



بررسی تأثیر سیمان پرتلند و نانو رس بر پتانسیل فروریزش و شاخص‌های تحکیم خاک فروریزشی

مصطفی زمانیان^{*}، فاطمه قهرمانی

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، تهران، ایران

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷-۰۹-۱۲
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۰۸
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۱-۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۰۹

کلمات کلیدی:

خاک فروریزشی
پتانسیل فروریزش
بهسازی خاک
سیمان پرتلند
نانو رس

خلاصه: فروریزش، کاهش حجم ناگهانی خاک با افزایش رطوبت است که در اثر از بین رفتن مقاومت عوامل پیونددهنده ذرات رخ می‌دهد. خاک‌های فروریزشی در مناطق وسیعی از جهان و در نواحی گرمسیری ایران، یافت می‌شوند. وقوع فروریزش می‌تواند خسارتهای زیادی به تاسیسات و سازه‌های مجاور خاک تحمیل کند. بنابراین مطالعه رفتار خاک‌های فروریزشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق تثبیت خاک فروریزشی منطقه سرکویر سمنان که از نوع لای با پیوندهای ضعیف رسی است، توسط سیمان پرتلند و نانو رس مورد مطالعه قرار گرفت. سیمان به مقدار ۰/۵، ۱ و ۲/۵ و نانو رس به مقدار ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد وزنی خاک خشک، به خاک فروریزشی اضافه شدند. نمونه‌ها با دانسیته نسبی ۱۴ کیلونیوتون بر متر مکعب و درصد رطوبت ۵٪، آماده شدند. با انجام آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های بهسازی شده پس از ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، شاخص فروریزش مطابق با استاندارد ASTM D ۵۳۳۳ تعیین شد. نتایج نشان داد که هر دو ماده سیمان و نانو رس می‌توانند پتانسیل فروریزش را کاهش دهند. عملکرد بهسازی به‌طور قابل توجهی به مقدار ماده افزودنی و نیز زمان عمل‌آوری وابسته بود. بهترین عملکرد بهسازی در مقادیر پائین نانو رس مشاهده شد و با افزایش مقدار نانو رس، بازده بهسازی کاهش یافت. برخلاف سیمان، فرآیند تثبیت با نانو رس نسبتاً سریع بود و با تبخیر آب درون خاک، تکمیل شد. علاوه بر این، در این تحقیق با عکس‌برداری میکروسکوپی از نمونه‌های بهسازی شده و بهسازی نشده، رفتار خاک از دیدگاه میکرومکانیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

۱- مقدمه

نوع خاک‌ها بیشتر در نواحی خشک و نیمه‌خشک یافت می‌شوند. خاک‌های فروریزشی، عمدتاً از نوع ماسه و لای بادرستی^۱ یا لس هستند. این خاک‌ها در حالت طبیعی دارای نسبت تخلخل بالا، دانسیته نسبی پایین، درصد رطوبت پایین و پیوندهای بین‌ذره‌ای ضعیف هستند [۲]. خاک‌های فروریزشی هنگامی که در درجه اشباع پایین و یا در شرایط خشک قرار دارند، به‌واسطه وجود پیوندهای بین‌دانه‌ای و مکش ساختاری (اختلاف فشار هوا و آب حفره‌ای)، مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. در یک تنش مشخص، چنانچه مقدار رطوبت به مقدار رطوبت بحرانی افزایش یابد، تغییر شکل‌های ناگهانی بزرگی در آن‌ها

خاک‌های فروریزشی^۱ از جمله خاک‌های مسئله‌دار^۲ هستند که در مناطق وسیعی از جهان و همچنین در نواحی شرقی و مرکزی ایران، یافت می‌شوند. لس^۳ به‌عنوان یک خاک فروریزشی، حدود ۱۰٪ از سطح کره زمین را در برمی‌گیرد [۱]. پدیده فروریزش عبارت است از کاهش حجم ناگهانی خاک در اثر افزایش رطوبت و اغلب در اثر دست رفتن مقاومت عامل پیونددهنده ذرات خاک رخ می‌دهد. این

- 1 Collapsible soils
- 2 Problematic soils
- 3 Loess

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_zamanian@sbu.ac.ir



رخ می‌دهد. با افزایش درصد رطوبت، پیوندهای بین‌دانه‌ای (باند‌های نمکی یا کلسیتی و یا پل‌های رسی) که از عوامل اصلی نگه‌دارنده ساختار هستند، از بین می‌روند [۳-۵]. رفتار خاک‌های فروریزی در مواجهه با رطوبت مورد توجه محققین زیادی بوده است [۶-۱۸]. سیمان و آهک به‌عنوان دو ماده تثبیت‌کننده پرکاربرد، به‌طور وسیعی برای بهبود خواص خاک فروریزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۶-۱۹].

آنجلووا^۱ مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های خاک لس تثبیت‌شده با افزودن ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان را مطالعه کرد و مشاهده کرد که با افزایش درصد سیمان، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد [۲۷]. ساریوسری و مهانتان^۲ خصوصیات مهندسی خاک لس اصلاح‌شده با مقادیر مختلف سیمان پسماند کوره را بررسی و آن را با خاک اصلاح‌شده با سیمان پرتلند مقایسه کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزودن هردو ماده تثبیت‌کننده، شاخص خمیری و درصد رطوبت بهینه را افزایش می‌دهند. همچنین با افزایش درصد سیمان پرتلند تا ۵٪، مقاومت فشاری محصور نشده و مدول الاستیسیته افزایش می‌یابند درحالی‌که این افزایش تنها در درصدهای بالای سیمان پسماند کوره اتفاق می‌افتد. البته در یک نسبت اختلاط مشخص، سیمان پسماند کوره نسبت به سیمان پرتلند به‌مراتب تأثیر کمتری داشت [۲۸]. آرووا^۳ و همکارانش، رفتار خاک لس تثبیت‌شده با سیمان را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزودن بیش از ۷/۵ درصد سیمان و پس از گذشت ۱۵ روز، خصوصیات مکانیکی خاک به طرز چشمگیری بهبود یافته و آن را برای استفاده در پروژه‌های عمرانی مناسب می‌نماید [۲۹]. محمد و ال-گمال^۴ هم در تحقیقی به مقایسه اثر سیمان سولفوری و سیمان پرتلند بر روی خاک فروریزی پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت خاک بهسازی شده با سیمان سولفوری حدوداً ۳ برابر بیشتر از نمونه‌های بهسازی شده با سیمان پرتلند است [۳۰]. نورزاد و پاک‌نیت اثر ۴ ماده تثبیت‌کننده سیمان پسماند کوره، آهک، آمونیوم سولفات و پتاسیم کلرید بر خاک فروریزی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در شرایط اختلاط و عمل‌آوری یکسان، نمونه‌های تثبیت‌شده با ۳٪ سیمان پسماند کوره، شاخص فروریزش

کمتری نسبت به نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک دارند. آن‌ها همچنین با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش بر روی نمونه‌های تثبیت‌شده با آمونیوم سولفات و پتاسیم کلرید نشان دادند هر ۲ ماده مورد استفاده، شاخص فروریزش را کاهش می‌دهند. با این حال و در شرایط یکسان، اثر نمک سولفات آمونیوم نسبت به پتاسیم کلرید بیشتر است [۳۱]. در دهه اخیر نانو مواد به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده جهت بهبود خواص فروریزی خاک‌ها مورد توجه و استفاده محققین قرار گرفته است [۳۲-۳۶]. کریم و همکارانش، با افزودن دو ماده بنتونیت و کائولینیت در مقیاس نانو، اصلاح خصوصیات مکانیکی خاک ماسه‌ای گچ دار و فروریزی بغداد را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پتانسیل فروریزش خاک با افزودن ۱۰٪ از هریک از نانو مواد کائولینیت و بنتونیت به ترتیب در حدود ۸۰٪ و ۸۲٪ کاهش می‌یابد [۳۷]. وکیلی در پژوهش خود برای تثبیت خاک‌های فروریزی از سیمان و آهک استفاده کرد. نتایج تحقیق او نشان داد که با افزودن ۳٪ سیمان به خاک و اضافه کردن ۱ تا ۵٪ آهک به خاک فروریزی و افزایش زمان عمل‌آوری، می‌توان پتانسیل فروریزش را کنترل کرد [۳۸]. می^۵ و همکارانش با افزودن مقادیر ۳، ۷ و ۱۰٪ سیمان پرتلند به خاک لس، دو آزمایش سه محوری و فشاری محصور نشده را به ترتیب برای تخمین میزان بهبود مقاومت برشی و مقاومت فشاری محصور نشده انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن سیمان پرتلند به لس می‌تواند به شکل مؤثری پارامترهای مقاومت برشی لس را بهبود بخشد [۳۹]. حائری و همکاران، مطالعه‌ای در خصوص ارزیابی پتانسیل فروریزش خاک گرگان با نانو مواد انجام دادند. نمونه‌ها با افزودن نانو سیلیکا، آهک و سیمان تثبیت شدند [۴۰]. در تحقیقی دیگر، حائری و همکارانش به بررسی مقاومتی نمونه‌های تثبیت‌شده خاک فروریزی با نانو سیلیکا پرداختند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، افزودن نانو سیلیکا حتی به مقدار کم (کمتر از ۱٪) به خاک فروریزی منجر به افزایش خصوصیات مقاومتی به میزان قابل‌توجهی شد [۴۱]. داودی اثر نانو رس بر بهسازی خصوصیات رمبندگی خاک منطقه سیوند فارس را مورد بررسی قرار داد. وی در این پژوهش نمونه‌های بازسازی‌شده به روش اختلاط با درصدهای متفاوت نانو رس را مورد آزمایش قرار داد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها بیانگر بهبود شرایط رمبندگی خاک

