

# بررسی تاثیر نانوسیلیس در تثبیت خاک رس و اصلاح مشخصات مکانیکی و حجمی آن در بستر راه

## مقاله پژوهشی

سعید غفارپورجهرمی\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران  
زهرا یزدی راوندی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی پویندگان دانش، چالوس، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Saeed\_ghf@sru.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۸/۲۸ - پذیرش: ۹۸/۰۲/۰۴

صفحه ۱۸۳-۱۶۹

### چکیده

در سال‌های اخیر فناوری نانو سبب تحولات بسیاری در دانش شده و محققین در زمینه‌های مختلف از آن بهره گرفته‌اند. نانو ذرات به دلیل ویژگی‌های خاص فیزیکی و شیمیایی در بسیاری از علوم برای ساخت مواد جدید و با قابلیت‌های منحصر به فرد به کار می‌روند. در این تحقیق تاثیر نانوسیلیس بعنوان یکی از محصولات فناوری نانو، با نقش پوزولان مصنوعی و بسیار فعال با سیمان مورد بررسی قرار گرفته است. در ارتباط با کاربرد نانوسیلیس در اصلاح و بهسازی مشخصات خاک‌های مختلف، مطالعات محدودی صورت گرفته است که در این مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی خواص فیزیکی، حجمی و مکانیکی خاکهای ضعیف تثبیت شده با سیمان حاوی نانو سیلیس از طریق آزمایش‌های متفاوت حدود انبرگر، مقاومت فشاری تک محوری، باربری کالیفرنیا و تورم پرداخته شده است. به علاوه، جهت مطالعه ریزساختار خمیر سیمان حاوی نانو سیلیس از آزمایش‌های طیف‌سنجی تفرق اشعه ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان دهنده افزایش قابل توجه مشخصات مکانیکی نظیر مقاومت فشاری تک محوری و باربری کالیفرنیا با افزایش نانوسیلیس در کوتاه مدت می‌باشد بطوریکه با اصلاح سیمان با افزودن ۱۰ درصد نانو سیلیس (بر حسب وزن سیمان)، مقاومت فشاری تک محوری ۲۵ درصد و باربری کالیفرنیا ۴۵ درصد در طی ۷ روز افزایش یافت. این روند در نمونه های ۲۸ روزه تا ۶۵ درصد خواهد بود. این نتایج همچنین حاکی از کاهش قابل توجه پتانسیل تورم خاک دارد. در نهایت یک طرح بهینه برای تثبیت بسترهای حاوی رس ضعیف با استفاده از سیمان اصلاح شده با نانوسیلیس جهت کاربردهای کوتاه مدت و دراز مدت ارائه می‌شود که در مقاصد عملی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: خاک رس، نانوسیلیس، مشخصات مکانیکی، مقاومت فشاری تک محوری، باربری کالیفرنیا

### ۱-مقدمه

از جمله این مشکلات تغییرات در خصوصیات رفتاری خاک یعنی تغییر مشخصات حجمی، مکانیکی و مقاومتی خاک در زمان جذب آب باشد که می‌تواند خسارت‌های زیادی را باعث شود لذا چگونگی شناسایی و برخورد با این نوع خاک‌ها، موضوع بسیاری از مطالعات و تحقیقات در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. وجود بستر مقاوم یکی از اصول اولیه ساخت در عملیات عمرانی است. خاک، اساس یک سازه است که بارها را به طور موثر توزیع می‌کند و اگر استحکام و پایداری خاک

خاک به عنوان یکی از پوشش های سطح زمین، اولین و مهمترین بخش یک پروژه مهندسی هستند که مهندسان با آن برخورد دارند. برخی از این خاک ها در پروژه های مهندسی مشکل آفرین هستند که به خاکهای مسئله دار موسوم هستند. بجز خاک‌های مستعد روانگرایی، اغلب خاک‌های مسئله‌دار از کانی‌های رسی تشکیل شده‌اند. این کانی‌ها با ابعاد بسیار ریز، جذب و نگهداری زیادی از آب دارند که می‌توانند مشکلات زیادی را برای سازه‌های مهندسی مستقر در سطح ایجاد کنند.

فیزیکی و شیمیایی خاک بطور قابل ملاحظه‌ای دگرگون خواهد شد که یکی از دلایل آن سطح ویژه بسیار بالای نانومواد و خصوصیات مورفولوژی آنها می‌باشد (Seyedi et al., 2013). مواد در محدوده‌ی نانو اغلب رفتار فیزیکی بسیار متفاوتی با اتم‌ها و مواد توده‌ای از خود نشان می‌دهند. خصوصیات مواد نانو مقیاس را نمی‌توان ضرورتاً با توجه به ویژگی‌های مواد در مقیاس بزرگتر پیش‌بینی کرد. ذرات در مقیاس نانو به خاطر اندازه کوچکشان، مساحت سطح ویژه بسیار بالای را دارا هستند و به دلیل داشتن همین مساحت سطح ویژه بسیار بالا و بارهای سطحی، حتی در صورت استفاده بسیار کم از این ذرات در محیط خاک، رفتار فیزیکی- شیمیایی و خصوصیات مهندسی خاک را به طور بسیار ویژه و قابل توجه تحت تأثیر قرار می‌دهند (Gutierrez et al., 2005) و (Zhang, 2007). در سال‌های اخیر نانو ذراتی نظیر نانو سیلیس، نانو آلومینیوم، نانو مس، نانو تیتانیم، نانو منیزیم، نانو لوله‌های کربنی، نانو خاک و نانو رس جهت بهسازی خاک‌های مسئله‌دار مورد پژوهش محققان مختلف قرار گرفته است (Zhang et al., 2014)، (Ng and Gholilou and Nikraz, 2014)، (Coo, 2014)، (Bahmani et al., 2014)، (Changizi et al., 2015)، (li et al., 2015)، (Majeedi et al., 2014) و (Kim et al., 2014). مطالعات متفاوتی در زمینه مهندسی ژئوتکنیک انجام شده است که عموماً تأثیر حضور نانوذرات طبیعی در خاک و اثر افزودن نانو مواد در خاک بررسی شده است. یکی از این تحقیقات توسط احدی و همکارانش نشان می‌دهد که افزودن مقدار ناچیزی نانو سیلیس به خاک رس، باعث افزایش حد روانی و حد خمیری و کاهش نشانه خمیری خاک می‌گردد. بعبارتی وجود ذرات نانو موجب افزایش حدود ات‌برگ می‌شود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد با افزودن ۱/۵ درصد نانو سیلیس به مخلوط رس-سیمان، مقاومت فشاری تک محوری حدود ۳۵ درصد افزایش می‌یابد (Ahadi et al., 2014). یکی دیگر از این تحقیقات بر روی نانوالومینیوم توسط لو و همکارانش در سال ۲۰۱۲ انجام شده است که نشان می‌دهد این ماده نانو دارای خصوصیات منحصر به فردی است و بنابراین می‌توان از آن جهت بهسازی خصوصیات مهندسی خاک‌های مسئله‌دار کمک گرفت (Luo et al., 2015). به عنوان مثال افزودن نانوالومینیوم به برخی

