

بهسازی خاک ماسه‌ای رس دار با استفاده از نانوذره

سعید رحمتی سردشت^۱، علی اکبر حشمتی رفسنجانی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- Saeed_rahmati@civileng.iust.ac.ir

۲- heshmati@iust.ac.ir

چکیده:

استفاده از نانو ذرات در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها، موضوعی مهم در تحقیقات مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک است. در این پژوهش اثر افزودن نانو ذرات کلسیم اکسید و آلومینیوم اکسید بر مقاومت فشاری در سه زمان مختلف عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز بررسی شد. نتایج نشان داد 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 نمونه شاهد افزایش مقاومت داشتند و همچنین این افزایش مقاومت برای نمونه‌های دارای نانو کلسیم اکسید به ترتیب ۱۸/۷۳، ۴۰/۴۳ و ۳۶/۷۲ نسبت به نمونه شاهد بوده است. با توجه به نتایج، افزایش زمان عمل‌آوری تأثیری در افزایش مقاومت نداشت و همچنین درصد بهینه برای هر دو نانوذره ۰/۱ درصد انتخاب شد. بررسی منحنی‌های تنش کرنش نشان داد نمونه‌های دارای نانو آلومینیوم اکسید رفتار شکننده‌تری نسبت به نمونه‌های دارای کلسیم اکسید داشتند. در ادامه نمونه‌ها تحت آنالیز FESEM قرار گرفتند و نتایج نشان‌دهنده پرشدگی بهتر در بین نمونه‌های بهسازی شده بوده است.

واژگان کلیدی:

بهسازی خاک، نانو، کلسیم اکسید، آلومینیوم اکسید، مقاومت فشاری محدود نشده.

* علی اکبر حشمتی رفسنجانی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران
ایمیل: heshmati@iust.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Soil Improvement of Clayey Sand Using Nanoparticle

S. Rahmati Sardasht^١, A.A. Heshmati R.^٢

^١- Master Student of Geotechnical Engineering of Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

^٢- Associate Prof., Faculty of Civil Engineering of Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Abstract:

The field of nanotechnology encompasses all technologies that operate on a nanoscale, typically ranging from ١ to ١٠٠ nanometers. Nano-particles are the most commonly used materials in this technology. Given the provided definition of nanotechnology, there is a growing interest in exploring its applications in the field of geotechnical engineering. Recently, numerous researchers have directed their efforts toward discovering these applications. This strong interest stems from the unique properties of these particles and their potential to enhance the mechanical and structural characteristics of soil. This article explores the impact of different percentages of calcium oxide and aluminum oxide nanoparticles on the compressive strength of clayey sandy soil with a constant clay content. To achieve this, clayey sandy soil comprising ٨٠% sand and ٢٠% clay, after being treated with varying percentages (٠,٠٥%, ٠,١%, and ٠,٢% by dry soil weight) of nanoparticles, including aluminum oxide and calcium oxide, in three different curing times of ٧, ١٤ and ٢٨ days was tested for unconfined compressive strength. The results indicate that samples containing ٠,٠٥%, ٠,١%, and ٠,٢% aluminum oxide nanoparticles after ٢٨ days of curing experienced a ٢٤,٩٢%, ٤٤,٧٨%, and ٤٣,٢٨% increase in strength, respectively, compared to the control sample. Similarly, the increase in strength for samples with calcium oxide nanoparticles was ١٨,٧٣%, ٤٠,٤٣%, and ٣٤,٧٢%, respectively. According to the findings, the curing time did not have a significant effect on strength improvement, and the optimum percentage for both types of nanoparticles was determined to be ٠,١%. Further analysis of stress-strain curves revealed that samples with aluminum oxide nanoparticles exhibited a more brittle behavior compared to those with calcium oxide nanoparticles. Subsequently, for microstructural investigations, the samples were analyzed using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM). The microstructural examinations demonstrated better compactness among the treated samples, indicating improved microstructural characteristics in the nanoparticle-amended soils.

Keywords: Soil improvement, nanotechnology, calcium oxide, Aluminum oxide, unconfined compressive strength.

۱ - مقدمه

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 این خاک‌ها امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بهسازی و تثبیت خاک‌ها می‌تواند با افزایش مقاومت برشی و کنترل خصوصیات انقباضی انبساطی خاک، موجب افزایش ظرفیت باربری بستر و کاهش مقادیر نشست گردد [۱].

در دهه‌های اخیر، با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از نانو ذرات در مطالعات مهندسی موردعلاقه محققان در سراسر جهان قرار گرفته است. از مهم‌ترین ویژگی‌های نانو ذرات می‌توان به حرکت آزادانه آن‌ها در محیط متخلخل به علت کوچک بودن قطرشان و دارا بودن نسبت زیاد سطح به حجم برای نانو ذرات که به تبع آن، ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر منجر به واکنش فعالانه با سایر ذرات و حلال‌ها شده، اشاره کرد. مقادیر بسیار ناچیز از این مواد می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رفتار فیزیکی و شیمیایی و همچنین خواص مهندسی خاک داشته باشند و امروزه جهت بهبود خواص مهندسی خاک به‌عنوان تثبیت‌کننده از این فناوری استفاده می‌گردد [۲-۴]. در طول سال‌های اخیر، نانو ذرات مختلف از جمله نانورس، نانو سیلیکا، نانولوله‌های کربنی، نانو ذرات فلزی و اکسید فلزی مانند نانو تیتانیوم و نانو آلومینیوم اکسید به‌منظور کاربردهای مهندسی و بهسازی خاک بکار گرفته شده است [۵-۱۱].