1 Angelova
2 Sariosseiri and Muhunthan
3 Arrúa
4 Mohamed and El Gamal

رطوبت و تراکم نسبی در محل ساخته شدند تا صرفاً اثر مواد افزودنی بر بهبود خصوصیات خاک، مورد ارزیابی قرار گیرد. زمان عمل‌آوری نیز به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در روند بهبود مقاومت خاک، مورد ارزیابی قرار گرفت و رفتار نمونه‌ها پس از ۷، ۱۴ و ۲۸ روز بررسی شد. علاوه بر این، در این تحقیق با عکس‌برداری میکروسکوپی از نمونه‌های بهسازی شده، روند بهبود مقاومت و فرضیه‌های ارائه‌شده در این زمینه مورد ارزیابی مجدد قرار گرفت.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- خاک مورد آزمایش

خاک‌های فروریزی در بخش‌های مرکزی ایران، مانند استان سمنان، باعث ایجاد مشکلات زیادی برای جاده‌ها و مسیرهای راه‌آهن شده است. وجود ترک‌های در نزدیکی مسیر راه‌آهن سمنان- تهران نشانه‌ای از وجود خاک فروریزی در این منطقه است که با انجام مطالعات تکمیلی وجود خاک فروریزی در این محل مشخص شده است. به همین دلیل نمونه‌های خاک مورد استفاده در این تحقیق، از منطقه سرکوپر واقع در استان سمنان اخذ شد. موقعیت مکانی محل اخذ نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

با انجام آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری مطابق با استاندارد ASTM D 422 نوع دانه‌بندی خاک مشخص شد. منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل ۲ ارائه شده است. در جدول ۱ نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ (ASTM D 4318)، تراکم استاندارد (ASTM D 698) و چگالی ویژه دانه‌های خاک (ASTM D 854) ارائه شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی و نیز حدود اتربرگ، خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد، در رده خاک‌های سیلتی با خاصیت خمیری کم (ML) قرار می‌گیرد.

برای تعیین پتانسیل فروریزش خاک مورد مطالعه با برداشت خاک سطحی، اقدام به نمونه‌گیری دست‌نخورده از عمق ۱ متری سطح زمین شد. نمونه‌های دست‌نخورده داخل رینگ فلزی تحکیم قرار گرفته و آزمایش تعیین پتانسیل ریمبندگی خاک مطابق با معیار ASTM D 5333 انجام شد [۴۴]. این معیار مبتنی بر آزمایش تحکیم یگانه است و با استفاده از دستگاه تحکیم (ادنومتر) انجام می‌شود. از پارامترهای مهم خاک که از آزمایش تحکیم به دست می‌آیند،

با استفاده از نانو رس بود و نشان داد که با افزودن ۵ درصد نانو رس، پتانسیل ریمبندگی خاک تقریباً به‌طور کامل از بین می‌رود [۴۲]. ایرانپور و همکارانش، به مطالعه آزمایشگاهی اثر نانو مواد بر رفتار خاک فروریزی پرداختند. آن‌ها با افزودن نانو رس، نانو مس، نانو آلومینیوم و نانو سیلیکا به نمونه‌های بازسازی‌شده با دانسیته نسبی و رطوبت طبیعی در محل، پتانسیل فروریزی خاک سمنان را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌داد افزودن نانو مواد به خاک در درصدهای کم مؤثر بوده اما در صورتی که مقدار آن از حد بهینه تجاوز کند، می‌تواند بر روی رفتار مکانیکی خاک تأثیر منفی نیز داشته باشد. آن‌ها در مورد نمونه‌های تثبیت‌شده با نانو آلومینیوم، کمترین پتانسیل فروریزش را در نمونه‌های بهسازی شده با مقدار ۰/۱٪ نانو آلومینیوم گزارش کردند که این امر در مورد نمونه تثبیت‌شده با نانو رس نیز صادق بود. آن‌ها در نهایت بیان کردند که نانو رس به دلیل داشتن سطح ویژه بزرگ‌تر نسبت به نانو سیلیکا، اثر کاهشی بیشتری بر پتانسیل فروریزش خاک داشته است. در حالی که در نانو آلومینیوم و نانو مس این اثر چندان قابل توجه نبوده و حتی در مواردی اثر معکوس نیز مشاهده شده است [۴۳].

همان‌طور که اشاره شد، تحقیقات گسترده‌ای با هدف کاهش پتانسیل ریمبندگی در خاک‌های فروریزی با استفاده از مواد افزودنی مختلف انجام شده است. نکته قابل توجه در این تحقیق‌ها استفاده از مقادیر مختلف مواد افزودنی جهت بهسازی خاک است. با توجه به قیمت بالای مواد افزودنی، به‌خصوص نانو مواد، لزوم بررسی و ارائه یک مقدار بهینه جهت کاهش پتانسیل ریمبندگی با استفاده از این مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین منظور در این تحقیق یک مطالعه آزمایشگاهی مدون جهت بررسی تأثیر مواد افزودنی و نیز اثرات زمان عمل‌آوری بر روی خصوصیات فروریزی خاک انجام شد. در این راستا از دو نوع ماده افزودنی استفاده شد و سعی شد مقدار بهینه این مواد مشخص شود. از سیمان به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده در دسترس و پرکاربرد و نانو رس به‌عنوان یک افزودنی جدید استفاده شد. سیمان با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱ و ۲/۵ و نانو رس با نسبت وزنی ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد نسبت به خاک خشک، به خاک فروریزی سمنان افزوده شدند. از آنجاکه افزایش تراکم خاک می‌تواند به‌عنوان یک روش بهسازی به‌طور قابل توجهی پتانسیل فروریزش خاک را کاهش دهد، نمونه‌های خاک با درصد



شکل ۱. محل نمونه‌گیری از خاک فروریزشی سمنان
Fig. 1. Location of sampling from the collapsible soil, Semnan

تحکیم مرسوم است. مقدار تنش قائم به صورت گام‌های افزایشی از ۵ به ۲۰۰ کیلو پاسکال (۵، ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰) و در فواصل زمانی یک ساعت بر نمونه اعمال می‌شود. در مقدار تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال و پس از گذشت یک ساعت، نمونه با آب غرقاب شده و تا ۲۴ ساعت به آن اجازه تحکیم داده می‌شود. در این مدت تغییر شکل نمونه در زمان‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰ و ۱۴۴۰ دقیقه پس از غرقاب کردن، ثبت می‌شوند. در نهایت مقدار تغییر شکل نهایی نمونه پس از گذشت ۲۴ ساعت و در تنش ثابت ۲۰۰ کیلو پاسکال ثبت می‌شود. بر این اساس شاخص فروریزش (I_e) را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

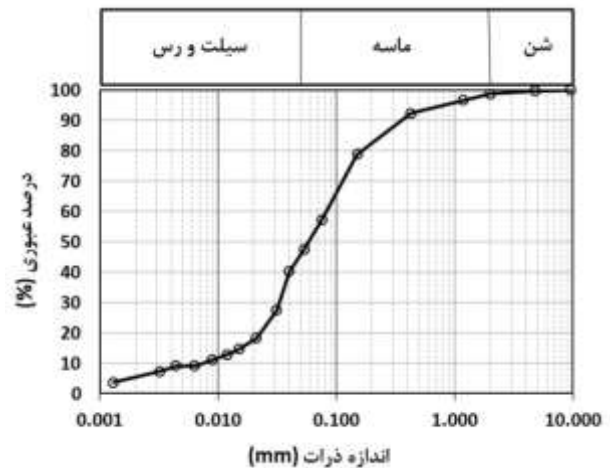
$$I_e = \frac{\Delta e_c}{1 + e_0} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه، Δe تغییرات نسبت تخلخل برای بارگذاری ۲۰۰ کیلو پاسکال و e نسبت تخلخل اولیه خاک می‌باشند. با توجه به ماهیت یک‌بعدی آزمایش تحکیم، می‌توان مقدار شاخص فروریزش را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$I_e = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه Δh ، تغییر در ارتفاع نمونه ناشی از جذب آب (mm) در تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال و h_0 ارتفاع اولیه نمونه (mm) خاک است.