کافی نباشد، در سازه تحت اثر بارهای وارده نشست، ترک و گسختگی رخ می‌دهد و خاک‌های رسی بیشتر در معرض این مسئله هستند. یک از روش‌های حل مشکل ضعیف بودن بستر راه، بهسازی خاک است. هدف از بهسازی خاک عبارتند از افزایش مقاومت، کاهش تغییر شکل‌پذیری و نشست، افزایش دوام و غیره است. در گذشته برای بهبود خصوصیات خاک افزودنی‌های همچون سیمان، آهک، قیر، خاکستر بادی و غیره در مطالعات سایر پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است (Buddhima et al., 2015) و (Lou et al., 2012). ایده استفاده از نانوتکنولوژی برای اولین بار توسط ریچارد فینمن در سال ۱۹۵۹ مطرح شد (Feynman, 1959). پس از آن از این تکنولوژی در تمامی شاخه‌های علوم بسط پیدا کرد. تعاریف متفاوتی از این تکنولوژی توسط محققان ارائه شده است با این وجود، تعریف کامل و جامعی از نانوتکنولوژی توسط انجمن فیزیک ایالات متحده آمریکا ارائه شده است. در این تعریف توسعه و تحقیق تکنولوژی در سطح اتمی، مولکولی یا ماکرومولکولی بعنوان نانوتکنولوژی تعریف می‌شود بطوریکه در مقیاس حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر یعنی یک میلیارد متر و تنها توسط میکروسکوپ آزمایشگاهی قابل مشاهده است. بعبارتی تولید و استفاده از ساختمان، ابزار و سیستم‌هایی که به دلیل ابعاد کوچک، خصوصیات نو و بدیعی دارند. استفاده از خصوصیات مواد در مقیاس نانو، فواید بسیاری در زندگی انسان دارد از آن جمله می‌توان به استفاده موثر و بهینه از انرژی، اقتصادی بودن و افزایش کارایی و کیفیت در مدت زمان کوتاه اشاره کرد. محققان در این زمینه، نیازمند دانش نانوتکنولوژی هستند که فراتر از تجربه‌های خود می‌باشند. به علت گسترده بودن مباحث ژئوتکنیکی، مطالعات متفاوتی در زمینه کاربرد نانوتکنولوژی در مهندسی ژئوتکنیک تا کنون انجام شده است. ساختمان اکثر خاک‌ها و سنگ‌ها در مقیاس نانو بوده و واکنش‌های شیمیایی در آن مقیاس اتفاق می‌افتد. در نتیجه، پتانسیل بالقوه‌ای از کاربرد نانوتکنولوژی در مکانیک خاک مشاهده شده است. از آن جمله ترکیب خاک با برخی افزودنی‌های خاص و در مقیاس نانو، می‌تواند باعث بهبود پارامترهای مقاومتی خاک شود بطوریکه در گذشته به منظور تثبیت و بهبود خاک‌های ضعیف مورد استفاده قرار گرفته است. سیدی و همکارانش (۲۰۱۳) نشان دادند که با افزودن مقدار بسیار کمی نانو مواد در اصلاح خاک، رفتار

ارائه دهد و بدین طریق گامی دیگر در استفاده از نانو فناوری در مهندسی ژئوتکنیک معرفی می‌شود. به طور کلی هر خاکی که عاری از مواد شیمیایی نظیر سولفات‌ها و همچنین مواد آلی باشد قابلیت تثبیت شدن با سیمان را دارد (بتاچارجا و همکارانش (۲۰۰۳)). در اکثر فعالیت‌های عمرانی از سیمان پرتلند نوع یک استفاده می‌شود. در مواردی که خاک حاوی حداکثر ۱۰ درصد سولفات باشد یا آب مصرفی حاوی بیشتر از ۱۵۰ ppm سولفات باشد از سیمان نوع دو استفاده می‌شود (دوپاس و همکارانش ۱۹۷۹). بر اساس توصیه صورت گرفته، سیمان مورد نیاز برای تثبیت موثر خاک‌های رسی که براساس روش رده‌بندی متحد در رده‌ی رس با خاصیت خمیری کم یا CL قراردارند، بین ۸ تا ۱۲ درصد وزنی خاک مصرفی می‌باشد (Mitchell and Freitag, 1961). به علاوه یکی از مواد افزودنی نوین و جدید که در بهسازی خاک مورد استفاده مهندسان در کشورهای مختلف جهان می‌باشد، نانو مواد هستند (Majeedi et al., 2013)، (Shahin et al., 2015) و (Kadivar et al., 2012). یکی از تفاوت‌های بارز این تحقیق استفاده از یک نوع ماده اصلاح کننده خاص در مقیاس نانو و با کاربرد آسان، سریع و ارزان در اصلاح مشخصات حجمی و مکانیکی خاک‌های رسی می‌باشد که قبلاً گزارش نشده است. بررسی تاثیر نانوسیلیس بر روی میزان تورم و پارامترهای مقاومت برشی مخلوط خاک، آهک و گچ (به عنوان ترکیب سولفاتی) در شرایط آزمایشگاهی، دلالت بر کم شدن اثرات مخرب سولفات‌ها و کاهش میزان تورم با افزودن نانو سیلیس دارد (Bahmani et al. 2014) و (Changizi and Haddad, 2015). در یکی دیگر از تحقیقات انجام یافته توسط غلام و همکارش در سال ۲۰۱۵، از ذرات نانو سیلیس برای افزایش مقاومت فشاری ماسه نیز استفاده شده است. همچنین ذرات نانو سیلیس باعث کاهش نفوذپذیری ماسه‌های تا ۲۵ درصد می‌شوند (Gholami and Shiva, 2015). بطوریکه در ماسه یکنواخت و با قابلیت روانگرایی، ذرات نانو سیلیس می‌توانند باعث کاهش تخلخل ماسه و در نتیجه کاهش نفوذپذیری و همچنین افزایش مقاومت برشی شوند که می‌تواند رفتار ماسه در شرایط بارگذاری سیکلی را نیز بهبود دهد. بطورکلی تحقیقات انجام یافته توسط محققان مختلف نشان داده است که تاثیر نانو مواد در زمینه تغییر واکنش‌های شیمیایی خاک نتایج بهتری را در قیاس با تغییر

خاک‌های مسئله‌دار باعث افزایش ظرفیت باربری و همچنین کاهش نشست تحکیمی می‌گردد. همچنین افزودن نانو آلومینیوم سبب افزایش مقدار باربری کالیفرنیا یا CBR و همچنین مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌های مسئله‌دار می‌شود. قاضی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ تحقیقی را روی خصوصیات خمیری و مقاومتی نوعی خاک رس و بدون هیچ گونه افزودنی و همچنین خاک اصلاح شده با نانوذرات رس انجام دادند (Ghazi et al. 2011). آنها در تحقیق خود با گزارش نتایج آزمایش حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تک محوری نشان دادند که با افزودن نانورس مونتموریلونیت به خاک، حد روانی و شاخص خمیری و مقاومت فشاری تک محورهی افزایش می‌یابد. در تحقیق دیگری توسط محمدی و همکارش (۲۰۱۳) استفاده از نانو ذرات باعث بهبود ویژگی‌های نفوذپذیری خاک رس مورد استفاده در هسته سدهای خاکی شده است که بسیار قابل اهمیت می‌باشد (Mohammadi and Niazian, 2013). در این مقاله با استفاده از آزمون‌های در مقیاس آزمایشگاهی به بررسی تاثیر نانوسیلیس در تغییر مشخصات فیزیکی، مکانیکی و حجمی نوعی خاک رس مسئله‌دار تثبیت شده با سیمان پرداخته می‌شود. بعبارتی تاثیر نانوسیلیس در بهبود روش سنتی و قدیمی تثبیت خاک با سیمان مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار می‌گیرد. از آنجای که فرآیند تولید و مصرف سیمان در آلودگی محیط زیست نقش مخربی دارد، در واقع هدف این تحقیق جایگزینی مصالح نوین با قابلیت تأثیرگذاری بیشتر و موثرتر در جهت کاهش میزان سیمان مصرفی برای تثبیت خاک‌های مسئله‌دار رسی است. استفاده زیاد از سیمان موجب افزایش تولید و نشر گازهای گلخانه‌ای از جمله CO<sub>2</sub> می‌شود و در نتیجه موجب اثر گلخانه‌ای می‌شود. برای این منظور آزمایش‌های به منظور ارزیابی خصوصیات خمیری، مشخصات تراکمی، رفتار حجمی و پارامترهای مکانیکی مورد کاوش قرار گرفتند که شامل حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری تک محوری، باربری کالیفرنیا و تورم می‌باشد که برای نمونه‌های مختلف تحت تاثیر وجود نانوسیلیس و عدم وجود آن در خاک تثبیت شده با سیمان انجام شده است. همچنین به منظور تجزیه و تحلیل عملکرد نانوذرات از نتایج آنالیز SEM و XRD نیز استفاده شده است که می‌تواند درک بهتری از رفتار، نقش و عملکرد نانوذرات در خاک‌های تثبیت شده با سیمان

مسئله‌دار رسی با آهک، سیمان و قیر را نشان می‌دهد که از اهداف این تحقیق نیز می‌باشد.

