

بهسازی خاک ماسه‌ای رس دار با استفاده از نانوذره

سعید رحمتی سردشت (کارشناس ارشد)

علی اکبر حشمتی رفسنجانی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۳)
دوره‌ی ۴۰، شماره‌ی ۴، صص. ۱۱۵-۱۰۸، (یادداشت فنی)

استفاده از نانوذرات در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها، موضوعی مهم در مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک است. در پژوهش حاضر، اثر افزودن نانوذرات کلسیم اکسید و آلومینیوم اکسید در مقاومت فشاری در سه زمان مختلف عمل‌آوری ۰/۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بررسی شده و نتایج نشان داده است که نمونه‌های دارای ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ نانو آلومینیوم اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روزه به ترتیب ۲۴/۹۲، ۴۶/۷۸ و ۴۳/۲۸ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش مقاومت داشته و همچنین این افزایش مقاومت برای نمونه‌های دارای نانو کلسیم اکسید به ترتیب ۱۸/۷۳، ۴۰/۴۳ و ۳۶/۷۲ نسبت به نمونه‌ی شاهد بوده است. با توجه به نتایج، افزایش زمان عمل‌آوری تأثیری در افزایش مقاومت نداشته و همچنین درصد بهینه برای هر دو نانوذره ۰/۱٪ انتخاب شده است. بررسی منحنی‌های تنش کرنش نشان داد که نمونه‌های دارای نانو آلومینیوم اکسید، رفتار شکننده‌تری نسبت به نمونه‌های دارای کلسیم اکسید داشته‌اند. در ادامه، نمونه‌ها تحت آنالیز FESEM قرار گرفته و نتایج نشان‌دهنده‌ی پُرشدگی بهتر در بین نمونه‌های بهسازی‌شده بوده است.

saeed_rahmati@civileng.iust.ac.ir
heshmati@iust.ac.ir

واژگان کلیدی: بهسازی خاک، نانو، کلسیم اکسید، آلومینیوم اکسید، مقاومت فشاری محدودنشده.

۱. مقدمه

اشاره کرد. مقادیر بسیار ناچیز از مواد اخیر می‌تواند تأثیر قابل توجهی در رفتار فیزیکی و شیمیایی و همچنین خواص مهندسی خاک داشته باشند و امروزه جهت بهبود خواص مهندسی خاک به‌عنوان تثبیت‌کننده از فن‌آوری مذکور استفاده می‌شود.^[۴-۲] در طول سال‌های اخیر، نانوذرات مختلف، از جمله نانو رس، نانو سیلیکا، نانو لوله‌های کربنی، نانوذرات فلزی، و اکسید فلزی مانند نانو تیتانیوم و نانو آلومینیوم اکسید به‌منظور کاربردهای مهندسی و بهسازی خاک استفاده شده است.^[۱۱-۵]

کول کارنی و ماندال^۱ (۲۰۲۲)، اثر افزودن نانو سیلیکا را در نسبت‌های وزنی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی در خصوصیات ماسه‌ی سیلتی، از جمله: نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت فشاری محدودنشده، و وزن مخصوص خشک بیشینه بررسی کردند و دریافتند که افزودن مقادیر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی نانو سیلیکا به خاک منجر به افزایش نسبت باربری کالیفرنیا به ترتیب ۱۱، ۱۵ و ۲۰ درصد و کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خاک به ترتیب ۷، ۹

با گسترش روزافزون جمعیت، نیاز به ساخت سازه‌های بلندمرتبه و همچنین وجود خاک‌های مسئله‌دار و نامناسب که مشکلاتی، نظیر: نشست، کاهش مقاومت برشی، و عدم ظرفیت باربری کافی جهت ساخت را به همراه دارند، بهسازی خاک‌های مذکور امری اجتناب‌ناپذیر است. بهسازی و تثبیت خاک‌ها می‌تواند با افزایش مقاومت برشی و کنترل خصوصیات انقباضی انبساطی خاک، موجب افزایش ظرفیت باربری بستر و کاهش مقادیر نشست شود.^[۱]

در دهه‌های اخیر، با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از نانوذرات در مطالعات مهندسی، موردعلاقه‌ی پژوهشگران در سراسر جهان قرار گرفته است. از مهم‌ترین ویژگی‌های نانوذرات می‌توان به حرکت آزادانه‌ی آن‌ها در محیط متخلخل به‌علت کوچک‌بودن قطرشان و داشتن نسبت زیاد سطح به حجم برای نانو ذرات که به‌تبع آن، ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر منجر به واکنش فعالانه با سایر ذرات و حلال‌ها شده است،

*نویسنده مسئول

تاریخ‌دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹، تاریخ‌اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹، تاریخ‌پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱.

استناد به این مقاله:

رحمتی سردشت، سعید و حشمتی رفسنجانی، علی‌اکبر، ۱۴۰۳. بهسازی خاک ماسه‌ای رس‌دار با استفاده از نانوذره. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۴)، صص. ۱۱۵-۱۰۸. DOI: 10.24200/J30.2024.63620.3279

ژئوتکنیکی، از جمله حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت فشاری سه‌محوری تحکیم‌نیافته‌ی زهکشی‌نشده و تحکیم مضاعف را انجام داده‌اند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از نقش بسیار مهم نانو رس بر خواص خمیری، مقاومتی، و تغییر شکل‌پذیری خاک بوده است. مشاهده‌ها نشان از افزایش شاخص خمیری، درصد رطوبت بهینه، مقاومت فشاری، تنش چسبندگی کل، و مقاومت برشی و همچنین کاهش وزن مخصوص بیشینه، تنش اصطکاکی کل، رفتار پراکندگی و فروریزی داشته‌اند. همچنین با توجه به اهمیت نوع خاک می‌توان دریافت که در اثر افزودن نانو رس به خاک‌های بررسی‌شده، پتانسیل ریمبندگی نمونه‌ها به‌طور بسیار محسوس کاهش می‌یابد.^[۱۷] طاها و طاها^[۱۲]، با افزودن نانو رس، نانو آلومین، و نانو مس به خاک رسی، تأثیر آن‌ها را در رفتار توری و انقباضی خاک بررسی کردند و دریافتند که کاهش کرنش انقباضی و توری به‌دلیل افزودن نانو مواد بوده است.^[۱۸] بارتون^۸ و همکاران^۹ (۲۰۰۹) و گالاگر و فینسترل^۹ (۲۰۰۴)، نیز در بررسی نانوذرات سیلیس بر روی خصوصیات خاک‌های رسی دریافتند که استفاده از درصد‌های کم نانو سیلیس باعث افزایش چسبندگی خاک‌های رسی می‌شود.^{[۱۹] و [۲۰]}

