

بررسی آزمایشگاهی اثر نانوسیلیس در پارامترهای مقاومتی و تحکیم خاک‌های رسی کرج

علی محمد رجیبی* (استادیار)

پردیس علوم، دانشکده‌ی زمین‌شناسی، دانشگاه تهران

علیرضا حیدری عبداللهی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه قم

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۸)
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۲/۱، ص. ۶۵-۷۳

امروزه بهسازی خاک‌های مسئله‌دار به عنوان یکی از چالش‌های مهندسان ژئوتکنیک مورد توجه زیادی قرار گرفته است. از آنجا که خاک‌های مسئله‌دار، منشأ ثانویه دارند و حاصل هوازدگی شیمیایی هستند؛ معمولاً پراکندگی زیادی در سطح زمین دارند. از جمله خاک‌های مسئله‌دار، رس‌ها هستند که با توجه به خصوصیات ضعیف مقاومتی، مشکلات نشست و پتانسیل واگرایی خود، مشکلات زیادی را در بستر سازه‌ها ایجاد می‌کنند. یکی از روش‌های کنترل مسائل ناشی از خاک‌های مسئله‌دار، تثبیت شیمیایی آن‌هاست. در مطالعه‌ی حاضر، با افزودن نانوسیلیس به نوعی از خاک رسی پهنه‌ی شهر کرج، رفتار مقاومتی خاک‌های مسئله‌دار بررسی شده است. به این منظور پس از انجام آزمایش‌های شاخص روی خاک پایه، نانوسیلیس در درصدهای ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به خاک مورد مطالعه افزوده و آزمایش‌های برش مستقیم، مقاومت فشاری تک‌محوری و تحکیم روی آن‌ها انجام شده است. همچنین به منظور بررسی و مقایسه‌ی ویژگی‌های بافتی، خاک قبل و بعد از تثبیت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تصویربرداری شده است. نتایج نشان داد که افزودن نانوسیلیس تا ۲٪، موجب افزایش پارامترهای مقاومتی (شامل چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی) و کاهش ضرایب تراکم‌پذیری و تورم خاک مورد مطالعه شده است.

واژگان کلیدی: خاک رسی، مقاومت برشی، تحکیم، نانوسیلیس، بهسازی خاک.

۱. مقدمه

در پژوهشی در سال ۲۰۰۴، ضمن تأکید بر وجود ویژگی‌های منحصر به فرد نانومواد، نشان داده شد که فعالیت پوزولانی نانوسیلیس به مراتب بیشتر از میکروسیلیس است و لذا عملکرد بهتری در کاربردهای بهسازی خاک دارد.^[۱] همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، تأثیر میکروسیلیس در نفوذپذیری، فشار تورم و مقاومت فشاری خاک‌های رسی مطالعه شد و نتایج نشان داد که با افزودن میکروسیلیس، نفوذپذیری و فشار تورم خاک کاهش و مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده افزایش می‌یابد.^[۲] برخی پژوهشگران (۲۰۰۵)، نیز از نانوسیلیس برای افزایش چسبندگی خاک‌ها و کاهش ویسکوزیته‌ی آن‌ها استفاده و رفتار ماسه‌ی بهبود یافته با نانومواد در شرایط بارگذاری چرخه‌ی باربری را بررسی کردند، نتایج به دست آمده نشان داد که چسبندگی خاک‌های مذکور وابسته به درصد افزایش نانوذرات است.^[۳] همچنین در مطالعه‌ی (۲۰۰۷) با استفاده از نانومواد، بهبود ۴۰ درصدی نشست با اعمال زلزله‌ی مصنوعی در محلی با خاک ماسه‌ی با ویسکوزیته‌ی بالا گزارش شد.^[۴] مطالعات کامل دیگری نیز در سال ۲۰۱۱، روی واکنش‌های شیمیایی میکروسیلیس با آهک و تأثیر آن

خاک‌های رسی به دلیل ماهیت تشکیل و پراکندگی زیادشان در سطح زمین، معمولاً در مسیر اجرای پروژه‌های مهندسی قرار می‌گیرند. از آنجا که خاک‌های رسی از جمله خاک‌های مسئله‌دار هستند، بر حسب نوع پروژه‌ی مهندسی، مشکلات خاصی را به وجود می‌آورند. آن‌ها عمدتاً پارامترهای مقاومتی چندان بالایی ندارند و نشست تحکیمی زیادی دارند. یکی از روش‌های تثبیت خاک‌های رسی، استفاده از مواد افزودنی شیمیایی است. امروزه مطالعات امکان‌سنجی کاربرد نانومواد به منظور بهسازی خاک، گسترش زیادی یافته است. مشخصه‌ی اصلی نانومواد، اندازه‌ی کوچک، سطح ویژه، قابلیت پخش بالا و آگومره شدن است. این ویژگی‌های موجب شده است که به نانومواد در کاربردهای مهندسی و از جمله مهندسی ژئوتکنیک توجه شود.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۶/۳/۲۱، پذیرش ۱۳۹۶/۴/۱۷.

DOI:10.24200/J30.2018.2007.2061

در خواص مهندسی خاک انجام شد و نتایج نشان داد که میکروسیلیس می‌تواند به عنوان یک ماده‌ی مناسب و بهبود دهنده‌ی خواص شیمیایی در خاک‌ها به‌کار رود. [۵] همچنین در سال ۲۰۰۹، به منظور مطالعه‌ی تأثیر نانو سیلیس در ابعاد ۵ تا ۱۰۰ نانومتر، از آزمایش‌های ادمتر، سه‌محوری و آزمایش فشاری تک‌محوری نشده استفاده و نشان داده شد که مقاومت خاک با زمان افزایش می‌یابد و نتایج به‌دست آمده‌ی اخیر نشان داد که خاک محتوای نانوذرات در مراحل ابتدایی شکل‌پذیر و سپس رفتار کشسان‌خمیری دارد. [۶]

