



مطالعه آزمایشگاهی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رمبنده بهسازی شده با مواد نانو

علی اکبر سلطانی نژاد^۱، مهدی مخبری^{۲*}، سید مرتضی مرندی^۳

۱ گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
۲ گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران
۳ گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهیدباهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

کلمات کلیدی:

پتانسیل رمبندگی
نانوکربنات کلسیم
نانورس
نانوسیلیس
نانو اکسید آلومینیوم

خلاصه: رمبندگی را فروریزش ناگهانی خاک در اثر از دست رفتن عامل پیوند دهنده ذرات خاک تعریف کرده‌اند. فروریزش ماسه‌ها ناشی از لغزشی شدن ذرات رسی است که دانه‌ها را به چسبیده است، در حالی که رمبندگی خاک‌های رسی ناشی از بین رفتن پیوند الکتروشیمیایی است. نظر به اینکه پدیده رمبندگی مشکلات فراوانی را در اجرای پروژه‌های عمرانی کرده است، بررسی رفتار این خاک و بهسازی آن بسیار با اهمیت است. در این مقاله تأثیر مواد نانو بر پتانسیل رمبندگی خاک بررسی شده است. بدین منظور، خاک با پتانسیل رمبندگی شدید از منطقه الله‌آباد کرمان انتخاب و تأثیر افزودنی‌های نانوسیلیس، نانورس، نانواکسید آلومینیوم و نانوکربنات کلسیم با درصدهای مختلف بر رفتار تغییر حجمی خاک، پتانسیل رمبندگی و مقاومت برشی مطالعه گردیده است. نتایج نشان داد که به دلیل تغییر ساختار و اسکلت خاک افزودن نانوسیلیس و نانورس کاهش قابل ملاحظه پتانسیل رمبندگی را به همراه دارد و لی دو ماده دیگر یعنی نانوکربنات کلسیم و نانو اکسید آلومینیوم تأثیر کمتری دارند. از طرفی نانوسیلیس و نانورس باعث افزایش ضریب چسبندگی بیشتری می‌شوند در حالی که نانوکربنات کلسیم و نانوسیلیس بیشترین تأثیر بر زاویه اصطکاک داخلی خاک دارند. همچنین عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که خاک رمبنده دارای حفرات میکروسکوپی بوده و با افزودن نانومواد، خلل و فرج خاک کمتر و بافت خاک متراکم تر شده و در نتیجه کاهش پتانسیل رمبندگی را به همراه دارد.

۱- مقدمه

در مهندسی ژئوتکنیک به خاک‌هایی که احداث سازه بر روی آن‌ها ایمن نبوده و نیز تحت تأثیر شرایط آب و هوایی قرار دارند خاک‌های مسئله‌دار گفته می‌شود. خاک‌های مسئله‌دار در گونه‌های متفاوتی از جمله متورم شونده، جاذب آب، فرو ریزشی و سست می‌باشند [۱-۳]. در مواجهه با خاک‌های مسئله‌دار، سه روش تغییر مکان ساخت و ساز، جایگزینی خاک نامطلوب محل با خاک و مصالح مناسب و بهسازی خاک موجود مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲، ۴-۶]. که در برخی از موارد و با توجه به محدودیت‌های مالی و یا مکانی (مانند تغییر مکان پروژه یا کمبود زمین مناسب) بهترین گزینه «بهسازی» این نوع خاک‌ها است [۵، ۷، ۸]. یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار که به خاک رمبنده یا فرو ریزشی معروف است، با افزایش رطوبت (حالت تقریباً اشباع)، به دلیل سست شدن ناگهانی پیوند بین‌دانه‌ای دچار کاهش حجم و نشست می‌شوند [۹، ۱۰]. خاک‌های رمبنده ساختار لانه زنبوری داشته و محدوده نسبت تخلخل آن‌ها حدوداً بین ۰/۸ تا ۱/۲، وزن مخصوص خشک

بین ۱/۲ تا ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، حد روانی کمتر از ۴۵ و شاخص خمیری کمتر از ۲۵ درصد است [۱۱، ۱۲]. خاک‌های رمبنده را بر اساس عمق به سه دسته خاک‌های سطحی که در تنش کمتر از ۰/۲ مگا پاسکال، خاک‌هایی سطحی که در تنش ۰/۲ مگا پاسکال و خاک‌های عمیق که در تنش‌های بالاتر از ۰/۴ مگا پاسکال قرار دارند، طبقه‌بندی می‌کنند. افزایش رطوبت در خاک‌های سطحی و یا کم عمق که تنش اعمال شده در آن‌ها صرفاً وزن سربار خود است، موجب تغییر میزان رمبندگی می‌گردد [۱۳]. با توجه به مشکلات حاصل از احداث سازه بر روی این نوع خاک‌ها تثبیت آن‌ها مورد توجه مهندسين است. جهت بهسازی خاک‌های رمبنده با توجه شدت رمبندگی، جنبه‌های اقتصادی و ساخت روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. تراکم مرطوب می‌تواند در تثبیت لایه‌های سطحی خاک که تحت تأثیر سازه‌های سبک هستند، استفاده شود درحالی‌که تزریق عمیق می‌تواند یک روش موثر برای سازه‌های عمیق و یا زیرزمینی باشد. یکی دیگر از روش‌های مقابله با خاک‌های رمبنده استفاده از شالوده‌های عمیق (شمع) است که بار سازه را به لایه‌های زیرین خاک رمبنده منتقل کند. به طور

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mehdi.mokhberi@iau.ac.ir



عمومی و گسترده از تثبیت شیمیایی برای بهسازی خاک های رمنده استفاده میشود [۱۴، ۱۵]. همچنین با استفاده از آزمایش بزرگ مقیاس به بررسی بهبود خاک رمنده با ستون سنگی پرداخته شده و نشان داده شده است که با استفاده از ستون سنگی محصور شده با ژئوگرید می توان پتانسیل رمندهگی خاک رس با خاصیت خمیری کم را حدود ۸۰٪ کاهش داد. محققین کاهش چشمگیر پتانسیل رمندهگی را مرتبط به افزایش فشار جانبی ستون سنگی به خاک رمنده می دانند [۱۶].

امروزه برای تثبیت شیمیایی خاک های مسئله دار علاوه بر مواد سنتی متداول مانند سیمان و آهک، از مواد نانو نیز استفاده می شود. فناوری نانو به تمام فناوری های پیشرفته در زمینه کار با مقیاس نانو (ابعاد حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) اطلاق می شود. این فناوری موجب ساخت مصالحی با خواص و عملکردهای نوین می شود [۱۷، ۱۸]. امروزه، پرمصرف ترین نوع مواد نانو در زمینه بهسازی خاک های مسئله دار، نانو آهک (Nano lime)، نانو سیلیس (Nano Silica)، نانو بنتونیت (Nano bentonite)، نانو زئولیت (Nano zeolite)، نانو مونتموریلونیت (Nano Montmorillonite) و نانو آلومینیوم (Nano Aluminum) می باشند [۱۹]. نانو آهک در تثبیت خاک رس، باعث افزایش حد خمیری و کاهش شاخص خمیری می شود. نانو سیلیس همان دی اکسید سیلیس (SiO_2) با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر است که معمولاً به صورت معلق در مایع و یا پودر (با درصد خلوص متفاوت) تهیه و تولید می شوند. اگرچه قدرت پایداری واکنش با خاک، در نانو سیلیس (به دلیل سطح ویژه بالا) نسبت به سیلیکا بیشتر است، اما در خاک های نرم باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش چسبندگی می گردد. در بهسازی خاک لس با نانو سیلیس بررسی ها نشان می دهد با اضافه کردن تنها ۳٪ نانو سیلیس به خاک لس، در ۳ روز اول حدود ۹۵٪ مقاومت تک محوری نمونه ۲۸ روزه حاصل می شود. با افزایش درصد نانو سیلیس تا ۵٪ مقاومت تک محوری نمونه ها افزایش یافته است، لیکن این افزایش از ۵٪ تا ۷٪ تأثیری بر مقاومت تک محوری نمونه ها نخواهد داشت [۲۰]. نانو بنتونیت خاصیت جذب رطوبت و تورم بیشتری نسبت به بنتونیت طبیعی دارد. رسیدن رطوبت به نانو بنتونیت باعث پراکندگی دانه های بنتونیت در هوا و تشکیل ژلاتین بنتونیت با ویسکوزیته بالا شده و به همین دلیل در حفاری ماشینی، به منظور بهبود خواص گل حفاری از این ژل استفاده می شود [۲۱]. علاوه بر ژل بنتونیت، نانو بنتونیت نیز با بهبود بخشیدن میزان نفوذپذیری دوغاب بین دانه های ماسه، باعث مقاومت خاک در برابر پدیده روانگرایی می شود [۲۲]. ژئولیت یک ماده معدنی است که عمدتاً از آلومینوسیلیکات (Aluminosilicate) تشکیل است. افزودن آن به

خاک، باعث افزایش حد روانی می شود. نانو رس ها، نانو ذرات سیلیکات به شکل لای های (صفحه ای) هستند که به روش های مختلف فاصله صفحات رس از یکدیگر افزایش یافته و نانو رس تشکیل می شود. نانو رس دارای سطح ویژه بزرگی است که باعث اندرکنش زیاد بین نانو رس و محیط اطراف می شود [۲۳]. بررسی ها نشان دادند که افزودن نانورس تا ۲۰ درصد وزن خاک موجب افزایش پتانسیل رمندهگی شده و بیش تر از این مقدار پتانسیل رمندهگی کاهش می یابد [۲۴]. بدلیل سازگاری با محیط زیست، نانو رس ها در بهسازی خاک های رمنده نشان دادند که رفتار رمندهگی خاک تقریباً با استفاده از ۵ درصد نانورس کاملاً ثابت شده است. همچنین پتانسیل رمندهگی با کاهش درصد رطوبت، چگالی خشک و محتویات نانورس، افزایش می یابد، در حالی که در صورت افزایش تنش عمودی اعمال شده به نمونه ها، افزایش می یابد [۲۵]. استفاده از مواد نانو نظیر نانورس، نانوسیلیس، نانو آلومینا در درصد های پایین سبب ایجاد اثر منفی در پتانسیل رمندهگی خاک گردیده، و باعث افزایش رمندهگی خاک میشوند. برای کاهش این اثر باید از محلول های کلوئیدی مواد نانو استفاده کرد و یا با محاسبه مینیمم مقدار مواد نانو از مقدار بیشتری استفاده شود [۲۶]. نشان داده شده است که بهسازی خاک رمنده با نانو مونتموریلونیت به ابعاد زمین و یا عمق بهسازی آن ها بستگی دارد، به طوری که با افزایش ابعاد زمین و یا عمق این روش مقرون به صرفه نیست [۲۷]. محققین نشان دادند که بر اساس مقایسه تغییرات پتانسیل رمندهگی نمونه های تثبیت شده با بنتونیت، میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج در درصد وزنی مشابه، افزودن کمتر از ۷٪ بنتونیت و ۳٪ میکروسیلیس به ترکیب خاک، پتانسیل رمندهگی را کاهش و افزودن ۷٪ خاکستر پوسته برنج، این پارامتر را افزایش خواهد داد. همچنین نتایج بررسی شکل پذیری خاک های رمنده سمنان با استفاده از همین مواد به عنوان افزودنی نشان داد که پتانسیل رمندهگی خاک با افزودن بنتونیت و خاکستر پوسته برنج روند کاهشی داشته است. در صورتی که با افزودن میکروسیلیس تا ۴ درصد روند کاهشی داشته ولی بعد از آن این روند افزایشی بوده است [۲۸]. در بهسازی خاک های فرو ریزی با روش تزریق روی خاک با رمندهگی نسبتاً زیاد، نتایج آزمایش تحکیم روی نمونه های خاک با حدود ۷۰٪ آهک تزریق شده، کاهش پتانسیل رمندهگی را نشان می دهند. از طرفی نتایج آزمایش سه محوری تحکیم یافته و زهکشی نشده تزریق آهک حاکی از افزایش قابل ملاحظه مقاومت برشی خاک دارد [۲۹]. در مطالعه خاک های متورم شونده اصلاح شده با دو ماده آهک و خاکستر بادی نتایج دلالت بر آن دارد که هر دو ماده از نشست و تورم خاک جلوگیری می کنند؛ اما در درصد وزنی برابر تأثیر آهک بیشتر است [۳۰]. نتایج در بررسی دیگر بیانگر آن است که استفاده

