Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538

Research Article

Effect of Polypropylene Fibers and Silica Nano Colloids on Stabilized Soft Soil Under Melting Cycle

Pegah Ardalani [a,*], Hasan Sharafi [b]

[a] *Master's student in Geotechnics, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran*
[b] *Associate Professor, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received: 02 May 2022
Revised: 26 July 2023
Accepted: 21 August 2023

Keywords:

soft clay soil;
silica nano collioid;
lime;
fibers;
themelting and freezing cycle.

ABSTRACT

Today, cement is used as the most widely used and most common soil stabilizer. But considering the adverse environmental effects of cement, the necessity of using geopolymers as a suitable alternative to cement is important due to the favorable environmental aspects. In this study, lime-based geopolymer and nanomaterials, which include nanocolloidal silica and fibers, have been used to stabilize kaolinite soil. Various parameters such as the type of nanomaterials, the amount of nanomaterials, the proportion of alkaline activating solution and the processing time were considered as factors affecting the behavior of the stabilized samples. In order to evaluate the effect of geopolymer and nanomaterials on the mechanical behavior of the samples, unconfined compressive strength and tensile strength of the Vikh melting vesicle, which were the main criteria for comparing the samples, have been performed. On the other hand, XRD and SEM analysis was done to investigate the microstructure of stabilized soil. The results show that geopolymers based on fibers and nanomaterials are a suitable alternative to cement materials in soil stabilization, so that adding fibers and nanomaterials to soil increases the strength and improves the mechanical behavior of the samples. On the other hand, by increasing the amount of nanomaterials up to 5% and alkaline solution, the compressive and tensile strength of the samples increases. It is a strong reaction agent of chemical additives and the formation of aluminosilicate gel in geopolymer compounds, which increases the bearing capacity of the soil and stabilizes it.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2023.26525.2238

© 2023 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: hasansharafi1@gmail.com

How to cite this article:
Ardalani, P., & Sharafi, H. (2023). Effect of polypropylene fibers and silica nano colloids on stabilized soft soil under melting cycle. Journal of Modeling in Engineering, 21(75), 269-283. doi: 10.22075/jme.2023.26525.2238

مقاله پژوهشی

اثر الیاف پلی پروپیلن و نانو کلوئید سیلیس بر روی خاک نرم تثبیت شده تحت سیکل ذوب ویخ

پگاه اردلانی [۱*]، حسن شرفی [۲]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۲
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰

واژگان کلیدی:
خاک نرم رسی،
نانو کلوئید سیلیس،
آهک،
الیاف،
سیکل ذوب ویخ .

چکیده

امروزه سیمان به عنوان پرمصرف‌ترین و رایج‌ترین تثبیت‌کننده خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی با توجه به آثار نامطلوب زیست محیطی سیمان، ضرورت استفاده از ژئوپلیمرها بدلیل جنبه-های مطلوب زیست محیطی به عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان حائز اهمیت می‌باشد. در این مطالعه، از ژئوپلیمر بر پایه آهک و نانومواد که شامل نانوکلوئیدسیلیس والیاف می‌باشد، برای تثبیت خاک کائولینیت استفاده شده است. پارامترهای مختلف مانند نوع نانومواد، مقدار نانومواد، نسبت محلول فعال‌کننده قلیایی و زمان عمل آوری به عنوان عوامل موثر بر رفتار نمونه‌های تثبیت شده مورد توجه قرار گرفت. برای ارزیابی تاثیر ژئوپلیمر و نانومواد بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده و مقاومت کششی و سیکل ذوب و یخ در دمای ۲۵-۵۰ درجه سانتی‌گراد که معیار اصلی مقایسه نمونه‌ها بوده‌اند، انجام شده است. از طرفی تحلیل XRD و SEM جهت بررسی ریزساختاری خاک تثبیت شده، انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ژئوپلیمر بر پایه الیاف و نانومواد، جایگزین مناسبی برای مواد سیمانی در تثبیت خاک هستند، به طوری که افزودن الیاف و نانومواد به خاک باعث افزایش مقاومت و بهبود رفتار مکانیکی نمونه‌ها می‌شود. از طرفی با افزایش میزان نانومواد تا ۵ درصد و محلول قلیایی، مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقاومت‌های به دست آمده، با مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سیمان مورد مقایسه قرار گرفته شده است. همچنین نتایج تحلیل ریزساختاری نشان‌دهنده واکنش شدید افزودنی‌های شیمیایی و تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی در ترکیبات ژئوپلیمری است که خود باعث افزایش ظرفیت باربری خاک و تثبیت آن می‌شود.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2023.26525.2238

© 2023 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱-مقدمه[۱]

در بسیاری از کشورها جهان، حوزه وسیعی از سطح زمین با خاک های نرم وسست پوشیده شده‌اند. انجام پروژه‌های عمرانی بر روی این گونه خاک‌ها به دلیل مقاومت فشاری کم، مقاومت برشی ضعیف، تراکم‌پذیری بالا، حساسیت به دست خوردگی، ظرفیت باربری نامناسب، نشست و ویژگی دوام، مشکل‌ساز است. لذا برای بهتر شدن چنین شرایطی از روش‌های تثبیت استفاده می‌شود [۱]. تقویت خاک‌های سست و نامناسب جهت ایجاد خاکی با خصوصیات مهندسی دلخواه و به کارگیری، آن در مهندسی عمران تثبیت نامیده می‌شود [۲]. یکی از رایج‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های تثبیت، روش شیمیایی است. در تثبیت شیمیایی، مصالحی که چسبندگی دارند، به منظور بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، شامل مقاومت و دوام به خاک¬های نرم وسست افزوده می‌شوند [۳]. از جمله مصالح با خصوصیات چسبندگی، سیمان است. سیمان از سال ۱۹۵۰به عنوان

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: hasansharafi1@gmail.com
۱ .دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲. دانشیار ، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

استناد به این مقاله:
اردلانی، پگاه، و شرفی، حسن. (۱۴۰۲). اثر الیاف پلی پروپیلن و نانو کلوئید سیلیس بر روی خاک نرم تثبیت شده تحت سیکل ذوب ویخ. مدل سازی در مهندسی، ۲۱(۷۵)، ۲۶۹-۲۸۳ . doi: 10.22075/jme.2023.26525.2238

رایج‌ترین تثبیت-کننده برای ساخت بستر، زیر اساس و اساس در مهندسی عمران استفاده شده است. تثبیت باسیمان، یک تکنولوژی است که برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی انواع گسترده‌ای از خاک‌ها استفاده می‌شود [۴]. از معایب سیمان می‌توان به مسائل زیست محیطی به ویژه مصرف انرژی بالا وانتشار گاز گلخانه‌ایی در هنگام تولید آن اشاره کرد [۳]. به ازاء تولید هر تن سیمان ۹۵٪ تن co2 تولید می‌شود که ۵۰۰۰ مگاژول انرژی و ۱/۵ تن منابع تمام شدنی شامل سنگ آهک و رس مصرف می‌شود [۵]. حدود ۷٪ از انتشار گاز co2 در جهان به تنهایی مربوط به صنعت سیمان است [۶]. بنابراین نیاز به یک ماده نوین به لحاظ زیست محیطی و خاصیت چسبندگی نسبت به سیمان بهینه‌تر باشد، احساس می‌شود که ژئوپلیمر می‌تواند جاگزین مناسبی باشد. ژئوپلیمر از واکنش بین مصالح آلومینوسیلیکات و محلول قلیایی برای تولید پیوند شیمیایی قوی حاصل می‌شوند [۷] و [۲۴]. در ابتدا در سال ۱۹۵۰ از ژئوپلیمر با عنوان سیستم‌های فعال‌کننده قلیایی برای ساخت یک ساختمان بلند مرتبه در روسیه استفاده شده است [۸]. درسال ۱۹۷۲، سیستم‌های فعال کننده‌ی قلیایی، ژئوپلیمر نام گذاری شد [۹]. ژئوپلیمرها انواع متنوعی دارند، لذا در گزارشی در سال ۲۰۱۱ از لحاظ اقتصادی، هزینه یژئوپلیمر نسبت به سیمان ۷٪ کمتر تا ۳۹٪ بیشتر است [10].

در پژوهش حاضر، از آهک به عنوان ماده خام ژئوپلیمر و نانوکلوئیدسیلیس به عنوان افزودنی ماده خام ژئوپلیمر سدیم هیدروکسید به عنوان جزء قلیایی ژئوپلیمر استفاده شده است.