بر اساس معیار ASTM شاخص فروریزش خاک‌های فروریزشی



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک فروریزشی منطقه سرکوبر سمنان
Fig. 2. Particle size distribution curve of collapsible soil, Sarkavir, Semnan

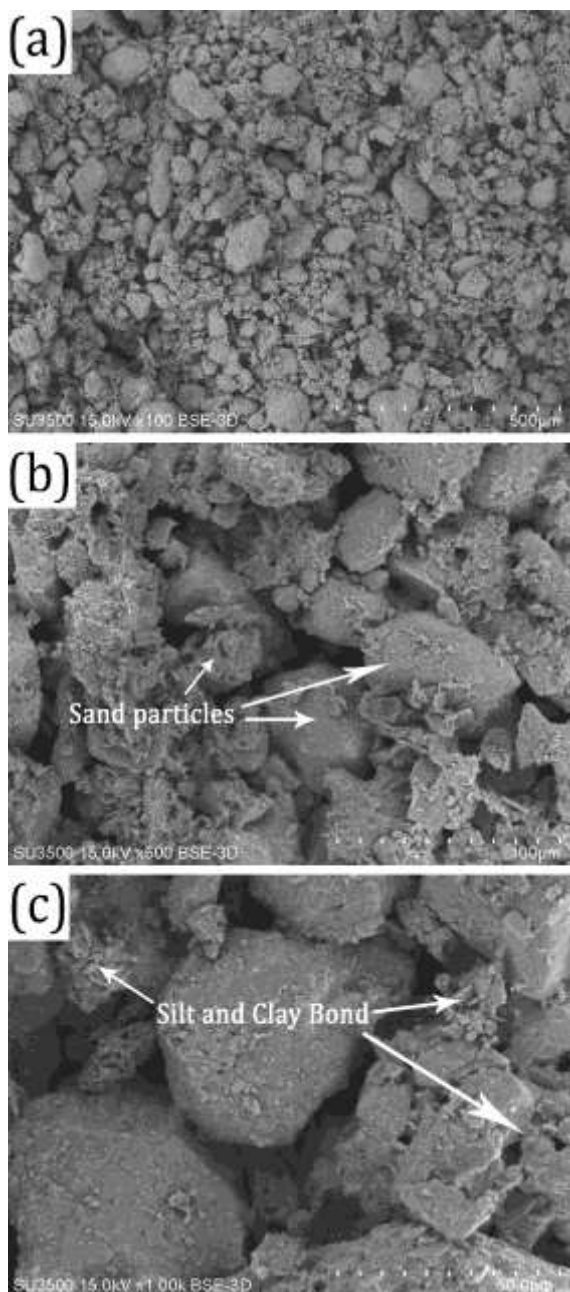
جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک فروریزشی مورد آزمایش
Table 1. Physical specification of tested collapsible soil

e_0	$\left(\frac{gr}{cm^3}\right)\gamma_d$	ω_0	PI	PL	LL	G_s
۰/۹۱۴	۱/۴	۵	۳	۲۰	۲۳	۲/۶۸

شاخص‌های تراکم شامل شاخص فشردگی^۱ (C_c) و شاخص تورم^۲ (C_s) هستند.

روند انجام آزمایش تعیین شاخص فروریزش مشابه با آزمایش

1 Compression Index
2 Swelling Index



شکل ۴. تصاویر SEM از ساختار خاک دست‌نخورده و فروریزی در بزرگنمایی (الف) ۱۰۰ برابر، (ب) ۵۰۰ برابر و (ج) ۱۰۰۰ برابر
 Fig. 41. SEM image from the structure of undisturbed collapsible soil: (a) 100X, (b) 500X, (c) 1000X

۲-۲- مشخصات مواد افزودنی

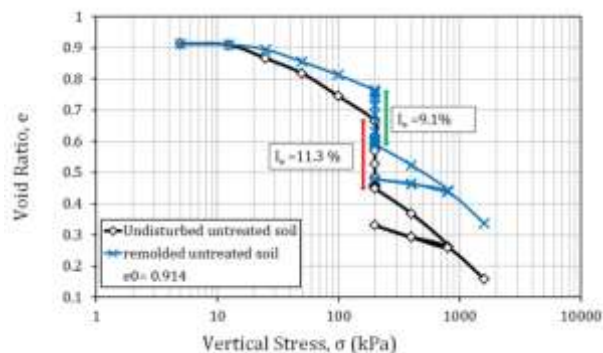
۲-۲-۱- سیمان

در این تحقیق برای بهسازی خاک فروریزی از دو ماده افزودنی سیمان و نانو رس استفاده شد. سیمان از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ ساخت کارخانه سیمان غرب و چگالی دانه‌های سیمان ۳/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و بلین آن ۳۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم است.

جدول ۲. رده‌بندی شاخص رمبندگی بر اساس معیار ASTM [۴۴]

Table 2. Collapse classification based of ASTM criteria [44]

شاخص رمبندگی I _e (%)	۰	۰/۱-۲	۲/۱-۶	۶/۱-۱۰	>۱۰
درجه رمبندگی	غیررمبند	کم	متوسط	نسبتاً شدید	شدید



شکل ۳. نتایج آزمایش تعیین پتانسیل فروریزش خاک دست‌نخورده و خاک بازسازی‌شده منطقه سرکویر سمنان

Fig. 3. Collapse potential tests result of undisturbed and reconstituted soil of Sarkavir, Semnan

را می‌توان مطابق با جدول ۲ تقسیم‌بندی کرد.

نتایج آزمایش تعیین پتانسیل فروریزش خاک سمنان در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد خاک بکر در رده خاک‌های با پتانسیل فروریزش شدید ($I_e = 11.3\%$) قرار می‌گیرد. با توجه به روش بهسازی، نمونه‌های دست‌خورده و بهسازی نشده با درصد تراکم و رطوبت مشابه با نمونه بکر ساخته شدند. نتایج آزمایش تعیین پتانسیل فروریزش بر روی این نمونه‌ها نشان داد که پتانسیل فروریزش نمونه‌های دست‌خورده نیز در محدوده نسبتاً شدید ($I_e = 9.1\%$) قرار دارد. به عبارت دیگر با دقت مناسبی می‌توان رفتار فروریزی خاک دست‌خورده را با خاک بکر مقایسه نمود.

شکل ۴، تصاویر گرفته‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) از بافت خاک بهسازی نشده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۴-الف مشخص است، بافت خاک شامل یک محیط متخلخل با توزیع تصادفی حفرات با اندازه‌های مختلف است که عمدتاً از دانه‌های ریز ماسه و سیلت تشکیل شده است. دانه‌های سیلت با پیوندهای رسی و یا کلسیت در کنار هم قرار دارند. این پیوندها در شکل ۴-ج نشان داده شده‌اند.



شکل ۵. تصاویری از (الف) خاک فروریزی منطقه سرکوبر سمنان، (ب) نمونه خاک بهسازی شده با نانو رس، (ج) نانو رس ساخت شرکت سیگماآلدریک و (د) سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان غرب

Fig. 5. Image of: (a) collapsible soil of Sarkavir, Semnan; (b) specimens treated by Nano-clay; (c) nano-clay from Sigma Aldrich, (d) Portland cement type II from Siman Gharb company

یونی نانو رس مورد استفاده ۴۸ meq/100gr (میلی اکی والان در هر ۱۰۰ گرم خاک خشک) بوده که مقدار نسبتاً بالایی در مقایسه با سایر رس‌ها است. بالا بودن ضریب تبادل یونی نشان‌دهنده تمایل بالای نانو رس به تبادل یونی (تبادل کاتیونی) با ذرات خاک و یا خود ذرات نانو رس است. مشخصات نانو رس مورد استفاده، در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۵ تصاویری از محل نمونه‌گیری از خاک فروریزی منطقه سرکوبر سمنان (شکل ۵-الف) به همراه یک نمونه خاک بهسازی شده با نانو رس (شکل ۵-ب)، نانو رس ساخت شرکت سیگماآلدریک (شکل ۵-ج) و سیمان نوع دو محصول کارخانه سیمان غرب (شکل ۵-د) ارائه شده است.

۳-۲- روش انجام آزمایش

نمونه‌های خاک فروریزی به صورت یکنواخت با مواد تثبیت‌کننده مخلوط شده و با وزن مخصوص و رطوبت طبیعی مشابه با نمونه‌های بکر بازسازی شدند. مقدار نسبت وزنی سیمان به وزن خاک خشک ۰/۵، ۱ و ۲/۵ درصد انتخاب شد. برای نمونه‌های بازسازی شده با نانو رس، نسبت وزن نانو مواد به وزن خاک خشک، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد تعیین شد.

