراکندگی زیادی در سطح زمین دارند. از جمله خاک‌های مسئله‌دار، رس‌ها هستند که با توجه به خصوصیات ضعیف مقاومتی، مشکلات نشست و پتانسیل واگرایی خود، مشکلات زیادی را در بستر سازه‌ها ایجاد می‌کنند. یکی از روش‌های کنترل مسائل ناشی از خاک‌های مسئله‌دار، تثبیت شیمیایی آن‌هاست. یکی از روش‌های اصلاح و بهبود کیفیت خاک‌ها استفاده از مواد افزودنی است. با توجه به کاربرد وسیع مواد نانو در علوم مختلف می‌توان تاثیر این مواد را بر خاک به عنوان یک افزودنی نوین مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش به بررسی تاثیر ماده افزودنی نانوسیلیس بر مقاومت خاک‌های رسی پرداخته شده است. با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و آزمایش‌های تک‌محوری به بررسی اثر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری محصور نشده خاک‌های رسی در منطقه جلفا پرداخته شده است. نمونه‌های خاک چسبنده با افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیس مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک چسبنده شده است. نتایج نشان داد که درصد افزودنی نانوسیلیس جهت مقاومت فشاری بهینه در خاک رسی این منطقه حدود ۰/۸ درصد می‌باشد. مقایسه سه سری مقاومت فشاری خاک رسی در درصد‌های مختلف افزودنی نانوسیلیس حداقل مقاومت را حدود 6 kg/cm^2 و حداکثر مقاومت را حدود 9 kg/cm^2 نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: خاک چسبنده، نانو سیلیس، مقاومت فشاری، آزمایش تک محوری، بهسازی خاک.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: petrofarhad@aushab.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر فناوری نانو سبب تحولات بسیاری در دانش شده و محققین در زمینه‌های مختلف از آن بهره گرفته‌اند. نانو ذرات به دلیل ویژگی‌های خاص فیزیکی و شیمیایی در بسیاری از علوم برای ساخت مواد جدید و با قابلیت‌های منحصر به فرد به کار می‌روند. با توجه به اهمیت بهسازی خاک در سازه‌های عمرانی و توجه روزافزون به انواع افزودنی‌های نوین پرداختن به این موضوع از اهمیت زیادی برخوردار است. مطالعه ویژگی‌های انواع افزودنی‌ها و تاثیر آنها در تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و نهایتاً انتخاب مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین این افزودنی‌ها از موضوعات قابل توجه علم ژئوتکنیک است [۱]. این در حالی است که استفاده از نانو مواد در مهندسی ژئوتکنیک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از اینرو به دلیل عدم وجود اطلاعات آزمایشگاهی کافی و به دست آوردن اطلاعاتی جامع در خصوص افزودن نانو مواد به خاک به منظور بهسازی، داده‌های واقعی خواص ژئوتکنیکی آن ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به دسترسی آسان، فراوانی منابع و گسترش تولید مواد افزودنی پودر نانو سیلیس و نانو اکسید آهن در کشور، استفاده از این مواد جهت بهسازی خاک رس در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی به دلیل فراوانی خاک ریزدانه رسی در استان آذربایجان شرقی و نیاز به بهسازی این خاک‌ها با توجه به گسترش احداث سازه‌های عمرانی در این مناطق، بویژه در منطقه ویژه آزاد تجاری ارس و شهر جلفا، مطالعه کاملی در اینگونه خاک‌ها بر ضرورت تحقیق می‌افزاید. در این تحقیق تأثیر افزودن نانو ذرات بر خواص مهندسی خاک منطقه آزاد تجاری ارس مورد بررسی قرار می‌گیرد. این خواص مهندسی شامل مقاومت فشاری تک محوری و رفتار تحکیمی می‌باشد. بدین منظور از پودر نانوسیلیس به عنوان ماده تثبیت کننده در تثبیت خاک‌های رسی با درصدهای مختلف استفاده شده و تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک ارزیابی می‌گردد.

با توجه به قرارگیری برخی از پروژه‌های عمرانی مهم بر خاک‌های رسی، ضرورت اصلاح و بهسازی آنها جهت ایجاد بستری مناسب برای اجرای پروژه‌های مهندسی حائز اهمیت است. در سال‌های اخیر تکنولوژی نانو در حد گسترده و با سرعت بالایی در تمامی زمینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته و بدلیل جدید بودن و عدم وجود مرجعی کامل در مهندسی ژئوتکنیک و تحقیقات پراکنده و ناکافی نیاز به شناخت، نحوه کاربرد و میزان تاثیر نانو ذرات در این حوزه می‌باشد. در مهندسی ژئوتکنیک، خاک‌های رسی در برخی موارد به عنوان خاک‌های دارای مشکل از نظر ظرفیت باربری، تورم، رمبندگی، نشست و غیره مورد بررسی محققین قرار گرفته است [۲]. از دیرباز استفاده از افزودنی‌ها به منظور بهسازی این گونه خاک‌ها در راستای بهبود تراکم، کاهش تورم، بهبود مقاومت و پایداری مورد نظر پژوهشگران حوزه مهندسی ژئوتکنیک بوده است. در سال‌های اخیر، با رشد جمعیت زمین‌های مناسب جهت انجام پروژه‌های عمرانی رو به کاهش است.

بطور کلی خاک موجود در برخی مناطق از دیدگاه مهندسی برای ساخت و ساز، ایده آل و کاملاً مطلوب نیست و باید با اعمال تغییراتی بر آن، جهت فعالیت‌های عمرانی آماده گردد. یکی از راهکارهای مناسب در مواجهه با خاک‌های نامناسب در مهندسی ژئوتکنیک، تغییر خصوصیات خاک است که به بهسازی یا اصلاح مرسوم است. روش‌های بهسازی متعددی جهت اصلاح خاک زیر پی وجود دارد که می‌توان به استفاده از پی‌های عمیق، برداشت خاک ضعیف و جایگزینی با مصالح پرکننده، استفاده از افزودنی‌ها، تزریق و... اشاره نمود [۲]. انتخاب روش بهسازی بستگی به عوامل متعددی از جمله نوع خاک، درصد ریزدانه، مساحت و عمق بهسازی، مقاومت و تراکم پذیری خاک موردنظر، ضوابط نشست، دسترسی به مهارت فنی، نوع تجهیزات، مصالح و هزینه بهسازی دارد. اهداف متعددی برای بهسازی خاک وجود دارند، از جمله میتوان به افزایش ظرفیت باربری، افزایش خصوصیات مقاومتی، افزایش پایداری شیب و کاهش نشست اشاره نمود [۲].