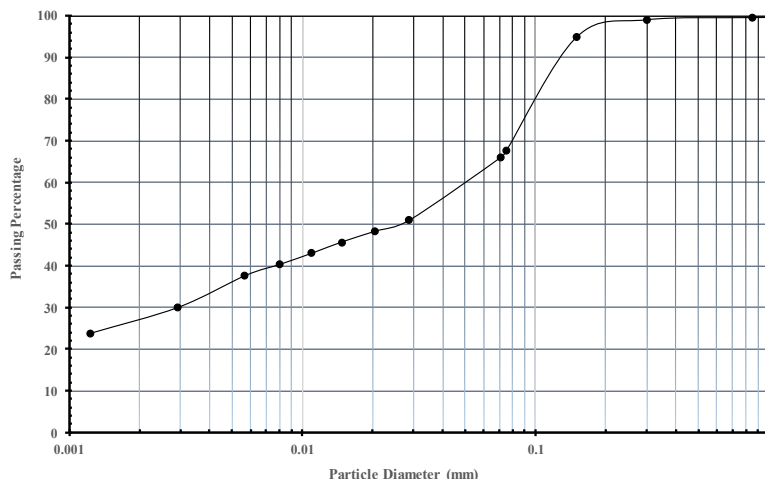
بر اساس آزمایش‌های انجام شده با مقادیر مختلف عامل رسوب ساز کلرید (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گرم بر لیتر) که از تزریق باکتری باسیلوس اسفاریکوس (*Bacteria Bacillus sphericus*) همراه با رطوبت به خاک به دست می‌آید، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که رهمبندگی به ازای هر سه درصد مختلف کلرید کلسیم کاهش یافته ولی مقدار بهینه عامل رسوب ساز کلرید کلسیم ۷۵ گرم بر لیتر تعیین می‌شود [۳۸]. در بهسازی بیولوژیکی خاک رس رهمبند بهترین نتیجه زمانی حاصل گردید که از روش مجموع محلول سیمان‌تاسیون و سوسپانسیون باکتری استفاده گردید. همچنین بهترین درصد اختلاط باکتری به سیمان‌تاسیون ۷۰ به ۳۰ است زیرا عامل اصلی در بهسازی در این روش، باکتری بوده که فرایند هیدرولیز اوره را انجام می‌دهد و محلول سیمان‌تاسیون نقش کمکی به این فرایند را ایفا می‌کند [۳۹].

بررسی استفاده از زباله‌های صنعتی نظیر ضایعات نساجی در بهسازی خاک‌های رهمبند نشان می‌دهد اگر درصد این ضایعات مخلوط با خاک ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ درصد باشد پتانسیل رهمبندگی خاک به طور قابل توجهی از حدود ۱۱ درصد به ۲/۶ درصد به هنگام استفاده از ۲۴ درصد لجن نساجی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش برشی افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی را نشان می‌دهد. با انجام آزمایش‌های حدود آتربرگ مشخص شد افزایش در حد خمیری وجود دارد. با در نظر گرفتن نتایج آزمایش تراکم، کاهش در حداکثر چگالی خشک و افزایش درصد رطوبت بهینه مشاهده گردید. مقادیر CBR^۱ برای همه نمونه‌ها نشان دهنده مناسب بودن استفاده از مخلوط خاک و خاک- لجن تنها در لایه زیرین روسازی است [۴۰] [۴۲].

مطالعات فوق‌الذکر نشان می‌دهد که علی‌رغم مطالعات متعدد تنوی و آزمایشگاهی، لزوم استفاده از مواد نانو در بهبود پتانسیل رهمبندگی خاک و بررسی مقایسه‌ای تأثیر افزودنی‌های نانو با درصد‌های مختلف محسوس بوده و میتواند داده‌های جدیدی را به جامعه مهندسی ژئوتکنیک جهت بر طرف نمودن چالش‌های موجود ارائه نماید. لذا در این پژوهش به بررسی اثر چهار نانومواد شامل نانو سیلیس، نانورس، نانواکسید آلومینیوم و نانوکربنات کلسیم بر رهمبندگی خاک پرداخته شد. آزمایش‌های پتانسیل رهمبندگی و برش مستقیم به عنوان معیار اصلی سنجش عملکرد نانومواد به کار گرفته شدند. همچنین در انتها به منظور درک بهتر و ریزساختاری، بر روی چند نمونه منتخب عکس برداری الکترونی روبشی (SEM) انجام شد.

از این دو ماده به مرور زمان باعث افزایش آرام مقاومت فشاری تک محوره در نمونه‌های خاک می‌شود. هر چه نسبت اختلاط خاکستر بادی با آهک بیشتر شود مقدار افزایش مقاومت کمتر میگردد. از طرفی میزان رطوبت تأثیر قابل توجهی بر مقاومت نمونه‌ها می‌گذارد و افزایش رطوبت باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود [۳۱].

محققین رفتار خاک‌های رهمبند را پس از ترکیب با آمونیوم سولفات و پتاسیم کلراید با غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ مول بر لیتر بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب نمک‌های معدنی با خاک رهمبند تأثیر بسزایی در کاهش فروریزش این خاک‌ها دارد. همچنین نمونه‌هایی که با انرژی تراکم بیشتری بازسازی شدند، دارای استعداد رهمبندگی کمتری بودند [۳۲]. نتایج استفاده از آمونیوم سولفات $(NH_4)_2SO_4$ و پتاسیم کلرید (KCL) در غلظت‌های مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ مول بر لیتر) و در انرژی تراکم مختلف در تثبیت شیمیایی خاک‌های رهمبند و پتانسیل رهمبندگی بیانگر آن است که: که محلول کلسیم کلرید نسبت به آمونیوم سولفات در بهسازی شیمیایی خاک رهمبند اثر بهتری ایفا می‌کند. همچنین با افزایش انرژی تراکم پتانسیل رهمبندگی خاک کاهش می‌یابد [۳۳]. محققان در تثبیت شیمیایی با استفاده از دو افزودنی فرماید و آمونیوم پرسولفات باعث فعال سازی واکنش سیلیکات سدیم شده‌اند. نتایج آزمایش تک محوری آنان نشان می‌دهد که استفاده از آمونیوم پرسولفات به جای فرماید باعث افزایش مقاومت تک محوری از ۰/۳ به ۰/۷ مگاپاسکال و افزایش مدول ارتجاعی از ۲۲ تا ۴۷ مگاپاسکال شده است [۳۴]. بررسی‌ها روی ترکیب خاک رهمبند با خاکستر بادی و سولفور تحت دمای عمل‌آوری از دمای محیط تا ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و مدت عمل‌آوری آن‌ها از ۲۸ روز تا یک سال نشان داد، مقاومت این نمونه‌ها سه برابر نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند می‌باشد. نفوذپذیری این نمونه‌ها بین 10^{-13} تا 10^{-11} متر بر ثانیه متغیر بود [۳۵]. در اصلاح خاک رهمبند به روش تزریق با سه ماده دوغاب سیمان، گچ و نانوسیلیس، نتایج نشان می‌دهد که آهک بیشترین کاهش را در پتانسیل رهمبندگی به میزان ۷۰٪ داشته است، در حالی که سیمان و میکروسیلیس به ترتیب باعث کاهش ۶۰٪ و ۴۰٪ رهمبندگی خاک محل شده است [۳۶]. نتایج بررسی پارامترهای مقاومتی و رهمبندگی خاک در تزریق حجم‌های مختلفی از دوغاب شیمیایی اکریلات مایع نشان می‌دهد که با افزایش اکریلات مایع از میزان رهمبندگی خاک کاسته شده ولی به ازای حجم تزریق بالا ماهیت خاک از بین رفته و رفتار موجود دیگر از دوغاب پیروی می‌کند، در نتیجه میزان پتانسیل رهمبندگی ثابت گشته و تغییر محسوسی ندارد [۳۷].



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک منطقه الله‌آباد کرمان

Fig. 1. The particle size distribution of Allah Abad's soil in Kerman

جدول ۱. مشخصات خاک مورد مطالعه

Table 1. The properties of the studied soil

D60 (mm)	D50 (mm)	D30 (mm)	ضریب چسبندگی C (Kg/cm ²)	زاویه اصطکاک داخلی خاک (درجه)	رده بندی خاک (Gs)	چگالی دانه های جامد (Gs)	شاخص خمیری (%)	حد خمیری (%)	حد روانی (%)	رطوبت اپتیمم (%)	دانسیتته خشک ماکزیمم (g/cm ³)
۰/۰۵	۰/۰۲۷	۰/۰۰۳	۰/۰۹	۳۶	CL	۲.۷	۱۱	۱۹	۳۰	۱۵/۵	۱/۷۸

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خاک

خاک مورد مطالعه از عمق ۲-۱،۵ متر با رطوبت محل ۳،۲٪ از منطقه الله‌آباد شهر کرمان واقع در جنوب شرق ایران تهیه گردید. جهت شناخت مشخصات مکانیکی خاک آزمایش‌های دانه‌بندی بر اساس ASTM D422-63، حدود اتربرگ براساس ASTM D4318، تراکم پراکتور بر اساس ASTM D698 و... انجام شد. شکل (۱) نمودار توزیع دانه بندی خاک و جدول ۱ مشخصات خاک برداشت شده را نمایش می‌دهند. با توجه به نمودار دانه‌بندی، جدول ۱ و طبقه‌بندی متحد خاک مورد مطالعه رس با خاصیت خمیری کم (CL) می‌باشد. همچنین با استفاده از آزمایش تعیین وزن مخصوص با موم طبق استاندارد ASTM D1188-96 دانسیته خاک در محل ۱/۴ گرم برسانتی‌مترمکعب بدست آمد.

۲-۲- مواد نانو

در تحقیق حاضر از چهار مواد نانو شامل نانوسیلیس شرکت یو اس ریسرچ نانومتريالز، نانورس شرکت سیگماآلدريچ، نانوآکسید آلومینیوم شرکت یو اس ریسرچ نانومتريالز و نانوکربنات کلسیم شرکت آمریکن المنتس استفاده گردید. مشخصات مواد نانو مصرفی ارائه‌شده توسط شرکت‌های سازنده در جدول (۲) نمایش داده شده است.

به طور رایج در بهسازی خاک با مواد نانو، تا ۲٪ از خاک را با مواد نانو جایگزین می‌کنند و این درصد نسبتاً اقتصادی است، لذا در این تحقیق از چهار مواد نانو ذکرشده با درصد های ۰،۵، ۱، ۱،۵ و ۲٪ برای بهبود خاک استفاده شد. همچنین نمونه خاک تثبیت‌نشده نیز، به عنوان نمونه شاهد به‌منظور مقایسه با نمونه‌های بهسازی شده و بررسی اثربخشی استفاده از نانومواد در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. مشخصات مواد نانو مصرفی

Table 2. The properties of the used nano materials

نوع نانو	سیلیس (SiO ₂)	رس (مونتمریلونیت)	اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃)	کربنات کلسیم (CaCO ₃)
اندازه ذرات	nm ۲۰-۳۰	nm ۲-۱	nm ۵۰	nm ۸۰-۱۰
سطح ویژه	m ² /g ۶۰۰-۱۸۰	m ² /g ۲۷۰-۲۲۰	m ² /g >۱۹	m ² /g ۶۰-۳۰
چگالی بالک	g/cm ³ ۰/۱ <	g/cm ³ ۰/۱۰-۵/۷	g/cm ³ ۰/۱۹	g/ml ۰/۶۸
چگالی واقعی	g/cm ³ ۲/۴	g/cm ³ ۱/۹۸	g/cm ³ ۲/۷	g/cm ³ ۲/۹۳
رنگ	سفید	زرد کم رنگ	سفید	سفید
خلوص	+%۹۹	+%۹۹	+%۹۹	+%۹۸
مورفولوژی	کروی	الیگومری و تقریباً صفحه‌ای	تقریباً کروی	مکعبی یا شش ضلعی