در سال ۲۰۱۲، نیز آزمایش‌هایی برای تثبیت خاک‌های سیلتی انجام و تأثیر هم‌زمان آهک و میکروسیلیس بر روی خاک با ۲٪ آهک و ۱، ۳ و ۵ درصد میکروسیلیس بررسی و نتیجه‌گیری شد که اختلاط آهک و سیلیس به نسبت ۲ و ۳ درصد، مقاومت فشاری خاک را به‌طور رضایت‌بخشی بالا می‌برد و خاک را برای زیرسازی جاده مناسب می‌گرداند. [۷] همچنین در سال ۲۰۱۴، اثر نانوذرات سیلیس در حدود اتربرگ، هدایت هیدرولیکی، و مقاومت فشاری خاک‌های رسوبی تثبیت‌شده با سیمان بررسی شد و نتایج نشان داد که افزودنی نانو سیلیس باعث کاهش شاخص خمیری و افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود. در ضمن کمینه‌ی هدایت هیدرولیکی در نمونه‌ی تثبیت شده با ۴٪ نانو سیلیس مشاهده شده است. [۸] در مطالعات دیگری در همان سال، نتیجه گرفته شد که نانوذرات سیلیس می‌تواند تورم‌پذیری رس مونت موریلونیت را مهار کند. [۹] در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۵ نیز تأثیر استفاده از ذرات نانو - خاک در تثبیت خاک‌های نرم بررسی شد و نتایج نشان داد که مقدار کمی نانو - خاک، تأثیر قابل توجهی در اصلاح خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های نرم دارد. [۱۰] برخی پژوهشگران نیز در همان سال، با افزودن آهک و مواد شیمیایی نوین به خاک رس به این نتیجه رسیدند که استفاده از افزودنی‌های مذکور منجر به کاهش حد خمیری و افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری نیز مقاومت خاک افزایش می‌یابد، اما از یک زمان معینی به بعد افزایش ذکر شده محسوس نیست. [۱۱]

در یک مطالعه‌ی دیگر (۲۰۱۵) نیز در بررسی رفتار رس با افزودن ترکیبی نانو اکسید آهن و فیبر پلی‌استر نشان داده شد که با افزودن درصد‌های مختلف نانو اکسید آهن و پلی‌استر، پارامترهای مقاومتی خاک مورد نظر افزایش می‌یابند؛ به طوری که افزایش مقاومت ذکر شده تا درصدی از افزودنی محسوس بوده و از آن به بعد تأثیر قابل توجهی در مقاومت نداشته است. [۱۲] همچنین در سال ۲۰۱۶، اثر افزودنی نانو سیلیس به منظور بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رسی تثبیت شده با سیمان بررسی و نتیجه‌گیری شد که افزودنی نانو سیلیس، پارامترهای مقاومتی خاک رسی را افزایش می‌دهد و می‌تواند جهت اصلاح خاک در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شود. [۱۳] برخی پژوهشگران (۲۰۱۶) نیز خصوصیات انقباضی خاک‌های رسی در حضور نانومواد را با استفاده از نانومس و نانو اکسید آلومینیوم بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مواد مذکور می‌توانند به‌عنوان افزودنی جهت کاهش انقباض خاک در حین خشک شدن به‌کار روند. [۱۴] همچنین در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۶)، اثر ۴ نوع افزودنی (نانورس، نانومس، نانو آلومینا و نانو سیلیس) به منظور بهسازی خاک‌های ریزی بررسی و نشان داده شد که نانوذرات می‌توانند پتانسیل فروریزش خاک را کاهش دهند. و نیز نتیجه گرفتند که نانومواد مختلف، آثار مختلفی در رفتار خاک‌های ریزی دارد. [۱۵]

در همان سال، اثر نانومس و نانو آلومینا نیز در هدایت هیدرولیکی مخلوط خاک - بنتونیت متراکم با شاخص خمیری متفاوت بررسی و نشان داده شد که برای نمونه‌ی خاک با درصد رس بالا (بنتونیت)، افزودن نانومواد می‌تواند تا ۷ برابر، هدایت هیدرولیکی خاک را کاهش دهد. [۱۶] همچنین در مطالعه‌ی در سال

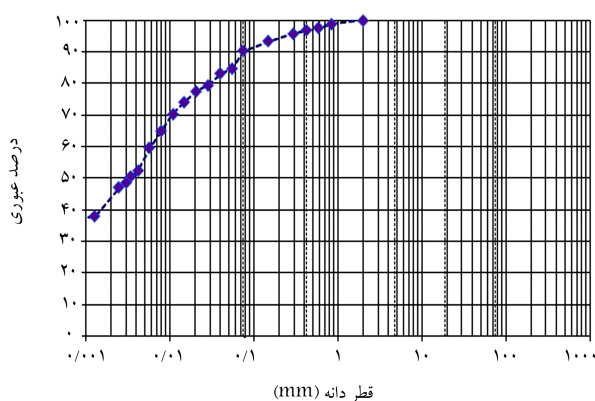
۲۰۱۶، اثر دو نوع افزودنی نانو دی‌اکسید تیتانیوم و نانو خاکستر در خصوصیات خاک‌های نرم بررسی و نشان داده شد که افزودن مواد مذکور باعث افزایش مقاومت برشی و کاهش نشست تحکیمی خاک می‌شود. [۱۷] به منظور بهبود رفتار خاک (۲۰۱۶)، نیز اثر نانولوله‌های کربنی، نانوبنتونیت، سیلیس کلونیدی و لاپونیت بررسی و نتیجه‌گیری شد که اندازه، ساختار، مقاومت اتصال و رئولوژی تعلیق نانوذرات از عوامل مؤثر در بهبود رفتار مقاومتی خاک هستند. [۱۸] همچنین در سال ۲۰۱۷، با انجام یک مطالعه‌ی مروری و جمع‌بندی مطالعات پیشین در خصوص کاربرد مواد نانو در بهسازی انواع مختلف خاک نشان داده شد که حضور مقدار بسیار کمی نانومواد می‌تواند اثر قابل توجهی در خواص مهندسی خاک داشته باشد. به طوری که استفاده از نانومواد در مخلوط خاک باعث افزایش مقاومت، شاخص تورم و تراکم‌پذیری و کاهش نفوذپذیری، پتانسیل روان‌گرایی، نشست و کرنش‌های حجمی می‌شود. [۱۹]