کول کارنی و ملندال^۲ (۲۰۲۲)، اثر افزودن نانو سیلیکا را در نسبت‌های وزنی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی بر خصوصیات ماسه سیلتی از جمله نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت فشاری محدود نشده و وزن مخصوص خشک حداکثر مورد بررسی قراردادند. نتایج نشان داد 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 حداکثر وزن مخصوص خاک به ترتیب ۷، ۹ و ۱۰ درصد شد. همچنین برای مقاومت فشاری محدود نشده خاک در درصد وزنی ۲۰ درصد افزایشی مشاهده نشد ولی در درصدهای ۳۰

و ۴۰ درصد به ترتیب ۱۶۳ و ۲۰۵ درصد افزایش مقاومت مشاهده شده است [۱۲]. وصیف و همکاران^۳ (۲۰۲۲)، طیف وسیعی از درصد‌های نانو سیلیس (۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸) را برای بهسازی خاک استفاده کردند. آزمایش آزمایشگاهی برای شناسایی حدود آتربرگ، درصد رطوبت بهینه، حداکثر وزن مخصوص خشک و بررسی ریزساختاری استفاده شد. بر اساس این مطالعه، بهسازی خاک با ۰/۴ تا ۰/۶ درصد نانو سیلیس بهترین نتیجه را به همراه داشت. نتایج نشان داد زمانی که درصد نانو سیلیس از ۰/۰ به ۰/۸٪ افزایش می‌یابد، شاخص پلاستیک حدود ۳۳٪ کاهش و حد پلاستیک و حد روانی به ترتیب ۳۴ و ۷۸ درصد افزایش یافت. همچنین وزن مخصوص حداکثر خاک بهسازی شده با نانو سیلیس کاهش یافت، درحالی‌که درصد رطوبت بهینه از ۶/۳٪ تا ۱۴/۸٪ در درصد‌های ۰/۰ تا ۰/۸٪ درصد نانو سیلیس افزایش یافت [۱۳]. مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های بهسازی شده با نانو سیلیکا با ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی بر دو نوع خاک رسی توسط کارومانچی و نرلا^۴ (۲۰۲۲) با انجام آزمایش سه محوری و مقاومت فشاری محدود نشده بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد با افزودن نانو سیلیکا تا ۳ درصد وزنی و زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز، مقاومت فشاری محصور نشده به میزان ۴۰۶ و ۴۹۶ درصد افزایش می‌یابد. [۱۴]. حائری و ولیش زاده^۵ (۲۰۲۰)، مقاومت فشاری خاک رس لس^۶ بهسازی شده توسط نانورس، نانو سیلیس و نانو کربنات کلسیم را مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد 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 حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده 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 شد. کارآمدترین بهسازی نمونه تثبیت شده با ۰/۲٪ نانو کربنات کلسیم بود که منجر به بالاترین مقاومت فشاری محدود نشده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری شد [۱۵]. احمدی و

^۵ Haeri and Valishzadeh

^۶ Loess

^۲ Kulkarni and Mandal

^۳ Wasif

^۴ Karumanchi and Nerella

شفیعی^۷ (۲۰۱۹)، با توجه به تفاوت‌های موجود در خواص نانو سیلیکا و میکرو سیلیس به بررسی تأثیر افزودن این مواد بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس پرداختند. درصد افزودنی هر یک از این دو ماده افزودنی به ۶ درصد محدود و نمونه‌ها پس از ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده نشان داد که افزودن نانو سیلیکا در مقادیر کمتر از ۲ درصد بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک تأثیر قابل توجهی داشته است. در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس، سرعت افزایش مقاومت در مقادیر کمتر از ۱ درصد بیشتر بوده، در حالی که میکرو سیلیس روند نسبتاً پایداری را دنبال می‌کرد. 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].

طبرسا^۸ و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی نمونه‌های مختلف خاک از منطقه شبکه سد بوستان گنبد و اینکه برون واقع در استان گلستان تحت تأثیر بهسازی با کمک نانورس در نسبت‌های وزنی متفاوت ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی پرداختند. در این بررسی آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی از جمله حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت فشاری سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده و تحکیم مضاعف انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها حاکی از نقش بسیار مهم نانورس بر خواص خمیری، مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری خاک بوده است. مشاهدات 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 فرو ریزشی می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت نوع خاک می‌توان دریافت که در اثر افزودن نانورس به خاک‌های بررسی شده پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها به‌طور بسیار محسوس کاهش می‌یابد [۱۷]. طاها و طاها^۹ (۲۰۱۲) با افزودن نانورس، نانو آلومین و نانو مس به خاک رسی، تأثیر این نوع نانو مواد بر رفتار توری و انقباضی خاک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده کاهش کرنش انقباضی و

توری با افزودن نانو مواد بوده است [۱۸]. بارتون^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۹) و گالاگر و فینسترل^{۱۱} (۲۰۰۴) به بررسی نانو ذرات سیلیس بر خصوصیات خاک‌های رسی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از درصدهای کم نانو سیلیس باعث افزایش چسبندگی خاک‌های رسی می‌شود [۱۹-۲۰].

