



Semnan University



Research Article

Stabilization of Dune Sandy Soil with Steel-slag-based Geopolymer and Nanosilica

Bohloli, M. H.^a , Imam, S. M. R.^{b*} , Khaleghi, M.^c

^a Graduate Student of Geotechnics, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

^b Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

^c PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-03-01

Revised: 2023-12-06

Accepted: 2023-12-18

Keywords:

Soil stabilization;

Geopolymer;

Steel slag;

Nanosilica

ABSTRACT

Stabilization of the road base in the areas that have fine-grained sandy soil, or the so-called dune sand, is necessary. On the other hand, there is no justification for using traditional methods to do this, considering the advancement of technology and emergence of new materials that are environmentally friendly. In recent years, one of the concerns of geotechnical researchers is to choose the best stabilizing material for this purpose by testing different materials. Nowadays, geopolymer materials are considered as one of the best environmentally-friendly materials due to their availability, reduced consumption of energy resources, and reduced production of greenhouse gases. On the other hand, with the development of nanotechnology and researchers' understanding of their properties, nanomaterials can also be used in the preparation of the geopolymers. In the past, researchers have conducted studies on the stabilization of some types of soils using geopolymeric materials. But, the use of geopolymeric materials, based on iron slag and in combination with nanosilica, to stabilize fine sandy soils, is a subject that has not been studied in the past; which has been addressed in the present research. In this research, effect of adding 0-3 percent of nanosilica to the mixture of sandy soil with 5%-20% of geopolymer based on industrial pozzolan obtained from iron smelting furnace slag was studied. In order to achieve the best percentage of preparation of geopolymer mixture, 5%-20% alkaline solution with a concentration range of 4-12 M has been used. Also, the samples have been examined in the curing time of 1-28 days. In this regard, according to the increase of the investigated factors, and in order to reduce the number of tests, the Taguchi method was used to optimize the test design.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2023.29893.1637>

* Corresponding author.

E-mail address: rimam@aut.ac.ir

How to cite this article: Bohlouli, M., Imam, M., & Khaleghi, M. (2023). Stabilization of a dune sandy soil with steel-slag-based geopolymer and nanosilica. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(3), 119-137. doi: [10.22075/jtie.2023.29893.1637](https://doi.org/10.22075/jtie.2023.29893.1637)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

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

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

تثبیت ماسه‌بادی با استفاده از ژئوپلیمر با پایه سرباره آهن و نانوسیلیس

محمد‌های بهلولی^۱، سید محمدرضا امام^{۲*}، مرتضی خالقی^۳

^۱ دانشجوی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

چکیده

تثبیت بستر جاده‌ها در مناطقی که دارای خاک ماسه‌ای ریزدانه یا به اصطلاح ماسه‌بادی هستند امری ضروری است. از طرفی، استفاده از روش‌های سنتی جهت انجام این کار با توجه به پیشرفت تکنولوژی و پدیدار شدن مصالح نوین که دوست‌دار محیط‌زیست هستند توجیهی ندارد. از این رو، در سال‌های اخیر، یکی از دغدغه‌های محققان حوزه ژئوتکنیک این شده است که با آزمایش مواد مختلف، بهترین ماده تثبیت‌کننده را برای این منظور انتخاب کنند. امروزه، مواد ژئوپلیمری به دلیل در دسترس بودن، کاهش مصرف انرژی و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، به عنوان یکی از بهترین مواد دوست‌دار محیط‌زیست برای رسیدن به این هدف مطرح هستند. از طرفی، با توسعه علم نانوتکنولوژی و پی بردن محققان به خواص آن‌ها، نانومواد نیز می‌توانند در تهیه ژئوپلیمرها مورد استفاده قرار گیرند. محققان در گذشته، راجع به تثبیت برخی از انواع خاک‌ها با استفاده از مصالح ژئوپلیمری مطالعاتی داشته‌اند. لیکن استفاده از مواد ژئوپلیمری بر پایه سرباره آهن و در ترکیب با نانوسیلیس، جهت تثبیت خاک ماسه‌ای ریزدانه، موضوعی است که در گذشته مورد بررسی قرار نگرفته و در این تحقیق به آن پرداخته شده است. این تحقیق، به مطالعه اثر افزودن صفر تا ۳ درصد نانوسیلیس به مخلوط خاک ماسه‌بادی با ۵ تا ۲۰ درصد ژئوپلیمر بر پایه پوزولان صنعتی حاصل از سرباره کوره آهن‌گدازی می‌پردازد. جهت رسیدن به بهترین درصد تهیه اختلاط ژئوپلیمر، از ۵ تا ۲۰ درصد محلول قلیایی با محدوده غلظت ۴ تا ۱۲ مولار استفاده شده است. همچنین، نمونه‌ها در بازه زمانی عمل‌آوری ۱ تا ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این راستا، با توجه به افزایش فاکتورهای مورد بررسی، جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها، از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی طرح آزمایش استفاده شده است.

واژگان کلیدی:

تثبیت خاک،

ژئوپلیمر،

سرباره آهن،

نانوسیلیس.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2023.29893.1637>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: rimam@aut.ac.ir

استناد به این مقاله: بهلولی، محمد‌های، امام، محمدرضا، & خالقی، مرتضی. (۱۴۰۲). تثبیت ماسه بادی با استفاده از ژئوپلیمر با پایه سرباره آهن و نانوسیلیس. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۹(۳)، ۱۳۷-۱۱۹. doi: 10.22075/jtie.2023.29893.1637

۱. مقدمه

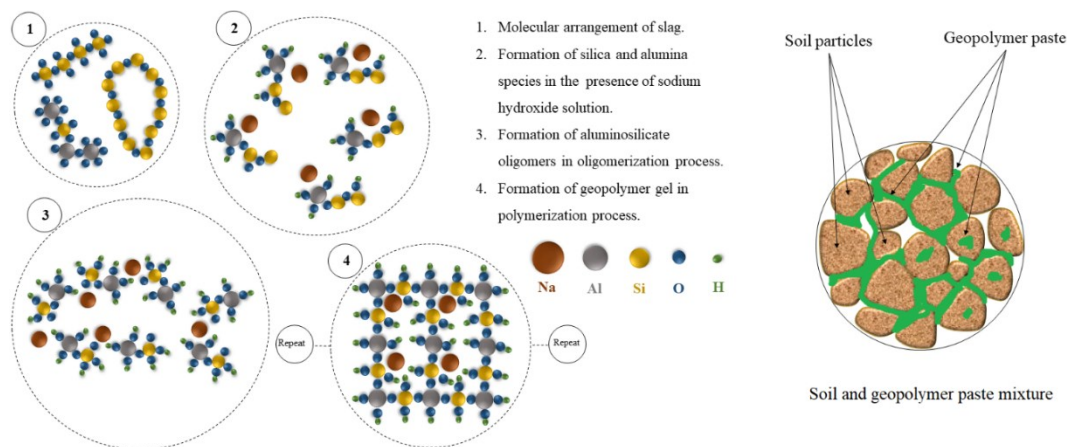
برق و استخراج حجم زیادی از مصالح طبیعت همگی جزو نقاط منفی در فرایند تولید سیمان به حساب می‌آیند. از این‌رو، امروزه محققان به دنبال استفاده از مصالح دوست‌دار محیط‌زیست هستند.

ژئوپلیمرها مصالح ساختمانی نسبتاً جدیدی هستند که به عنوان جایگزین سیمان در تثبیت خاک‌ها مطرح شده‌اند. این مصالح، مواد آلومینا سیلیکاتی با ساختار آمورف تا شبه‌کریستالی دارند که طی بسپارش آلومین و سیلیس در یک محیط قلیایی شدید و سپس تشکیل پیوندهای Si-O-Si و Si-O-Al مختلف وابسته به نسبت مواد اولیه ساخته می‌شوند (شکل ۱) و دارای پتانسیل انقباض کم، چسبندگی عالی، خواص مکانیکی عالی (مثل مقاومت فشاری و سختی) و مقاومت در برابر گرما، حلال‌های آلی و اسید هستند.

