

Experimental Study of Compressive Strength and Shear Strength Parameters of Treated Sand with Nanomaterial, Basalt Fiber and Polymer

Sadegh Shahidi¹, Meysam Bayat^{2*} , Sayed Alireza Zarei³

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Abstract

Soil stabilization techniques have traditionally relied on cement or lime, yet there remains a significant knowledge gap regarding the mechanical behavior of soil treated with innovative materials. Addressing this gap, this study delves into the mechanical properties of soil stabilized with polyurethane (PU) foam, nano-silica, and basalt fiber. Through rigorous experimentation, unconfined compressive strength (UCS) and direct shear tests were conducted on reconstituted silica and calcareous samples, each treated with various combinations of these additives. A comprehensive examination of parameters such as additive content and curing time was undertaken to elucidate their effects. The results unveiled a noteworthy enhancement in UCS and shear strength parameters (cohesion and friction angle) with the incorporation of PU foam, nano-silica, or their amalgamation with fiber. Particularly striking was the superior performance observed with the combination of PU and basalt fiber, showcasing remarkable improvements in the mechanical behavior of both silica and calcareous sand, especially when considering shorter curing times. The synergistic effects of PU and basalt fiber proved instrumental in fortifying the soil's structural integrity against environmental challenges. Furthermore, it was consistently observed that calcareous samples exhibited elevated UCS, and shear strength values compared to their silica counterparts. This discrepancy underscores the inherent differences in mechanical behavior between these two types of sand, highlighting the need for tailored stabilization approaches. Moreover, the investigation delved into the failure patterns and microstructural changes within the stabilized samples, employing Scanning Electron Microscopy (SEM) for detailed analysis. This microscopic examination offered valuable insights into the efficacy of the stabilizing agents and their impact on the soil's mechanical properties. For instance, SEM imaging revealed significant bonding in fiber-reinforced samples, indicating enhanced load transfer mechanisms. Similarly, the presence of clusters of nano-silica particles adhering to sand particles showcased an improved cohesion within the stabilized soil. PU-stabilized samples, on the other hand, exhibited a cohesive layer enveloping sand particle, thereby enhancing interparticle connectivity and overall stability. The superior performance of PU over nano-silica was underscored by its ability to create a more cohesive matrix and foster stronger interparticle bonds, as evidenced by the SEM analysis. In conclusion, this study sheds light on the potential of innovative stabilization materials such as PU foam, nano-silica, and basalt fiber in bolstering the mechanical properties of soil. The findings not only offer valuable insights into the efficacy of these additives but also pave the way for the development of tailored soil stabilization techniques geared towards enhancing infrastructure resilience and sustainability.

Review History

Received: Mar 13, 2024

Revised: Sep 01, 2024

Accepted: Jun 01, 2024

Keywords

Silica and calcareous sand
Soil improvement
Fiber
Nanomaterials
Polymer

* Corresponding Author Email: bayat.m@pci.iaun.ac.ir - ORCID: 0000-0001-5525-5199



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه آزمایشگاهی مقاومت فشاری و پارامترهای مقاومت برشی ماسه بهسازی شده با نانومواد، الیاف بازالت و پلیمر

صادق شهیدی^۱، میثم بیات^{۲*} , سید علیرضا زارعی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد خوراسگان (اصفهان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۳. دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد خوراسگان (اصفهان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در حالی که روش‌های سنتی بهسازی خاک با استفاده از سیمان یا آهک به طور گسترده مورد تحقیق قرار گرفته‌اند، اما هنوز درک کاملی از رفتار مکانیکی خاک‌های بهسازی شده با افزودنی‌های جدید مثل پلیمرها وجود دارد. این مطالعه به بررسی خواص مکانیکی خاک‌های استحکام‌بخشی شده با فوم پلی‌یورتان (PU)، نانوسیلیس و الیاف بازالت می‌پردازد. مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) و آزمون برش مستقیم روی نمونه‌های بازسازی شده ماسه سیلیسی و کربناته با استفاده از ترکیبات مختلف از این مواد انجام شد. پارامترهای مختلفی از جمله مقدار مواد افزودنی و زمان عمل آوری مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان می‌دهند که با افزودن فوم PU، نانوسیلیکا یا ترکیب آنها با الیاف، مقاومت فشاری بدون و پارامترهای مقاومت برشی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به ویژه، ترکیب PU و الیاف بازالت عملکردی بسیار امیدبخش در بهبود رفتار مکانیکی ارائه می‌دهد، به ویژه برای زمان‌های عمل آوری کوتاه که می‌تواند در پروژه‌هایی که زمان اهمیت بالایی دارد، مفید واقع شود. همچنین، شکل گسیختگی نمونه‌ها و ساختار پلیمر میکروسکوپی نمونه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

ماسه سیلیسی و کربناته

بهسازی خاک

الیاف، نانومواد

پلیمر

۱- اجزای مقاله

بهبود خاک به عنوان یک پایه اساسی در مهندسی عمران مطرح است، به ویژه زمانی که در پروژه با خاک ضعیف سر و کار داریم [1-5]. استفاده از افزودنی‌های سنتی، موادی مانند سیمان و آهک از گذشته تا به امروز در بهبود پایداری خاک و بهبود ظرفیت باربری مورد استفاده مهندسين و پژوهشگران ژئوتکنیکی بوده است [6-11]. با این حال، با ظهور فناوری‌های پیشرفته که مضر برای محیط زیست هستند و فرایندهای پراثری، تمرکز به سوی استفاده

از مواد نوآورانه مانند نانومواد و پلیمرها انتقال یافته است [12]. این مواد نوآورانه فرصت‌های بی‌نظیری را برای تقویت ساختارهای خاکی ارائه می‌دهند و مشکلات مرتبط با خاک‌های ضعیف یا خاک‌های نرمی که در زمان بارگذاری دچار تغییر شکل می‌شوند، را به‌طور مؤثر کاهش می‌دهد. از طریق استفاده دقیق و مهندسی، این مواد ویژگی‌های ریزساختار خاک را با نفوذ مناسب در فضاهای خالی بین ذرات تغییر می‌دهند و در نهایت موجب افزایش مقاومت توده خاک می‌شوند [4]. با تشدید شهرنشینی و افزایش تقاضا برای زیرساخت‌ها، اهمیت روش‌های نوین بهسازی

* رایانامه نویسنده مسئول: bayat.m@pci.iaun.ac.ir - ORCID: 0000-0001-5525-5199

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



خاک به طور چشمگیری بیشتر می شود [13, 14].

در مهندسی عمران معاصر، استفاده از الیاف برای تقویت خاک یا تثبیت آن با آهک و سیمان به عنوان یک راهبرد تحول آفرین ظاهر شده است. با اضافه کردن الیاف که به طور معمول از موادی مانند پلی پروپیلن، بازالت، پلی استر یا فولاد تشکیل شده اند، در توده خاک، مهندسان ویژگی های مکانیکی و عملکرد آن را تقویت می کنند [2, 15-17]. این روش نه تنها مقاومت و ظرفیت تحمل بار خاک را افزایش می دهد، بلکه از شکست و تغییر شکل های ترد جلوگیری می کند [18]. افزودن الیاف به خاک، مقاومت کششی آن را افزایش می دهد، خطر ایجاد شکست های ترد و رفتارهای شکننده را کاهش می دهد. علاوه بر این، الیاف باعث می شود تا تنش ها درون جرم خاک به طور موثرتری پخش شود و احتمال شکست تحت بار را کاهش می دهد. مطالعه های قبلی نشان می دهند که تلفیق آهک، سیمان و الیاف، مواد مرکبی با ویژگی های مهندسی برتر ایجاد می کند [19-22]. علاوه بر این، استفاده از الیاف ها با کاهش نیاز به مواد تثبیت کننده سنتی مثل آهک و سیمان، مزایای زیست محیطی به همراه دارد که امروزه مورد توجه پژوهشگران است.