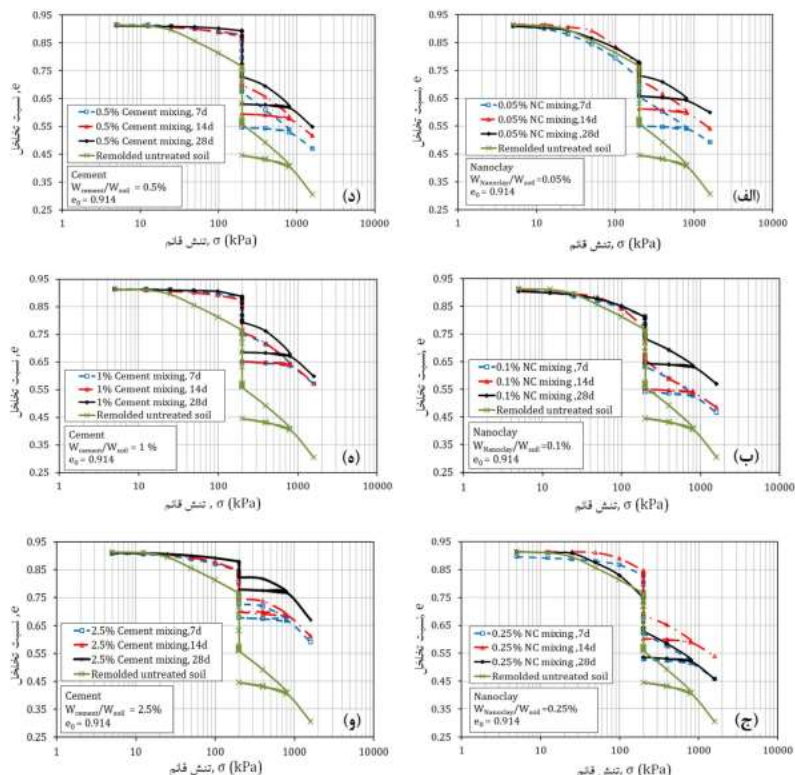
جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانو رس

Table 3. Physical and mechanical specification of Nano-clay

واحد	مونت موریلونیت	نوع کانی
gr/cm ³	0.5-0.7	چگالی دانه‌ها
nm	1-2	اندازه ذرات
m ² /gr	220-270	مساحت سطح ویژه
meg/100gr	48	ضریب تبادل یونی
-	زرد روشن	رنگ
%	1-2	رطوبت

۲-۲-۲ - نانو رس

نانو رس مورد استفاده از جنس کانی مونت‌موریلونیت محصول کارخانه سیگماآلدریچ (Sigma aldrich) با خلوص بالای ۹۹ درصد است. اندازه سطح ویژه ذرات نانو رس برابر با ۲۲۰-۲۷۰ مترمربع بر گرم است. مساحت سطح ویژه نانو رس یکی از مهم‌ترین فاکتورهای ایجاد واکنش‌های شیمیایی ذرات در خاک به شمار می‌رود. این ویژگی سبب می‌شود که نواحی فعال و گروه‌های عامل موجود در ساختار نانو رس به میزان بیشتری در تماس با خاک قرار گیرند و به تبع آن قدرت جذب شیمیایی نانو رس تقویت خواهد شد. همچنین ضریب تبادل



شکل ۶. نتایج آزمایش‌های تعیین شاخص فروریزش در نمونه‌های بهسازی شده به روش اختلاط با (الف) ۰/۰۵٪ نانو رس، (ب) ۰/۰۱٪ نانو رس، (ج) ۰/۲۵٪ نانو رس و (د) ۰/۵٪ سیمان،

(ه) ۱٪ سیمان، (و) ۲/۵٪ سیمان

Fig. 6. The result of collapse potential for specimens treated by mixing with: (a) 0.05% wt. Nano-clay; (b) 0.1% wt. Nano-clay; (c) 0.25% wt. Nano-clay; (d) 0.5% wt. cement; (e) 1% wt. cement; (f) 2.5% wt. cement;

تراکم هر لایه، سطح آن توسط یک تیغ خراش داده شد. برای حفظ رطوبت نمونه‌ها، رینگ‌های حاوی نمونه با چندلایه پلاستیک محصور شدند و سپس درون محفظه‌ای با دما و رطوبت ثابت قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از گذشت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز از محفظه خارج شده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

در این تحقیق پس از تعیین شاخص فروریزش، به منظور بررسی رفتار خاک در شرایط پس از وقوع فروریزش، آزمایش تحکیم در مقادیر تنش‌های بالاتر انجام شد. همچنین یک چرخه باربرداری و بارگذاری مجدد به منظور تعیین شاخص تورم، در تنش ۸۰۰ کیلو پاسکال اعمال شد. در این مرحله مقدار تنش طی دو مرحله از ۸۰۰ به ۲۰۰ کیلو پاسکال رسید و سپس بارگذاری مجدد تا مقدار تنش ۱۶۰۰ کیلو پاسکال ادامه یافت.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۶ نتایج آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های بهسازی شده با درصد‌های مختلف سیمان و نانو رس در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت

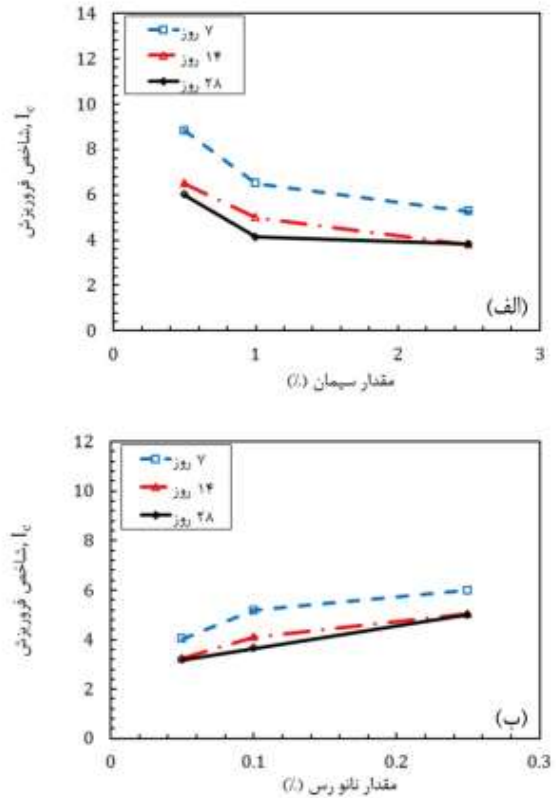
در ابتدا خاک فروریزی به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار گرفت تا کاملاً خشک شود. بنا بر پیشنهاد طاها و طاها^۱ برای اختلاط همگن نمونه‌ها با ماده افزودنی، در ابتدا مصالح خاک و ماده افزودنی به صورت خشک با هم مخلوط شدند و سپس رطوبت موردنظر با افزودن آب به این مخلوط و اختلاط مجدد بدست آمد [۴۵]. سپس با توجه به ابعاد رینگ فلزی دستگاه تحکیم (قطر ۷/۵ و ارتفاع ۲ سانتی‌متر)، مقدار مشخصی از خاک خشک با درصد‌های وزنی مشخص از مصالح تثبیت‌کننده، جهت تهیه نمونه‌هایی با وزن مخصوص و رطوبت نسبی مشابه با نمونه‌های در محل آماده شد. لازم به ذکر است که رطوبت نسبی و وزن مخصوص طبیعی خاک به ترتیب ۵ درصد و ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. نمونه‌ها با استفاده از روش کوبش مرطوب^۲ در سه لایه درون رینگ تحکیم ساخته شدند. برای ایجاد یکنواختی دانسیته نمونه در ارتفاع نمونه‌ها، از فن تراکم کاهش‌یافته^۳ استفاده شد [۴۶]. همچنین جهت ایجاد پیوستگی بین لایه‌های خاک، پس از

1 Taha, O.M.E. Taha
2 Moist Tamping
3 Under Compaction

کاهش پتانسیل فروریزش خواهد شد. با افزایش مقدار سیمان، پل‌های سیمانی بیشتری بین ذرات خاک شکل گرفته و پتانسیل فروریزش کاهش خواهد یافت. علاوه بر این، در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان، فرآیند کاهش پتانسیل فروریزش با گذشت زمان ادامه می‌یابد. کاهش شاخص فروریزش در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان تحت تأثیر دو فرآیند هیدراسیون سیمان و انجام واکنش‌های پوزولانی با خاک است. در ابتدای زمان عمل‌آوری و مراحل اولیه بهسازی، هیدراسیون سیمان منجر به شکل‌گیری پل‌های سیمانی در خاک شده و موجب کاهش شاخص فروریزش می‌شود. پس از این مرحله و با گذشت زمان، واکنش‌های پوزولانی بین سیمان و ذرات خاک شکل می‌گیرد. با تکمیل واکنش‌های پوزولانی در طول زمان، اتصالات سیمانی منجر به تقویت بیشتر ساختار خاک و به تبع آن افت شاخص فروریزش خواهند شد. تصاویر میکروسکوپی از ساختار خاک بهسازی شده با مقادیر مختلف سیمان نیز بیانگر این موضوع است (شکل ۸). همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزایش درصد سیمان، علاوه بر پر شدن حفرات خالی خاک، اتصالات سیمانی بیشتری بین دانه‌های خاک شکل گرفته است.