این مصالح از مخلوط کردن پیش‌ماده‌های ژئوپلیمر با فعال‌ساز قلیایی حاصل می‌شوند. پیش‌ماده‌های ژئوپلیمر شامل طیف وسیعی از مواد آلومیناسیلیکات مانند سرباره آهن، خاکستر بادی، پوزولان‌های طبیعی، متاکائولین، لجن قرمز و خاکستر پوسته برنج است. فعال‌سازهای قلیایی نیز محلول‌های سدیم سیلیکات قلیایی، پتاسیم سیلیکات قلیایی، کلسیم کاربید و سدیم هیدروکسید یا ترکیبی از این‌ها را شامل می‌شوند.

امروزه رشد جمعیت و عدم وجود فضای کافی برای ساخت‌وساز از یک‌سو و وجود انواع خاک‌های مسئله‌دار در محل پروژه‌ها از سوی دیگر باعث شده که مهندسی عمران از انواع روش‌های بهسازی و تثبیت خاک استفاده نمایند. یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار در مناطق بیابانی، ماسه‌بادی است. ماسه‌بادی به دلیل دانه‌بندی ریز و نداشتن چسبندگی، بسیار ناپایدار بوده و با وزش باد مشکلات محیط‌زیستی فراوانی برای مناطق بیابانی به وجود می‌آورد. علاوه بر آن، ماسه‌بادی به دلیل نداشتن قوام کافی، قادر به مقاومت در برابر بارهای سازه‌ای نیست. از این‌رو، تثبیت و بهسازی خاک ماسه‌بادی با هدف‌های سازه‌ای و محیط‌زیستی امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

سیمان، همواره یکی از گزینه‌های مهندسی عمران برای تثبیت خاک‌های مشکل‌آفرین است. سیمان، پودری است که از سنگ آهک و خاک رس تولید می‌شود و یکی از تثبیت‌کننده‌های قدیمی شیمیایی خاک‌های غیرچسبنده به حساب می‌آید. سیمان عمدتاً حاوی اکسیدهای آهک (CaO)، سیلیس (SiO₂)، آلومینیوم (Al₂O₃) و آهن (Fe₂O₃) می‌باشد و فرایند تولید آن یکی از مهمترین عوامل انتشار گاز گلخانه‌ای کربن دی‌اکسید در محیط‌زیست است. همچنین، مصرف سوخت فسیلی، مصرف



شکل ۱. فرایند ژئوپلیمریزاسیون و تثبیت خاک

درصد نانوسیلیس، به نمونه‌ای با مقاومت فشاری ۷۲ مگاپاسکال در ۲۸ روز دست یابند. آنها دریافتند که افزودن نانوسیلیس تا ۲ درصد باعث ایجاد یک ژئوپلیمر متراکم‌تر با تعداد ذرات غیرفعال کمتری می‌شود. اساعدی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تأثیر نانورس روی ویژگی‌های مکانیکی و گرمایی ژئوپلیمرها پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که میزان بهینه نانورس که باعث افزایش مقاومت می‌شود، ۲ درصد می‌باشد. همچنین، نتایج آنالیز ریزساختارها نشان داد که نانورس نه تنها باعث کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار شده، بلکه به‌عنوان یک فعال‌ساز برای فرآیندهای تشکیل ژئوپلیمر نیز عمل می‌کند. نسکار و چاکرابورتی (۲۰۱۶) اثر افزودن نانوسیلیس، نانوکربن لوله‌ای و تیتانیوم دی‌اکسید را به بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی کم‌کلسیم مطالعه کرده و به این نتیجه رسیدند که افزودن ۰/۷۵ درصد نانوسیلیس یا ۱ درصد تیتانیوم دی‌اکسید روی بتن ژئوپلیمری با خاکستر بادی کم‌کلسیم، مقاومت فشاری رضایت‌بخشی را حاصل می‌کند. سینگی و همکاران (۲۰۱۶) مطالعات آزمایشگاهی روی تثبیت خاک رسی با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی انجام داده و دریافتند که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها، زمانی که از خاکستر بادی به عنوان پیش‌ماده ژئوپلیمر استفاده می‌شود، نسبت به زمانی که از سرباره کوره آهن‌گدازی استفاده می‌شود، بسیار کمتر است. آنها متوجه شدند که اثر افزودن سرباره به میزانی کمتر از ۸ درصد تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری ندارد و نهایتاً نسبت Na/Al و Si/Al در مخلوط ژئوپلیمر مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری را کنترل می‌کند. آداک و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثر افزودن نانوسیلیس به ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی در بتن پرداخته و دریافتند که با جایگزین کردن ۶ درصد از خاکستر بادی با نانوسیلیس، مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت به دلیل

سرباره آهن محصولی مصنوعی، ثانویه و زائد در صنعت است، که به هنگام جداسازی آهن در کوره‌های ذوب‌آهن از ناخالصی‌های موجود در سنگ‌آهن به وجود می‌آید. سرباره، ترکیبی از سیلیکات و اکسیدهای فلزی پیچیده است که پس از سرد شدن مواد ناخالص باقی می‌ماند. اجزای تشکیل‌دهنده سرباره عمدتاً آهنک، سیلیس و آلومین است و شباهت زیادی به اجزای سیمان پرتلند دارد. با بهره گرفتن از سرباره آهن به‌عنوان پیش‌ماده در ساخت ژئوپلیمرها می‌توان با دفن هدمند زباله‌های صنعتی و عدم استخراج منابع طبیعی، به محیط‌زیست و همچنین به اقتصادی کردن پروژه‌ها کمک کرد.

امروزه، با توسعه علم نانو تکنولوژی، نانومواد نیز به‌طور فزاینده‌ای در ژئوپلیمرها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نانوسیلیس یک ماده غیرسمی، بی‌مزه و بدون آلودگی، همراه با گروه‌های هیدروکسیل است که جذب آب را در سطح آن تسهیل می‌کند. از دیگر مشخصات نانوسیلیس می‌توان به اندازه ریزذرات، خلوص زیاد، چگالی کم، سطح ویژه زیاد و پراکندگی خوب آن اشاره کرد (هان و همکاران، ۲۰۲۲). پژوهشگران دریافته‌اند که نانوسیلیس و نانوالومین باعث کاهش نفوذپذیری و جذب آب در ژل‌های ژئوپلیمر می‌شوند. همچنین، ذرات نانوسیلیس و نانوالومین در ماتریس ژئوپلیمر نقش بسیار سازنده‌ای داشته و باعث افزایش قابلیت‌های مکانیکی ژئوپلیمر می‌شوند (خاطر، ۲۰۱۶).

دiaz و همکاران (۲۰۱۰) روی اثر توزیع اندازه ذرات بر واکنش‌پذیری ژئوپلیمرها تحقیق کرده و به این نتیجه رسیدند که مقدار بیشتر ذرات ریز باعث افزایش سطح ویژه و واکنش‌پذیری بیشتر و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری می‌شود. دب و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر نانوسیلیس بر افزایش مقاومت ژئوپلیمرها بر پایه خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی در دمای اتاق را مورد بررسی قرار دادند. آنها توانستند با مخلوطی از ۸۳ درصد خاکستر بادی، ۱۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی و ۲

با ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی نوع F و سرباره کوره آهن‌گدازی به این نتیجه رسیدند که افزودن ژئوپلیمر به طور قابل توجهی تنش تسلیم و سختی اولیه نمونه‌ها را افزایش می‌دهد و به تدریج با افزایش مقدار ژئوپلیمر، نمونه‌ها از حالت انعطاف‌پذیر فاصله گرفته و شکننده می‌شوند. ریورا و همکاران (۲۰۲۰) در مورد جایگزینی سیمان پرتلند معمولی با سیمان فعال شده قلیایی بر پایه خاکستر بادی در تثبیت خاک نوع A-۴ مطالعه کرده و به این نتیجه رسیدند که تثبیت خاک با ۳۰ درصد سیمان فعال شده قلیایی بر پایه خاکستر بادی بهترین مقاومت مکانیکی را حاصل می‌کند و در مقایسه با روش سنتی سیمان پرتلند معمولی در شرایط عمل‌آوری خیس نشده ۲۸ روزه، ۱۲ درصد مقاومت فشاری تک‌محوری را بهبود می‌بخشد. سوکپراسرت و همکاران (۲۰۲۱) تثبیت خاک رسی سیلت‌دار با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی و سرباره را مورد آزمایش قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بهینه‌ترین نسبت اختلاط ۱۰:۲۰:۷۰ (سرباره: خاکستر بادی: خاک) می‌باشد که بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری را در هر غلظتی از محلول قلیایی و در یک دمای معین به دست می‌دهد. آنها همچنین دریافتند که با افزودن سرباره بیشتر از ۱۰ درصد، مقاومت فشاری تک‌محوری به تدریج کاهش می‌یابد. نولو و همکاران (۲۰۲۱) روی تثبیت خاک انبساطی کتان سیاه با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی تحقیق کرده و به این نتیجه رسیدند که با اضافه کردن ۴۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی با غلظت محلول قلیایی سدیم هیدروکسید ۸ مولار می‌توان به ۵/۲ برابر مقاومت فشاری خاک نمونه طبیعی دست یافت. فخرآبادی و همکاران (۲۰۲۱) تثبیت خاک ماسه‌ای-رسی با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه سرباره مس را برای مقاومت در برابر شرایط آب-وهوایی سخت بررسی کردند و با انجام آزمایش‌های سیکل تر و خشک و مقاومت فشاری تک‌محوری به این نتیجه رسیدند که ترکیب خاک با ۱۵ درصد سرباره مس