اولوا و همکاران (۲۰۱۸)، سنتز ژئوپلیمر از زئولیت طبیعی و بهبود خواص مکانیکی خاک ماسه بادی را بررسی کردند. برای این منظور، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها بررسی شد و طرح اختلاط مطلوب و بهینه به عنوان تابعی از مقاومت فشاری تعیین شد. در طرح اختلاط بهینه، غلظت محلول فعال‌کننده ۱۴ مولار، نسبت محلول فعال‌کننده قلیایی به زئولیت جامد ۰/۵، نسبت ماسه به زئولیت ۱/۵ و دمای بهینه سنتز ۶۰ درجه سانتی گراد بود [۱۱]. چناروبینی و همکاران در سال ۲۰۲۰ تحقیق تحت عنوان "تاثیر تثبیت‌کننده زئولیت و سیمان بر رفتار مکانیکی خاکهای متورم شونده" انجام دادند. هدف از این مطالعه، ارزیابی تأثیر جایگزینی نسبی سیمان با زئولیت بر رفتار مکانیکی خاک متورم شونده تثبیت‌شده با سیمان است. چهار درصد مختلف سیمان (۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد) و درصدهای مختلف جایگزینی سیمان با زئولیت (۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰) طرح شد، سپس آزمایش های تراکم با روش پروکتور استاندارد و مقاومت فشار محدود نشده انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن سیمان منجر به افزایش حداکثر چگالی خشک (MDD) و رطوبت بهینه (OMC) مخلوط خاک و سیمان شد، در حالی که افزایش محتوای زئولیت منجر به روندهای مخالف شد. بعد از ۲۸ روز از دوره عمل آوری، جایگزینی سیمان با ۳۰ درصد زئولیت نیز منجر به دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)شد. حداکثر میزان بهبود UCS از ۱۲ درصد سیمان با ۳۰ درصد زئولیت در نمونه جایگزین شده بدست آمد. اغلب، نمونه‌هایی با محتوای سیمان بیشتر به خوبی کارایی محتوای زئولیت بهینه را ثابت کرد. علاوه بر این، شکنندگی با افزودن زئولیت به مخلوط با مشاهده حالت‌های خرابی نمونه‌های تثبیت‌شده کاهش می یابد. مشابه نتایج آزمایش قبلی، بیشترین سختی (E50) در ۳۰ درصد محتوای زئولیت اندازه‌گیری شد. در نهایت، پارامتر ترکیب فعال (AC) معرفی شد، که نشان می‌دهد بالاترین میزان بهبود قدرت را می توان با جایگزینی سیمان با ۳۰ درصد زئولیت در محتویات مختلف سیمان به دست آورد [۱۲].

کامارودین و همکارانش در سال ۲۰۲۰ مقاله‌ای با عنوان "بهبود خاک‌رسی دریایی با استفاده از تثبیت‌کننده آهک و فعال‌سازی قلیایی با گنجاندن الیاف Coir (الیاف دور میوه نارگیل) اصلاح شده" انجام دادند. در این مطالعه، دو نوع مختلف از تثبیت کننده خاک - آهک و فعال‌کننده قلیایی (AA) با گنجاندن الیاف کوکوپیت (Coir) به عنوان مسلح کننده خاک در خاک رس دریایی، مورد بررسی قرار گرفت. گنجاندن الیاف در خاک تثبیت شده تأثیر مثبت در افزایش مقاومت خاک دارد. بنابراین، برای ارزیابی اثربخشی تثبیت خاک، آزمایشات مکانیکی مانند مقاومت کششی غیر مستقیم، آزمایش خمشی و آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در سه دوره مختلف عمل آوری (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) روی خاک شاهد و تثبیت شده انجام شد. حضور الیاف در خاک تثبیت شده به دلیل افزایش نیروی سطحی و ترکیب ذرات خاک سبب چسبندگی ذرات قویتر وافزایس مقاومت خاک شده است. تجزیه و تحلیل ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) و انرژی اشعه ایکس

پراکندگی (EDX) نیز پس از برش برای ارزیابی تغییرات خاک قبل و بعد از تثبیت انجام شد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که عمل تثبیت ساختار خاک را به متراکم شدن تغییر داده است، بطوری که منافذ بزرگ را در مقایسه با خاک تثبیت نشده پر می‌کند [۱۳].

اکبری و همکاران در سال ۲۰۲۱ پژوهشی تحت عنوان " تاثیر الیاف پلی پروپیلن و نانو زئولیت بر خاک نرم تثبیت شده تحت چرخه مرطوب و خشک" انجام دادند. در این مطالعه نانو زئولیت به عنوان جایگزین قسمتی از آهک استفاده شده است که سپس الیاف پلی پروپیلن در ترکیب خاک تثبیت شده، برای توسعه روش تثبیت خاک با آهک و بهبود کارایی خاک این تکنیک، گنجانده شده است. با انجام این کار، نمونه¬های خاک نرم با اصلاح کننده آهک، آهک-نانو زئولیت و آهک-نانوزئولیت-الیاف (LZF) آماده شدند و در معرض ۱-۷ چرخه خشک و مرطوب قرار گرفتند. نمونه خاک کائولینیت ابتدا با درصدهای مختلف آهک (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد در وزن خشک) و نانو زئولیت (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۵ درصد آهک) تثبیت شد تا درصد بهینه نانو زئولیت هم مشخص شود. سپس، آزمایشات تراکم، EC، pH، UCS، Eu، مقاومت کششی غیر مستقیم(ITS) ، XRD و SEM بر روی نمونه¬های خاک کائولینیت تثبیت شده انجام گردیده است. تجزیه و تحلیل نشان داد که جایگزینی بهینه آهک با نانو زئولیت ٪۴۰ خواهد بود و مقدار بهینه الیاف پلی پروپیلن اضافه شده در ترکیب خاک تثبیت شده نیز ٪۱ خواهد بود. کاهش عمده در مصرف آهک مقاومت فشاری را ۴۰ درصد و دوام را ۲۱ درصد افزایش داد. نتایج همچنین نشان داد که نمونه حاوی ٪۱۵ LZF دارای دوام عالی در برابر شرایط محیطی و عملکرد بسیار خوب از نظر مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)، مقاومت کششی و کاهش وزن می‌باشد. قبل و پس از اعمال ۷ چرخه تر-خشک، UCS به ترتیب ۳۹ و ۱۶ درصد افزایش یافت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اصلاح‌کننده LZF یک گزینه مناسب برای تثبیت مبتنی بر آهک در مناطق تحت چرخه مرطوب و خشک است [۱۴].

اکبری و همکاران در سال ۲۰۲۰ تحقیقی با عنوان "اثر گنجاندن الیاف پلی پروپیلن در خاک رس کائولن تثبیت شد با آهک و نانو زئولیت در دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتی گراد" انجام دادند. در این تحقیق آزمایشات EC، pH، مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)، E50، Eu، مقاومت کششی غیر مستقیم(ITS) ، XRD و SEM بر روی خاک کائولن در دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد انجام شده است. بر اساس نتایج، جایگزینی آهک با نانو زئولیت بر خواص مکانیکی تأثیر مفیدی دارد. افزودن نانوذرات تا ۴۰ درصد به عنوان جایگزین بهترین کارایی بر روی مقاومت نمونه های تثبیت‌شده، به ویژه در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد دارد. به طوری که نمونه‌های حاوی آهک ۱۰٪ با ۴۰٪ جایگزینی نانو زئولیت پس از ۲۸ روز عمل آوری در دمای ۲۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد، مقاومت فشاری در حدود ۲۰ و ۷ برابر در مقایسه با خاک رس کائولن نشان داد. افزایش مقدار آهک همچنین اوج انرژی کرنشی (Eu) مدول سکانت (E50) را افزایش داد. علاوه بر این، ترکیب الیاف، با وجود کاهش اندک مقاومت فشاری، قابلیت خوبی در افزایش مقاومت کششی و کرنش نمونه¬ها و در نتیجه افزایش انرژی کرنشی نشان داد. نتایج آزمایشات XRD و SEM نشان داد که افزودن مواد افزودنی در خاک کائولن باعث تغییر ساختار خاک شده است. نتایج تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) در طول واکنش پوزولانی می‌شود [۱۵].

شرما و کامر در سال ۲۰۲۰ مطالعه مروری با عنوان "بکارگیری ژئوپلیمرهای مبتنی بر زباله‌های صنعتی به عنوان تثبیت‌کننده خاک" انجام دادند. این مقاله مروری بر مطالعات مربوط به استفاده از ژئوپلیمرهای مبتنی بر زباله های صنعتی به عنوان تثبیت-کننده خاک تمرکز دارد. در این بررسی، فقط ژئوپلیمرهای به دست آمده از ضایعات جامد صنعتی در نظر گرفته شده است. اثرات پارامترهای مختلف ژئوپلیمرها مانند درصدهای مختلف مخلوط (٪)، مولاریت(M) ، دما(T) ، زمان عمل آوری (روز)، نسبت فعال‌کننده قلیایی (AA) و نسبت آب/چسبانند (w/b) روی خواص ژئوتکنیکی خاک مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر این، اثرات ریخت شناسی و رفتار ریزساختاری ژئوپلیمرها بر روی خواص ژئوتکنیکی خاک نیز مورد بحث قرار گرفته است. در این بررسی، مشخص شده است که ۵ تا ۲۰ درصد مخلوط ژئوپلیمر، مولاریت ۸-۱۲ مول، دمای ۲۵ تا ۴۵ درجه سانتی گراد، ۷ تا ۲۸ روز عمل، نسبت AA 5/1 تا ۲/۵ و نسبت w/b 35/0 تا ۰/۸۵ محدوده مطلوب پارامترهای ژئوپلیمر است که باعث بهبود چشمگیر در خواص ژئوتکنیکی خاک می‌شود. علاوه بر این، مطالعات تجزیه و تحلیل ریخت‌شناسی و ریزساختاری نشان می‌دهد

