نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره۳، سال ۱۳۹۷، صفحات ۵۹۷ تا ۶۰۶
DOI: 10.22060/ceej.2017.12241.5157

ارزیابی اصلاح کننده نانو بر مشخصات حجمی و مکانیکی خاک ریزدانه رسی

سعید غفارپورجهرمی*، حمید زاهدی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده: امروزه استفاده از نانوتکنولوژی در دهه‌های اخیر به منظور بهبود خصوصیات رفتاری مصالح مورد استقبال محققان در علوم مختلف قرار گرفته است. یکی از این موضوعات در مهندسی ژئوتکنیک، استفاده از نانو مواد در بهبود خصوصیات رفتاری خاک‌های مسئله‌دار به منظور افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست، کاهش تورم و همچنین کاهش هزینه‌های اقتصادی به منظور تثبیت خاک در کوتاه مدت و دراز مدت می‌باشد. در این تحقیق، نتایج یک مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی تشریح می‌شود که در آن تاثیر نانوآلومینیوم اکسید گاما بر مشخصات حجمی و مکانیکی نوعی خاک رس مسئله‌دار مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق ابتدا تاثیر سیمان در اصلاح خاک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در ادامه تاثیر توام سیمان و نانو آلومینیوم بر مشخصات خاک مورد کنکاش قرار می‌گیرد. بررسی این تاثیرات در دوره‌های عمل‌آوری ۱روزه تا ۲۸روزه انجام شده است. خصوصیات مورد ارزیابی در این تحقیق شامل حدود اتربرگ، مشخصات تراکمی، مقاومت فشاری تک محوری، نسبت باربری کالیفرنیا و درجه اسیدیته (pH) برای خاک اصلاح نشده، خاک اصلاح شده با مقادیر مختلف سیمان و خاک اصلاح شده با سیمان در درصدهای مختلف نانوآلومینیوم می‌باشد. همچنین به منظور کنترل و ارزیابی تأثیر مواد در مقیاس نانو از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تأثیر نانو آلومینیوم در رفتار کوتاه‌مدت به منظور افزایش مقاومت و سرعت خودگیری بسیار محسوس است بطوریکه با افزودن ۲٪ ماده نانو، مقاومت تک محوری نمونه‌ها در روز اول تا ۲۰٪ در مقایسه با نمونه‌های متناظر افزایش می‌یابد. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهند با افزودن کمتر از ۶ درصد ماده نانو (بر حسب وزن سیمان) می‌توان مقاومت مکانیکی خاک را تا بیش از ۳۵ درصد افزایش داد و به دنبال آن بخش قابل توجهی از مصرف سیمان در اصلاح و به‌سازی خاک را کاهش داد که نشان دهنده تاثیر اقتصادی ماده نانو و متعاقب آن کاهش مصرف انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۱ آذر ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۰ بهمن ۱۳۹۵
پذیرش: ۲ اسفند ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۷ اسفند ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:
خاک رس
نانوآلومینیوم گاما
اصلاح و به‌سازی
مشخصات مکانیکی
مشخصات حجمی

۱- مقدمه

خاک به‌عنوان یکی از پوشش‌های سطح زمین، اولین و مهمترین بخش در اجرای هر پروژه مهندسی می‌باشد که مهندسان با آن مواجه هستند. برخی از این خاک‌ها در پروژه‌های مهندسی مشکل آفرین هستند که به‌عنوان خاک‌های مسئله‌دار شناخته می‌شوند. 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 مستقر در سطح ایجاد کنند. از جمله این مشکلات می‌تواند تغییرات در خصوصیات رفتاری خاک یعنی تغییر در مشخصات حجمی، مکانیکی و مقاومتی در زمان جذب آب باشد که خسارت‌های زیادی را باعث می‌شود. لذا چگونگی شناسایی و برخورد با این نوع خاک‌ها، موضوع بسیاری از مطالعات و تحقیقات در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. وجود یا ایجاد بستر مقاوم از اصول اولیه ساخت در هر عملیات عمرانی است. خاک به‌عنوان ساختگاه یک سازه، بارها را به طور موثر توزیع و منتقل می‌کند و اگر استحکام و پایداری خاک کافی نباشد به دلیل نشست‌های نامتقارن در سازه، ایجاد ترک و گسیختگی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. خاک‌های رسی بیشتر در معرض این مسئله هستند لذا یکی از روش‌های حل مشکل ضعیف بودن زمین، به‌سازی خاک است. اهداف در به‌سازی خاک بسیار متعدد و شامل افزایش مقاومت، کاهش نشست و افزایش دوام است. در بررسی مطالعات پژوهشگران مختلف برای بهبود خصوصیات رفتاری خاک از افزودنی‌های مختلف همچون سیمان، آهک، قیر، خاکستر بادی و غیره استفاده شده و مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است [۵-۱].