با مرور پیشینه‌ی پژوهش مشاهده می‌شود که داده‌های آزمایشگاهی در زمینه‌ی نانو مواد و آثار آن‌ها در رفتار ژئوتکنیکی خاک و توانایی آن‌ها در بهبود و تثبیت انواع خاک‌ها محدود بوده است، در حالی که ظرفیت پژوهش در این زمینه به مراتب بیشتر بوده است. از سوی دیگر، در زمینه‌ی بهسازی با استفاده از نانو مواد، تاکنون مطالعات اندکی بر روی نانوذرات کلسیم‌اکسید و آلومینیوم‌اکسید از دیدگاه ژئوتکنیکی به‌عنوان تثبیت‌کننده انجام شده است. لذا در پژوهش حاضر، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانوذرات کلسیم‌اکسید و نانو آلومینیوم‌اکسید در رفتار خاک ماسه‌ای رس‌دار پرداخته شده است. بدین منظور برای بررسی خصوصیات مقاومتی خاک ماسه‌ای رس‌دار، از نمونه‌های دارای دو نانوذره‌ی مذکور با ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزن کل خشک خاک طی عمل‌آوری‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده استفاده شده است. برای بررسی ریزساختار نمونه‌های خاک بهسازی‌شده، نمونه‌ها تحت آنالیز آزمایش FESEM^{۱۰} قرار گرفتند.

۲. مصالح مصرفی و روش‌ها

۱.۲. خاک

خاک استفاده‌شده در پژوهش حاضر، ماسه‌ی فیروزکوه (شماره‌ی ۱۶۱) و همچنین رس کائولینیت بوده است. براساس سیستم طبقه‌بندی واحد خاک (USCS)، ماسه‌ی فیروزکوه (شماره‌ی ۱۶۱) به‌عنوان ماسه با دانه‌بندی ضعیف (SP) طبقه‌بندی می‌شود. در شکل ۱، نتایج آزمایش تراکم انجام‌شده مطابق با استاندارد ASTM D۶۹۸-۱ مشاهده می‌شود، که طبق آن درصد رطوبت بهینه برابر ۱۱ و وزن مخصوص خشک بیشینه برابر ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده است. در جدول ۱، نیز ترکیب‌های تشکیل

و ۱۰ درصد شده است. همچنین برای مقاومت فشاری محدودنشده‌ی خاک در درصد وزنی ۲۰٪ افزایش مشاهده نشده است، ولی در درصد‌های ۳۰ و ۴۰ درصد به ترتیب ۱۶۳ و ۲۰۵ درصد افزایش مقاومت مشاهده شده است.^[۱۲] وصیف و همکاران^۱ (۲۰۲۲)، طیف وسیعی از درصد‌های نانو سیلیس (۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸) را برای بهسازی خاک استفاده کرده‌اند. آزمایش آزمایشگاهی برای شناسایی حدود اتربرگ، درصد رطوبت بهینه، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک، و بررسی ریزساختاری استفاده شده است. براساس مطالعه‌ی حاضر، بهسازی خاک با ۰/۴ تا ۰/۶ درصد نانو سیلیس بهترین نتیجه را به همراه داشته و نتایج نشان داده است زمانی که درصد نانو سیلیس از ۰٪ به ۰/۸٪ افزایش یافته است، شاخص خمیری حدود ۳۳٪ کاهش و حد خمیری و حد روانی به ترتیب ۳۴ و ۷۸ درصد افزایش یافته است. همچنین وزن مخصوص بیشینه‌ی خاک بهسازی‌شده با نانو سیلیس کاهش یافته است، در حالی که درصد رطوبت بهینه از ۶/۳ تا ۱۴/۸ درصد در درصد‌های ۰٪ تا ۰/۸٪ نانو سیلیس افزایش یافته است.^[۱۳] نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی نمونه‌های بهسازی‌شده با نانو سیلیس با ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و درصد وزنی بر دو نوع خاک رسی توسط کارونماچی و نرلا^۲ (۲۰۲۲) از طریق آزمایش‌های سه‌محوری و مقاومت فشاری محدودنشده نشان داده است که با افزودن نانو سیلیس تا ۳٪ وزنی و زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز، مقاومت فشاری محصورنشده به میزان ۴۰۶ و ۴۹۶ درصد افزایش می‌یابد.^[۱۴] حائری و ولیش‌زاده^۳ (۲۰۲۰)، مقاومت فشاری خاک رس لس^۴ بهسازی‌شده توسط نانو رس، نانو سیلیس و نانو کربنات کلسیم را ارزیابی کرده و دریافت‌اند که مقدار ناچیزی از نانو مواد (کمتر از ۱٪ از وزن خشک کل خاک) می‌تواند به‌طور قابل توجهی رفتار مکانیکی خاک را بهبود بخشد. مقادیر افزودنی‌هایی که بیشینه‌ی مقاومت فشاری محدودنشده را می‌دهند، به ترتیب برای نانو سیلیس، نانو کربنات کلسیم و نانو رس به ترتیب ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ درصد از وزن خشک کل خاک تعیین شده است. کارآمدترین بهسازی نمونه‌ی تثبیت‌شده با ۰/۲٪ نانو کربنات کلسیم بوده است، که منجر به بالاترین مقاومت فشاری محدودنشده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری شد.^[۱۵] احمدی و شفیعی^۵ (۲۰۱۹)، با توجه به تفاوت‌های موجود در خواص نانو سیلیس و میکروسیلیس به بررسی تأثیر افزودن مواد مذکور در پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس پرداخته‌اند. درصد افزودنی هر یک از دو ماده‌ی اخیر به ۰/۶٪ محدود و نمونه‌ها پس از ۲۸ روز آزمایش شدند و نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده نشان داد که افزودن نانو سیلیس در مقادیر کمتر از ۲٪ در مقاومت فشاری و مدول کشسانی خاک تأثیر قابل توجهی داشته است. در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس، سرعت افزایش مقاومت در مقادیر کمتر از ۱٪ بیشتر بوده است، در حالی که میکروسیلیس روند نسبتاً پایداری را دنبال کرده است. نتایج حاصل از آزمایش پراش پرتوی ایکس (XRD) نشان داد که هیچ واکنش شیمیایی قابل توجهی در خاک توسط مواد افزودنی ایجاد نشده است.^[۱۶] طبرسائ^۶ و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی نمونه‌های مختلف خاک از منطقه‌ی شبکه‌ی سد بوستان گنبد و اینچه‌برون واقع در استان گلستان تحت تأثیر بهسازی با کمک نانو رس در نسبت‌های وزنی متفاوت ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی پرداخته و آزمایش‌های مختلف