که تشکیل C -S –H ترکیبات ژل، سیلیکات، کلسیت و آلومینات عمدتا مسئول بهبود خواص ژئوتکنیکی هستند. خاک تثبیت شده با استفاده از ژئوپلیمرهای مبتنی بر زباله های صنعتی کاربردهای بالقوه‌ای در بهبود زمین، مصالح اساس و زیراساس روسازی‌های انعطاف‌پذیر دارد. علاوه بر این، این روش تثبیت خاک نه تنها از زباله‌های جامد صنایع صنعتی به صورت هدفمند استفاده می‌کند بلکه بسیار مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست هستند [۱۶]. ونگ و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی خاک‌های رسی در برابر سیکل‌های یخ زدن و آب شدن پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رس با افزایش تعداد سیکل‌های یخ زدن و آب شدن دچار تغییر می‌شود و مدول باقی‌مانده و مقاومت شکست بعد از ۳ تا ۷ سیکل یخ زدن و آب شدن، به حداقل مقدار خود رسید. بنابراین، مقاومت خاک‌ها در نواحی سرد نیاز به طراحی در هفت سیکل یخ زدن و آب شدن دارد [۱۷]. صدمات ناشی از یخ زدن و آب شدن، یکی از مشکلات اساسی خاک‌های ریزدانه محسوب می‌شود. مقاومت و دوام توسط سیکل‌های یخ زدن و آب شدن کاهش می‌یابد. ترک‌ها و شکاف‌های ایجاد شده، رایج‌ترین صدمات ناشی از یخ زدن و آب شدن محسوب می‌شود.

۲ -مواد وروش‌ها

۲-۱ -مواد و مصالح مصرفی

نمونه خاک:

جهت انجام آزمایشات این مقاله از خاک رس کائولینیت استفاده شده است[۲۲]. علت استفاده از خاک رس آن است که با توجه به تحقیقات گذشته، اثرات سیکل های یخبندان و ذوب یخ بر خاکهای ریزدانه بیشتر و مشهودتر می باشد. این خاک دارای نام تجاری زنوز می‌باشد و از کارخانجات چینی‌سازی شهرستان لالجین همدان تهیه شد. معدن تولیدی این خاک در استان آذربایجان شرقی واقع است. قبل از تهیه نمونه‌های آزمایشی، ابتدا مشخصات فیزیکی و شناسائی خاک طبق استانداردهای مندرج در ASTM تعیین گردید. نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین به منظور شناسائی کانی‌ها تشکیل دهنده این خاک، آزمایش XRD توسط آزمایشگاه سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد که براساس نتایج این آزمایش کانی‌های تشکیل دهنده خاک مورد بررسی به شرح زیر تعیین گردید :

کوارتز + کلسیت + فلدسپار +کانی

همچنین برای تعیین درصد این کانی ها به طور نسبی باید عناصر تشکیل دهنده خاک و درصد آن ها نیز تعیین شود. به این منظور آزمایش XRF نیز بر روی نمونه ها انجام شد تا عناصر موجود در خاک و درصد آنها تعیین گردد. نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات نمونه خاک مورد بررسی

ویژگی	مقدار
حد روانی ٪	۳۶
حد خمیری ٪	۱۶
دامنه خمیری ٪	۲۰
رطوبت طبیعی ٪	۵
رطوبت بهینه ٪	۲۰/۵
وزن واحد حجم خشک حداکثر (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۱/۶۶
طبقه‌بندی (یونیفاید)	cl

جدول ۲- نتایج آزمایشXRF

ترکیب عناصر	میزان (٪)
SiO_2	۴۵/۹
CaO	۱۴/۱
L.O.I	۱۲/۴۹
Al_2O_2	۱۰/۴
Fe_2O_2	۶/۳
K_2O	۳/۱
MgO	۲/۹
SO_3	۲/۶
Cl	۰/۷۹
Na_2O	۰/۵۹
TiO_2	۰/۵۵
P_2O_5	۰/۱۹
La&Lu	۱<

آهک:

آهک مورد استفاده در این پژوهش محصول شرکت آهک صنعتی سیمان شرق مشهد می باشد. آهک صنعتی از نوع شکفته می‌باشد. مواد تشکیل دهنده این آهک بر اساس نتایج XRF انجام شده مطابق جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- ترکیبات شیمیایی آهک شکفته

CaO	SiO_2	$Al_2O_3+Fe_2O_3$	MgO
۶۸ درصد	۰/۶ درصد	۱/۳ درصد	۰/۵ درصد

الیاف:

الیاف پلی پروپیلن مصرفی در این پژوهش از شرکت تولید الیاف پلی پروپیلن (سهام عام) تهیه گردیده که مشخصات آن در جدول ۴ آمده است [۲۳].

جدول ۴- مشخصات الیاف پلی پروپیلن

مشخصات	مقادیر
شکل ظاهری	الیاف سفید رنگ
نوع الیاف	الیاف تکی
وزن مخصوص	۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
طول	۱۲ میلیمتر
قطر متوسط	در حدود ۲۰ میکرون
مقاومت کششی	۳۵۰ نیوتن بر میلی‌مترمربع
نقطه ذوب	۱۶۰ درجه سانتیگراد
شرایط نگهداری	در محیط خشک
مدت نگهداری	در شرایط ایده آل نامحدود
رسانای الکتریکی و حراراتی	کم
مقاومت در محیط اسید و قلیایی	خیلی خوب
بسته‌بندی	کیسه‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۴۰ کیلوگرمی

تاکنون از الیاف پلی پروپیلن به عنوان افزودنی، برای مسلح نمودن انواع بتن و مخلوط‌های سیمانی و گچی استفاده گردیده است. دچار زنگ، الیاف پلی پروپیلن با قابلیت نگهداری طولانی آب‌زدگی و خوردگی نمی‌شود. همچنین در برابر بسیاری از موارد خورنده مانند اسیدها و بازها مقاوم بوده و تخریب نمی‌شود.

نانوکلوئید سیلیس:

نانو سیلیس مورد استفاده در این پژوهش محصول شرکت نانو لوتوس پارس ایران می‌باشد. نتایج آنالیزهای TEM SEM در جداول ۵ و ۶ آمده است.

جدول ۵- ترکیب شیمیایی نانو کلوئید سیلیس

SiO_2	۶۳/۹
Co	۰/۰۸
Fe	۰/۰۹
Fe_2O_3	۰/۰۳۸
K_2O	۴/۳
Na_2O	۱۷/۳
MgO	۰/۱۵
Al_2O_3	۰/۱۵
SO_3	۰/۳۹
CaO	۰/۰۸۷

جدول ۶- مشخصات نانو سیلیس

خصوصیات	مقادیر
حالت	مایع
اندازه ذرات	nm ۵-۳۵
PH	۱۳
رنگ	شفاف
ویسکوزیته cps	۱۰<
چگالی gr/cm^3	۱/۰۵ تا ۱/۴

۲-۲-روش انجام آزمایش

۲-۲-۱ - روش تیمار آزمایش

براساس نتایج تحقیقات قبل، نظیر اثنی عشر و جعفری (۱۳۸۹) و کبیر و همکاران (۱۳۸۹) مشخص گردیده است که حداکثر میزان آهک در مطالعات آزمایشگاهی ۸٪ و مقادیر بهینه ۴ الی ۵٪ بوده است [۱۸] و [۱۹]. تجربیات قضاوی و روستایی (۲۰۰۹) نشان داده است که حداکثر کاربرد الیاف پلی پروپیلن ذر خاک رسی ۳٪ می‌باشد [۲۰]. اما در حین آزمایشات مقدماتی و قبل از شروع مراحل اصلی این پژوهش مشخص گردید استفاده بیش از ۱٪ الیاف، سبب می‌شود تا اختلاط آن با خاک با دشواری زیادی مواجه شود و عملا موجب پخش غیر یکنواخت الیاف در نمونه‌ها شود. علاوه بر آن، استفاده همزمان آهک و الیاف پلی پروپیلن از نظر شرایط اقتصادی اقتضا می‌کند که درصد پایین الیاف انتخاب شود. در خصوص تعداد دوره‌های انجماد و آب شدن با مراجعه به مطالعات انجام شده توسط ونگ و همکاران (۲۰۰۷)، قضاوی و روستایی (۲۰۰۹) و موارد مشابه دیگر مشخص گردید که بیشتر تغییرات در بافت خاک تا دوره ۷ام به وقوع می‌پیوندد [۲۱].

بنابراین در این پژوهش برای بررسی اثر مقادیر آهک والیاف پلی پروپیلن بر مشخصات مکانیکی خاک رسی، ۱۴ تیمار مرکب از ۵ سطح آهک (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰) وزن خشک خاک و و نانو کلوئیدسیلیس (۰، ۵ درصد آهک) در دمای (۲۵ و۵۰) و زمان عمل‌آوری (۱، ۷، ۱۴، ۲۸) تهیه گردید. برای تعیین اثر دوره‌های انجماد- آب شدن بر روی ترکیبات مورد نظر از هر تیمار ۱۲ نمونه تهیه شد که به ترتیب دوره های (۱، ۳، ۶، ۹ام) انجماد–آب شدن را تحمل نمودند. برای دقت بیشتر و انجام مطالعات آماری، هر نمونه با ۳ تکرار تهیه گردید. به منظور اطمینان از گیرش کامل مخلوط خاک-آهک – الیاف، کلیه نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در کیسه نایلون در دمای مناسب عمل آوری شدند.