به طور کلی هر نوع خاکی که عاری از مواد شیمیایی نظیر سولفات‌ها و همچنین مواد آلی باشد قابلیت تثبیت شدن با سیمان را دارد [۶]. در اکثر فعالیت‌های عمرانی از سیمان پرتلند نوع یک یا دو استفاده می‌شود. در مواردی که خاک حاوی حداکثر ۱۰٪ سولفات باشد یا آب مصرفی حاوی بیشتر از ۱۵۰ ppm سولفات باشد از سیمان نوع دو استفاده می‌شود [۷]. 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٪ وزنی خاک مصرفی می‌باشد [۸]. به علاوه یکی از مواد افزودنی نوین و جدید که در به‌سازی خاک مورد استفاده مهندسان در کشورهای مختلف جهان می‌باشد، نانو مواد هستند [۱۴-۹].

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Saeed_ghf@srttu.edu

یکی از تفاوت‌های بارز این تحقیق استفاده از یک نوع ماده اصلاح کننده خاص در مقیاس نانو و با کاربرد آسان، سریع و نسبتاً ارزان در اصلاح مشخصات حجمی و مکانیکی خاک‌های رسی می‌باشد که قبلا گزارش نشده است.

مواد در محدوده‌ی ذرات 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 ابعاد بسیار کوچک، سطح ویژه بسیار بالای را دارا هستند و به دلیل داشتن همین خصوصیت و بارهای الکتریکی در سطح، در صورت استفاده به مقدار بسیار اندک 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 [۱۵ و ۱۶]. در سال‌های اخیر نانو ذراتی نظیر؛ نانو سیلیس، نانوآلومینیوم، نانو مس، نانو تیتانیم، نانومنیزیم، نانولوله‌های کربنی، نانو خاک و نانو رس جهت به‌سازی خاک‌های مسئله‌دار به کار گرفته و مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته‌اند [۲۸–۱۷]. در این میان نانوآلومینیوم دارای خصوصیات منحصر بفردی است بنابراین می‌توان از نانوآلومینیوم جهت به‌سازی خصوصیات مهندسی خاک‌های مسئله‌دار نیز کمک گرفت. به عنوان مثال افزودن نانوآلومینیوم به خاک‌های مسئله‌دار باعث افزایش ظرفیت باربری و همچنین کاهش نشست تحکیمی می‌گردد [۲۹]. همچنین افزودن نانوآلومینیوم سبب افزایش مقدار باربری کالیفرنیا یا CBR و همچنین مقاومت فشاری تک محوری برخی خاک‌های خاص شده است [۳۰]. در این مطالعه با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی به بررسی تغییر رفتار خاک رس تثبیت شده با سیمان پس از مخلوط شدن با نانو ذرات آلومینوم می‌پردازیم. از آنجایی که سیمان در آلودگی محیط زیست نقش مخربی دارد، در واقع هدف ما جایگزینی مصالح نوین و با قابلیت تأثیرگذاری بیشتر جهت کاهش میزان مصرف سیمان برای تثبیت خاک‌های مسئله‌دار رسی است. برای این منظور آزمایش‌های مختلف چون حدود اتربرگ و تراکم به ترتیب برای بررسی اثر نانو ذره ذکر شده بر ویژگی‌های حجمی، خمیری و تراکمی خاک تثبیت شده با سیمان انجام شده است. به علاوه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و آزمایش باربری کالیفرنیا یا CBR به عنوان آزمایش‌های مقاومتی و مکانیکی برای مطالعه اثر نانوآلومینوم روی ویژگی‌های مقاومتی خاک تثبیت شده با سیمان در زمان‌های مختلف عمل‌آوری از ۱ تا ۲۸ روز انجام شدند. همچنین به منظور تجزیه و تحلیل بهتر نتایج از نتایج آنالیز SEM نیز استفاده شده است که می‌تواند درک بهتری از رفتار نانو ذرات در خاک‌های تثبیت شده با سیمان ارائه دهد و بدین طریق گامی موثر در استفاده از فناوری‌های نوین (نانو فناوری) در مهندسی ژئوتکنیک برداشته شود.

در حال حاضر قیمت نانوآلومینیوم با توجه به محدودیت ظرفیت تولید داخلی و واردات آن از خارج کشور قابل توجه می‌باشد اما تجربه نشان داده است با توسعه تکنولوژی در کشور، امکان بومی شدن این محصول و تولید آن در آینده وجود خواهد داشت که قطعاً قیمت آن بسیار ارزان خواهد شد.

همچنین لازم به ذکر است میزان ماده نانو مصرفی بر حسب وزن سیمان به مقدار ۲، ۴ و ۶ درصد می‌باشد که هزینه آن در قیاس با مزایای آن در اصلاح مشخصات سیمان به منظور تثبیت خاک و افزایش مشخصات مکانیکی قابل توجه نخواهد بود که متعاقب آن کاهش مصرف انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی در تولید و مصرف سیمان را به دنبال خواهد شد. هرچند هزینه فرآوری سیمان با ماده نانو نیز باید لحاظ شود.