۲-۳- آزمایش‌ها

۲-۳-۱- آزمایش پتانسیل رمبندگی

در این پژوهش آزمایش پتانسیل رمبندگی طبق استاندارد ASTM D5333-03 به عنوان یکی از معیارهای اصلی بررسی عملکرد نانومواد بر خاک رمبده در نظر گرفته شد [۴۱]. این روش برای تعیین میزان رمبندگی یک بعدی کاربرد دارد که هنگام اشباع شدن خاک‌های غیراشباع با یک سیال رخ می‌دهد. آزمایش شامل قراردادن نمونه ای نسبتاً دست نخورده از خاک با رطوبت طبیعی در یک دستگاه تحکیم اتودومتر با اعمال یک تنش قائم از پیش تعیین شده به نمونه و اشباع کردن نمونه با آب برای ایجاد رمبندگی است. به منظور انجام این آزمایش، نمونه ای دست نخورده با رطوبت طبیعی با استفاده از رینگ دستگاه تحکیم برداشت شد. پس از تنظیم دستگاه، بارگذاری در مراحل مختلف (۰/۵، ۰/۱۲، ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) به صورت یک ساعته در شرایط رطوبت طبیعی اعمال شد و عدد گیج قرائت شد. پس از ثبت گیج نمونه در تنش ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب، نمونه به وسیله آب غرقاب و و عدد‌های گیج در بازه های زمانی ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه، ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت قرائت و ثبت گردید. در نهایت پتانسیل رمبندگی (I_c) به صورت ذیل (رابطه ۱) محاسبه می‌گردد:

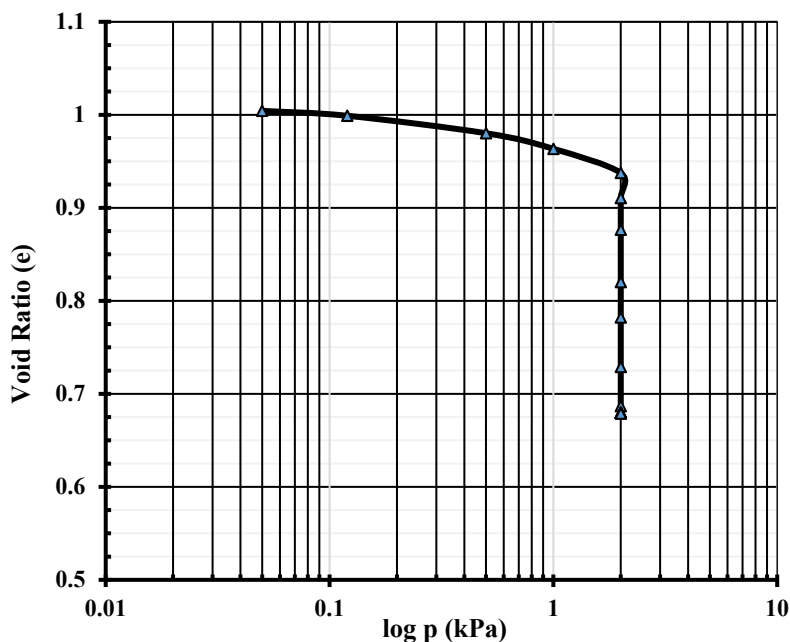
$$I_c = \left[\frac{d_f - d_0}{h_0} - \frac{d_f - d_i}{h_0} \right] \times 100 = \left[\frac{d_f - d_i}{h_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

که در آن d_f کاهش حجم خاک پس از غرقاب شدگی برحسب میلی‌متر، d_i کاهش حجم خاک قبل از غرقاب شدگی برحسب میلی‌متر و h_0 ارتفاع اولیه نمونه برحسب میلی‌متر است.

جهت اطمینان از شدید بودن پتانسیل رمبندگی خاک آزمایش پتانسیل رمبندگی بر روی نمونه دست‌نخورده انجام شد و عدد ۱۱/۸۷ که نشانگر خاک با پتانسیل رمبندگی شدید است، حاصل شد. شکل (۲) نمودار حاصل از آزمایش پتانسیل رمبندگی بر روی نمونه دست‌نخورده از خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

از آنجایی که برای ساخت نمونه‌های خاک با مواد نانو، به ناچار خاک دچار دست‌خوردگی می‌شود، با سعی و خطا نمونه‌های بازسازی شده با رطوبت معادل رطوبت طبیعی خاک (۲/۳٪) و دانسیته‌های مختلف ساخته شد تا به پتانسیل رمبندگی ای معادل پتانسیل رمبندگی خاک دست‌نخورده دست پیدا شود. سپس درصد رطوبت طبیعی خاک و دانسیته به دست آمده، مبنای ساخت نمونه‌ها قرار گرفتند.

جدول (۳) نتایج سعی و خطای انجام‌شده را نشان می‌دهد. همانطور که از جدول مشاهده می‌شود، نزدیک‌ترین حالت دست‌خورده به حالت دست‌نخورده از بین سه سعی و خطای انجام‌گرفته، حالت نمونه‌های دست‌خورده (بازسازی شده) در رطوبت ۳/۲٪ و وزن مخصوص خشک ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. با توجه به مقادیر ناچیز نانومواد استفاده‌شده، عملی و آسان بودن انجام در محل پروژه‌های ژئوتکنیکی و نتایج حاصل این مقادیر برای ساخت نمونه‌ها تا پایان پژوهش استفاده شدند.



شکل ۲. تخمین پتانسیل رمبندگی با استفاده از آزمایش یگانه پتانسیل رمبندگی

Fig. 2. Collapse potential estimation from single oedometer collapse test

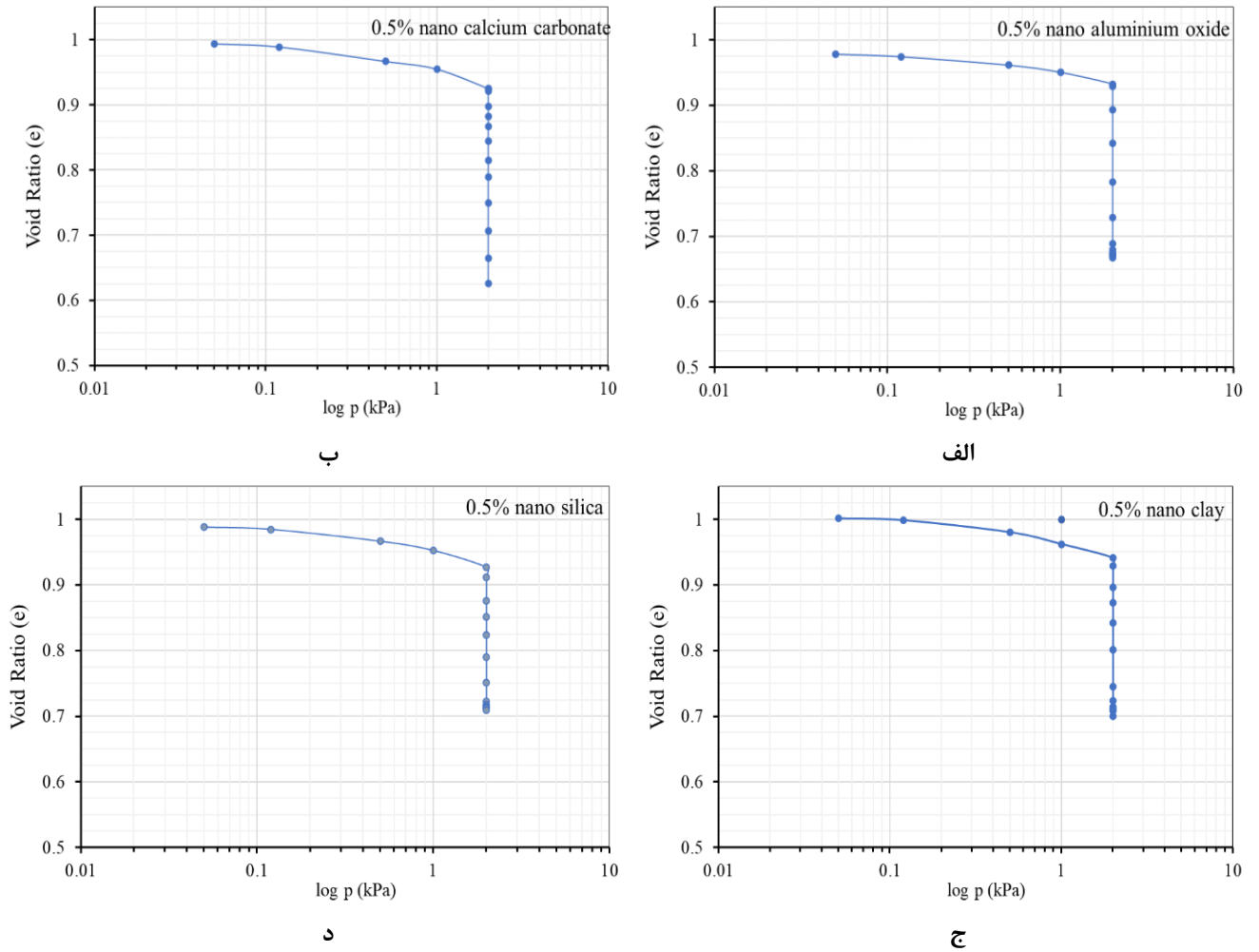
جدول ۱. نتایج آزمایش رمبندگی روی نمونه‌های دست نخورده و دست خورده (ریمولد شده در رطوبت ۳٫۲٪)

Table 3. The results of the collapse potential test on undisturbed and disturbed soil (remodeled at a moisture of 3.2%)

نمونه	I_C	پتانسیل رمبندگی
$\gamma_d=1/45$ خاک دست نخورده	۱۱/۸۷	شدید
$\gamma_d=1/40$ خاک دست خورده	۱۲/۹	شدید
$\gamma_d=1/45$ خاک دست خورده	۱۶/۳۵	شدید

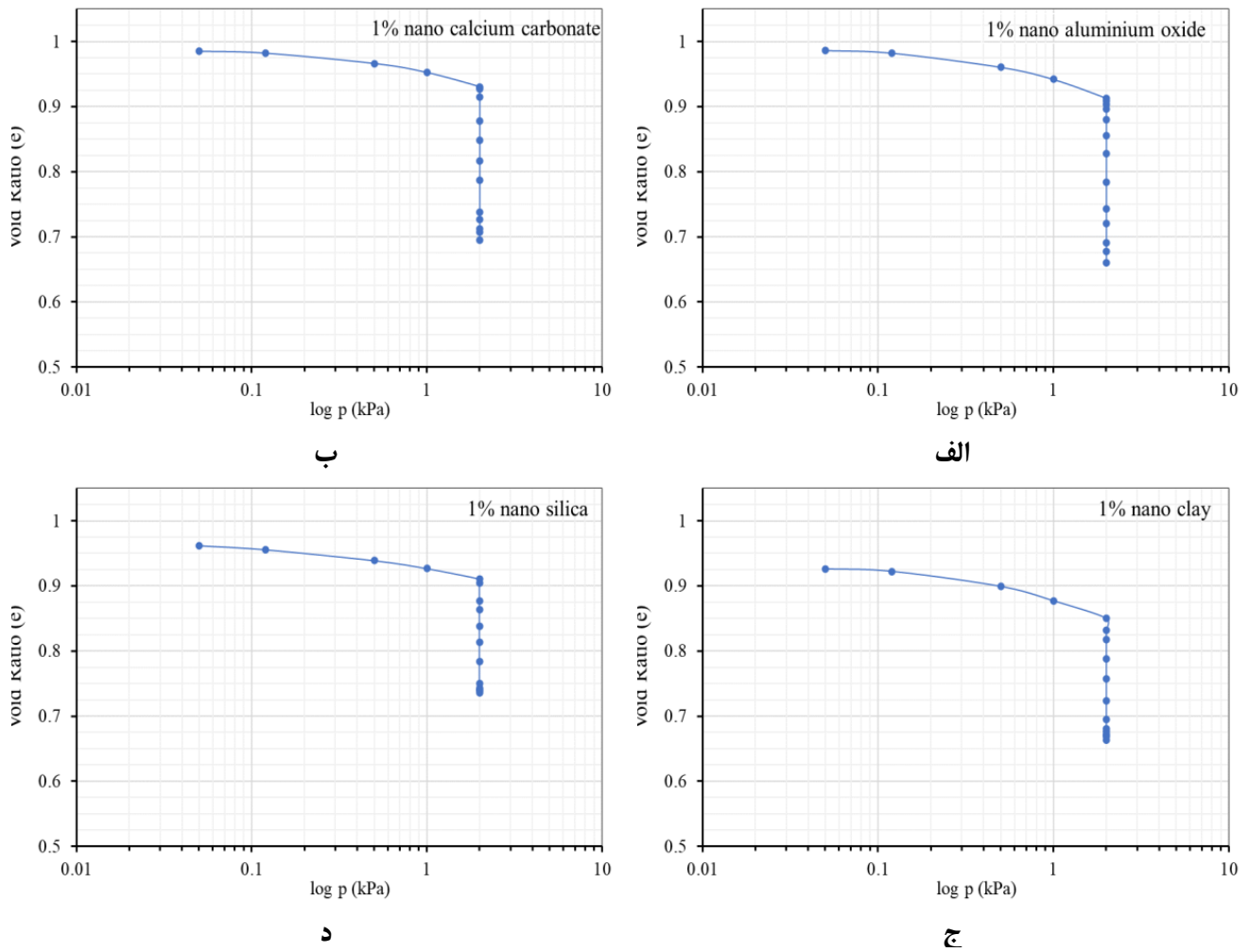
پلاستیکی قرارداده شدند تا رطوبت خاک همگن شود. پس از آماده‌شدن مخلوط نهایی، قالب‌گیری انجام شد. از این حیث، مقدار مناسب از مخلوط نهایی را در سه لایه درون قالب ریخته شده و هر لایه طوری متراکم گردید تا به حجم ثابت در نظر گرفته شده دست یافته‌شد. در انتها آزمایش پتانسیل رمبندگی طبق استاندارد ذکر شده انجام شد. به منظور افزایش دقت آزمایش‌ها، از هر ترکیب تعداد دو نمونه ساخته شد و اعداد گزارش شده میانگین دو نمونه است. اشکال (۳) الی (۶) نتایج آزمایش رمبندگی بر روی نمونه‌های بازسازی شده تثبیت‌شده با نانومواد را نمایش می‌دهند.