برای مرحله انجماد و آب شدن، نمونه‌ها پس از ۲۸ روز در یک یخچال در دمای ۲۰- درجه سیلسیوس برای ۶ ساعت قرار داده شدند وآنگاه برای آب شدن در دمای ۲۵+ درجه سیلسیوس برای ۶ ساعت قرار داده شدند. این دماها یکی از دماهایی هستند که در تحقیقات قبلی که توسط کی و همکاران (۲۰۰۴) انجام شد مشخص گردید. ۶ ساعت دوره زمانی مناسبی است که پس از آن که هر کدام از این ۱۲ تیمار مراحل آماده‌سازی، عمل‌آوری و سپس دوره‌های یخبندان – ذوب انجماد را تحمل نمودند و آماده انجام آزمایش فشاری محصور نشده شدند. برای شناسایی هر کدام از نمونه ها از یک کد معین به صورت ((R, C ,L% ,pp% استفاده شد که در آن R ,L ,C ,pp به ترتیب درصد الیاف، درصد آهک، شمار دوره‌های تحمیل شده یخبندان –ذوب انجماد و شمار تکرار است.

۲-۲-۲-روش ساخت نمونه

در این آزمایشات از درصد رطوبت ۲۰/۵ درصد (رطوبت بهینه) و جرم مخصوص ماکزیمم خشک ۱/۶۶ گرم بر سانتی مترمکعب برای ساختن نمونه‌ها استفاده شده است.

برای آماده‌سازی نمونه‌ها و اختلاط آنها با الیاف پلی پروپیلن، ابتدا مقدار خاک مناسب مرطوب شده برای یک نمونه و مقدار الیاف مورد نظر را به شش قسمت مساوی تقسیم کرده؛ سپس هر قسمت خاک با یک قسمت الیاف مخلوط شده‌اند (شکل۱). همانطور که گفته شد با توجه به سایر تحقیقات انجام شده در مورد الیاف پلی پروپیلن و همچنین تجربیات و نتایج بدست آمده از تجارب قبلی، از ۱ درصد وزنی خاک جهت مسلح‌سازی خاک توسط الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده قرار گرفته‌اند، زیرا اختلاط و ساخت نمونه‌های خاک با مقدار الیاف بالای کاری بسیار مشکل بوده و در نهایت نمی‌توان به یک نمونه همگن دست یافت. سپس خاک مخلوط شده با الیاف روی شیشه کار ریخته می‌شود و آهک، نانو کلوئید سیلیس، محلول فعال‌ساز قلیایی و آب مقطر به مقدار معین بدان افزوده شده و به خوبی ورز داده می‌شود طوری که مخلوط خاک تر همگنی تشکیل گردد. برای تهیه نمونه، از قالبی فلزی با قطر داخلی ۵ سانتیمتر و ارتفاع برابر ۱۰ سانتیمتر استفاده شده است. لازم به ذکر است که سطح داخلی قالب کاملا با روغن پوشیده شد تا بتوان به سهولت نمونه را بدون تغییر شکل از آن خارج کرد. همانطور که گفته شد خاک در شش لایه در قالب ریخته شد و پس از ریختن هر لایه توسط یک سمبه و چکش با تعداد ضربات مساوی (چهار ضربه) نمونه متراکم گردید. شایان ذکر است که عمل تراکم در تمامی نمونه‌های ساخته شده بطور یکسان صورت گرفت تا نمونه‌ها دارای تراکم نسبتا یکسان شوند. ضمنا هنگام افزودن لایه بعدی، سطح لایه قبل را توسط چاقوی نوک تیز شیار داده شد تا پیوستگی و پیوند لازم بین لایه‌های خاک ایجاد شود. سپس نمونه با استفاده از تجهیزات از داخل لوله درآورده می‌شود (شکل۲). سپس نمونه‌ها داخل نایلون پیچیده می شود تا به محل نگهداری در دستگاه ژرمیناتور منتقل شود و به مدت معین داخل دستگاه عمل‌آوری گردد. بعد از در آوردن نمونه‌ها از داخل دستگاه، نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی و سیکل ذوب –انجماد قرار گرفته‌اند. بعد از در آوردن نمونه‌ها از داخل دستگاه، نمونه‌ها تحت سیکل‌های مختلف ذوب-یخ قرار گرفته و بعد از اعمال سیکل‌های یخبندان و ذوب، همه آنها تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی قرار می‌گیرند.

شکل ۱- تقسیم الیاف به شش قسمت مساوی و الیاف اضافه شده به خاک در داخل قالب

شکل ۲- آماده‌سازی نمونه خاک کائولینیت تثبیت شده با ژئوپلیمر

۲-۲-۳ -آزمایش های آزمایشگاهی

آزمایش تراکم:

برای تعیین مشخصات تراکمی، مخلوطهای مختلف و براساس استاندارد ASTM D-698 آزمایش انجام شد تا نمونه‌های مورد نظر با درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر بدست آمده از این آزمایش ساخته

شوند.

آزمایش فشاری محصور نشده:(UCS)

روش استاندارد برای انجام آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده طبق ASTM-D2166 انتخاب شده است. این استاندارد ارائه دهنده روش تعیین مقاومت فشاری محصور نشده خاکهای چسبنده در شرایط دست نخورده، بازسازی شده و یا متراکم شده با بارگذاری کنترل کرنش است. آزمایش¬های تک محوری به کمک دستگاه سه محوری انجام شده است. در شکل ۳-۲۲ نمایی از دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده و دستگاه ۳ محوری نشان داده شده است. برای اعمال تنش به نمونه‌ها از بار ۱۰ کیلو نیوتن و برای تغییر شکل از حسگر تغییر مکان استفاده گردیده است. در این مقاله، جهت افزایش دقت در اندازه‌گیری‌ها با امکانات ثبت اطلاعات به صورت خودکار از دستگاه سه-محوری استفاده شده است. در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، با در نظر گرفتن همگنی کرنش و همسانی مصالح و با اندازه‌گیری نیروی محوری F، ارتفاع H ، و قطر D، می‌توان تنش‌ها وکرنش‌ها را بصورت روابط زیر تعیین کرد:

$$(\Delta H\times 100)/H \qquad (۱)$$

که در آن ΔH تغییر شکل اندازه‌گیری در حین آزمایش و H ارتفاع اولیه نمونه است.

$$\sigma=F/AC \qquad (۲)$$

که در آن F نیروی محوری و Ac ضریب تصحیح می‌باشد. برای محاسبه ضریب تصحیح از رابطه استفاده شده است.

$$Ac=A/(1-\varepsilon\%) \qquad (۳)$$

که در آن A سطح مقطع اولیه نمونه است.

شکل۳- دستگاه آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم:(ITS)

که تست کشش غیرمستقیم از مناسب‌ترین و رایج‌ترین آنهاست. این آزمایش در اصل یک آزمایش فشاری قطری است که در آن نمونه استوانه‌ای شکل تحت تأثیر نیروی فشاری وارد بر سطح جانبی قرار می‌گیرد. این نحوه بارگذاری سبب ایجاد تنش‌های کششی در امتداد قطر بارگذاری می‌شود. در نتیجه، نمونه در امتداد قطر بارگذاری شده می‌شکند.

روش استاندارد ASTM-D6931 برای ارزیابی مقاومت کششی غیرمستقیم خاک مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش در دمای c25° و با جک مارشال که دارای سرعت mm/min8/50است، صورت گرفت. معادله (۴) برای محاسبه مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، استفاده می‌شود:

$$2p/\pi LD \quad = q \qquad (۴)$$

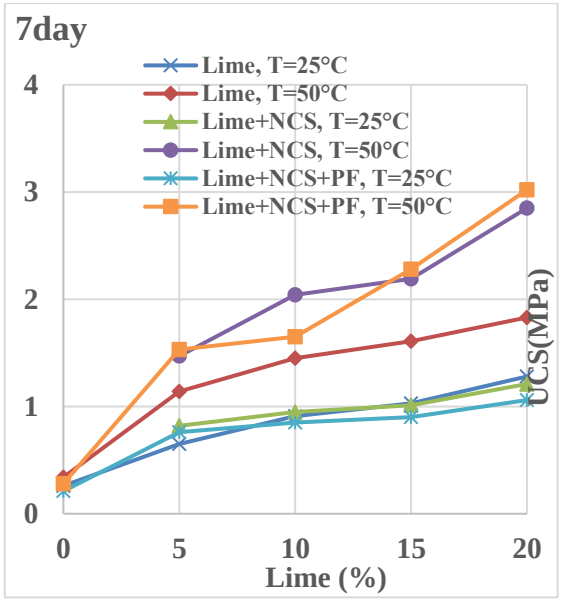
که در آن، q معادل مقاومت کششی برزیلی) Mpa) ، P حداکثر بار اعمالی(N)، t ارتفاع نمونه (mm) وD قطر نمونه (mm) است. مراحل انجام آزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در شکل (۳-۲۳) ارائه شده است.