۲- مواد و مصالح مورد استفاده و روش انجام آزمایش‌ها

۲- ۱- مواد و مصالح

۲- ۱- ۱- خاک

خاک استفاده شده در این تحقیق، از طریق حفر گمانه دستی به عمق m ۸ از سطح زمین در منطقه خانی‌آباد تهران بدست آمده است. سپس به منظور تعیین مشخصات فیزیکی آن، آزمایش‌هایی براساس استانداردهای ASTM D-4318 و ASTM D-854 بر روی نمونه‌ی خاک مبنا انجام گرفت که خلاصه نتایج آن در جدول شماره ۱ آورده شده است. با توجه به این نتایج، در طبقه‌بندی یونیفاید این خاک از نوع CL به حساب می‌آید. برای شناسایی و ارزیابی میزان تورم خاک از روش مستقیم استفاده شده است. ارزیابی مستقیم پتانسیل تورم به معنی اندازه‌گیری مستقیم فشار تورم و درصد تورم خاک است. جدول ۲ نتایج حاصل از اندازه‌گیری مستقیم درصد و فشار تورم، به روش A در استاندارد ASTM D-4546 را نشان می‌دهد [۳۱].

جدول ۱: مشخصه‌های فیزیکی خاک مبنا

Table 1. Physical Properties of Base Soil

طبقه بندی خاک	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	چگالی ویژه
CL	٪۳۱/۶	٪۱۹/۳	٪۱۲/۳	۲/۶۴۹

جدول ۲: درصد تورم و فشار تورم

Table 2. Percentage of soil swelling and swelling pressure

تورم پذیری	درصد تورم	فشار تورم (kPa)	نوع خاک
متوسط	۴/۳۵	۱۶/۳	CL
متوسط	۲/۸	۱۲/۴	
متوسط	۱/۷	۸/۶	

۲- ۱- ۲- سیمان پرتلند

سیمان استفاده شده در این تحقیق، تهیه شده از شرکت سیمان تهران و از نوع سیمان پرتلند گونه ۴۲۵-۱ است. این سیمان طبق استاندارد ملی ایران به شماره ISIRI 389، تولید می‌شود و یک سیمان زود سخت شونده محسوب می‌گردد، که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جداول شماره ۳ و ۴ آورده شده است.

۲- ۱- ۳- نانو آلومینیوم

نانو آلومینیوم مورد استفاده در این تحقیق محصول شرکت US Research Nanomaterial است. در جداول شماره ۵ و ۶ مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانو ذرات آلومینوم آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات فیزیکی سیمان نوع ۴۲۵ طبق استاندارد ملی شماره ۳۸۹

Table 3. Physical properties of cement type 425 according to national standard number 389

نام مشخصه	سطح مخصوص gr/cm^2	انبساط اتوکلاو	زمان گیرش		مقاومت فشاری kg/cm^2	
			اولیه	نهایی	۲ روزه	۲۸ روزه
مقدار در استاندارد ۳۸۹	بیش از ۲۸۰۰	کمتر از ۰/۸ درصد	بیش از ۴۵ دقیقه	کمتر از ۶ ساعت	بیش از ۱۰۰	بیش از ۴۲۵

جدول ۴: مشخصات شیمیایی سیمان نوع ۴۲۵ – ۱ طبق استاندارد ملی شماره ۳۸۹

Table 4. Chemical properties of cement type 425 according to national standard number 389

نام مشخصه	MgO	L.O.I	I.R
مقدار در استاندارد ۳۸۹	کمتر از ۵٪	کمتر از ۳٪	کمتر از ۰/۷۵ درصد

جدول ۵: مشخصات فیزیکی نانو آلومینیوم اکسید گاما

Table 5. Physical Properties of Gamma Oxide Aluminum Nano

رنگ	اندازه متوسط ذرات	مساحت سطح ویژه m^2/gr	چگالی حجمی gr/cm^3	خلوص
سفید	۲۰ nm	بیش از ۱۳۸	۳/۸۹	بیش از ۹۹ ٪

جدول ۶: مشخصات شیمیایی نانو آلومینیوم اکسید گاما

Table 6. Chemical Properties of Gamma Oxide Aluminum Nano

Co	Mn	Na	Cr	Fe	Ca	Al_2O_3
کمتر از ۲ ppm	کمتر از ۳ ppm	کمتر از ۷۰ ppm	کمتر از ۴ ppm	کمتر از ۸۰ ppm	کمتر از ۲۵ ppm	کمتر از ۹۹ ٪

۲- ۲- روش انجام آزمایش‌ها

۲- ۲- ۱- نحوه پراکنده نمودن نانو ذرات در توده خاک

مسئله بسیار مهم در ارتباط با استفاده از نانو ذرات در به‌سازی خاک، اطمینان از پراکندگی مناسب ذرات در مقیاس نانو است. چنانچه مسئله پراکندگی نانو ذرات در توده‌ی خاک به درستی حل نشود، این ذرات تأثیر شگرف خود بر تغییر خصوصیات خاک را به درستی نشان نخواهند داد. در آزمایش‌های انجام شده از درصدهای وزنی مختلف نانوآلومینیوم شامل ۲٪، ۴٪ و ۶٪ (بر حسب وزن سیمان) در ترکیب خاک–سیمان استفاده شده است. در مرحله نخست این تحقیق لازم بود نانو ذرات با توجه به درصد مورد نظر و با دقت یک صدم وزن شوند و سپس توسط دستگاه حمام سونیکیت در آب مقطر پراکنده شوند. میزان آب مقطر استفاده شده در این مرحله به مقدار یک درصد بیشتر از رطوبت بهینه مورد نیاز انتخاب می‌شود. بلافاصله پس از پراکنش نانو ذرات در آب مقطر، محلول بدست آمده را باید با استفاده از یک آبپاش به ترکیب خاک–سیمان اسپری کرد و حین اسپری کردن با استفاده از یک کاردک باید نمونه به‌هم زده شود تا رطوبت و نانوذرات بطور کاملا همگن در نمونه پخش شوند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و متناسب با هر آزمایش، لازم است آنها را درون دو کیسه نایلونی به‌صورت مهر و موم شده قرار داد تا مدت زمان مورد نظر عمل‌آوری با همان رطوبت سپری شود. لازم به ذکر است دمای نگهداری نمونه‌ها ۲۰ درجه و در محیط آزمایشگاه می‌باشد.