کاهش نیاز خاکستر بادی به حرارت اولیه برای فعال‌سازی می‌باشد. چوب بستی و کوتانایی (۲۰۱۷) مطالعاتی آزمایشگاهی برای ارزیابی تأثیر ذرات نانوسیلیس بر مشخصات مکانیکی و ریزساختاری ماسه تثبیت شده با سیمان پرتلند انجام دادند. آنها دریافتند که با افزودن ۸ درصد نانوسیلیس، مقاومت فشاری نمونه‌ها بهبود می‌یابد. نتایج کار آنها نشان داد که نانوسیلیس باعث افزایش شدت پیک هیدرات کلسیم سیلیکات و هیدروکسید کلسیم می‌شود و می‌تواند به خوبی منافذ را پر کرده و باعث افزایش مقاومت فشاری شود. فامیفان و همکاران (۲۰۱۸) در مورد تثبیت خاک لاتریت حاشیه‌ای با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی نوع C و سرباره کوره آهن‌گدازی مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که افزودن سرباره کوره آهن‌گدازی به مخلوط خاک و ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی نوع C در نسبت‌های ۵۰:۵۰ (سدیم هیدروکسید: سدیم متاسیلیکات) اثری ندارد و بهینه‌ترین حالت مخلوط برای کسب بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه در نسبت‌های ۱۰:۳۰:۶۰ (سرباره کوره آهن‌گدازی: خاکستر بادی نوع C: خاک) و ۱۰:۹۰ (سدیم هیدروکسید: سدیم متاسیلیکات) به دست می‌آید. قدیر و رنجبر (۲۰۱۸) عملکرد مکانیکی خاک رسی تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه خاکستر آتشفشانی را با سیمان پرتلند معمولی مقایسه کردند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌های خاک تثبیت نشده با افزودن مواد تثبیت‌کننده می‌تواند از مقدار ۰/۲ به ۴ مگاپاسکال و از ۲ به ۱۲ مگاپاسکال در شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک برسد. آنها مشاهده کردند که مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه خاکستر آتشفشانی نسبت به خاک تثبیت شده با سیمان پرتلند معمولی در شرایط خشک، بهبود ۲۰۰ درصدی پیدا می‌کند. عبدالله و همکاران (۲۰۱۹) با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی نشده روی خاک رسی تثبیت شده

همراه با فعال‌کننده قلیایی سدیم هیدروکسید با نسبت ۱:۱ و غلظت ۱۱ مولار می‌تواند انتخاب مناسبی برای مقاومت در برابر چرخه‌های تر و خشک باشد. ونگ و همکاران (۲۰۲۱) خاک رسی تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه متاکائولین را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند و با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری دریافتند که با افزایش مقدار متاکائولین و فعال‌کننده قلیایی، مقاومت فشاری خاک رسی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. آنها نسبت ۲:۱ را برای متاکائولین به محلول قلیایی و مقدار ۱۲ درصد را برای حالت بهینه افزودن ژئوپلیمر به خاک رسی پیشنهاد دادند. ساهو و سینگ (۲۰۲۲) در مورد تثبیت خاک‌های انبساطی با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه سرباره، آهک هیدراته شده و سیمان پرتلند مطالعه‌ای انجام داده و دریافتند که تثبیت خاک‌های انبساطی با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه سرباره در مقایسه با روش‌های سنتی تثبیت، مانند سیمان و آهک، مقاومت و دوام بیشتری را حاصل می‌کند. لو و همکاران (۲۰۲۲) با مطالعه اثر افزودن ژئوپلیمر بر پایه متاکائولین بر خاک رس سیلت‌دار و مقایسه آن با روش‌های سنتی دریافتند که ژئوپلیمر بر پایه متاکائولین تأثیر آشکاری بر بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری و دیگر شاخص‌های مکانیکی نسبت به سایر افزودنی‌ها دارد.

نانومواد به آنها وجود ندارد. در این تحقیق، به ارزیابی عملکرد ژئوپلیمر ساخته شده با ترکیب نانوسیلیس و مصالح دورریز سرباره آهن در افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و کاهش نفوذپذیری خاک ماسه‌بادی پرداخته شده است. در این راستا، از سدیم هیدروکسید به عنوان فعال‌ساز قلیایی در ساخت ژئوپلیمر بهره گرفته شده است. پنج فاکتور مؤثر بر مقاومت فشاری، شامل دوره عمل‌آوری (برای بازه ۱-۲۸ روز)، میزان و غلظت محلول قلیایی (به ترتیب برای بازه‌های ۵-۲۰ درصد و ۴-۱۲ مولار)، میزان نانوسیلیس (برای بازه ۰-۳ درصد) و میزان سرباره آهن (برای بازه ۵-۲۰ درصد)، هر کدام در چهار سطح، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، برای بهینه‌سازی انتخاب ترکیب‌های مختلف از حالت-های ذکر شده در بالا، از روش آزمایش‌های تاگوچی نیز بهره گرفته شده تا با توجه به ترکیب‌های گزینش شده و تعداد کمتر آزمایش‌های پیشنهادی، بتوان فاکتورها و متغیرهای بیشتری را مورد ارزیابی قرار داده و مهندسی را در دستیابی به طرح اختلاط دقیق‌تر و اقتصادی‌تر سوق داد.

۲. مواد و روش‌های آزمایش

در این بخش، مواد مورد استفاده و روش آزمایش در این تحقیق شرح داده شده است.

۲-۱. مواد

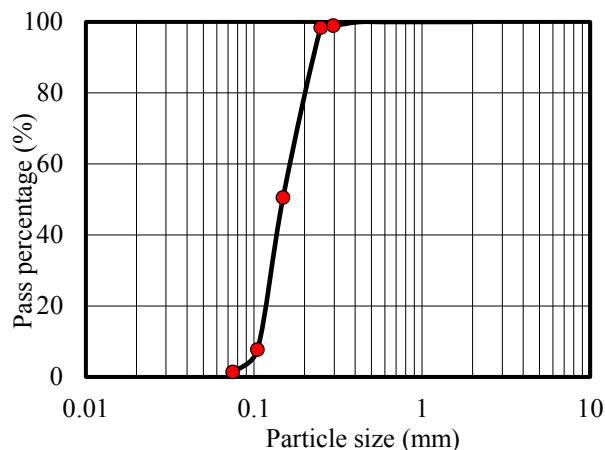
با اینکه مکانیسم ژئوپلیمر مدت‌ها پیش توسعه یافته و دارای ویژگی‌های مثبت زیادی است، این ماده هنوز به فراوانی سیمان پرتلند مورد استفاده قرار نگرفته است. از طرفی، اثرات نانوسیلیس در واکنش‌های سیمانی مورد مطالعه محققین زیادی قرار گرفته و به عنوان یک افزودنی مؤثر در زمینه بهبود خواص مکانیکی و میکروساختار به دست آوردن سریع‌تر مقاومت، پذیرفته شده است.