مشخصات فیزیکی ساختمان خاک ایجاد می‌کند لذا این موضوع تأثیر این مواد در بهبود قابل توجه تثبیت خاک‌های

## ۲- مشخصات مصالح مصرفی

### ۱-۲- خاک رس

است. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری مستقیم درصد و فشار تورم به روش A در استاندارد *ASTM D4546* در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور اطلاع از ترکیبات شیمیایی خاک و درصد عناصر، آزمایش *XRF* بر روی نمونه خاک انجام شده است که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. همچنین بررسی طیف سنجش پراش پرتو ایکس (*XRD*) بر روی نمونه خاک انجام شده است که نتیجه آن در شکل ۱ آمده است.

خاک مورد استفاده در این تحقیق از نوع خاک رس بوده که بعد از بررسی و مطالعه تعداد قابل توجهی نمونه خاک رسی سه منطقه عبدالآباد، یافت‌آباد و شهرری در استان تهران انتخاب گردید. مشخصات فیزیکی و حدود اتربرگ خاک در جدول ۱ نشان داده شده است که در سیستم طبقه‌بندی متحد نوع خاک از نوع CL می‌باشد. همچنین برای شناسایی و ارزیابی میزان تورم خاک بعنوان یک نوع خاک مسئله‌دار، از روش مستقیم استفاده شده است. ارزیابی مستقیم پتانسیل تورم به معنی اندازه‌گیری مستقیم فشار تورم و درصد تورم خاک

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک رس

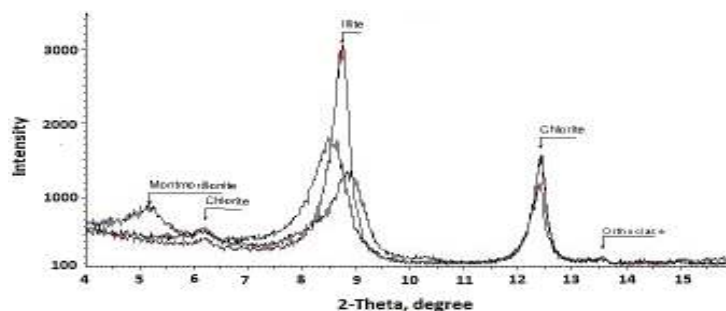
CL	نوع خاک
رس به رنگ قهوه‌ای روشن	شکل ظاهری
۳۵ درصد	حد روانی
۱۴ درصد	حد خمیری
۲۱ درصد	شاخص خمیری
۱۴ درصد	رطوبت بهینه
۱۹ $\text{kN/m}^3$	وزن مخصوص خشک حداکثر
۲/۶۴۹	چگالی ویژه

جدول ۲. درصد تورم و فشار تورم خاک رس

نوع خاک	فشار تورم $\text{kPa}$	درصد تورم	تورم پذیری
CL	۱۶/۳	۴/۳۵	متوسط
	۱۲/۴	۲/۸	متوسط
	۸/۶	۱/۷	متوسط

جدول ۳. ترکیبات شیمیایی خاک رس حاصل از آزمایش *XRF*

$K_2O$	$Na_2O$	$MgO$	$CaO$	$TiO_2$	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	ترکیبات
۲/۸۲	۳/۰۱	۲/۵۹	۱/۷۴	۰/۶۷۲	۵/۰۳	۱۵/۳۳	۶۲/۸۹	درصد



شکل ۱. نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) بر روی خاک رس

## ۲-۲- سیمان

سیمان مورد استفاده در تحقیق حاضر سیمان پرتلند نوع ۲ و می‌باشد. این سیمان طبق استاندارد ملی ایران به شماره *ISIRI* 389 تولید می‌شود که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۴ تیریز-مرند آمده است.

جدول ۴. مشخصات سیمان مورد استفاده

$C_3A$	$C_4AF$	$C_3S$	$OS_3$	$MgO$	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	ترکیبات
۶	۱۱	۲۴	کمتر از ۳	۲/۹	۳/۶	۴/۷	۲۱/۷	درصد

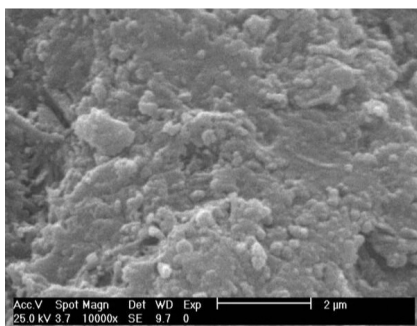
## ۳-۲- نانو سیلیس

بسیار بالا و بارهای سطحی، با استفاده از درصد کمی نانو ذرات می‌توان به درصد بالایی از بهبود خواص دست یافت. نانوسیلیس به صورت ذرات پودر خشک و یا به صورت معلق در مایع محلول، در بازار موجود می‌باشد که در این تحقیق از نانوسیلیس موجود در بازار ایران که به صورت پودر خشک استفاده شده است. میزان خلوص این ماده ۹۸٪ است که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین نتایج آزمایش بررسی پراش پرتو ایکس (*XRD*) در شکل ۲ و در ادامه عکس بزرگنمایی آن در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (*SEM*) در شکل ۳ آورده شده است.

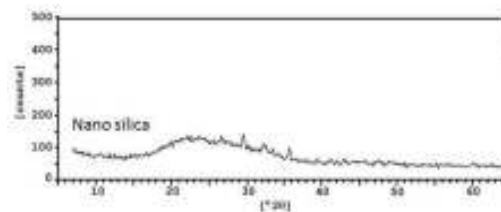
سیلیس با ترکیب شیمیایی  $SiO_2$  یکی از معروفترین موادی است که از گذشته بعنوان ماده‌ای موثر در افزایش چسبندگی و دوام سیمان بکار گرفته می‌شده است. اما نانو سیلیس شامل مجموعه‌ای از ذرات کوچک و در مقیاس نانو است که از طریق پیوندهای شیمیایی به یکدیگر متصل شده و ذرات بزرگتری را تشکیل می‌دهند. مزیت اصلی نانو سیلیس در مقایسه با سیلیس، گستره سطح بالای این ماده است که باعث می‌شود در بستر مورد استفاده، بر هم‌کنش بیشتری از خود نشان دهد. نانوسیلیس به طور معمول حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر کوچکتر ذرات خاک می‌باشند. ذرات نانو به دلیل سطح ویژه‌ی بالای خود که ناشی از ریز بودن ذرات می‌باشد، بسیار واکنش‌پذیرتر از ذرات خاک می‌باشند و به دلیل سطح ویژه‌ی

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی پودر نانو سیلیس

درصد وزنی	ترکیب
۹۸	$SiO_2$
۰/۳	$Na_2O$
۰/۰۰۵	$Fe_2O_3$
۰/۰۷	$K_2O$
۰/۱	$Al_2O_3$
کمتر از ۱	<i>L.O.I</i>



شکل ۳. بزرگنمایی نانوسیلیس در میکروسکوپ الکترونیکی



شکل ۲. نتایج پراش پرتو ایکس روی نانوسیلیس

### ۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های تهیه شده بعد از عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه تحت آزمایش قرار داده شدند. به منظور ایجاد شرایط یکسان عمل‌آوری، تمامی نمونه‌ها پس از ساخته شدن درون کیسه نایلونی در در چند لایه قرار گرفتند تا رطوبت آنها در اثر تبخیر کاهش نیابد. لازم به ذکر است دمای ساخت و نگهداری نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش حدود ۲۰ درجه در محیط آزمایشگاه می‌باشد. جدول ۶ درصد‌های وزنی سیمان و نانوسیلیس را در آماده‌سازی نمونه‌ها به منظور انجام آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد. حداقل نسبت وزنی آب به سیمان برای انجام واکنش‌های شیمیایی سیمان حدود ۰/۲۵ می‌باشد (Neville and Brooks, 2010) که در این تحقیق همانگونه که اشاره شد، نسب وزنی آب به سیمان در تمامی مخلوط‌ها ۰/۴ لحاظ شده است تا امکان دسترسی مناسب سیمان به آب برای انجام واکنش پوزولانی کامل فراهم شود.