^۶ Tabarsa

^۷ Taha & Taha

^۸ Butrón

^۹ Gallagher & Finsterle

^{۱۰} Field emission scanning electron microscopy

^۱ Wasif

^۲ Karumanchi & Nerella

^۳ Haeri & Valishzadeh

^۴ Loess

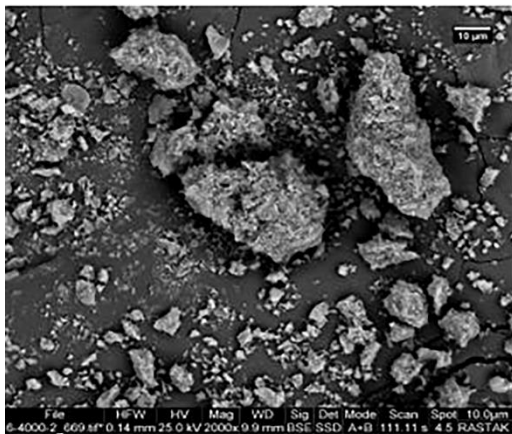
^۵ Ahmadi & Shafiee

همگن شود. پس از آن مخلوط همگن مطابق با استاندارد ASTM D2166 در ۵ لایه درون قالب متراکم شد.

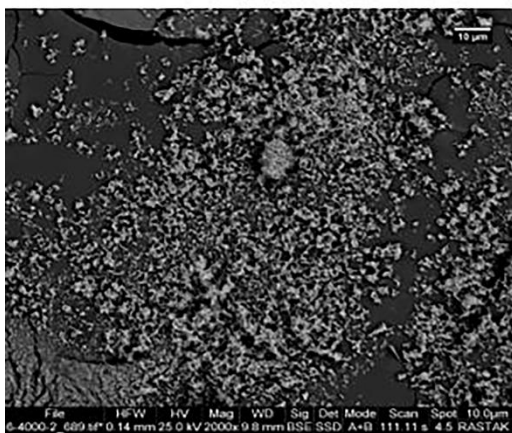
این تذکر لازم است که قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری، قطر، و ارتفاع نمونه توسط کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و مقادیر مقاومت‌های حاصل شده براساس ابعاد تغییر یافته اصلاح شده است.

۴.۲. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

برای ارزیابی اثر نانوذرات در بهسازی نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد ASTM D2166 در شرایط کنترل کرنش با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر



(الف)



(ب)

شکل ۲. تصاویر FESEM: (الف) آلومینیوم‌اکسید، (ب) کلسیم‌اکسید.

جدول ۲. ترکیب‌های تشکیل‌دهنده نانوذرات.

ساختار شیمیایی	کلسیم‌اکسید (%)	آلومینیوم‌اکسید (%)
CaO	۹۷/۲	-
MgO	۱/۲۳	-
Cl	۱/۰۷	-
Al ₂ O ₃	-	۹۴/۲۷
Na ₂ O	-	۱/۵۷
SO ₃	-	۴/۱۶

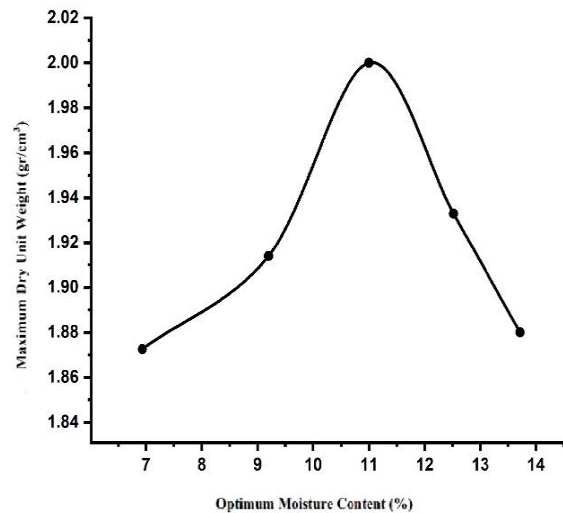
دهنده‌ی خاک مذکور، که از آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) به‌دست آمده است، ارائه شده است.

۲.۲. نانوذرات

دو نوع نانوذره‌ی آلومینیوم‌اکسید و کلسیم‌اکسید در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده است، که به‌صورت تجاری در دسترس هستند و از پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه شده است. در شکل ۲، تصاویر FESEM نانوذرات مشاهده می‌شود. همچنین ترکیب‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها، که از آزمایش XRF به‌دست آمده‌اند، در جدول ۲ ارائه شده است.