در پژوهشی [۳] ضمن تاکید بر وجود ویژگی های منحصر به فرد نانومواد، نشان داده شد که فعالیت پوزولانی نانوسیلیس به مراتب بیشتر از میکروسیلیس است و لذا عملکرد بهتری در کاربردهای بهسازی خاک دارد. همچنین در پژوهش دیگری [۴] در همان سال، تاثیر میکروسیلیس در نفوذپذیری، فشار تورم و مقاومت فشاری خاک های رسی مطالعه شد و نتایج نشان داد که با افزودن میکروسیلیس، نفوذپذیری و فشار تورم خاک کاهش و مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده افزایش می یابد. برخی پژوهشگران در سال ۲۰۰۵، نیز از نانوسیلیس برای افزایش چسبندگی خاک ها و کاهش ویسکوزیته آن ها استفاده و رفتار ماسه بهبود یافته با نانومواد در شرایط بارگذاری چرخه ای را بررسی کردند، نتایج بدست آمده نشان داد که چسبندگی خاک های مذکور وابسته به درصد افزایش نانوذرات می باشد [۵]. همچنین با استفاده از نانومواد، بهبود ۴۰ درصدی نشست با اعمال زلزله مصنوعی در محلی با خاک ماسه ای با ویسکوزیته بالا گزارش شد [۶].

مطالعه های کامل دیگری نیز در سال ۲۰۱۱، روی واکنش های شیمیایی میکروسیلیس با آهک و تاثیر آن در خواص مهندسی خاک انجام شده و نتایج نشان داد که میکروسیلیس می تواند به عنوان یک ماده مناسب و بهبود دهنده خواص شیمیایی در خاک ها به کار رود [۷]. در سال ۲۰۱۲، نیز آزمایش هایی برای تثبیت خاک های سیلتی انجام و تأثیر همزمان آهک و میکروسیلیس بر روی خاک با ۲٪ آهک و ۱، ۳، و ۵ درصد میکروسیلیس بررسی و نتیجه گیری شد که اختلاط آهک و سیلیس به نسبت ۲ و ۳ درصد، مقاومت فشاری خاک را به طور رضایت بخشی بالا می برد و خاک را برای زیرسازی جاده مناسب می کند [۸].

در سال ۲۰۱۴، اثر نانوذرات سیلیس در حدود اتربرگ، هدایت هیدرولیکی و مقاومت فشاری خاک های رسوبی تثبیت شده با سیمان بررسی شد و نتایج نشان داد که افزودنی نانوسیلیس باعث کاهش شاخص خمیری و افزایش مقاومت فشاری خاک می شود. در ضمن کمینه هدایت هیدرولیکی در نمونه تثبیت شده با ۴٪ نانوسیلیس مشاهده شده است [۹]. در مطالعه دیگری در همان سال، نتیجه گرفته شد که نانوذرات سیلیس می توانند تورم پذیری رس مونت موریلونیت را مهار کنند [۱۰]. در سال ۲۰۱۵ نیز تاثیر استفاده از نانوسیلیس در تثبیت خاک های نرم بررسی شد و نتایج نشان داد که مقدار کمی نانوسیلیس، تاثیر قابل توجهی در اصلاح خصوصیات ژئوتکنیکی خاک های نرم دارد [۱۱]. برخی پژوهشگران نیز در همان سال، با افزودن آهک و مواد شیمیایی نوین به خاک رس به این نتیجه رسیدند که استفاده از افزودنی های مذکور منجر به کاهش حد خمیری و افزایش مقاومت فشاری خاک می شود. همچنین با افزایش زمان عمل آوری نیز مقاومت خاک افزایش می یابد، اما از یک زمان معینی به بعد افزایش ذکر شده محسوس نیست [۱۲].

در سال ۲۰۱۶، اثر افزودنی نانوسیلیس به منظور بهبود ویژگی های ژئوتکنیکی خاک رسی تثبیت شده با سیمان بررسی و نتیجه گیری شده که افزودنی نانوسیلیس، پارامترهای مقاومتی خاک رسی را افزایش می دهد و می تواند جهت اصلاح خاک در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شود [۱۳]. همچنین در سال ۲۰۱۷، با انجام یک مطالعه مروری و جمع بندی مطالعه های پیشین در خصوص مقدار کاربرد مواد نانو در بهسازی انواع مختلف خاک نشان داده شد که حضور مقدار بسیار کمی نانومواد می تواند اثر قابل توجهی در خواص مهندسی خاک داشته باشد. به طوری که استفاده از نانو مواد در مخلوط خاک باعث افزایش مقاومت، شاخص تورم و تراکم پذیری و کاهش نفوذپذیری، پتانسیل گرای، نشست و کرنش های حجمی می شود [۱۳]. همچنین در سال ۲۰۱۸ [۱۴] به بررسی تاثیر نانوسیلیس بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ریزدانه کرمان پرداختند و نتایج بدست آمده در این تحقیق نیز نشان داد که حضور درصد کمی از نانوسیلیس می تواند تاثیرات چشمگیری بر روی رفتار فیزیکی، شیمیایی و خواص مهندسی خاک ها بگذارد.

در نهایت در سال ۲۰۱۹، [۱۵] در خصوص اثر نانوسیلیس در بهسازی پارامترهای مقاومتی و تحکیم خاک های رسی کرج مطالعه نموده و نشان دادند که تثبیت خاک با نانوسیلیس، روشی موثر برای بهسازی خاک بوده و طی آن مقاومت برشی، مقاومت فشاری تک محوری و پارامترهای تحکیمی خاک بهبود می یابند و در نتیجه پایداری سازه ها افزایش می یابد.