یکی از مسائل بسیار مهم در ارتباط با استفاده از نانو ذرات در بهسازی خاک‌های مسئله‌دار، پراکندگی مناسب نانو ذرات است، چنانچه مسئله پراکندگی نانو ذرات در توده‌ی خاک به درستی انجام نشود، این ذرات تأثیر شگرف خود بر خصوصیات خاک را به درستی نشان نخواهند داد. بدین منظور ابتدا نانوسیلیس به دوغاب سیمان اضافه شد تا سیمان اصلاح شود. بدین منظور مخلوط سیمان و آب با نسبت ۰/۴ همراه با نانوسیلیس درون یک مخلوط کن کوچک ریخته شده و توسط همزنی با سرعت متوسط ۶۰۰ دور در دقیقه به مدت ۹۰ ثانیه مخلوط می‌شوند. سپس در مدت ۳۰ ثانیه مخلوط کن متوقف و قسمت‌هایی که به بدنه مخلوط کن چسبیده‌اند را جدا کرده و مجدداً عمل اختلاط این بار با دور تند حدود ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه ادامه می‌یابد. در این راستا از پره مخصوصی برای همزن استفاده می‌شود تا در سرعت بالا، تنش برشی زیاد به منظور اختلاط در مقیاس نانو انجام شود. سپس دوغاب سیمان اصلاح شده به خاک رس بصورت تدریج افزوده و مخلوط خاک اصلاح شده نمونه‌سازی می‌شود.

جدول ۶. درصد وزنی سیمان و نانوسیلیس در آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه	درصد وزنی سیمان بر حسب وزن خاک خشک	درصد وزنی نانوسیلیس بر حسب وزن سیمان
نمونه ۱- خاک مینا	۰	۰
نمونه ۲	۵٪	-
نمونه ۳	۷٪	-
نمونه ۴	۵٪	۵٪
نمونه ۵		۱۰٪
نمونه ۶		۲۰٪
نمونه ۷		۳۰٪
نمونه ۸	۷٪	۵٪
نمونه ۹		۱۰٪
نمونه ۱۰		۲۰٪

#### ۴- برنامه آزمایش ها

##### ۴-۱- حد روانی و خمیری

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D4318 انجام شده است. تکرار آزمایش ۲ بار مطابق استاندارد گفته شده انجام شده است و سپس میانگین نتایج مبنای کار قرار گرفته است.

##### ۴-۲- آزمایش تراکم

از آنجایی که هدف ساختن نمونه‌ها در وزن مخصوص حداکثر خشک و رطوبت بهینه بود، در ابتدا بر روی مخلوط خاک-سیمان-نانوسیلیس، آزمایش تراکم پراکتور استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D698 صورت گرفت تا مقادیر وزن مخصوص حداکثر خشک و رطوبت بهینه برای نمونه‌های مختلف بدست آید.

##### ۴-۳- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یکی از آزمایش‌های است که به دلیل سادگی، به طور گسترده در ارزیابی مشخصات مقاومتی و میزان بهبود خاک‌های ریزدانه رسی بکار می‌رود. به همین منظور این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D2166 بر روی تمامی نمونه‌های بهسازی شده با سیمان و نانو سیلیس در سنین مختلف انجام شد. آزمایش به صورت کنترل کرنش انجام گردید. کلیه نمونه‌ها در درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک آماده و در قالب‌های

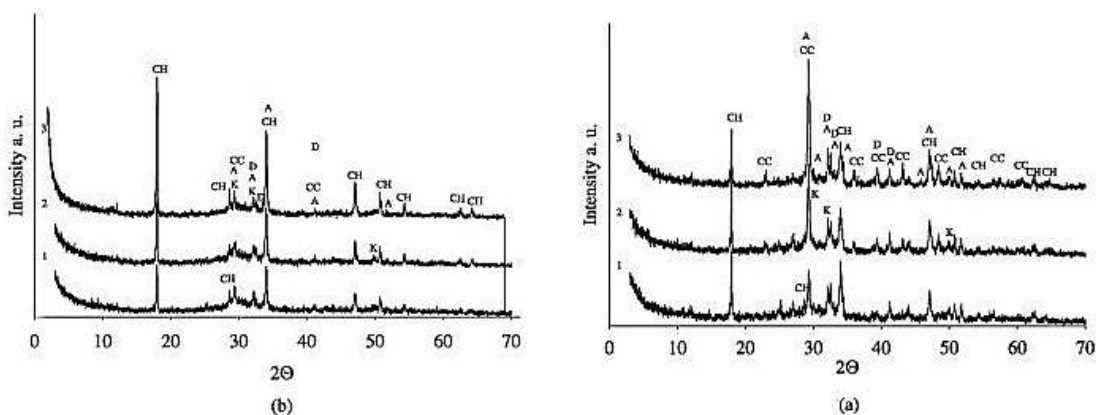
استوانه‌ای شکل، دارای قطر ۳۵ میلی‌متر و ارتفاع ۸۰ میلی‌متر در سه لایه ریخته و هر لایه به خوبی متناسب با انرژی تراکم کوبیده می‌شود. نمونه‌های فوق پس از مدتی که خود را گرفته و قدری محکم شدند به دقت از قالب خارج گشته و در داخل دو کیسه نایلونی مهر و موم شده قرار گرفته و در روزهای ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

##### ۴-۴- آزمایش باربری کالیفرنیا- CBR

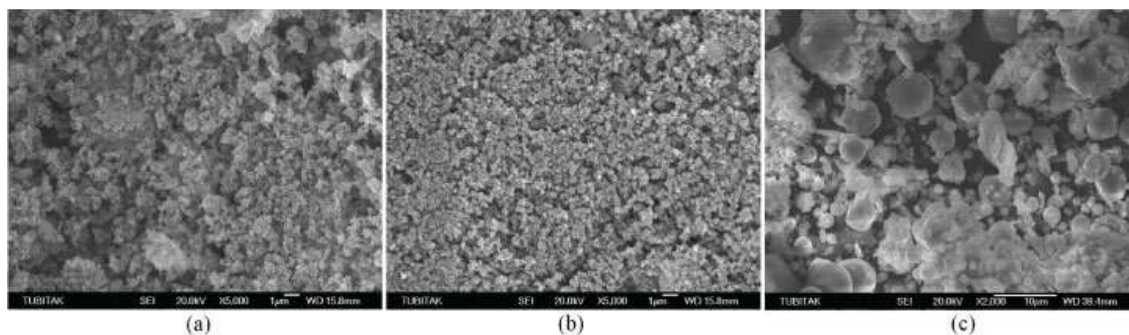
آزمایش CBR مطابق با استاندارد ASTM D1883 بر روی نمونه‌های که در درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک بدست آمده از آزمایش تراکم ساخته شده‌اند، انجام گرفته است. این آزمایش به روش خشک بر روی نمونه‌ها انجام شد، به این صورت که نمونه‌ها بعد از پایان عمل‌آوری تحت آزمایش CBR قرار گرفته‌اند. همچنین با غرقاب کردن نمونه‌ها، میزان تورم نیز مورد ارزیابی قرار گرفت تا خصوصیات حجمی نیز مورد سنجش قرار گیرد.