۲- ۲- ۲- حد روانی و خمیری

تعیین حدود اتربرگ مطابق با استاندارد ASTM D-4318 انجام شده است. تکرار آزمایش ۲ بار مطابق استاندارد گفته شده انجام شده و سپس میانگین نتایج مبنای کار به‌عنوان نتیجه نهایی قرار گرفته است. این آزمایش‌ها بر روی مخلوط خاک–سیمان با درصدهای مختلف نانوآلومینیوم انجام گرفت.

۲- ۲- ۳- آزمایش تراکم

در این تحقیق آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد و مطابق با استاندارد ASTM D-698 صورت گرفت تا مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه بدست آید. این آزمایش نیز بر روی مخلوط خاک–سیمان در درصدهای مختلف نانوآلومینیوم انجام گرفته است. همچنین لازم به ذکر است ساخت نمونه‌ها در تمامی آزمایش‌ها به منظور تعیین خصوصیات مکانیکی، مقاومتی و حجمی در وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه انجام می‌شود تا شرایط ساخت و بافت نمونه‌ها مشابه باشد.

۲- ۲- ۴- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (محصور نشده) یکی از آزمایش‌هایی است که به دلیل سادگی و در دسترس بودن، به طور گسترده در ارزیابی مشخصات مقاومتی و تخمین میزان بهبود خاک‌های ریزدانه رسی بکار می‌رود. به همین منظور این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D-2166 بر روی تمامی نمونه‌های به‌سازی شده با سیمان با درصدهای مختلف نانوآلومینیوم در سنین مختلف عمل‌آوری انجام شد. این 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 mm و ارتفاع ۸۰ mm در سه لایه ریخته و هر لایه به خوبی متناسب با انرژی تراکم آزمایش پروکتور استاندارد، کوبیده شدند. نمونه‌های فوق پس از مدت زمانی حدود ۳ ساعت که خود را گرفته و قدری محکم شدند، به دقت از قالب خارج شده و در داخل دو کیسه نایلونی به منظور عدم تغییر رطوبت قرار گرفتند تا در زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، مورد آزمایش قرار گیرند.

۲- ۲- ۵- آزمایش باربری کالیفرنیا- CBR

آزمایش باربری کالیفرنیا و یا CBR مطابق با استاندارد ASTM D-1883 بر روی نمونه‌های متراکم شده در درصد رطوبت بهینه با حداکثر وزن مخصوص خشک (بدست آمده از آزمایش تراکم)، انجام گرفته است. این آزمایش به روش خشک برروی نمونه‌ها انجام شد به این صورت که نمونه‌ها بعد از پایان زمان عمل‌آوری، تحت آزمایش CBR قرار گرفته‌اند. همچنین با غرقاب کردن نمونه‌ها، میزان تورم نیز مورد ارزیابی قرار گرفت تا خصوصیات حجمی و تغییرات آن مورد سنجش و مقایسه قرار گیرد.

۲- ۲- ۶- آزمون pH

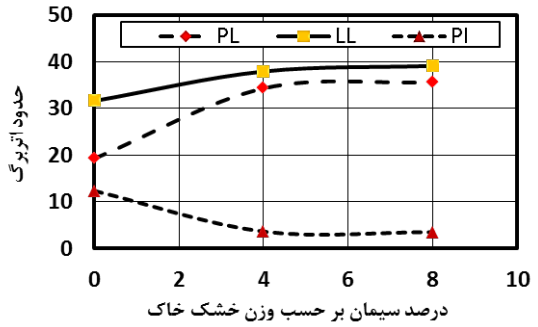
آزمون pH به منظور تعیین درجه اسیدیته، مطابق با استاندارد ASTM D-4972 برروی نمونه‌ها انجام می‌شود. برای این منظور مقدار ۱۰ گرم خاک خشک شده در هوای آزاد از الک نمره ۱۰ با قطر چشمه ۲ mm عبور داده می‌شود. سپس آنرا با ۱۰ cc آب مقطر در یک بشر به مدت یک ساعت به طور کامل به آرامی به هم زده می‌شود. پس از آن به وسیله pH سنج، میزان pH یعنی درجه اسیدیته نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