خاک مورد بررسی در این تحقیق دارای دانه‌بندی نشان داده شده در شکل ۲ بوده و متعلق به منطقه بیابانی چوپانان است. چوپانان، در استان اصفهان قرار داشته و در طول جغرافیایی ۵۴،۳۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳،۶۱ درجه شمالی واقع شده است. این منطقه، کویری بوده و دارای حجم زیادی از ماسه‌بادی است. با توجه به منحنی دانه‌بندی، مقادیر D_{30} ، D_{10} و D_{50} این خاک به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۱۳ و ۰/۱۶ میلی‌متر به دست آمده است. بر اساس روش USCS، این خاک،

علی‌رغم تمامی تلاش‌هایی که محققین در مورد استفاده از ژئوپلیمرها در خاک داشته‌اند، اما به اندازه کافی داده‌های علمی در مورد تثبیت خاک ماسه‌بادی توسط ژئوپلیمرها بر پایه سرباره آهن و مشاهده اثر افزودن

که تصویری از آن در شکل ۳-الف نشان داده شده است، در دسته SP قرار می‌گیرد. آزمایش تراکم پروکتور استاندارد به روش A و آزمایش برش مستقیم در قالب $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر به صورت خشک، و همچنین بعضی آزمایش‌های شناسایی دیگر روی این خاک انجام شده که نتایج آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

تثبیت ماسه‌بادی با استفاده از ژئوپلیمر با پایه سرباره آهن و نانوسیلیس



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک

باشد. به‌طور کلی، سرباره‌ها تفاوت‌هایی در ترکیب شیمیایی خود دارند؛ ولی درصد معمول ترکیب اجزای اصلی آنها در جدول ۲ آمده است. سرباره مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۳-ب نشان داده شده است.

ترکیب شیمیایی سرباره بستگی به ترکیب سنگ معدن و همچنین ناخالصی‌های موجود در سنگ‌آهک اضافه‌شده به کوره دارد. لذا، از نظر هدایت تولید آهن در کوره ذوب‌آهن بهتر است سنگ‌آهک دارای خلوص بیشتری

جدول ۱. مشخصات خاک

مشخصه	مقدار	استاندارد
γ_{dmax} (kN/m ³)	17.05	ASTM D4253
γ_{dmin} (kN/m ³)	14.57	ASTM D4254
e_{min}	0.56	ASTM D4253
e_{max}	0.82	ASTM D4254
D ₁₀ (mm)	0.11	ASTM D422
D ₃₀ (mm)	0.13	ASTM D422
D ₅₀ (mm)	0.16	ASTM D422
D ₆₀ (mm)	0.18	ASTM D422
C _c	0.94	ASTM D422
C _u	1.8	ASTM D422
D _r	0.8	ASTM D4253-4
USCS	SP	ASTM D2488
ω_{opt} (%)	13	ASTM D698
G _s	2.65	ASTM D854
ϕ	30	ASTM D3080

جدول ۲. اجزای سرباره آهن

ردیف	ترکیب	درصد
1	SiO ₂	34-40
2	CaO	34-40
3	Al ₂ O ₃	7-11
4	MgO	6-9
5	MnO	0.5-2.5
6	FeO	0.3-1.3
7	TiO ₂	1.5-4.5
8	V ₂ O ₅	0.05-0.35
9	Na ₂ O	0.25-0.75
10	K ₂ O	0.3-1.3
11	CaO/SiO ₂	0.8-1.11
12	H ₂ O	1-7



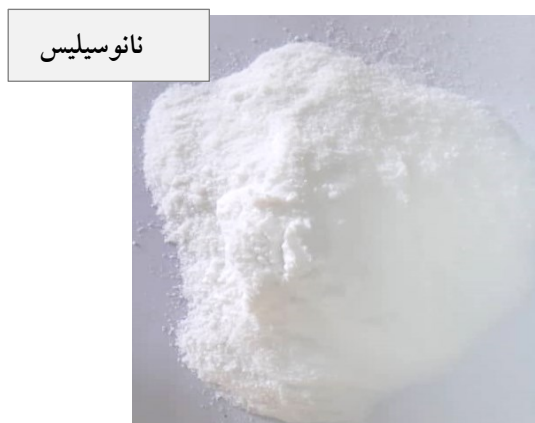
سرباره

ب



خاک

الف



نانوسیلیس

ج

شکل ۳. الف) خاک، ب) سرباره آهن و ج) نانوسیلیس

هیدروکسید با آب یک واکنش بسیار گرمازا است و لازم است تا حداقل یک روز قبل از استفاده برای هم‌دم شدن با محیط ساخته شود.

نانوسیلیس مورد استفاده در این تحقیق (شکل ۳-ج) دارای درجه خلوص SiO_2 بیش از ۹۹ درصد است و فعالیت خوب پوزولانی دارد و انتظار می‌رود در ترکیب با سرباره آهن بتواند در تهیه ژئوپلیمر مؤثر عمل کند. مشخصات نانوسیلیس مورد استفاده در جدول ۳ آمده است.

سدیم هیدروکسید (NaOH) را می‌توان به صورت پودر یا پولک‌های جامد سفیدرنگ تهیه کرد. برای ساخت محلول قلیایی شامل سدیم هیدروکسید، ابتدا وزن مشخصی از تکه‌های پولکی سدیم هیدروکسید را بر اساس غلظت انتخابی با آب مقطر داخل یک ظرف شیشه‌ای به آرامی حل کرده تا جایی که از حصول محلول یکنواخت اطمینان حاصل شود. سپس، برای استفاده از محلول به جهت جلوگیری از خوردگی شیشه، محلول در ظروف پلاستیکی ریخته می‌شود. واکنش سدیم

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نانوسیلیس

رنگ	چگالی (kN/m^3)	اندازه ذره (nm)	سطح ویژه (M^2/gr)	SiO_2 (%)	اجزای تشکیل دهنده	ماده
سفید	۲۴	۱۱-۱۳	۲۰۰	>۱۰۰	سیلیکون اکسید	نانوسیلیس

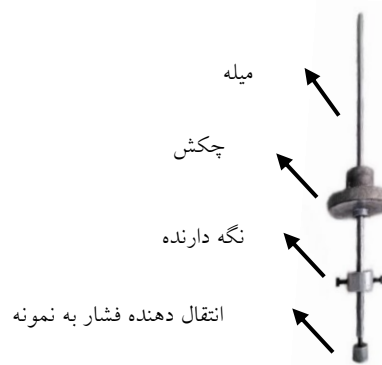
(شکل ۴-الف) متراکم می‌شود. در هر مرحله از تراکم، کوبه از ارتفاعی که تنظیم شده ۲۰ مرتبه متوالی جهت تراکم یکنواخت نمونه رها می‌شود. در این روش نمونه‌سازی، انرژی تراکم ثابت مانده و در انتهای کار وزن مخصوص خشک هر نمونه اندازه‌گیری می‌شود. به دلیل عدم استحکام نمونه ماسه‌ای، هنگام خارج کردن آن با استفاده از جک از قالب‌های استاندارد، در این تحقیق با استفاده از لوله‌های از جنس پولیکا، قالب‌هایی که بتوان آنها را از وسط جدا کرد، ساخته و مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۴-ب) تا بتوان به راحتی نمونه را از قالب جدا کرده و جهت بارگذاری در دستگاه قرار داد. برای اطمینان از نتایج آزمایش‌ها و کاهش خطاهای احتمالی، برای هر ردیف آزمایش ۳ نمونه ساخته شده و میانگین نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. کلیه نمونه‌ها پس از ساخت و طی شدن زمان عمل‌آوری با استفاده از دستگاه بارگذاری CBR مارشال ساخت شرکت ELE با سرعت بارگذاری ۵۰/۸ میلی‌متر در دقیقه به صورت کرنش کنترل شکسته شدند.