##### ۴-۵- بررسی نتایج آزمایش XRD

در این تحقیق به منظور بررسی پراکنش و تاثیر مناسب نانو سیلیس در اصلاح عملکرد سیمان، از نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) و همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد که نتایج آن در شکل ۴ و ۵ آورده شده است.



شکل ۴. نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه سیمان اصلاح شده در درصدهای مختلف نانو سیلیس



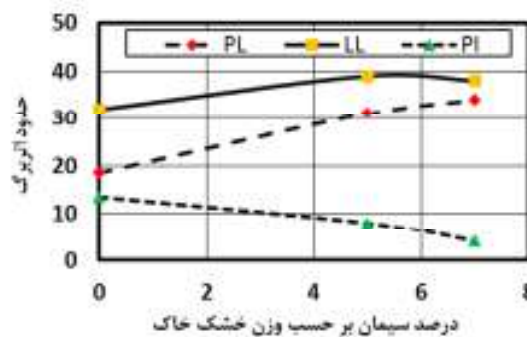
شکل ۵. نتایج تصویر میکروسکوپ الکترونیکی روی سیمان اصلاح شده ۷ روزه با بزرگنمایی مختلف

## ۵-ارزیابی نتایج

### ۵-۱- نتایج آزمایش حد خمیری و روانی

نتایج این شکل نشان می‌دهند که رابطه مستقیمی بین درصد سیمان با حد خمیری و روانی وجود دارد. به علاوه با افزایش درصد سیمان حد خمیری با شیب بیشتری نسبت به حد روانی افزایش یافته است، به عبارت دیگر شاخص خمیری با شدت بیشتری کاهش یافته است.

همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است در اثر اضافه کردن سیمان به خاک مینا، حد خمیری و حد روانی خاک اصلاح شده با درصدهای متفاوت سیمان، نسبت به خاک اصلاح نشده افزایش یافته است. این نتایج همچنین نشان می‌دهند که شاخص خمیری یعنی اختلاف حد خمیری و حد روانی در قیاس با خاک اصلاح نشده کاهش پیدا کرده است.

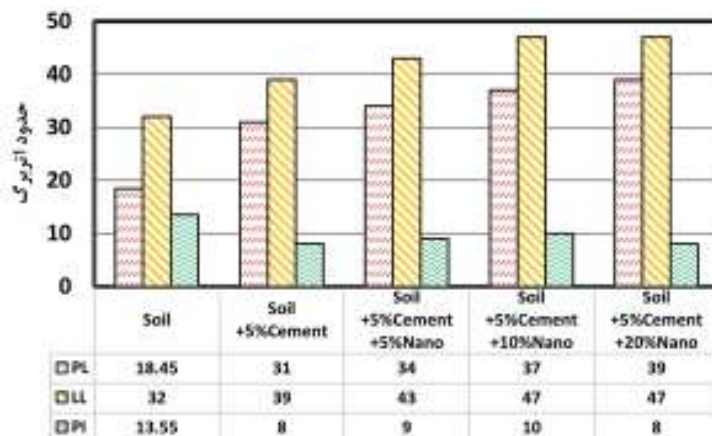


شکل ۶. تغییرات حدود اتربرگ خاک تثبیت شده با سیمان

خصوصیات خمیری و حجمی خاک با افزودن سیمان و ماده نانو افزایش می‌یابد. از این نتایج می‌توان استنتاج کرد که نانوسیلیس به دلیل انرژی سطحی زیاد باعث افزایش فعالیت پوزولانی و به دنبال آن افزایش سرعت واکنش‌های شیمیایی سیمان می‌شود که نتیجه آن تاثیر محسوس بر خصوصیات خمیری خاک خواهد شد. این موضوع در خاکهای تورمزا بسیار اهمیت دارد بطوریکه می‌توان با افزودن مقدار کمی سیمان به همراه ماده نانو سیلیس، تورم حجمی را کنترل کرد.

همانطور که از شکل ۷ مشخص است، بر اثر افزایش درصد نانوسیلیس حد خمیری با روند نسبتاً آرام و ملایم افزایش یافته است، در صورتی که حد روانی ابتدا افزایش می‌یابد و سپس روند افزایش آن متوقف می‌شود به گونه‌ای که بیشترین مقدار حد روانی به ازای ۱۰ درصد نانوسیلیس پدیدار می‌شود به همین علت حداکثر شاخص خمیری نیز در ۱۰ درصد نانو سیلیس رخ داده است (مقایسه داده‌های نتایج آزمایشگاهی). روند تغییرات حدود اتربرگ در این شکل نشان می‌دهد



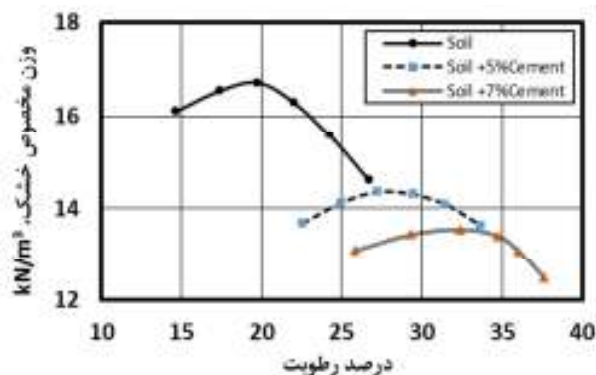


شکل ۷. تأثیر نانو سیلیس بر حدود اتبرگ خاک تورمزا

### ۲-۵- نتایج آزمایش تراکم

۳۱ درصد رخ داده است. با افزایش میزان سیمان، غلظت و خصوصیات سیالیت دوغاب سیمان در کاهش اصطکاک بین ذرات و تراکم خاک تحت تاثیر قرار گرفته و باعث خواهد شد رطوبت بهینه افزایش قابل توجهی داشته باشد. عبارتی تراکم خاک باید با درصد رطوبت بیشتری انجام شود چرا که بخشی از آب صرف واکنش‌های شیمیایی با سیمان شود.

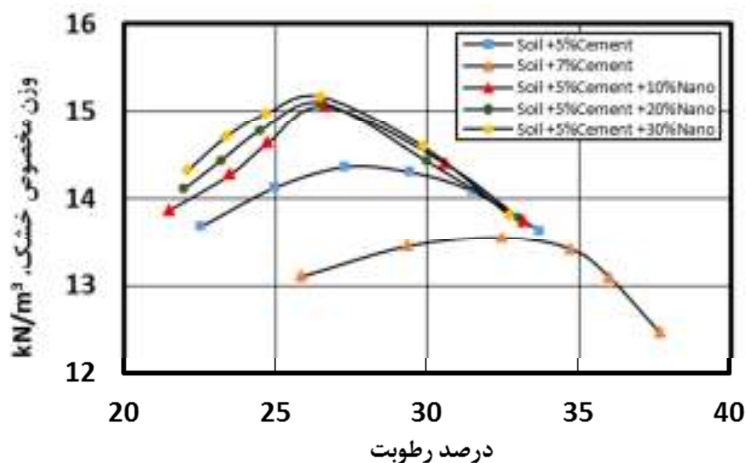
نتایج آزمایش تراکم در شکل ۸ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند با افزودن سیمان به خاک مینا وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش و درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که با افزایش درصد سیمان این موضوع بیشتر محسوس می‌شود. کمترین وزن مخصوص خشک بیشینه مربوط به ۷ درصد سیمان می‌شود که در رطوبت بهینه حدود



شکل ۸. تأثیر مقدار سیمان بر منحنی تراکم خاک تورمزا

رطوبت بهینه رخ نمی‌دهد ولی به مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه افزوده می‌گردد به گونه‌ای که بیشترین مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه به ازای ۳۰ درصد نانو سیلیس (بر حسب وزن سیمان) رخ می‌دهد.