در مهندسی نوین، نانومواد با ویژگی های استثنایی خود، مواد ساختمانی را از طریق قدرت نفوذ بالا، توزیع، مقاومت و دوام، متحول کرده اند. اما تأثیر نانومواد از حوزه های ساخت و ساز معمولی فراتر می رود؛ آنها پیشروی خوبی در زمینه های مختلف مهندسی برای بهبود دوام، رفع آلودگی و راه حل های زیرساخت پایدار داشته اند [23-27]. جافاریان و همکاران [28] توانایی تحول آفرینی ترریق نانومواد به خاک های دانه ای را به روشنی نشان می دهند، با گزارش افزایش مقاومت فشاری و بهبود ویژگی های خاک های دانه ای. به طور مشابه، لوئو و همکاران [29] ویژگی های مکانیکی ماسه کربناته بهسازی شده با سیمان را از طریق نانوسیلیکا افزایش داد. این پیشرفت ها نقش اساسی نانومواد در انقلاب مهندسی عمران را تأکید می کنند.

پلیمرها به تازگی به عنوان یک ماده نوآورانه دیگری در مهندسی عمران ظاهر شده اند. فوم پلی یورتان یک پلیمر آلی با ساختارهای سلولی بسته یا باز از زمان های گذشته تاکنون کاربردهای گوناگونی پیدا کرده است. تحقیقات بسیاری برای ترکیب فوم پلی یورتان با مواد آلی یا سیمان برای ساخت وسازه های

معمول در مهندسی عمران انجام شده است [30-34]. تقویت و بهسازی خاک با فوم پلی یورتان چندین مزیت دارد، از جمله طبیعت سبک آن، ویسکوزیته پایین، خواص چسبندگی بالا، عایق بودن در برابر حرارت، پایداری شیمیایی، قابلیت اتساع بعد از ترریق، نرخ اتساع بالا و زمان واکنش کوتاه و سریع. تحقیقات قبلی نشان می دهد که تقویت انواع مختلف خاک های چسبنده و دانه ای با فوم پلی یورتان بدون در نظر گرفتن ویژگی های فیزیکی و مکانیکی یا سطوح آب زیرزمینی آنها، حتی در شرایط ژئوتکنیکی پیچیده، امکان پذیر است [13, 14, 35-37].

هر چند مطالعات زیادی روی تثبیت خاک با استفاده از مواد متنوع انجام شده است، اما هنوز بررسی کاملی روی مقاومت فشاری و پارامترهای مقاومت برشی خاک های دانه ای بهسازی شده با ترکیب الیاف بازالت، نانوسیلیکا و فوم پلی یورتان انجام نشده است.

۲- مواد و روش ها

در این مطالعه، مجموعه ای از آزمایش های مقاومت فشاری و برش مستقیم روی نمونه های بهسازی شده انجام شد، پنج نوع مخلوط افزودنی، شامل الیاف بازالت، آب، نانوسیلیکا و فوم پلی یورتان برای بهسازی نمونه های ماسه سیلیسی و کربناته در نظر گرفته شد. پنج گروه نمونه تقویت شده با افزودنی های مختلف آماده شده است که شامل نمونه های بهسازی شده با الیاف، نمونه های تثبیت شده با نانوسیلیکا، نمونه های بهسازی شده با ترکیبی از الیاف و نانوسیلیکا، نمونه های تثبیت شده با PU، و نمونه های بهسازی شده با PU و الیاف. این افزودنی ها به ماسه سیلیسی و کربناته افزوده شدند و سپس به درون قالب ها ریخته شدند تا پس از آن با عمل کوبش، نمونه ها آماده شوند. پس از دوره عمل آوری مورد نظر، آزمایش های UCS و برش مستقیم روی نمونه های انجام شده است. آثار مقدار افزودنی، زمان عمل آوری، نوع ماسه (سیلیسی و کربناته) روی مقدار مقاومت فشاری بررسی شده است. علاوه بر این، آزمایش های برش مستقیم برای تحلیل پاسخ برش نمونه ها انجام شده است.

در این تحقیق، همانطور که پیشتر اشاره شده است، ماسه سیلیسی و کربناته استفاده شده است. ماسه سیلیسی از منطقه ورزنه اصفهان جمع آوری شده است و ماسه کربناته از جزیره کیش در

است. قالب‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۵۰ میلی‌متر برای آماده‌سازی نمونه‌ها به کار گرفته شدند. نمونه‌ها با نرخ کرنش ثابتی برابر با یک درصد در دقیقه بارگذاری شدند تا به مقدار تنش ماکزیمم برسند. مواد افزودنی مانند آب، الیاف، نانوسیلیکا و پلی‌یورتان با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن با ماسه سیلیسی یا کربناته خشک مخلوط شده است. مقدار آب در صورت

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی ماسه سیلیسی و کربناته

Table 1. Summary of physical characteristics of silica and calcareous sands

	Soil type (USCS)	G_s	ω_{opt}	e_{max}	e_{min}
Silica Sand	SP	2.66	8	0.83	0.61
Calcareous Sand	SP	2.67	6.5	1.42	0.90

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی الیاف بازالت

Table 2. Physical and mechanical characteristics of basalt fiber

Characteristics	Results
Color	Golden brown
Cut Length (mm)	12
Diameter of fiber (μm)	16
Density (g/cm ³)	2.62
Fracture strength (MPa)	2150
Elastic modulus (GPa)	98
Tensile strength (MPa)	3000
Water absorption (%)	0.1

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی نانوسیلیکا

Table 3. Physical properties of nano-silica

Characteristics	Results
Color	White
Form	Amorphous
Nano type	Silicon oxide (SiO ₂)
Purity (%)	99
Particle Size (nm)	20-30
Specific Surface Area (m ² /g)	190-220
Free water content	Less than 3%

جدول ۴. ویژگی‌های فیزیکی پلی‌ورتان

Table 4. Technical properties of PU foam

Characteristics	Results
Application temperature	$\geq 5^\circ C$; curing below $50^\circ C$ not possible
Foam expansion	Approx. 100%-200%
Curing time	At $20^\circ C$ and high humidity: ~ 1 cm/h; at low humidity and $20^\circ C$: ~ 0.5 cm/h; at high humidity and $50^\circ C$: ~ 0.5 cm/h; loses adherence after 10-20 minutes
Cell structure after curing	Closed cell
Temperature resistance	$-40^\circ C$ to $100^\circ C$
Heat conductivity	Approx. 0.04 W/mK
Density (DIN 53420)	23 g/ml

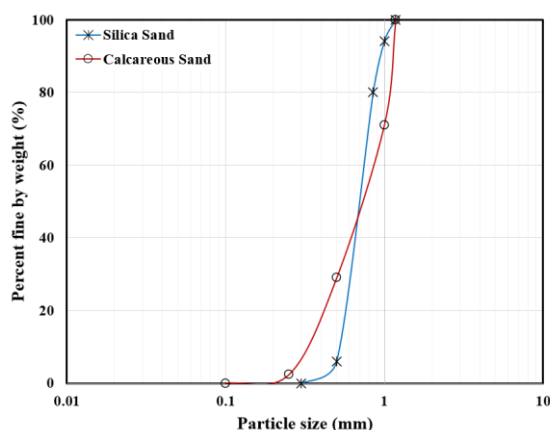
خلیج فارس استفاده شده است. منحنی‌های توزیع اندازه ذرات این دو نوع ماسه در شکل (۱) نشان داده شده است. ویژگی‌های فیزیکی ماسه‌ها نیز در در جدول (۱) ارائه شده است.

الیاف بازالت با درصد‌های مختلف از ۰/۵ تا ۴ درصد وزنی برای بهسازی نمونه‌ها استفاده شده است. الیاف بازالت، که از سنگ آتشفشانی طبیعی به دست می‌آید، به خاطر ویژگی‌های مکانیکی استثنایی و پایداری زیست‌محیطی خود، روز به روز بیشتر شناخته می‌شود. با مزایایی از قبیل استحکام کششی بالا، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری گرمایی، الیاف بازالت به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله ساختمانی، هوافضا و خودروسازی برای تقویت مواد کامپوزیتی و افزایش عملکرد سازه‌ها استفاده می‌شود. جدول (۲) ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی الیاف بازالت مورد استفاده در این تحقیق را شرح می‌دهد.

همان‌طور که پیشتر اشاره شده است از نانو ذرات نیز در این تحقیق برای تثبیت ماسه استفاده شده است. نوع نانو ذرات مورد استفاده در این تحقیق، نانوسیلیکا بوده است. جدول (۳) برخی ویژگی‌های نانوسیلیکا که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، ارائه می‌دهد.

نوع دیگر افزودنی مرود استفاده در این تحقیق، پلیمر بوده است. در این مطالعه، از فوم پلی‌یورتان یک نوع پلیمر خاص برای بهسازی خاک استفاده شده است. جدول (۴) ویژگی‌های آن را شرح می‌دهد.