هدف اصلی این مطالعه عبارت از بررسی امکان افزایش ظرفیت باربری و بهبود پارامترهای تحکیم در خاک‌های مورد مطالعه به منظور احداث سازه‌های عمرانی است. همچنین به دلیل فراوانی و در دسترس بودن مواد اولیه سیلیس و در نتیجه قیمت مناسب نانوسیلیس نسبت به سایر نانومواد، در پژوهش حاضر از نانوسیلیس استفاده شده است. اهداف فرعی و کاربردهای مورد نظر عبارتند از:

- تعیین تاثیر درصدهای مختلف نانوسیلیس بر روی پارامترهای مقاومتی زهکشی نشده خاک رسی.

- تعیین درصد بهینه نانوسیلیس.

- بررسی رفتار و پارامترهای تحکیم خاک رسی مورد مطالعه در اثر افزودن نانوسیلیس.

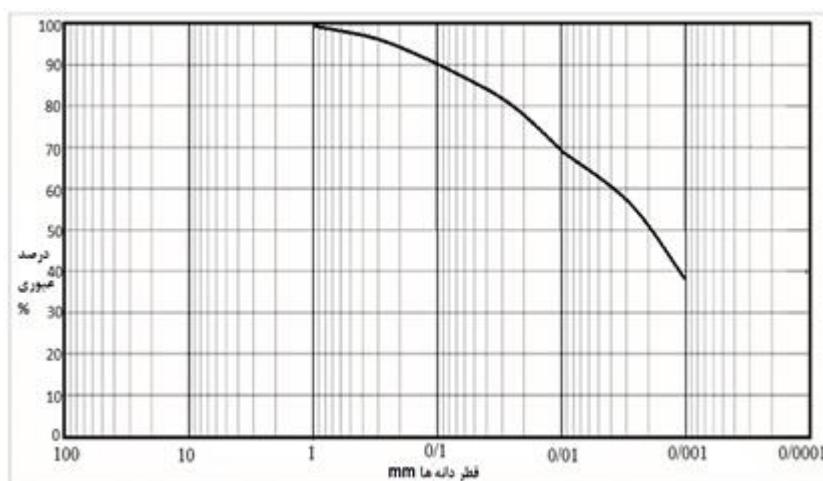
۲- مواد و روش ها

۲-۱- روش تحقیق

برای انجام آزمایش، ابعاد و وزن نمونه مطابق استاندارد اندازه گیری شده و در دستگاه بارگذاری تک محوری دستی با استاندارد AASH TO 208 ASTM D2166 BS 1377-7 - بر روی صفحه پایینی قرار داده می‌شود و صفحه بالایی بدون اعمال بار بر روی سطح نمونه در تماس قرار می‌گیرد. گنج تغییر مکان در این شرایط صفر می‌شود. بارگذاری با سرعتی انجام می‌شود که ۰/۵ تا ۲ درصد کرنش محوری در دقیقه حاصل شود به گونه‌ای که مدت زمان لازم برای گسیختگی نمونه در حدود ۱۵ دقیقه باشد. آزمایش زمانی متوقف می‌شود که نمونه گسیخته شود. نتایج آزمایش به صورت نمودار تنش-کرنش نمایش داده شده و میزان مقاومت فشاری تک محوری خاک تعیین می‌شود. پارامتر مقاومت فشاری، درصد افزودنی مواد نانوسیلیس و نمونه‌های خاک چسبیده از متغیرهای مورد بررسی این تحقیق محسوب می‌گردد. مطالعه نیز به روش آزمایشگاهی بوده و قسمتهای مقدماتی آن کتابخانه‌ای می‌باشد. داده‌هایی که از آزمایشگاه استخراج می‌گردند پس از تحلیل و بررسی توسط نرم افزارهایی نظیر اکسل در قالب نمودار و جداول ارائه شده و ارائه روابط و ضرایب در دستور کار قرار می‌گیرد.

۲-۲- خصوصیات خاک و نانوسیلیس مصرفی

خاک مورد مطالعه با حفر چاه دستی و نمونه برداری از عمق ۲ متری سطح زمین در منطقه جلفا از استان آذربایجان شرقی تهیه شد. جهت شناسایی اولیه خاک، آزمایش چگالی در محل طبق استاندارد [۱۶]، در عمق ۲ متری انجام و مقدار چگالی طبیعی خاک برابر $1/55 \text{ gr/cm}^3$ تعیین شده است. بر اساس نتایج دانه بندی [۱۷] درصد ریزدانه و ماسه خاک مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۹۱/۲۴ و ۸/۷۶ درصد تعیین شده است (شکل ۱). به منظور طبقه بندی خاک، آزمایش اتربرگ طبق استاندارد [۱۸] انجام و حد خمیری، حد روانی و شاخص خمیری خاک به ترتیب برابر با ۲۴، ۴۰ و ۱۵ درصد تعیین شده است. با توجه به نتایج دانه بندی و حدود اتربرگ نوع خاک مطابق سیستم طبقه بندی متحد از نوع رس با حد روانی پایین (CL) تعیین می‌شود. با توجه به اینکه در این پژوهش، آماده سازی نمونه ها جهت انجام آزمایش های مختلف در درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه صورت پذیرفته است، آزمایش تراکم نیز طبق استاندارد [۱۹] انجام شده است. بر این اساس وزن حجمی خشک بیشینه خاک برابر $1/74 \text{ gr/cm}^3$ و درصد رطوبت بهینه خاک، ۲۴٪ تعیین شده است. خصوصیات فیزیکی نانوسیلیس مورد استفاده در مطالعه حاضر، با توجه به آنالیز ارائه شده توسط شرکت تولید کننده، در جدول ۱ ارائه شده است که مطابق آن، پودر نانوسیلیس مورد استفاده به رنگ سفید و با محدوده قطر ۱۳-۱۱ نانومتر، بیش از ۹۹٪ سیلیس داشته و مقادیر سایر عناصر، شامل تیتانیم، کلسیم، سدیم و آهن موجود در پودر سیلیس مورد استفاده به ترتیب کمتر از ۱۲۰، ۷۰، ۵۰ و ۲۰ (pp) بوده است.