با توجه به فراوانی خاک‌های رسی در سطح زمین و مشکلات زیادی که آن‌ها در پایداری بستر پروژه‌های عمرانی ایجاد کرده‌اند، امکان‌سنجی بهسازی شیمیایی خاک‌های رسی با استفاده از افزودن نانومواد، اهمیت زیادی دارد. همچنین به دلیل فراوانی و در دسترس بودن مواد اولیه‌ی سیلیس و در نتیجه قیمت مناسب نانو سیلیس، نسبت به سایر نانومواد، در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از نانو سیلیس، تغییرات پارامترهای مقاومتی و تحکیم نوعی از خاک‌های رسی بررسی شود. به این منظور در مطالعه‌ی حاضر، با انجام یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی خاک‌های رسی محدوده‌ی شهر کرج، تأثیر افزودنی نانو سیلیس در پارامترهای مقاومتی و تحکیمی نمونه‌ی خاک رسی بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. خصوصیات خاک و نانو سیلیس مورد استفاده

خاک مورد مطالعه با حفر چاهک دستی و نمونه‌برداری از عمق ۲ متری سطح زمین در منطقه‌ی شهرستان کرج به مختصات $35^{\circ} 47' 17.1''$ عرض شمالی و $50^{\circ} 52' 41.1''$ طول شرقی تهیه شده است. جهت شناسایی اولیه‌ی خاک، آزمایش چگالی در محل طبق استاندارد ASTM D556-82، در عمق ۲ متری انجام و مقدار چگالی طبیعی خاک در عمق ذکر شده برابر $\frac{\rho_r}{\rho_{20}} = 1.55$ تعیین شده است. شکل ۱، منحنی دانه‌بندی خاک را طبق استاندارد ASTM 422-63 D نشان می‌دهد. [۲۱] براساس نتایج آزمایش دانه‌بندی درصد ریزدانه و ماسه‌ی



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک مصرفی.

جعبه‌ی برش به ابعاد $10 \times 10 \text{ cm}$ و با در نظر گرفتن تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال انجام شد. در پژوهش حاضر، همچنین آزمایش‌ها در شرایط دمایی گیرش و چگالی مشابه برای تمام نمونه‌های خاک انجام و نمونه‌ها در شرایط تحکیم یافته و زهکشی شده آزمایش شده‌اند.

۳.۲.۲. آزمایش تحکیم

در پژوهش حاضر، جهت تعیین پارامترهای تحکیم (ضریب فشردگی و ضریب تورم)، آزمایش تحکیم مطابق استاندارد ASTM D2435^[۲۶] انجام شده است. به این منظور خاک‌های رسی ابتدا از الک ۲۰۰ عبور داده شده و پس از افزودن درصد‌های مورد نظر نانوسیلیس، نمونه در شرایط درصد رطوبت بهینه در ۳ لایه با ضخامت یکسان در داخل رینگ تحکیم متراکم و آزمایش تحکیم مطابق با استاندارد انجام شده است.

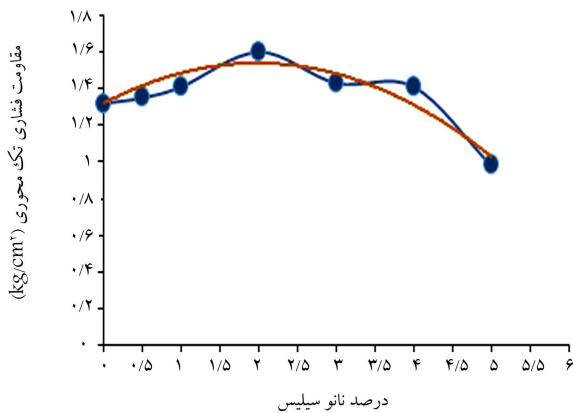
۴.۲.۲. عکس برداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، یکی از روش‌های بررسی ویژگی‌های ریزساختاری خاک است که امروزه در مهندسی خاک کاربردهای فراوانی دارد. میکروسکوپ الکترونی روبشی، امکان بررسی و آنالیز ریزساختاری داخلی را در ابعاد میکرون و نانومتر فراهم آورده است. در پژوهش حاضر، جهت مشاهده‌ی بافت و ساختار خاک تثبیت شده، آزمایش مذکور بر روی نمونه‌ی خاک طبیعی و نمونه‌ی خاک تثبیت شده با نانوسیلیس در درصد‌های ۲ و ۵ (درصد‌های مهم به دست آمده از مطالعه‌ی حاضر) انجام شده است.

۳. بحث و نتایج

۱.۳. تأثیر نانوسیلیس در مقاومت تک محوری خاک

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری روی خاک طبیعی و تثبیت شده با ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد افزودنی نانوسیلیس، در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۲، روند تغییرات مقادیر مقاومت فشاری تک محوری را به ازاء درصد‌های افزودنی مختلف مشاهده می‌شود که مطابق آن با افزایش نانوسیلیس، مقاومت فشاری تک محوری خاک، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بر این اساس، نرخ افزایش تغییرات مقاومت فشاری با افزودن نانوسیلیس ابتدا کم و به ازاء افزودن ۲٪ نانوسیلیس، به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد. بعد از این مرحله با افزودن نانوسیلیس، نه فقط افزایشی در مقاومت فشاری تک محوری مشاهده



شکل ۲. تأثیر درصد نانوسیلیس در مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده.

خاک مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۹۰/۲۳ و ۹/۷۷ درصد تعیین شده است. به منظور طبقه‌بندی خاک، آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318^[۲۷] انجام و حد خمیری، حد روانی و شاخص خمیری خاک به ترتیب برابر با ۴۱، ۲۵ و ۱۶ درصد تعیین شده است. با توجه به نتایج آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ نوع خاک مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد از نوع رس با حد روانی پایین (CL) تعیین می‌شود. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌های مختلف در درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه صورت پذیرفته است، آزمایش تراکم نیز طبق استاندارد ASTM D698^[۲۸] انجام شده است. بر این اساس وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک برابر $\frac{27}{cm^3}$ و درصد رطوبت بهینه‌ی خاک، ۲۳٪ تعیین شده است.