در این مطالعه، آزمایش مقاومت فشاری طبق ASTM D2166 برای ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌های بهبود یافته استفاده شده



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه سیلیسی و کربناته

Fig. 1. Particle size distribution curves of silica and calcareous sands

نشان می‌دهند. نمونه‌های حاوی ۱۰٪ نانوسیلیکا بیشترین UCS را در هر دو نمونه ماسه دارند، با افزایش UCS از ۵٪ تا ۱۰٪ محتوای نانوسیلیکا و سپس کاهش بعد از ۱۰٪ به ۲۰٪. نمونه‌های ماسه کربناته در اینجا نیز دارای مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های ماسه سیلیسی هستند. به طور خاص، برای محتوای نانوسیلیکا ۵٪، ماسه کربناته دارای مقدار UCS بیشتری نسبت به شن سیلیکا را نشان می‌دهد، اما برای محتوای نانوسیلیکا بیشتر از ۵٪، شن سیلیکا ارزش‌های UCS بالاتری نسبت به شن کلسیم‌دار را نشان می‌دهد. کاهش مقاومت فشاری مشاهده شده با محتوای نانوسیلیکا بیشتر از ۱۰٪ می‌تواند به ذرات نانوسیلیکا ارتباط داد که بین ذرات ماسه را پر می‌کنند و باعث کاهش اصطکاک بین ذرات و تسهیل غلظت ذرات می‌شود.

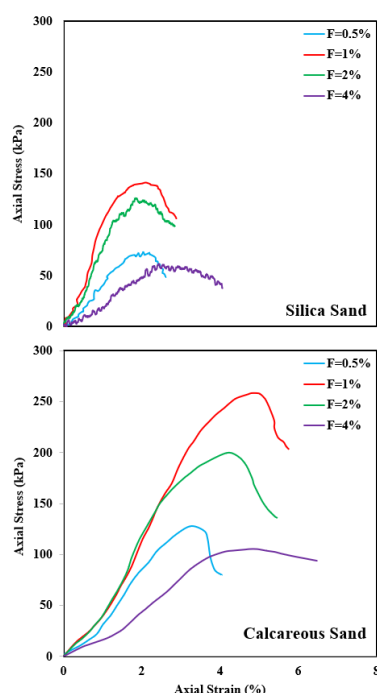
در این بخش، ترکیبی از نانوسیلیکا و الیاف بازالت برای تقویت نمونه‌های ماسه سیلیسی و کربناته استفاده شده است با مقدار محتوای ثابت نانوسیلیکا ۵٪ و مقدار الیاف متغیر از ۰/۵٪ تا ۴٪. منحنی‌های تنش-کرنش این نمونه‌ها در شکل (۴) نمایش داده شده است. مقادیر UCS با افزایش مقدار الیاف از ۰/۵٪ تا ۱٪ افزایش می‌یابد و در مقدار الیاف برابر با ۱٪ به بیشترین مقدار خود می‌رسد، اما پس از آن با افزایش بیشتر مقدار الیاف، مقاومت

وجود در ترکیب برابر با مقدار رطوبت بهینه (OMC) ماسه در نظر گرفته شده است. مخلوط‌ها با استفاده از روش تراکم مرطوب تا پنج لایه در قالب متراکم شده است و سپس درون یک نایلون قرار گرفته‌اند و در نهایت در دمای اتاق برای عمل‌آوری نگهداری شده‌اند.

برای آزمایش‌های برش مستقیم، نمونه‌ها در یک جعبه خمش ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متری قرار گرفته‌اند. تقریباً روند مشابهی برای ساخت نمونه نمونه‌های برش مستقیم با نمونه‌های تک محوری استفاده شده است. پس از عمل‌آوری و انتقال نمونه‌ها به دستگاه برش مستقیم، یک تنش نرمال یکنواخت از طریق صفحه بالا اعمال شده است. در نهایت، بارگذاری برشی انجام شد. از سرعت بارگذاری ۰/۰۱ میلی‌متر بر دقیقه برای آزمایش‌های برش مستقیم استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث‌ها

در این بخش، تأثیر مقدار افزودنی‌ها بر مقاومت فشاری نمونه‌های سیلیسی و کربناته پس از گذشت ۲۸ روز عمل‌آوری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های بهسازی شده با الیاف بازالت را نشان می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های تقویت شده با ۱٪ الیاف بیشترین UCS را دارند. در واقع، با افزایش مقدار الیاف از ۰٪ تا ۱٪ مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است و با افزایش بیشتر الیاف از ۱٪ تا ۴٪ منجر به کاهش UCS می‌شود. به علاوه، مقایسه بین ماسه سیلیسی و کربناته نشان می‌دهد که نمونه‌های کربناته تقویت شده با الیاف، مقاومت UCS بالاتری نسبت به همتایان سیلیسی دارند. اختلاف در مقدار UCS بین نمونه‌های ماسه سیلیسی و کربناته، به ویژگی‌های منحصر به فرد ذرات ماسه کلسیم‌دار بازمی‌گردد. سطوح خشن و خلل و فرج بالا در ماسه کربناته، امکان نقاط تماس و قفل‌شدگی بیشتر با الیاف را فراهم می‌کند، که منجر به مکانیسم‌های انتقال بار و توزیع تنش بهتر و در نهایت باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. علاوه بر این، ترکیب شیمیایی ماسه کربناته، به ویژه وجود مواد معدنی مانند کربنات کلسیم، می‌تواند اتصالات چسبنده قوی‌تری با مواد فیبر فراهم کند، که در نتیجه ویژگی‌های مکانیکی را بهبود می‌بخشد. شکل (۳) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیکا را



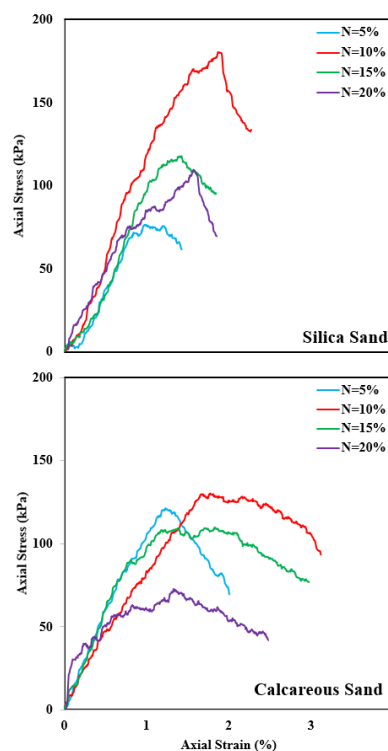
شکل ۲. نتایج آزمایش‌های تک محوری بر روی نمونه‌های تقویت شده با الیاف بازالت

Fig. 2. UCS results of fiber-reinforced samples

کاهش می‌یابد. به طور کلی، نمونه‌های ماسه کربناته مقدار UCS بالاتری نسبت به ماسه سیلیسی نشان می‌دهد، به ویژه برای محتوای الیاف بیشتر از ۵٪. به عنوان نمونه، در مقدار الیاف ۱٪، UCS ماسه کربناته برابر ۹۳۰ کیلوپاسکال است، در حالی که UCS ماسه سیلیسی تنها برابر با ۳۰۱ کیلوپاسکال است. مقایسه این یافته‌ها با نتایج قبلی در مورد نمونه‌های حاوی الیاف یا نانوسیلیس به تنهایی نشان می‌دهد که ترکیب نانوسیلیکا و الیاف بازالت بسیار تاثیرگذارتر از استفاده مجزای آنها است.