به علاوه براساس شکل ۹ مشاهده می‌شود که با اضافه کردن نانو سیلیس به سیمان، درصد رطوبت بهینه نسبت به حالتی که خاک مینا با ۷ درصد سیمان بهسازی شده است کاهش می‌یابد، در صورتی که وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی آن افزایش می‌یابد. با افزایش درصد نانو سیلیس تغییر چندانی در درصد

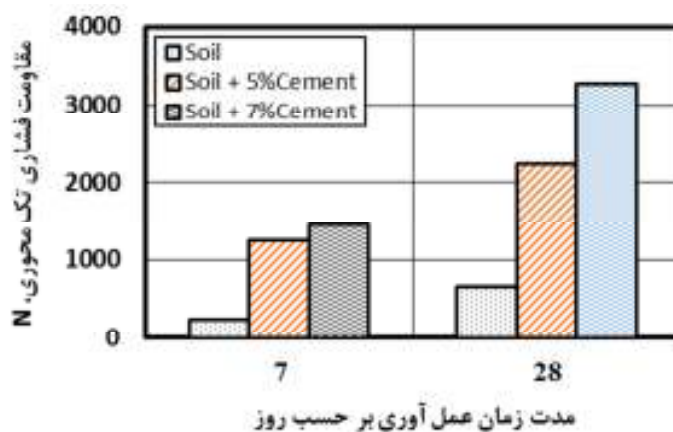


شکل ۹. تأثیر نانو سیلیس بر منحنی تراکم خاک تورمزا

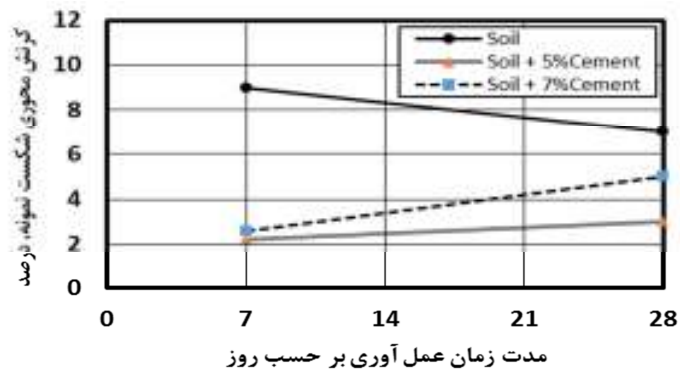
### ۳-۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

افزایش سیمان باعث افزایش کرنش محوری شکست نمونه می‌شود. این موضوع بدان علت است که افزایش سیمان با تغییر در مشخصات مکانیکی خاک، رفتار آن را ترد و شکننده تر می‌کند. همچنین شکل ۱۱ نشان می‌دهد در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان، با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، کرنش شکست نیز افزایش می‌یابد در حالیکه در خاک اصلاح‌نشده این روند رو به کاهش است. این موضوع ناشی از عملکرد ژل سیمان-خاک می‌باشد بطوریکه با عملکرد واکنش شیمیایی هیدراسیون، پیوند بین ذرات بیشتر شده و در نتیجه چسبندگی و به دنبال آن مقاومت برشی و مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد.

در ابتدا با استفاده از آزمایش تک محوری تأثیر افزودن درصد‌های متفاوت سیمان به تنهایی به‌عنوان ماده تثبیت کننده، مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، افزودن سیمان به خاک منبأ سبب افزایش مقاومت فشاری تک محوری می‌شود و این افزایش با گذشت زمان رابطه‌ی مستقیمی دارد به عنوان مثال در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، مقاومت فشاری محصورنشده خاک بهسازی شده با ۷ درصد سیمان حدود ۵۶ درصد بیشتر از مقاومت خاک بهسازی شده با ۵ درصد سیمان است. همچنین شکل ۱۱ نشان می‌دهد کرنش محوری متناظر با شکست نمونه‌ها در آزمایش تک محوری، متناسب با مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری می‌باشد بطوریکه



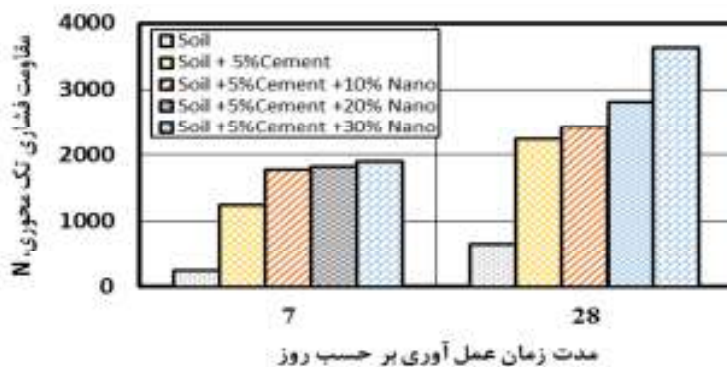
شکل ۱۰. مقایسه تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک محوری



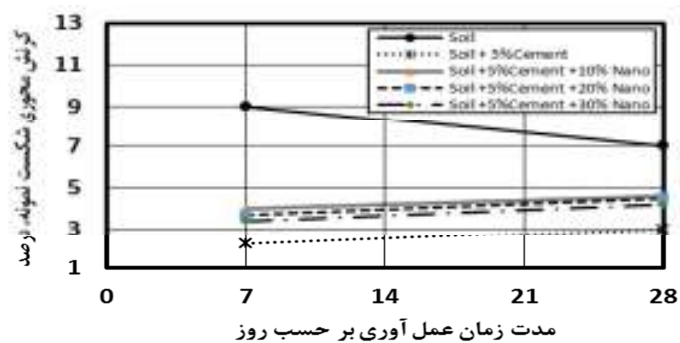
شکل ۱۱. مقایسه تاثیر مقدار سیمان و زمان عمل آوری بر کرنش محوری شکست نمونه

می‌یابد بطوریکه این افزایش در عمل آوری کوتاه مدت کمتر بوده (حدود ۴۰ درصد) ولی در بلند مدت این افزایش قابل ملاحظه است (حدود ۷۵ درصد). علاوه بر این با بررسی نتایج شکست نمونه مشاهده شد که با افزایش مدت زمان عمل آوری، کرنش گسیختگی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۳).

در ادامه تحقیق با انتخاب ۵ درصد سیمان برای تثبیت خاک، مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نانو سیلیس (بر حسب وزن سیمان) برای اصلاح سیمان انتخاب و خاک با سیمان اصلاح شده مورد آزمایش تک محوری قرار گرفت. این ترکیب‌ها در مدت زمان‌های عمل آوری کوتاه مدت ۷ روزه و دراز مدت ۲۸ روزه انجام شده است. مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که به ازای افزودن نانو سیلیس مقاومت فشاری محصور نشده افزایش



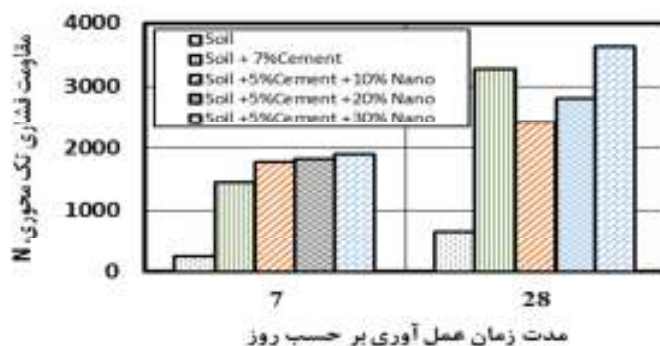
شکل ۱۲. مقایسه تاثیر نانو سیلیس و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری



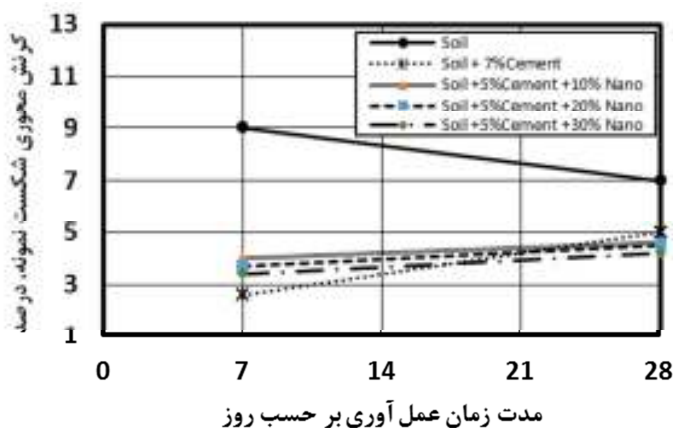
شکل ۱۳. مقایسه تاثیر نانو سیلیس و زمان عمل آوری بر کرنش محوری شکست نمونه

تا هفت روزه)، تأثیر نانو سیلیس در مقایسه با نمونه‌های بهسازی شده با ۷ درصد سیمان نیز بیشتر است به عنوان مثال در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه مقاومت فشاری ترکیب خاک-سیمان به همراه ۳۰ درصد نانو سیلیس حدود ۲۹ درصد از خاک بهسازی شده با ۷ درصد سیمان و ۶ برابر از خاک مینا بیشتر است. اما در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده در نمونه‌ی بهسازی شده با ۷ درصد سیمان رخ می‌دهد به گونه‌ای که مقاومت فشاری محصورنشده آن نسبت به خاک مینا ۴/۵ برابر و نسبت به ترکیب خاک سیمان همراه با ۳۰ درصد نانو سیلیس ۱۹ درصد بیشتر شده است. روند رشد کرنش شکست در شکل ۱۵ نشان می‌دهد با گذشت زمان و دوره عمل‌آوری، افزودن ۷ درصد سیمان می‌تواند نتیجه‌ای مشابه با دیگر نمونه‌های ۲۸ روزه داشته باشد بعبارتی کرنش محوری شکست در تمامی نمونه‌های اصلاح شده به ۶ درصد می‌رسد.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد کرنش محوری متناظر با شکست نمونه‌ها با مقدار سیمان، مقدار ماده نانو و زمان عمل‌آوری تناسب دارد. نتایج این شکل نشان می‌دهد سیمان و ماده نانو باعث کاهش کرنش محوری شکست می‌گردد و به عبارتی رفتار خاک را شکننده‌تر می‌کند. هرچند افزایش سیمان باعث کاهش کرنش شکست می‌شود اما افزودن توام سیمان و ماده نانو باعث افزایش کرنش شکست می‌شود. روند افزایش کرنش شکست در نمونه های اصلاح شده با گذشت زمان و عمل‌آوری محسوس‌تر و رو به رشد است درحالی که در خاک اصلاح‌نشده این روند رو به کاهش است. این موضوع ناشی از عملکرد ژل سیمان-خاک-نانو می‌باشد. این نتایج با تحقیقات انجام یافته توسط (Gholami and Shiva (2015 همخوانی دارد و نتایج مشابهی توسط این محققان گزارش شده است. در شکل ۱۴ تأثیر افزایش سیمان به ۷ درصد در قیاس با تأثیر مواد نانو بر مقاومت فشاری تک محوری نشان داده شده است. از این شکل می‌توان دریافت که در بازه زمانی کوتاه مدت (یک



شکل ۱۴. تأثیر افزایش سیمان تا ۷ درصد و یا اصلاح با مواد نانو بر مقاومت فشاری تک محوری

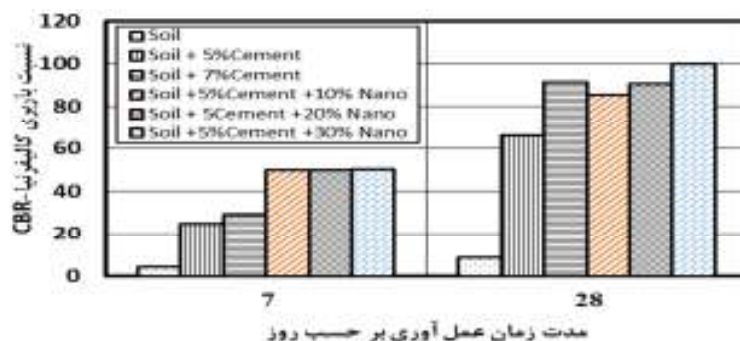


شکل ۱۵. تأثیر افزایش سیمان تا ۷ درصد و یا اصلاح با مواد نانو بر کرنش محوری شکست نمونه

## ۵-۴- نتایج آزمایش باربری کالیفرنیا CBR

نمونه‌ها نیز، مقدار باربری کالیفرنیا افزایش می‌یابد. این نتایج با تحقیقات انجام یافته توسط Bahmani et al. (2014) همخوانی دارد و نتایج مشابهی توسط این محققان در استفاده از نوعی نانو سیلیس بدست آمده است.

شکل ۱۶ نشان می‌دهد که در اثر افزودن سیمان به خاک مینا، مقدار باربری کالیفرنیا شروع به افزایش می‌کند به عبارتی دیگر می‌توان گفت در نمونه‌های بهسازی شده با سیمان، مقدار باربری کالیفرنیا با افزایش مقدار سیمان افزایش می‌یابد به علاوه مشاهده می‌شود که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری



شکل ۱۶. مقایسه تاثیر نانو سیلیس و زمان عمل‌آوری بر نسبت باربری کالیفرنیا

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی‌های آزمایشگاهی، تاثیر نانو سیلیس در اصلاح سیمان و تثبیت بستر خاک رسی مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده بهبود قابل ملاحظه خصوصیات مکانیکی و مهندسی خاک‌های اصلاح شده می‌باشد. اهم نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه و جمع‌بندی کرد: بررسی خصوصیات فیزیکی خاک در تحلیل نتایج حدود ارتبرگ نشان داد که با افزودن سیمان، دامنه خمیری خاک مینا کاهش می‌یابد به گونه‌ای که کمترین نشانه خمیری به ازای ۷ درصد سیمان برای اصلاح خاک رخ خواهد داد. به علاوه افزودن نانو سیلیس به سیمان و اصلاح آن، باعث افزایش نشانه خمیری خاک اصلاح شده با سیمان حاوای نانوذرات می‌شود. بیشترین میزان نشانه خمیری در خاک اصلاح شده با سیمان حاوای ۱۰ درصد نانو سیلیس به دست آمده است.