نمونه‌های بازسازی شده برای آزمایش رمبندگی در رینگ آزمایش تحکیم به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر ساخته شدند. برای ساخت نمونه‌ها، در ابتدا به روش مخلوط خشک، ماده خشک (خاک+مواد نانو) لازم از هر ترکیب طبق درصد‌های تعیین‌شده به وسیله ترازوی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد و سپس به منظور دستیابی به ترکیبی همگن به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط گردید [۳۵]. پس از آن، مقدار لازم و برابر رطوبت طبیعی خاک، آب به ترکیب خشک اضافه و به منظور تهیه مخلوط یکنواخت به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط گردیدند. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در کیسه‌های



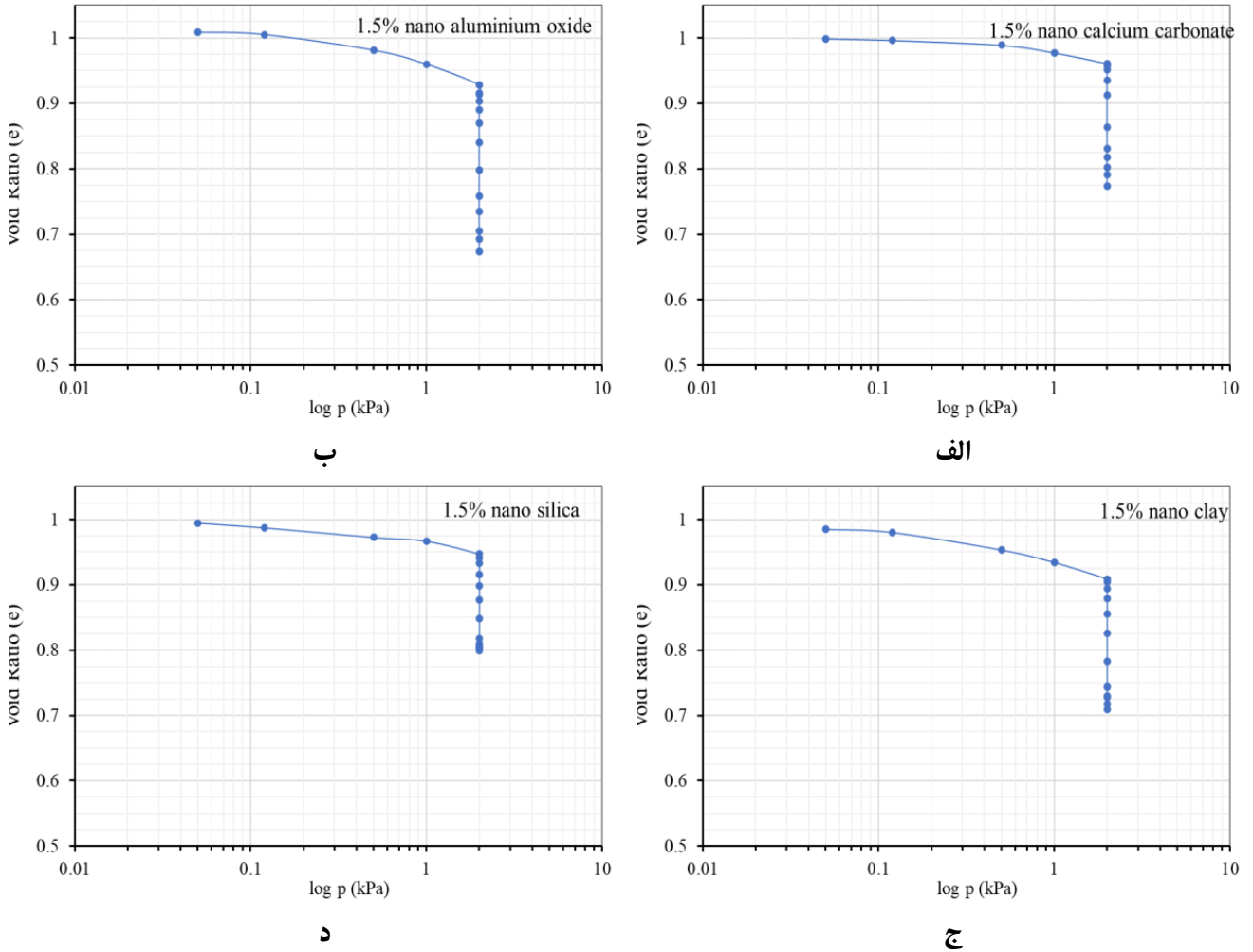
شکل ۳. نتایج آزمایش رهمبندگی با مقدار ۰/۵ درصد از الف) نانو آلومنیوم اکسید، ب) نانو کلسیم کربنات، ج) نانو رس، د) نانو سیلیکا

Fig. 3. The results of collapse potential tests using 0.5 percent of a) nano aluminium oxide b) nano calcium carbonate c) nanoclay d) nanosilica



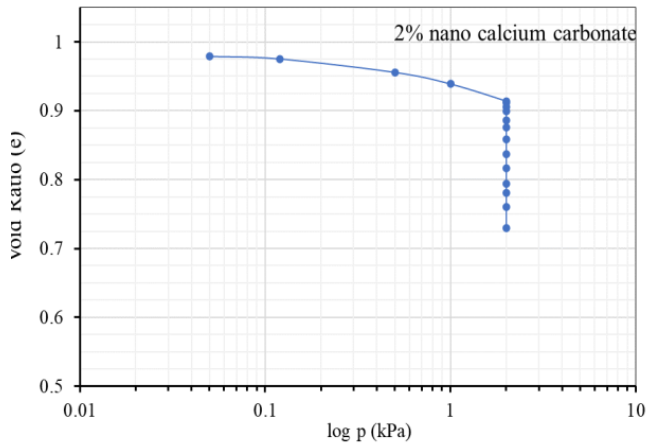
شکل ۴. نتایج آزمایش رهمبندگی با مقدار ۱ درصد از الف) نانو آلومنیوم اکسید، ب) نانو کلسیم کربنات، ج) نانو رس، د) نانو سیلیکا

Fig. 4. The results of collapse potential tests using 1 percent of a) nano aluminium oxide b) nano calcium carbonate c) nanoclay d) nanosilica

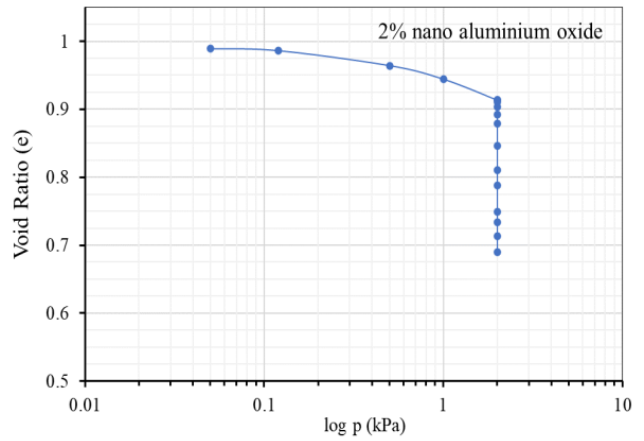


شکل ۵. نتایج آزمایش ریمبندگی با مقدار ۱/۵ درصد از الف) نانو آلومینیوم اکسید، ب) نانو کلسیم کربنات، ج) نانو رس، د) نانو سیلیکا

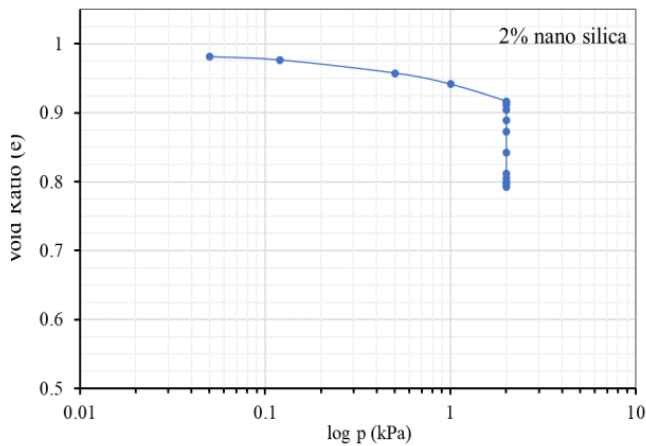
Fig. 5. The results of collapse potential tests using 1.5 percent of a) nano aluminium oxide b) nano calcium carbonate c) nanoclay d) nanosilica



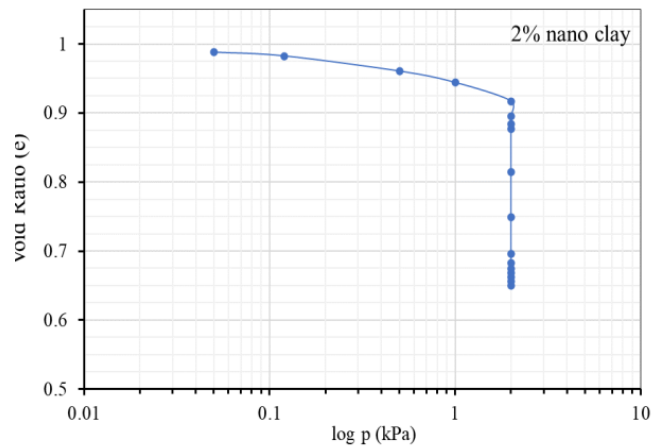
ب



الف



د



ج

شکل ۶. نتایج آزمایش رهمبندگی با مقدار ۲ درصد از الف) نانو آلومینیوم اکسید، ب) نانو کلسیم کربنات، ج) نانو رس، د) نانو سیلیکا

Fig. 6. The results of collapse potential tests using 2 percent of a) nano aluminium oxide b) nano calcium carbonate c) nanoclay d) nanosilica

جدول ۴. نتایج آزمایش برش مستقیم برای درصد‌های مختلف نانومواد افزودنی

Table 4. The results of the direct shear test for different percentages of the nano materials