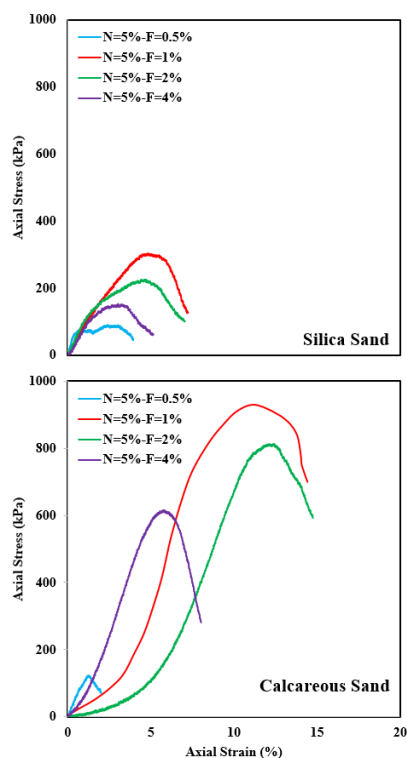
شکل (۵) نتایج آزمون UCS روی نمونه‌های تثبیت شده با پلی‌یورتان با محتوای پلی‌یورتان از ۵٪ تا ۲۰٪ را ارائه می‌دهند. یافته‌ها نشان می‌دهد که محتوای بهینه پلی‌یورتان برای هر دو نوع ماسه برابر با ۱۰٪ است. به طور خاص، مقدار UCS با افزایش مقدار پلی‌یورتان از ۵٪ تا ۱۰٪ افزایش می‌یابد، سپس بعد از آن با افزایش بیشتر مقدار پلی‌یورتان، مقاومت آن کاهش می‌یابد. در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانو و الیاف، نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان مقدار UCS بالاتری دارند، که نشان‌دهنده مزیت پلی‌یورتان نسبت به نانومواد و الیافها برای بهبود خاک است. این مزیت ممکن است از قابلیت پلی‌یورتان برای ایجاد یک ماتریس کامل پخش شده و مقاوم درون توده خاک نشأت گرفته باشد که پایداری و ظرفیت تحمل بار را افزایش می‌دهد. به علاوه، نمونه‌های ماسه کربناته به طور کلی مقدار UCS بالاتری نسبت به ماسه سیلیسی در تمام مقادیر پلی‌یورتان نشان می‌دهند که نشان از عملکرد برتر آنها در خاک‌های کربناته است. بهبودهای در رفتار مکانیکی خاک‌های دانه‌ای همچنین در مطالعات قبلی گزارش شده است [12, 38, 39] که با یافته‌های ارائه شده در این تحقیق همخوانی دارد.

همچنین، ما مقاومت فشاری نمونه‌های پلی‌یورتان تقویت شده با الیاف را نیز بررسی کردیم. شکل (۶) تأثیر مقدار الیاف بر نتایج UCS نمونه‌های پلی‌یورتان تقویت شده با الیاف را نشان می‌دهند. در این تحقیق، محتوای پلی‌یورتان ثابت برابر با ۱۵٪ است، در حالی که مقدار الیاف از ۰ تا ۴٪ متغیر است. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت فشاری با افزایش مقدار الیاف از ۰ تا ۴٪ به طور تدریجی افزایش می‌یابد. به طور مشخص، برای محتوای الیاف داده شده، نمونه‌های ماسه کربناته مقدار UCS بالاتری نسبت به



شکل ۳. نتایج آزمایش‌های تک محوری روی نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیکا

Fig. 3. UCS results of nano-silica stabilized samples

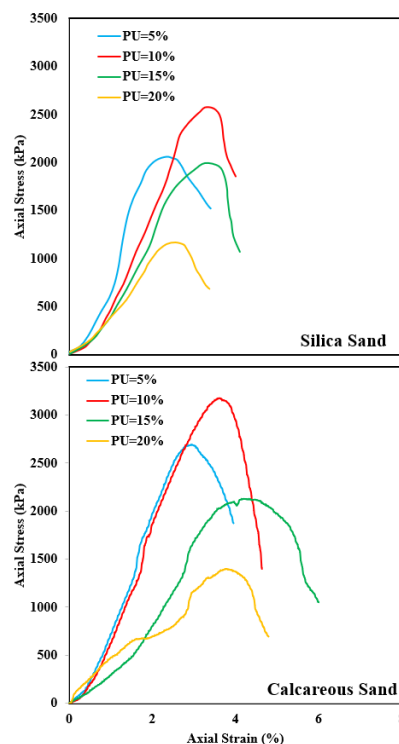


شکل ۴. نتایج آزمایش‌های تک محوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیکا و تقویت شده با الیاف بازالت

Fig. 4. UCS results of nano-silica stabilized fiber-reinforced samples

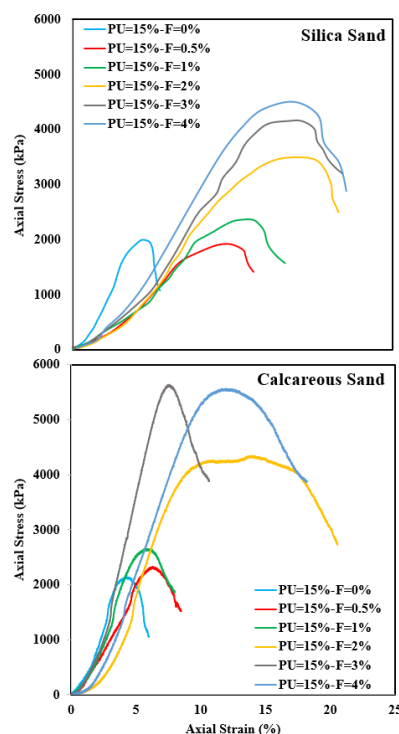
نمونه‌های شن سیلیکا را نشان می‌دهند. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزودن الیاف به نمونه‌های پلی‌یورتان تقویت شده باعث بهبود قابل توجه UCS و افزایش کرنش شکست می‌شود. این ترکیب از پلی‌یورتان و الیاف به دلیل اثرات هم‌زمانی آن‌ها بهبودهای قابل توجهی در ویژگی‌های مکانیکی را ایجاد می‌کند. به‌طور خاص، افزودن الیاف مقاومت کششی و ظرفیت تحمل بار خاک را افزایش می‌دهد، در حالی که پلی‌یورتان همبندی و استحکام را فراهم می‌کند که منجر به ایجاد یک توده خاکی محکم و انعطاف‌پذیر می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که ترکیب پلی‌یورتان و الیاف برای کاربردهای بهسازی خاک، عملکرد و مقاومت بهبود یافته در هر دو نوع ماسه سیلیسی و کربناته ارائه می‌دهد. برخی تحقیقات قبلی نیز از ترکیب الیاف‌ها و پلیمرها برای افزایش رفتار مکانیکی انواع خاک‌ها استفاده کرده‌اند [40, 40] که نتایجی همسو با این نتایج بدست آوردند.

در این بخش، تأثیر زمان عمل‌آوری که از ۳ ساعت تا ۲۸ روز برای نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان و از ۱ روز تا ۲۸ روز برای نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا است، بررسی شده است. پس از ۳ ساعت، نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان به مقاومت کافی و قابل اندازه‌گیری رسیدند، در حالی که نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا نیاز به یک دوره عمل‌آوری بیشتری برای به دست آوردن مقاومت کافی برای اندازه‌گیری داشتند. همانطور که از نتایج در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود، یک روند ثابت افزایش UCS با زمان در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود که به دلیل سخت‌شدن پیش‌رونده پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا ناشی از واکنش‌های شیمیایی یا فرآیند هیدراتاسیون نسبت داده می‌شود. به‌طور کلی، ماسه کربناته مقادیر UCS بالاتری نسبت به ماسه سیلیسی برای تمامی زمان‌های عمل‌آوری نشان می‌دهد، که به اختلاف‌های ذاتی و فیزیکی آنها مرتبط است. علاوه بر این، این اختلاف بین ماسه کربناته و سیلیسی با افزایش زمان عمل‌آوری، به‌ویژه هنگام اضافه کردن الیاف، تشدید می‌شود. در حالی که به‌طور کلی UCS با گذر زمان افزایش می‌یابد، نرخ افزایش UCS به وابستگی از افزودنی‌های استفاده شده متفاوت است. به‌طور خاص، نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان نرخ بهبود UCS بالاتری نسبت به نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا را نشان می‌دهند که عملکرد برتر پلی‌یورتان را نسبت به گذشت زمان نشان می‌دهد. علاوه بر این، اضافه کردن الیاف مقادیر