خصوصیات فیزیکی نانوسیلیس مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، با توجه به آنالیز ارائه شده توسط شرکت تولیدکننده، در جدول ۱ ارائه شده است؛ که مطابق آن، پودر نانوسیلیس مورد استفاده به رنگ سفید و با محدوده‌ی قطر ۱۱-۱۳ نانومتر، بیش از ۹۹٪ سیلیس داشته و مقادیر سایر عناصر، شامل: تیتانیم، کلسیم، سدیم و آهن موجود در پودر نانوسیلیس مورد استفاده به ترتیب کمتر از ۱۲۰، ۷۰، ۵۰ و ۲۰ (ppm) بوده است.

۲.۲. آزمایش‌ها

۱.۲.۲. آزمایش تراکم تک محوری

آزمایش تراکم تک محوری زهکشی نشده در خاک‌های رسی اشباع، یکی از مهم‌ترین آزمایش‌هایی است که به منظور تعیین مقاومت تراکم تک محوری یا همان چسبندگی زهکشی نشده استفاده می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، آزمایش تراکم تک محوری مطابق استاندارد ASTM D1566-85^[۲۹] روی نمونه‌های طبیعی و تثبیت شده با نانوسیلیس با درصد‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۵، بلافاصله پس از افزودن نانو و با سرعت بارگذاری $1 \frac{mm}{min}$ انجام شده است. در آزمایش تراکم تک محوری جهت ساخت نمونه‌ها، از قالب با قطر و ارتفاع به ترتیب ۴/۹۷ و ۱۰/۰۵ سانتی‌متر استفاده شده است. نمونه‌ی خاک آماده شده در شرایط رطوبت بهینه، در ۳ لایه با ضخامت تقریباً یکسان تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر در قالب تک محوری متراکم شده است.

۲.۲.۲. آزمایش برش مستقیم

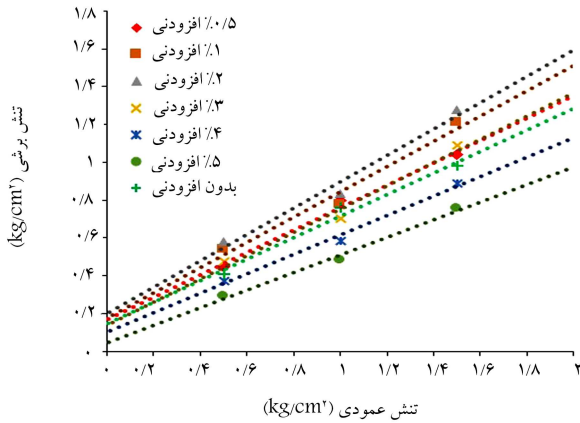
پارامترهای مقاومت برشی خاک، یکی از عوامل مهم در تعیین رفتار خاک‌ها هستند. یکی از روش‌های تعیین پارامترهای ذکر شده، آزمایش برش مستقیم است. در مطالعه‌ی حاضر، آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D3080-98^[۲۵] روی خاک طبیعی و نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس در درصد‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵، بلافاصله پس از افزودن نانو انجام شده است. آزمایش برش مستقیم در

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی نانوسیلیس مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر.

مقدار	مشخصه
۹۹/۲٪	درصد خلوص
۱۱ - ۱۳ nm	قطر دانه
$40 - 60 \text{ m}^2/\text{g}$	سطح مخصوص
سفید	رنگ
$< 0.1 \text{ g/cm}^3$	تراکم فله
2.4 g/cm^3	چگالی واقعی

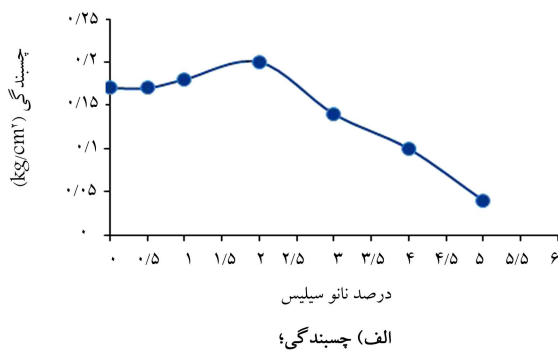
جدول ۲. نتایج آزمایش برش مستقیم و تک محوری بر روی خاک تثبیت شده با نانوسیلیس.

درصد نانوسیلیس	۰	۰٫۵	۱	۲	۳	۴	۵
چسبندگی (kg/cm^2)	۰٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۱۸	۰٫۲	۰٫۱۴	۰٫۱	۰٫۰۴
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۰	۳۱	۳۴	۳۵	۳۲	۲۷	۲۵
مقاومت تک محوری (kg/cm^2)	۱٫۳۲	۱٫۳۵	۱٫۴۱	۱٫۶	۱٫۴۳	۱٫۴۱	۰٫۹۸



شکل ۳. نمونه‌ی گسیخته شده در دستگاه تک محوری با افزودن ۲٪ نانوسیلیس.

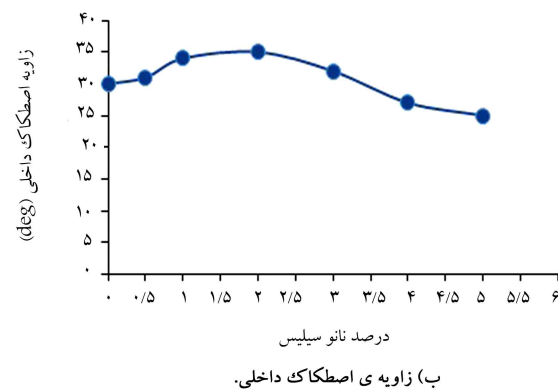
شکل ۴. نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی خاک رسی با درصد‌های مختلف نانوسیلیس.