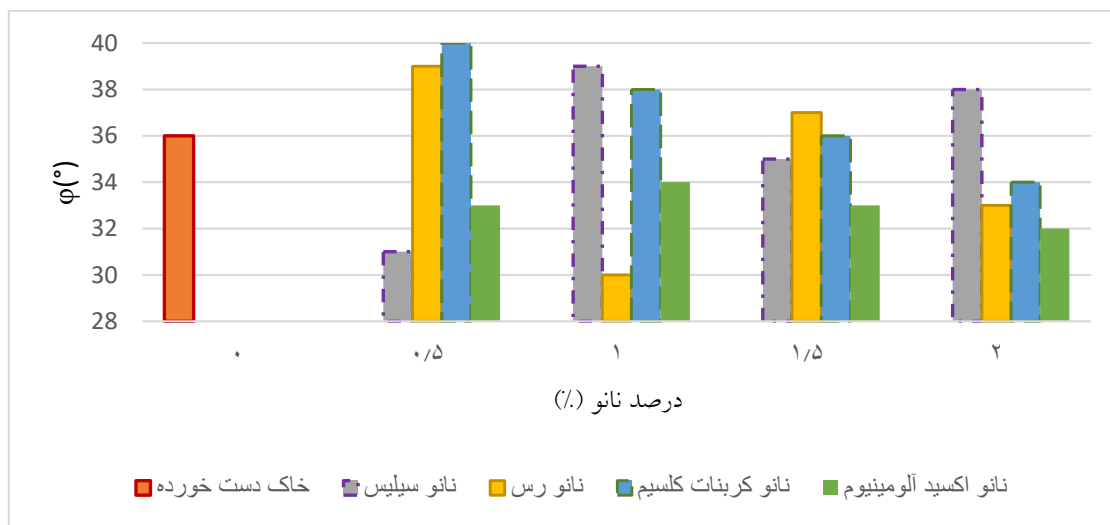
Samples	ϕ (زاویه اصطکاک داخلی)	C (ضریب چسبندگی) Kg/cm^2
نمونه بدون افزودنی	۳۶	۰/۰۹
0.5% Nano Aluminum Oxide	۳۳	۰/۱
1% Nano Aluminum Oxide	۳۴	۰/۱۱
1.5% Nano Aluminum Oxide	۳۳	۰/۱
2% Nano Aluminum Oxide	۳۲	۰/۰۸
0.5% Nano Calcium Carbonate	۴۰	۰/۰۱
1% Nano Calcium Carbonate	۳۸	۰/۰۲
1.5% Nano Calcium Carbonate	۳۶	۰/۰۲
2 % Nano Calcium Carbonate	۳۹	۰/۰۸
0.5% Nano Clay	۳۹	۰/۰۸
1% Nano Clay	۳۰	۰/۲۷
1.5% Nano Clay	۳۷	۰/۰۲
2% Nano Clay	۳۳	۰/۱۳
0.5% Nano-Silica	۳۱	۰/۲۵
1% Nano-Silica	۳۹	۰/۱۱
1.5% Nano-Silica	۳۵	۰/۱۳
2% Nano-Silica	۳۸	۰/۱۱

۲-۳-۲- آزمایش برش مستقیم

مطابق نتایج بدست آمده، مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد نانو کلسیم کربنات به خاک رس مورد مطالعه تا میزان ۲ درصد چسبندگی متناظر آن افزایش پیدا می‌کند، لیکن به صورت کلی افزودن این ماده باعث کاهش چسبندگی خاک رس نسبت به حالت بدون افزودنی شده است. طبق نتایج بدست آمده، زاویه اصطکاک داخلی با اضافه نمودن نانو کلسیم کربنات افزایش پیدا کرده است، به‌گونه‌ای که با افزودن ۰/۵ درصد کلسیم کربنات به خاک رس مقدار زاویه اصطکاک داخلی به ۴۰ درجه رسیده است، اما به طور کلی با افزودن مقدار نانو کلسیم کربنات تا میزان ۲ درصد، زاویه اصطکاک داخلی روند کاهشی داشته و حتی در حالت ۲ درصد کلسیم کربنات افزوده شده، شاهد افت زاویه اصطکاک داخلی در خاک هستیم.

با افزودن نانو اکسید آلومینیوم مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک در تمامی درصدها نسبت به حالت خاک بدون افزودنی کاهش داشته است. با افزایش میزان درصد نانو اکسید آلومینیوم به خاک، زاویه اصطکاک داخلی

دیگر معیار در نظر گرفته شده برای بررسی عملکرد نانومواد بر خاک رمبند مورد مطالعه، آزمایش برش مستقیم است. جهت تعیین مقاومت برشی خاک در سطح گسیختگی معلوم، تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک، تعیین میزان چسبندگی خاک و مقاومت برشی زهکشی نشده از آزمایش برش مطابق استاندارد ASTM D3080 استفاده گردید. نمونه‌ها برای آزمایش برش مستقیم در قالب برش مربعی به ابعاد ۶ در ۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ سانتی‌متر مطابق روش ذکر شده در قسمت آزمایش پتانسیل رمبندگی ساخته شدند. پارامترهای C (ضریب چسبندگی) و ϕ (زاویه اصطکاک داخلی) در دستگاه برش مستقیم با انجام ۴ آزمایش مشابه برای هر حالت (۴ مواد نانو مختلف) و وارد کردن آن‌ها در نمودار $\tau - \sigma$ ، با رسم بهترین خط عبوری از میان نقاط تعیین شده، مقادیر C و ϕ تعیین و در جدول (۴) ارائه شده است.



شکل ۷. تاثیر نانومواد استفاده شده با درصدهای ۰/۵، ۱/۵ و ۲٪ بر زاویه اصطکاک داخلی خاک مورد مطالعه

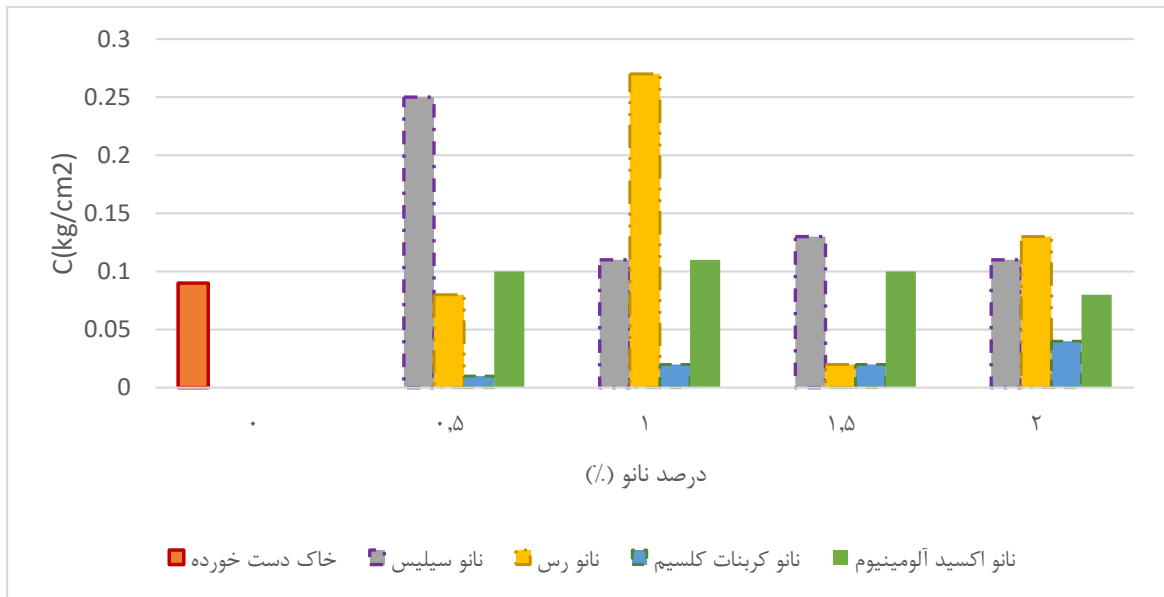
Fig. 7. The effect of 0.5%, 1%, 1.5% and 2% Nano materials on friction angle of studied collapsible soils

مقدار نانو سیلیس به مقدار یک درصد وزنی خاک، زاویه اصطکاک داخلی افزایش قابل مشاهده‌ای داشته ولی چسبندگی از ۰/۲۵ به ۰/۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع کاهش پیدا کرده است. با افزایش مقدار درصد نانوسیلیس تا میزان ۲ درصد وزنی خاک، چسبندگی نسبت به حالت بدون افزودنی افزایش پیدا کرده است، اما نمو تغییرات کم است. شکل‌های (۷) و (۸) نمودار تغییرات مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را برای ۴ افزودنی (نانو اکسید آلومینیوم، نانو کلسیم کربنات، نانو رس و نانوسیلیس) از آزمایش برش مستقیم را در درصدهای مختلف نشان می‌دهد.

جهت بهبود پتانسیل رمبندگی، از چهار مواد نانو شامل نانوسیلیس، نانورس، نانو اکسید آلومینیوم و نانو کربنات کلسیم با درصدهای ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲٪ استفاده گردید. در شکل (۹) نمودار پتانسیل رمبندگی نمونه‌های مختلف که با درصدهای مختلف از ۴ افزودنی (نانو اکسید آلومینیوم، نانو کلسیم کربنات، نانو رس و نانوسیلیس) بهسازی شدند را نشان می‌دهد. آنچه که از این نمودارها به وضوح مشخص است، تأثیر افزودنی‌های نانو در کاهش شاخص رمبندگی است. به نحوی که با افزایش درصد اختلاط این ماده با خاک، میزان شاخص رمبندگی کاهش یافته و توام با آن نشست نیز کاهش پیدا کرده است.

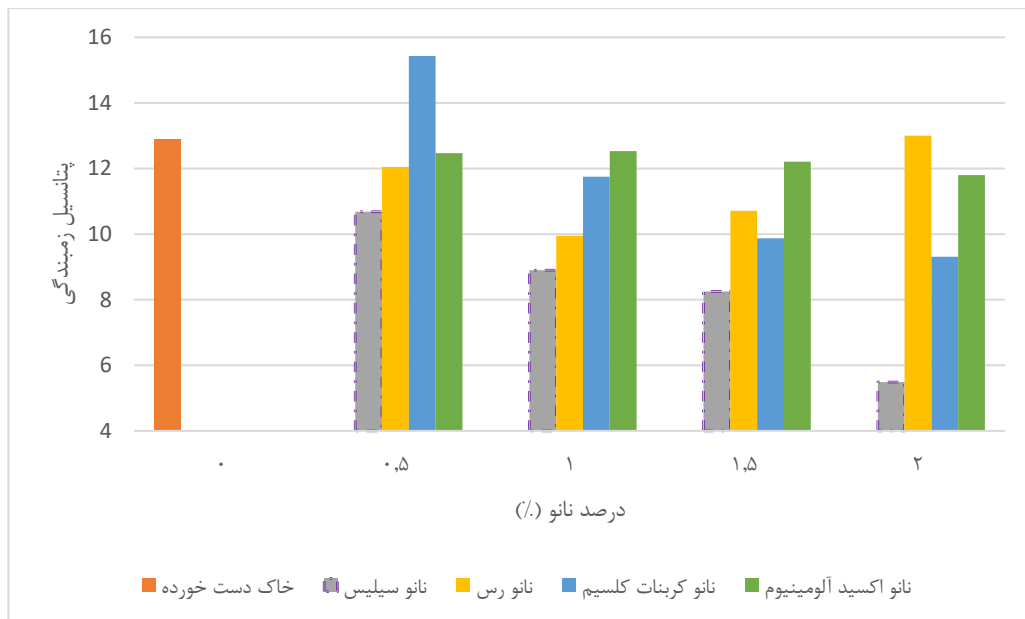
روند کاهشی به خود گرفته است. مطابق نتایج همچنین نشان می‌دهد که مقدار چسبندگی با افزودن نانو اکسید آلومینیوم، نسبت به حالت بدون افزودنی در تمامی درصدهای اضافه شده مقداری افزایش داشته و با افزایش مقدار نانو اکسید آلومینیوم تغییر محسوسی در مقدار چسبندگی مشاهده نمی‌شود. درصدهای اضافه شده مقداری افزایش داشته و با افزایش مقدار نانو اکسید آلومینیوم تغییر محسوسی در مقدار چسبندگی مشاهده نمی‌شود. با افزایش ۱ درصد وزنی نانورس به خاک، چسبندگی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، لیکن با افزودن ۱/۵ درصد از این نانو ماده، چسبندگی کاهش می‌یابد. بطور کلی با افزایش مقدار نانو رس به خاک تغییرات چسبندگی ایجاد شده روند مشخصی ندارد. چنین روندی در اثر افزودن نانو رس بر زاویه اصطکاک داخلی نیز مشاهده می‌شود، به نحوی که در مقدار یک درصد نانورس مقدار زاویه اصطکاک داخلی به کمترین میزان خود رسیده و تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با تغییرات درصد نانو رس روند مشخصی ندارد.