با مرور بر پیشینه پژوهش، مشاهده می‌شود که داده‌های آزمایشگاهی در زمینه ی نانو مواد و اثرات آن‌ها بر رفتار ژئوتکنیکی خاک و توانایی آن‌ها در بهبود و تثبیت انواع خاک‌ها محدود بوده است، در حالی که ظرفیت پژوهش در این زمینه به‌مراتب بیشتر است. از سوی دیگر، در زمینه ی بهسازی با استفاده از نانو مواد، تاکنون مطالعات اندکی بر روی نانو ذرات کلسیم اکسید و نانو آلومینیوم اکسید از دیدگاه ژئوتکنیکی به‌عنوان تثبیت‌کننده انجام گرفته است. لذا در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانو ذرات کلسیم اکسید و نانو آلومینیوم اکسید بر رفتار خاک ماسه‌ای رس دار پرداخته شده است. بدین منظور برای بررسی خصوصیات مقاومتی خاک ماسه‌ای رس دار، از نمونه‌های دارای این دو نانوذره با ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزن کل خشک خاک طی عمل‌آوری‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده استفاده شد. برای بررسی ریزساختار نمونه‌های خاک بهسازی شده، نمونه‌ها تحت آنالیز آزمایش^{۱۲} FESEM قرار گرفتند.

۲- مصالح مصرفی و روش‌ها

۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش ماسه فیروزکوه (شماره ۱۶۱) و همچنین رس کائولینیت بوده است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی واحد خاک (USCS)، ماسه فیروزکوه (شماره ۱۶۱) به‌عنوان ماسه با دانه‌بندی ضعیف (SP) طبقه‌بندی می‌شود. شکل (۱) نتایج آزمایش تراکم که مطابق با استاندارد ASTM D ۶۹۸-۱ انجام شد را نشان می‌دهد که طبق آن درصد رطوبت بهینه برابر ۱۱ درصد و وزن مخصوص خشک حداکثر برابر ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری

^{۱۰} Butrón

^{۱۱} Gallagher and Finsterle

^{۱۲} Field emission scanning electron microscopy

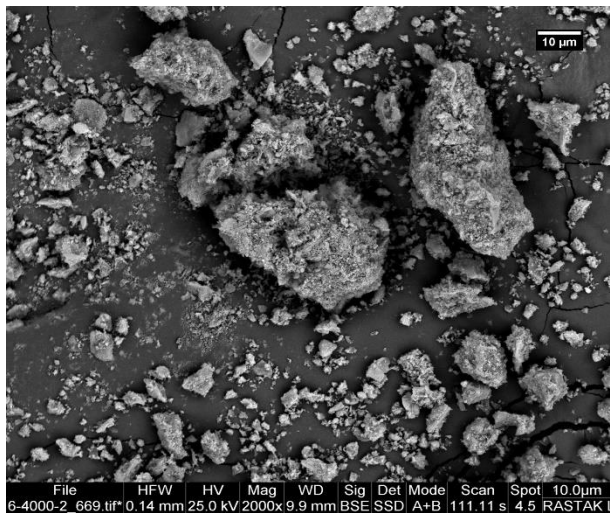
^۷ Ahmadi and Shafiee

^۸ Tabarsa

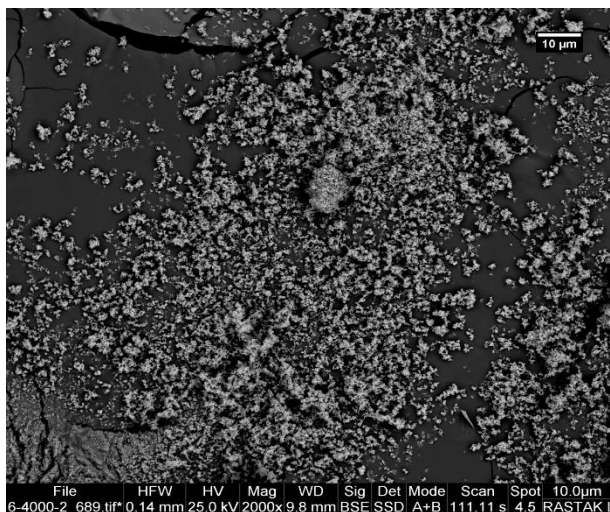
^۹ Taha and Taha

تشکیل دهنده این نانو ذرات که از آزمایش XRF به دست آمده در جدول (۲) آورده شده است.

شد. جدول (۱) ترکیبات تشکیل دهنده این خاک را که از آزمایش طیف سنجی فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) به دست آمده را نشان می دهد.



(الف)

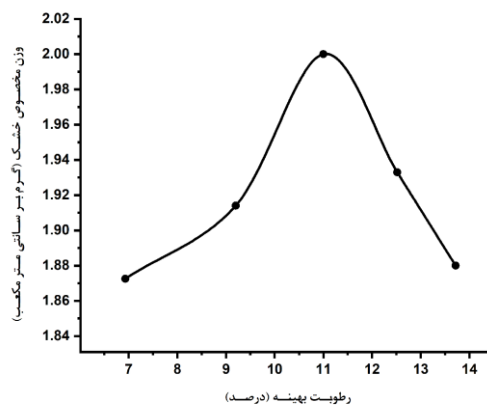


(ب)

شکل ۲: تصاویر FESEM الف) آلومینیوم اکسید
ب) کلسیم اکسید

جدول ۱: آنالیز شیمیایی ماسه و رس

رس	ماسه	ترکیب شیمیایی
۶۷/۸۷	۹۱/۳۳	SiO _۲
۰/۶۹	۲/۸۹	Fe _۲ O _۳
۲۵/۵۱	۲/۰۳	Al _۲ O _۳
۳/۳۶	۲/۰۵	CaO
-	۱/۴۹	Na _۲ O
۲/۵	۰/۲۱	K _۲ O
۰/۰۷	-	Cu