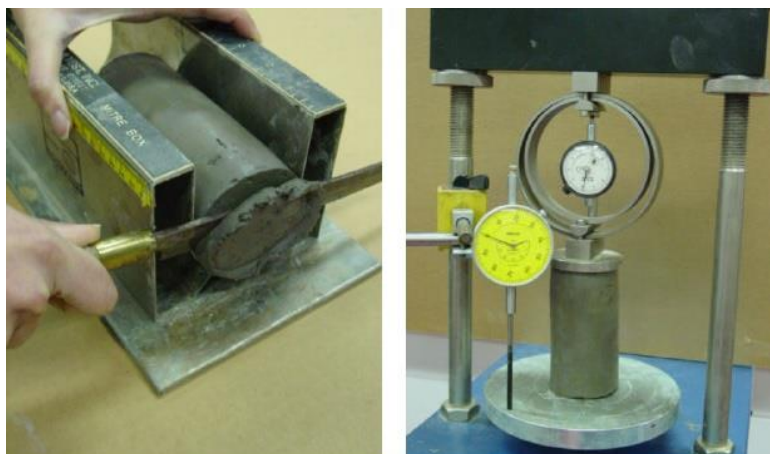
شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک با استفاده از آزمایش هیدرومتری

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی نانوسیلیس مورد استفاده در مطالعه

مقدار	مشخصه
۹۹/۲٪	درصد خلوص
۱۱-۱۳ nm	قطر دانه
۴۰-۶۰ M ² /g	سطح مخصوص
سفید	رنگ
< ۰/۱ g/cm ³	تراکم فله
۲/۴ g/cm ³	چگالی واقعی

۲-۳- آزمایش تراکم تک محوری

آزمایش تراکم تک محوری زهکشی شده در خاک‌های رسی اشباع، یکی از مهمترین آزمایش‌هایی است که به منظور تعیین مقاومت تراکم تک محوری یا همان چسبندگی زهکشی نشده استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر، آزمایش تراکم تک محوری مطابق استاندارد [۲۰] روی نمونه‌های طبیعی و تثبیت شده با نانوسیلیس با درصد‌های ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۲ و ۱/۴ بلافاصله پس از افزودن نانو و با سرعت بارگذاری ۱ mm/min انجام شده است. در آزمایش تراکم تک محوری جهت ساخت نمونه‌ها، از قالب با قطر و ارتفاع به ترتیب ۴/۹۷ و ۱۰/۰۵ سانتی متر استفاده شده است. نمونه خاک آماده شده در شرایط رطوبت بهینه، در ۳ لایه با ضخامت تقریباً یکسان تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر در قالب تک محوری متراکم شده است (شکل ۲).



شکل ۲- نمونه در حال گسیختگی در دستگاه تک محوری با افزودن ۰/۸٪ نانوسیلیس

۲-۴- مقایسه مقاومت فشاری خاک‌های رسی و رابطه تخمینی آن با درصد نانوسیلیس

همانطور که بحث شد آزمایش فشار محدود نشده نوع ویژه ای از آزمایش تحکیم نیافته است که معمولاً برای نمونه های رسی مورد استفاده قرار می گیرد. در این آزمایش فشار محدود کننده صفر است. بار محوری تا ایجاد گسیختگی در نمونه به سرعت اعمال می شود. این مقاومت با اعمال تنش محوری به نمونه استوانه ای شکل خاک، بدون آن که فشار محیطی به آن وارد شود و یا بررسی کرنش های محوری مربوط به مقادیر مختلف تنش تعیین می شود. تنشی که بر اثر آن در نمونه خاک گسیختگی رخ می دهد به نام مقاومت فشاری ساده (تک محور) نامیده شده است. در نمونه های رسی که اشباع می باشند این مقاومت با درصد رطوبت خاک کاهش می یابد. در خاک های غیر اشباع و در صورتی که وزن مخصوص خشک خاک ثابت بماند نیز، این مقاومت با افزایش درجه اشباع خاک کاهش می یابد [۲۱].

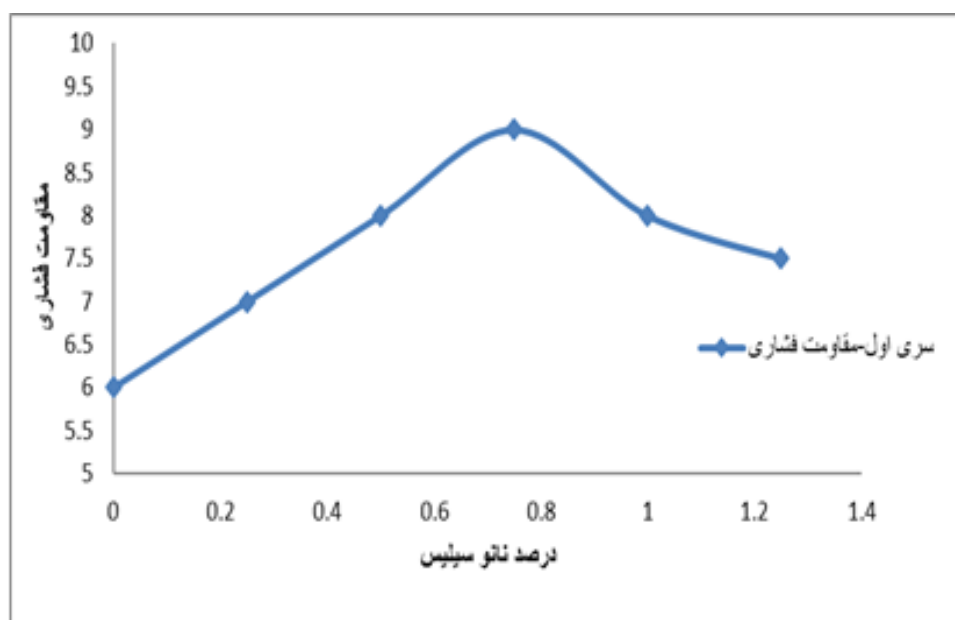
نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری روی خاک طبیعی و تثبیت شده با ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۲ و ۱/۴ درصد وزنی نانوسیلیس، در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۴ الی ۶، روند تغییرات مقادیر مقاومت فشاری تک محوری را به ازاء درصدهای افزودنی مختلف مشاهده می شود که مطابق آن با افزایش نانوسیلیس، مقاومت فشاری تک محوری خاک، ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. بر این اساس، نرخ افزایش تغییرات مقاومت فشاری با افزودن نانوسیلیس ابتدا کم و به ازاء افزودن ۰/۸٪ نانوسیلیس، به بیشینه مقدار خود می رسد. بعد از این مرحله با افزودن نانوسیلیس، نه فقط افزایشی در مقاومت فشاری تک محوری مشاهده نمی شود، بلکه روند عمومی منحنی، کاهشی است. بررسی ها نشان می دهند که افزایش مقاومت فشاری نمونه با افزودن نانوسیلیس ناشی از بارهای سطحی بالا در ذرات نانوسیلیس است. به طوری که ذرات نانوسیلیس به سرعت تمایل به جذب شدن در اطراف ذرات رس دارند. لذا با توجه به کاهش فضای خالی نمونه در اثر افزودنی و متراکم شدن خاک، نمونه تنش فشاری بیشتری را تحمل می کند. با افزایش درصد افزودنی به بیش از درصد بهینه (۰/۸٪)، نانوسیلیس بین ذرات خاک به صورت مازاد قرار می گیرد و این امر سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه ها می شود. شکل ۳، تصویر نمونه گسیخته شده در خاک تثبیت شده با ۰/۸٪ نانوسیلیس را نشان می دهد. بررسی سطوح شکست در نمونه های طبیعی و تثبیت شده با نانوسیلیس، در مقایسه با نمونه های طبیعی رفتار ترد تری دارد و سطح شکست در نمونه های مذکور، در نتیجه توسعه ترک های کششی در دو انتهای نمونه تشکیل می شود.