نتایج نشان می‌دهد که با افزودن نانو سیلیس به خاک چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی روند به خصوصی ندارند، اما هنگامی که نیم درصد از نانوسیلیس به خاک افزوده می‌شود، زاویه اصطکاک داخلی کاهش قابل توجهی دارد و چسبندگی متناظر آن نیز افزایش پیدا می‌کند. با افزایش



شکل ۸. تاثیر نانومواد استفاده شد با درصدهای ۰/۵، ۱/۵ و ۲٪ بر چسبندگی خاک مورد مطالعه

Fig. 8. The effect of 0.5%, 1%, 1.5% and 2% Nano materials on cohesion of studied collapsible soils



شکل ۹. تاثیر نانومواد استفاده شد با درصدهای ۰/۵، ۱/۵ و ۲٪ بر پتانسیل زمبندگی خاک مورد مطالعه

Fig. 9. The effect of 0.5%, 1%, 1.5% and 2% Nano materials on collapse potential of studied soils

خاک می‌شوند. به وجود آمدن مواد سیمانی آلومینات کلسیم هیدراته تأثیر زیادی در شروع واکنش تجمع - تراکم دارد. به واکنش گرمازا که در آن اجزاء آهک زنده و سیمان با آب ترکیب می‌شوند هیدراسیون گفته می‌شود که در آن اجزای جامد تشکیل‌دهنده سیمان با آب واکنش داده و سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته و آهک هیدراته را به وجود می‌آورند. این واکنش در مدت زمان کوتاهی صورت گرفته و باعث کاهش درصد رطوبت مخلوط می‌شود. واکنش‌های بین آهک، آب، مواد سیلیس دار و آلومین دار که موجب تشکیل انواع مختلفی از ژل‌های چسباننده می‌شود، به عنوان واکنش‌های پوزولانی شناخته می‌شوند. واکنش پوزولانی سبب به وجود آمدن مواد سیمانی می‌شود که باعث افزایش مقاومت و دوام خاک می‌گردد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که شاخص رمبندگی خاک مورد نظر بر اثر افزودن نانورس نسبت به افزودن نانوکربنات کلسیم و نانوسیلیس و آلومینیوم اکسید سبب ایجاد کاهش بیشتر شاخص رمبندگی می‌شود. علت کاهش شاخص رمبندگی در تغییر ساختار و نحوه قرارگیری ذرات خاک در کنار هم با اضافه شدن نانورس است. مطابق نتایج به دست آمده از تصاویر SEM خاک رمبند دارای حفرات میکروسکوپی و ماکروسکوپی است که افزودن بک افزودنی حفرات بزرگ‌تر را به هم می‌ریزد و یک همبستگی‌ای بین ذرات خاک ایجاد می‌کند. همین مسئله موجب کاهش میزان رمبندگی می‌شود که در نتایج ارائه شده نیز مشهود است. نتایج درصد وزنی اکسید عناصر موجود در نانورس در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵) نشان می‌دهد که اکسیدهای Al_2O_3 و SiO_2 سهم بسیار زیادی در بین اکسیدهای عناصر نانورس دارند. به طوری که می‌توان گفت این دو اکسید، اکسیدهای اصلی نانورس هستند. حال می‌توان ادعا کرد نانورس به علت دارا بودن ترکیبات سیلیسی و آلومینی توانسته به عنوان ماده‌ای پوزولانی عمل کند. ماده سیلیسی یا سیلیسی-آلومینی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با دماهای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی به وجود آورده که خاصیت چسبندگی و سیمانی داشته است. همچنین می‌توان گفت با اضافه کردن نانورس به خاک واکنش تبادل یون‌های مثبت توسط یون‌های کلسیم، آلومینیوم و آهن موجود در این مواد با عناصر خاک انجام شده و خاک رمبند بهسازی شده است. در واقع باید گفت که طبق سری لیوتروپیک ترتیب کلی یون‌هایی که در خاک مشاهده می‌شوند به صورت $Na^+ < K^+ < Mg^+ < Ca^{2+} < Al^{3+} < Fe^{3+}$

نتایج نشان می‌دهد که با افزودن نانوسیلیس به خاک رس برای بهسازی خاک رمبند تأثیر بیشتری نسبت به اضافه کردن سایر افزودنی‌ها دارد. بنابراین چنین استنباط می‌شود که با افزودن نانورس تا مقدار ۱ درصد وزنی پتانسیل رمبندگی کاهش بیشتری نسبت به افزودن نانو کلسیم کربنات تا میزان یک درصد وزنی داشته است. همچنین در درصدهای وزنی ۱/۵ و ۲ درصد وزنی نانو کلسیم کربنات اثر بیشتری بر کاهش پتانسیل رمبندگی نسبت به نانو رس از خود نشان داده است. افزودن نانو اکسید آلومینیوم بر پتانسیل رمبندگی خاک تأثیر داشته است اما در مقایسه با سایر افزودنی‌های استفاده شده اثر کمتری از خود نشان داده است.

با مقایسه نمودارهای تأثیر مواد نانو بر پتانسیل رمبندگی می‌توان دریافت که هرچه درصد نانو سیلیس و نانو کلسیم کربنات به خاک رمبند بیشتر گردد (یعنی از میزان ۰/۵ درصد تا ۲ درصد وزنی خاک)، اثر کاهش پتانسیل رمبندگی شدیدتر می‌شود. به عبارت دیگر شیب نمودار این دو ماده بیشتر از نانو رس و نانو اکسید آلومینیوم است. هنگامی که درصد نانو اکسید آلومینیوم از ۰/۵ به ۲ درصد افزایش پیدا می‌کند، مطابق نتایج به دست آمده کاهش پتانسیل رمبندگی به طور محسوسی افزایش می‌یابد به عبارت دیگر افزایش درصد نانو اکسید آلومینیوم تأثیر محسوسی بر کاهش مقدار پتانسیل رمبندگی خاک دارد. بیشترین کاهش پتانسیل رمبندگی با افزودن نانوسیلیس در مقدار ۲ درصد وزنی این ماده مشاهده گردید که درجه رمبندگی خاک مورد مطالعه را از پتانسیل رمبندگی شدید به پتانسیل رمبندگی متوسط می‌رساند که تأثیر بسیار مطلوبی نسبت به سایر افزودنی‌های آزمایش شده دارد. بطور کلی تغییرات میزان چسبندگی، زاویه اصطکاک و شاخص رمبندگی که در اقسام نانومواد رخ می‌دهد و بعضاً با یکدیگر متفاوت هستند به دلیل تفاوت در اندرکنش‌های شیمیایی بین سطح فعال رس و نانوموادهای بکار رفته می‌باشد.

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

افزودن مواد شیمیایی به خاک موجب شروع چندین واکنش می‌گردد، از آن جمله می‌توان به واکنش تبادل یون‌های مثبت، واکنش تجمع - تراکم، واکنش هیدراسیون و واکنش پوزولانی اشاره کرد. در سری لیوتروپی هر یک از یون‌ها تمایل به جایگزینی یون‌هایی که در سمت چپ آن قرار دارند داشته و به این ترتیب یون‌های یک ظرفیتی با یون‌های چند ظرفیتی جایگزین می‌شوند. در اثر واکنش تجمع - تراکم دانه‌های رس مجتمع شده و به صورت دانه‌های بزرگ‌تری درمی‌آیند و به صورت آشکاری سبب تغییر بافت

جدول ۵. درصد وزنی اکسید عناصر موجود در نانورس

Table 5. The chemical compounds of the nanoclay

شماره	ترکیب	درصد
۱	Na ₂ O	۰/۹۸
۲	MgO	۳/۲۹
۳	Al ₂ O ₃	۱۹/۶۰
۴	SiO ₂	۵۰/۹۵
۵	K ₂ O	۰/۸۶
۶	CaO	۱/۹۷
۷	TiO ₂	۰/۶۲
۸	Fe ₂ O ₃	۵/۶۲
۹	LOI	۱۵/۴۵

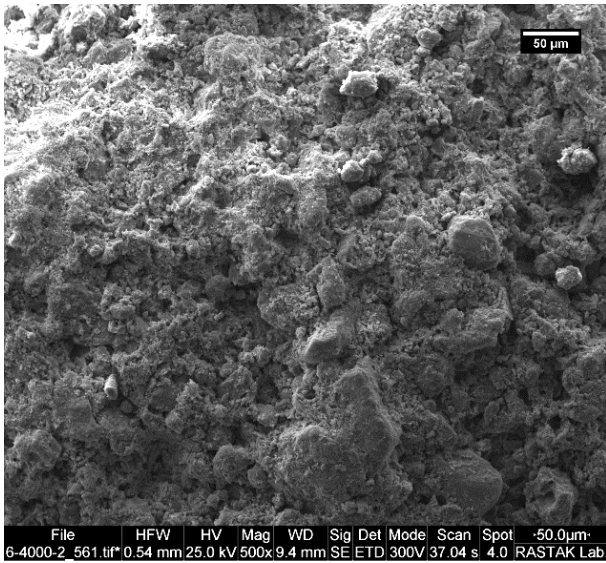
اکسید می‌توان گفت به علت بالا بودن سطح ویژه آلومینیوم اکسید نسبت به کلسیم اکسید توانایی اتصال و برقراری پیوندهای بیشتری با ذرات خاک داشته لذا سبب کاهش شاخص رهمندگی بیشتری در خاک CL برداشت شده از منطقه الله‌آباد کرمان می‌گردد، اما کلسیم کربنات به علت آنکه سطح ویژه کمتری دارد مطابق نمودار بدست آمده تاثیر به مراتب کمتری نسبت به سایر افزودنی‌ها دارد.

۳-۱- آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM)

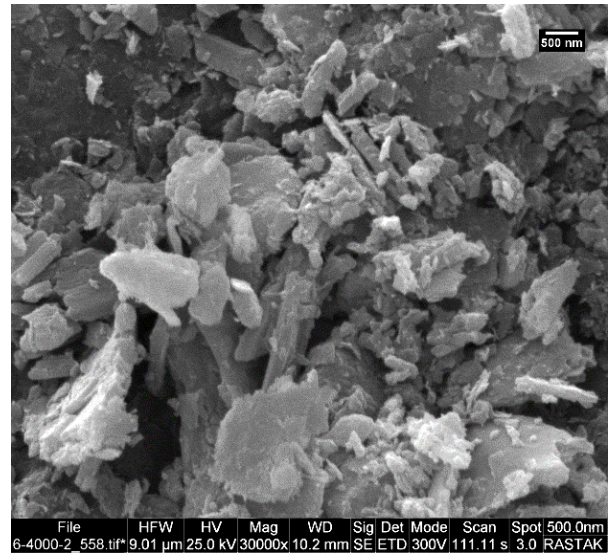
اشکال (۱۰) الی (۱۴) مربوط به آزمایش SEM خاک شاهد (بدون افزودنی) و خاک‌های بهسازی شده با مواد نانو (نانو رس، نانوسیلیس، نانوکلسیم کربنات و نانو اکسید آلومینیوم) در دو مقیاس ۵۰۰ نانومتر و ۵۰ میکرومتر نشان داده شده است. در همین راستا و به منظور مقایسه بهتر تصاویر میکرومتر نشان داده شده است. در همین راستا و به منظور مقایسه بهتر تصاویر SEM با یکدیگر، مقیاس‌های ۵۰ میکرومتر و ۵۰۰ نانومتر انتخاب شده‌اند. بر اساس نتایج شاخص رهمندگی خاک منطقه پتانسیل رهمندگی بالایی به دلیل وجود حفرات دارد، بنابراین می‌توان گفت که علت اصلی فروریزش و نشست ناگهانی خاک (در اثر افزایش رطوبت) همین ضعف ساختاری بوده که این مشکل با ترکیب مواد نانو مختلف (نانو رس، نانوسیلیس، نانو کلسیم کربنات و نانو اکسید آلومینیوم) برطرف می‌شود. همانگونه که در بخش‌های قبل اشاره شد، رهمندگی در خاک‌های رسی ناشی از بین رفتن پیوندهای بونی بین واحدهای تشکیل دهنده کانی‌های رسی است، در حالیکه که عامل رهمندگی در ماسه‌ها لغزش ذرات ماسه بر روی هم می‌باشد. بنابراین تصاویر الکترونی نشان می‌دهد که می‌دهد که مواد نانو چگونه باعث از بین رفتن

است و در واکنش تبادل یون‌های مثبت هر یک از یون‌ها تمایل به جایگزینی یون‌های سمت چپ خود را دارند و به این ترتیب یون‌های تک ظرفیتی جای خود را به یون‌های چند ظرفیتی می‌دهند.