۳.۲. ساخت نمونه

به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، ابتدا نانوذره (به مقدار ۰/۰۵، ۰/۱، و ۰/۲ درصد وزن کل خشک خاک) به آب مقطر با توجه به درصد رطوبت بهینه‌ی به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم و سپس به مدت ۳۰ دقیقه توسط یک همزن مغناطیسی هم زده شده است. سپس محلول همگن به نمونه‌ی خاک دارای ماسه و رس، که قبلاً به‌خوبی هم زده شده بودند، در ۵ مرحله اضافه و به‌خوبی مجدداً هم زده شد تا نمونه کاملاً

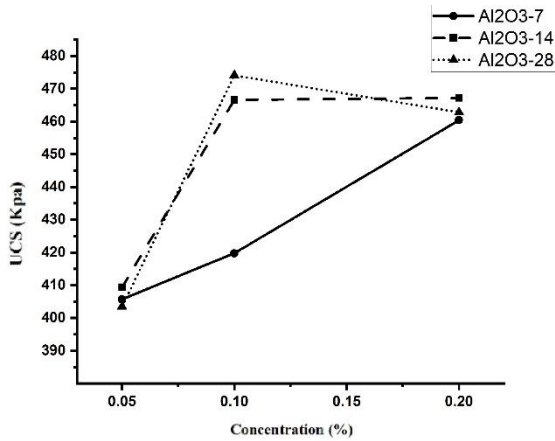


شکل ۱. منحنی تراکم خاک ماسه‌ای رس‌دار.

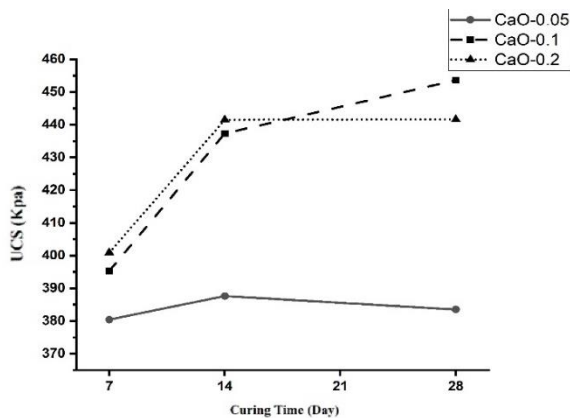
جدول ۱. آنالیز شیمیایی ماسه و رس.

ترکیب شیمیایی	ماسه	رس
SiO ₂	۹۱/۳۳	۶۷/۸۷
Fe ₂ O ₃	۲/۸۹	۰/۶۹
Al ₂ O ₃	۲/۰۳	۲۵/۵۱
CaO	۲/۰۵	۳/۳۶
Na ₂ O	۱/۴۹	-
K ₂ O	۰/۲۱	۲/۵
Cu	-	۰/۰۷

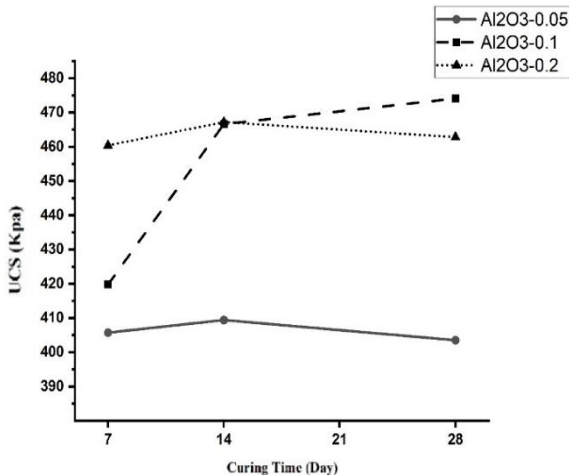
مقاومت داشته و پس از آن افزایش مقاومت خیلی جزئی بوده است. در صورتی که نمونه‌های دارای ۰/۰۵ و ۰/۲ درصد وزنی نانوذره بعد از مدت زمان ۱۴ روز دیگر افزایش مقاومت نداشته و کاهش جزئی در کاهش مقاومت داشته‌اند، که علت آن واکنش سریع نانوذرات با ذرات خاک است. در مطالعات دیگر نیز عدم افزایش مقاومت پس از ۱۴ روز عمل‌آوری مشاهده شده است.^[۲۵، ۲۶] در جدول ۳، خلاصه‌ی کلیه‌ی نتایج ارائه شده است.



شکل ۳. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی نانو آلومینیوم‌اکسید در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۰۱، و ۰/۲ درصد.



شکل ۴. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی کلسیم‌اکسید در عمل‌آوری‌های ۰/۰۵، ۰/۰۱، و ۰/۲ روز.



شکل ۵. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی آلومینیوم‌اکسید در عمل‌آوری‌های ۰/۰۵، ۰/۰۱، و ۰/۲ روز.

۳۷ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر انجام شده است. برای جلوگیری از خطاهای احتمالی، هر آزمون سه بار تکرار شد. همچنین منحنی‌های تنش- کرنش برای مقایسه‌ی رفتار مقاومت نمونه‌ها ترسیم شده‌اند.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. تغییرات مقاومت بیشینه‌ی نمونه‌های بهسازی‌شده

تغییرات بیشینه‌ی مقاومت نمونه‌های بررسی‌شده با در نظر گرفتن تغییرات غلظت و زمان عمل‌آوری در شکل‌های ۳ الی ۶ و جدول ۳ مشاهده می‌شود.