۳- ارزیابی نتایج مستخرج از آزمایش‌ها

۳- ۱- نتایج آزمایش حد خمیری و روانی

نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که نتایج این شکل نشان می‌دهند با افزودن سیمان به خاک مبنا، حد خمیری و حد روانی خاک اصلاح شده تحت تاثیر میزان سیمان، نسبت به خاک اصلاح نشده افزایش یافته است. همچنین این نتایج نشان می‌دهند شاخص خمیری یعنی اختلاف بین حد خمیری و حد روانی، با افزودن سیمان کاهش پیدا کرده است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۱ نشان می‌دهند که رابطه مستقیمی بین درصد سیمان با حدود خمیری و روانی وجود دارد. با افزودن حدود ۴ درصد سیمان، حد خمیری با شیب بیشتری در مقایسه با حد روانی افزایش می‌یابد

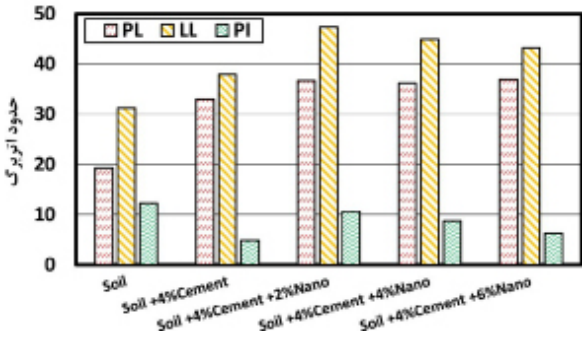
به عبارت دیگر شاخص خمیری کاهش محسوس و قابل توجهی حدود ۶۵ درصد یافته است. این نتایج برای درصد سیمان بیش از ۴ درصد، تغییرات زیادی را در نتایج نشان نمی‌دهند.



شکل ۱: تأثیر سیمان بر حدود اتربرگ

Fig. 1. Effect of cement on the Atterberg limit

نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ بر روی نمونه اصلاح شده با درصدهای مختلف نانوآلومینیوم در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. نتایج این شکل نشان می‌دهند که با افزودن نانو آلومینیوم اکسید، حد خمیری نمونه‌ها تغییر چندانی ندارد و با روند بسیار آرام و ملایمی تا بیش از ۵٪ افزایش یافته است، درصورتی که حد روانی با افزودن ۲ درصد ماده نانو افزایش قابل توجهی دارد و سپس با افزودن بیشتر ماده نانو، شروع به کاهش یافتن می‌کند به گونه‌ای که بیشترین مقدار حد روانی به ازای ۲٪ نانو آلومینیوم اکسید به میزان ۴۸ درصد پدیدار می‌شود به همین علت حداکثر شاخص خمیری نیز در ۲٪ نانو آلومینیوم به میزان ۱۳ درصد رخ داده است. روند تغییرات حدود اتربرگ در این شکل نشان می‌دهند خصوصیات خمیری و حجمی خاک با افزودن سیمان و ماده نانو تحت تاثیر محسوسی قرار می‌گیرد. این موضوع در خاک‌های تورم‌زا بسیار اهمیت دارد بطوریکه می‌توان با افزودن مقدار کمی سیمان به همراه درصد ناچیزی ماده نانو، تورم حجمی را کنترل کرد.

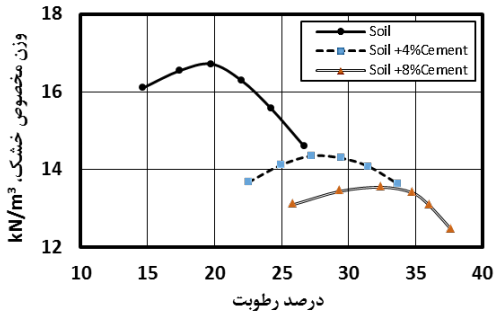


شکل ۲: تأثیر نانو آلومینیوم اکسید گاما بر حدود اتربرگ

Fig. 2. Effect of Nano Aluminum Gamma Oxide on Atterberg Amount

۳- ۲- نتایج آزمایش تراکم

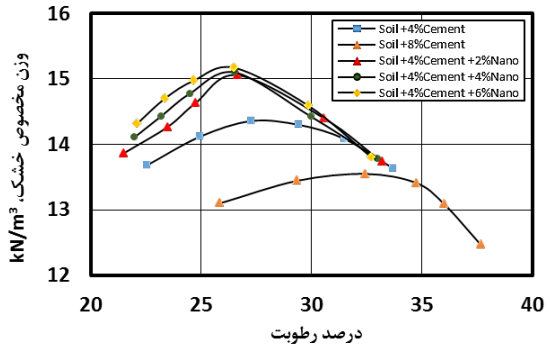
در شکل ۳ نتایج آزمایش تراکم نشان داده شده است. همانطور که نتایج این شکل نشان می‌دهند، با افزودن سیمان به خاک مبنا، وزن مخصوص خشک بیشینه دچار کاهش و رطوبت بهینه متناظر افزایش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش میزان سیمان از ۴ به ۸ درصد، وزن مخصوص بیشینه به ترتیب به میزان ۱۵ و ۲۱ درصد کاهش و رطوبت بهینه به ترتیب به میزان ۷ و ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. کمترین وزن مخصوص خشک بیشینه در ۸٪ سیمان و متناظر با رطوبت بهینه حدود ۳۳٪ رخ داده است. افزودن سیمان به خاک باعث خواهد شد به دلیل وجود واکنش‌های شیمیایی کوتاه مدت در سیمان و شروع هیدروتاسیون و همچنین افزایش غلظت آب ناشی از وجود ذرات سیمان باعث شده است در عملیات تراکم تحت انرژی ثابت، به دلیل افزایش اصطکاک ناشی از عملکرد سیمان، وزن مخصوص خشک کاهش و رطوبت بهینه متناظر در مقایسه با خاک بدون اصلاح کننده سیمان، افزایش یابد.