با توجه به روند بهسازی خاک در مقادیر مختلف سیمان، می‌توان گفت مقدار بهینه سیمان مورد استفاده برای کاهش پتانسیل فروریزش ۱٪ است که پس از گذشت ۲۸ روز موجب افت شاخص فروریزش از حدود ۹ به کمتر از ۴ می‌شود که بیش از ۵۰٪ بازده بهسازی را نشان می‌دهد.

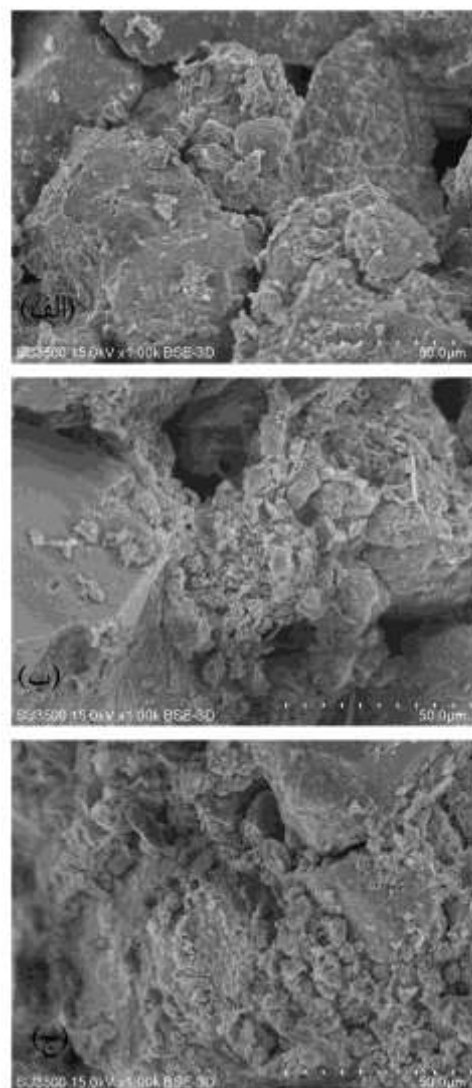
فرآیند بهسازی خاک با نانو رس متفاوت از سیمان است. برخلاف نمونه‌های بهسازی شده با سیمان، در نمونه‌های بهسازی شده با نانو رس، پس از گذشت ۱۴ روز افت زیادی در شاخص فروریزش مشاهده نمی‌شود. با توجه به مقدار کم نانو رس استفاده‌شده برای بهسازی، فرآیند تثبیت با نانو رس تنها از طریق تقویت اتصالات بین‌دانه‌ای امکان‌پذیر خواهد بود. نانو رس سطح ویژه بالایی دارد که این ویژگی موجب تماس بیشتر بین نواحی فعال و گروه‌های عامل موجود در ساختار نانو رس با محیط شده و بدین ترتیب قدرت جذب شیمیایی این ماده تقویت می‌شود. ذرات نانو رس همچنین به دلیل دارا بودن ضریب تبادل یونی بالا، تمایل زیادی به واکنش با خاک دارند. واکنش‌پذیری بالای نانو رس منجر به انجام واکنش‌های یونی بین ذرات خاک و نانو رس شده و اتصالات رسی جدیدی در ساختار خاک



شکل ۷. تغییرات شاخص فروریزش با مقدار ماده افزودنی و زمان در نمونه‌های تثبیت‌شده با (الف) سیمان و (ب) نانو رس
 Fig. 7. Variation of collapse potential with additive material content and time for; (a) Cement; (b) Nano-clay

ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، با اضافه کردن سیمان و نانو رس، پتانسیل فروریزش با زمان کاهش یافته است. کارایی بهسازی نمونه‌ها بر اساس نوع و مقدار ماده تثبیت‌کننده و نیز زمان‌های عمل‌آوری مختلف، در ادامه با هم مقایسه شده است. در شکل ۷، تغییرات شاخص فروریزش نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف سیمان و نانو رس در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، مقدار پتانسیل فروریزش برای همه زمان‌های عمل‌آوری، با افزایش درصد سیمان کاهش می‌یابد. بطور میانگین، با افزایش مقدار درصد سیمان از ۰/۵ درصد به ۲/۵ درصد، پتانسیل فروریزش از حدود ۸ درصد به کمتر از ۵ درصد کاهش می‌یابد. بهبود خاک توسط سیمان از دو طریق می‌تواند رخ دهد. اولین مکانیسم، پر شدن حفرات خاک فروریزشی با سیمان است. دومین مکانیسم در اثر تقویت اتصالات بین‌دانه‌ای و یا به عبارت دیگر، افزایش مقاومت برشی خاک است که موجب

عملکرد بهسازی با افزایش مقدار نانو رس است. با توجه به مقدار ناچیز نانو رس استفاده شده در فرآیند اختلاط با خاک فروریزی، توزیع یکنواخت آن با خاک دشوار بوده و پس از اضافه کردن رطوبت به خاک احتمال واکنش نانو ذرات باهم و تشکیل ساختارهای ضعیف نانو رسی وجود دارد. این ساختارهای ضعیف در شرایطی که بین ذرات خاک قرار بگیرند می‌توانند منجر به کاهش عملکرد بهسازی و افزایش پتانسیل فروریزش نیز شوند. با افزایش مقدار نانو رس احتمال تشکیل این نانو ساختارهای ضعیف وجود دارد. این روند کاهش مقاومت با افزایش درصد نانو مواد در نتایج آزمایش‌های طاهها و طاهها و ایرانپور و حداد نیز مشاهده شده است [۴۳ و ۴۵]. در تحقیق‌های مشابهی که طاهها و طاهها و نیز ایرانپور و حداد انجام دادند، دلیل این موضوع جذب آب توسط نانو ذرات بیان شد. آنها بیان کردند که با افزایش مقدار نانو رس، آب بیشتری به اطراف اتصالات بین دانه‌ای خاک جذب می‌شود که این موضوع منجر به کاهش مقاومت خاک خواهد شد [۴۳ و ۴۵]. این فرضیه در صورتی می‌تواند درست باشد که بعد از تبخیر آب بین‌دانه‌ای، مقاومت خاک افزایش یابد. از آنجاکه در تحقیقات ذکر شده، اثرات زمان بر روی روند بهسازی مورد بررسی قرار نگرفته است، درستی این فرضیه قابل اثبات نیست. از طرفی، نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان داد که در مقادیر بالای نانو رس، حتی با تبخیر آب بین‌دانه‌ای، پتانسیل فروریزش کاهش می‌یابد که بیانگر عدم صحت فرضیه جذب آب توسط ذرات نانو رس بوده و مبین تشکیل نانو ساختارهای ضعیف است. به عبارت دیگر با افزایش مقدار نانو رس و با توجه به واکنش‌پذیری بالای این ماده، احتمال واکنش نانو ذرات با هم و تشکیل کلوخه‌های ضعیف نانو رسی افزایش می‌یابد. تشکیل این توده‌های ضعیف منجر به کاهش مقاومت برشی خاک و افزایش پتانسیل فروریزش خواهند شد. برای اطمینان از وجود توده‌های ضعیف نانو رسی بین ذرات خاک، یکسری عکس میکروسکوپی از نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف نانو رس گرفته شد (شکل ۹). نواحی صورتی رنگ در شکل ۹ نشان دهنده توده‌های ضعیف نانو رس است. با افزایش درصد نانو رس، احتمال تشکیل این کلوخه‌های ضعیف نیز بیشتر خواهد شد. علاوه بر این با مقایسه تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و نانو رس می‌توان دید که در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان بخشی از حفرات نیز با سیمان پر شده‌اند. در صورتی که در ساختار



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی از ساختار خاک فروریزی بهسازی شده با (الف) ۰/۵٪ سیمان، (ب) ۱٪ سیمان، (ج) ۲/۵٪ سیمان
Fig. 8. SEM image of the structure of collapsible soil treated by: (a) 0.5% wt. cement; (b) 1% wt. cement; (c) 2.5% wt. cement