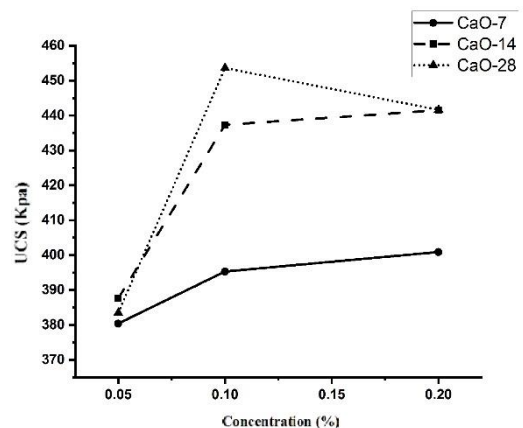
۳.۱.۱. تأثیر غلظت نانوذرات

در شکل‌های ۳ و ۴، نمودارهای مقاومت نهایی نمونه‌های خاک حاوی ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۲ درصد وزنی نانوذرات کلسیم‌اکسید و آلومینیوم‌اکسید، که به مدت ۷، ۱۴، و ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند، مشاهده می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از نمودارهای اخیر نشان می‌دهند که افزایش جایگزینی هر دو نانوذره تا ۰/۰۱ وزنی موجب بالارفتن میزان مقاومت تک‌محوری و پس از آن کاهش و یا افزایش نسبت جزئی مقاومت می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت از غلظت ۰/۰۱ تا غلظت ۰/۲، مقاومت آنچنانی مشاهده نمی‌شود و غلظت بهینه، ۰/۰۱ وزنی است. غلظت بهینه‌ی نانوذرات، فضاهای بین دانه‌های خاک را پر می‌کند و همچنین پیوند بین ذرات خاک را بهبود می‌بخشد و نمونه را مترکم‌تر می‌کند و این مسئله منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری شده است.^[۲۱] همچنین افزودن نانوذره‌ی بیشتر از مقدار بهینه، سبب افزایش سطح تماس بین ذرات نانو می‌شود، که منجر به ایجاد توده‌یی از نانوذرات می‌شود و در نتیجه، فعالیت نانوذرات را تحت تأثیر قرار می‌دهد.^[۲۲] در مطالعه‌ی مجید و طاهرا^[۱۶] (۲۰۱۶)، نیز افزودن نانوذره‌ی آلومینیوم‌اکسید بیش از ۰/۰۱ وزنی مقاومت فشاری را افزایش نداده است.^[۲۳] نتایج مشابه در مطالعاتی که از دیگر نانوذرات استفاده شده است، نیز به‌دست‌آمده است.^[۲۴] در مقایسه‌ی نانوذرات کلسیم‌اکسید و آلومینیوم‌اکسید، نمونه‌های دارای آلومینیوم‌اکسید، مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند.

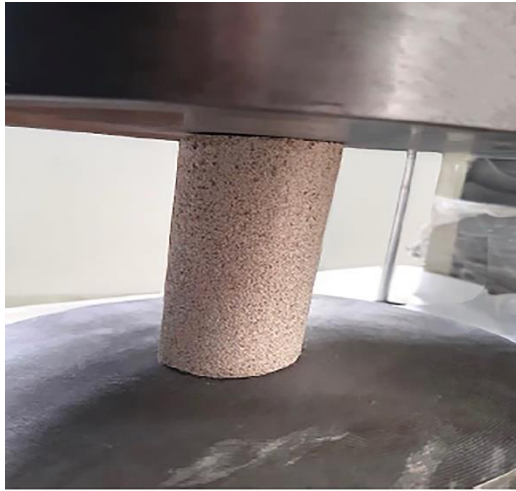
۳.۱.۲. تأثیر زمان عمل‌آوری

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان استنباط کرد که نمونه‌های دارای هر دو نانوذره با ۰/۰۱ وزنی با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ روز تا ۱۴ روز، افزایش



شکل ۶. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی کلسیم‌اکسید در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۰۱، و ۰/۲ درصد.

نشانه‌گر رفتار شکننده‌تر نمونه‌های بهسازی‌شده در مقایسه با نمونه‌ی شاهد است. در مورد اثر زمان عمل‌آوری، هر چه زمان عمل‌آوری طولانی‌تر باشد، نمونه شکنندگی کمتری نشان می‌دهد. در مطالعه‌ی میر و ردی^۱ (۲۰۲۱)، نیز

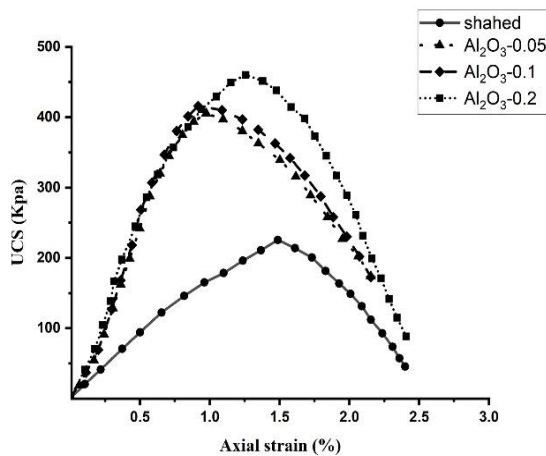


(الف)



(ب)

شکل ۷. نمونه‌های تحت آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده: (الف) قبل از آزمایش، (ب) بعد از آزمایش.



شکل ۸. منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی‌شده با آلومینیوم‌اکسید در عمل‌آوری ۷ روزه.

در شکل ۷، نمونه‌ی قبل و بعد از آزمایش تک‌محوری مشاهده می‌شود. مکانیزم شکست نمونه‌های دارای کلسیم‌اکسید در درصد‌های مختلف مشابه شکل (۷-ب) بوده است. شکست نمونه‌ها از بالا تا پایین نمونه و با زاویه‌ی حدوداً ۶۰ درجه بوده است، که نشان‌دهنده‌ی چسبندگی خوب نمونه‌هاست.