شکل ۳: تأثیر مقدار سیمان بر منحنی تراکم

Fig. 3. Effect of cement quantity on the density curve

علاوه بر این شکل ۴ نشان دهنده تاثیر افزودن نانوآلومینیوم به نمونه‌ها است. نتایج این شکل نشان می‌دهند که با افزودن ماده نانو، درصد رطوبت بهینه در مقایسه با نمونه خاک مبنای اصلاح شده با سیمان، کاهش می‌یابد درحالی که وزن مخصوص خشک بیشینه افزایشی تا حدود ۱۳ درصد متناسب با درصد ماده نانو دارد. در نمونه های حاوی ۴ درصد سیمان، با افزایش میزان نانوآلومینیوم تغییر محسوس و چندانی در رطوبت بهینه نمونه‌های اصلاح شده رخ نمی‌دهد ولی بر مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه اندکی افزوده می‌گردد به گونه‌ای که بیشترین مقدار وزن مخصوص خشک در نمونه‌های اصلاح شده با ۶٪ نانو آلومینوم رخ می‌دهد.



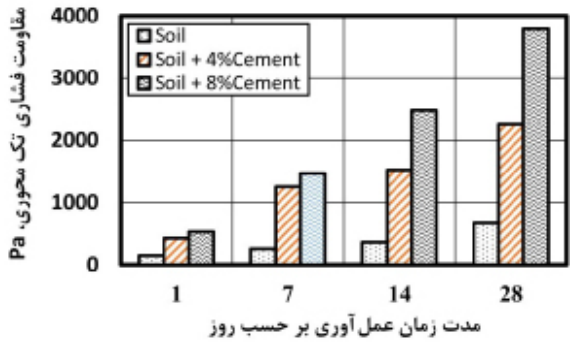
شکل ۴: تأثیر نانو آلومینیوم اکسید گاما بر منحنی تراکم

Fig. 4. Effect of Nano Aluminum Gamma Oxide on the Convection Curve

۳- ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

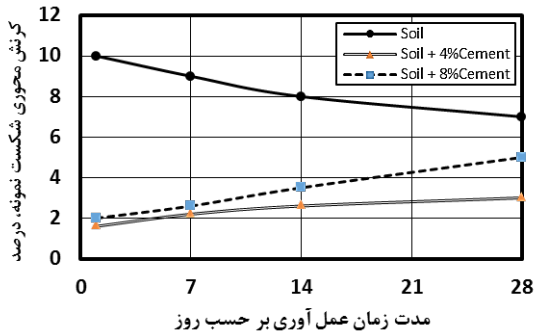
به منظور ارزیابی مقاومت تک محوری، در ابتدا تنها تأثیر افزودن درصدهای متفاوت سیمان به‌عنوان ماده تثبیت کننده مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۵ آمده است. از نتایج این شکل مشاهده می‌شود که افزودن سیمان به خاک مبنا سبب افزایش مقاومت فشاری تک محوری محصور نشده می‌شود و این افزایش با گذشت زمان رابطه‌ی مستقیمی دارد بطوریکه در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، مقاومت فشاری تک محوری خاک به‌سازی شده در ۸٪ سیمان حدود ۶۸٪ بیشتر از نمونه‌های متناظر در ۴٪ سیمان است. همچنین شکل ۶ نشان دهنده کرنش محوری متناظر با بار شکست نمونه‌ها در آزمایش تک محوری است. این نتایج نشان می‌دهند که کرنش شکست متناسب با مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری است بطوریکه با افزایش سیمان، کرنش محوری متناظر با لحظه شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع بدان علت است که افزایش سیمان با تغییر در مشخصات مکانیکی خاک، رفتار آن را تُرد و شکننده‌تر می‌کند. همچنین شکل ۶ 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 در واکنش‌های شیمیایی هیدارسیون، پیوند بین ذرات خاک بیشتر شده و در نتیجه چسبندگی و به دنبال آن مقاومت برشی و مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد.

در ادامه این تحقیق مقادیر ۲، ۴ و ۶٪ نانوآلومینیوم اکسید گاما به ترکیب خاک با ۴٪ سیمان افزوده شدند و مقاومت فشاری تک محوری این ترکیب‌ها در مدت زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. از نتایج این شکل مشاهده می‌شود که به ازای افزودن ۶٪ نانو آلومینیوم، بیشترین مقاومت فشاری بدست می‌آید. همچنین قابل مشاهده است که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری برای تمامی ترکیب‌ها، مقاومت فشاری تک محوری نیز متناسب با زمان افزایش می‌یابد. در شکل ۸، نتایج کرنش شکست نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است که مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، کرنش گسیختگی متناظر با شکست نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد.