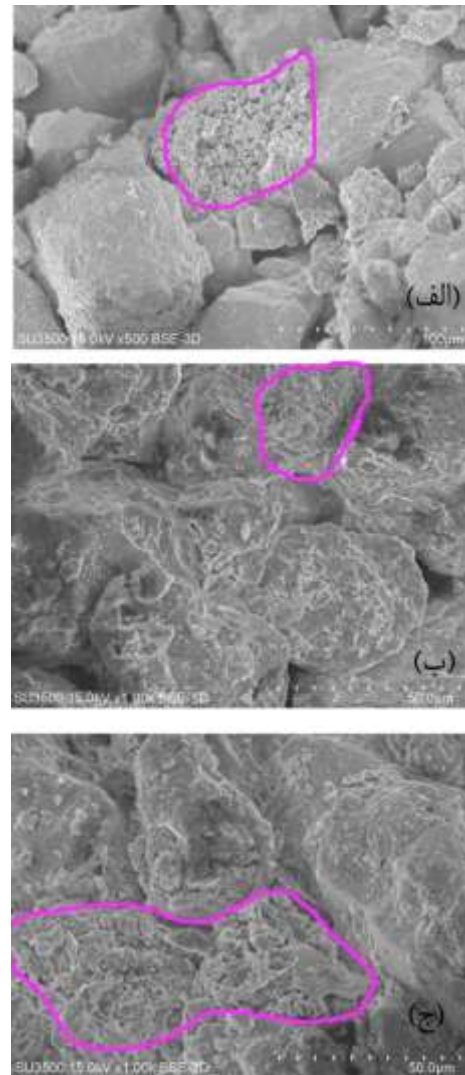
به وجود می‌آورند. این فرآیند موجب تقویت پیوندهای بین ذرات خاک شده و مانع از فروریزش ساختار خاک خواهند شد. واکنش‌های تبادل یونی نانو رس با خاک، برخلاف واکنش‌های پوزولانی و هیدراسیون سیمان با خاک، در مدت زمان کوتاهی اتفاق می‌افتند. با گذشت زمان و کاهش رطوبت درون خاک، مقاومت این پیوندها افزایش می‌یابد. بنابراین روند افزایش مقاومت خاک بهسازی شده با نانو رس تقریباً پس از گذشت ۱۰ الی ۱۴ روز و با تبخیر شدن آب درون خاک به مقدار نهایی خود خواهد رسید.

نکته قابل توجه در نمونه‌های بهسازی شده با نانو رس، کاهش

پتانسیل فروریزش از حدود ۹ درصد به کمتر از ۲/۵ درصد می‌رسد که متناظر با ۷۰ درصد بازده بهسازی است. نتایج تحقیق انجام شده توسط ایران‌پور و حداد [۴۳] نشان داد که با اضافه کردن ۰/۱ نانو رس به خاک فروریزشی، پتانسیل فروریزش به کمتر از ۱ درصد می‌رسد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش نانو رس از ۰/۱ به ۰/۶ درصد، پتانسیل فروریزش به بیش از ۴ درصد افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش پتانسیل فروریزش و کاهش بازدهی بهسازی است. نکته قابل توجه اینکه در این تحقیق نمونه‌ها تنها در یک زمان عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند، اثرات زمان بر روی عملکرد بهسازی مورد بررسی قرار نگرفت.

در نهایت با بررسی نتایج بدست آمده از بهسازی خاک با سیمان و نانو رس می‌توان گفت که استفاده از نانو رس در مقادیر پائین می‌تواند منجر به عملکرد بهتری در بهسازی و کاهش پتانسیل فروریزش خاک شود. لازم به ذکر است که از لحاظ اقتصادی و به دلیل قیمت پائین سیمان، استفاده از سیمان حتی در درصدهای بالاتر نیز مقرون به صرفه تر از نانو رس است. از طرفی استفاده از سیمان برای بهسازی خاک دارای محدودیت‌های زیست محیطی است. فرآیند تولید سیمان منجر به تولید حجم زیادی گاز گلخانه‌ای مونوکسید کربن می‌شود. ضمن اینکه استفاده از سیمان در خاک‌های دارای مقادیر بالای سولفات و کلر نیز با محدودیت‌های جدی مواجه است. نکته قابل توجه اینکه نانو رس از جنس خاک بوده و استفاده از آن برای بهسازی محدودیت زیست محیطی خاصی نخواهد داشت. بنابراین و در صورتی که فرآیند تولید نانو رس منجر به تولید ارزان قیمت این ماده شود، می‌تواند گزینه مناسبی برای بهسازی خاک‌ها، بویژه خاک‌های فروریزشی به شمار رود.

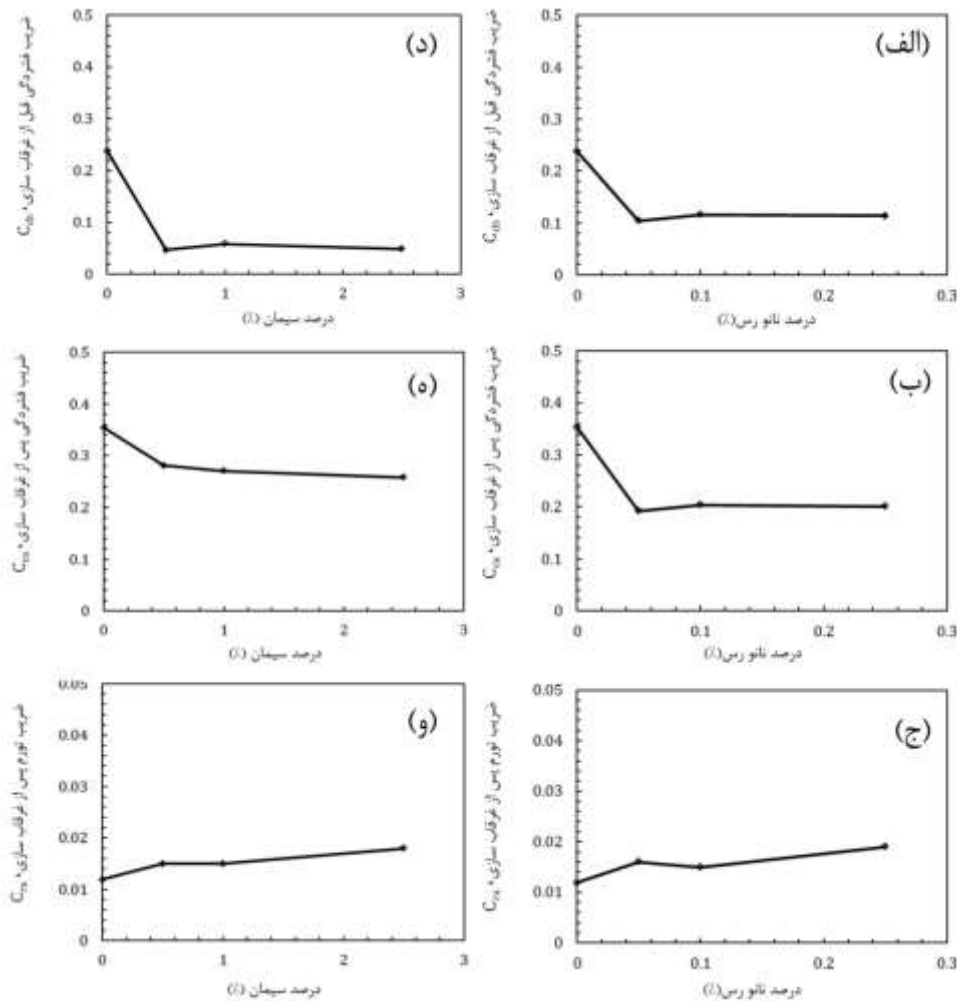
از نظر ساختاری، خاک فروریزشی حاوی دانه‌های ماسه‌ای ریز و لای با اتصالات بین دانه ای ضعیف رسی است. برای بهسازی این ساختار ضعیف و متخلخل می‌توان اتصالات بین دانه ای را تقویت کرد و یا با پر کردن فضای بین دانه‌ای، پتانسیل فروریزش را کاهش داد. نانو مواد با تقویت اتصالات بین دانه‌ای از طریق اتصال با ذرات رس بین دانه‌ای، منجر به بهسازی خاک فروریزشی می‌شود. در صورتیکه برای بهسازی خاک با سیمان می‌بایست علاوه بر پرکردن حفرات خاک، ذرات ماسه را از طریق پل های سیمانی به هم متصل کرد. بنابراین از نظر ساختاری نیز بهسازی با نانو رس روش کارا تر و هدفمندتری



شکل ۹: تصاویر میکروسکوپی از ساختار خاک فروریزشی بهسازی شده با (الف) ۰/۵٪ نانو رس، (ب) ۱٪ نانو رس، (ج) ۲/۵٪ نانو رس
Fig. 9. SEM image of the structure of collapsible soil treated by: (a) 0.5% wt. Nano-clay; (b) 1% wt. Nano-clay; (c) 2.5% wt. Nano-clay

خاک بهسازی شده با نانو رس هنوز خلل و فرج زیادی در ساختار خاک وجود دارد. بعبارت دیگر در فرآیند بهسازی با نانو رس، فرآیند بهسازی از طریق ایجاد و تقویت پل‌های بین دانه ای رخ می‌دهد اما فرآیند بهسازی با سیمان علاوه بر تقویت اتصالات بین دانه‌ای شامل پرکردن فضاهای بین دانه نیز است.