۲-۲. آزمایش‌ها و نمونه‌سازی

در مرحله اول این تحقیق، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس استاندارد ASTM-D2166 روی نمونه‌های خاک مخلوط با ژئوپلیمر بر پایه سرباره آهن و نانوسیلیس انجام شده است. آماده‌سازی نمونه‌ها به این صورت انجام می‌شود که پس از تهیه مواد اولیه و قبل از شروع به نمونه‌سازی (۲۴ ساعت قبل)، محلول قلیایی سدیم هیدروکسید ساخته شده و در ظرف‌های پلاستیکی نگهداری می‌شود. پوزولان صنعتی سرباره آهن، نانوسیلیس و محلول سدیم هیدروکسید را با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن کرده، سپس خاک و سرباره و نانوسیلیس را به صورت خشک با دست مخلوط کرده و پس از آن محلول سدیم هیدروکسید را به مخلوط اضافه کرده و تا مطمئن شدن از یکنواختی، با دست به خوبی مخلوط می‌شود. مخلوط حاصل در قالب استوانه‌ای (۳۶ میلی‌متر قطر داخلی و ۷۲ میلی‌متر ارتفاع) با استفاده از روش لُد (۱۹۷۸) در سه لایه ریخته شده و با استفاده از چکشی که قابلیت تنظیم از ارتفاع رها شدن کوبه را دارد



ب



الف

شکل ۴. الف) کوبه تراکم و ب) قالب نمونه‌سازی

توصیه می‌کند. نسبت سیگنال به نویز به عنوان شاخص واریانس محاسبه می‌شود و به جای میانگین مقادیر، برای تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده حساسیت مشخصه کیفی مورد بررسی به عوامل خارجی اثرگذار و غیرقابل کنترل در یک فرایند کنترل شده است. در روش تاگوچی، از این مفهوم برای به دست آوردن شرایط بهینه در آزمایش‌ها استفاده می‌شود. در هر آزمایش، هدف، یافتن بزرگترین نسبت سیگنال به نویز در نتایج است. مقدار سیگنال به نویز بزرگ نشان‌دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل بیش از اثر پارامترهای غیرقابل کنترل است. طراحی فرایند با بزرگترین نسبت سیگنال به نویز همواره سبب ایجاد بهترین کیفیت با حداقل واریانس است (استفانی فرالی و همکاران، ۲۰۲۲). در این تحقیق، از نرم‌افزار Minitab برای به دست آوردن برنامه و تحلیل آماری نتایج آزمایش‌ها بر اساس روابط تاگوچی استفاده شده است. مطابق جدول ۴، با تعریف پنج فاکتور در چهار سطح، از آرایه ارتوگونال L16 برای طراحی برنامه آزمایش استفاده شده است. در این مرحله، هدف، دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری با یافتن طرح اختلاط بهینه مواد ژئوپلیمری با ماسه‌بادی است. پس از یافتن طرح اختلاط بهینه براساس حداکثر مقاومت فشاری

پس از به دست آمدن نسبت‌های اختلاط بهینه در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، در ادامه مطالعات، آزمایش‌های تکمیلی CBR، نفوذپذیری و SEM نیز روی مخلوط بهینه خاک ماسه‌بادی با مواد ژئوپلیمری انجام شده است.

۲-۳. نسبت‌های اختلاط و روش تاگوچی

برخلاف رویه سنتی طراحی برنامه آزمایش‌ها که برای تعیین اثر تمام عوامل مختلف بر پارامتر مورد نظر باید آزمایش‌های متعددی طراحی می‌شد، در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی آزمایش‌ها به روش تاگوچی استفاده شده است. تاگوچی برای کاهش زمان و هزینه‌ای که صرف آزمایش‌های مهندسی می‌شد، شروع به توسعه روش‌های جدید برای بهینه‌سازی فرایند آزمایش‌های مهندسی کرد و فلسفه روش تاگوچی را بنیان نهاد. در روش تاگوچی، برای طراحی آزمایش‌ها از آرایه‌های ارتوگونال استفاده می‌شود. فرایند طراحی آزمایش‌ها شامل انتخاب آرایه‌های ارتوگونال مناسب، اختصاص دادن عوامل به ستون‌های مناسب و تعیین شرایط برای آزمایش‌ها است. وقتی آزمایش‌ها شامل تکرار در هر موقعیت آزمایشی باشد و نتایج به صورت کمی اندازه‌گیری شود، تاگوچی نسبت سیگنال به نویز را

تک‌محوری، آزمایش‌های دیگر مانند نفوذپذیری، CBR و تصویربرداری با SEM روی نمونه‌های تهیه شده با نسبت‌های اختلاط بهینه انجام می‌شود.

جدول ۴. فاکتورها و سطوح تعریف شده در روش تاگوچی

فاکتور	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
نسبت پوزولان به خاک	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲
نسبت محلول قلیایی به مجموع خاک و سرباره و نانوسیلیس	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲
نسبت نانوسیلیس به خاک	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳
مدت‌زمان عمل‌آوری (روز)	۱	۳	۷	۲۸
غلظت محلول (مولار)	۴	۸	۱۰	۱۲

برنامه آزمایش‌ها بر اساس پیشنهاد روش بهینه‌سازی تاگوچی در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. برنامه آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری

نمونه	نسبت پوزولان به خاک	نسبت محلول قلیایی به مجموع خاک و سرباره و نانوسیلیس	نسبت نانوسیلیس به خاک	غلظت محلول (مولار)	مدت‌زمان عمل‌آوری (روز)
1	5	5	0	4	1
2	5	10	1	8	7
3	5	15	2	10	3
4	5	20	3	12	28
5	10	5	1	12	3
6	10	10	0	10	28
7	10	15	3	8	1
8	10	20	2	4	7
9	15	5	2	8	28
10	15	10	3	4	3
11	15	15	0	12	7
12	15	20	1	10	1
13	20	5	3	10	7
14	20	10	2	12	1
15	20	15	1	4	28
16	20	20	0	8	3

۳. نتایج و بحث

در این بخش، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR، نفوذپذیری و SEM خاک آورده شده است.

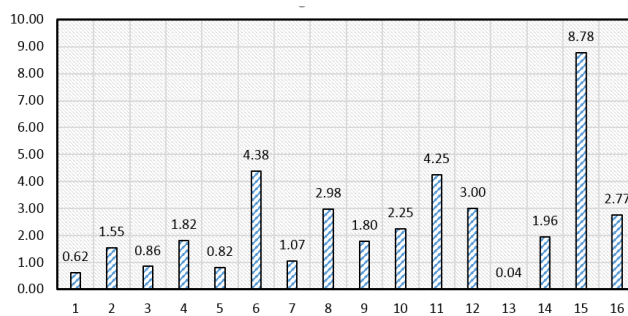
مطابق با نمونه ساخته‌شده شماره ۱۵ است که جزئیات مقادیر آن در جدول ۵ آمده است. نمونه‌ای مجدد با استفاده از طرح اختلاط بهینه ساخته شد و مورد آزمایش مقاومت تک‌محوری قرار گرفت تا از نتیجه مقاومت پیش‌بینی‌شده تاگوچی اطمینان حاصل شود. مقاومت فشاری تک‌محوری ۸/۰۵ مگاپاسکال برای نمونه تکراری شماره ۱۵ حاصل شد که با اختلاف ۸ درصدی از نتیجه نمونه اصلی نشان داد که نتایج آزمایش‌ها و پیش‌بینی‌های روش تاگوچی قابل اطمینان هستند.

۳-۱. مقاومت فشاری تک‌محوری

نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری و وزن مخصوص خشک نمونه‌های مختلف در جدول ۶ و نمودار میله‌ای شکل ۶ آورده شده است. تحلیل نتایج با استفاده از روش تاگوچی نشان داد که درصد بهینه اختلاط در این تحقیق

جدول ۶. نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری و وزن مخصوص خشک نمونه‌ها

شماره نمونه	مقاومت فشاری (Mpa)	γ_d (gr/cm ³)
1	0.62	1.79
2	1.55	1.76
3	0.86	1.90
4	1.82	1.92
5	0.82	1.76
6	4.38	1.80
7	1.07	2.00
8	2.98	1.86
9	1.80	1.65
10	2.25	1.84
11	4.25	1.96
12	3.00	1.97
13	0.04	1.78
14	1.96	1.75
15	8.78	1.95
16	2.77	1.95