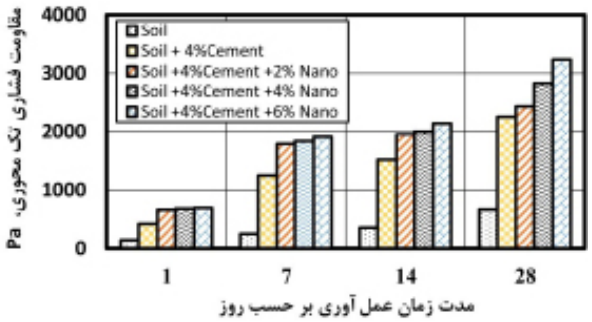
شکل ۵: مقایسه تاثیر مقدار سیمان و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری

Fig. 5. Effect of cement and curing time on axial compressive strength



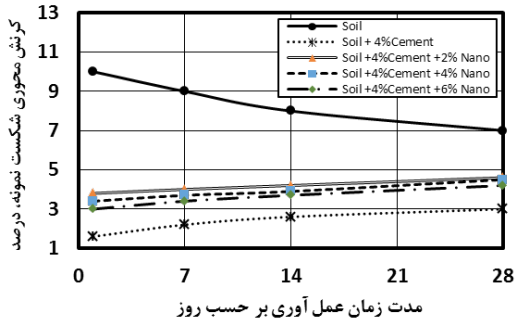
شکل ۶: مقایسه تاثیر مقدار سیمان و زمان عمل آوری بر کرنش محوری شکست نمونه

Fig. 6. Effect of cement quantity and curing time on the axial failure of the sample failure



شکل ۷: مقایسه تاثیر نانو آلومینیوم گاما و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری

Fig. 7. Effects of Nano-Aluminum Gamma and curing time on axial compressive strength

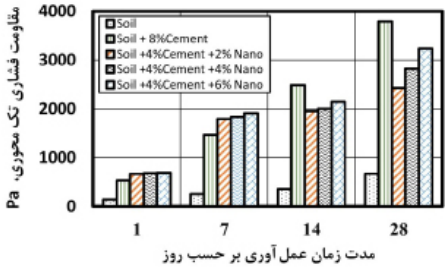


شکل ۸: مقایسه تاثیر نانو آلومینیوم گاما و زمان عملآوری بر کرنش محوری شکست نمونه

Fig. 8. Effects of Nano-Aluminum Gamma and curing time on axial strain failure of sample

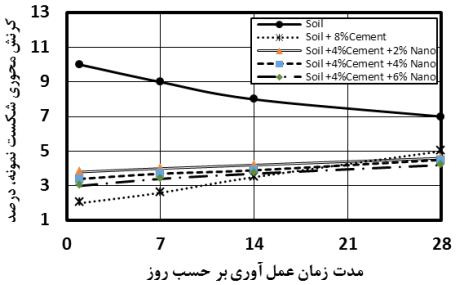
همچنین نتایج شکل ۸ نشان می‌دهند که کرنش محوری متناظر با شکست نمونه‌ها با مقدار سیمان، مقدار ماده نانو و زمان عمل‌آوری تناسب معنی‌داری دارد. نتایج این شکل نشان می‌دهند سیمان و ماده نانو باعث کاهش کرنش محوری شکست می‌گردد و به‌عبارتی رفتار خاک را شکننده‌تر و ترد می‌کند. هرچند افزایش سیمان باعث کاهش کرنش شکست می‌شود اما افزودن توام سیمان و ماده نانو باعث افزایش کرنش شکست می‌شود. افزایش کرنش شکست در نمونه‌های اصلاح شده، با زمان عمل‌آوری تناسب مستقیمی دارد که بسیار محسوس و روند تغییرات آن رشد افزایش دارد بطوریکه از کمتر از ۳ درصد در روز اول به حدود ۵ درصد در روز ۲۸ام می‌رسد. این درحالی است که این تغییرات در خاک اصلاح‌نشده با گذشت زمان رو به کاهش است و از ۱۰ درصد در روز اول به حدود ۷ درصد در روز ۲۸ام می‌رسد. این موضوع نشان دهنده عملکرد ژل سیمان–خاک‌نانو در بافت خاک اصلاح شده و بروز پدیده هیدراتاسیون دارد.

در شکل ۹ تاثیر افزایش سیمان به ۸٪ در قیاس با تاثیر مواد نانو بر مقاومت فشاری تک محوری نشان داده شده است. از این شکل می‌توان دریافت که در بازه زمانی کوتاه مدت (یک تا هفت روزه)، تأثیر نانوآلومینیوم در مقایسه با نمونه‌های به‌سازی شده با ۸٪ سیمان نیز بیشتر است به عنوان مثال در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه مقاومت فشاری ترکیب خاک و سیمان به همراه ۶٪ نانوآلومینیوم حدود ۳۰٪ از خاک به‌سازی شده با ۸٪ سیمان و بدون ماده نانو و حدود ۶ برابر از مقاومت فشاری خاک مبنا بیشتر است. این نتایج در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان می‌دهند بیشترین مقدار مقاومت فشاری تک محوری در ۸٪ سیمان و بدون ماده نانو رخ می‌دهد به گونه‌ای که مقاومت فشاری آن نسبت به خاک مبنا حدود ۴ برابر و نسبت به ترکیب خاک و سیمان ۴ درصد همراه با ۶٪ نانوآلومینیوم به میزان ۲۰٪ بیشتر شده است. فرآیند تغییرات کرنش شکست در شکل ۱۰ نشان می‌دهند که با گذشت زمان و دوره عمل‌آوری، افزودن ۸٪ سیمان می‌تواند نتیجه‌ای مشابه با دیگر نمونه‌های ۲۸ روزه داشته باشد بعبارتی کرنش محوری شکست در تمامی نمونه‌های اصلاح شده به حدود ۵٪ می‌رسد.