شکل۴- مراحل انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

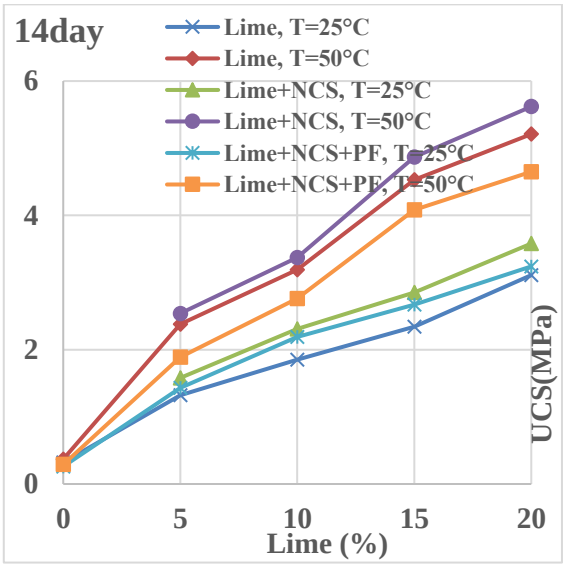
۳ -نتایج

نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نمودارهای ۱ تا ۳ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های خاک کائولینیت حاوی درصدهای مختلف آهک، ترکیب آهک-نانوکلوئید سیلیسو ترکیب آهک- نانوکلوئید سیلیس- الیاف پلی‌پروپیلن در دماهای ۲۵ و ۵۰ درجه سانتیگراد را به ترتیب برای نمونه‌هایی با زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشان می‌دهد.

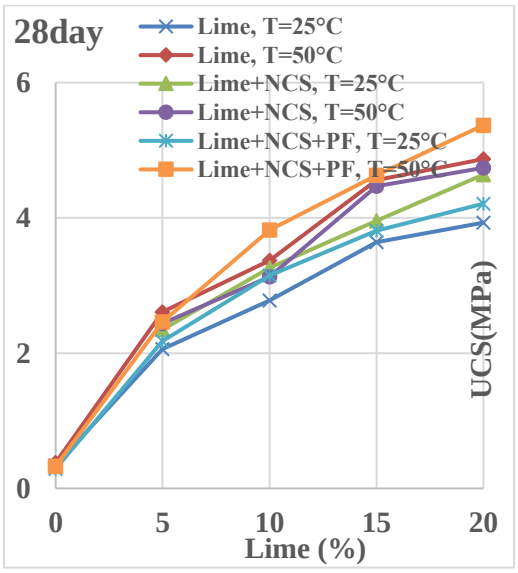


نمودار ۱- مقاومت فشاری خاک تثبیت شده پس از ۷ روز عمل‌آوری



نمودار۲- مقاومت فشاری خاک تثبیت شده پس از ۱۴ روز عمل‌آوری

با بررسی نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد طی ۷ روز، جایگزینی نانوکلوئیدسیلیس تاثیر چندانی روی مقاومت فشاری نداشته و موجب کاهش مقاومت می‌شود. عملا این کاهش در مقاومت به علت کاهش مقدار آهک در خاک است و چون زمان عمل‌آوری هم کوتاه است، ذرات نانوکلوئیدسیلیس هنوز وارد واکنش پوزولانی نشده و نه تنها بهبودی ایجاد نمی‌کنند بلکه کاهش مقاومت نیز به وجود خواهند آورد. اما در سنین ۱۴ و ۲۸ روز، همچون مواد پوزولانی دیگر، جایگزینی بخشی از آهک با نانوکلوئیدسیلیس مقاومت نمونه‌های تثبیت شده را افزایش می‌دهد. به طور کلی مشاهده می‌شود که نرخ افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی بایندر ترکیب آهک-نانوکلوئیدسیلیس بالاتر از نمونه‌های حاوی آهک تنها می باشد. نانوکلوئیدسیلیس یک ماده پوزولانی است که متشکل از آلومینوسیلیکات با ساختارهای توخالی بوده که با آهک به عنوان یک فعال کننده عمل کرده و به بهبود خواص مهندسی در خاک کمک می‌کند. این ماده از مواد معدنی آمورف بدون ساختار بلوری تشکیل شده که در حضور هیدروکسید کلسیم Ca(OH)2 میتواند منجر به ایجاد نانو ساختارهای سیمانی شبیه کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) و کلسیم آلومینات هیدراته (CAH) شود. بطوریکه این ترکیبات یک ساختار متراکم را ایجاد کرده و مقاومت خاک را افزایش می‌دهند.

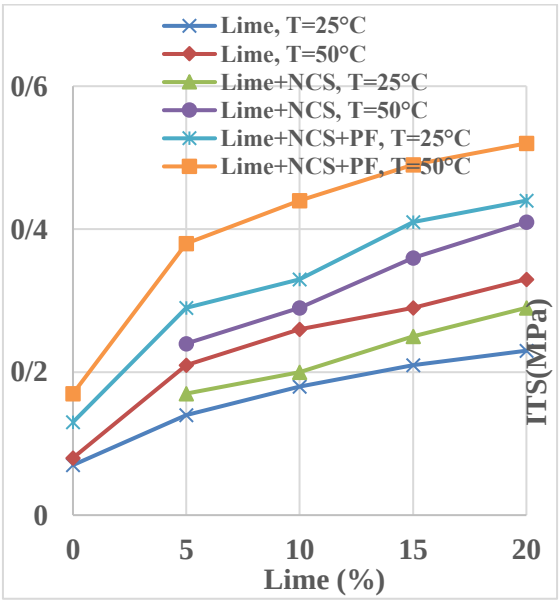


نمودار۳- مقاومت فشاری خاک تثبیت شده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری

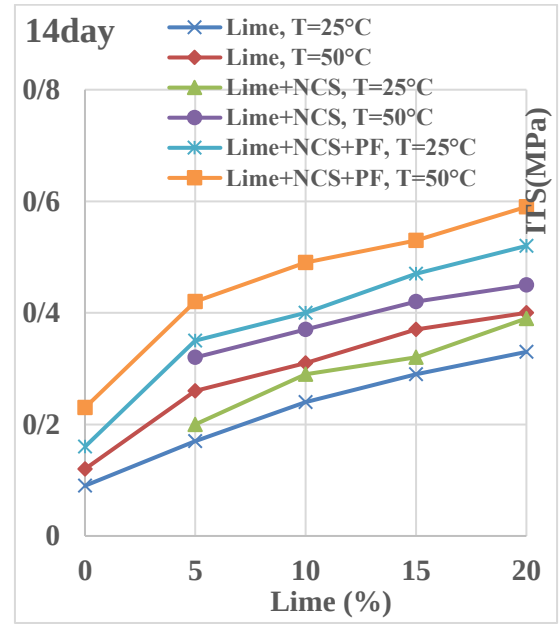
یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار انجام واکنش‌های پوزولانی و بهبود مقاومت فشاری، شرایط و دمای عمل آوری می‌باشد. طبق اشکال فوق، افزایش دما از ۲۵ به ۵۰ درجه سانتیگراد، منجر به افزایش سرعت در انجام واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های خاک کائولینیت می‌گردد. به طور کلی می‌توان گفت که با افزایش دما، زمان عمل‌آوری کمتری برای مقاومت فشاری مورد نظر لازم است. با افزایش دما و کاهش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها و افزایش مقدار آهک، سطح بالاتری از مقاومت نیز به دست می‌آید. در شرایطی که دمای عمل آوری به ۵۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد ، در

واکنش ها تسریع شده و فرآیند ایجاد چسب‌های سیمانی وارد واکنش‌های پوزولانی می‌شوند. بنابراین جایگزین کردن نانوکلوئید سیلیس به جای آهک نه تنها موجب کاهش مقاومت نمی‌شود، بلکه افزایش نسبتا خوبی در مقاومت به وجود آورده است. با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۱۴ در هر دو دما، میزان مقاومت فشاری با افزودن نانوکلوئیدسیلیس افزایش می‌یابد ولی با افزایش زمان عمل آوری از ۱۴ به ۲۸ روز، میزان مقاومت فشاری در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد. این اثر کاهشی با افزایش درصد آهک کمتر می‌گردد. پس، با بالا رفتن سن عمل‌آوری، افزودن نانوکلوئیدسیلیس به جای آهک در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد عملکرد مثبت و در دمای ۵۰ عملکرد منفی داشته است. چون در زمان عمل‌آوری بالا و دمای پایین، نانوکلوئیدسیلیس فرصت واکنش نشان دادن پوزولانی را دارد و منجر به افزایش سیلیس و آلومینای موجود در خاک شده است. اما با افزایش دما، واکنش پوزولانی شدت یافته و پوزولان نانوکلوئید در سنین پایین مصرف شده است و با توجه به کاهش آهک (با جایگزین نانوذرات) برای واکنش های دراز مدت آهکی وجود ندارد. این موضوع نشان‌دهنده این می‌باشد که با ترکیب نانوکلوئیدسیلیس می‌توان به مقاومت زود هنگام دست یافت. افزایش مقاومت در کوتاه مدت به دلیل افزایش در دانسیته با توجه به وزن مخصوص نانوکلوئیدسیلیس نسبت به اهک است. استفاده از نانوکلوئیدسیلیس در شرایط عمل‌آوری ۵۰ درجه و طی ۷ روز عملکرد بهینه‌ای دارد. زیرا افزایش دما موجب می‌شود در کوتاه مدت واکنش‌های آهک به سمت واکنش‌های پوزولانی پیشروی کند و برای تامین نیاز این واکنش، نانوکلوئیدسیلیس وارد سیستم می‌شود. بنابراین، با افزودن نانوکلوئیدسیلیس و افزایش دمای عمل‌آوری، می‌توان در کاهش زمان عمل‌آوری و اقتصادی نمودن پروژه‌ها تاثیر بسزایی داشت. با دقت در نمودارهای فوق می‌توان بیان کرد که استفاده از الیاف پلی پروپیلن در نمونه حاوی آهک-نانوکلوئید سیلیس باعث کاهش جزئی مقاومت فشاری شده است. دلیل این کاهش جزئی، به دلیل ایجاد حفره‌های ریز در اطراف الیاف و همچنین اندرکنش الیاف با یکدیگر است. هنگامیکه الیافها بصورت تصادفی در نمونه توزیع می‌شوند موجب می‌گردد قسمتی از الیافها بر روی یکدیگر قرار بگیرند که در شرایط آزمایش فشاری این مورد عملکرد ضعیفتری نسبت به اتصال خاک دارد. ولی به علت مقدار خیلی جزئی اتصالهای الیاف-الیاف، مقاومت فشاری افت جزئی نشان خواهد داد. در این تحقیق، بکارگیری الیاف با هدف افزایش در دوام محصول انجام شده و محدود بودن تغییرات UCS قبل و پس از افزودن الیاف نشان دهنده تاثیر مناسب است. زیرا کنترل این آزمایش به دلیل تائید عدم تاثیر منفی الیاف بر مقاومت فشاری است.