نمی‌شود؛ بلکه روند عمومی منحنی، کاهشی است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که افزایش مقاومت فشاری نمونه با افزودن نانوسیلیس ناشی از بارهای سطحی بالا در ذرات نانوسیلیس است. به طوری که ذرات نانوسیلیس به سرعت تمایل به جذب شدن در اطراف ذرات رس دارند. لذا با توجه به کاهش فضای خالی نمونه در اثر افزودنی و متراکم شدن خاک، نمونه تنش فشاری بیشتری را تحمل می‌کند. با افزایش درصد افزودنی به بیش از درصد بهینه (۲٪)، نانوسیلیس بین ذرات خاک به صورت مازاد قرار می‌گیرد و این امر سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. شکل ۳، تصویر نمونه‌ی گسیخته شده در خاک تثبیت شده با ۲٪ نانوسیلیس را نشان می‌دهد. بررسی سطوح شکست در نمونه‌های طبیعی و تثبیت شده با درصد‌های مختلف افزودنی نشان می‌دهد که نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس، در مقایسه با نمونه‌های طبیعی رفتار تردتری دارد و سطح شکست در نمونه‌های مذکور، در نتیجه‌ی توسعه‌ی ترک‌های کششی در دو انتهای نمونه تشکیل می‌شود.

۲.۳. تأثیر نانوسیلیس در مقاومت برشی خاک

مطابق آزمایش‌های انجام شده، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک طبیعی برابر ۳۰ درجه و چسبندگی آن ۱۷ کیلوپاسکال به دست آمده است. مقادیر پارامترهای مقاومت برشی ناشی از آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۴، همچنین پوش موهر - کولمب حاصل از آزمایش‌های مذکور را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۴، بالاترین شیب و عرض از مبدأ مربوط به خاک تثبیت شده با ۲٪ افزودنی است، که معرف بیشترین زاویه‌ی اصطکاک داخلی (۳۵ درجه) و چسبندگی خاک (۲۰ کیلوپاسکال) است و منحنی‌های مربوط به درصد افزودنی بیشتر (۳، ۴، ۵)، همه پایین‌تر از منحنی مربوط به ۲٪ افزودنی قرار گرفته‌اند.



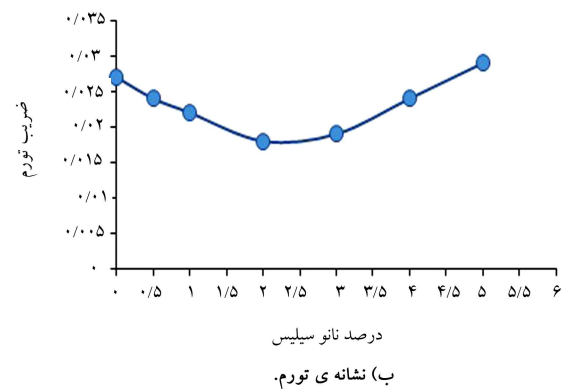
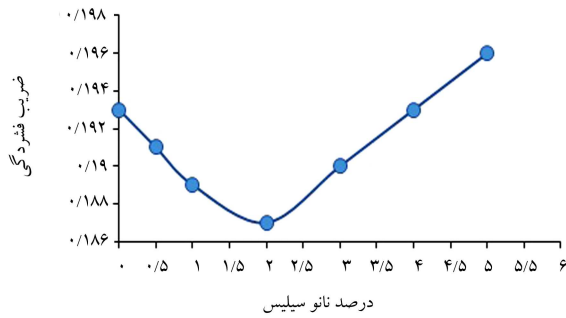
شکل ۵. تأثیر درصد نانوسیلیس در پارامترهای مقاومت برشی خاک تثبیت شده.

نانومواد تا ۲٪ را می‌توان ناشی از واکنش‌های سیمانی شدن نانوسیلیس دانست. در نتیجه، نمونه تحت تنش‌های فشاری یکسان، مقاومت برشی بیشتری را از خود نشان می‌دهد. در درصد‌های بالاتر از درصد بهینه، تثبیت‌کننده‌ی مازاد که در بین ذرات خاک باقیمانده است، سبب کاهش پارامترهای مقاومتی خاک می‌شود.

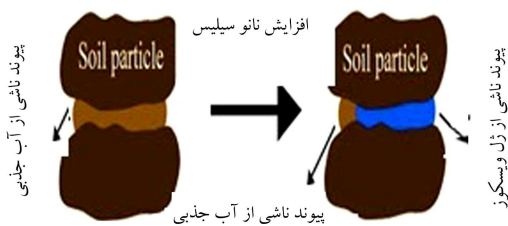
در شکل ۵، تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک رسی مورد مطالعه با افزودن درصد‌های متفاوت نانوسیلیس مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، هر دو پارامتر زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی تا ۲٪ افزودنی نانوسیلیس افزایش و سپس کاهش یافته است. به هر حال، نرخ تغییرات چسبندگی در مقایسه با زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک بیشتر است. افزایش زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی نمونه با افزودن

جدول ۳. نتایج آزمایش تحکیم بر روی خاک تثبیت شده با افزودنی نانوسیلیس.

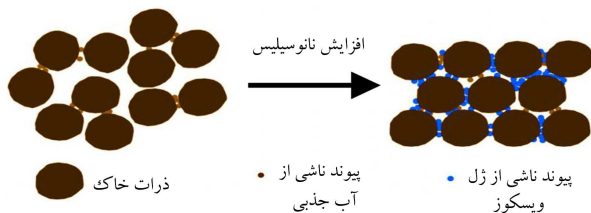
پارامترها	درصد نانوسیلیس						
	۰	۰٫۵	۱	۲	۳	۴	۵
درجه اشباع (%)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
وزن مخصوص خشک (gr/cm^3)	۱٫۸۳	۱٫۸۲	۱٫۸	۱٫۷۸	۱٫۸	۱٫۸۲	۱٫۸۸
نسبت تخلخل	۰٫۴۶	۰٫۴۷	۰٫۴۸	۰٫۵	۰٫۴۹	۰٫۴۷	۰٫۴۲
درصد رطوبت (%)	۱۷٫۳	۱۷٫۵	۱۸٫۲	۱۸٫۶	۱۸٫۱	۱۷٫۵	۱۵٫۸
نشانه فشردگی	۰٫۱۹۳	۰٫۱۹۱	۰٫۱۸۹	۰٫۱۸۷	۰٫۱۹	۰٫۱۹۳	۰٫۱۹۶
نشانه تورم	۰٫۰۲۷	۰٫۰۲۴	۰٫۰۲۲	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۹	۰٫۰۲۴	۰٫۰۲۹



شکل ۶. تأثیر درصد نانوسیلیس در پارامترهای تحکیمی خاک تثبیت شده.



شکل ۷. اثر نانوسیلیس در پیوند بین ذرات رس. [۲۸]



شکل ۸. اثر نانوسیلیس در فاصله‌ی بین ذرات رس. [۲۸]

۳.۳. تأثیر نانوسیلیس در خصوصیات تحکیمی خاک

به منظور مطالعه‌ی چگونگی تحکیم‌پذیری خاک مورد مطالعه در حضور افزودنی نانوسیلیس، آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌ی خاک طبیعی و همچنین نمونه‌ی خاک تثبیت شده با درصد‌های افزودنی ۰٫۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ انجام شد. براساس آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ی خاک طبیعی، نشانه‌ی فشردگی (C_c) و تورم خاک (C_s) به ترتیب برابر ۰٫۱۹۳ و ۰٫۰۲۷ تعیین شده است. درجه‌ی اشباع خاک اولیه قبل از انجام آزمایش برابر ۸۷٫۸٪ و نسبت تخلخل اولیه‌ی خاک برابر ۰٫۴۶ به دست آمده است. پس از انجام آزمایش بر روی خاک اولیه، نسبت تخلخل نمونه برابر ۰٫۴۶ و درصد رطوبت خاک برابر ۱۷٫۳٪ محاسبه شده است. در جدول ۳، نتایج حاصل از آزمایش‌های تحکیم در درصد‌های مختلف افزودنی نانوسیلیس ارائه شده است. در شکل ۶، نیز تغییرات نشانه‌ی فشردگی و تورم خاک به ازاء درصد‌های مختلف افزودنی نانوسیلیس مشاهده می‌شود که مطابق آن، افزودن نانوسیلیس تا درصد مشخص به ازاء فشارهای یکسان باعث کاهش نشست خاک می‌شود، ولی با افزایش درصد افزودنی در همان فشارها، نشست بیشتری اتفاق می‌افتد. نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌ی حاوی ۲٪ نانوسیلیس، کمترین مقدار ضریب فشردگی و تورم را دارد. کاهش ضرایب فشردگی و تورم خاک رس در اثر تثبیت را می‌توان ناشی از واکنش‌های شیمیایی بین ذرات رس و تثبیت‌کننده‌ها دانست که از طرفی باعث ایجاد پیوند بین ذرات رس و از طرفی دیگر، باعث اشغال بخشی از حجم حفره‌های موجود در خاک می‌شود. پس از رسیدن به مقدار بهینه، افزودن تثبیت‌کننده به خاک موجب افزایش ضریب فشردگی و تورم می‌شود. دلیل این موضوع پایان واکنش‌های شیمیایی و باقی‌ماندن تثبیت‌کننده‌های مازاد است، که موجب افزایش نشست می‌شود.

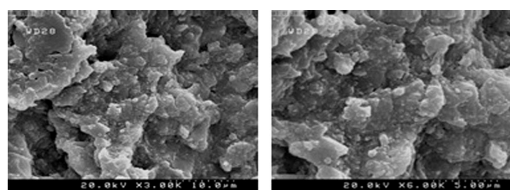
مکانیزم تغییر رفتار خاک (از جمله افزایش مقاومت تراکم تک‌محوری، مقاومت برشی، و رفتار تحکیمی) در حضور نانوسیلیس هنوز به خوبی شناخته نشده است. اما احتمالاً دو مکانیزم در این رابطه وجود دارد: در مکانیزم اول (شکل ۷)، با افزودن آب به رس، ذرات نانوسیلیس جذب آب لایه‌ی دوگانه می‌شوند و تولید نوعی ژل ویسکوز می‌کنند. تولید ژل ویسکوز باعث افزایش سطح تماس بین ذرات رس می‌شود. پیوند بین ذرات رس به دلیل وجود ژل ویسکوز (در نتیجه‌ی حضور نانوسیلیس) احتمالاً قوی‌تر از پیوند بین ذرات رس به دلیل آب جذبی (در خاک بدون افزودنی نانوسیلیس) است. در نتیجه، حضور ژل مذکور و افزایش سطح تماس بین ذرات رس می‌تواند یکی از دلایل توجیه‌کننده‌ی رفتار خاک مورد بحث در پژوهش حاضر باشد. در مکانیزم دوم (شکل ۸)، نانوسیلیس فاصله‌ی بین ذرات رس را کاهش می‌دهد و این امر باعث می‌شود تعداد بیشتری از ذرات رس با هم در تماس باشند. در این شرایط، ذرات رس به‌وسیله‌ی ژل ویسکوز ذکر شده به ذرات نانوسیلیس می‌چسبند و مطابق

با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت تراکم تک‌محوری و مقاومت برشی در پژوهش حاضر، چسبندگی خاک تثبیت شده از چسبندگی خاک طبیعی بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، سطح تماس مؤثر بین ذره‌ی در ذرات رس با افزایش درصد نانوسیلیس افزایش می‌یابد و در نتیجه، مقاومت پیوند و نهایتاً زاویه‌ی اصطکاک داخلی مخلوط خاک و نانوسیلیس افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی همچنین در برخی پژوهش‌ها، به دست آمده است. [۲۸، ۲۷]