شکل ۱: منحنی تراکم خاک ماسه‌ای رس دار

۲-۲- نانو ذرات

دو نوع نانوذره آلومینیوم اکسید و کلسیم اکسید در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. این نانو ذرات به صورت تجاری در دسترس است و از پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه شده است. شکل (۲) تصاویر FESEM نانو ذرات را نشان می دهد. همچنین ترکیبات

جدول ۲: ترکیبات تشکیل دهنده نانو ذرات

ساختار شیمیایی	کلسیم اکسید (%)	آلومینیوم اکسید (%)
CaO	۹۷٫۲	-
MgO	۱٫۷۳	-
Cl	۱٫۰۷	-
Al ₂ O ₃	-	۹۴٫۲۷
Na ₂ O	-	۱٫۵۷
SO ₂	-	۴٫۱۶

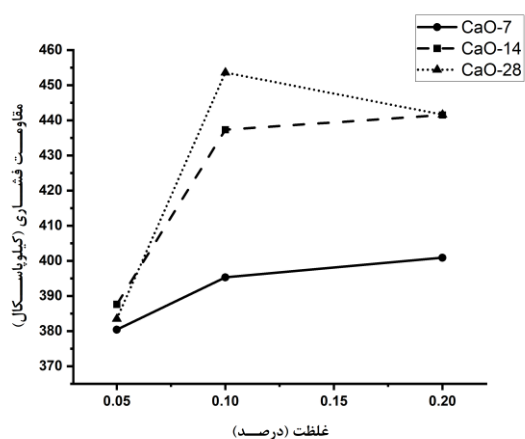
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات مقاومت حداکثر نمونه‌های بهسازی شده

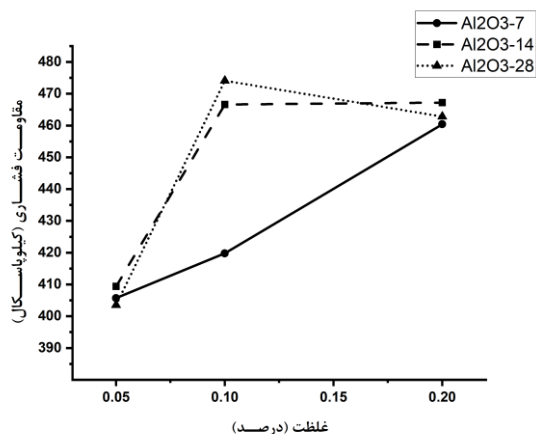
تغییرات حداکثر مقاومت نمونه‌های مورد بررسی با در نظر گرفتن تغییرات غلظت و زمان عمل‌آوری در شکل‌های (۳) تا (۶) و جدول (۳) آورده شده است.

۳-۱-۱- تأثیر غلظت نانو ذرات

نمودار ارائه شده در شکل (۳) و شکل (۴) مقاومت نهایی نمونه‌های خاک حاوی ۰٫۰۵، ۰٫۱ و ۰٫۲ درصد وزنی نانو ذرات کلسیم اکسید و آلومینیوم اکسید که به مدت ۱۴، ۲۸ و ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۳: مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی نانو کلسیم اکسید در غلظت‌های ۰٫۰۵، ۰٫۱ و ۰٫۲



شکل ۴: مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی نانو آلومینیوم اکسید در غلظت‌های ۰٫۰۵، ۰٫۱ و ۰٫۲

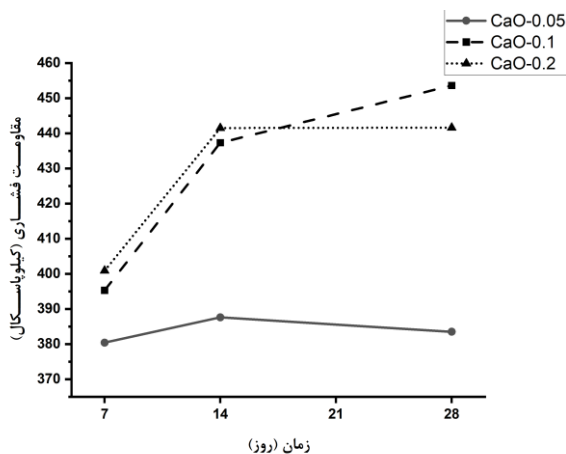
۳-۲- ساخت نمونه

به منظور 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 بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم اضافه شده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه توسط یک همزن مغناطیسی هم زده می‌شود. سپس محلول همگن به نمونه خاک دارای ماسه و رس که قبلاً به خوبی هم زده شده بودند در پنج مرحله اضافه شد و به خوبی مجدداً هم زده شده تا نمونه کاملاً همگن شود. پس از آن مخلوط همگن مطابق با استاندارد ASTM D ۲۱۶۶ در ۵ لایه درون قالب متراکم شد.