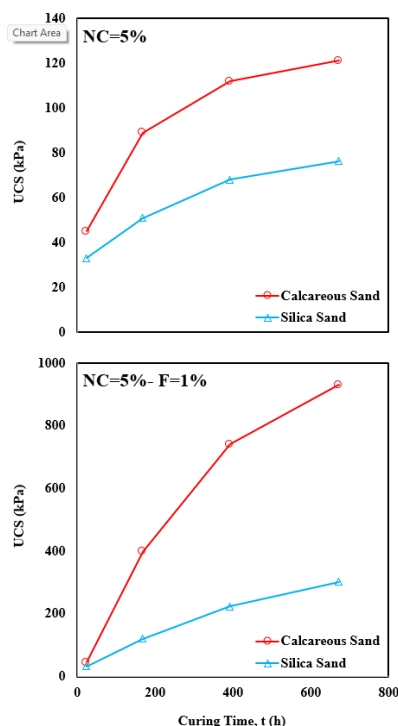
شکل ۵. نتایج آزمایش‌های تک محوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده با پلی‌ارتان

Fig. 5. UCS results of PU-stabilized samples



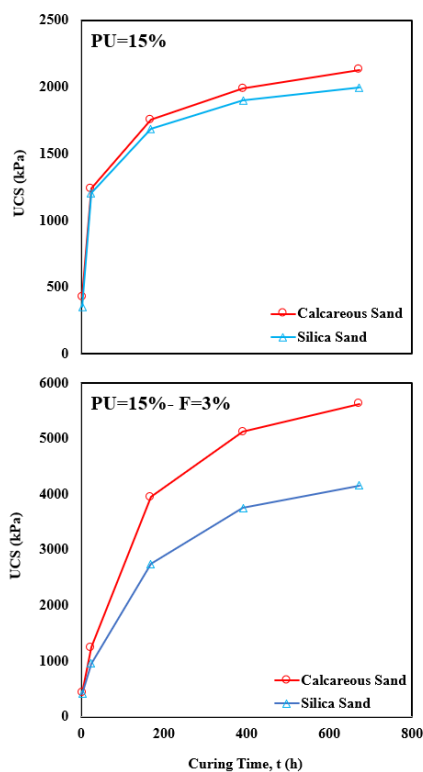
شکل ۶. نتایج آزمایش‌های تک محوری روی نمونه‌های تثبیت شده با پلی‌ارتان و الیاف

Fig. 6. UCS results of PU-stabilized fiber-reinforced samples



شکل ۷. اثر زمان عمل‌آوری بر روی نمونه‌های بهسازی شده حاوی نانوسیلیکا

Fig. 7. Effect of curing time on the UCS of treated samples containing nano-silica



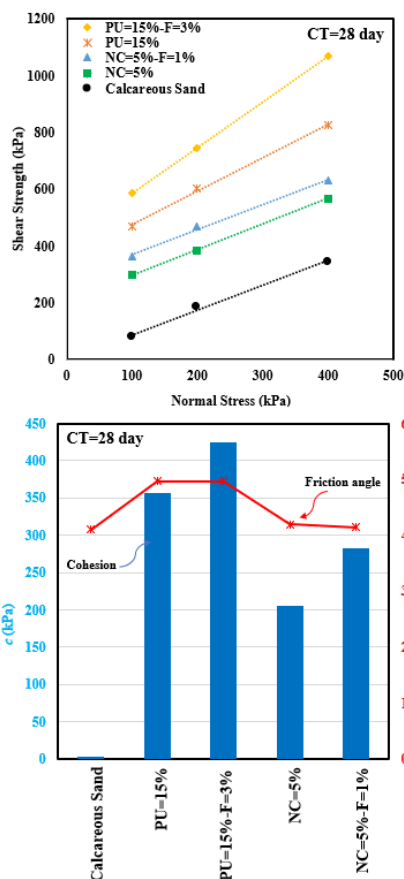
شکل ۸. اثر زمان عمل‌آوری بر روی نمونه‌های بهسازی شده حاوی پلی‌اورتان

Fig. 8. Effect of curing time on the UCS of treated samples containing PU

UCS را برای هر دو نمونه تقویت شده با پلی‌یورتان و نانوسیلیکا افزایش می‌دهد که به تأکید بر آثار هم‌زمانی افزودنی‌های ترکیب شده در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک می‌پردازد.

بررسی تجزیه و تحلیل تصاویر حالت‌های شکست به عنوان یک ابزار حیاتی برای ارزیابی اثربخشی افزودنی‌های مختلف در نمونه‌های خاک بهسازی شده عمل می‌کند [41-45]. در شکل (۹)، تأثیر افزودنی‌های مختلف بر الگوهای شکست نشان داده شده است. هیچ تفاوت قابل تشخیصی بین حالت‌های شکست مشاهده شده در نمونه‌های ماسه سیلیسی و کربناته وجود نداشت. بنابراین، برای ساده‌سازی، تنها یک تصویر نماینده برای هر نوع گروه افزودنی ارائه شده است. دو تصویر بالا الگوهای شکست مشاهده شده در ماسه سیلیسی را نشان می‌دهند، در حالی که دو تصویر پایین حالت‌های شکست در ماسه کربناته را نشان می‌دهند. نمونه‌هایی که تنها با پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا تثبیت شده‌اند، رفتار ترد به همراه ترک‌های برشی را نشان داده‌اند. اضافه کردن الیاف‌ها به نمونه‌ها منجر به تغییر قابل توجهی در رفتار شده است. به‌طور خاص، افزودن الیاف‌ها باعث تغییر رفتار از ترد به انعطاف‌پذیر می‌شود. بنابراین، حضور الیاف‌ها باعث افزایش سختی و مقاومت در برابر انتشار ترک‌ها در نمونه‌ها می‌شود.

بررسی تجزیه و تحلیل تصاویر حالت‌های شکست به عنوان یک ابزار حیاتی برای ارزیابی اثربخشی افزودنی‌های مختلف در نمونه‌های خاک بهسازی شده عمل می‌کند [41-45]. در شکل (۹)، تأثیر افزودنی‌های مختلف بر الگوهای شکست نشان داده شده است. هیچ تفاوت قابل تشخیصی بین حالت‌های شکست مشاهده شده در نمونه‌های ماسه سیلیسی و کربناته وجود نداشت. بنابراین، برای ساده‌سازی، تنها یک تصویر نماینده برای هر نوع گروه افزودنی ارائه شده است. دو تصویر بالا الگوهای شکست مشاهده شده در ماسه سیلیسی را نشان می‌دهند، در حالی که دو تصویر پایین حالت‌های شکست در ماسه کربناته را نشان می‌دهند. نمونه‌هایی که تنها با پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا تثبیت شده‌اند، رفتار ترد به همراه ترک‌های برشی را نشان داده‌اند. اضافه کردن الیاف‌ها به نمونه‌ها منجر به تغییر قابل توجهی در رفتار شده است. به‌طور خاص، افزودن الیاف‌ها باعث تغییر رفتار از ترد به انعطاف‌پذیر می‌شود. بنابراین، حضور الیاف‌ها باعث افزایش سختی و مقاومت در برابر انتشار ترک‌ها در نمونه‌ها می‌شود.



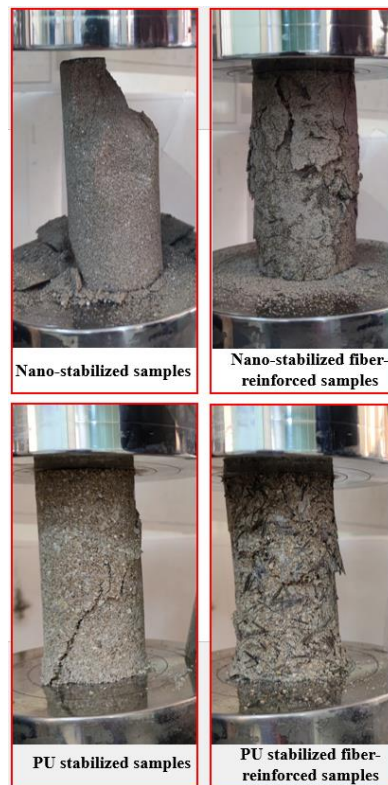
شکل ۱۱. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه کربناته

Fig. 11. Direct shear tests on calcareous sand samples

مقایسه بین نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان و نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا نشان داد که پلی‌یورتان انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به نانوسیلیکا دارد. این تفاوت در انعطاف‌پذیری در الگوهای شکست مشاهده می‌شود، بطوریکه ترک‌های مشاهده شده در نمونه‌های با پلی‌یورتان تمایل به نشان دادن چسبندگی بیشتر نسبت به نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا دارند.