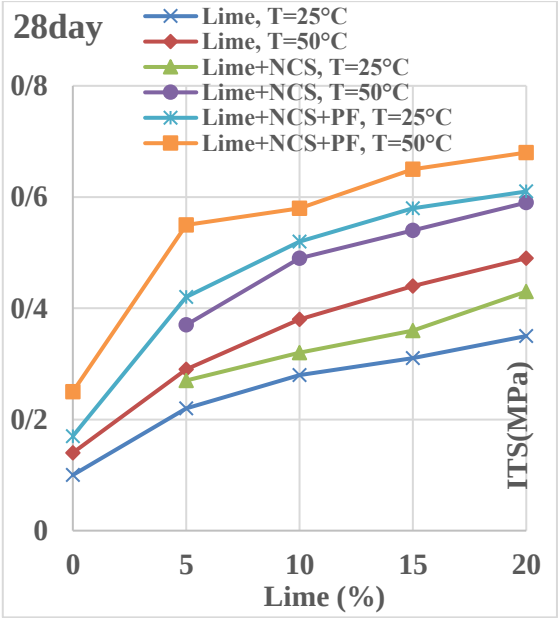
نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم:



نمودار ۴-مقاومت کششی غیرمستقیم خاک تثبیت شده پس از ۷ روز عمل‌آوری



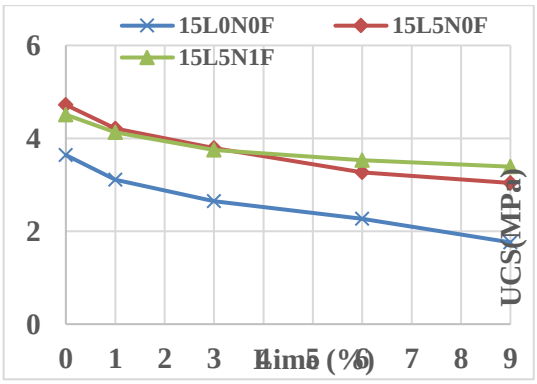
نمودار ۵- مقاومت کششی غیرمستقیم خاک تثبیت شده پس از ۱۴ روز عمل‌آوری



نمودار ۶- مقاومت کششی غیرمستقیم خاک تثبیت شده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری

افزودن ۵٪ آهک به خاک کائولینیت باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت کششی غیرمستقیم خاک می‌گردد. همچنین با زیاد شدن مقادیر آهک در خاک، در هر دو دمای آزمایش و در هر سه زمان عمل‌آوری مختلف، مقاومت کششی بطور متناوب افزایش می‌یابد. به نحوی که میزان افزایش مقاومت کششی نمونه حاوی ۲۰٪ آهک نسبت به نمونه حاوی ۵٪ آهک در دمای عمل‌آوری ۲۵ درجه برای نمونه‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۶۴، ۹۴ و ۵۵ درصد می‌باشد و این مقدار برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد برابر با ۵۷، ۵۴ و ۶۹ درصد بدست آمد. دلایل این افزایش همان دلایلی است که برای مقاومت فشاری ارائه شد. همچنین نتایج بیانگر این موضوع است که جایگزینی ۵ درصد آهک با نانوکلوئید سیلیس، علاوه بر اینکه افزایش ۱۰ تا ۳۰ درصدی در مقاومت کششی ایجاد می‌کند، باعث کاهش مصرف آهک می‌گردد. دلایل اثر افزایشی نانوکلوئید سیلیس همانند مقاومت فشاری می باشد. افزودن الیاف به محصولات تثبیت شده افزایشی برابر با تقریباً ۶۰ تا ۹۰ درصد در مقاومت کششی ایجاد خواهد کرد. در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم با اعمال نیروی قائم، الیاف دچار تغییر شکل شده و در این مرحله بین الیاف و ذرات خاک، قفل‌شدگی به وجود می‌آید و همزمان ذرات خاکی که در تماس با الیاف هستند، باعث ایجاد نیروهای اصطکاکی در الیاف می‌شوند. مجموعه‌ی نیروهای ناشی از قفل‌شدگی و اصطکاک، تنش کششی را در الیاف بسیج می‌کند و باعث افزایش مقاومت کششی نمونه خاک می‌گردد. بنابراین وجود الیاف در خاک به بهبود مقاومت کششی خاک بطور قابل ملاحظه‌ای کمک خواهد کرد. با بررسی نمودارهای هر سه شکل فوق، می‌توان ادعا کرد که در هر سه زمان عمل‌آوری، میزان مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه خاک کائولینیت با افزایش دمای عمل آوری از ۲۵ به ۵۰ درجه سانتیگراد افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. دلیل این تغییرات افزایش دماست که سبب افزایش سرعت در انجام واکنش‌های پوزولانی می شود ودر کوتاه مدت واکنش های آهک به سمت واکنش های پوزولانی پیشروی کند در نتیجه باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌های خاک کائولینیت می‌گردد.

تاثیر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر مقاومت فشاری

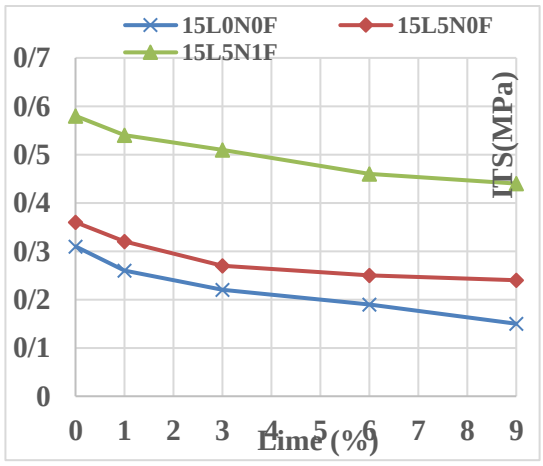


نمودار ۷- بررسی مقاومت فشاری نمونه خاک‌ها تحت سیکل های ذوب-یخبندان

نتایج نشان می‌دهد که هر سه نمونه آزمایش شده قادر به تحمل سیکلهای اعمالی ذوب-یخبندان هستند و هیچ کدام گسیخته نشدند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کاهش مقاومت فشاری بعد از ۱ سیکل کاهش می‌یابد. جایگزین کردن نانوکلوئیدسیلیس بجای ۵٪ آهک، با وجود کاهش مقدار آهک، به انجام و شکل‌گیری واکنش‌ها تسریع بخشیده و موجب می‌گردد بهبودی چشمگیری در مقاومت فشاری نسبت خاک بدون نانوکلوئیدسیلیس ایجاد گردد. با تحلیل نتایج می‌توان مشاهده کرد که افزودن ۰٫۱٪ الیاف پلی-پروپیلن به خاک L5N0F ۱۵ در سیکلهای کمتر باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه بدون الیاف می‌گردد، ولی در سیکلهای بالاتر باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. افزودن الیاف سبب حضور آن در بین ذرات خاک و ماده افزودنی شده و به این ترتیب اصطکاک بین ذرات بیشتر می‌گردد. این امر سبب پیوستگی بیشتر ذرات خاک شده که به افزایش مقاومت فشاری خاک و دوام بیشتر آن‌ها در

برابر سیکل‌های ذوب-یخبندان می‌انجامد. همچنین میزان افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن را می‌توان به قابلیت‌های الیاف در محدود کردن گسترش ترک‌ها، کاهش میزان تنش در لبه ترک‌ها و تاخیر در رشد ترک‌ها نیز نسبت داد که نشان‌دهنده افزایش کارایی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف است. به نحوی که می‌توان این روش را در مقابله با شرایط محیطی ذوب-یخبندان کاملا کارآمد دانست. با افزودن آهک و نانوکلوئید سیلیس به خاک نرخ کاهش مقاومت فشاری ناشی از افزایش سیکل ذوب و یخ کاهش می‌یابد. بعد از ۶ سیکل میزان کاهش خیلی کم می‌شود و خاک تثبیت‌شده در مقابل سیکل‌های بالاتر مقاومت میکند. میزان کاهش مقاومت فشاری بعد از ۶ سیکل ذوب-یخبندان برای نمونه اول، دوم و سوم نسبت به نمونه‌های متناظر بدون سیکل ذوب-یخبندان به ترتیب ۵۲، ۳۶ و ۲۵ درصد بدست آمد. بنابر نتایج فوق، می‌توان ترکیب ۱۵ درصد آهک و جایگزینی ۵٪ نانوکلوئیدسیلیس در کنار یک درصد الیاف پلی‌پروپیلن را در برابر پدیده ذوب-یخبندان کاملا موفق اعلام کرد .