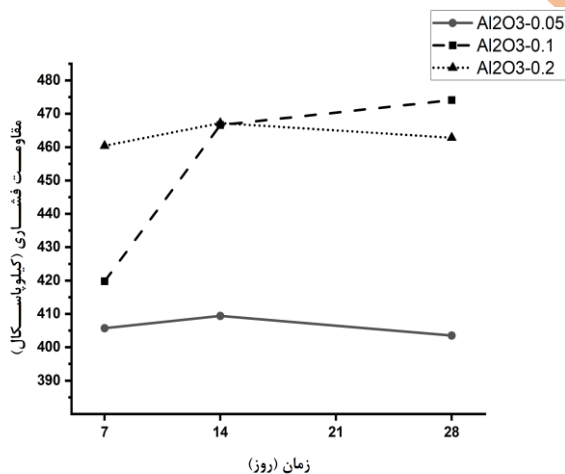
لازم به ذکر است که قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری قطر نمونه و ارتفاع نمونه توسط کولیس دیجیتالی با دقت ۰٫۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و مقادیر مقاومت‌های حاصل شده بر اساس ابعاد تغییر یافته اصلاح گردید.

۳-۲-۴- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

برای ارزیابی اثر نانو ذرات بر بهسازی نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد ASTM D ۲۱۶۶ در شرایط کنترل کرنش با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. در این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۳۷ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر استفاده شد. برای جلوگیری از خطاهای احتمالی، هر آزمون سه بار تکرار شد. همچنین منحنی‌های تنش-کرنش برای مقایسه رفتار مقاومت نمونه‌ها ترسیم شد.



شکل ۵: مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی کلسیم اکسید در عمل‌آوری‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز



شکل ۶: مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی آلومینیوم اکسید در عمل‌آوری‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

نتایج به‌دست‌آمده از نمودارهای بالا حاکی از آن است که افزایش جایگزینی هر دو نانوذره تا ۰/۱ درصد وزنی موجب بالا رفتن میزان مقاومت تک‌محوری می‌گردد و پس از آن کاهش و یا افزایش نسبت جزئی مقاومت مشاهده می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت از غلظت ۰/۱ تا غلظت ۰/۲ شاهد افزایش مقاومت آن‌چنانی نبوده و غلظت بهینه ۰/۱ درصد وزنی می‌باشد. غلظت بهینه نانو ذرات فضاهای بین دانه‌های خاک را پر کرده و همچنین پیوند بین ذرات خاک را بهبود داده است و نمونه را متراکم‌تر می‌کند و این مسئله منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری شده است [۲۱]. همچنین افزودن نانوذره بیشتر از مقدار بهینه به باعث افزایش سطح تماس بین ذرات نانو می‌شود که باعث ایجاد توده‌ای از نانو ذرات شده و در نتیجه فعالیت نانو ذرات را تحت تأثیر قرار دهد [۲۲]. در مطالعه مجید و طاها^{۱۳} نیز افزودن نانوذره آلومینیوم اکسید بیش از ۰/۱ درصد وزنی مقاومت فشاری را افزایش نداده است [۲۳]. نتایج مشابه در مطالعاتی که از دیگر نانو ذرات استفاده شده است نیز به‌دست‌آمده است [۲۴، ۲۵] در مقایسه نانو ذرات کلسیم اکسید و آلومینیوم اکسید، نمونه‌های دارای آلومینیوم اکسید مقاومت بیشتری را از خود نشان دادند.

۳-۱-۲- تأثیر زمان عمل‌آوری

با توجه به شکل (۵) و شکل (۶) می‌توان استنباط کرد که نمونه‌های دارای هر دو نانوذره با ۰/۱ درصد وزنی با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ روز تا ۱۴ روز دارای افزایش مقاومت هستند و پس از آن افزایش مقاومت خیلی جزئی است. در صورتی که نمونه‌های دارای ۰/۰۵ و ۰/۲ درصد وزنی نانوذره بعد از مدت‌زمان ۱۴ روز دیگر افزایش مقاومت نداشته و کاهش جزئی در کاهش مقاومت دارند که علت آن واکنش سریع نانو ذرات با ذرات خاک است. در مطالعات دیگر نیز عدم افزایش مقاومت پس از ۱۴ روز عمل‌آوری مشاهده شده است [۲۶، ۲۵]. در جدول (۳) خلاصه کلیه نتایج ارائه شده است.

^{۱۳} Majeed and Taha

جدول ۳: مقایسه مقاومت نهایی نمونه‌های خاک حاوی آلومینیوم اکسید و کلسیم اکسید نسبت به نمونه شاهد

نمونه	مدت زمان (روز)	غلظت	مقاومت نهایی (کیلو پاسکال)	افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد
شاهد	۷	-	۲۲۵/۷	-
	۱۴	-	۲۹۵	-
	۲۸	-	۳۲۳	-
آلومینیوم اکسید	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
	۲۸	۰/۰۵	۴۰۳/۵	۲۴/۹۲
		۰/۱	۴۷۴/۱	۴۶/۷۸
		۰/۲	۴۶۲/۸	۴۳/۲۸
کلسیم اکسید	۷	۰/۰۵	۳۸۰/۴	۶۸/۵۴
		۰/۱	۳۹۵/۳	۷۵/۱۴
		۰/۲	۴۰۰/۹	۷۷/۶۲
	۱۴	۰/۰۵	۳۸۷/۶	۳۱/۳۹
		۰/۱	۴۳۷/۳	۴۸/۲۳
		۰/۲	۴۴۱/۵	۴۹/۶۶
	۲۸	۰/۰۵	۳۸۴/۵	۱۸/۷۳
		۰/۱	۴۵۳/۶	۴۰/۴۳
		۰/۲	۴۴۱/۶	۳۶/۷۲



(الف)