با مقایسه نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بهترین عملکرد بهسازی برای نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵٪ نانو رس حاصل می‌شود که پس از گذشت ۱۰ الی ۱۴ روز رخ می‌دهد. در این شرایط



شکل ۱۰. تغییرات شاخص‌های فشردگی و تورم قبل و بعد از غرقاب سازی در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و نانو رس پس از ۲۸ روز
 Fig. 10. Variation of compression and swelling index of the soil before and after inundation for treated specimens with cement and nano-clay after 28 days

دارد. این کاهش ناشی از تقویت ساختار خاک و تراکم‌پذیری کمتر آن است که در اثر تقویت اتصالات و یا پر کردن خلل و فرج خاک رخ خواهد داد. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان شاخص فشردگی مقداری کمتر از نمونه‌های بهسازی شده با نانو رس است. دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از پر شدن حفرات خاک با سیمان و یا تردتر بودن رفتار نمونه‌های بهسازی شده با سیمان باشد.

پس از فرآیند غرقاب کردن نمونه، شاخص فشردگی تحت تأثیر دو عامل تغییر خواهد کرد. با غرقاب سازی نمونه‌ها و وقوع فروریزش، بخش زیادی از حفرات خاک از بین رفته و تراکم خاک به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد که موجب کاهش شاخص فشردگی خاک خواهد شد. از طرفی شاخص فشردگی خاک در شرایط اشباع به مراتب

به شمار می‌رود. در شکل ۱۰ شاخص‌های تورم و فشردگی نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و نانو رس قبل و پس از غرقاب سازی با نمونه بهسازی نشده مقایسه شده است. متغیر C_{cb} شاخص فشردگی خاک در شرایط قبل از غرقاب شدن نمونه (قبل از وقوع فروریزش) و متغیرهای C_{ca} و C_{sa} نیز به ترتیب شاخص‌های تورم و فشردگی در شرایط پس از غرقاب سازی و وقوع فروریزش، می‌باشند. از آنجاکه شاخص تورم را می‌بایست از یک چرخه باربرداری و بارگذاری مجدد محاسبه کرد و قبل از غرقاب کردن نمونه این چرخه اعمال نمی‌شود، بنابراین شاخص تورم قبل از فروریزش ارائه نشده است.

همان‌طور که از این شکل مشخص است شاخص فشردگی در هردوی نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و نانو رس افت قابل توجهی

بیشتر از شرایط خشک خاک است. نتایج نشان می‌دهد که با غرقاب کردن نمونه شاخص‌های فشردگی در همه نمونه‌های بهسازی شده و نشده، افزایش می‌یابد. این مهم نشان‌دهنده تأثیر بیشتر رطوبت بر تغییر شکل‌پذیری خاک در مقابل افزایش تراکم ناشی از فروریزش است. همان‌طور که از شکل‌های ۱۰-ب و ۱۰-ه مشخص است، پس از وقوع فروریزش نیز تأثیرات بهسازی قابل مشاهده بوده و نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و نانو رس شاخص فشردگی کمتری خواهند داشت. نکته قابل توجه در تغییرات شاخص فشردگی قبل و بعد از بهسازی، تأثیر مقدار ماده افزودنی بر تغییر شکل‌پذیری خاک است. بطوریکه پس از بهسازی شاخص فشردگی از حدود ۰/۲۵ در خاک بهسازی نشده به کمتر از ۰/۰۵ در خاک بهسازی شده با سیمان و حدود ۰/۱ در خاک بهسازی شده با نانو رس رسید.

شاخص تورم (شاخص باربرداری و بارگذاری مجدد) در هر دو نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و نانو رس مشابه با نمونه‌های بهسازی نشده نبود. به عبارت دیگر پس از یک سیکل باربرداری و بارگذاری مجدد، اتصالات بین دانه‌ای که در اثر فرآیند تثبیت با سیمان و نانو رس ایجاد شده بودند، از بین رفته و رفتار خاک بهسازی شده پس از این چرخه باربرداری و بارگذاری مجدد، شبیه به رفتار خاک بهسازی نشده، شد.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر افزودنی‌های سیمان و نانو رس بر تغییر شکل‌پذیری و پتانسیل فروریزش خاک رَمبند منطقه سرکوبر واقع در استان سمنان مطالعه شده است. خاک فروریزشی این منطقه در رده خاک‌های با درجه فروریزش شدید قرار دارد و پتانسیل فروریزش نمونه‌های بازسازی شده آن نیز در رده پتانسیل فروریزش نسبتاً شدید قرار دارد. نمونه‌های خاک فروریزشی با افزودن ۰/۰۵، ۱ و ۲/۵ درصد سیمان و ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد نانو رس بهسازی و پس از ۱۴، ۷، ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. علاوه بر این از نمونه‌های بهسازی شده نیز عکس‌های میکروسکوپی گرفته شد و رفتار ماکرومکانیکی نمونه‌های خاک در مقیاس میکرومکانیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجاکه افزایش تراکم خاک یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های فروریزشی به شمار می‌رود، فرآیند بهسازی بر روی نمونه‌های خاک با همان درصد رطوبت و تراکم موجود در محل، اجرا شد تا

بتوان اثرات تثبیت شیمیایی را از اثرات تراکم تفکیک کرد. بر روی نمونه‌های بهسازی شده آزمایش تحکیم مطابق با استاندارد ASTM D 5333 جهت تعیین پتانسیل فروریزش انجام شد و عملکرد بهسازی نمونه‌های مختلف مقایسه شد. علاوه بر این، پس از غرقاب ساختن نمونه‌ها و تعیین پتانسیل فروریزش، آزمایش تحکیم تا تنش قائم ۱۶۰۰ کلیوپاسکال ادامه یافت و یک چرخه باربرداری و بارگذاری مجدد بر روی نمونه‌ها اعمال شد. بر این اساس، مقادیر ضریب فشردگی و ضریب تحکیم قبل و بعد از غرقاب سازی نیز محاسبه شد. در این تحقیق ضمن بررسی تحقیق‌های مشابه، سعی شد حتی الامکان مقادیر درصد افزودنی‌ها بصورت واقع بینانه‌تری انتخاب شده و بازه تغییرات درصد افزودنی نیز بر این اساس تدقیق شد. علاوه بر این در این پژوهش اثرات زمان بر عملکرد بهسازی بررسی شد و صحت فرضیه‌های موجود در خصوص بهسازی با نانو مواد مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با عکس‌برداری میکروسکوپی و انجام چرخه‌های باربرداری و بارگذاری پس از فروریزش، رفتار خاک از نظر ساختاری با جزئیات بیشتری ارزیابی شد. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، برخی از مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق بدین شرح می‌باشند:

۱. افزودن هر دو ماده سیمان و نانو رس موجب کاهش پتانسیل فروریزش و نیز کاهش تغییر شکل‌پذیری خاک شد. شاخص فروریزش در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان بیش از ۵۰٪ و در نمونه‌های بهسازی شده با نانو رس بیش از ۷۵٪ کاهش یافت.
۲. مقدار ماده تثبیت‌کننده تأثیر زیادی بر روی بازده فرآیند بهسازی داشت. بهترین عملکرد بهسازی در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۱٪ سیمان بدست آمد. با افزایش مقدار سیمان به ۲/۵٪، بهبود عملکرد چندانی در نمونه‌های مشاهده نشد.
۳. بهترین بازده فرآیند بهسازی در نمونه‌های بهسازی شده با ۰/۰۵٪ نانو رس بود. با افزایش مقدار نانو رس، احتمال تجمع ذرات نانو و تشکیل کلوخه‌های نانو رس افزایش یافت. این کلوخه‌ها دارای ساختاری نسبتاً ضعیف بوده و منجر به افزایش پتانسیل فروریزش شدند.
۴. نتایج نشان داد که عملکرد بهسازی وابسته به زمان است. در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان، با گذشت زمان بازده فرآیند بهسازی افزایش یافت که این مهم ناشی از تکمیل واکنش‌های پوزولانی و هیدراسیون با زمان است. در نمونه‌های بهسازی شده با