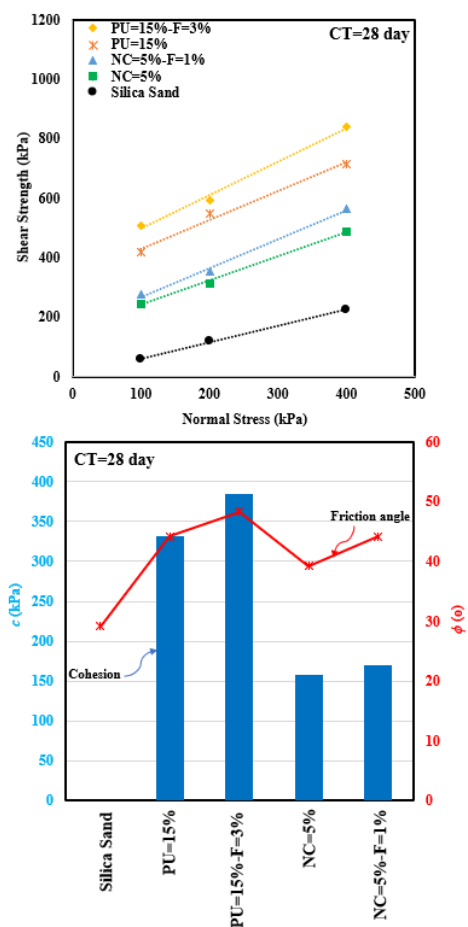
پارامترهای مقاومت برشی، از جمله چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک (φ)، نقش حیاتی در ارزیابی پایداری و رفتار مواد خاکی ایفا می‌کنند. در این مطالعه، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم برای ارزیابی مقاومت برشی نمونه‌های سیلیسی و کربناته تحت تنش‌های نرمال ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. شکل‌های (۱۰ و ۱۱)، نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برای نمونه‌های سیلیسی و کربناته را نشان می‌دهند.

یافته‌ها نشان می‌دهند که نمونه‌های درمان شده مقاومت برشی بسیار بالاتری نسبت به نمونه‌های ماسه خالص سیلیسی و کربناته دارند. در میان نمونه‌های بهسازی شده برای هر دو نوع ماسه،



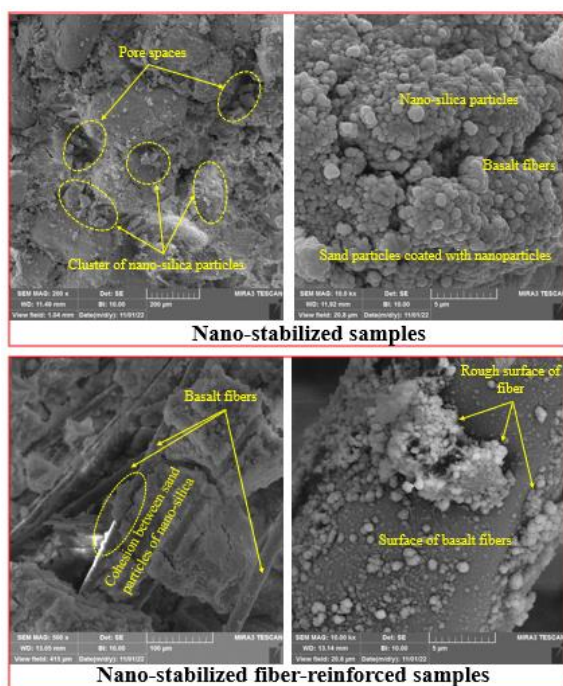
شکل ۹. فرم گسیختگی نمونه‌های بهسازی شده

Fig. 9. Failure patterns of the treated samples



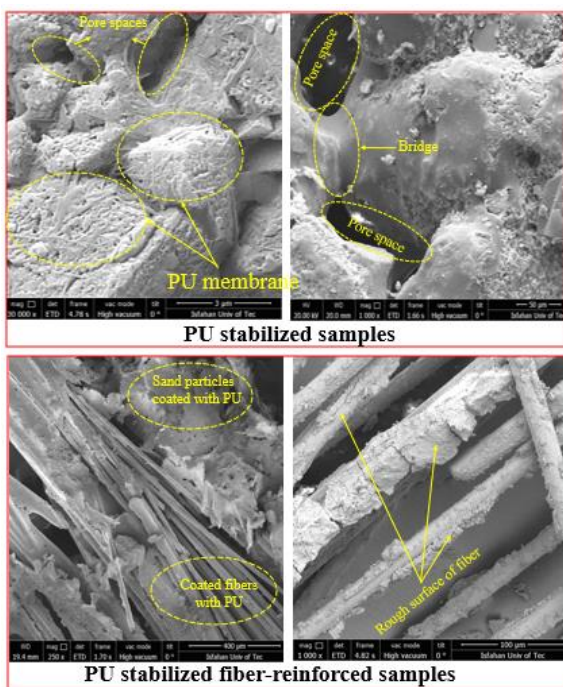
شکل ۱۰. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم روی ماسه سیلیسی

Fig. 10. Direct shear tests on silica sand samples



شکل ۱۲. نتایج SEM روی نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا

Fig. 12. SEM results for the samples containing nano-silica



شکل ۱۳. نتایج SEM روی نمونه‌های حاوی پلی‌ارتان

Fig. 13. SEM results for the samples containing PU

تجزیه و تحلیل SEM نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا خوشه‌هایی از ذرات نانوسیلیکا را که به سطح ذرات ماسه چسبیده‌اند و یک لایه محافظ تشکیل می‌دهند را نشان می‌دهد. این پدیده اتصال بین ذرات را بهبود می‌بخشد و فضاهای خالی را پر کرده و ویژگی‌های مکانیکی توده خاک را بهبود می‌بخشد. به طور

نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا کمترین مقاومت برشی را نشان می‌دهند، در حالی که نمونه‌های تثبیت‌شده با پلی‌یورتان و الیاف، مقادیر بالاتری از مقاومت برشی را نشان می‌دهند. افزایش مقاومت برشی با افزودن الیاف به نمونه‌های تثبیت‌شده با نانو یا پلی‌یورتان به تأثیر تقویتی الیاف‌ها در داخل ماتریس خاک برمی‌گردد. الیاف‌ها به عنوان عناصر تحمیل بار عمل می‌کنند، فشارهای اعمالی را به طریق بهتری توزیع می‌کنند و کلیه چسبندگی و مقاومت در برابر تغییر شکل برشی را افزایش می‌دهند.

مقایسه نتایج بین ماسه سیلیسی و آهکی نشان می‌دهد که نمونه‌های ماسه کربناته به طور کلی مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه‌های سیلیسی را برای یک افزودنی خاص نشان می‌دهد. علاوه بر این، اضافه کردن الیاف به نمونه‌های پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا منجر به افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک برای ماسه سیلیسی شد، در حالی که این پارامترها برای ماسه کربناته نسبتاً ثابت مانده است. این تفاوت می‌تواند به دلیل تفاوت در ساختار و شکل دانه‌های ماسه سیلیسی و کربناته باشد. ماسه سیلیسی معمولاً از ذرات گرد گوشه تشکیل شده است که در مقابل تنش‌های برشی حساس‌تر است و تمایل بیشتری به حرکت و لغزش دارد. هنگامی که الیاف‌ها به نمونه‌های پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا اضافه می‌شود، آن‌ها می‌توانند باعث افزایش درگیری بین دانه‌ها شوند و تا حدودی مانع غلتش و لغزش دانه‌ها می‌شوند و در نهایت باعث افزایش زاویه اصطکاک می‌شوند. با این حال، در ماسه کربناته که شامل ذرات تیز گوشه‌تری است، اصطکاک طبیعی بین ذرات از پیش بالا است. بنابراین، اضافه کردن الیاف‌ها ممکن است به طور قابل توجهی سازوکار برهمکنش ذرات را تغییر ندهد. علاوه بر این، تغییرات پارامترهای مقاومت برشی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی پلی‌یورتان و الیاف بالاترین مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک را از خود نشان می‌دهند.

در شکل‌های (۱۲ و ۱۳)، نتایج SEM نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا و پلی‌ارتان را ارائه شده است. به طور کلی، تصاویر SEM نمونه‌های تقویت شده با الیاف، اتصال محکم بین الیاف‌ها و ذرات ماسه را نشان می‌دهد. این سازوکار اتصال انتقال بار در داخل ماتریس خاک را تسهیل می‌کند و ویژگی‌های مکانیکی آن را بهبود می‌دهد.