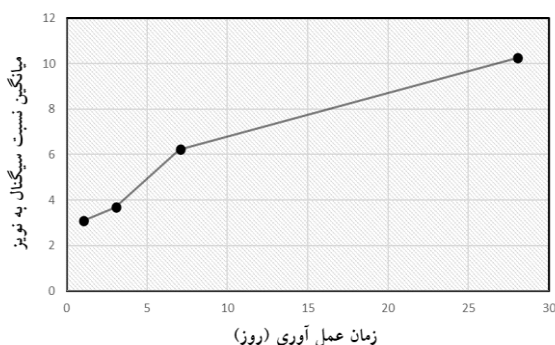
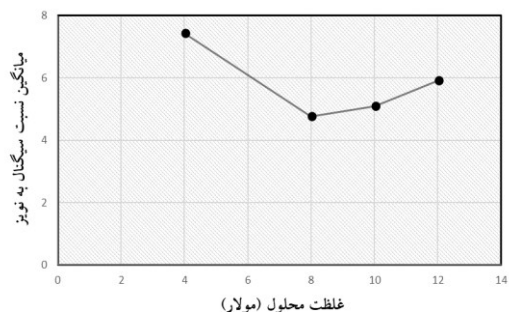
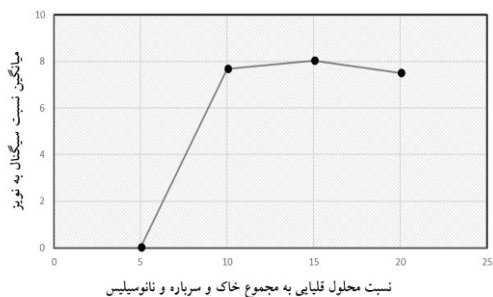
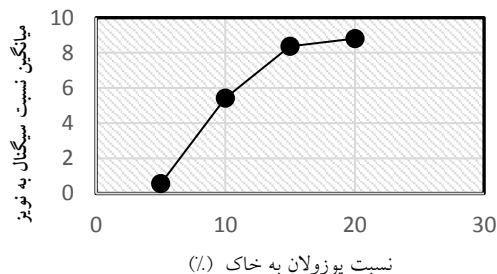
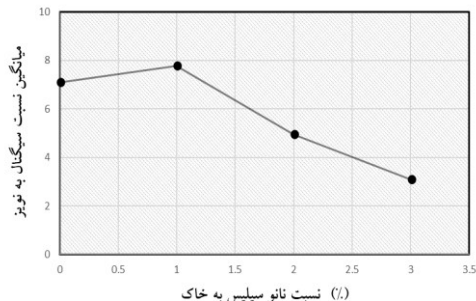


شماره نمونه

شکل ۶. نمودار میله‌ای نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها

فاکتورهای قابل کنترل در آزمایش که باعث بیشینه شدن مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شوند مد نظر است.

با استفاده از تحلیل تاگوجی، نمودارهای سیگنال به نویز فاکتورها در سطوح مختلف به دست آمد. در نمودارهای سیگنال به نویز این تحقیق، یافتن سطوحی از



شکل ۷. نمودارهای سیگنال به نویز فاکتورهای مورد بررسی در سطوح مختلف

افزایش مقاومت نشان می‌دهند. افزودن بیشتر از ۱ درصد باعث تجمع، کاهش کارایی نانومواد و ایجاد مراکز هسته‌زایی می‌شود؛ به طوری که در اطراف این مراکز شروع به متمرکز شدن می‌کنند و کامل در مخلوط پخش نشده و باعث افت مقاومت می‌شوند.

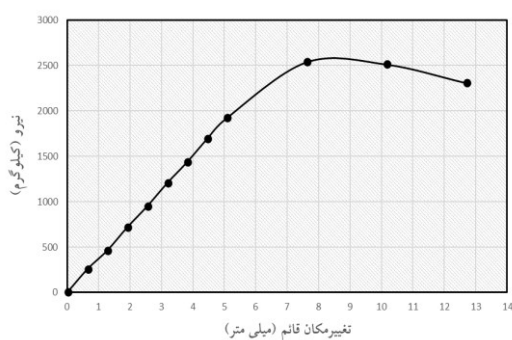
همچنین، از نمودار سیگنال به نویز مربوط به فاکتور میزان سرباره می‌توان فهمید که افزودن سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود. افزایش

بر اساس شکل ۷، مشاهده می‌شود که افزودن نانوسیلیس تا ۱ درصد باعث بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود و پس از آن باعث کاهش مقدار مقاومت می‌گردد. با توجه به مقادیر زیاد سیلیس و آلومین نانومواد و همچنین سطح ویژه زیاد و ریزدانه بودن آنها در حد ابعاد نانو که عوامل اساسی در کسب مقاومت نمونه‌های ژئوپلیمری هستند، مشاهده می‌شود که با افزودن نانومواد تا ۱ درصد نمونه‌ها به طور صعودی

افزایش غلظت محلول قلیایی به‌طور کلی باعث بهبود مقاومت فشاری محصور نشده نمی‌شود و در محدوده منطقی غلظت‌ها، در غلظت ۴ مولار، می‌توان به بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده دست یافت. افزایش غلظت محلول قلیایی باعث تخریب ساختار خاک و به تأخیر افتادن فرایند ژئوپلیمری شده و به‌طور کلی باعث افت مقاومت می‌شود.

۲-۳. نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

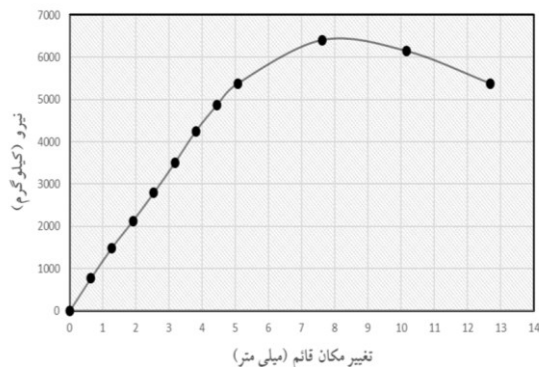
آزمایش CBR مطابق با استاندارد ASTM D1883 به دو صورت تر و خشک روی نمونه خاک تثبیت شده با طرح اختلاط بهینه به‌دست آمده انجام شده است. نمونه‌های تر به مدت ۲۴ ساعت به‌صورت غرقاب نگه داشته شده‌اند. نتایج نیرو-جابجایی قائم در شکل ۸ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار نیروی لازم برای نفوذ سنبه در نمونه در حالت خشک تقریباً سه برابر است.



تر

مقدار سرباره باعث افزایش واکنش‌های پوزولانی، چسبندگی و در نهایت افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود. افزودن میزان محلول تا حدود ۱۵ درصد به مخلوط باعث بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود و پس از آن نمونه‌ها با افزایش میزان محلول با افت مقاومت مواجه می‌شوند. با افزودن میزان محلول قلیایی، به جهت فعال‌کنندگی بیشتر، واکنش پلیمری بیشتری اتفاق می‌افتد و مقاومت افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر از میزان ۱۵ درصد به دو دلیل مقاومت کاهش می‌یابد: اول، خراب شدن ساختار خاک با تشکیل هیدروکسید فلزی (یون‌های منفی سدیم هیدروکسید با کاتیون‌های مواد معدنی خاک) و دوم با به تأخیر انداختن فرایند ژئوپلیمری به دلیل جلوگیری از فرایند استخراج مایع-جامد آلومینیوم و سیلیکات.

افزایش مدت‌زمان عمل‌آوری باعث بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود. با افزایش مدت‌زمان عمل‌آوری، واکنش‌های پوزولانی و فرایند ژئوپلیمراسیون تکمیل شده و مقاومت نمونه‌ها افزایش می‌یابد.



خشک

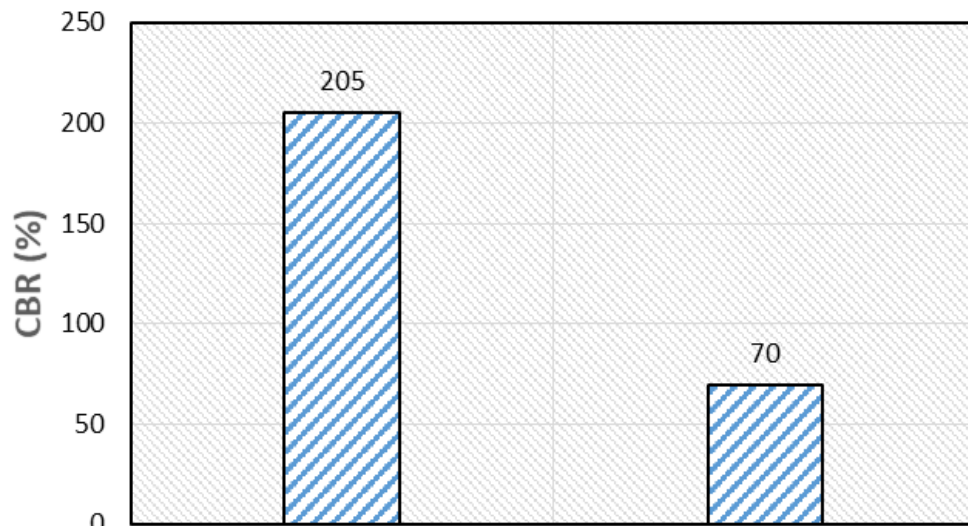
شکل ۸. نمودار نیرو-جابجایی قائم آزمایش CBR

در حالت خیس‌شدگی است. شرایط مشابه خیس شدن نمونه‌ها در آزمایشگاه می‌تواند در واقعیت بارش باران و برف یا وقوع سیلاب بر جاده خاکی باشد که با استفاده از طرح اختلاط بهینه حاصل از این تحقیق تثبیت شده

نتایج عددی CBR در نمودار میله‌ای شکل ۹ نشان داده شده است. عدد CBR مربوط به نمونه خشک حدوداً سه برابر نمونه تر است. این موضوع نشان‌دهنده افت مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با طرح اختلاط بهینه

استفاده نمود و از مقاومت کافی خاک تثبیت‌شده با این طرح اختلاط در برابر شرایط خیس‌شدگی مانند بارش نزولات آسمانی اطمینان حاصل نمود.