۲.۳. بررسی منحنی‌های تنش-کرنش

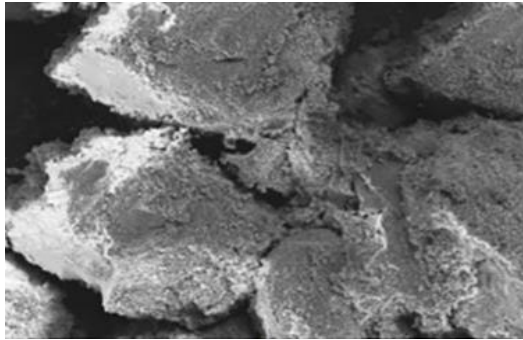
در شکل‌های ۸ الی ۱۱، نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های بررسی‌شده با درصد‌های مختلف نانوذرات و زمان عمل‌آوری مشاهده می‌شوند. منحنی‌های تنش-کرنش در نمونه‌های بهسازی‌شده با دو نانوذره‌ی متفاوت بوده است. در نمونه‌های بهسازی‌شده با نانوذره‌ی آلومینیوم‌اکسید نسبت به نمونه‌ی شاهد، مقاومت بیشینه افزایش و کرنش متناظر با آن کاهش یافته است. این تغییرات

جدول ۳. مقایسه‌ی مقاومت نهایی نمونه‌های خاک حاوی

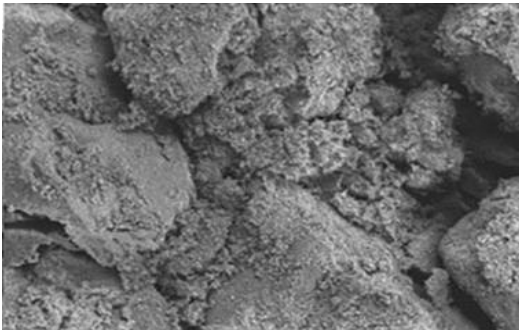
آلومینیوم‌اکسید و کلسیم‌اکسید نسبت به نمونه‌ی شاهد.

نمونه	مدت زمان (روز)	غلظت	مقاومت نهایی (کیلوپاسکال)	مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد
شاهد	۷	-	۲۲۵/۷	-
	۱۴	-	۲۹۵	-
	۲۸	-	۳۲۳	-
آلومینیوم‌اکسید	۷	۰/۰۵	۴۰۵/۷	۷۹/۷۵
		۰/۱	۴۱۹/۸	۸۶
		۰/۲	۴۶۰/۴	۱۰۳/۹۸
	۱۴	۰/۰۵	۴۰۹/۴	۳۸/۷۸
		۰/۱	۴۶۶/۶	۵۸/۱۷
		۰/۲	۴۶۷/۲	۵۸/۳۷
کلسیم‌اکسید	۷	۰/۰۵	۴۰۳/۵	۲۴/۹۲
		۰/۱	۴۷۴/۱	۴۶/۷۸
		۰/۲	۴۶۲/۸	۴۳/۲۸
	۱۴	۰/۰۵	۳۸۰/۴	۶۸/۵۴
		۰/۱	۳۹۵/۳	۷۵/۱۴
		۰/۲	۴۰۰/۹	۷۷/۶۲
کلسیم‌اکسید	۱۴	۰/۰۵	۳۸۷/۶	۳۱/۳۹
		۰/۱	۴۳۷/۳	۴۸/۲۳
		۰/۲	۴۴۱/۵	۴۹/۶۶
	۲۸	۰/۰۵	۳۸۳/۵	۱۸/۷۳
		۰/۱	۵۳/۶	۴۰/۴۳
		۰/۲	۴۴۱/۶	۳۶/۷۲

^۱ Mir & Reddy



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. تصاویر FESEM سطح ماسه در حضور و عدم حضور نانوذره در بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابری: (الف) در عدم حضور نانوذره، (ب) در حضور نانوذره.

شاهد داشته‌اند، در نمونه‌های دارای ۰/۱٪ کلسیم‌اکسید این کرنش نسبت به نمونه‌ی شاهد بیشتر بوده است. افزایش کرنش اخیر، نشان‌دهنده‌ی رفتار انعطاف پذیر نمونه‌ی مذکور است. همچنین در نمونه‌های دارای کلسیم‌اکسید بعد از رسیدن به نقطه‌ی اوج، سخت‌شوندگی کرنش مشاهده می‌شود. در بیشتر مطالعات سخت‌شوندگی، کرنش با افزودن نانوذره مشاهده نمی‌شود؛ ولی در مطالعاتی همچون پژوهش چن^۱ و همکاران (۲۰۲۴)، با افزودن نانو سیلیس به خاک رس سیلتی، رفتار اخیر مشاهده شده است.^[۲۸]

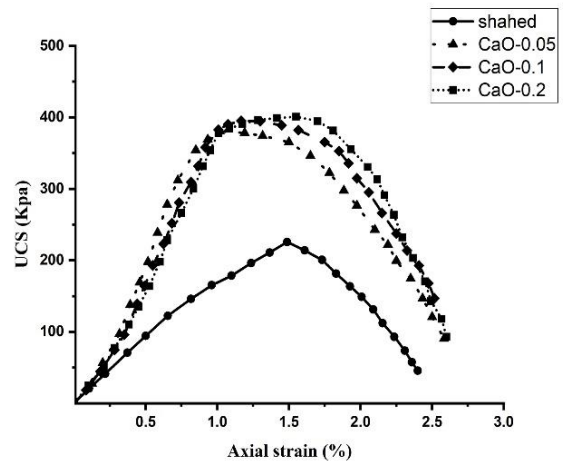
۳.۳. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان نشر (FESEM)

برای بررسی ریزساختاری نمونه‌های بهسازی‌شده با نانوذرات، پس از آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده از نمونه‌ها نمونه‌گیری شد، که نتایج آن در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