تاثیر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر مقاومت کششی غیرمستقیم:

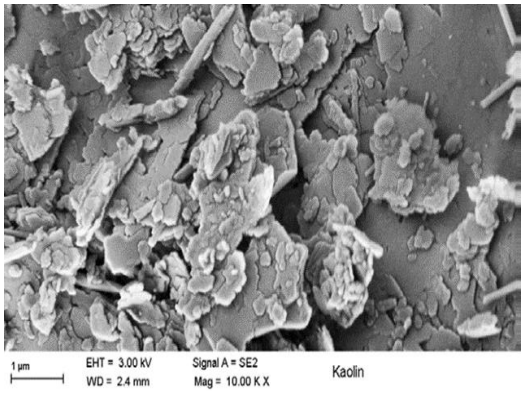


نمودار ۸- بررسی مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه خاکها تحت سیکلهای ذوب-یخبندان

سیکل‌های ذوب-یخبندان مختلف نسبت به نمونه بدون این افزودنی افزایش یافته است. به عبارت دیگر، جایگزین کردن آهک با نانوکلوئیدسیلیس با وجود اینکه کاهشی در مصرف آهک دارد، اما تا حدود ۲۰ درصد باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود. این موضوع کاملا دوستدار محیط زیست بوده و کاملا کارآمد است. طبق نتایج شکل (۸)، مشاهده می‌شود که خاک مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن استحکام و شکل‌پذیری بیشتری در مقایسه با نمونه‌های حاوی آهک تنها و یا ترکیب آهک و نانوکلوئید سیلیس دارند. به عبارت دیگر، افزودن الیاف به خاک تثبیت شده با افزودنی باعث بهبود اثرات منفی مواد افزودنی از جمله کاهش تردشدگی و افزایش شکل‌پذیری در خاک می‌شود و سبب بهبود عملکرد خاک کائولینیت در مقابل سیکلهای ذوب-یخبندان می‌گردد. با افزودن آهک و نانوکلوئید سیلیس به خاک نرخ کاهش مقاومت کششی ناشی از افزایش سیکل ذوب ویخ کاهش می‌یابد. بعد از ۶ سیکل میزان کاهش خیلی کم میشود و خاک تثبیت شده در مقابل سیکل‌های بالاتر مقاومت می‌کند. پس با وجود اینکه هم آهک به تنهایی و هم ترکیب آهک و نانوکلوئیدسیلیس کارآیی قابل قبولی در مقابل پدیده ذوب-یخبندان از خود نشان می‌دهد، در صورتی که الیاف نیز در سیستم وارد شود شرایط بسیار مطلوب‌تر شده و سیستم در مقابل شرایط محیطی مقاوم خواهد بود.

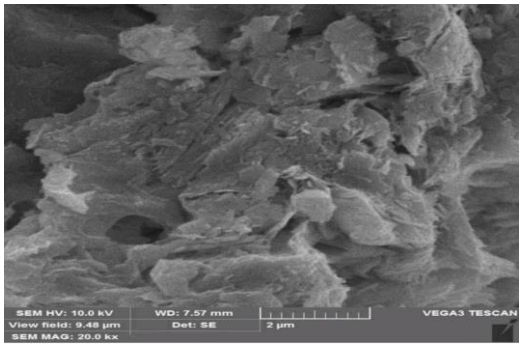
ارزیابی طرح تثبیت ویژه با تصویربرداری:SEM

حفرات خاک

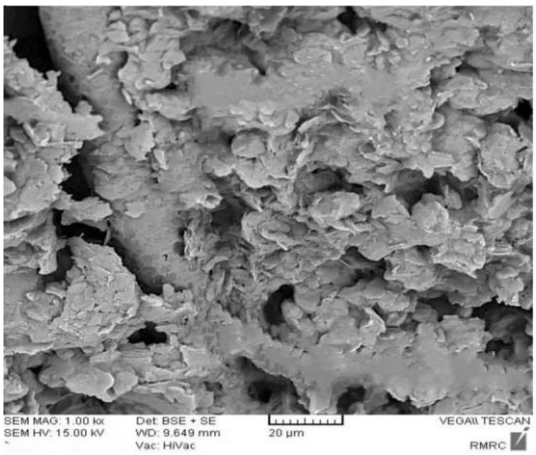


شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی خاک نرم (کائولینیت)

مواد سیمانی



شکل۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه تثبیت¬شده با آهک ونانوکلوئیدسیلیس



شکل۷-تصاویر میکروسکپی نمونه تثبیت‌شده با آهک و نانوکلوئید و الیاف

در شکل (۵)، نمونه خاک نرم ارائه شده است که ذرات رس با فاصله در کنار یکدیگر و بصورت پوسته‌ای قرار دارند؛ به نحوی که مقایسه آن با شکل (۶) به روشنی نشان می‌دهد، تثبیت انجام شده علاوه بر ایجاد ساختار درهم، با تشکیل محصولات سیمانی به صورت پوشش ذرات و بهم چسباندن آنها بهبود قابل توجهی در ساختار ایجاد کرده است. شکل (۷) حضور الیاف در محصول تثبیت شده را نمایش داده که ذرات خاک و محصولات سیمانی کاملا با الیاف درگیر و ساختار درهم تنیده ایجاد می کنند. همین موضوع موجب پایداری بیشتر آن در برابر شرایط محیطی و افزایش مقاومت کششی خواهد شد. نتایج نمودار (۳ و ۶) کاملا با شکل (۷) مطابقت دارند.

۴ -نتیجه‌گیری وجمع‌بندی

بر اساس آزمایشاتی که در این تحقیق انجام شد، اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

افزودن آهک به خاک رس کائولینیت و افزایش درصد این تثبیت‌کننده باعث بیشتر شدن مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. به نحوی که افزودن آهک به مقدار ۲۰٪، در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، مقاومت خاک را نسبت به خاک حاوی ۵٪ آهک در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۹۷، ۱۱۶ و ۹۰ درصد افزایش داده است که مقادیر قابل توجهی است .

با بررسی نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد طی ۷ روز، جایگزینی نانوکلوئیدسیلیس تاثیر چندانی روی مقاومت فشاری نداشته و موجب کاهش مقاومت می‌شود، اما در سنین ۱۴ و ۲۸ روز، همچون مواد پوزولانی دیگر، جایگزینی بخشی از آهک با نانوکلوئیدسیلیس مقاومت نمونه‌های تثبیت شده را افزایش می‌دهد. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در نمونه حاوی آهک- نانوکلوئید سیلیس در دما و زمان‌های عمل‌آوری مختلف باعث کاهش جزئی مقاومت فشاری شده است.

افزایش دما از ۲۵ به ۵۰ درجه سانتیگراد، منجر به افزایش سرعت در انجام واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های خاک کائولینیت می‌گردد. با افزایش دما و مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها و افزایش مقدار آهک، سطح بالاتری از مقاومت نیز به دست می‌آید. با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۱۴ در هر دو دما، میزان مقاومت فشاری با افزودن نانوکلوئیدسیلیس افزایش می‌یابد ولی با افزایش زمان عمل‌آوری از ۱۴ به ۲۸ روز، میزان مقاومت فشاری در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد کاهش می یابد که این اثر کاهشی با افزایش درصد آهک کمتر می‌گردد. پس، با بالا رفتن سن عمل‌آوری، افزودن نانوکلوئیدسیلیس به جای آهک در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد عملکرد مثبت و در دمای ۵۰ عملکرد منفی داشته است .

افزودن ۵٪ آهک به خاک کائولینیت باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت کششی غیرمستقیم خاک

می‌گردد. همچنین با زیاد شدن مقادیر آهک در خاک، در هر دو دمای آزمایش و در هر سه زمان عمل‌آوری مختلف، مقاومت کششی بطور متناوب افزایش می‌یابد .