مقاومت فشاری می‌شود، با مقدار الیاف بهینه بیشترین مقدار مقاومت فشاری به ترتیب ۴۵۰۲ و ۵۶۲۳ کیلوپاسکال برای ماسه سیلیسی و کربناته پس از ۲۸ روز بدست آمده است.

۳- بررسی زمان عمل‌آوری نشان می‌دهد که نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان نرخ افزایش مقاومت فشاری بسیار بالاتری را نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا دارند، که نشان‌دهنده کارایی برتر پلی‌یورتان در بهبود خواص مکانیکی خاک در زمان کوتاه‌تر است که می‌تواند در پروژه‌هایی که زمان اهمیت بالایی دارد مورد توجه واقع شود.

۴- بررسی تجزیه و تحلیل بصری نمونه‌ها پس از آزمایش تک محوری نشان دهنده رفتار ترد نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان یا نانوسیلیکا، با تشکیل ترک‌های برشی است. با این حال، اضافه کردن الیاف بازالت، مانع از بروز رفتار ترد در نمونه‌ها شده است. نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان تردی کمتری نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا از خود نشان می‌دهند.

۵- نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان می‌دهد که در نمونه‌های بازسازی شده به‌ویژه با استفاده از پلی‌یورتان و الیاف، بهبود قابل توجهی در مقاومت برشی وجود دارد. نمونه‌های ماسه کربناته به طور کلی، مقدار بالاتری از چسبندگی و زاویه اصطکاک را نشان می‌دهند، که در نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان و الیاف بیشترین اختلاف را نشان می‌دهند.

قدردانی نویسندگان

از حمایت مادی و معنوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان اصفهان و دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد کمال تشکر را داریم.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اظهار می‌دارند که هیچ گونه تعارض منافع (اعم از مالی، حرفه‌ای، شخصی یا سازمانی) که بر روند پژوهش، نتایج یا تفسیرهای آن تأثیرگذار باشد، وجود ندارد.

سهم نویسندگان

صادق شهیدی انجام آزمایشات و آماده سازی اولیه مقاله و تجزیه و تحلیل داده‌ها را بر عهده داشت. ارائه برنامه آزمایشات

مشابه، تصاویر SEM نمونه‌های بهسازی شده با پلی‌یورتان، لایه‌ای متراکم از پلی‌یورتان را نشان می‌دهند که ذرات ماسه را احاطه کرده و به طور مؤثر آن‌ها را به هم چسبانده است. این توده چسبیده اتصالات بین‌ذره‌ای را تقویت می‌کند که به افزایش مقاومت می‌شود. نتایج SEM نشان می‌دهند که پلی‌یورتان عملکرد برتری نسبت به نانوسیلیکا دارد به دلیل توانایی آن در ایجاد توسعه پس‌بنده گسترده‌تر اطراف ذرات ماسه. علاوه بر این، پلی‌یورتان به طور مؤثری حجم بیشتری از فضاهای خالی را پر کرده و سطح ذرات ماسه را به طور جامع‌تری پوشش می‌دهد نسبت به نانوزل.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تک محوری و برش مستقیم روی نمونه‌های بهسازی شده با ترکیب‌های مختلف از الیاف بازالتی، پلی‌یورتان و نانوسیلیکا انجام شده است تا تأثیر انواع و مقدار افزودنی‌ها و زمان عمل‌آوری بر رفتار مکانیکی ماسه سیلیسی و کربناته را ارزیابی کند. بر اساس نتایج، می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- در نمونه‌های بهسازی شده با الیاف، ماسه کربناته دارای مقاومت فشاری بالاتری نسبت به ماسه سیلیسی است. مقدار بهینه الیاف در حدود ۱٪ برای هر دو نوع ماسه بدست آمده است. برای نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا، ماسه سیلیسی مقاومت فشاری بالاتری نسبت به ماسه کربناته را نشان می‌دهد. با اضافه کردن مقدار بهینه نانوسیلیکا در حدود ۱۰٪، به همراه الیاف بازالت، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش شدیدی داشته است، به‌ویژه برای ماسه کربناته. در نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا و الیاف، مقدار بهینه الیاف برابر با ۱٪ بوده است.

۲- آزمایش‌های تک محوری نشان می‌دهد که پلی‌یورتان به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت فشاری ماسه سیلیسی و کربناته را افزایش می‌دهد. عملکرد بهینه با ۱۰٪ پلی‌یورتان مشاهده شده که بالاترین مقدار UCS را به ترتیب ۲۵۷۳ و ۳۱۷۷ کیلوپاسکال برای ماسه سیلیسی و کربناته پس از ۲۸ روز بدست آورده است. پلی‌یورتان مؤثرتر از نانوسیلیکا و الیاف بازالتی در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها بوده است. علاوه بر این، اضافه کردن الیاف باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در بهبود

منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی از سازمان‌ها یا نهادهای داخلی و خارجی انجام شده است.

بررسی نتایج آماده سازی مقاله توسط میثم بیات صورت گرفت. سید علیرضا زارعی نیز تجزیه و تحلیل داده‌ها و آماده‌سازی مقاله را بر عهده داشت.

References

- [1] Salehi, M., Bayat, M., Saadat, M. and Nasri, M., 2021. Experimental study on mechanical properties of cement-stabilized soil blended with crushed stone waste. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(6), pp.1974-1984. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0953-5>.
- [2] Hadi Sahlabadi, S., Bayat, M., Mousivand, M. and Saadat, M., 2021. Freeze-thaw durability of cement-stabilized soil reinforced with polypropylene/basalt fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(9), p.04021232. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003905](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003905).
- [3] Baldovino, J.J., Izzo, R.L., Rose, J.L. and Domingos, M.D., 2021. Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 271, p.121874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121874>.
- [4] Al-Atroush, M.E. and Sebaey, T.A., 2021. Stabilization of expansive soil using hydrophobic polyurethane foam: A review. *Transportation Geotechnics*, 27, p.100494. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100494>.
- [5] Syed, M., GuhaRay, A., Agarwal, S. and Kar, A., 2020. Stabilization of expansive clays by combined effects of geopolymerization and fiber reinforcement. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 101, pp.163-178. <https://doi.org/10.1007/s40030-019-00418-3>.
- [6] Saadat, M. and Bayat, M., 2022. Prediction of the unconfined compressive strength of stabilised soil by Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Non-Linear Regression (NLR). *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), pp.80-91. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1699668>.
- [7] Saygili, A. and Dayan, M., 2019. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers. *Cold Regions Science and Technology*, 161, pp.107-114. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.010>.
- [8] Chethan, B.A. and Ravi Shankar, A.U., 2021. Strength and durability characteristics of cement and class F fly ash-treated black cotton soil. *Indian Geotechnical Journal*, pp.1-13. <https://doi.org/10.1007/s40098-020-00488-2>.
- [9] Yang, X., Wei, J., Liang, J., Rong, H., Wu, B., Zhang, G. and Zhou, S., 2023. Corrosion characteristics of cement-stabilized crushed stone under vibrational effects. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(5), p.04023092. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004733](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004733).
- [10] Yabaluie Khamesluei, M.R., Bayat, M., Mousivand, M. and Nozari, M.A., 2024. Effect of zeolite replacement and tyre fibre inclusions on geotechnical properties of cement-or lime-stabilised sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 19(5), pp.879-894. <https://doi.org/10.1080/17486025.2024.2326087>.
- [11] Wang, Z. and Mei, G., 2012. Dynamic properties of rubber cement stabilized soil based on resonant column tests. *Marine Georesources & Geotechnology*, 30(4), pp.333-346. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2011.631693>.
- [12] Ghasemi, M., Bayat, M. and Ghasemi, M., 2023. Experimental study on mechanical behavior of Sand improved by polyurethane foam. *Experimental Techniques*, 47(6), pp.1201-1211. <https://doi.org/10.1007/s40799-023-00633-5>.
- [13] Cao, X., Lee, L.J., Widya, T. and Macosko, C., 2005. Polyurethane/clay nanocomposites foams: processing, structure and properties. *Polymer*, 46(3), pp.775-783.
- [14] Espadas-Escalante, J.J. and Avilés, F., 2015. Anisotropic compressive properties of multiwall carbon nanotube/polyurethane foams. *Mechanics of Materials*, 91, pp.167-176. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.07.006>.
- [15] Tang, C.S., Wang, D.Y., Cui, Y.J., Shi, B. and Li, J., 2016. Tensile strength of fiber-reinforced soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), p.04016031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001546).
- [16] Eshaghzadeh, M., Bayat, M., Ajalloeian, R. and Hejazi, S.M., 2021. Mechanical behavior of silty sand reinforced with nanosilica-coated ceramic fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(23), pp.2664-2683. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1898857>.
- [17] Tavakol, K., Bayat, M., Nadi, B. and Ajalloeian, R., 2023. Combined influences of cement, rice husk ash and fibre on the mechanical characteristics of a calcareous sand. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(9), pp.3729-3739. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0695-7>.
- [18] Razeghi, H.R. and Rad, A.S., 2024. Influence of fiber reinforcement on the ultrasonic P-wave velocity and unconfined compressive strength of cemented clay. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10(1), p.7. <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00516-0>.
- [19] Sujatha, E.R., Mahalakshmi, S. and Kannan, G., 2023.