بر اساس نتایج آزمون تراکم ملاحظه شد که افزودن سیمان به خاک باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه می‌گردد، که با افزایش میزان سیمان مصرفی این تغییرات بیشتر می‌شود. به ازای ۷ درصد سیمان بیشترین درصد رطوبت بهینه و کمترین وزن مخصوص خشک بیشینه بدست آمده است. به علاوه افزودن نانو سیلیس به ترکیب خاک-سیمان سبب کاهش درصد رطوبت بهینه و

همچنین نتایج شکل ۱۶ تاثیر افزودن درصدهای مختلف (۱۰، ۲۰ و ۳۰) نانو سیلیس به ترکیب خاک بهسازی شده با ۵ درصد سیمان را نیز نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که افزودن نانو سیلیس به ترکیب خاک-سیمان، سبب افزایش مقاومت باربری کالیفرنیا نمونه‌ها می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار باربری کالیفرنیا در کوتاه مدت یعنی مقاومت ۷ روزه، با افزایش درصد نانو سیلیس تغییر چندانی و محسوسی ندارد به عبارتی درصد نانو سیلیس در کوتاه مدت تاثیری بر باربری کالیفرنیا ندارد. این نتایج نشان می‌دهند درصد ناچیزی نانو سیلیس در کوتاه مدت می‌تواند باربری کالیفرنیا را تا ۵۰ درصد افزایش دهد. بررسی باربری کالیفرنیا در درازمدت نشان می‌دهند تاثیر میزان نانو سیلیس بسیار محسوس‌تر است بطوریکه با افزایش میزان نانو سیلیس از ۱۰ درصد تا ۳۰ درصد (بر حسب وزن سیمان)، باربری کالیفرنیا از ۲۸ درصد به ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نتایج میزان تورم نمونه‌های اشباع نیز نشان دادند که با افزودن سیمان میزان تورم به شدت و تا کمتر از ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش با افزایش ماده نانو نیز روند مشابهی را دنبال می‌کند بطوریکه میزان کاهش تورم با افزودن ماده نانو از ۱۰ تا ۳۰ درصد وزن سیمان، به کمتر از ۴۰ درصد کاهش می‌یابد.

-Bhattacharja, S., Javedi, I. and Alan, H. (2003), "Stabilization of clay soils by Portland cement or lime—a critical review of literature" PCA R&D Serial 2066, pp. 60-67.

-Buddhima, I., Jian, C. and Cholachat, R. (2015), "Ground Improvement: Case Histories", Oxford, 1st Edition; UK: Elsevier.

-Changizi, F. and Haddad, A. (2015), "Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO<sub>2</sub> and recycled polyester fiber", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 367-378.

-Dupas, J. and Pecker, A. (1979), "Static and dynamic properties of sand-cement", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 105, No. 3, pp. 419-436.

-Feynman, R. (1959), "There's plenty of room at the bottom", report from speech given at annual meeting of the American Physical Society. Engineering Society, Vol. 23, pp. 22-36.

-Ghazi, H., Baziar, M.H. and Mirkazemi, S.M. (2011), "The effects of nano-material additives on the basic properties of soil", 14th Asian Regional Conference of Geotechnical, Hong-Kong.

-Gholami, M., and Shiva, S. (2015), "Effect of Sampling Method on Strength of Stabilized Silty Sands with Colloidal Nano Silica", Journal of Civil Engineering Research, Vol. 5, No.6, pp. 129-135.

-Gholilou R., and Nikraz, H. (2014), "The Reasons for Introducing Nano-silica in Cementations Layer in Pavement", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 19, pp. 1761-1768.

-Gutierrez, M.S. (2005), "Potential Applications of Nano-mechanics in Geotechnical Engineering", In Proceeding of the International Workshop on Micro-Geomechanics across Multiple Strain Scales, Cambridge, UK.

-Kadivar, M., Barkhordari, K. and Kadivar, M. (2012), "Nanotechnology in Geotechnical Engineering", In Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Vol. 261, No. 1, pp. 524-528.

-Kim, S., Hooton, R., Cho, T. and Lee, J. (2014), "Comparison of innovative Nano fly

افزایش وزن مخصوص خشک بیشینه می‌گردد. به گونه‌ای خاک اصلاح شده با سیمان حاوی ۳۰ درصد نانوسیلیس (بر حسب وزن سیمان)، کمترین درصد رطوبت بهینه و بیشترین مقدار وزن مخصوص خشک را داشت.

-نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری نشان داد که افزودن سیمان و نانو سیلیس هر دو سبب افزایش مقاومت تک محوری نمونه‌ها می‌شوند. همچنین دیده شد که با افزایش درصد سیمان و نانو سیلیس مقاومت تک محوری افزایش بیشتری می‌یابد و این افزایش با گذشت زمان رابطه‌ای مستقیم دارد، در بازه‌های زمانی کوتاه مدت، تأثیر نانو سیلیس در نمونه‌های حاوی ۷ درصد سیمان کم است اما در بلندمدت بیشترین میزان مقاومت تک محوری به نمونه‌های بهسازی شده با ۷ درصد سیمان تعلق دارد.

-افزودن سیمان و نانوسیلیس سبب افزایش نسبت باربری کالیفرنیا می‌شود و نرخ افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در کوتاه مدت زیاد است اما تحت تأثیر میزان نانوسیلیس نمی‌باشد. این ویژگی در بسیاری از پروژه‌ها که محدودیت زمانی در آن‌ها حکم فرماست می‌تواند بسیار سودمند است. به‌عنوان مثال نسبت باربری کالیفرنیا در نمونه اصلاح شده با سیمان با افزودن تنها ۱۰ درصد نانو سیلیس (بر حسب وزن سیمان) در مدت هفت روز بیش از ۴۵ درصد افزایش می‌یابد.

## ۷-مراجع

-احدی، ر. جلیلی، م. و نیکخواه شهمیرزادی، م. (۱۳۹۳)، "بررسی تأثیر افزودنی‌های نانو بر خواص مهندسی مصالح خاکی (مطالعه موردی خاک رس زنجان)", اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

-American Society for Testing and Materials-ASTM (2000), "One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils" Designation: D4546-2000.

-Bahmani, S.H., Huat, B.B., Asadi, A. and Farzadnia, N. (2014), "Stabilization of residual soil using SiO<sub>2</sub> nanoparticles and cement" Construction and Building Materials, Vol. 64, pp. 350-359.

- International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, 3(3); pp.37-46.
- Neville, A. M. and Brooks, J. (2010), "Concrete Technology", 2nd Revised edition Edition, Longman Scientific & Technical, Harlow.
- Ng, C.W.W. and Coo, J. (2014), "Hydraulic conductivity of clay mixed with nanomaterials", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 52, No. 6, pp. 808-811.
- Seyedi, G. and Mirkazemi, S.M. (2013), "Application of nanomaterial to stabilize a weak soil", International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri USA.
- Shahin, S., Fayed, L. and Ahmad, E. (2015) "Review of Nano additives in stabilization of Soil", 7th International Conference on Nano-Technology in Construction, Sharm El-Sheikh, Egypt.
- Zhang, G. (2007), "Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils", In Geo-Denver Congress: New Peaks in Geomechanics, pp. 1-13.
- Zhang, S., Wang, W., Song, X., Chi, X. and Lu., T. (2014), "Direct shear behavior of nanometer magnesia reinforced cement soil with 28d age", The Open Mechanical Engineering Journal, Vol. 8, pp. 509-513.
- ash with conventional fly ash and nano-silica". Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 41, No. 5, pp. 396-402.
- Li, N., Wang, W., Ye, J., Tao, F. and Chi, X. (2015), "Short Age Direct Shear Behavior of Seashore Soft Soil Reinforced by Cement and Nano-Titanium Dioxide", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 1087-1093.
- Lo, S. and Wardani, S. (2002) "Strength and dilatancy of silt stabilized by a cement and fly ash mixture", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, No. 1, pp. 77-89.
- Luo, H.L., Hsiao, D.H., Lin, D.F. and Lin, C.K. (2012), "Cohesive Soil Stabilized Using Sewage Sludge Ash/Cement and Nano Aluminum Oxide", International Journal of Transportation Science and Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 83-100.
- Majeedi, Z.H. and Taha, M.R. (2013), "A Review of Stabilization of Soils by using Nanomaterials", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 7, No. 20, pp. 576-581.
- Majeedi, Z.H., Taha, M.R. and Jawad, I.T. (2014), "Stabilization of soft soil using nanomaterials", Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol. 8, No. 4, pp. 503-509.
- Mitchell, J.K. and Freitag, D. (1961), "Review and Evaluation of Soil-Cement Pavements", Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 126, No. 1, pp. 1123-1144.
- Mohammadi, M. and Niazian, M. (2013), "Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay",