



مطالعه آزمایشگاهی تأثیر نانوذرات رُس و سیلیکا بر روی رفتار خاکهای سیلتی - رُسی شهر مشهد

سهیل قره^{۱*}، کیمیا یزدانی^۲، وهاب بشارت^۲

۱- گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۲- گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۳۱

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۷/۰۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳

کلمات کلیدی:

بهسازی خاک

نانورُس

نانوسیلیکا

مقاومت برشی

نشست

خلاصه: در مناطق شهری به ویژه کلان‌شهر مشهد با توجه به قرارگیری محدوده‌های وسیعی بر روی رسوبات ریزدانه و خاک‌های دستی و مسأله‌دار، ارائه فناوری‌های نوین به منظور جلوگیری از بروز نشست‌های نامتقارن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در این راستا با توجه به ضرورت ساخت سازه‌های بلندمرتبه و همچنین مشکلات زیست‌محیطی، بکارگیری فناوری نانو در بهسازی خاک جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی نظیر اجرای ستون‌های سنگی، تزریق تحت فشار سیمان و یا آهک، اجرای شمع و ریزشمع و غیره می‌باشد. فناوری نانو به دلیل افزایش قابل توجه سطح ذرات، با تأثیر چشم‌گیری در بهبود پارامترهای مقاومتی و مکانیکی خاک همراه می‌باشد. در این پژوهش تأثیر افزودن نانورُس از نوع مونت‌موریلونیت و نانوسیلیکا از نوع S بر پارامترهای مقاومتی و مکانیکی خاک ریزدانه اطراف حرم مطهر رضوی در شهر مشهد در نسبت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۲/۵ و ۵ از نانورُس و ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ از نانوسیلیکا با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی گردید. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه پارامترهای مقاومت برشی و فشاری و همچنین کاهش نشست‌پذیری خاک در نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با نانورُس می‌باشد، به طوری که افزودن ۱ درصد نانوسیلیکا و ۲/۵ درصد نانورُس به ترتیب موجب افزایش ۶۲۰ و ۱۳۴ درصدی ظرفیت باربری خاک سیلتی - رُسی مورد مطالعه شده است. لازم به ذکر است با توجه به پائین بودن شاخص تورم این خاک، افزودن این نانوذرات همراه با تغییر در درجه تورم‌پذیری خاک محدوده مورد مطالعه نمی‌باشد.

۱- مقدمه

با گسترش روزافزون جمعیت، نیاز به ساخت سازه‌های بلندمرتبه و همچنین وجود خاک‌های مسأله‌دار 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، که این مهم با توجه به وجود ساختمان‌های بافت فرسوده در محدوده‌های مجاور حرم مطهر رضوی در مشهد مقدس از اهمیت بسزایی برخوردار 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 نانومواد در مطالعات مهندسی مورد علاقه محققان در سراسر جهان قرار گرفته است. درمقیاس نانو، نسبت سطح به حجم افزایش و به تبع آن، ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر منجر به واکنش فعالانه با سایر ذرات و حلال‌ها

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghareh_soheil@pnu.ac.ir

شده؛ به طوری که 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 ژئوتکنیکی خاک به عنوان تثبیت‌کننده از این فناوری استفاده می‌گردد [۲-۴].

در طول سال‌های اخیر، نانوذرات مختلف از جمله نانورُس، نانوسیلیکا، نانولوله‌های کربنی، نانوذرات فلزی و اکسید فلزی مانند TiO_2 و Al_2O_3 به منظور کاربردهای مهندسی و بهسازی خاک بکار گرفته شده است.

احمدی و شفییعی در ۲۰۱۹ با توجه به تفاوت‌های موجود در خواص نانوسیلیکا و میکروسیلیس به بررسی تأثیر افزودن این مواد بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رُس 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 نانوسیلیکا در مقادیر کمتر از ۲ درصد بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک تأثیر قابل توجهی داشته است. در نمونه‌های حاوی



در مسائل مهندسی باشد [۷].

عباسی و همکاران، با بررسی تأثیر نانورُس بر پتانسیل پراکنشی^۱ دو نوع خاک رُس با پلاستیسیته کم و پلاستیسیته بالا به این نتایج دست یافتند که افزودن نانورُس به خاک‌های پراکنده رُسی، می‌تواند به میزان قابل توجهی توانایی پراکنش آنها را کاهش دهد [۸]. شهیدی و همکاران، خاک‌های آلوده با ۶ و ۸ درصد گازوئیل را با استفاده از ۱ درصد مونت‌موریلونیت و ۳ درصد کلوسیت (نوعی نانورُس) بهسازی و پلاستیسیته این نوع خاک‌ها را بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد افزودن نانورُس باعث افزایش حدود روانی و خمیری خاک و احیاء خواص پلاستیسیته خاک می‌گردد. همچنین آنها مقاومت نمونه‌های خاک آلوده و خاک‌های بهسازی شده با نانورُس را در چرخه‌های متوالی ذوب-یخبندان مورد بررسی قرار دادند. نتایج چرخه‌های ذوب و یخبندان نشان دهنده کاهش مقاومت تمام نمونه‌ها در چرخه اولیه و افزایش بیشتر مقاومت نمونه‌های بهسازی شده با مونت‌موریلونیت نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با هالوسیت در چرخه‌های بعدی بود [۹].

کنعانی‌زاده و خوش نیت استفاده از نانورُس را جهت ممانعت از نفوذ شیرابه‌های زباله به داخل خاک در سه حالت خنثی، اسیدی و قلیایی بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌های انجام شده بیان‌گر کاهش نفوذپذیری در حالت خنثی از 3×10^{-9} به 11×10^{-11} و $7/74$ سانتی‌متر بر ثانیه، در حالت اسیدی از $3/66 \times 10^{-9}$ به $7/9 \times 10^{-10}$ سانتی‌متر بر ثانیه و برای حالت بازی از $3/25 \times 10^{-9}$ به $5/24 \times 10^{-10}$ سانتی‌متر بر ثانیه بود [۱۰]. قاضی و همکاران، مقاومت فشاری خاک رُس عمل‌آوری شده توسط نانورُس در سطوح مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این آزمایش‌ها بیان‌گر افزایش ۳۴ درصدی مقاومت فشاری خاک با افزودن ۸ درصد وزنی نانورُس بود که موجب کاهش شکل‌پذیری و افزایش سختی خاک می‌شود [۱۱]. در مطالعات دیگری بهاری و همکاران تأثیر افزودن نانورُس با نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد را در بهبود خواص فیزیکی خاک‌های سیلتی بررسی نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد افزودن نانورُس باعث افزایش مقاومت و پایداری خاک شده و فرسایش بستر و انتقال مواد قرضه را کاهش می‌دهد [۱۲].

نانوذرات سیلیکون دی‌اکسید، که با عنوان نانوذرات سیلیکا و یا نانوسیلیکا نیز شناخته می‌شود از دیگر مواد افزودنی به منظور بهبود و تثبیت خاک در حوزه نانوسیلیکا می‌باشد. بهمین در مطالعات خود اثرات افزودن این نانوذرات بر خاک سیمانی شده را بررسی نمود و به این نتیجه دست یافتند

نانوسیلیس، سرعت افزایش مقاومت در مقادیر کمتر از ۱ درصد بیشتر بوده، در حالی که میکروسیلیس 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. علاوه بر این، بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نشان داد که هر دو ماده نقش مهمی در کاهش تخلخل و ایجاد یکپارچگی ذرات داشتند. با این حال، الگوی پر کردن منافذ و ذرات محصور توسط این دو ماده متفاوت بود. این تفاوت به ویژه از نظر میزان جذب آب توسط نمونه تأثیرگذار بوده است [۵].

طبرسا و همکاران در سال ۲۰۱۸، به بررسی نمونه‌های مختلف خاک از منطقه شبکه سد بوستان گنبد و اینچه برون واقع در استان گلستان تحت تأثیر بهسازی با کمک نانورُس 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 تک محوری، مقاومت فشاری سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده و تحکیم مضاعف انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها حاکی از نقش بسیار مهم نانورُس بر خواص خمیری، مقاومتی و تغییر شکل پذیری خاک بوده است. مشاهدات نشان از افزایش شاخص خمیری، درصد رطوبت بهینه، مقاومت فشاری، تنش چسبندگی کل و مقاومت برشی و کاهش وزن مخصوص بیشینه، تنش اصطکاکی کل، رفتار پراکنده و فروریزی می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت نوع خاک می‌توان دریافت که در اثر افزودن نانورُس به خاک‌های بررسی شده پتانسیل رهمبندگی نمونه‌ها بطور بسیار محسوس کاهش می‌یابد [۶].

سوی و همکاران در ۲۰۱۸، مقاومت برشی نمونه خاک سیلتی را با افزودن فیبر کربن و نانوسیلیکا را توسط آزمایش برش مستقیم تحت سربارهای مختلف مورد پژوهش قرار دادند. نتایج نشان داد مقاومت برشی خاک تهیه شده توسط مواد مورد آزمایش، بطور قابل توجهی باعث بهبود مشخصات آن شده است. فیبر کربن بطور قابل توجهی باعث بهبود زاویه اصطکاک داخلی خاک و چسبندگی آن گردیده و از طرف دیگر نانوسیلیکا باعث پر شدن حفرات موجود در بین دانه‌های خاک شده و چسبندگی خاک را افزایش داده است. نتایج نشان داد با افزودن ۲ درصد وزنی فیبر کربن و ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا بطور قابل توجه و به میزان ۱۲۸/۳ درصد مقاومت خاک در مقایسه با خاک طبیعی افزایش پیدا کرده است. از دیگر نتایج، می‌توان نشان داد که استفاده از فیبر کربن و نانوسیلیکا می‌تواند یک روش مؤثر جهت بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های سیلتی به جای کاربرد سیمان

علاوه با توجه به مشکلات روش‌های سنتی مانند اجرای ستون‌های سنگی، تزریق تحت فشار سیمان و یا آهک، اجرای شمع و ریزشمع و غیره از جمله مشکلات زیست‌محیطی، لزوم مطالعه روش‌های نوین جهت بهسازی و مقاوم‌سازی خاک در این مناطق ضرورت می‌یابد.

در همین راستا استفاده از نانوذرات به دلیل حجم کم مواد افزودنی مورد نیاز در بهسازی خاک، بهسازی خاک با رطوبت طبیعی یا رطوبت بهینه آن، سهولت اجرا، سازگاری مناسب به جهت استحصال این نانوذرات از پروفیل خاک، سازگاری با محیط زیست و کاهش هزینه‌های عملیاتی اجرایی می‌تواند گزینه مناسبی به عنوان جایگزین روش‌های سنتی باشد. به همین منظور در این پژوهش تأثیر افزودن نانوذرات رُس و سیلیکا بر پارامترهای مقاومتی خاک‌های سیلتی-رُسی خالص (سیمانی نشده) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی بررسی و مقایسه گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خاک مورد مطالعه

خاک مورد مطالعه در این پژوهش از خاک‌های ریزدانه محدوده اطراف حرم مطهر رضوی که دارای ظرفیت باربری کم و نشست‌پذیری زیاد می‌باشند، انتخاب شده است. در همین راستا ابتدا خصوصیات مکانیکی و مقاومتی نمونه خاک خالص و سپس بهسازی شده با نانورُس و نانوسیلیکا مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور تعیین نوع خاک از نظر دانه‌بندی، آزمایش‌های الک و هیدرومتری بر روی خاک مورد مطالعه انجام و نوع خاک سیلتی-رُسی همراه با ماسه تعیین گردید (شکل ۱). در شکل ۲ نمایی کلی از خاک عبوری از الک شماره ۴ و همچنین موقعیت اخذ نمونه‌های آزمایشگاهی در شهر مشهد نشان داده شده است. به منظور تشخیص ساختار شیمیایی و نوع کانی‌های رُسی تشکیل‌دهنده خاک، آزمایش پراش پرتوی ایکس (XRD) با دقت بسیار بالا بر روی نمونه‌های خاک خالص انجام گردید (شکل ۳)، به علاوه نتایج حاصل از آزمایش XRD نمایان‌گر درصد بالای کانی‌های گروه سیلیس، دولومیت و کربنات کلسیم و کوارتز می‌باشد که فاز اصلی خاک را تشکیل می‌دهد. لازم به ذکر است جهت تعیین پارامترهای مقاومتی و مکانیکی خاک، تمامی مطالعات آزمایشگاهی بر اساس استاندارد ASTM انجام و نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- نانوذرات

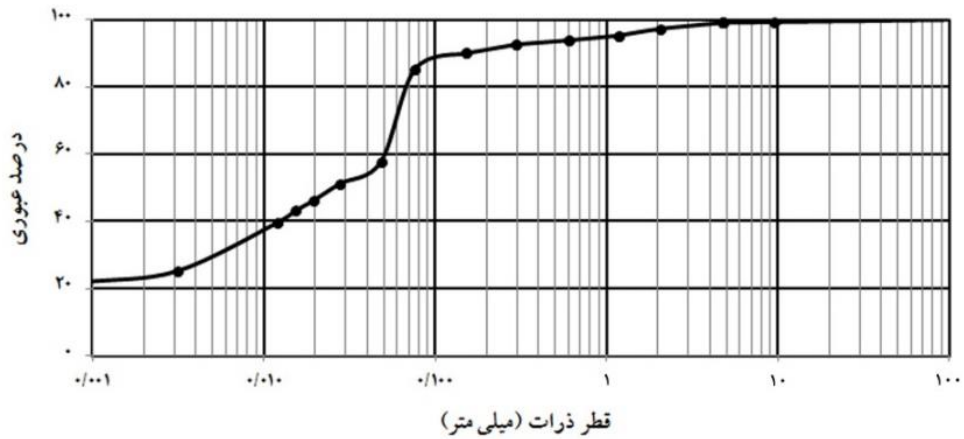
نانورُس مورد استفاده در این پژوهش از نوع مونت‌موریلونیت K_{۱۰} به صورت پودری و همچنین نانوسیلیکا به صورت پودری و از نوع S با خلوص

که افزودن ۰/۴ درصد نانوسیلیکا به خاک سیمانی شده، مقاومت فشاری را تا ۸۰ درصد افزایش می‌دهد [۱۳]. مطالعات آزمایشگاهی نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا بر خاک رُسی توسط کلهر و همکاران با انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد، حدود اتربرگ و مقاومت فشاری محصور نشده بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد با بهسازی خاک رس بوسیله نانوسیلیکا درصد رطوبت بهینه، حد روانی و حد خمیری افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک و شاخص خمیری کاهش می‌یابد. با افزودن مقدار این ماده تا ۲ درصد وزنی و زمان عمل‌آوری تا ۴۲ روز، مقاومت فشاری محصور نشده به میزان ۶۳ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزودن مقادیر بیش از این نسبت وزنی باعث رفتار شکننده در نمونه‌ها می‌گردد [۱۴].

چنگیزی و حداد اثر افزودن نانوسیلیکا را در نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد بر خصوصیات خاک‌های رُسی از جمله حدود اتربرگ، مقاومت برشی، مقاومت فشاری محصور نشده و وزن مخصوص خشک حداکثر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش مقادیر نانوسیلیکا باعث افزایش حدود اتربرگ، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مقاومت فشاری محصور نشده و حداکثر وزن مخصوص خاک و کاهش شاخص پلاستیسیته و میزان نشست پذیری خاک می‌شود [۱۵].

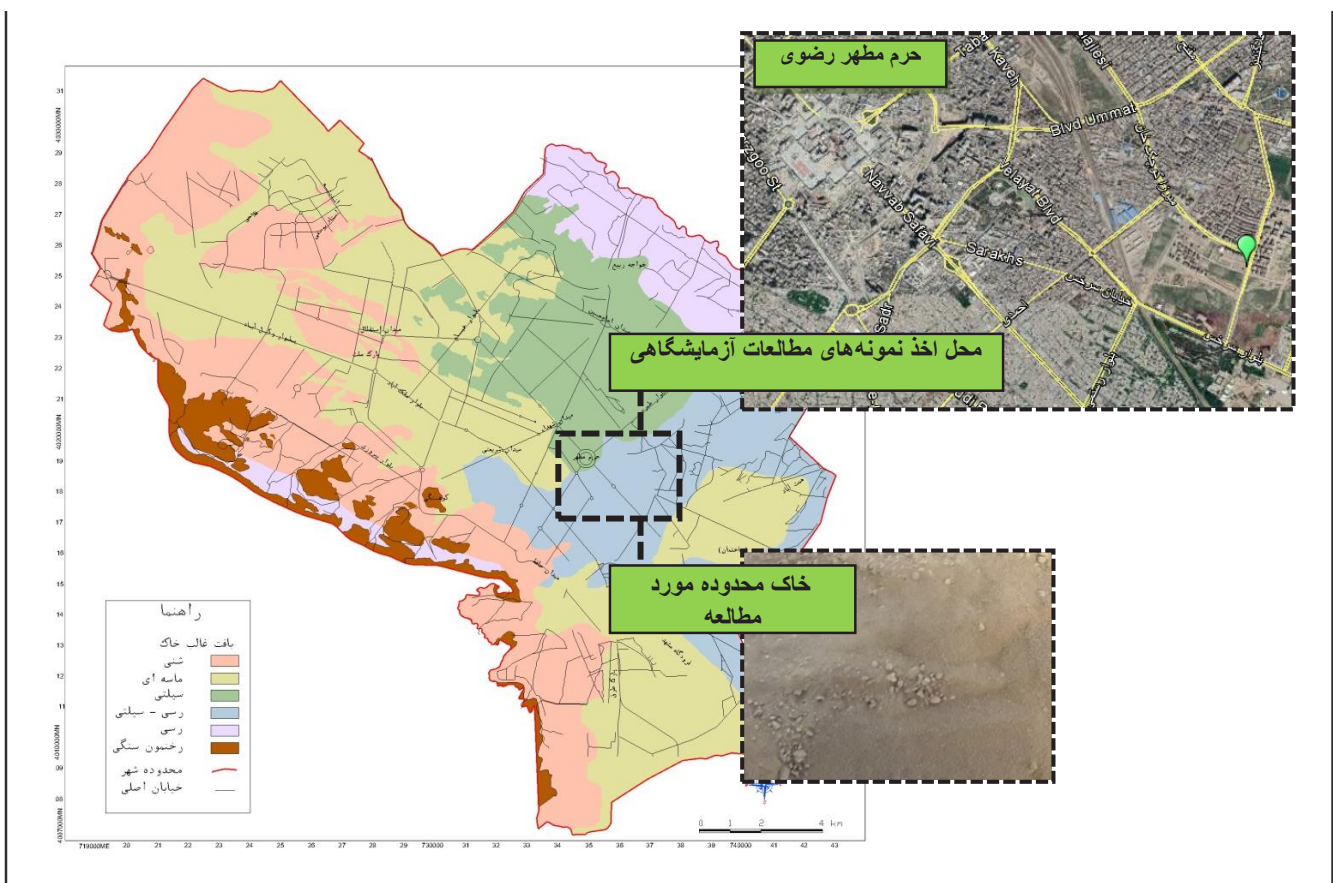
شهر مشهد به عنوان یکی از مهم‌ترین کلان‌شهرهای کشور بر روی نهشته‌های آبرفتی جوان واقع شده و نواحی وسیعی از آن به ویژه محدوده‌های مجاور حرم مطهر رضوی، بر روی رسوبات ریزدانه و سیلتی-رُسی بنا شده‌اند. همچنین رسوبات ریزدانه در قسمت‌هایی از بستر شهر با بافت غالب خاک درشت‌دانه، به صورت لندهای بین لایه‌ای مشاهده می‌شوند [۱۶].

حافظی مقدس و قزی نقشه پهنه‌بندی ظرفیت باربری مجاز پی را در شهر مشهد بر اساس اطلاعات ۲۰۰ گمانه و با توجه به نتایج آزمایش‌های برش مستقیم، سه محوری و نفوذ استاندارد تهیه نمودند. بر اساس این نقشه، در شهر مشهد به طرف شرق همراه با کاهش اندازه ذرات خاک از ظرفیت باربری آن کاسته شده؛ به طوری که برای پی سطحی با عرض و عمق ۱ متر بخش مرکزی و شرقی شهر در گروه خاک‌های با ظرفیت باربری کم و خیلی کم قرار دارد [۱۷]. در این نواحی به دلیل بروز نشست‌های سطحی متعدد در محیط‌های دارای بافت فرسوده، عدم تقویت خاک موجب وارد آمدن خسارات جدی به ساختمان‌های با پی ضعیف می‌گردد. همچنین به دلیل وجود حرم مطهر رضوی، ضرورت ساخت سازه‌های بلندمرتبه نظیر هتل‌ها و مجتمع‌های تجاری و خدماتی در این مناطق احساس می‌شود. به



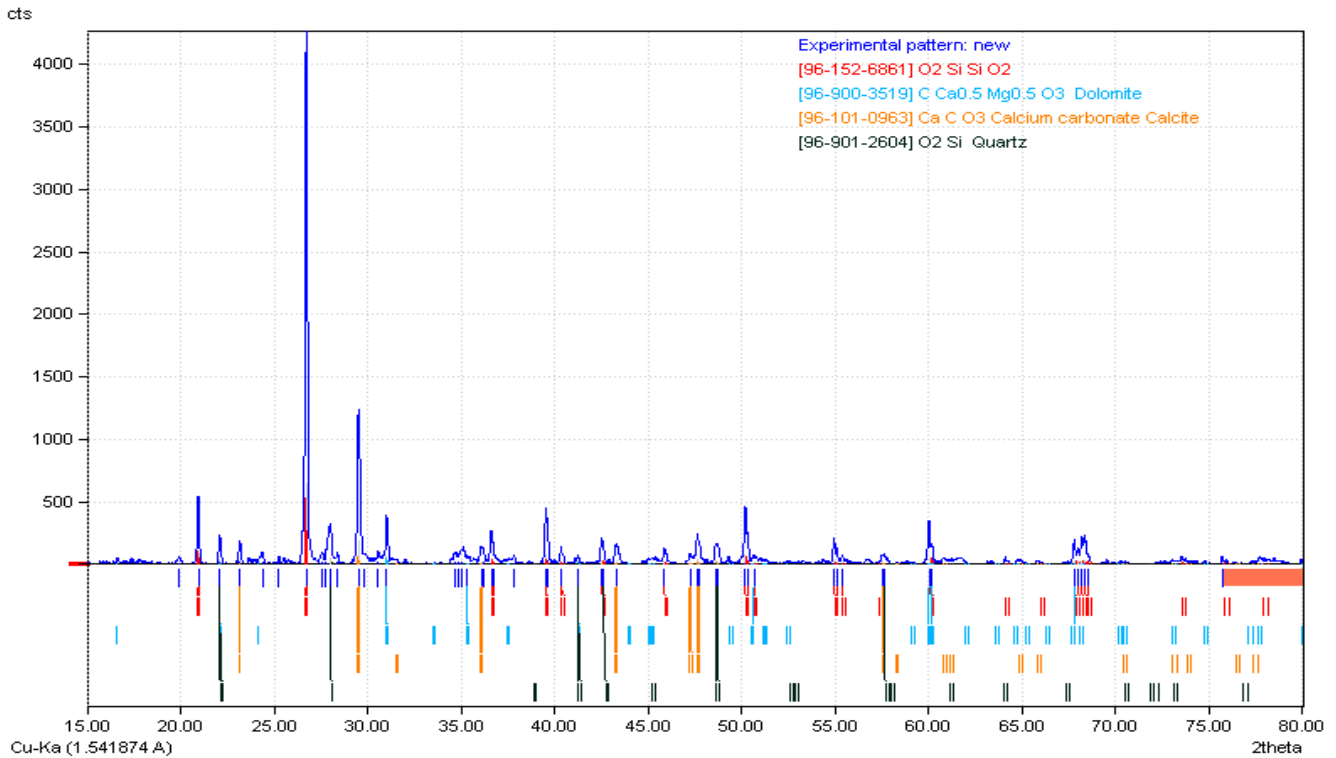
شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

Fig. 1. Grain size distribution curve of the studied soil



شکل ۲. محل اخذ نمونه های مطالعات آزمایشگاهی و خاک محدوده مورد مطالعه در مجاورت حرم مطهر رضوی در شهر مشهد

Fig. 2. The location was taken studied soil in the vicinity of Razavi Holy Shrine in Mashhad for laboratory experiments



شکل ۳. نتیجه آزمایش تفرق اشعه ایکس خاک مورد مطالعه

Fig. 3. Results of soil X-Ray diffraction test

جدول ۱. مشخصات مقاومتی و مکانیکی خاک مورد مطالعه.

Table 1. Strength parameters and mechanical properties of the studied soil

استاندارد	واحد	مقدار	خصوصیات
ASTM D 854-87	-	۲/۶۴	چگالی دانه‌های خاک
ASTM D 698-78	kN/m ³	۱۷/۳	وزن مخصوص خشک حداکثر (□)
ASTM D 698-78	%	۱۴	درصد رطوبت بهینه (□)
ASTM D 4318-87	%	۱۸	حد خمیری (PL)
ASTM D 4318-87	%	۲۲	حد روانی (LL)
ASTM D 4318-87	%	۴	شاخص خمیری (PI)
ASTM D 2166-87	kPa	۵۲	حداکثر مقاومت فشاری
ASTM D 3080-90	Degree	۲۵	زاویه اصطکاک داخلی (□) (Degree)
ASTM D 3080-90	kPa	۲۴/۵	چسبندگی (C)
ASTM D 422-87	%	۳	شن (%)
ASTM D 422-87	%	۱۲	ماسه (%)
ASTM D 421-58	%	۸۵	سیلت و رس (%)
USCS	-	CL-ML	نوع خاک

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانورُس [۱۸]

Table 2. Physical and chemical properties of Nanoclay

مشخصات فیزیکی	نوع کانی	چگالی (gr/cm ³)	pH	رطوبت (%)	رنگ	اندازه ذرات (nm)	فاصله ذرات (Å)	ضریب تبادل یونی (meg/100 gr)	ضریب هدایت الکتریکی (MV)	سطح ویژه (m ² /gr)
	مونتموریلونیت	۰/۱۰-۷/۵	۵/۳-۵/۲	۱-۲	زرد	۱-۲	۶۰	۴۸	۲۵-	۲۲۰-۲۷۰
مشخصات شیمیایی	عنصر درصد	LOI	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
		۱۵/۴۵	۵/۶۲	۰/۶۲	۱/۹۷	۰/۸۶	۵۰/۹۵	۱۹/۶	۳/۲۹	۰/۹۸

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوسیلیکا [۱۸]

Table 3. Physical and chemical properties of Nanosilica

مشخصات فیزیکی	نوع کانی	سطح ویژه (m ² /gr)	اندازه ذرات (nm)	چگالی (gr/cm ³)	چگالی واقعی (gr/cm ³)	رنگ
	S	۲۰۰	۱۱-۱۳	<۰/۱۰	۲/۴	سفید
مشخصات شیمیایی	عنصر درصد	Fe	Na	Ca	Ti	SiO ₂
		<۰/۰۸	<۰/۱۹	<۰/۲۷	<۰/۴۶	>۹۹

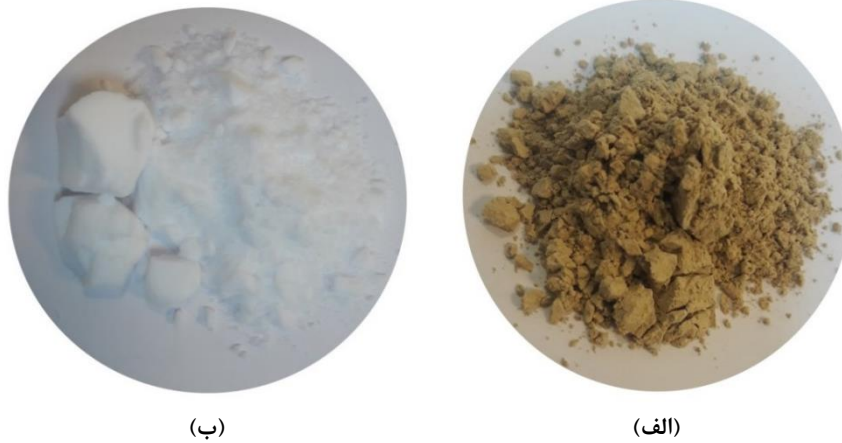
یکی از مهم‌ترین مسائل به منظور افزایش دقت انجام مطالعات آزمایشگاهی، نحوه ساخت نمونه‌ها و تعیین نسبت ترکیب خاک با افزودنی‌ها به منظور شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر عملیات اجرایی می‌باشد. در این پژوهش به منظور تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، خاک خالص و نانوذره مورد نظر در نسبت‌های وزنی معین بصورت خشک با یکدیگر ترکیب و سپس رطوبت بهینه لازم که از آزمایش تراکم بدست آمده است، با کمک اسپری مخصوصی با نازلی چند جهته به آن اضافه شد. لازم به ذکر است با توجه به کلئیدی بودن نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش، امکان اختلاط مستقیم آب و نانوذرات و سپس افزودن آن‌ها با استفاده از اسپری به خاک وجود ندارد. به علاوه، به دلیل تغییر خواص مکانیکی و فیزیکی خاک در صورت استفاده از همزن‌های برقی، در این پژوهش خاک و نانوذرات به صورت دستی با یکدیگر مخلوط شدند.

با توجه به تفاوت رفتار نمونه‌های خاک بازسازی شده در آزمایشگاه با

۹۹٪ می‌باشد. در جداول ۲ و ۳ مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانورُس و نانوسیلیکا مورد استفاده و در شکل ۴ نمایی کلی از آن‌ها آورده شده است.

۲-۳- مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی روشی برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک و پیش‌بینی رفتار آن در شرایط متفاوت می‌باشد. در این پژوهش تأثیر افزودن نانوذرات رُس و سیلیکا بر روی خواص مکانیکی خاک مورد مطالعه با استفاده از آزمایش‌های مختلف بررسی گردید. این آزمایش‌ها شامل آزمایش تراکم استاندارد، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم می‌باشد که بر روی نمونه‌های خالص (بدون بهسازی) و بهسازی شده با نانوذرات با نسبت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۲/۵ و ۵ از نانورُس و ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ از نانوسیلیکا و بر اساس استانداردهای ASTM انجام گردید (جدول ۴).



شکل ۴. نمایی کلی از نانوذرات مورد استفاده، الف) نانورُس ب) نانوسیلیکا

Fig. 4. An overview of the nanoparticles used a) Nanoclay, b) Nanosilica

جدول ۴. آزمایش های انجام شده بر روی نمونه های خاک خالص و بهسازی شده

Table 4. Performed experiments on pure and improved specimens

پراش پرتوی ایکس	میکروسکوپ الکترونی	حدود اثربرگ	برش مستقیم	مقاومت فشاری محصور نشده	تراکم استاندارد	نوع آزمایش	
						نسبت وزنی (درصد)	نانوذرات
✓	✓	✓	✓	✓	✓	۰	نانورُس
-	-	✓	✓	✓	-	۰/۱	
-	-	✓	✓	✓	-	۰/۵	
-	-	✓	✓	✓	-	۱	
-	✓	✓	✓	✓	-	۲/۵	
-	✓	✓	✓	✓	-	۵	
-	-	✓	✓	✓	-	۰/۱	نانوسیلیکا
-	✓	✓	✓	✓	-	۰/۲۵	
-	-	✓	✓	✓	-	۰/۵	
-	-	✓	✓	✓	-	۰/۷۵	
-	✓	✓	✓	✓	-	۱	

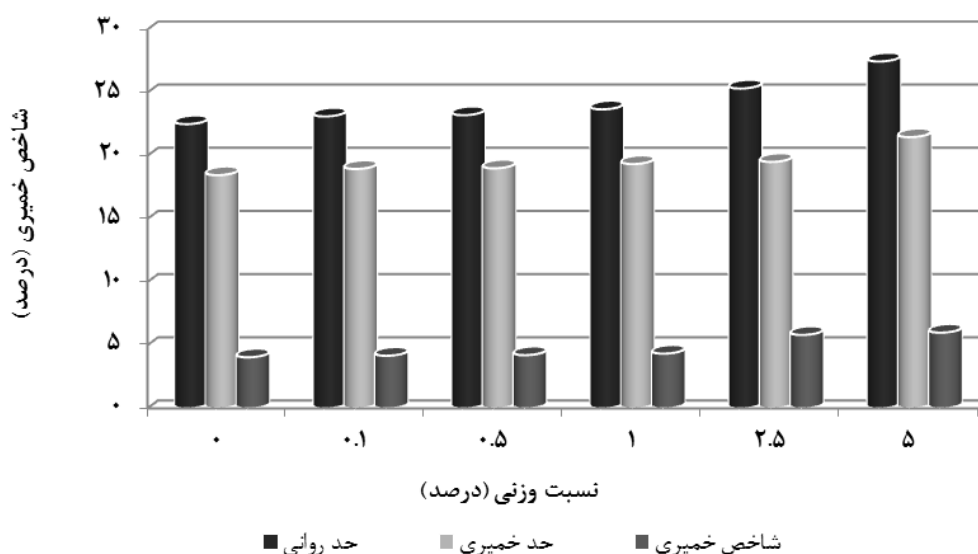
در مراجع، بر اساس حجم قالب، وزن مخصوص و رطوبت بهینه خاک، در چند لایه متراکم گردید تا نمونه خاک مشابه شرایط واقعی بازسازی گردد. بر اساس تحقیقات انجام شده، به منظور جلوگیری از کلوخه شدن و تجمع ذرات نانو و همچنین اطمینان از پخش همگن رطوبت در نمونه های آزمایشگاهی، بسته به نوع خاک بایستی چند ساعت نمونه ها درون محفظه ای بسته نگهداری شوند که حداقل زمان توقف در جدول ۵ آورده شده است

نمونه های طبیعی دست نخورده اخذ شده از محل بر اساس نتایج مطالعات معماریزاده و همکاران، در این پژوهش به منظور افزایش دقت ساخت نمونه های مطالعات آزمایشگاهی علاوه بر نمونه های بهسازی شده، نمونه خاک خالص مورد مطالعه نیز بازسازی و تحت شرایط یکسان با سایر نمونه ها مورد آزمایش قرار گرفت [۱۹].
نمونه ها با استفاده از قالب استاندارد و با توجه به روش توصیه شده

جدول ۵. روش آماده سازی خشک- زمان توقف [۲۰]

Table 5. Preparation method of dry Soil Specimens- Stopping time

رده بندی خاک بر اساس استاندارد ASTM D2487	حداقل زمان توقف (ساعت)
SP, SW, GP, GW	نیازی نیست
SM, GM	۳
SC, GC, OL, CL, ML	۱۸
PT, OH, CH, MH	۳۶



شکل ۵. مقایسه حدود اتربرگ در نمونه های بهسازی شده با نانورُس

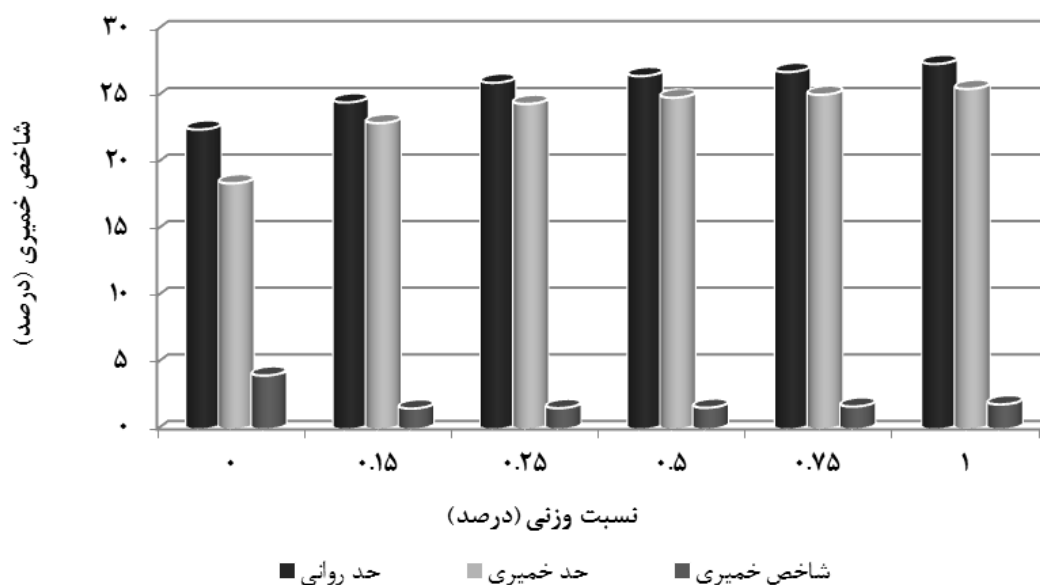
Fig. 5. Comparison of Atterberg Limits in improved specimens with Nanoclay

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر نانوذرات بر خواص پلاستیسیته خاک

به منظور بررسی تأثیر افزودن نانوذرات رُس و سیلیکا بر روی خواص پلاستیسیته خاک، آزمایش حدود اتربرگ بر اساس استاندارد ASTM 4318-87 بر روی نمونه های خاک قبل و بعد از بهسازی انجام گردید. نتایج این آزمایش ها بر روی خاک طبیعی و خاک بهسازی شده با نانورُس با نسبت های وزنی متفاوت در شکل ۵ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود افزایش میزان نانورُس از ۰ تا ۵ درصد وزنی خاک، سبب افزایش حد روانی و حد خمیری و همچنین شاخص پلاستیسیته خاک می گردد، که این امر ناشی از ابعاد بسیار کوچک و سطح ویژه بالای نانورُس می باشد، به طوری که با افزودن این ماده به خاک، سطح تماس ذرات خاک بیشتر

[۲۰] و با توجه به خاک مورد مطالعه در این محدوده نمونه های آماده سازی شده در محفظه هایی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت تحت عمل آوری قرار گرفتند و به منظور افزایش دقت مطالعات آزمایشگاهی، برای هر نسبت وزنی از میان چندین نمونه آزمایشگاهی، از نتایج دو نمونه که دارای رفتار یکسانی بودند، استفاده گردید، که نتایج آزمایش مجدد نشان دهنده صحت مطالعات آزمایشگاهی می باشد. لازم به ذکر است در مواردی که دو نمونه مشابه نتایج متفاوتی داشتند، تکرارپذیری تا رسیدن به صحت مطالعات آزمایشگاهی انجام گردید. همچنین جهت اطمینان از نحوه قرارگیری نانوذرات در خاک، مطالعات آزمایشگاهی میکروسکوپ الکترونی بر روی نمونه های خاک خالص و بهسازی شده با نسبت های بهینه انجام گردید.



شکل ۶. مقایسه حدود اتربرگ در نمونه های بهسازی شده با نانوسیلیکا

Fig. 6. Comparison of Atterberg Limits in improved specimens with Nanosilica

نانوسیلیکا نسبت به نانورُس و در نتیجه افزایش بیشتر حدود روانی و خمیری خاک در نسبت های وزنی مشابه می باشد.

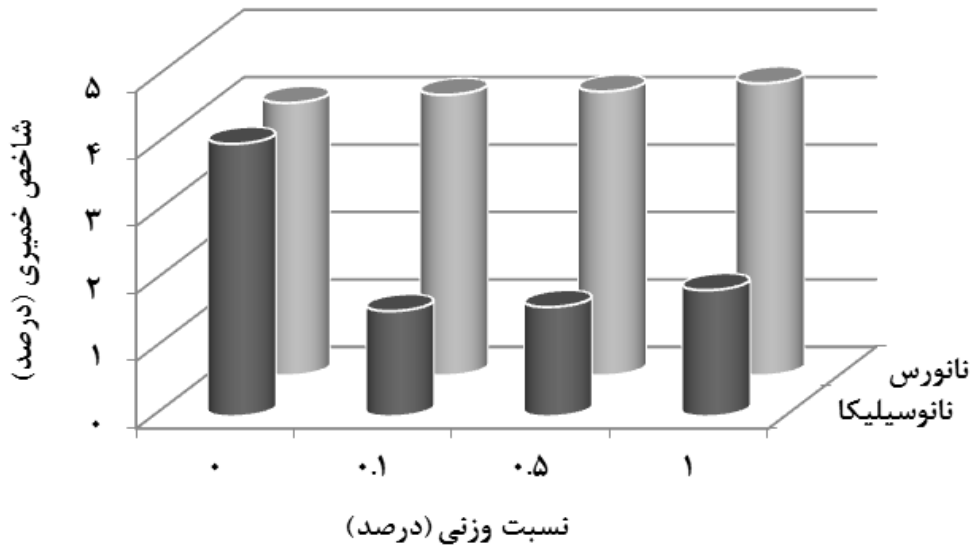
۳-۲- تأثیر نانوذرات بر مقاومت برشی خاک

یکی از مهم ترین پارامترهای مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک در بررسی پایداری سیستم سازه نگهبان، ارزیابی مقادیر نشست خاک، طراحی فونداسیون، دیوارهای حائل، خاکریزها و غیره پارامترهای مقاومت برشی خاک (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) است. لذا در این راستا آزمایش مقاومت برش مستقیم بر روی نمونه های خاک بهسازی شده با نانورُس و نانوسیلیکا به صورت کوچک مقیاس درون قالب مربعی با ابعاد $6 \times 6 \times 2$ سانتی متری تحت سربارهای ۱، $1/5$ و ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، در حالت تحکیم نیافته زهکشی نشده با سرعت $0/5$ میلی متر بر دقیقه مطابق با استاندارد ASTM D 3080-90 انجام شد. تغییرات پارامترهای مقاومت برشی خاک در نسبت های وزنی متفاوت از نانورُس و سیلیکا در شکل های ۸ تا ۹ و تغییرات میزان زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در نسبت های وزنی مشابه از نانوذرات رُس و سیلیکا در شکل های ۱۰ تا ۱۱ ارائه و مقایسه شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد با توجه به تأثیر نانوذرات بر پارامترهای

شده و با نزدیک شدن به شرایط فولکوله، جذب آب توسط ذرات خاک و در نتیجه حدود اتربرگ خاک افزایش می یابد، که این نتایج با مطالعات بهاری و همکاران، بازیار و همکاران و طبرسا و همکاران نیز همخوانی و مطابقت دارد [۶، ۱۲ و ۲۱].

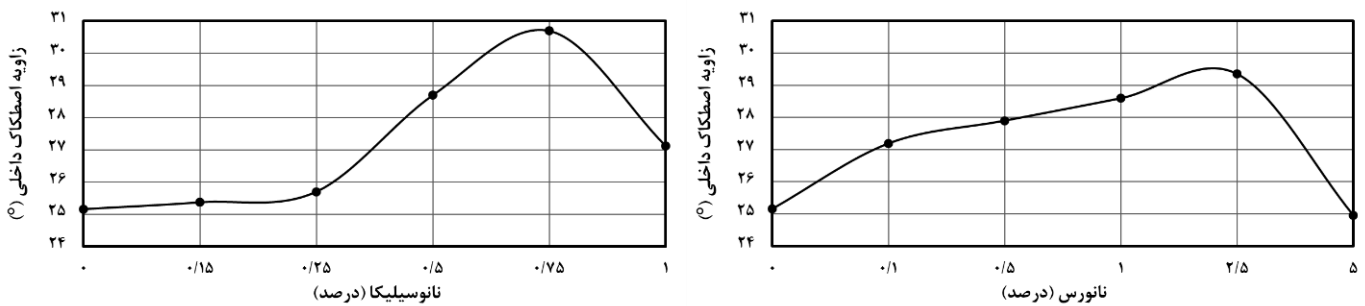
از سوی دیگر نتایج حاصل از آزمایش حدود اتربرگ بر روی نمونه های خاک بهسازی شده با نانوسیلیکا بیانگر افزایش حد روانی و حد خمیری خاک با افزایش درصد نانوسیلیکا و کاهش شاخص خمیری خاک می گردد (شکل ۶). شایان توجه می باشد مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی بر روی خاک محدوده مورد مطالعه با مطالعات بهمنی و همکاران و چنگیزی و حداد از همخوانی و مطابقت مناسبی برخوردار می باشد [۱۳ و ۲۲].

یکی از پارامترهای مهم در بررسی رفتار خاک های ریزدانه، میزان تورم پذیری آن ها می باشد، که در این راستا در این پژوهش، درجه تورم پذیری نمونه های خاک قبل و بعد از بهسازی با توجه به مقادیر حد روانی و شاخص خمیری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد خاک مورد مطالعه در این پژوهش دارای درجه تورم پذیری کم بوده و بهسازی این خاک با افزودن نانوذرات رُس و سیلیکا نیز تأثیری بر افزایش تورم آن ندارند. لازم به ذکر است نتایج مطالعات آزمایشگاهی بیان گر قدرت جذب آب بیشتر



شکل ۷. مقایسه شاخص خمیری خاک در نمونه‌های بهسازی شده با نانورس و نانوسیلیکا در نسبت‌های وزنی مشابه

Fig. 7. Comparison of soil Plasticity Index in improved samples with nanoclay and Nanosilica in the same weight ratios



شکل ۸. تأثیر نسبت‌های وزنی متفاوت نانورس و نانوسیلیکا بر زاویه اصطکاک داخلی خاک

Fig. 8. The effect of different weight ratios of Nanoclay and Nanosilica on soil internal friction angle

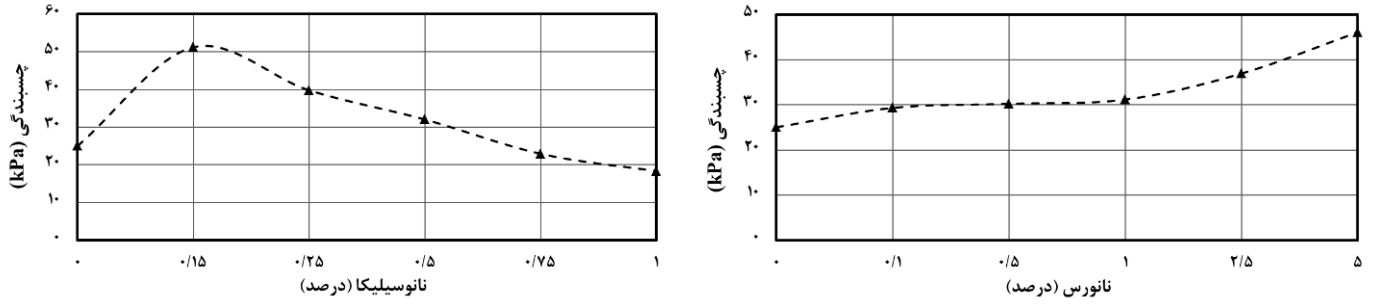
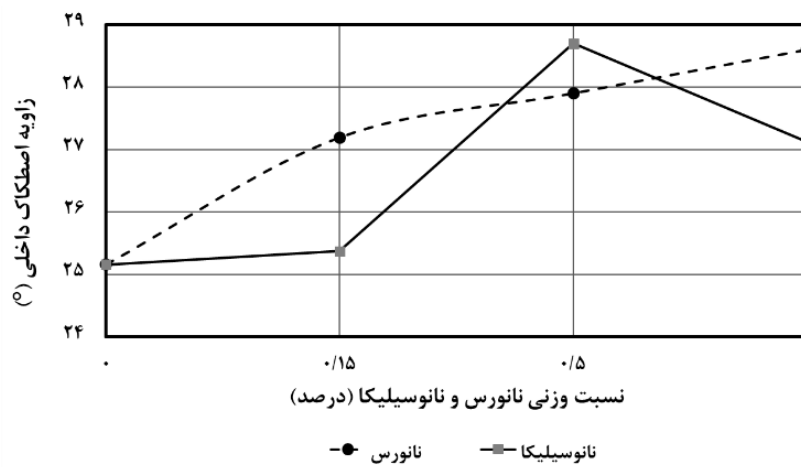


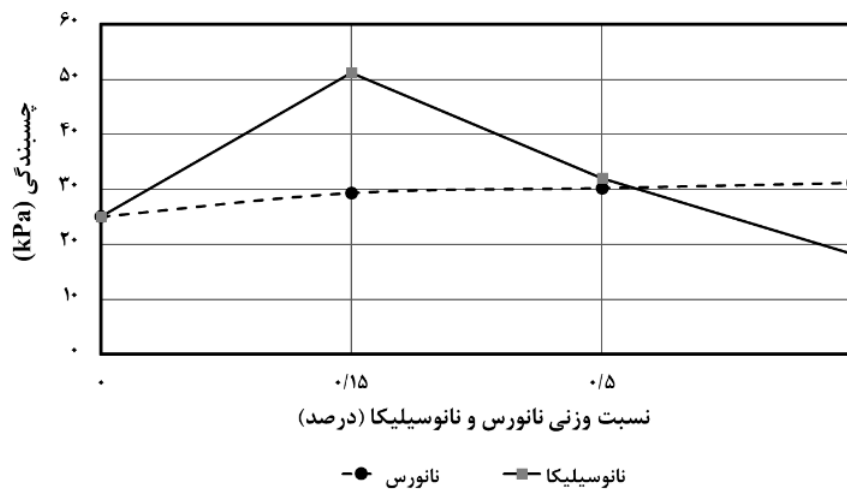
Fig. 9. The effect of different weight ratios of Nanoclay and Nanosilica on soil cohesion

شکل ۹. تأثیر نسبت‌های وزنی متفاوت نانورس و نانوسیلیکا بر چسبندگی خاک



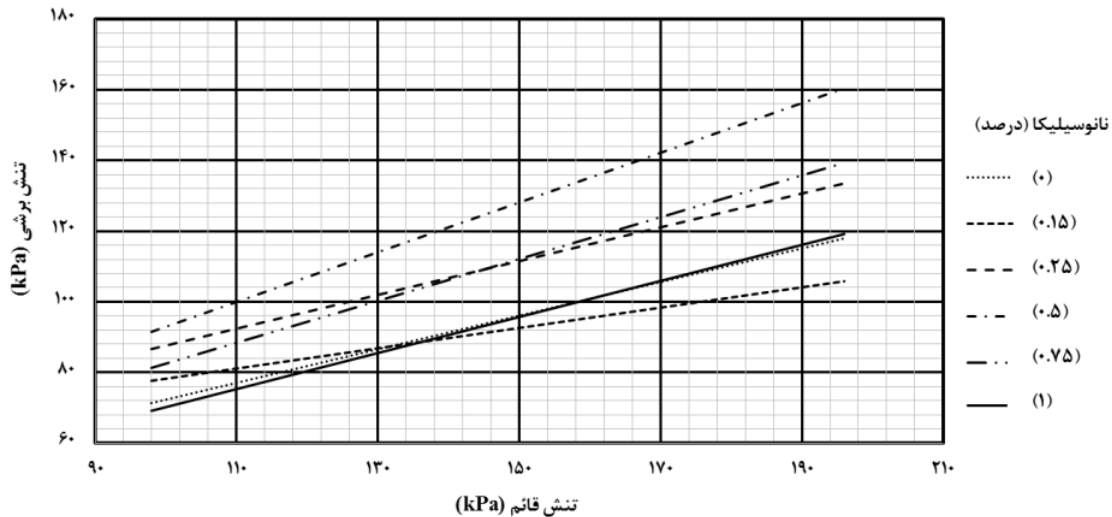
شکل ۱۰. مقایسه زاویه اصطکاک داخلی خاک در نمونه های بهسازی شده با نانورس و نانوسیلیکا در نسبت‌های وزنی مشابه

Fig. 10. Comparison of soil internal friction angle in improved specimens with Nanoclay and Nanosilica in the same weight ratios



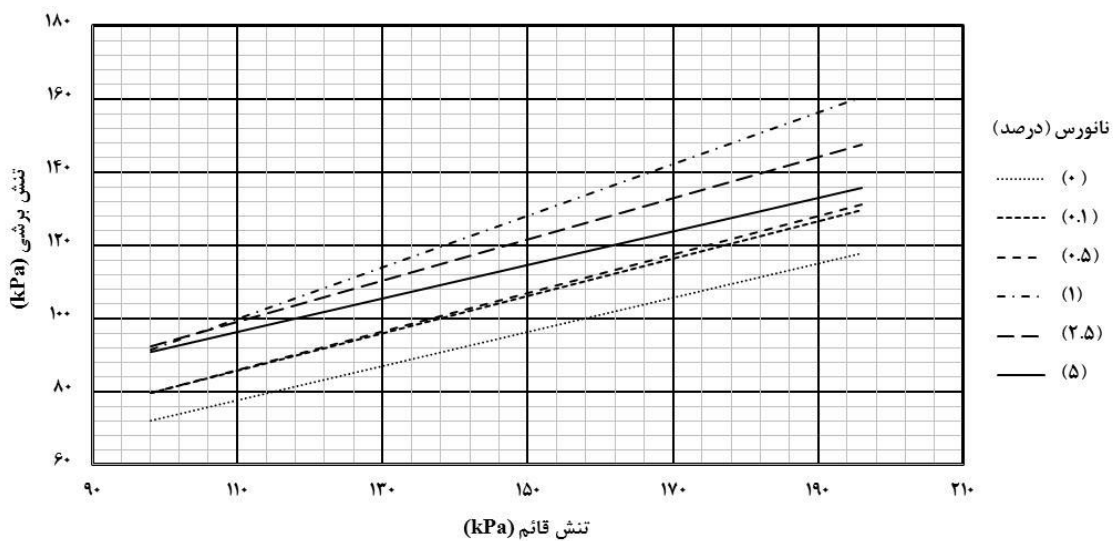
شکل ۱۱. مقایسه چسبندگی خاک در نمونه های بهسازی شده با نانورس و نانوسیلیکا در نسبت‌های وزنی مشابه

Fig. 11. Comparison of soil cohesion in improved specimens with Nanoclay and Nanosilica



شکل ۱۲. تغییرات تنش برشی-تنش قائم در نمونه های بهسازی شده با نانوسیلیکا

Fig. 12. Changes of shear stress-vertical stress in improved specimens with Nanosillica

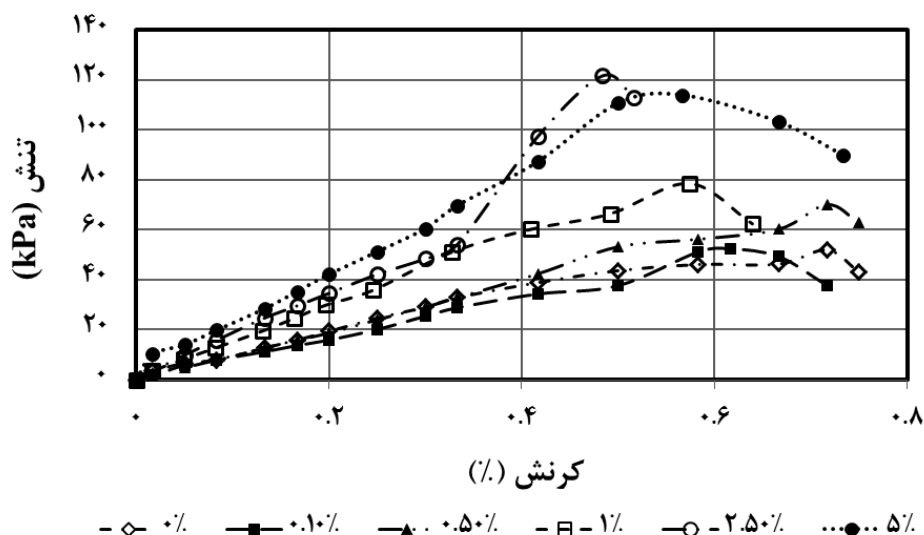


شکل ۱۳. تغییرات تنش برشی-تنش قائم در نمونه های بهسازی شده با نانورس

Fig. 13. Changes of shear stress-vertical stress in improved specimens with Nanoclay

نانوذرات در نمونه های خاک مورد مطالعه در این پژوهش ارائه شده است. بررسی نتایج بیانگر تأثیر افزایش نانوذرات بر پارامترهای مقاومت برشی خاک می باشد؛ به گونه ای که زاویه اصطکاک داخلی خاک در نمونه های بهسازی شده با نانورس تا ۲/۵ درصد وزنی و نمونه های بهسازی شده با نانوسیلیکا تا ۰/۷۵ درصد نسبت به خاک خالص به ترتیب ۱۶ و ۲۲ درصد

مقاومت برشی خاک، میزان مقاومت برشی خاک در نمونه های بهسازی شده با نانورس و نانوسیلیکا با افزایش قابل توجهی همراه بوده که این افزایش ناشی از افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذرات و دانه های خاک و در نتیجه افزایش قفل و بست و اتصال بین نانوذرات می باشد. همچنین در شکل های ۱۲ و ۱۳ تغییرات تنش برشی در برابر تنش قائم به ازای افزایش



شکل ۱۴. تأثیر مقادیر مختلف نانورس بر مقاومت فشاری محصور نشده

Fig. 14. The effect of different amounts of Nanoclay on unconfined compressive strength

نمونه‌های بهسازی شده با نسبت‌های وزنی بالاتر این نانوذره را می‌توان به عنوان عاملی مؤثر در کاهش میزان چسبندگی خاک عنوان نمود (شکل ۹).

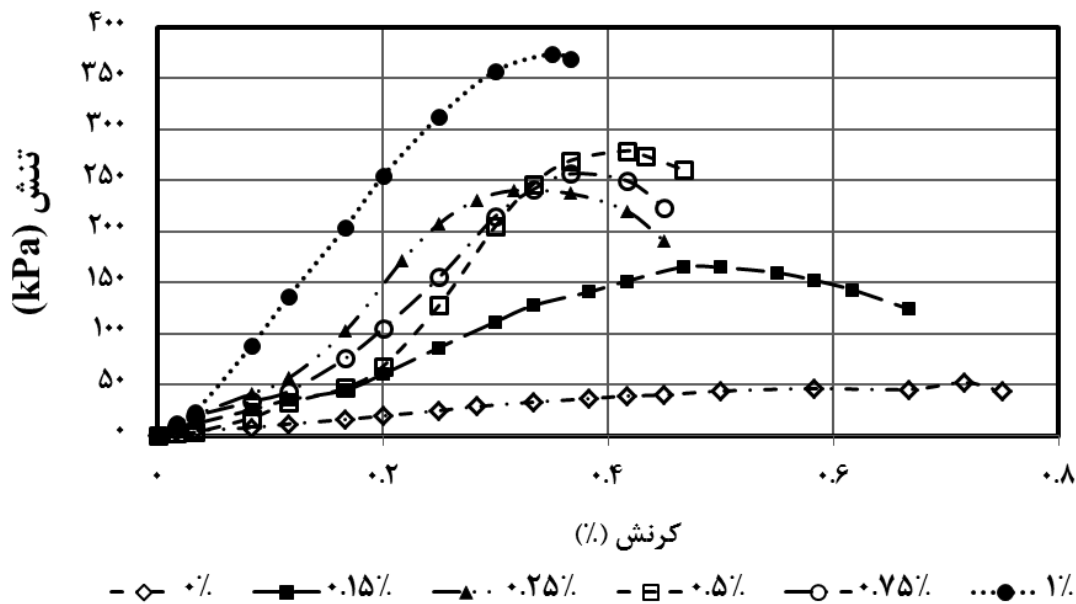
۳-۳- بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

جهت تعیین مقاومت فشاری و ظرفیت باربری خاک بهسازی شده با نانوذرات، ساخت نمونه‌های مطالعات آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D 2166-87 انجام گردید. در این آزمایش بارگذاری با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام و نمونه‌ها تحت افزایش بارگذاری گسیخته شدند و به منظور افزایش دقت در نتایج آزمایش، برای هر نسبت وزنی دو نمونه مشابه تهیه و آزمایش‌ها تکرار گردید که نتایج آزمون مجدد نشان‌دهنده صحت آزمایش‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است در مواردی که دو نمونه مشابه نتایج متفاوتی داشتند، تکرارپذیری تا رسیدن به صحت مطالعات آزمایشگاهی انجام گردید، با توجه به کاهش تخلخل، افزایش پیوستگی بین ذرات خاک به دلیل نفوذ نانوذرات در آن و افزایش خواص خمیری خاک در نمونه‌های بهسازی شده، مقاومت فشاری خاک افزایش و کرنش در لحظه گسیختگی خاک کاهش می‌یابد.

رفتار تنش-کرنش نمونه‌های خاک بهسازی شده با درصدهای متفاوت نانورس تحت آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، در شکل ۱۴ آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می‌گردد مقدار بهینه نانورس در

افزایش می‌یابد و افزایش بیشتر نانوذرات مذکور در خاک مورد مطالعه با تأثیر معکوس بر زاویه اصطکاک داخلی خاک همراه می‌باشد (شکل ۸)، که این امر ناشی از افزایش سطح مرزدانه‌ها و درگیری بیشتر دانه‌های خاک با یکدیگر در اثر افزودن نانوذرات به خاک می‌باشد. با این حال با افزایش مقدار نانوذرات و کلوخه شدن این مواد، به دلیل گسترش مرزدانه‌ها از مقدار بهینه، سطح تماس و درگیری سنگدانه‌ها و در نتیجه زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد.

از دیگر پارامترهای مقاومت برشی خاک میزان چسبندگی آن می‌باشد، که مقایسه نتایج آزمایش برش مستقیم خاک خالص با خاک بهسازی شده با نانوذرات نشان می‌دهد در نمونه‌های بهسازی شده با نانورس، میزان چسبندگی در تمام نسبت‌های وزنی روند صعودی داشته که بیشترین آن افزایش ۸۴ درصدی چسبندگی خاک بهسازی شده با ۵ درصد نانورس نسبت به خاک خالص است. درحالی که پارامتر چسبندگی در نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا ابتدا به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزودن ۰/۱۵ درصد نانوسیلیکا، میزان چسبندگی ۱۰۸ درصد افزایش داشته و پس از آن با افزایش نانوسیلیکا این پارامتر به طور تدریجی کاهش می‌یابد و حتی در نمونه بهسازی شده با ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی نسبت به خاک خالص نیز کاهش می‌یابد. در محدوده این پژوهش قدرت بالای جذب آب ذرات نانوسیلیکا و در نتیجه کاهش مقدار آب مورد نیاز ذرات خاک در



شکل ۱۵. تأثیر مقادیر مختلف نانوسیلیکا بر مقاومت فشاری محصور نشده

Fig. 15. The effect of different amounts of Nanosilica on unconfined compressive strength

از اعمال بار، تأثیر نانوذرات بر روی مقادیر نشست خاک ارزیابی گردید (شکل‌های ۱۷ و ۱۸). همان‌گونه که نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد، در تمام نمونه‌های بهسازی شده، با افزایش مقادیر نانوذرات میزان نشست نمونه کاهش یافته و کم‌ترین میزان نشست در نمونه بهسازی شده با ۱ درصد نانوسیلیکا مشاهده می‌شود که نسبت به خاک خالص با ۸۶ درصد کاهش نشست همراه بوده است. شایان توجه می‌باشد با توجه به عدم وجود فشارهای همه‌جانبه در مطالعات آزمایشگاهی، تمامی نتایج محافظه‌کارانه و در راستای اطمینان می‌باشد.

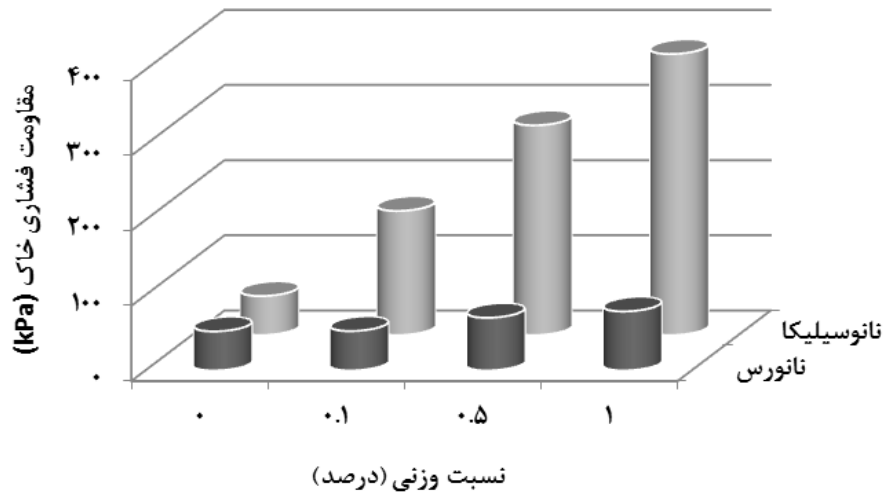
۳-۴- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی

جهت بررسی توزیع مناسب نانوذرات در خاک مورد مطالعه در این پژوهش، خاک در سه حالت خالص و بهسازی شده با نانورُس و بهسازی شده با نانوسیلیکا با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تحت بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۹-الف تصویر مربوط به میکروسکوپ الکترونیکی عبوری (TEM) ذرات نانوسیلیکا به شکل خوشه‌ای مشاهده می‌شوند و در شکل ۱۹-ب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مربوط به پراکنش ذرات نانوسیلیکا در خاک نمایش داده شده است.

خاک سیلتی-رُسی مورد مطالعه ۲/۵ درصد وزنی است؛ به طوری که در این نسبت وزنی مقاومت فشاری خاک تا ۱۳۴ درصد افزایش و مقادیر کرنش تا ۳۳ درصد کاهش می‌یابد و افزودن مقادیر بیش از نسبت وزنی بهینه به دلیل عدم نحوه پراکنش مناسب ذرات نانورُس موجب کاهش مقاومت فشاری محصور نشده خاک می‌شود. شایان توجه می‌باشد این امر ناشی از گسترش مرزدانه‌ها و سرعت در شکست نمونه در مقادیر بیش از حد نانوذرات است که با نتایج تحقیقات پیشین نظیر ماجد و همکاران (۲۰۱۴) و طبرسا و همکاران (۲۰۱۸) نیز همخوانی و مطابقت دارد [۶ و ۲۳].

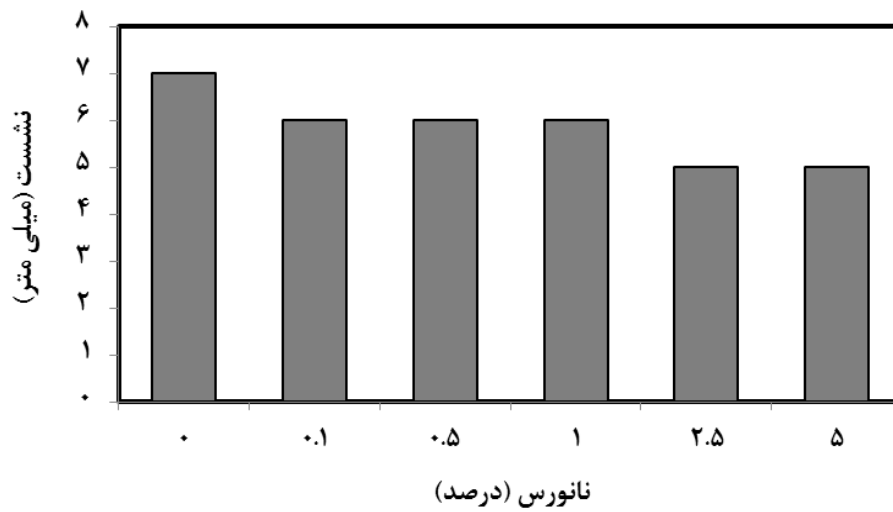
نتایج آزمون مقاومت فشاری محصور نشده نشان می‌دهد در نمونه‌های خاک بهسازی شده با نانوسیلیکا مقاومت نسبت به خاک خالص به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است؛ به طوری که با افزودن نانوسیلیکا تا ۱ درصد وزنی، مقاومت فشاری نمونه‌ها با ۶۲۰ درصد افزایش و مقادیر کرنش با ۵۱ درصد کاهش همراه بوده است (شکل ۱۵)، که این نتایج با مطالعات چنگیزی و حداد (۲۰۱۷) نیز همخوانی و مطابقت دارد [۱۵].

به دلیل اهمیت نشست‌های نامتقارن در دوران بهره‌برداری، با توجه به نتایج آزمون مقاومت فشاری محصور نشده و تغییر ارتفاع نمونه‌ها پس



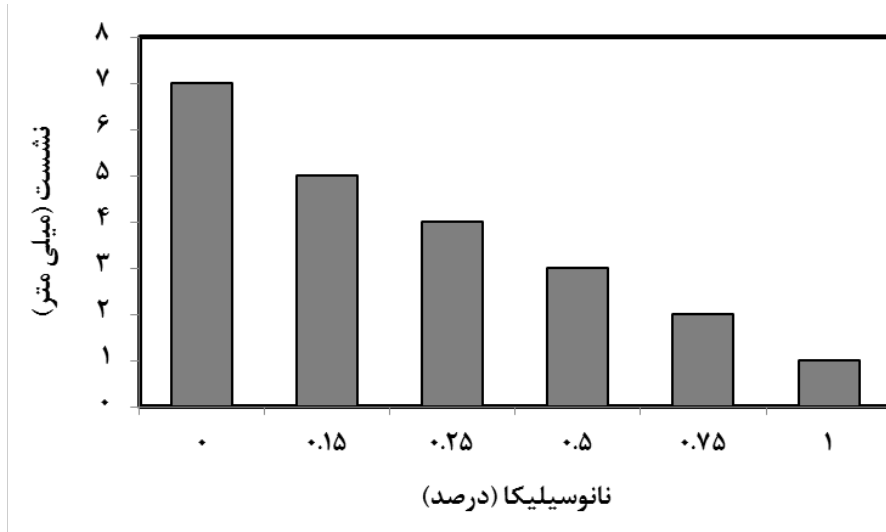
شکل ۱۶. مقایسه مقاومت فشاری خاک در نمونه های بهسازی شده با نانورس و نانوسیلیکا با نسبتهای مشابه

Fig. 16. Comparison of soil compressive strength in improved specimens with Nanoclay and Nanosilica in the same ratios



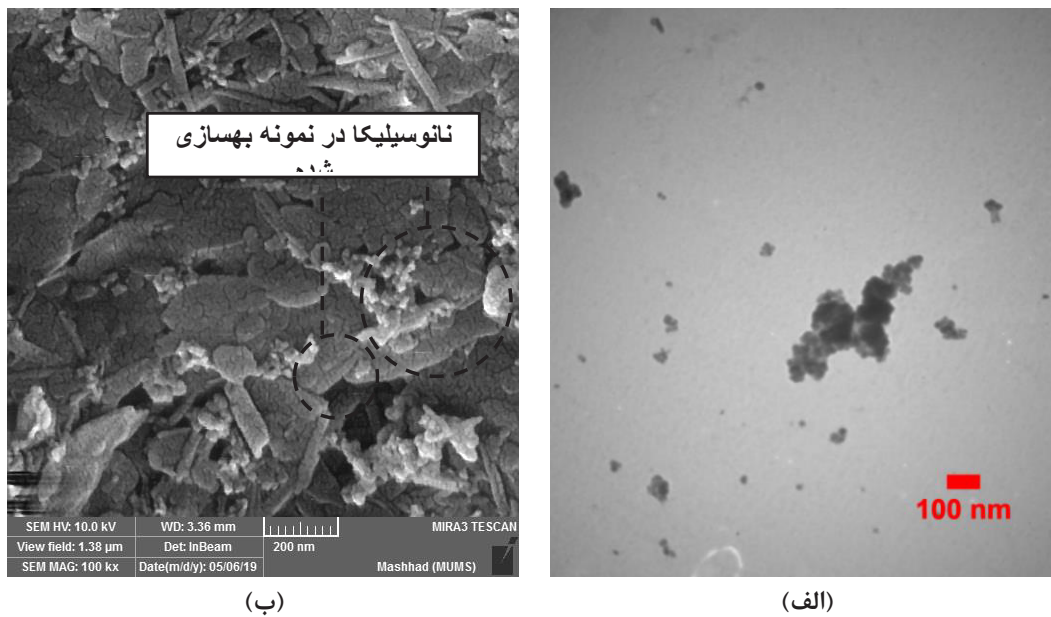
شکل ۱۷. تأثیر مقادیر مختلف نانورس بر نشست خاک بهسازی شده با نانورس

Fig. 17. Changes of settlement in improved specimens with different amounts of Nanoclay



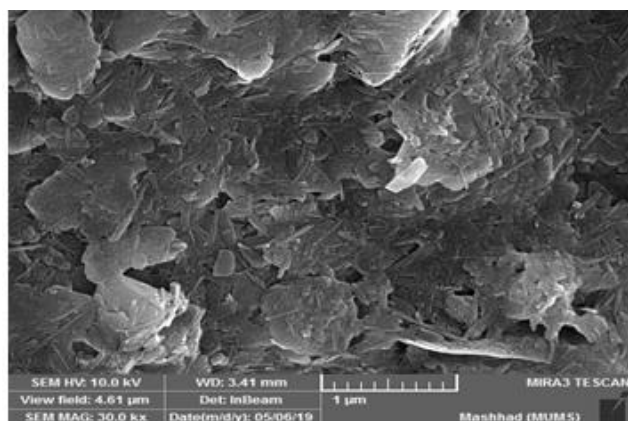
شکل ۱۸. تأثیر مقادیر مختلف نانوسیلیکا بر نشست خاک بهسازی شده با نانوسیلیکا

Fig. 18. Changes of settlement in improved specimens with different amounts of Nanosillica

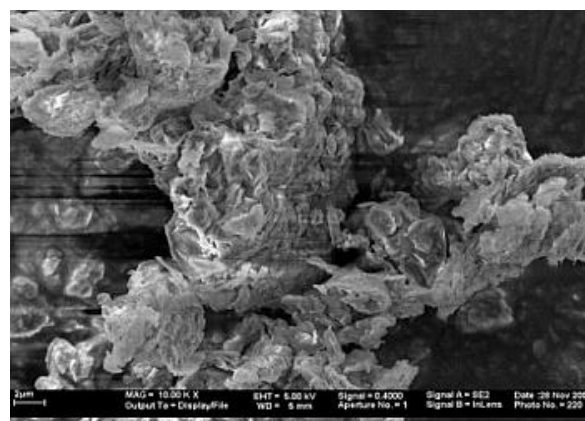


شکل ۱۹. الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نانوسیلیکا، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه خاک بهسازی شده با نانوسیلیکا

Fig. 19. a) Transmission electron microscopy (TEM) image of Nanosillica, b) Scanning electron microscopy (SEM) image of improved specimens with Nanosillica



(ب)



(الف)

شکل ۲۰. الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نانورُس، ب) تصویر SEM نمونه خاک بهسازی شده با نانورُس

Fig. 20. a) Scanning electron microscopy (SEM) image of Nanoclay b) SEM image of improved specimens with Nanoclay

گرفته است.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد در اثر وجود نانوذرات در میان ذرات خاک به دلیل افزایش سطح ویژه، میزان جذب آب و در نتیجه حدود روانی و خمیری خاک افزایش می‌یابد، که این تغییرات به ویژه در نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا به طور قابل توجهی مشاهده می‌شود. به علاوه در راستای این پژوهش، بهسازی خاک با استفاده از نانوذرات تأثیری بر روی شاخص تورم خاک ندارد. از طرفی دیگر بهسازی خاک با نانوذرات همراه با افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک مورد مطالعه می‌باشد، به گونه‌ای که افزودن ۲/۵ درصد نانورُس، زاویه اصطکاک داخلی خاک را تا ۱۶ درصد و همچنین افزودن ۵ درصد نانورُس میزان چسبندگی خاک را تا ۸۴ درصد افزایش داده است.

شایان توجه می‌باشد بیشترین افزایش مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا به ترتیب در نمونه‌های بهسازی شده با ۰/۷۵ درصد و ۰/۱۵ درصد مشاهده می‌شود که زاویه اصطکاک داخلی خاک را ۲۲ درصد و میزان چسبندگی را ۱۰۸ درصد افزایش داده است. همچنین مقایسه نتایج آزمایش مقاومت برشی خاک مورد مطالعه نشان می‌دهد پارامترهای مقاومت برشی در نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا با افزایش و کاهش ناگهانی همراه است؛ در حالی که میزان تغییرات در نمونه‌های بهسازی شده با نانورُس به صورت تدریجی است، که

در شکل‌های ۲۰-الف و ۲۰-ب نیز تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی نانورُس و پراکنش این ذرات در خاک مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است به دلیل رُسی بودن نوع خاک، مشاهده نانوذرات رُس درون خاک چندان آسان نمی‌باشد، همچنین با توجه به ابعاد بسیار کوچک نانورُس (۱ تا ۲ نانومتر) به راحتی درون عکس‌ها قابل مشاهده و تفکیک نمی‌باشند. با این حال نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومتی خاک پس از افزودن نانورُس و نانوسیلیکا به خاک، حاکی از حضور این ذرات درون خاک می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی نمونه‌های بهسازی شده با نانوذرات، این ذرات به طور کامل در بین خلل و فرج موجود در خاک قرار گرفته و با توجه به سطح ویژه بالای نانورُس، بر روی سطح ذرات و دانه‌های خاک استقرار یافته است و با افزایش واکنش بین دانه‌های خاک همراه گردیده است. لازم به ذکر است حضور نانوذرات و تأثیر آنها در فرآیند بهسازی خاک در نتایج آزمایش‌های مقاومتی خاک نیز مشاهده گردید.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نتایج تأثیر افزودن نانورُس در نسبت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۲/۵ و ۵ و همچنین نانوسیلیکا در نسبت‌های وزنی ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ بر بهبود پارامترهای مکانیکی و مقاومتی خاک‌های سیلتی-رُسی نواحی محدوده اطراف حرم مطهر رضوی مورد بررسی و مقایسه قرار

Nanoclay Particles for Stabilization of Dispersive Clayey Soils,” *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 36, no. 1, pp. 327–335, 2018

- [9] M. Shahidi, F. Farrokhi, and F. Asemi, “Changes in Physical and Mechanical Properties of Gas Oil–Contaminated Clayey Sand after Addition of Clay Nanoparticles,” *J. Environ. Eng.*, vol. 145, no. 4, p. 4019004, 2019.
- [10] N. Kananizadeh and A. Khoshniat, “Behavior of nanoclay as an additive in order to reduce Kahrizak landfill clay permeability,” in *Proceeding of 2nd International Conference on Environmental Science and Technology*, 2011, pp. 26–28
- [11] H. Ghazi, M. H. Baziar, and S. M. Mirkazemi, “Assess of the improvement of the behavior of soil strength in the presence of nanoscale additive,” *Assas J. Sci. Technol.*, pp. 45–50, 2011.
- [12] M. Bahari, M. Nikookar, M. Arabani, A. K. Haghi, and H. Khodabandeh, “Stabilization of silt by nanoclay,” in *Proc. of 7th National Congress on Civil Engineering*, 2013, pp. 7–8
- [13] S. H. Bahmani, B. B. K. Huat, A. Asadi, and N. Farzadnia, “Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 350–359, 2014
- [14] A. Kalhor, M. Ghazavi, M. Roustaei, and S. M. Mirhosseini, “Influence of nano-SiO₂ on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2019
- [15] F. Changizi and A. Haddad, “Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber,” *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 367–378, 2015
- [16] E. Yusefi, M. Ghafuri, G. Lashkaripour, and S. L. Talebian, “Investigation of clay minerals in soil of Mashhad City according to its Atterberg limits,” in *05th Iranian Conference of Engineering Geology*, 2007
- [17] N. Hafezi Moghaddas and A. Ghazi, “Geotechnical Zonation and evaluation of ultimate bearing capacity of

این تغییرات میتواند به دلیل نزدیکی خواص مکانیکی نانورُس به خاک مورد مطالعه و جذب آب بیشتر در نمونه‌های بهسازی شده با نانوسیلیکا باشد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان میدهد برای نسبت یکسان افزودنی، در خاک بهسازی شده با ۱ درصد نانوسیلیکا مقاومت فشاری با ۶۲۰ درصد افزایش و نشست با ۸۶ درصد کاهش همراه میباشد، در حالی که در خاک بهسازی شده با ۱ درصد نانورُس مقاومت فشاری با ۱۳۴ درصد افزایش و نشست با ۸۶ درصد کاهش همراه بوده است.

منابع

- [1] K. C. Onyelowe and B. V. Duc, “Durability of nanostructured biomasses ash (NBA) stabilized expansive soils for pavement foundation,” *Int. J. Geotech. Eng.*, pp. 1–10, 2018.
- [2] M. Gaafer, H. Bassioni, and T. Mostafa, “Soil Improvement Techniques,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, no. 12, pp. 217–222, 2015.
- [3] G. P. Makusa, *Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review*. Luleå tekniska universitet, 2013.
- [4] M. Celaya, M. Veisi, S. Nazarian, and A. Puppala, “Accelerated Design Process of Lime-stabilized Clays,” in *Reston, VA: ASCE Proceedings of the Geo-Frontiers 2011 conference, March 13-16, 2011, Dallas, Texas* | d 20110000, 2011
- [5] H. Ahmadi and O. Shafiee, “Experimental comparative study on the performance of nano-SiO₂ and microsilica in stabilization of clay,” *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 134, no. 9, p. 459, 2019
- [6] A. Tabarsa, N. Latifi, C. L. Meehan, and K. N. Manahiloh, “Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay—A sustainable material for construction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 454–463, 2018
- [7] H. Cui, Z. Jin, X. Bao, W. Tang, and B. Dong, “Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 286–295, 2018
- [8] N. Abbasi, A. Farjad, and S. Sepehri, “The Use of

- of nanoclay on engineering properties of soil,” in Forth International Congress of Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran, Iran, 2010
- [22] F. Changizi and A. Haddad, “Effect of nanocomposite on the strength parameters of soil,” *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 3, pp. 676–686, 2017
- [23] Z. H. Majeed, M. R. Taha, and I. T. Jawad, “Stabilization of soft soil using nanomaterials,” *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 503–509, 2014.
- Mashhad city,” in 05th Iranian Conference of Engineering Geology, 2007
- [18] “Iranian Nanomaterials Pioneers Company.”
- [19] Memarzadeh, A. Lashkari, and P. T. Shourijeh, “Consolidation behavior of structured clayey soils: a case study on shiraz fine alluvial strata,” *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 16, no. 10, pp. 1435–1444, 2018.
- [20] C. Liu and J. B. Evett, *Soil properties: testing, measurement and evaluation*. Prentice-Hall, Inc., 1984
- [21] M. H. Baziar, H. Ghazi, and S. M. Mirkazemi, “Effect

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Ghareh, K. Yazdani, V. Besharat, Laboratory Study of the Effect of Clay and Silica Nanoparticles on the Behavior of Silty-Clay Soils in Mashhad, Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 4723-4742.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18470.6877