جدول ۲- نتایج آزمایش تک محوری بر روی خاک تثبیت شده با نانوسیلیس

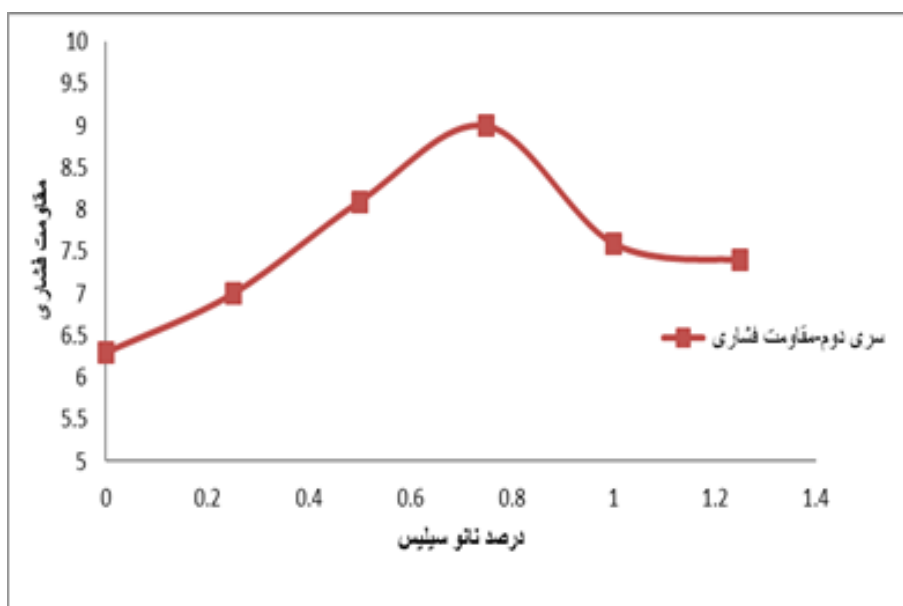
۱/۴	۱/۲	۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰	درصد نانوسیلیس %
۷/۴	۷/۶	۸	۹	۸/۵	۸/۱	۶/۹	۶	مقاومت تک محوری (kg/cm ²)



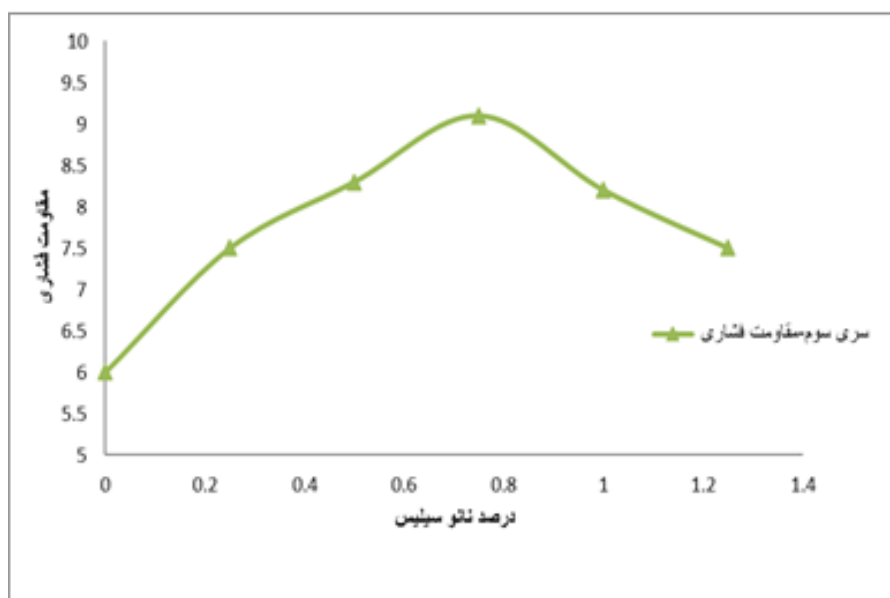
شکل ۳- نمونه در گسیخته شده در دستگاه تک محوری با افزودن ۰/۸٪ نانوسیلیس