- Potential of fibre reinforced and cement stabilized fibre reinforced soil blocks as sustainable building units. *Journal of Building Engineering*, 78, p.107733. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107733>.
- [20] Shen, Y.S., Tang, Y., Yin, J., Li, M.P. and Wen, T., 2021. An experimental investigation on strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil treated with lime or cement. *Construction and Building Materials*, 294, p.123537.
- [21] Dhar, S. and Hussain, M., 2019. The strength behaviour of lime-stabilised plastic fibre-reinforced clayey soil. *Road Materials and Pavement Design*, 20(8), pp.1757-1778. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1468803>.
- [22] Syed, M., GuhaRay, A., Chukka, S.K. and Ahmad, S., 2024. Laboratory Investigation and Numerical Modeling on Fiber Reinforced Lime and Alkaline Binder Stabilized Pavement Subgrade Soil. *Case Studies in Construction Materials*, 20, p.e03000.
- [23] Hosseini, A., Haeri, S.M., Mahvelati, S. and Fathi, A., 2019. Feasibility of using electrokinetics and nanomaterials to stabilize and improve collapsible soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(5), pp.1055-1065.
- [24] Davoodi, A., Esfahani, M.A., Bayat, M. and Mohammadyan-Yasouj, S.E., 2021. Evaluation of performance parameters of cement mortar in semi-flexible pavement using rubber powder and nano silica additives. *Construction and Building Materials*, 302, p.124166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124166>.
- [25] Davoodi, A., Esfahani, M.A., Bayat, M., Mohammadyan-Yasouj, S.E. and Rahman, A., 2022. Influence of nano-silica modified rubber mortar and EVA modified porous asphalt on the performance improvement of modified semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 337, p.127573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127573>.
- [26] Boschi, K., di Prisco, C.G., Grassi, D., Modoni, G. and Salvatore, E., 2024. Nanosilica grout permeation in sand: experimental investigation and modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 150(1), p.04023129. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11436>.
- [27] Karimiazar, J., Sharifi Teshnizi, E., Mirzababaei, M., Mahdad, M. and Arjmandzadeh, R., 2022. California bearing ratio of a reactive clay treated with nano-additives and cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(2), p.04021431. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004028](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004028).
- [28] Jafarian Barough, M., Çelik, S. and Oltulu, M., 2022. Investigation into the effect of nanomaterial injection on improving the geotechnical properties of granular soils. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(4), pp.3163-3179. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00785-7>.
- [29] Tang, L., Wang, Z., Zhang, X., Chen, X., Luo, J. and Wang, Y., 2023. Influence of rheological parameters on cement slurry penetration characteristics of novel oscillating grouting technology. *Construction and Building Materials*, 409, p.133999. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133999>.
- [30] Kumar, J., Verma, R.K. and Mondal, A.K., 2021. Taguchi-grey theory based harmony search algorithm (GR-HSA) for predictive modeling and multi-objective optimization in drilling of polymer composites. *Experimental Techniques*, 45, pp.531-548. <https://doi.org/10.1007/s40799-020-00428-y>.
- [31] Ud Din, I., Hao, P., Panier, S., Khan, K.A., Aamir, M., Franz, G. and Akhtar, K., 2020. Design of a new Arcan fixture for in-plane pure shear and combined normal/shear stress characterization of fiber reinforced polymer composites. *Experimental Techniques*, 44, pp.231-240. <https://doi.org/10.1007/s40799-019-00353-9>.
- [32] Huan, Y.Q.S.Y., Shao, Y.Q., Dai, Y.J., Liu, Y.Q., Wang, T.Y., Zhang, T.H. and Liu, M.H., 2016. Experimental study of the Mechanical Properties of a Novel Supramolecular Polymer Filament using a Microtensile Tester based on electronic balance. *Experimental Techniques*, 40, pp.737-742. <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0074-0>.
- [33] Golpazir, I., Ghalandarzadeh, A., Jafari, M.K. and Mahdavi, M., 2016. Dynamic properties of polyurethane foam-sand mixtures using cyclic triaxial tests. *Construction and Building Materials*, 118, pp.104-115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.035>.
- [34] Samimi, A. and Zarinabadi, S., 2012. Application solid polyurethane as coating in oil and gas pipelines. In *CHISA 2012 - 20th International Congress of Chemical and Process Engineering and PRES 2012 - 15th Conference PRES 1*.
- [35] Shokrieh, M.M., Saeedi, A. and Chitsazzadeh, M., 2013. Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/polyester nanocomposites. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 3, pp.1-5. <https://doi.org/10.1186/2193-8865-3-20>.
- [36] Zhou, Z., Du, X. and Wang, S., 2018. Strength for modified polyurethane with modified sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, pp.1897-1906. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0424-4>.
- [37] Zhang, Y., Qi, Y. and Zhang, Z., 2016. Synthesis of PPG-TDI-BDO polyurethane and the influence of hard segment content on its structure and antifouling properties. *Progress in Organic Coatings*, 97, pp.115-121. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.04.002>.
- [38] Chen, Q., Yu, R., Li, Y., Tao, G. and Nimbalkar, S., 2021. Cyclic stress-strain characteristics of calcareous sand improved by polyurethane foam adhesive.

- Transportation Geotechnics*, 31, p.100640. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100640>.
- [39] Abdelnaeem, M.M. and Hassona, F., 2023. Characterization of polyurethane foam conditioned sand. *Journal of Advanced Engineering Trends*, 42(2), pp.199-218.
- [40] Liu, J., Chen, Z., Song, Z., Bai, Y., Qian, W., Wei, J. and Kanungo, D.P., 2018. Tensile behavior of polyurethane organic polymer and polypropylene fiber-reinforced sand. *Polymers*, 10(5), p.499.
- [41] Hoang, T., Do, H., Alleman, J., Cetin, B. and Dayioglu, A.Y., 2023. Comparative evaluation of freeze and thaw effect on strength of BEICP-stabilized silty sands and cement-and fly ash-stabilized soils. *Acta Geotechnica*, 18(2), pp.1073-1092. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01612-7>.
- [42] Ghanbari, M. and Bayat, M., 2022. Effectiveness of reusing steel slag powder and polypropylene fiber on the enhanced mechanical characteristics of cement-stabilized sand. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 55(2), pp.241-257. <https://doi.org/10.22059/cej.2021.319310.1742>.
- [43] ShahriarKian, M., Kabiri, S. and Bayat, M., 2021. Utilization of zeolite to improve the behavior of cement-stabilized soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(2), p.35. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00284-9>.
- [44] Qiu, C.C., Xu, G.Z., Gu, G.Q., Song, W.Z. and Cao, D.H., 2024. Uniaxial compression test of cement-solidified dredged slurry columns encased with geogrid. *Geosynthetics International*, 31(6), pp.1-17. <https://doi.org/10.1680/jgein.23.00132>.
- [45] Roustaei, M., Pumple, J., Hendry, M.T., Harvey, J. and Froese, D., 2024. Effect of freeze-thaw cycles on the macrostructure and failure mechanisms of fiber-reinforced clay using industrial computed tomography. *Canadian Geotechnical Journal*, 61(9), pp.2007-2021. <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0136>.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Shahidi, S., Bayat, M. and Zarei, S.A., 2025. Experimental Study of Compressive Strength and Shear Strength Parameters of Treated Sand with Nanomaterial, Basalt Fiber and Polymer. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.19-32.

DOI: 10.22034/25.3.1