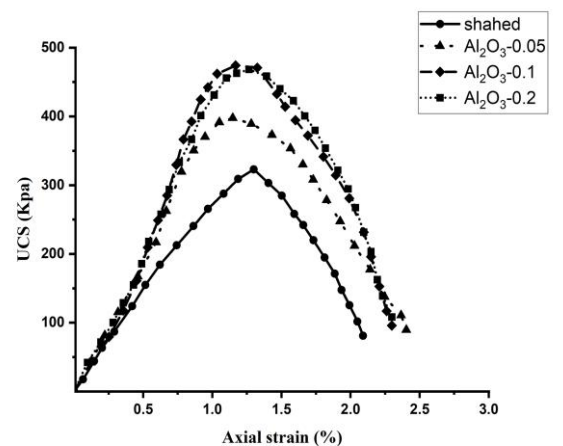
مطابق شکل اخیر مشخص است در حالتی که نانوذرات به درون فضای متخلخل تزریق شده‌اند، میزان پل‌های تشکیل‌شده توسط ذرات ریز و پُرشدگی فضاهای خالی افزایش یافته است. پُرشدگی فضاهای خالی توسط نانوذرات، باعث افزایش ناحیه‌ی تماس بین‌سطحی و تراکم نمونه و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری شده است.^[۲۹ و ۳۰]

۴. نتیجه‌گیری

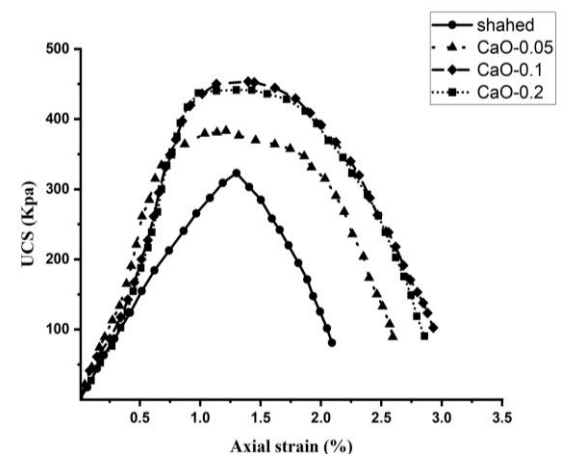
در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن نانوذرات کلسیم‌اکسید و آلومینیوم‌اکسید در نسبت‌های وزنی ۰/۰۵، ۰/۱، و ۰/۲ درصد در بهبود مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای رس‌دار بررسی شده و این نتایج به‌دست آمده است:



شکل ۹. منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی‌شده با کلسیم‌اکسید در عمل‌آوری ۷ روزه.



شکل ۱۰. منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی‌شده با آلومینیوم‌اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روزه.



شکل ۱۱. منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی‌شده با کلسیم‌اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روزه.

افزودن نانوذره‌ی آلومینیوم‌اکسید باعث افزایش مقاومت و کاهش کرنش متناظر با آن شده است.^[۲۷] برخلاف نمونه‌های بهسازی‌شده با آلومینیوم‌اکسید، که تمامی نمونه‌ها کرنش متناظر با مقاومت بیشینه‌ی کمتری نسبت به نمونه‌ی

^۱ Chen

- نمونه‌های بهسازی‌شده با هر دو نانوذره حساسیتی نسبت به زمان نداشته و افزایش زمان، تأثیر چندانی در افزایش مقاومت آن‌ها نداشته است، که دلیل آن، واکنش سریع نانوذرات با ذرات خاک است.
- بررسی منحنی‌های تنش- کرنش نشان داد نمونه‌های دارای نانو آلومینیوم‌اکسید رفتار شکننده‌تری نسبت به نمونه‌های دارای کلسیم‌اکسید داشته و همچنین در منحنی‌های تنش- کرنش، نمونه‌های دارای کلسیم‌اکسید، سخت‌شوندگی کرنش مشاهده شده است.
- تصاویر FESEM نشان‌دهنده‌ی پُرشدگی فضاهای خالی نمونه‌ها توسط نانوذرات بوده است، که باعث افزایش ناحیه‌ی تماس بین سطحی و تراکم نمونه و در نتیجه، افزایش مقاومت فشاری شده است.
- نمونه‌های دارای ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ نانو کلسیم‌اکسید بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری به ترتیب به مقاومت‌های ۴۰۳/۵، ۴۷۴/۱ و ۴۶۲/۸ کیلوپاسکال رسیده‌اند، که ۲۴/۹۲، ۴۶/۷۸ و ۴۳/۲۸ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش مقاومت داشته‌اند.
- نمونه‌های دارای ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ نانو کلسیم‌اکسید بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری به ترتیب به مقاومت‌های ۳۸۳/۵، ۴۵۳/۶ و ۴۴۱/۶ کیلوپاسکال رسیده و افزایش مقاومت آن‌ها ۱۸/۷۳، ۴۰/۴۳ و ۳۶/۷۲ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد بوده است.
- نمونه‌های بهسازی‌شده با درصد‌های ۰/۱ و ۰/۲ از هر دو نانوذره، مقاومت‌های نزدیک به هم داشته‌اند، بنابراین درصد بهینه، ۰/۱ انتخاب شده است.