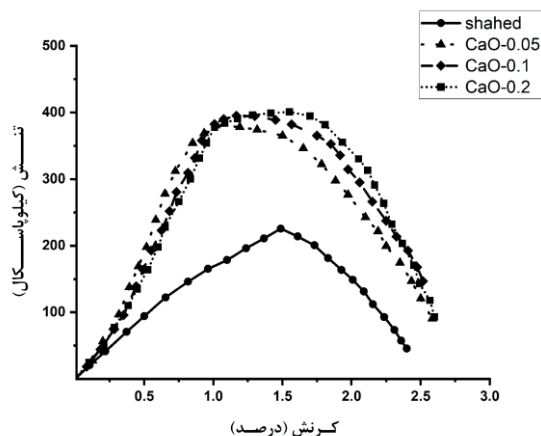
(ب)

شکل ۷: نمونه‌های تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده الف) قبل از آزمایش ب) بعد از آزمایش

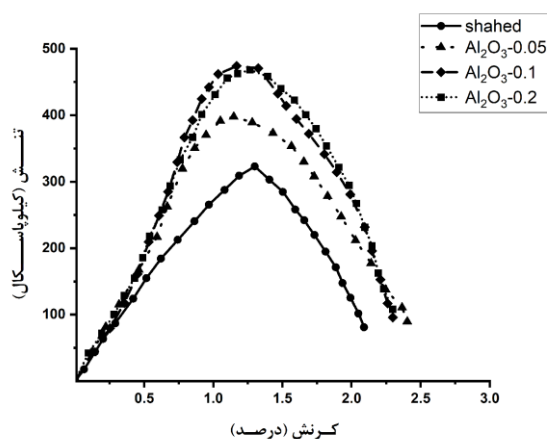
در شکل (۷) نمونه قبل و بعد از آزمایش تک‌محوری نشان داده شده است. مکانیزم شکست نمونه‌های دارای کلسیم اکسید در درصد‌های مختلف مشابه شکل (۷-ب) بوده است. شکست نمونه‌ها از بالا تا پایین نمونه و با زاویه حدوداً ۶۰ درجه بوده که نشان‌دهنده چسبندگی خوب نمونه‌ها است.

۲-۲- بررسی منحنی‌های تنش- کرنش

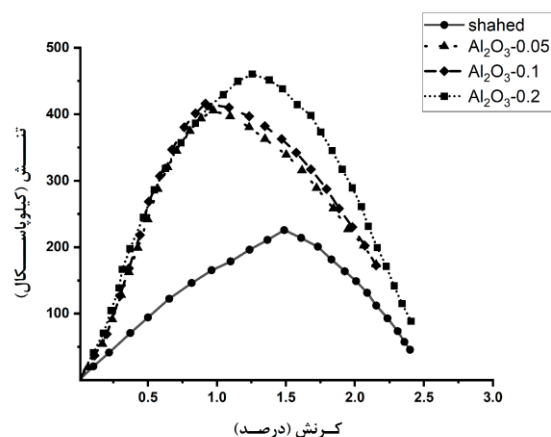
شکل‌های (۸) تا (۱۱) نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های مورد بررسی با درصدهای مختلف نانو ذرات و زمان عمل‌آوری را نشان می‌دهد. منحنی‌های تنش-کرنش در نمونه‌های بهسازی شده با دو نانوذره متفاوت بود. در نمونه‌های بهسازی شده با نانوذره آلومینیوم اکسید نسبت به نمونه شاهد، مقاومت حداکثر افزایش و کرنش متناظر با آن کاهش یافت. این تغییرات نشان‌دهنده رفتار شکننده‌تر نمونه‌های بهسازی شده در مقایسه با نمونه شاهد است. در مورد اثر زمان عمل‌آوری، هر چه زمان عمل‌آوری طولانی‌تر باشد، نمونه شکنندگی کمتری نشان می‌دهد. در مطالعه میر و ردی^{۱۴} نیز افزودن نانوذره آلومینیوم اکسید باعث افزایش مقاومت و کاهش کرنش متناظر با آن شد [۲۷]. برخلاف نمونه‌های بهسازی شده با آلومینیوم اکسید که تمامی نمونه‌ها کرنش متناظر با مقاومت حداکثر کمتری نسبت به نمونه شاهد داشتند، در نمونه‌های دارای ۱٪ درصد کلسیم اکسید این کرنش نسبت به نمونه شاهد بیشتر است. این افزایش کرنش نشان‌دهنده رفتار انعطاف‌پذیر این نمونه است. همچنین در نمونه‌های دارای کلسیم اکسید بعد از رسیدن به نقطه اوج، سخت‌شوندگی کرنش مشاهده می‌شود. در اکثر تحقیقات سخت‌شوندگی کرنش با افزودن نانوذره مشاهده نمی‌شود ولی در مطالعاتی همچون تحقیق چن^{۱۵} و همکاران با افزودن نانو سیلیس به خاک رس سیلتی این رفتار مشاهده شده است [۲۸].