شکل ۴- مقاومت فشاری خاک رسی (سری اول) در درصدهای مختلف افزودنی نانوسیلیس



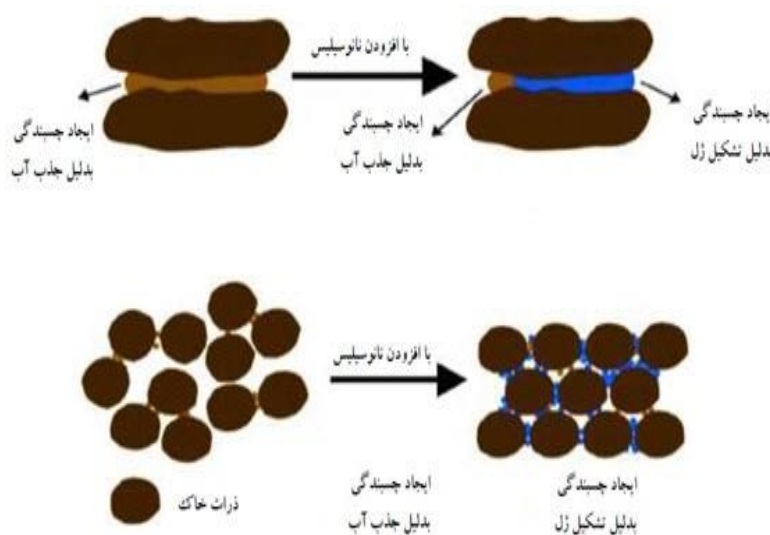
شکل ۵- مقاومت فشاری خاک رسی (سری دوم) در درصدهای مختلف افزودنی نانوسیلیس



شکل ۶- مقاومت فشاری خاک رسی (سری سوم) در درصدهای مختلف افزودنی نانوسیلیس

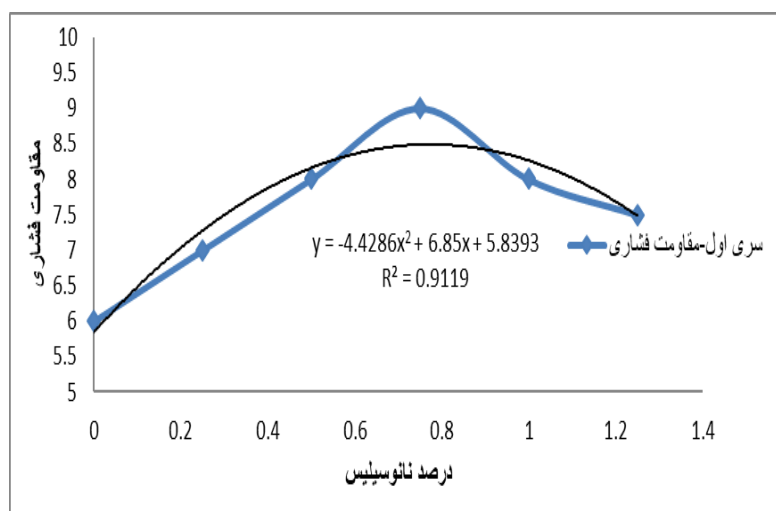
مکانیزم رفتار خاک مانند افزایش مقاومت فشاری تک محوری، در حضور نانوسیلیس هنوز به خوبی شناخته نشده است. اما امروزه دو مکانیزم در این رابطه وجود دارد: در مکانیزم اول (شکل ۷)، با افزودن آب به رس، ذرات نانوسیلیس جذب آب لایه دوگانه می شوند و تولید نوعی ژل ویسکوز می کنند. تولید ژل ویسکوز باعث افزایش سطح تماس بین ذرات رس می شود. پیوند بین ذرات رس به دلیل وجود ژل ویسکوز (در نتیجه حضور نانوسیلیس) احتمالاً قوی تر از پیوند بین ذرات رس به دلیل آبی جذبی (در خاک بدون افزودنی نانوسیلیس) است. در نتیجه، حضور ژل مذکور و افزایش سطح تماس بین ذرات رس می تواند یکی از دلایل توجیه کننده رفتار خاک مورد بحث در پژوهش حاضر باشد.

در مکانیزم دوم (شکل ۷)، نانوسیلیس فاصله بین ذرات رس را کاهش می‌دهد و این امر باعث می‌شود تعداد بیشتری از ذرات رس با هم در تماس باشند. در این شرایط، ذرات رس بوسیله ژل ویسکوز ذکر شده به ذرات نانوسیلیس می‌چسبند و مطابق با نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت تراکم تک محوری در پژوهش حاضر، چسبندگی خاک تثبیت شده از چسبندگی خاک طبیعی بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، سطح تماس مؤثر بین ذره ای در ذرات رس با افزایش درصد نانوسیلیس افزایش می‌یابد و در نتیجه، مقاومت پیوند و در نهایت زاویه اصطکاک داخلی مخلوط خاک و نانوسیلیس افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی همچنین در برخی پژوهش‌ها به دست آمده است [۲۱، ۲۲]. مقایسه سه سری مقاومت فشاری خاک‌های رسی در درصدهای مختلف افزودنی نانوسیلیس نشان می‌دهد که درصد بهینه افزودنی برای همه پارامترهای مذکور برابر با ۰/۸٪ نانوسیلیس می‌باشد. به طوری که با افزایش افزودنی نانوسیلیس از ۰ تا ۰/۸٪، شاهد افزایش مقاومت و بعد از آن شاهد کاهش مقاومت هستیم (اشکال ۸ الی ۱۰).