باشد. علی‌رغم کاهش مقاومت نمونه‌ها در حالت ترشدگی مطابق جدول ۷، عدد CBR هنوز در محدوده‌ای است که بتوان از آن در لایه اساس راه‌سازی



شکل ۹. مقدار CBR در دو حالت خشک (سمت چپ) و تر (سمت راست)

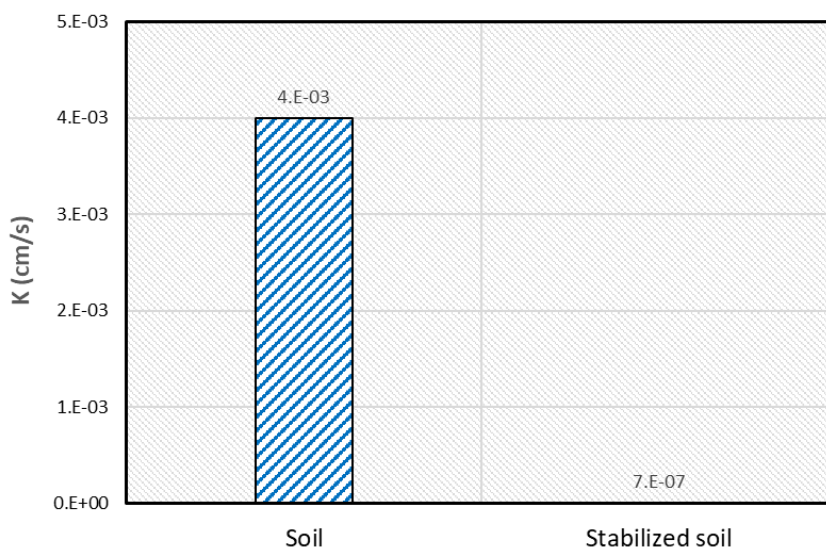
جدول ۷. توصیف خاک بر اساس عدد CBR (بولس، ۱۹۹۲)

محل مناسب استفاده	توصیف خاک	CBR
بستر	ضعیف	۰-۳
بستر	ضعیف تا نسبتاً خوب	۳-۷
زیراساس	نسبتاً خوب	۷-۲۰
اساس و زیراساس	خوب	۲۰-۵۰
اساس	عالی	>۵۰

بهینه با کاهش قابل توجه عدد نفوذپذیری مواجه می‌شود و مطابق شرایط توصیفی جدول ۸ از درجه نفوذپذیری متوسط به خیلی کم و تقریباً نفوذناپذیر تبدیل می‌گردد. این به دلیل واکنش‌های پوزولانی، افزایش چسبندگی و بسته شدن منافذ خاک می‌باشد.

۳-۳. نفوذپذیری

آزمایش نفوذپذیری به روش بار افتان (بولس، ۱۹۹۲) روی نمونه خاک تثبیت‌شده با طرح اختلاط بهینه به‌دست آمده انجام شده و نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه گشته است. مشاهده می‌شود که خاک پس از اختلاط با درصد‌های



شکل ۱۰. مقایسه ضریب نفوذپذیری خاک تثبیت شده (سمت راست) با تثبیت نشده (سمت چپ)

جدول ۸. توصیف درجه نفوذپذیری خاک بر اساس ضریب نفوذپذیری (چیدایکوبی و همکاران، ۲۰۱۱)

درجه نفوذپذیری	K (cm/sec)
خیلی زیاد	$K > 10^{-1}$
متوسط	$10^{-3} < K < 10^{-1}$
کم	$10^{-5} < K < 10^{-3}$
خیلی کم	$10^{-7} < K < 10^{-5}$
تقریباً نفوذناپذیر	$K < 10^{-7}$

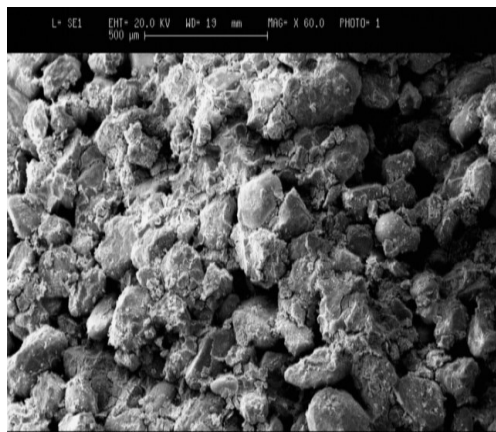
بین آنها، خاک ماسه‌ای را به یک خاک چسبنده و تقریباً نفوذناپذیر تبدیل کند.

۴. نتیجه‌گیری

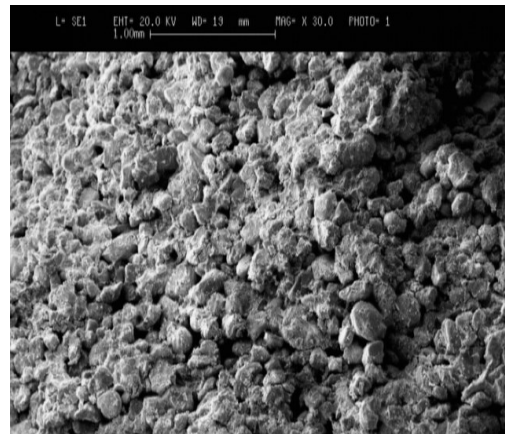
در این تحقیق، خاک ماسه‌بادی اصلاح شده با ژئوپلیمر بر پایه سرباره آهن و نانوسیلیس مورد بررسی قرار گرفت. پنج فاکتور مؤثر بر مقاومت فشاری تک‌محوری در چهار سطح آزمایش شدند و ضمن بررسی اثرات هر یک از آنها، طرح اختلاط بهینه خاک با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی برای حصول بیشترین مقاومت فشاری به دست آمد (جدول ۹). دستاوردهای این تحقیق در ادامه آمده است.

۳-۴. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

نمونه انتخاب شده برای این تصویربرداری، مخلوط بهینه‌ای است که بیشترین مقاومت فشاری را داشته است. تصاویر SEM خاک تثبیت شده با بزرگنمایی‌های مختلف در شکل ۱۱ آمده است. همانگونه که در تصاویر شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، بین دانه‌های خاک ماسه‌ای که کاملاً غیرچسبنده و جدا از هم هستند، ژل ژئوپلیمر تشکیل شده و توانسته به خوبی دانه‌های مجزای خاک را به همدیگر بچسباند. بدین ترتیب، با توجه به ایجاد چسبندگی بین دانه‌های ماسه و اشغال بخشی از فضای



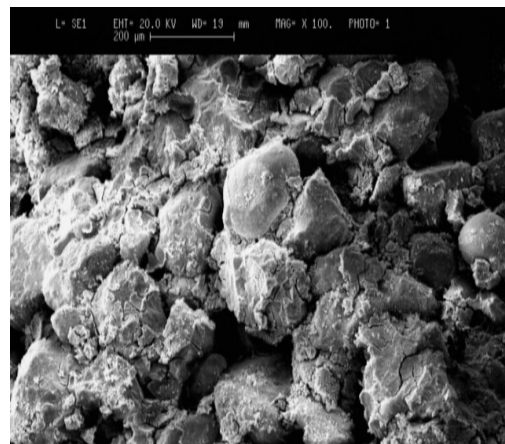
X 60.0



X 30.0



X 300.0



X 100.0

شکل ۱۱. تصاویر SEM نمونه مخلوط بهینه با ضرایب بزرگنمایی مختلف

جدول ۹. درصد بهینه اختلاط ماسه‌بادی با ژئوپلیمر بر پایه سرباره آهن و نانوسیلیس

فاکتور	درصد بهینه
نسبت پوزولان به خاک	۲۰
نسبت محلول قلیایی به مجموع خاک و سرباره و نانوسیلیس	۱۵
نسبت نانوسیلیس به خاک	۱
مدت زمان عمل‌آوری (روز)	۲۸
غلظت محلول (مولار)	۴

(۲) افزایش نسبت سرباره آهن به خاک به دلیل افزایش واکنش‌های پوزولانی و چسبندگی باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود.