شکل ۹: منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی شده با کلسیم اکسید در عمل‌آوری ۷ روز



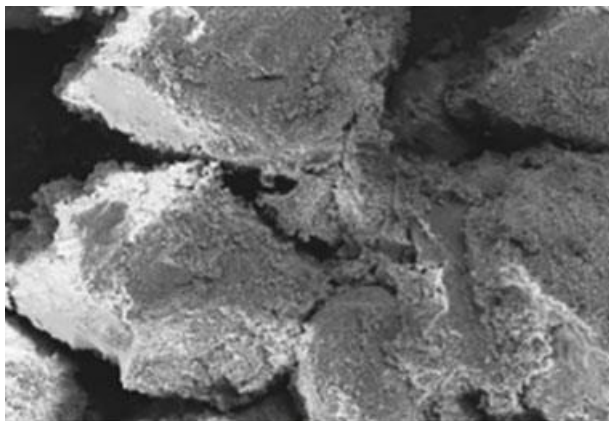
شکل ۱۰: منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی شده با آلومینیوم اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روز



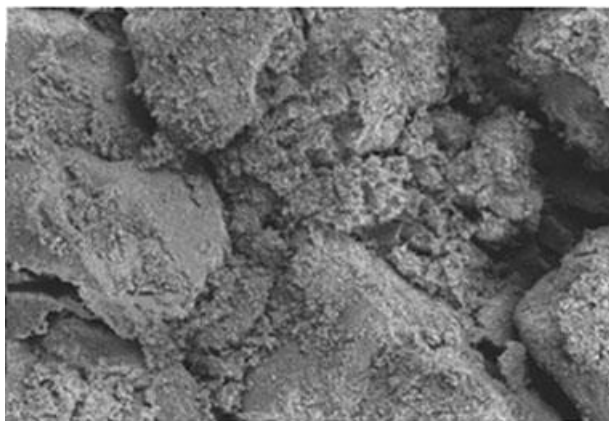
شکل ۸: منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی شده با آلومینیوم اکسید در عمل‌آوری ۷ روز

۳-۳- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان نشر (FESEM)

برای بررسی ریزساختاری نمونه‌های بهسازی شده با نانو ذرات، پس از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده از نمونه‌ها نمونه‌گیری شد و نتایج آن در شکل (۱۲) ارائه شده است.



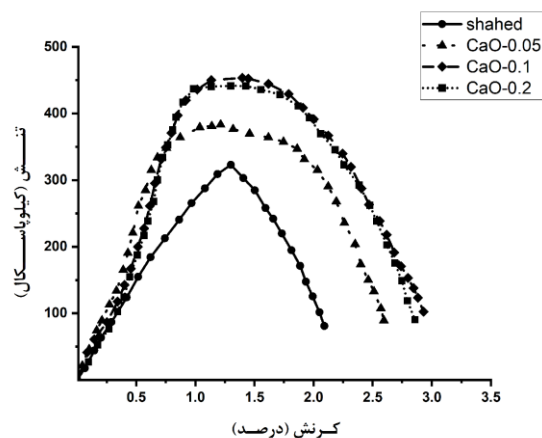
الف



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)

همان‌طور که از تصاویر شکل (۱۲) مشخص است در حالتی که نانو ذرات به درون فضای متخلخل تزریق می‌شود، میزان پل‌های تشکیل شده توسط ذرات ریز و پرشدگی فضاهای خالی افزایش یافته است. پرشدگی فضاهای خالی توسط نانوذرات باعث افزایش ناحیه تماس بین سطحی و تراکم نمونه و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۳۰،۲۹]



شکل ۱۱: منحنی‌های تنش-کرنش خاک بهسازی شده با کلسیم اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روز

۴ - نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر افزودن نانو ذرات کلسیم اکسید و آلومینیوم اکسید در نسبت‌های وزنی ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد بر بهبود مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای رس دار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زیر از این پژوهش حاصل شد:

- نمونه‌های دارای ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ نانو آلومینیوم اکسید در عمل‌آوری ۲۸ روزه به ترتیب به مقاومت‌های ۴۰۳/۵، ۴۶۴/۱ و ۴۶۲/۸ کیلو پاسکال رسیدند که ۲۴/۹۲، ۴۶/۷۸ و ۴۲/۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشتند.
- نمونه‌های دارای ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ نانو کلسیم اکسید بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری به ترتیب به مقاومت‌های ۳۸۳/۵، ۴۵۳/۶ و ۴۴۱/۶ کیلو پاسکال رسیدند و افزایش مقاومت این نمونه‌ها ۱۸/۷۳، ۴۰/۴۳ و ۳۶/۷۲ درصد نسبت به نمونه شاهد بوده است.
- نمونه‌های بهسازی شده با درصدهای ۰/۱ و ۰/۲ از هر دو نانوذره، مقاومت‌های نزدیک به هم داشتند، بنابراین درصد بهینه ۰/۱ درصد انتخاب شد.
- نمونه‌های بهسازی شده با هر دو نانوذره حساسیتی نسبت به زمان نداشتند و افزایش زمان تأثیر چندانی در افزایش مقاومت آن‌ها نداشت که دلیل آن، واکنش سریع نانو ذرات با ذرات خاک می‌باشد.
- بررسی منحنی‌های تنش کرنش نشان داد نمونه‌های دارای نانو آلومینیوم اکسید رفتار شکننده‌تری نسبت به نمونه‌های دارای کلسیم اکسید داشتند و همچنین در منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های دارای کلسیم اکسید، سخت‌شوندگی کرنش مشاهده شد.
- تصاویر FESEM نشان‌دهنده پرشدگی فضاهای خالی نمونه‌ها توسط نانو ذرات بوده که این پرشدگی باعث افزایش ناحیه تماس بین سطحی و تراکم نمونه و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری شده است.