نانوسیلیس به عنوان یک پوزولان بسیار فعال جهت انجام واکنش‌های سمته شدن باعث افزایش چشمگیر مقاومت نمونه‌ها می‌شود. سیلیسیوم دی‌اکسید یا سیلیکا فراوان‌ترین ماده سازنده پوسته زمین است. این ترکیب در طبیعت به دو شکل بلوری و بی‌شکل یافت می‌شود که ماده‌ای سفید رنگ با دمای ذوب و جوش بالا است. کاربرد سیلیس در تثبیت خاک بستگی زیادی به نوع و اندازه ذرات سیلیکا دارد که با لیزتر شدن ذرات سیلیکا تا حد نانو می‌توان پیوستگی بهتر در دانه بندی تا حد نانو و در نتیجه کمتر شدن منافذ بین آن‌ها با مقاومت بالاتر و دوام بیشتر و همچنین در عین حال دانه بندی سبک‌تری داشت. سیلیس یکی از معروف‌ترین موادی است که نقش مهمی در چسبندگی و پرکنندگی دارد. افزایش مقاومت در این شرایط به دلیل وجود بارهای سطحی بالا در ذرات نانوسیلیس بوده به طوری که این ماده به سرعت تمایل به کلوخه شدن دارد. این کلوخه شدن در عکس‌های SEM به وضوح قابل مشاهده شدن است. لذا این ذرات تمایل زیادی به جذب شدن در اطراف ذرات رسی دارند و همچنین دارای سطح ویژه بالاتری هستند. لذا با توجه به مترکم‌تر شدن خاک نفوذپذیری آن نیز کاهش می‌یابد. همچنین باید در نظر داشت که بر اساس بررسی میکروسکوپی SEM انجام شده در پژوهش‌های مختلف، نانوسیلیس‌های مصرفی می‌تواند دارای خصوصیات مختلف چه به لحاظ ابعاد ذرات و چه به لحاظ وضعیت کلوخه‌ای باشند. با بررسی نمودارهای پتانسیل رهمندگی افزودن کلسیم کربنات و آلومینیوم



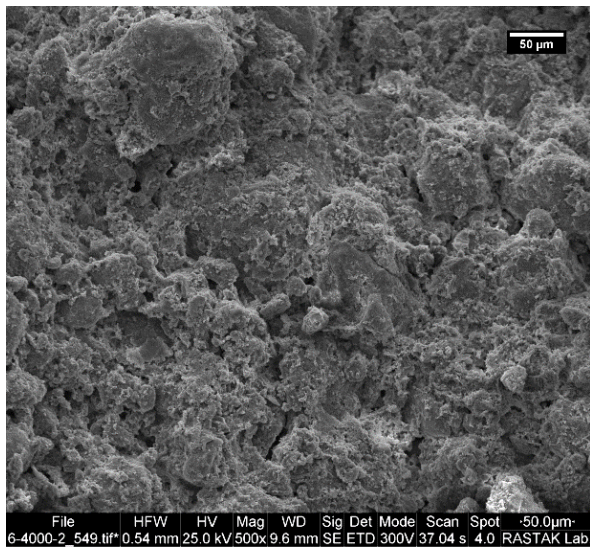
ب



الف

شکل ۱۰. تصاویر SEM خاک مورد مطالعه: الف) مقیاس ۵۰۰ نانومتر و ب) مقیاس ۵۰ میکرومتر

Fig. 10. The SEM images of the soil in a) 500 nm scale b) 50 μm scale



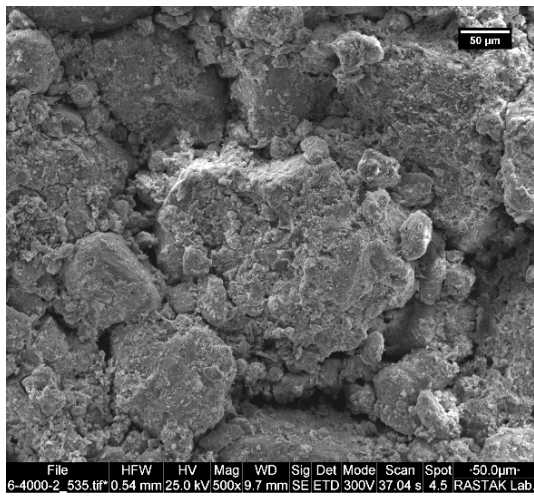
ب



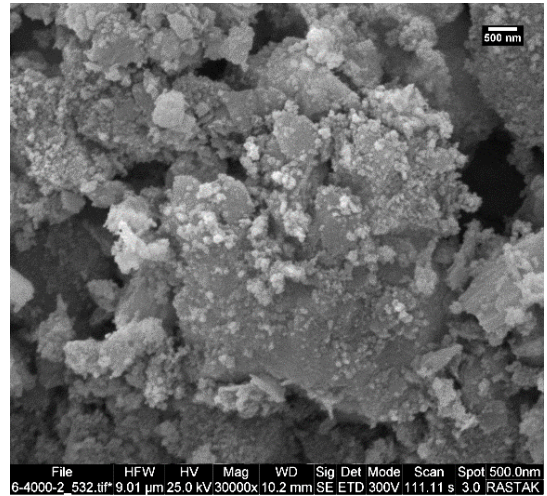
الف

شکل ۱۱. تصاویر SEM بر اثر افزودن نانورس به خاک مورد مطالعه: الف) مقیاس ۵۰۰ نانومتر و ب) مقیاس ۵۰ میکرومتر

Fig. 11. The SEM images of the effect of nanoclay addition to the soil in a) 500 nm scale b) 50 μm scale



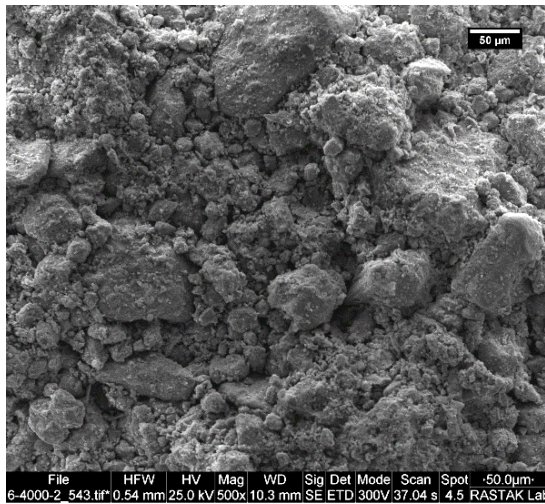
ب



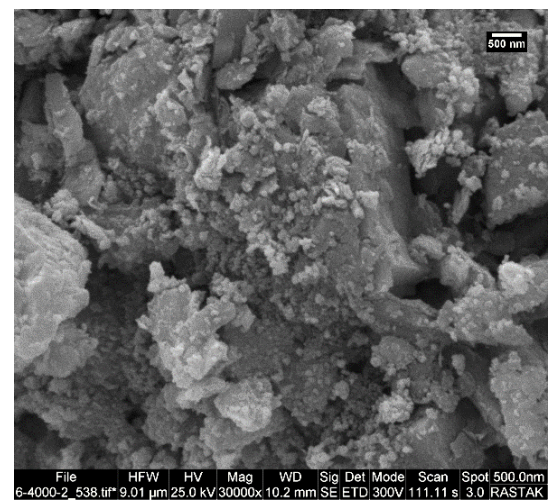
الف

شکل ۱۲. تصاویر SEM بر اثر افزودن نانوسیلیس به خاک مورد مطالعه: الف) مقیاس ۵۰۰ نانومتر و ب) مقیاس ۵۰ میکرومتر

Fig. 12. The SEM images of the effect of nanosilica addition to the soil in a) 500 nm scale b) 50 μm scale



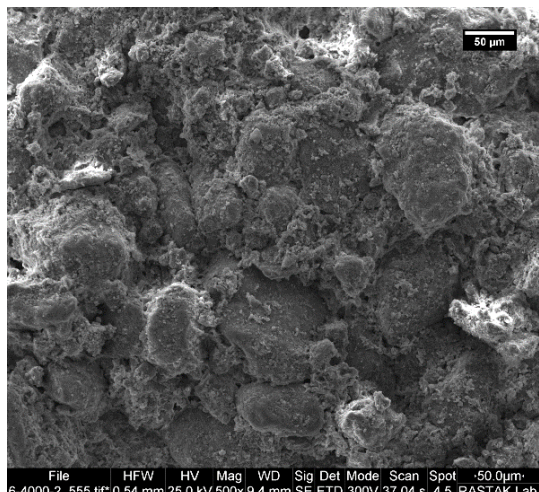
ب



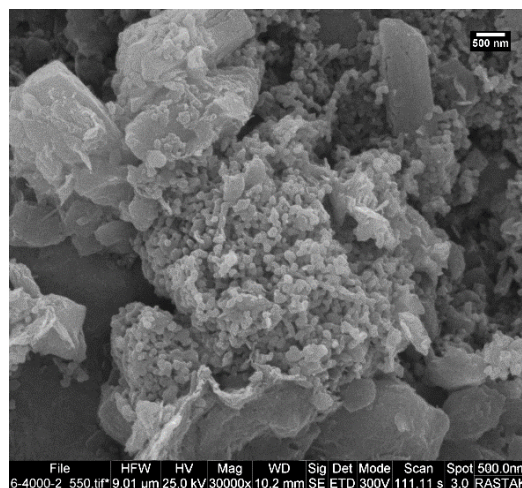
الف

شکل ۱۳. تصاویر SEM بر اثر افزودن نانوکلسیم کربنات به خاک مورد مطالعه: الف) مقیاس ۵۰۰ نانومتر و ب) مقیاس ۵۰ میکرومتر

Fig. 13. The SEM images of the effect of nano calcium carbonate addition to the soil in a) 500 nm



ب



الف

شکل ۱۴. تصاویر SEM بر اثر افزودن نانوالومینیوم اکسید به خاک مورد مطالعه: الف) مقیاس ۵۰۰ نانومتر و ب) مقیاس ۵۰ میکرومتر

Fig. 14. The SEM images of the effect of nano aluminium oxide addition to the soil in a) 500 nm scale b) 50 µm scale

ویژه بزرگ‌تر، پس با ذرات بیشتری از خاک پیوند برقرار کرده که این امر سبب کاهش بیشتر شاخص رمبندگی خاک شده است. اما آلومینیوم اکسید با آنکه دارای ظرفیت کاتیونی بالاتری نسبت به کلسیم کربنات است (+۳) که خود یک نکته مهم در توانایی جذب یون‌های منفی خاک بوده است، اما سطح ویژه پایین این ماده سبب ایجاد پیوندهای کمتری نسبت به سایر افزودنی‌های مورد مطالعه در این آزمایش‌ها شده است. مقایسه نتایج در اشکال (۱۱) تا (۱۴) نشان می‌دهد که نانو رس و نانو اکسید آلومینیوم قابلیت کریستالیزه کردن و ایجاد ساختار پولکی بیشتری نسبت به نانو سیلیس و نانو کربنات کلسیم دارند.

۴- نتیجه گیری

امروزه برای تثبیت خاک‌های مسئله‌دار علاوه بر روش‌های سنتی، از مواد نانو نیز استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر از چهار مواد نانو شامل نانوسیلیس، نانورس، نانو اکسید آلومینیوم و نانو کربنات کلسیم با درصد‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲٪ برای بهبود خاک استفاده شد. اثر افزودنی‌ها بر مقاومت برشی، مقدار چسبندگی و پتانسیل رمبندگی نمونه‌های مختلف بر روی خاک منطقه الله‌آباد شهر کرمان مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید.

۱- با افزودن مواد نانو (نانو اکسید آلومینیوم، نانو کلسیم کربنات، نانو رس و نانوسیلیس) به خاک شاخص رمبندگی کاهش یافت.

پیوندهای یونی و کاهش حفرات بین ذرات خاک می‌شوند. مطابق آزمایش میکروسکوپ الکترونی که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، با اضافه نمودن نانورس‌ها به خاک به علت سطح ویژه بالا و تأمین یون‌های مورد نیاز تشکیل دهنده کانی‌های رسی، پیوند کاذب بین ذرات از بین رفته و با در هم ریخته شدن این اسکلت حفرات خاک کاهش می‌یابند. در این حالت خاک ساختار متراکم‌تر و پولکی پیدا کرده و پتانسیل رمبندگی را کاهش می‌دهد. می‌کند. همچنین در شکل (۱۲) به نظر می‌رسد که واکنش نانوسیلیس و خاک باعث ایجاد ساختاری یکپارچه‌تر نسبت به نمونه خاک شاهد شده است. این واکنش‌ها باعث تشکیل ژل‌های سیمانی هیدرات‌های سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم همراه با کربنات کلسیم می‌شود. در نتیجه تشکیل ژل‌ها، اندازه حفرات ریزتر و در نتیجه به صورت کلی پوکی خاک کاهش می‌یابد. تشکیل و رشد این ترکیبات شیمیایی باعث پیوند بین ذرات و افزایش مقاومت مخلوط رس و مواد افزودنی، و همچنین باعث مسدود شدن و یا اشغال بخشی از حجم حفرات نیز می‌شود. همچنین و به این علت نانورس از آلومینیوم اکسید و کلسیم کربنات باعث کاهش بیشتری در شاخص رمبندگی خاک مورد مطالعه شده است.