(۱) افزایش نسبت نانوسیلیس به خاک تا حدود ۱ درصد باعث بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود و پس از آن احتمالاً به دلیل تجمع و شروع متمرکز شدن باعث افت مقاومت می‌شود.

حساسیت کمتر مخلوط نسبت به رطوبت، می توان از این روش اختلاط برای بهبود کیفیت لایه های زیرسازی راه استفاده نمود و نگرانی از جهت افت مقاومت غیرقابل قبول در حالت ترشدگی لایه های زیرسازی کمتر خواهد بود.

(۷) نتایج آزمایش نفوذپذیری روی نمونه طرح اختلاط بهینه نشان داد که پس از اختلاط، نفوذپذیری خاک به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و مخلوط عملاً نفوذناپذیر می شود.

(۸) تصاویر SEM از نمونه مخلوط بهینه نشان داد که ژل ژئوپلیمر تشکیل شده توانسته است به خوبی دانه های خاک را به همدیگر بچسباند و خاک ماسه ای غیرچسبنده را به یک خاک چسبنده و دارای مقاومت در برابر بارهای فشاری و تقریباً نفوذناپذیر تبدیل کند.

۵. تشکر و قدردانی

از زحمات آقای مهندس مهدی صادقیان، دانشجوی ارشد ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تقدیر و تشکر به عمل می آید.

(۳) افزایش نسبت محلول قلیایی به مجموع خاک و سرباره و نانوسیلیس تا حدود ۱۵ درصد باعث بهبود مقاومت فشاری تک محوری می شود و پس از آن، احتمالاً به دلیل تخریب ساختار خاک و به تأخیر انداختن فرایند ژئوپلیمری، باعث افت مقاومت می شود.

(۴) با افزایش مدت زمان عمل آوری، به دلیل وجود فرصت کافی برای تکمیل فرایند ژئوپلیمریزاسیون، مقاومت فشاری تک محوری افزایش می یابد.

(۵) افزایش غلظت محلول قلیایی به طور کلی باعث بهبود مقاومت فشاری تک محوری نمی شود و در محدوده منطقی غلظت ها (۱۲-۴ مولار)، در غلظت ۴ مولار می توان به بیشترین مقاومت فشاری تک محوری دست یافت. این موضوع می تواند به این دلیل باشد که با افزایش غلظت محلول، ساختار خاک تخریب شده و تکمیل واکنش های ژئوپلیمری به تأخیر می افتد.

(۶) آزمایش CBR در دو حالت تر و خشک روی نمونه طرح اختلاط بهینه انجام شد. عدد CBR مخلوط به دست آمده در حالت خشک ۲۰۵ و در حالت تر ۷۰ بود. با توجه به افزایش مقاومت خاک در اثر اختلاط و

۶. فهرست علائم

فهرست علائم به کار رفته در این تحقیق به شرح زیر است:

علائم انگلیسی

Y_0 مقدار هدف در روابط تاگوچی

Y_i مقدار عملکرد آزمایش i ام در روابط تاگوچی

K ضریب نفوذپذیری (m/s)

علائم یونانی

γ وزن مخصوص خاک (gr/cm^3)

زیرنویس

D خشک

۷. مراجع

- Abdullah, H. H., Shahin, M. A. and Walske, M. L. 2019. "Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag". *Soils Found.*, 59(6): 1906-1920.
- Adak, D., Sarkar, M. and Mandal, S. 2017. "Structural performance of nano-silica modified fly-ash based geopolymer concrete". *Constr. Build. Mater.*, 135, 430-439.
- Assaedi, H., Shaikh, F. and Low, I. M. 2016. "Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolymer". *J. Asian Ceramic Soc.*, 4(1): 19-28.
- Bowles, J. E. 1992. "Engineering properties of soils and their measurement". McGraw-Hill, Inc.
- Chiadikobi, K., Omoboriowo, A., Chiaghanam, O., Opatola, A. and Oyebanji, O. 2011. "Flood risk assessment of port harcourt, rivers state, Nigeria". *Adv. Appl. Sci. Res.*, 2(6): 287-298.
- Choobbasti, A. J. and Kutanaei, S. S. 2017. "Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 9(5): 981-988.
- Deb, P. S., Sarker, P. K. and Barbhuiya, S. 2015. "Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature". *Constr. Build. Mater.*, 101: 675-683.
- Diaz, E., Allouche, E. and Eklund, S. 2010. "Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers". *Fuel*, 89(5): 992-996.
- Fakhrabadi, A., Ghadakpour, M., Choobbasti, A. J. and Kutanaei, S. S. 2021. "Evaluating the durability, microstructure and mechanical properties of a clayey-sandy soil stabilized with copper slag-based geopolymer against wetting-drying cycles". *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 80(6): 5031-5051.
- Ghadir, P. and Ranjbar, N. 2018. "Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement". *Constr. Build. Mater.*, 188: 361-371.
- Han, Q., Zhang, P., Wu, J., Jing, Y., Zhang, D. and Zhang, T. 2022. "Comprehensive review of the properties of fly ash-based geopolymer with additive of nano-SiO₂". *Nanotech. Reviews*, 11(1): 1478-1498.
- Khater, H. M. 2016. "Effect of nano-silica on microstructure formation of low-cost geopolymer binder". *Nanocompos.*, 2(2): 84-97.
- Ladd, R. S. 1978. "Preparing Test Specimen using Undercompaction". *Geotechnical Testing Journal*, 1(1): 16-23. <http://dx.doi.org/10.1520/GTJ10364J>
- Luo, Y., Meng, J., Wang, D., Jiao, L. and Xue, G. 2022. "Experimental study on mechanical properties and microstructure of metakaolin based geopolymer stabilized silty clay". *Constr. Build. Mater.*, 316: 125662.
- Naskar, S. and Chakraborty, A. K. 2016. "Effect of nano materials in geopolymer concrete". *Perspect. Sci.*, 8: 273-275.
- Noolu, V., Rao, G. M. and Chavali, R. V. P. 2021. "Strength and durability characteristics of GGBS geopolymer stabilized black cotton soil". *Mater. Today: Proc.*, 43: 2373-2376.
- Phummiphon, I., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Arulrajah, A., Shen, S.-L. and Chindaprasirt, P. 2018. "High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material". *J. Hazard. Mater.*, 341: 257-267.
- Rivera, J. F., Orobio, A., Cristelo, N. and de Gutiérrez, R. M. 2020. "Fly ash-based geopolymer as A4 type soil stabiliser". *Transpo. Geotech.*, 25: 100409.
- Sahoo, S. and Singh, S. P. 2022. "Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers". *Constr. Build. Mater.*, 328: 127078.
- Singhi, B., Laskar, A. I. and Ahmed, M. A. 2016. "Investigation on soil-geopolymer with slag, fly ash and their blending". *Arab. J. Sci. Eng.*, 41(2): 393-400.
- Stephanie Fraley, J. Z., Oom, M. and Terrien, B. 2022. "Design of experiments via Taguchi methods-Orthogonal arrays". *LibreTexts-Engineering*.
- Sukprasert, S., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Rashid, A. S. A. and Nazir, R. 2021. "Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications". *Road Mater. Pavement Design*, 22(2): 357-371.
- Wang, S., Xue, Q., Zhu, Y., Li, G., Wu, Z. and Zhao, K. 2021. "Experimental study on material ratio and strength performance of geopolymer-improved soil". *Constr. Build. Mater.*, 267: 120469.