منابع

- [۱] Onyelowe, K.C. and Duc, B.V., ۲۰۲۰. Durability of nanostructured biomasses ash (NBA) stabilized expansive soils for pavement foundation. *International Journal of Geotechnical Engineering*, ۱۴(۳), pp.۲۵۴-۲۶۳. doi.org/۱۰.۱۰۸۰/۱۹۳۸۶۳۶۲,۲۰۱۷,۱۴۲۲۹.۰۹
- [۲] Celaya, M., Veisi, M., Nazarian, S. and Puppala, A., ۲۰۱۱. Accelerated design process of lime-stabilized clays. In *Geo-Frontiers ۲۰۱۱: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. ۴۴۶۸-۴۴۷۸). doi.org/۱۰.۱۰۶۱/۴۱۱۶۵(۳۹۷)۴۵۷
- [۳] Changizi, F. and Haddad, A., ۲۰۱۶. Effect of nano-SiO₂ on the geotechnical properties of cohesive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, ۳۴, pp.۷۲۵-۷۳۳. doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۷۰۶-۰۱۵-۹۹۶۲-۹
- [۴] Consoli, N.C., Vendruscolo, M.A., Fonini, A. and Dalla Rosa, F., ۲۰۰۹. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes*, ۲۷(۳), pp.۱۹۶-۲۰۳. doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.geotextmem.۲۰۰۸,۱۱,۰۰۵
- [۵] Ng, C.W.W. and Co, J.L., ۲۰۱۵. Hydraulic conductivity of clay mixed with nanomaterials. *Canadian Geotechnical Journal*, ۵۲(۶), pp.۸۰۸-۸۱۱. doi.org/۱۰.۱۱۳۹/cgj-۲۰۱۴-۰۳۱۳
- [۶] Bahmani, S.H., Huat, B.B., Asadi, A. and Farzadnia, N., ۲۰۱۴. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement. *Construction and Building Materials*, ۶۴, pp.۳۵۰-۳۵۹. doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.conbuildmat.۲۰۱۴,۰۴,۰۸۶
- [۷] Zhang, S., Wang, W., Song, X., Chi, X. and Lu, T., ۲۰۱۴. Direct shear behavior of nanometer magnesia reinforced cement soil with ۲nd age. *The Open Mechanical Engineering Journal*, ۸(۱). doi.org/۱۰.۲۱۷۴/۱۸۷۴۱۵۵X۰۱۴۰۸۰۱۰۵۰۹
- [۸] Arif, M., Hasan, S.D. and Siddiqui, S., ۲۰۲۳. Effect of nano silica on strength and permeability of concrete. *Materials Today: Proceedings*. doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.matpr.۲۰۲۳,۰۴,۰۷۳
- [۹] Zhang, S., Wang, W., Song, X., Chi, X. and Lu, T., ۲۰۱۴. Direct shear behavior of nanometer magnesia reinforced cement soil with ۲nd age. *The Open Mechanical Engineering Journal*, ۸(۱). doi.org/۱۰.۲۱۷۴/۱۸۷۴۱۵۵X۰۱۴۰۸۰۱۰۵۰۹

- [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(4), pp.63-67. 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/v3z3.917
- [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] Wei, W.A.N.G., Jingjing, L.I.U., Na, L.I. and Lu, M.A., 2022. Mechanical properties and micro mechanism of Nano-SiO₂ modified coastal cement soil at short age. *复合材料学报*, 39(4), pp.1701-1714. doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.2021.07.02,001
- [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/10.1080/10694243.2019.1676989
- [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*, 4, pp.1-12. doi.org/10.1007/s41062-020-2083-3
- [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.52-59. 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(6), 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., 2022. Enhancement consistency and compaction characteristics of clayey soil using nano silica material. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(4), pp.77-83. doi.org/10.21533/pen.v10i4.3367
- [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/s4999-020-00583-8
- [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

- [۲۶] Kong, R., Zhang, F., Wang, G. and Peng, J., ۲۰۱۸. Stabilization of loess using nano-SiO₂. *Materials*, ۱۱(۶), p.۱۰۱۴. doi.org/۱۰.۳۳۹۰/ma۱۱۰۶۱۰۱۴
- [۲۷] Mir, B.A. and Reddy, S.H., ۲۰۲۱. Mechanical behaviour of nano-material (Al₂O₃) stabilized soft soil. *International Journal of Engineering*, ۳۴(۳), pp.۶۳۶-۶۴۳. doi.org/۱۰.۵۸۲۹/ije.۲۰۲۱,۳۴,۰۳c.۰۷
- [۲۸] Chen, Q., Xie, K., Tao, G., Nimbalkar, S. and Zhang, H., ۲۰۲۴. Laboratory assessment of impact of nano-SiO₂ on different soil types in onshore and offshore environment. *Acta Geotechnica*, pp.۱-۲۳. doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۴۴۰-۰۲۳-۰۲۰۶۷-۰
- [۲۹] Ghavami, S., Farahani, B., Jahanbakhsh, H. and Moghadas Nejad, F., ۲۰۱۸. Effects of silica fume and nano-silica on the engineering properties of kaolinite clay. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(۲), pp.۱۳۵-۱۴۲. ۱۰.۲۲۰۶۰/ajce.۲۰۱۸,۱۴۲۰۳,۵۴۶۲
- [۳۰] Gu, J., Cai, X., Wang, Y., Guo, D. and Zeng, W., ۲۰۲۲. Evaluating the Effect of Nano-SiO₂ on Different Types of Soils: A Multi-Scale Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(۲۴), p.۱۶۸۰۵. doi.org/۱۰.۳۳۹۰/ijerph۱۹۲۴۱۶۸۰۵