جایگزینی ۵ درصد آهک با نانوکلوئید سیلیس، علاوه بر اینکه افزایش ۱۰ تا ۳۰ درصدی در مقاومت کششی ایجاد می‌کند، باعث کاهش مصرف آهک می‌گردد. افزودن الیاف به محصولات تثبیت شده افزایشی تقریباً برابر با ۶۰ تا ۹۰ درصد در مقاومت کششی ایجاد خواهد کرد. در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم با اعمال نیروی قائم، الیاف دچار تغییر شکل می‌گردد. در این مرحله بین الیاف و ذرات خاک قفل شدگی به وجود می‌آید و همزمان ذرات خاکی که در تماس با الیاف هستند، باعث ایجاد نیروهای اصطکاکی در الیاف می‌شوند. مجموعه‌ی نیروهای ناشی از قفل شدگی و اصطکاک، تنش کششی را در الیاف بسیج می‌کند و باعث افزایش مقاومت کششی نمونه خاک می گردد. بنابراین، وجود الیاف در خاک به بهبود مقاومت کششی خاک بطور قابل ملاحظه‌ای کمک خواهد کرد .

میزان مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه خاک کائولینیت با افزایش دمای عمل‌آوری از ۲۵ به ۵۰ درجه سانتیگراد

افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. دلیل این تغییرات این است که افزایش دما سبب افزایش سرعت در انجام واکنش‌های پوزولانی و فرآیند ایجاد چسب‌های سیمانی وارد واکنش های پوزولانی می‌شوند، در نتیجه باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌های خاک کائولینیت می‌گردد. با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روز میزان مقاومت کششی در هر دو دمای ۲۵ و ۵۰ درجه سانتیگراد حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری بعد از اعمال سیکلهای مختلف ذوب-یخبندان نشان میدهد که هر سه نمونه آزمایش شده قادر به تحمل سیکلهای اعمالی ذوب-یخبندان هستند و هیچ کدام گسیخته نشدند. جایگزین کردن نانوکلوئیدسیلیس بجای ۰٫۵ آهک، با وجود کاهش مقدار آهک، به انجام و شکل‌گیری واکنشها تسریع بخشیده و موجب می‌گردد بهبودی چشمگیری در مقاومت فشاری نسبت خاک بدون نانوکلوئیدسیلیس ایجاد گردد. با تحلیل نتایج می‌توان مشاهده کرد که افزودن ۰٫۱ الیاف پلی پروپیلن به خاک L5N0F ۱۵ در سیکلهای کمتر باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه بدون الیاف می‌گردد، ولی در سیکلهای بالاتر باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. میزان کاهش مقاومت فشاری بعد از ۶ سیکل ذوب-یخبندان برای نمونه اول، دوم و سوم نسبت به نمونه‌های متناظر بدون سیکل ذوب-یخبندان به ترتیب ۵۲، ۳۶ و ۲۵ درصد بدست آمد.

با جایگزینی ۰٫۵ آهک با ماده نانوکلوئیدسیلیس، مقاومت کششی نمونه‌های قرار گرفته تحت سیکلهای ذوب-یخبندان مختلف نسبت به نمونه بدون این افزودنی افزایش یافته است. به عبارت دیگر، جایگزین کردن آهک با نانوکلوئیدسیلیس با وجود اینکه کاهشی در مصرف آهک دارد، اما تا حدود ۲۰ درصد باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود. خاک مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن استحکام و شکل‌پذیری بیشتری در مقایسه با نمونه‌های حاوی آهک تنها و یا ترکیب آهک و نانوکلوئید سیلیس دارند. به عبارت دیگر، افزودن الیاف به خاک تثبیت‌شده با افزودنی باعث بهبود اثرات منفی مواد افزودنی از جمله کاهش تردشدگی و افزایش شکل پذیری در خاک می‌شود و سبب بهبود عملکرد خاک کائولینیت در مقابل سیکلهای ذوب-یخبندان می‌گردد.

نتایج آزمایش ریزساختاری تایید می‌کند که حضور نانوکلوئید سیلیس با کاهش تخلخل سیستم و افزایش عمده ژل‌های سیمانی CSH و ورود الیاف با افزایش چگالی، محصور کردن ریز ترک‌ها و ایجاد سیستم درهم تنیده، عملکرد مناسبی ارائه می‌دهد؛ به نحوی که فرایند اصلاح خاک نرم با استفاده از ترکیب آهک – نانوکلوئیدسیلیس – الیاف علاوه بر ارتقاء پارامترهای مقاومتی، دوام را افزایش داده است.

۵ -تقدیر وتشکر

باتشکر فراوان از استاد محترم دکتر شرفی که مرا در این پژوهش همراهی کردند.

مراجع

[1] Barden. L. and G Sides. " Sample disturbance in the investigation of clay structure, Geotechnique ". 21. no. 3 (1971): 211-222.

[2] Mohammadi. M. and V Tou gh."Experimental investigation of sand consolidation and reinforcement using ber and epoxy resin". Journal of Transport Infrastructure Engineering. (2016): 103-118.

[3] Sargent. P. " Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes". (2015): 555-604.

[4] Singhi. B. I Laskar. and M.A Ahmed. " Investigation on soil-geopolymer with slag, y ash and their blending". Arabian Journal for Science and Engineering. 41. no. 2 (2016): 393-400.

[5] Higgins. D. " GGBS and sustainability". Journal for Construction Materials. 160. no.3 (2007): 99-101.

[6] Meyer. C. "The greening of the concrete industry". Journal for Cement and Concrete Composites. 31. no. 8 (2009): 601-605.

[7] Duxson. P. A Fernandez-Jimenez. and J.L Proviz. " Geopolymer technology: The current state of the art". Journal of Materials Science. 42. no. 9 (2006): 2917-2933.

[8] Komnitsas. K. and D Zaharaki. " Geopolymerisation A review and prospects for the minerals industry". Journal for Minerals Engineering. 20. no. 14 (2007): 1261-1277.

[9] Davidovits. J. " Soft Mineralurgy and Geopolymers, In: Davidovits, J. and Orlinski, J. (Eds.), Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer' 88". Compiegne, France. 1 (1988): 19-23.

[10] McLellan B.C. R P. and Williams J. Lay. " Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement". Journal of Cleaner Production. 19. no. 9-10 (2011): 1080-1090.

[11] Ulloa. N. A. H Baykara. M. H Cornejo. A Rigail. C Paredes. and J. L Villalba. "Application-oriented mix design optimization and characterization of zeolite-based geopolymer mortars". Journal of Construction and Building Materials. (2018): 138-149.

[12] Ahmadi Chenarboni. H. H Hamid Lajevardi. and S MolaAbasi. " The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils". Journal of Construction and Building Materials. 15 (2018): 122-129.

[13] Kamaruddin. F. A. B. B Huat. V Anggraini. and H Nahazanan. " Modified natural fiber on soil stabilization with lime and alkaline activation treated marine clay". International Journal. 16. no. 58 (2019): 69-75.

[14] Akbari. H.R. H Sharafi. and A.R Goodarzi. " Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 °C" . Bulletin of Engineering Geology and the Environment.. (2020): 130-14.

[15] Akbari H.R. H Sharafi. and A.R Goodarzi. " Effect of polypropylene fber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles, Geotextiles and Geomembranesdo /j.geotexmem " , 2021,pp.10.1016.

[16] Sharma. K. " Utilization of industrial waste based geopolymers as a soil stabilizer" areview,Innovative Infrastructure Solutions. 5. No. 97 (2020).

[17] Wang. D. Y. W Ma. Niu. X. X Chang. and Z Wen. " Effects of Cyclic Freezing and Thawing on Mechanical Properties of Qinghai-Tibet Clay ". Journal for Cold Regions Science and Technology. 48. (2007): 34–43.

[۱۸] اثنی عشری، مهدی . "مقاومت فشاری محدودنشده خاک رس تثبیت شده با آهک و مسلح به الیاف پلیمری". چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک ومکانیک خاک ایران. ۶۸، ۱۳ (۱۳۹۸): ۱۳۲-۱۶۸.

[۱۹] کبیر، احسان . "بررسی تاثیر درصدآهک بر روی مقاومت فشاری تک محوری خاک CL-ML حاوی کلرید سدیم ". دومین سمینار ملی مسائل. ژئوتکنیکی شبکه های آبیاری و زهکشی ۶۸ ، ۱۶ (۱۳۹۸) : ۱۲۵-۱۳۶.

[20] Ghazavi. M. M Roustaie. "The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiberreinforced clay". Cold Regions Science and Technology. 61 (2009): 125-131.

[21] Wang. D. Ma. W Niu. Y Chang. and X Wen, "Effect of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay". Cold Regions Science And Technology .48 (2007): 34-43.

[۲۲] بی باک ،حدیث. "پیش بینی طرح اختلاط بهینه برای بهسازی خاک رس نرم با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی". ۵۷. ۱۷ (۱۳۹۸): ۱۴۷-۱۵۸.

[۲۳] مولودی، فرزین. "تأثیر کاربرد کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) در بهبود رفتار چرخه ای اتصالات تیر به ستون بتن آرمه". ۵۶ ،۱۷ (۱۳۹۸): ۱۴۳-۱۵۶.

[۲۴] جامخانه مهدی، عبادی. "تاثیر استفاده از خاک اره راش و اکالیپتوس به عنوان مواد مکمل در بهبود عملکرد تخته های کامپوزیتی سیمانی" .۵۳ ،۱۶ (۱۳۹۷): ۲۵۹-۲۶۷.