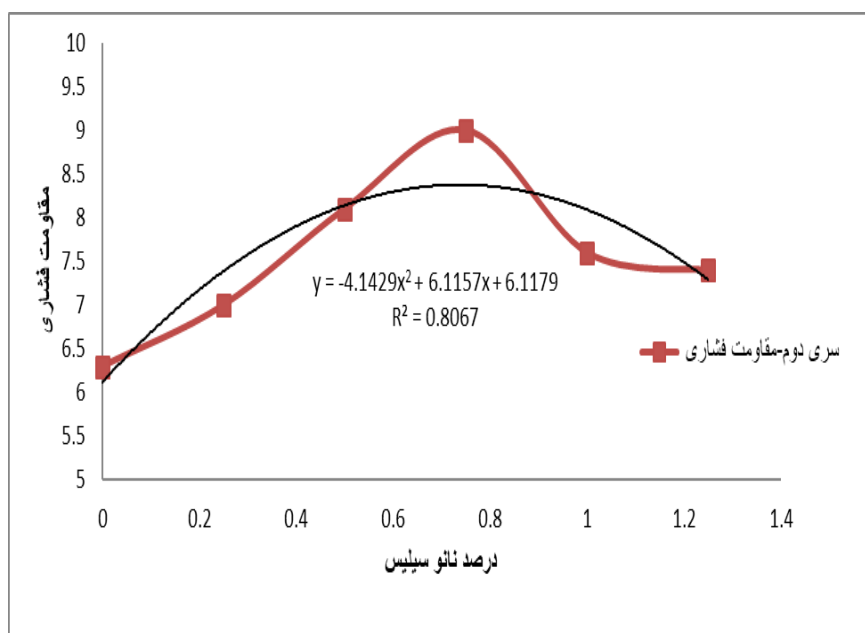


پیوند و فاصله بین ذرات رس

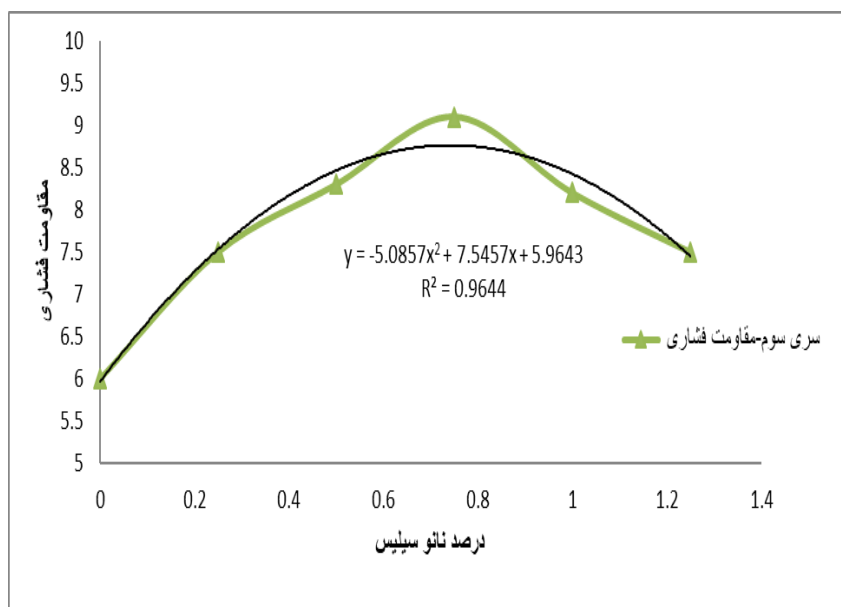
شکل ۷- تاثیر نانوسیلیس در



شکل ۸- مقایسه سه سری مقاومت فشاری خاک رسی در درصدهای مختلف افزودنی نانوسیلیس



شکل ۹- رابطه تخمینی بین درصد نانوسیلیس و مقاومت فشاری خاک رسی



شکل ۱۰- رابطه تخمینی بین درصد نانوسیلیس و مقاومت فشاری خاک رسی

بررسی اثرات نانوسیلیس بر روی مقاومت فشاری خاک بسیار ضروری و مهم قلمداد می‌گردد چرا که برخی خاک‌ها به علت دارا بودن ویژگی‌های فنی نامطلوب برای برخی از پروژه‌های عمرانی مناسب نمی‌باشند و نامرغوب محسوب می‌شوند. این گونه خاک‌ها بعضاً به دلیل حساسیت و ناپایداری در برابر رطوبت، مقاومت کم و تراکم پذیری مشکلات فراوانی را از نظر فنی و اقتصادی ایجاد می‌کنند. با استناد به نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌توان ذکر کرد که ذرات نانو با توجه به سطح ویژه بالای خود و بار سطحی که دارند، باعث فعل و انفعالات بین ذره‌ای می‌شوند. از دلایل دیگر اثر ذرات نانو، تخلخل درون ذره‌ای می‌باشد، که در این سوراخ‌ها بدلیل جذب و هیدراسیون در خلال فرایند تشکیل شدن معدنی آب وجود دارند که اگرچه آب موجود در این سوراخ‌ها نمی‌تواند بر فعل و انفعالات بین ذره‌ای اثر بگذارد، می‌تواند بر

حدود اتربرگ بزرگ نانو ذرات متخلخل اثرگذار باشد. از دلایل دیگر تأثیر ماده نانو روی خصوصیات اتربرگ خاک می‌توان به ساختار متراکم نانو که شامل سوراخ‌هایی می‌باشد، اشاره نمود که با آب پر می‌شوند و همانند آب موجود درون ذره ای روی حدود اتربرگ تأثیر می‌گذارند. از اینرو اضافه نمودن نانو به خاک باعث تغییر در خصوصیات خمیری و روانی خاک می‌شود [۲۳]. لذا افزایش مقاومت خاک‌هایی که با نانوسیلیس ترکیب می‌شوند به دلایل افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بوده است که این خود به دلیل قفل و بست قابل قبول بین ذرات می‌باشد. البته برای خاک‌های ریزدانه افزایش مقاومت بیشتر بدلیل افزایش چسبندگی در خاک می‌باشد [۱۵].