References – منابع

1. Onyelowe, K.C. and Duc, B.V., 2020. Durability of nanostructured biomasses ash (NBA) stabilized expansive soils for pavement foundation. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(3), pp.254-263. doi.org/10.1080/19386362.2017.1422909
2. Celaya, M., Veisi, M., Nazarian, S. and Puppala, A., 2011. Accelerated design process of lime-stabilized clays. In *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 4468-4478). doi.org/10.1061/41165(397)457
3. Changizi, F. and Haddad, A., 2016. Effect of nano-SiO₂ on the geotechnical properties of cohesive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, pp.725-733. doi.org/10.1007/s10706-015-9962-9
4. Consoli, N.C., Vendruscolo, M.A., Fonini, A. and Dalla Rosa, F., 2009. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3), pp.196-203. doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.11.005
5. Ng, C.W.W. and Co, J.L., 2015. Hydraulic conductivity of clay mixed with nanomaterials. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(6), pp.808-811. doi.org/10.1139/cgj-2014-0313
6. Bahmani, S.H., Huat, B.B., Asadi, A. and Farzadnia, N., 2014. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement. *Construction and Building Materials*, 64, pp.350-359. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.086
7. Zhang, S., Wang, W., Song, X., Chi, X. and Lu, T., 2014. Direct shear behavior of nanometer magnesia reinforced cement soil with 28d age. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 8(1). doi.org/10.2174/1874155X01408010509
8. Arif, M., Hasan, S.D. and Siddiqui, S., 2023. Effect of nano silica on strength and permeability of concrete. *Materials Today: Proceedings*. doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.073
9. Wang, W., Fu, Y., Zhang, C., Li, N. and Zhou, A., 2020. Mathematical models for stress-strain behavior of Nano magnesia-cement-reinforced seashore soft soil. *Mathematics*, 8(3), p.456. doi.org/10.3390/math8030456
10. Majeed, Z.H., Taha, M.R. and Jawad, I.T., 2014. Stabilization of soft soil using nanomaterials. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8(4), pp.503-509. doi.org/10.19026/rjaset.8.999
11. Kim, S.S., Hooton, R.D., Cho, T.J. and Lee, J.B., 2014. Comparison of innovative nano fly ash with conventional fly ash and nano-silica. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(5), pp.396-402. doi.org/10.1139/cjce-2012-0419
12. Kulkarni, P.P. and Mandal, J.N., 2022. Strength evaluation of soil stabilized with nano silica-cement mixes as road construction material. *Construction and Building Materials*, 314, p.125363. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125363
13. Jassim, N.W., Hassan, H.A., Mohammed, H.A. and Fattah, M.Y., 2023. Enhancement consistency and compaction characteristics of clayey soil using nano silica material. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(6), pp.77-83. doi.org/10.21533/pen.v10i6.3367

14. Karumanchi, M. and Nerella, R., 2022. Shear strength parameters from digital tri-axial test and soils stabilization with extracted nanosilica. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 7(1), pp.307-318. doi.org/10.1007/s41204-022-00238-0
15. Haeri, S.M. and Valishzadeh, A., 2021. Evaluation of using different nanomaterials to stabilize the collapsible loessial soil. *International Journal of Civil Engineering*, 19, pp.583-594. doi.org/10.1007/s40999-020-00583-8
16. Ahmadi, H. and Shafiee, O., 2019. Experimental comparative study on the performance of nano-SiO₂ and microsilica in stabilization of clay. *The European Physical Journal Plus*, 134(9), p.459. doi.org/10.1140/epjp/i2019-12918-1
17. Tabarsa, A., Latifi, N., Meehan, C.L. and Manahiloh, K.N., 2018. Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay—A sustainable material for construction. *Construction and Building Materials*, 158, pp.454-463. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.096
18. Taha, M.R. and Taha, O.M.E., 2012. Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. *Journal of nanoparticle research*, 14, pp.1-13. doi.org/10.1007/s11051-012-1190-0
19. Butrón, C., Axelsson, M. and Gustafson, G., 2009. Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity. *Tunnelling and underground space technology*, 24(6), pp.603-607. doi.org/10.1016/j.tust.2009.04.003
20. Gallagher, P.M. and Finsterle, S., 2004. Physical and numerical model of colloidal silica injection for passive site stabilization. *Vadose Zone Journal*, 3(3), pp.917-925. doi.org/10.2113/3.3.917
21. Hou, P., Wang, K., Qian, J., Kawashima, S., Kong, D. and Shah, S.P., 2012. Effects of colloidal nanoSiO₂ on fly ash hydration. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), pp.1095-1103. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.013
22. Luo, J., Zhou, A., Li, N., Wang, W. and Hu, J., 2022. Mechanical properties and microscopic characterization of cement stabilized calcareous sand modified by nano SiO₂. *Case Studies in Construction Materials*, 17, p.e01636. doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01636
23. Majeed, Z.H. and Taha, M.R., 2016. The effects of using nanomaterials to improvement soft soils. *Saudi J Eng Technol*, 1(3), pp.58-63. 10.21276/sjeat.2016.1.3.1
24. Valizadeh, M. and Janalizadeh Choobbasti, A., 2020. Evaluation of nano-graphene effect on mechanical behavior of clayey sand with microstructural and self-healing approach. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(3), pp.299-318. doi.org/10.1080/01694243.2019.1676598
25. Samala, H.R. and Mir, B.A., 2020. Some studies on microstructural behaviour and unconfined compressive strength of soft soil treated with SiO₂ nanoparticles. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5, pp.1-12. doi.org/10.1007/s41062-020-0283-3
26. Kong, R., Zhang, F., Wang, G. and Peng, J., 2018. Stabilization of loess using nano-SiO₂. *Materials*, 11(6), p.1014. doi.org/10.3390/ma11061014
27. Mir, B.A. and Reddy, S.H., 2021. Mechanical behaviour of nano-material (Al₂O₃) stabilized soft soil. *International Journal of Engineering*, 34(3), pp.636-643. doi.org/10.5829/ije.2021.34.03c.07
28. Chen, Q., Xie, K., Tao, G., Nimbalkar, S. and Zhang, H., 2024. Laboratory assessment of impact of nano-SiO₂ on different soil types in onshore and offshore environment. *Acta Geotechnica*, pp.1-23. doi.org/10.1007/s11440-023-02067-0
29. Ghavami, S., Farahani, B., Jahanbakhsh, H. and Moghadas Nejad, F., 2018. Effects of silica fume and nano-silica on the engineering properties of kaolinite clay. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(2), pp.135-142. doi.org/10.22060/ajce.2018.14203.5462
30. Gu, J., Cai, X., Wang, Y., Guo, D. and Zeng, W., 2022. Evaluating the Effect of Nano-SiO₂ on Different Types of Soils: A Multi-Scale Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), p.16805. doi.org/10.3390/ijerph192416805