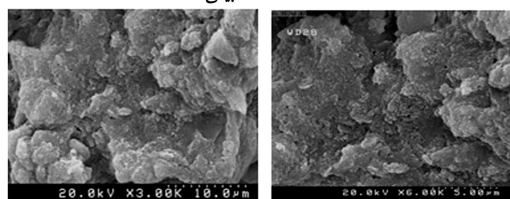
بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهند هنگامی که نانوذرات سیلیس با خاک رس خشک مخلوط می‌شوند، نانوسیلیس باعث می‌شود که ذرات رفتار آب‌گریز از خود نشان دهند. به دلیل آب‌گریزی ایجاد شده، فرایند تشکیل اگرگات‌ها و توده شدن ذرات خاک، هنگامی که آب به مخلوط ذرات نانوسیلیس و خاک اضافه می‌شود، مشکل است؛ اما پس از تشکیل ژل ویسکوز سیلیکا، فرایند مذکور امکان‌پذیر می‌شود. همچنین برخی فضاهای بین ذرات با ژل مورد نظر پر می‌شوند. در نتیجه، بهسازی با نانوسیلیس باعث تراکم بیشتر خاک می‌شود. به علاوه، تشکیل ژل مذکور باعث افزایش نیروهای پیوندی و قفل‌شدگی بین ذرات خاک می‌شود و در نتیجه مقاومت، چسبندگی، و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در حضور نانوسیلیس افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر نانوسیلیس به خاک (در مطالعه‌ی حاضر تا ۲٪)، مقدار بیشتری ژل ویسکوز تولید می‌کند و در نتیجه، مقاومت برشی افزایش بیشتری می‌یابد. نهایتاً افزایش بیش از ۲٪ نانوسیلیس باعث می‌شود که رفتار خاک بیشتر تحت تأثیر ذرات نانو و ژل ویسکوز قرار گیرد و در نتیجه مقاومت تراکم تک‌محوری، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش، و نشانه‌ی فشردگی و تورم خاک تحت تأثیر ژل مازاد افزایش یابد.

۴.۳. نتایج تصاویر SEM

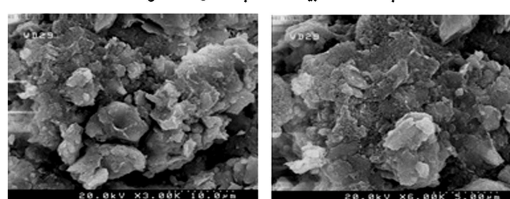
جهت مشاهده‌ی بافت خاک و تغییرات ساختار داخلی خاک تثبیت شده، عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی بر روی خاک اولیه و همچنین خاک تثبیت شده با پودر



الف) خاک طبیعی؛



ب) خاک تثبیت شده با ۲ درصد نانو؛



ج) خاک تثبیت شده با ۵ درصد نانو.

شکل ۹. تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۶۰۰۰ و ۳۰۰۰ برابر.

نانوسیلیس در درصد‌های ۲ و ۵ انجام شد؛ زیرا به ازاء درصد افزودنی برابر ۲، بیشترین افزایش در پارامترهای مقاومتی خاک حاصل شده و در حضور ۵٪ افزودنی، نانوسیلیس بیشترین اثر منفی را در مقادیر پارامترهای مورد مطالعه داشته است.

مطابق با شکل ۹، با توجه به ابعاد کوچک نانوسیلیس در مقایسه با حفره‌های بین ذرات رس، افزایش نانومواد تا ۲٪ وزنی، باعث پر شدن حفره‌ها و ایجاد پیوستگی بین ذرات می‌شود و یک بافت پیوسته‌ی را ایجاد می‌کند. این پیوستگی باعث بهبود پارامترهای مقاومتی و ضرایب تراکم‌پذیری و تورم خاک شده است. با افزایش درصد افزودنی از مقدار بهینه (۲٪) دانه‌های خاک با نانومواد ترکیب شده‌اند، ولی تثبیت‌کننده‌های مازاد به صورت نوعی ژل ویسکوز در برخی از نقاط نمونه به صورت فولکوله‌ی تجمع یافته‌اند که این اتفاق به ترتیب باعث کاهش و افزایش پارامترهای مقاومتی و تحکیمی (نشانه‌ی فشردگی و تورم) خاک تثبیت شده می‌شود.

۴.۴. نتیجه‌گیری

در مهندسی ژئوتکنیک، خاک‌های رسی در برخی موارد به عنوان خاک‌های مسئله‌دار از نظر ظرفیت باربری، تورم، رمیندگی، نشست و غیره مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است. از دیرباز، استفاده از افزودنی‌ها به منظور بهسازی خاک‌های رسی در راستای بهبود تراکم، کاهش تورم، بهبود مقاومت و پایداری مورد نظر پژوهشگران حوزه‌ی مهندسی ژئوتکنیک بوده است. این در حالی است که به استفاده از نانومواد در مهندسی ژئوتکنیک کمتر توجه شده است. به همین دلیل در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر افزودنی نانوسیلیس در خواص مهندسی نمونه‌ی خاک رسی بررسی شده است. بدین منظور از نانوسیلیس در تثبیت خاک‌های رسی شهر کرج (غرب تهران، ایران) با درصد‌های مختلف استفاده و ضمن انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، برش مستقیم و تحکیم تغییرات پارامترهای مقاومتی (زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک)، شاخص‌های تراکم‌پذیری و تورم بررسی شده است. نکته‌ی جالب توجه در مطالعه‌ی حاضر این است که درصد بهینه‌ی افزودنی برای همه‌ی پارامترهای مذکور (زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک) برابر با ۲٪ نانوسیلیس بوده است. به طوری که با افزایش افزودنی نانوسیلیس از ۰ تا ۲ درصد، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی افزایش و از آن به بعد کاهش می‌یابند. در مورد شاخص‌های تراکم‌پذیری و تورم خاک نیز افزودن نانوسیلیس تا نقطه‌ی بهینه (۲٪)، منجر به کاهش و سپس افزایش شاخص‌های مذکور می‌شود. نتایج تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روشی نشان داد که افزایش نانومواد تا ۲٪ وزنی، باعث ایجاد پیوستگی بین ذرات و نیز با ایجاد یک بافت پیوسته، باعث بهبود پارامترهای مقاومتی و ضرایب تراکم‌پذیری و تورم خاک می‌شود. با افزایش درصد افزودنی از مقدار بهینه‌ی ۲٪، دانه‌های خاک با نانو در برخی از فضاهای خالی نمونه‌ی خاک به صورت فولکوله‌ی تجمع یافته‌اند. به نظر می‌رسد پدیده‌ی ذکر شده باعث ایجاد یک روند معکوس در بهسازی خاک پس از افزودن ۲٪ نانوسیلیس شده است.