۳- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت که نانوذرات سیلیس باعث بهبودی خواص و ویژگی خاکها بخصوص خاک‌های چسبنده نظیر رس می‌شوند. در مهندسی ژئوتکنیک، خاک‌های رسی در برخی موارد به عنوان خاک‌های مسئله‌دار از نظر ظرفیت باربری، تورم، رمبندگی، نشست و غیره مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است. از دیر باز، استفاده از افزودنی‌ها به منظور بهسازی خاک‌های رسی در راستای بهبود تراکم، کاهش تورم، بهبود مقاومت و پایداری مورد نظر پژوهشگران حوزه مهندسی ژئوتکنیک بوده است. این در حالی است که به استفاده از نانومواد در مهندسی ژئوتکنیک کمتر توجه شده است. به همین دلیل در مطالعه حاضر، تأثیر افزودنی نانوسیلیس در خواص مهندسی نمونه خاک رس بررسی شده است. بدین منظور از نانوسیلیس در تثبیت خاک‌های رسی در منطقه جلفا (شمال غرب استان آذربایجان شرقی) با درصدهای مختلف استفاده و ضمن انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، شاخص تراکم پذیری و تورم بررسی شد. نکته جالب توجه در مطالعه حاضر این است که درصد بهینه افزودنی برای همه پارامترهای مذکور برابر با ۰/۸٪ نانوسیلیس می‌باشد. به طوری که با افزایش افزودنی نانوسیلیس از ۰ تا ۰/۸٪، شاهد افزایش مقاومت و بعد از آن شاهد کاهش مقاومت هستیم. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که درصد افزودنی نانوسیلیس جهت مقاومت فشاری بهینه در خاک رسی در این منطقه حدود ۰/۸ درصد می‌باشد. همچنین مقایسه سه سری مقاومت فشاری خاک رسی در درصدهای مختلف افزودنی نانوسیلیس، حداقل مقاومت را حدود ۶ و حداکثر مقاومت را حدود ۹ نشان می‌دهد. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که تثبیت خاک با نانوسیلیس، روشی مؤثر برای بهسازی خاک است که طی آن مقاومت فشاری تک محوری خاک بهبود می‌یابد و در نتیجه پایداری سازه‌هایی نظیر پی و بستر راه افزایش می‌یابد.

سپاسگزاری

اینجانب بر خود لازم می‌دانم از مدیریت و اساتید گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر و جلفا و همچنین از آقای مهندس علی صادقی گرگری، به خاطر همکاری‌های صمیمانه و دقیق در انجام آزمایشات مربوطه، تشکر و قدردانی نمایم.

مراجع

- [1] Pirmohammadi Alishah, F. Investigation of nano-silica effects on Coarse-grained soil's compressive strength: A case study for Aras Free Trade Zone (AFTZ). *Geotechnical Geology*, 2021; 17(2): 521-526. doi: 10.30495/geotech.2021.686398.
- [2] pirmohammadi alishah, F., Mohammad Rezaei, M. Investigation of the effect of diameter, distance and angle of micropiles on the stability of slopes under Steady State Seepage. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 2022; 15(1): 9-28.
- [3] Li, G, Properties of high volume Fly ask concrete incorporating nano-sio₂, *Cement and Concrete Research*, 34(6), pp. 1043-1049,2004.
- [4] Kalkan, E. and Akbulut, S ,The positive effects of silica fumeonthe permeability ,swelling pressure and compressive strength of natural clay liners, *Engineering Geology*, 73(1), pp. 145-156, 2004.
- [5] Gallagher, P.M. and Lin, Y, Column testing to determinecolloidsilicatransportmechanisms,Geo-Frontiers Congress. Austin, Texas, United States,2005.
- [6] Gallagher, P.M., Conlee, C.T. and Rollins, K.M, Full scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), pp. 186-196, 2007.
- [7] Karimi, M., Ghorbani, A., Daghigh, Y. and et al, Stabilization of silty sand soils with lime and microsilica admixture in presence of sulfates", 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Toronto, Canada, 2011.
- [8] Moayed, R.Z., Izadi, E. and Heidari, S, Stabilization of saline silty sand using lime and micro silica, *Journal of Central South University*, 19(10), pp. 3006-3011,2012.
- [9] Bahmani, S., Huat, B.B.K., Asadi, A. and et al, Stabilization of residual soil using Sio₂ nanoparticles and cement, *Construction and Building Materials*, 64(14), pp. 350-359,2014.
- [10] Pham, H. and Nguyen, Q.P, Effects of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersion, *Journal of Nanoparticle Research*, 16(2137),2014.
- [11] Khalid, N., Arshad, M.F., Mukri, M. and et al, Influence ofnano-soilparticlesinsoftsoilstabilization, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20(2), pp. 731-738,2015.
- [12] Modarresi, A. and Nosoudy, Y,Clay stabilization using coal waste and lime-Technical and environmental impacts, *Applied Clay Science*, 116-117, pp. 281-288,2015.
- [13] Ghasabkolaei, N., Janalizadeh, A., Jahanshahi, M. and et al,Physical and geotechnical properties cement treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study, *The European Physical Journal Plus*, 131(5), pp. 1-11,2016.
- [14] Ghasemi Panah, A, Moayed, RZ, and Nirmood, H,The Effect of Nanosilica Addition on Geotechnical Properties of Kerman Fine Soil, Third National Geotechnical Engineering Conference, Tehran, Iran Geotechnical Society, 2018.
- [15] Rajabi, AM, and Heidary, AR,Experimental Investigation of the Effect of Nanosilica on Resistance and Strengthening Parameters of Clay Soils of Karaj, *Civil Engineering Journal*, Sharif University, 35(2), pp.65-72, 2019.
- [16] ASTM D1556-82., 1982, Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cons Method, (E1) edition.
- [17] ASTM D422-63, Standard test method for particlesize analysis of soil, ASTM International, West Conshohocken, PA., 2007.
- [18] ASTM D4318., Standard test Methods for Liquid Limit. Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, (1998 Edition),1998.
- [19] ASTM D698., Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, *Book of Standards Volume: 04.08*,2007.

- [20] ASTM D2166-85, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, (1985 Edition), 1998.
- [21] Landman, J., Paineau, E., Davidson, P. and et al, Effects of added silica nanoparticles on the nematic liquid crystal phase formation in beidellite suspensions, J. Phys. Chem. B., 118(18), pp. 4913-4919, 2014.
- [22] Changizi, F., and Haddad A, A. Effect of nano-SiO₂ on the geotechnical properties of cohesive soil, Geotech. Geol. Eng., 34(2), pp. 725-733, 2016.
- [23] Mitchell, J.K., Soga, K, Fundamentals of soil behavior, 3th end, John Wiley and Sons, New York, 2005.