با مقایسه تصاویر میکروسکوپی افزودنی‌های کلسیم کربنات و آلومینیوم اکسید در اشکال (۱۳) و (۱۴) می‌توان دریافت که در یک درصد افزودنی مشخص از هردو ماده، کلسیم کربنات به علت داشتن سطح ویژه سطح

به صورت کلی پوکی خاک کاهش یافته است.

۷- با مقایسه تصاویر میکروسکوپی افزودنی‌های کربنات کلسیم و اکسید آلومینیوم می‌توان دریافت که در یک درصد افزودنی مشخص از هردو ماده، کربنات کلسیم به علت داشتن سطح ویژه سطح ویژه بزرگ‌تر، با ذرات بیشتری از خاک پیوند برقرار کرده و این امر سبب کاهش بیشتر شاخص رمبندگی خاک شده است.

۸- نتایج حاصل مربوط به انجام مطالعات بر روی خاک رمبند منطقه کرمان است و احتمالاً خاکهای رمبند دیگر نتایج متفاوتی را در بر خواهد داشت.

منابع

- [1] A.H.H. S. Mohammadi Khan Abadi, Laboratory study of soil improvement using nanomaterials (case study on the soil of Sardareh-Garmsar region), Technical and Engineering Faculty, Garmsar University, 2018.
- [2] I. Jefferson, D. Evstatiev, D. Karastanev, The treatment of collapsible loess soils using cement materials, in: GeoCongress 2008: Geosustainability and geohazard mitigation, 2008, pp. 662-669.
- [3] A.A. Basma, E.R.J.J.o.G.E. Tuncer, Evaluation and control of collapsible soils, 118(10) (1992) 1491-1504.
- [4] K.M. Rollins, J.J.J.o.G. Kim, G. Engineering, Dynamic compaction of collapsible soils based on US case histories, 136(9) (2010) 1178-1186.
- [5] M. Khaleghi, M.J.S. Rowshanzamir, T. Research, Biologic improvement of a sandy soil using single and mixed cultures: A comparison study, 186 (2019) 112-119.
- [6] M. Khaleghi, M.A.J.J.o.C. Rowshanzamir, E. Engineering, Impact of Biologic Single and Mixed Medium on Mechanical-Hydraulic properties of Dune Sand, 52(109) (2023) 91-100.
- [7] I.S. Lori, M.M. Toufigh, V.J.C. Toufigh, B. Materials, Improvement of poorly graded sandy soil by using copper mine tailing dam sediments-based geopolymer and silica fume, 281 (2021) 122591.
- [8] V. Toufigh, R. Baghban Shokatabad, I. Sheikhsosseini Lori, A.M. Namjoo, M.M.J.I.G.J. Toufigh, Mechanical

۲- افزودن نانوسیلیس به خاک رس برای بهسازی خاک رمبند تأثیر بیشتری نسبت به اضافه کردن سایر افزودنی‌ها دارد علت این امر می‌تواند چگالی توده بسیار کم نانوسیلیس نسبت به باقی نانومواد به کار رفته باشد و همچنین نانو سیلیس به خوبی نقش پرکنندگی ایفا کرده است. نتایج نشان داد که با افزودن نانورس تا مقدار ۱ درصد وزنی پتانسیل رمبندگی کاهش بیشتری نسبت به افزودن نانو کلسیم کربنات تا میزان یک درصد وزنی خاک دارد. در مقادیر درصد وزنی ۱/۵ و ۲ درصد وزنی نانو کلسیم کربنات اثر بیشتری بر کاهش پتانسیل رمبندگی نسبت به نانو رس از خود نشان داد. افزودن نانو اکسید آلومینیوم بر پتانسیل رمبندگی خاک تأثیر داشته است اما در مقایسه با سایر افزودنی‌های استفاده شده اثر بسیار کمتری از خود نشان داده است.

۳- هرچه درصد نانو سیلیس و نانو کلسیم کربنات به خاک رمبند بیشتر گردید، اثر کاهش پتانسیل رمبندگی شدیدتر گردیده است، به عبارت دیگر شیب نمودار این دو ماده بیشتر از نانو رس و نانو اکسید آلومینیوم است. افزایش درصد نانو اکسید آلومینیوم تأثیر محسوسی بر کاهش مقدار پتانسیل رمبندگی خاک دارد. بیشترین کاهش پتانسیل رمبندگی با افزودن نانوسیلیس در مقدار ۲ درصد وزنی این ماده مشاهده گردید که درجه رمبندگی خاک مورد مطالعه را از پتانسیل رمبندگی شدید به پتانسیل رمبندگی متوسط رساند و تأثیر بسیار مطلوبی نسبت به سایر افزودنی‌ها از خود نشان داد.

۴- اکسیدهای Al_2O_3 و SiO_2 سهم بسیار زیادی در بین اکسیدهای عناصر نانورس دارند و نانورس به علت دارا بودن ترکیبات سیلیسی و آلومینی توانسته به عنوان ماده‌ای پوزولانی عمل کند. ماده سیلیسی یا سیلیسی-آلومینی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با دماهای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی به وجود آورد که خاصیت چسبندگی و سیمانی داشته است.

۵- به علت بالا بودن سطح ویژه نانو کربنات کلسیم توانایی اتصال و برقراری پیوندهای بیشتری با ذرات خاک داشته لذا سبب کاهش شاخص رمبندگی بیشتری گردیده است، اما اکسید آلومینیوم به علت آنکه سطح ویژه کمتری دارد تأثیر به مراتب کمتری نسبت به سایر افزودنی‌ها داشته است.

۶- واکنش نانوسیلیس و خاک باعث ایجاد ساختاری یکپارچه‌تر نسبت به خاک خالص شده است. این واکنش‌ها باعث تشکیل ژل‌های سیمانی هیدرات‌های سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم همراه با کربنات کلسیم گردیده است. در نتیجه تشکیل ژل‌ها، اندازه حفرات ریز تر و در نتیجه

- Gorgan loessial soil improved by nano-silica, lime and Portland cement, in: *From Fundamentals to Applications in Geotechnics*, IOS Press, 2015, pp. 1820-1827.
- [21] R. Kourmaev, Application of Physical-Chemical Properties of Bentonite Utilized In Construction, as viewed Through the TRIZ Prism.
- [22] C. El Mohtar, J. Clarke, A. Bobet, M. Santagata, V. Drnevich, C. Johnston, Cyclic response of a sand with thixotropic pore fluid, in: *Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics IV*, 2008, pp. 1-10.
- [23] T. Lan, P.D. Kaviratna, T.J.J.C.o.M. Pinnavaia, Mechanism of clay tactoid exfoliation in epoxy-clay nanocomposites, 7(11) (1995) 2144-2150.
- [24] V. Ouhadi, H. Bakhshalipour, Impact of nano clays on the behavior properties of collapsible soils, in: *9th International Congress on Advances in Civil Engineering*. Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 2010.
- [25] A. Johari, H. Golkarfard, F. Davoudi, A.J.B.o.E.G. Fazeli, t. Environment, A predictive model based on the experimental investigation of collapsible soil treatment using nano-clay in the Sivand Dam region, Iran, 80 (2021) 6725-6748.
- [26] B.J.E.g. Iranpour, The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment, 205 (2016) 40-53.
- [27] A.H.H.] S. Mohammadi Khan Abadi, Laboratory study of soil improvement using nanomaterials (case study on the soil of Sardareh-Garmsar region), 2018. (in Persian).
- [28] S.H.D.G. A. H. Haddad, Evaluation of the soil compaction potential of layered sandy soil stabilized with micro silica, bentonite, and rice husk ash Modeling in Engineering, 13(42) (2014) 87-101 (in Persian).
- [29] F.R. S. Hamanian, "Remediation of collapsing soils using injection method (Case study of Semnan railway station.), *Advanced Applied Geology Journal*, Shahid Chamran University, Ahvaz, , (2013) 0–16 , (in Persian).
- [30] R.L. Buhler, A.B. Cerato, Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and class C fly ash, in: *Problematic soils and rocks and in situ characterization*, 2007, pp. 1-10.
- Behavior's Enhancement of Sandy Soil by a Natural Pozzolan-Based Geopolymer and Nanomaterial, 53(2) (2023) 394-408.
- [9] J.N.A. M. Qazawi, Design and implementation methods of stone columns, Khajeh Nasir Toosi University of Technology Publications, 2010.
- [10] D.J.E.G. Evstatiev, Loess improvement methods, 25(2-4) (1988) 341-366.
- [11] G. Zhang, Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils, in: *Advances in measurement and modeling of soil behavior*, 2007, pp. 1-13.
- [12] A.W. Opukumo, C.T. Davie, S. Glendinning, E.J.J.o.E. Oborie, A. Science, A review of the identification methods and types of collapsible soils, 69(1) (2022) 1-21.
- [13] Z. Lin, S.J.E.G. Wang, Collapsibility and deformation characteristics of deep-seated loess in China, 25(2-4) (1988) 271-282.
- [14] M. Ayseldeen, A. Negm, M. El-Sawwaf, M.J.J.o.r.m. Kitazume, g. engineering, Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers, 9(2) (2017) 329-339.
- [15] A. AlShaba, T. Abdelaziz, A.J.A.e.j. Ragheb, Treatment of collapsible soils by mixing with iron powder, 57(4) (2018) 3737-3745.
- [16] M. Bahrami, S.J.I.J.o.E. Marandi, Large-scale experimental study on collapsible soil improvement using encased stone columns, 34(5) (2021) 1145-1155.
- [17] P.H. C. Bréchnignac, and M. Lehmann,, *Nanomaterials and nanochemistry.*, Springer Science & Business Media, (2008).
- [18] C.R.J.S. Martin, *Nanomaterials: a membrane-based synthetic approach*, 266(5193) (1994) 1961-1966.
- [19] A. Tabarsa, N. Latifi, C.L. Meehan, K.N.J.C. Manahiloh, B. Materials, Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay–A sustainable material for construction, 158 (2018) 454-463.
- [20] S.M. Haeri, A.M. Hosseini, M.M. Shahrabi, S. Soleymani, Comparison of strength characteristics of

- [37] M.Y. Fattah, M.M. Al-Ani, M.T.J.S. Al-Lamy, Foundations, Studying collapse potential of gypseous soil treated by grouting, 54(3) (2014) 396-404.
- [38] H.H. B. Nik Iqbal Sanikht, D. Niazi, A. Nikoyi,, , , Investigation of the biological effect on the improvement of soil drainage, in: 8th National Congress of Civil Engineering, Babol, 2013. (in Persian).
- [39] H. Alaei, 2018. (in Persian), H. Alaei, "Investigating the properties of soil stabilized with polymer materials,, Islamic Azad University, Najaf Abad branch,, 2018. (in Persian).
- [40] M.M. Abbas, A. Nazir, A.M. Nasr, M.A.J.J.o.E.R. Darweish, Utilization of Industrial Wastes for Improving Geotechnical Properties of Collapsible Soil, 5(1) (2021) 15-19.
- [41] D.J.T.A. Astm, Standard test method for measurement of collapse potential of soils, (1996).
- [31] Y. Zhang, Z. Zhang, Influence factor analysis on strength of lime-fly ash loess, (2013).
- [32] K. Abbeche, O. Bahloul, T. Ayadat, A. Bahloul, Treatment of collapsible soils by salts using the double consolidation method, in: Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils, 2010, pp. 69-78.
- [33] K. Abbeche, F. Hammoud, T. Ayadat, Influence of relative density and clay fraction on soils collapse, in: Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Springer, 2007, pp. 3-9.
- [34] P. Arrúa, G. Aiassa, M.J.G.J. Eberhardt, Behavior of collapsible loessic soil after interparticle cementation, 1(2) (2011) 130-135.
- [35] A.-M. Mohamed, M.J.I.J.o.G.E. El Gamal, Treatment of collapsible soils using sulfur cement, 6(1) (2012) 65-77.
- [36] M. Alizadeh Rafiei, Improvement of a collapsible soil by injection method, Imam Khomeini International University, Qazvin, 2009. (in Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. A. Soltaninejad, M. Mokhberi, S. M. Marandi, *Experimental Investigation on Geotechnical Behavior of Collapsible Soils Improved with Nanomaterials*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(10) (2024) 2091-2112.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21956.7862