- using two biopolymers, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 339-329 (2017) (2)9.
- [4] S.M. Haeri, A.A. Garakani, A. Khosravi, C.L. Meehan, Assessing the hydro-mechanical behavior of collapsible soils using a modified triaxial test device, *Geotechnical Testing Journal*, 204-190 (2013) (2)37.
- [5] S.M. Haeri, Hydro-mechanical behavior of collapsible soils in unsaturated soil mechanics context, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, -25 (2016) (1)2 40.
- [6] K.E. Gaaver, Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils, *Alexandria Engineering Journal*, (3)51 210-205 (2012).
- [7] L. Barden, A. McGown, K. Collins, The collapse mechanism in partly saturated soil, *Engineering Geology*, 60-49 (1973) (1)7.
- [8] 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. 78-69.
- [9] A.A. Basma, E.R. Tuncer, Evaluation and control of collapsible soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1504-1491 (1992) (10)118.
- [10] A. Klukanova, J. Sajgalik, Changes in loess fabric caused by collapse: an experimental study, *Quaternary International*, 39-35 (1994) 24.
- [11] C. Rogers, Types and distribution of collapsible soils, in: *Genesis and properties of collapsible soils*, Springer, 1995, pp. 17-1.
- [12] A. Assallay, I. Jefferson, C. Rogers, I. Smalley, Fragipan formation in loess soils: development of the Bryant hydroconsolidation hypothesis, *Geoderma*, (2-1)83 16-1 (1998).
- [13] C. Chiu, C. Ng, C. Shen, Collapse behavior of loosely compacted virgin and non-virgin fills in Hong Kong, in: *Proc. 2nd Int. Conf. Unsaturated soils*, 1998, pp. 30-25.
- [14] C. Ng, C. Chui, C. Shen, Effects of wetting history on the volumetric deformations of an unsaturated loose fill, in: *Proceedings of the 13th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Taipei, Taiwan, 1998, pp. 146-141.
- نانو رس، پس از گذشت ۱۰ الی ۱۴ روز و با تبخیر آب درون خاک، افزایش بازده فرآیند بهسازی متوقف شد. این نتیجه برخلاف نتایجی بود که سایر محققین در این زمینه ارائه کرده بودند. سایر محققین دلیل کاهش مقاومت با افزایش درصد نانو ماده را جذب آب توسط نانو ذرات را در نقاط اتصال بین دانه ای بیان کردند که در صورت صحت این فرضیه می بایست پس از تبخیر آب مقاومت خاک افزایش یابد. در این تحقیق با در نظر گرفتن زمان عمل آوری صحت این فرضیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دلیل کاهش مقاومت با افزایش درصد نانو رس به دلیل تشکیل توده های ضعیف نانو رسی است که بدون واکنش با خاک، در درون ساختار خاک تشکیل می شوند.
۵. شاخص فشردگی نمونه های بهسازی شده، کمتر از نمونه های بهسازی نشده بود که بیانگر کاهش تغییر شکل پذیری خاک پس از بهسازی است (از حدود ۰/۲۵ به کمتر از ۰/۱ در بهسازی با نانو رس و ۰/۰۵ در بهسازی با سیمان رسید). از طرفی، شاخص تورم در نمونه های بهسازی شده و بهسازی نشده، تفاوت چندانی با هم نداشت که نشان دهنده از بین رفتن پیوندهای ایجاد شده در اثر بهسازی پس از یک چرخه باربرداری و بارگذاری مجدد است.
۶. ضعف سیمان در برابر مواد خورنده (سولفات و گچ و ...) و آلودگی های زیست محیطی ناشی از تولید سیمان استفاده از آن را به عنوان یک ماده تثبیت کننده با محدودیت هایی مواجه می کند. از طرفی نانو رس از جنس مصالح خاکی بوده و هیچ گونه آلودگی زیست محیطی ایجاد نخواهد کرد. صرف نظر از قیمت بالای نانو مواد، استفاده از این مصالح در مقادیر بسیار پائین بجای سیمان، علاوه بر عملکرد مشابه و حتی بهتر، از نظر زیست محیطی نیز ارجحیت بیشتری دارد.

مراجع

- [1] A. El Howayek, P.-T. Huang, R. Bisnett, M.C. Santagata, Identification and behavior of collapsible soils, (2011).
- [2] H.H. Abdel-Mohsen, A. Ali, Performance of partially replaced collapsible soil Part 1: Laboratory Study, in: *International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering*, 2015, pp. 9-6.
- [3] M. Ayeldeen, A. Negm, M. El-Sawwaf, M. Kitazume, Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil

- Geologica Balcanica, 24-21 (2007) (4-3)36.
- [28] F. Sariosseiri, B. Muhunthan, Geotechnical properties of Palouse loess modified with cement kiln dust and Portland cement, in: GeoCongress 2008: Characterization, Monitoring, and Modeling of GeoSystems, 2008, pp. -92 99.
- [29] P. Arrúa, G. Aiassa, M. Eberhardt, B.C. Alercia, Behavior of collapsible loessic soil after interparticle cementation, International journal of Geomate, 2)1 SERL -130 (2011) 2 136.
- [30] A.-M. Mohamed, M. El Gamal, Treatment of collapsible soils using sulfur cement, International Journal of Geotechnical Engineering, 77-65 (2012) (1)6.
- [31] R. Noorzad, H. Pakniat, Investigating the effect of sample disturbance, compaction and stabilization on the collapse index of soils, Environmental Earth Sciences, (18)75 1262 (2016).
- [32] Z.H. Majeed, M.R. Taha, A review of stabilization of soils by using nanomaterials, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 581-576 (2013) (2)7.
- [33] G. Zhang, Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils, in: Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior, 2007, pp. 13-1.
- [34] s. sohrabi shegefti, h. musavi jahromi, E.M. Super Repair s'effect on the strength parameters of the collapsible soils, Amirkabir Journal of Civil Engineering, -97 (2014) (1)46 106. (in Persian)
- [35] M.R. Noll, C. Bartlett, T.M. Dochat, In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica, in: Proceeding of the Sixth National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring, and Geophysical Method, National Ground Water Association, 1992, pp. 457-443.
- [36] P.M. Gallagher, Y. Lin, Column testing to determine colloidal silica transport mechanisms, in: Innovations in grouting and soil improvement, 2005, pp. 10-1.
- [37] H.H. Karim, T. Schanz, M.H. Nasif, Improving collapsibility and compressibility of gypseous sandy soil using bentonite and kaolinite, Engineering and
- [15] Alkandari, F. A., " Collapse of Cemented Carbonate Sand", Ph. D. thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, USA, (2000)
- [16] Elkady, T. Y." Static and dynamic behaviour of collapsible soils". Ph. D. Thesis, Arizona State University, USA, (2002).
- [17] M.M. Futai, M. De Souza Scares de Almeida, Collapsible soil: a theoretical and experimental study, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 16 (2002) 7.
- [18] A. BAGHERIE, A. FARSIJANI, CONSOLIDATION BEHAVIOR OF COLLAPSIBLE CLAYEY SOILS IN SATURATED AND UNSATURATED CONDITIONS, (2016). (in Persian)
- [19] G. Evans, D. Bell, Chemical stabilization of loess, New Zealand, in: Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981, pp. 658-649.
- [20] R.H. Borden, R.O. Holtz, I. Juran, Grouting, soil improvement and geosynthetics, in, ASCE, 1992.
- [21] F.N. Okonta, T. Manciya, Compaction and strength of lime-fly Ash stabilized collapsible residual sand, (2010).
- [22] S. Huangjing, W. Gasaluck, The stabilization of loess by chemical additives for road base, EJGE, -1651 (2010) 15 1668.
- [23] R. Moayed, E. Izadi, S. Heidari, Stabilization of saline silty sand using lime and micro silica, Journal of Central South University, 3011-3006 (2012) (10)19.
- [24] Y. Zhang, Z. Zhang, Influence factor analysis on strength of lime-fly ash loess, Engineering, 561 (2013) (06)5.
- [25] L.H. Mei, W.L. Min, G. Peng, The mechanical properties of cement reinforced loess and Pore microstructure characteristics, Applied Mechanics & Materials, ((527 2014)).
- [26] A. Khelifa, L. Azeddine, B. Ouassila, Treatment of Collapsible Soils by Cement Using the Double Consolidation Method, in: International Congress and Exhibition" Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology", Springer, 2017, pp. 88-76.
- [27] R.N. Angelova, Loess-cement long-term strength-a facilitating factor for loess improvement applications,

- collapsible soils, Amirkabir journal of civil engineering, (2018), inPress. (in Persian)
- [42] F. Davoudi, Experimental Study of collapsible soils Improvement Using Nanoclay, Msc Thesis, Persian Gulf University, Bushehr, Iran, 1394. (in Persian)
- [43] B. Iranpour, A. Haddad, The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment, Engineering Geology, 205 53-40 (2016).
- [44] ASTM D " .03-5333Standard test methods for measurement of collapse potential of soils2003) ,").
- [45] M.R. Taha, O.M.E. Taha, Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior, Journal of Nanoparticle Research, 1190 (2012) (10)14.
- [46] R. Ladd, Preparing test specimens using undercompaction, Geotechnical Testing Journal, 23-16 (1978) (1)1.
- Technology Journal, 3153-3141 (2012) (18)30.
- [38] A. Vakili, Evaluation of the lime and cement effect on the mechanical and physical characteristics of the collapsible soils, J. Basic. Appl. Sci. Res, 696-691 (2013) (8)3.
- [39] L.H. Mei, W.L. Min, G. Peng, The mechanical properties of cement reinforced loess and Pore microstructure characteristics, Applied Mechanics & Materials, ((527 2014)).
- [40] S.M. Haeri, A. Mohammad Hosseini, M.M. Shahrabi, S. Soleymani, Comparison of strength characteristics of Gorgan loessial soil improved by nanosilica, lime and Portland cement, in: 15th Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015.
- [41] M. A., Khodabandeh, M. Keramati, S. M. Hosseini, S. Nokandeh, Evaluation of the Effect of the leachate's pH on the rate of collapse and shear strength parameters of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Zamanian, F. Qahremani, Investigating the effect of Portland cement and Nanoclay on the collapse potential and consolidation indexes of the collapsible soil, Amirkabir J. Civil Eng., 52(6) (2020) 1439-1454.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15386.5905](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15386.5905)