نتایج مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که تثبیت خاک با نانوسیلیس، روشی مؤثر برای بهسازی خاک است که طی آن مقاومت برشی، مقاومت فشاری تک‌محوری و پارامترهای تحکیمی خاک بهبود می‌یابند و در نتیجه، پایداری سازه‌هایی نظیر پی و بستر راه افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر و گستردگی منابع سیلیس در سطح زمین و در نتیجه اقتصادی بودن آن، در صورت توسعه و بهبود تکنولوژی ساخت و اجرا، روش بهسازی مذکور می‌تواند به عنوان یک روش عملی به منظور

یک کار آزمایشگاهی است و احتمال دارد نسبت به شرایط برجای خاک، تفاوت قابل توجهی داشته باشد. در ادامه‌ی پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود با استفاده از روش‌های مختلف تصویربرداری، شامل X-Ray، XRD و XRF، ضمن شناسایی انواع مختلف رس، اثر نانوسیلیس در انواع رس بررسی شود. همچنین اثر افزودنی مذکور در پتانسیل تورم‌پذیری و رمبندگی خاک مطالعه شود.

بهسازی رفتار مقاومتی رس در بسیاری از حوزه‌های مهندسی ژئوتکنیک در نظر گرفته شود. ولیکن باید به این نکته توجه کرد که نتایج حاصل از پژوهش حاضر، براساس نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک‌های رسی منطقه‌ی کرج و با مشخصات مهندسی ارائه شده در پژوهش حاضر به دست آمده است و ممکن است برای سایر خاک‌های رسی با تغییراتی توأم باشد. همچنین نتایج به دست آمده، حاصل

منابع (References)

- Li, G. "Properties of high volume fly ash concrete incorporating nano-sio₂", *Cement and Concrete Research*, **34**(6), pp. 1043-1049 (2004).
- Kalkan, E. and Akbulut, S. "The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners", *Engineering Geology*, **73**(1), pp. 145-156 (2004).
- Gallagher, P.M. and Lin, Y. "Column testing to determine colloid silica transport mechanisms", Geo-Frontiers Congress, Austin, Texas, United States (2005).
- Gallagher, P.M., Conlee, C.T. and Rollins, K.M. "Full scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(2), pp. 186-196 (2007).
- Karimi, M., Ghorbani, A., Daghigh, Y. and et al. "Stabilization of silty sand soils with lime and microsilica admixture in presence of sulfates", *14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Toronto, Canada (2011).
- Butron, C., Axelsson, M. and Gustafson, G. "Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength, fracture behavior and hydraulic conductivity", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**(6), pp. 603-607 (2009).
- Moayed, R.Z., Izadi, E. and Heidari, S. "Stabilization of saline silty sand using lime and micro silica", *Journal of Central South University*, **19**(10), pp. 3006-3011 (2012).
- Bahmani, S., Huat, B.B.K., Asadi, A. and et al. "Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement", *Construction and Building Materials*, **64**(14), pp. 350-359 (2014).
- Pham, H. and Nguyen, Q.P. "Effects of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersion", *Journal of Nanoparticle Research*, **16**(2137) (2014).
- Khalid, N., Arshad, M.F., Mukri, M. and et al. "Influence of nano-soil particles in soft soil stabilization", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **20**(2), pp. 731-738 (2015).
- Modarresi, A. and Nosoudy, Y. "Clay stabilization using coal waste and lime-Technical and environmental impacts", *Applied Clay Science*, **116-117**, pp. 281-288 (2015).
- Changizi, F. and Haddad, A. "Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **7**(4), pp. 367-378 (2015).
- Ghasabkolaei, N., Janalizadeh, A., Jahanshahi, M. and et al. "Physical and geotechnical properties cement treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study", *The European Physical Journal Plus*, **131**(5), pp. 1-11 (2016).
- Jason L.C., Zac, P.S.S. and Charles, W.W.N. "Effect of nanoparticles on the shrinkage properties of clay", *Engineering Geology*, **213**, pp. 84-88 (2016).
- Iranpour, B. and Haddad, A. "The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment", *Engineering Geology*, **205**, pp. 40-53 (2016).
- Taha, O.M.E. and Taha, M.R. "Soil-water characteristic curves and hydraulic conductivity of nanomaterial-soil-bentonite mixtures", *Arabian Journal of Geosciences*, **9**(1), pp. 1-14 (2016).
- Babu, S. and Joseph, S. "Effect of nano materials on properties of soft soil", *International Journal of Science and Research*, **5**(8), pp. 634-637 (2016).
- Huang, Y. and Wang, L. "Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: A review", *Environmental Earth Sciences*, **75**(497), (2016).
- Ghasabkolaei, N., Janalizade, A., Roshan, N. and et al. "Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review", *Archive of Civil and Mechanical Engineering*, **17**(3), pp. 639-650 (2017).
- ASTM D1556-82., *Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cons Method*, (E1 edition) (1982).
- ASTM D422-63, "Standard test method for particle-size analysis of soil", ASTM International, West Conshohocken, PA (2007).
- ASTM D4318., *Standard test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, (1998 Edition).
- ASTM D698., *Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, Book of Standards Volume: 04.08.
- ASTM D2166-85, *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, (1985 Edition).
- ASTM D3080-98, "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, ASTM international", West Conshohocken PA (1998).

26. ASTM D2435., *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*, (2011 Edition).
27. Landman, J., Paineau, E., Davidson, P. and et al. "Effects of added silica nanoparticles on the nematic liquid crystal phase formation in beidellite suspensions", *J. Phys. Chem. B.*, **118**(18), pp. 4913-4919 (2014).
28. Changizi, F. and Haddad, A. "Effect of nano-SiO₂ on the geotechnical properties of cohesive soil", *Geotech. Geol. Eng.*, **34**(2), pp. 725-733 (2016).