شکل ۹: تاثیر افزایش سیمان تا ۸٪ و یا اصلاح با مواد نانو بر مقاومت فشاری تک محوری

Fig. 9. Effect of cement up to 8% or modified with nanoscale materials on single axial compressive strength



شکل ۱۰: تاثیر افزایش سیمان تا ۸٪ و یا اصلاح با مواد نانو بر کرنش محوری شکست نمونه

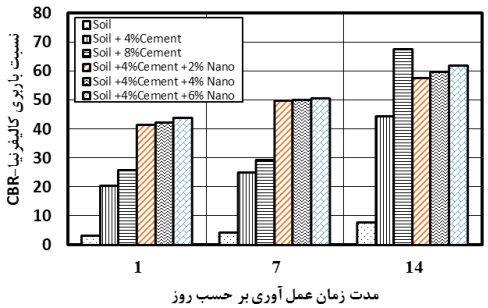
Fig. 10. Effect of cement up to 8% or modified with nanoscale materials on axial strain failure of sample

۳- ۴- نتایج آزمایش باربری کالیفرنیا CBR

نتایج آزمایش باربری کالیفرنیا بر روی نمونه‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج این شکل نشان می‌دهند که در اثر افزودن سیمان به خاک مبنا، مقادیر باربری کالیفرنیا شروع به افزایش می‌کنند به عبارتی 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 نمونه‌ها نیز، مقدار باربری کالیفرنیا افزایش می‌یابد.

همچنین نتایج شکل ۱۱ بیانگر تأثیر افزودن مقادیر مختلف نانوآلومینیوم از ۲، ۴ و ۶٪ به ترکیب خاک به‌سازی شده با ۴٪ سیمان را نیز نشان می‌دهند. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که افزودن نانوآلومینیوم به ترکیب خاک و سیمان، سبب افزایش باربری کالیفرنیا نمونه‌ها می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار باربری کالیفرنیا با افزایش درصد نانوآلومینیوم رابطه‌ی مستقیم دارد به طوری که بیشترین مقدار باربری کالیفرنیا به ازای ۶٪ نانوآلومینیوم نسبت به ۴ درصد سیمان بدست آمده است. به عنوان مثال حضور ۶٪ نانوآلومینیوم در ترکیب خاک و سیمان، باربری کالیفرنیا را بیش از

۵۰٪ نسبت به خاک به‌سازی شده در قیاس با نمونه ۴٪ سیمان بدون ماده نانو و بیش از ۹۰٪ نسبت به خاک مبنا، افزایش داده است. به علاوه مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۱۴ روز، بیشترین مقدار باربری کالیفرنیا در خاک به‌سازی شده با ۸٪ سیمان و بدون ماده نانو اختصاص یافته است. همچنین نتایج میزان تورم نمونه‌های اشباع نیز نشان دادند که با افزودن سیمان، میزان تورم به شدت و تا کمتر از ۵۰٪ کاهش می‌یابد. این کاهش با افزایش ماده نانو نیز روند مشابهی را دنبال می‌کند بطوریکه میزان کاهش تورم با افزودن ماده نانو از ۲ تا ۶٪ وزن سیمان، به کمتر از ۴۰٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱: مقایسه تاثیر نانو آلومینیوم گاما و زمان عملآوری بر نسبت باربری کالیفرنیا

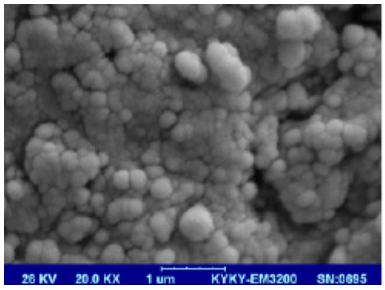
Fig. 11. Effect of Nano-Aluminum Gamma and Processing Time on California Bearing Ratio

۳- ۵- خصوصیات میکروسکوپی و شیمیایی

۳- ۵- ۱- آنالیز SEM

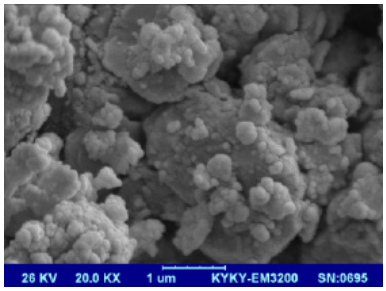
به منظور فهم و اطلاع از نوع ساختار (میکروساختار و ماکروساختار) بر روی رفتار نمونه‌ها، آنالیز SEM بر روی سه نمونه (نمونه اصلاح نشده، نمونه اصلاح شده با ۸٪ سیمان و نمونه اصلاح شده با ۴٪ سیمان به همراه ۶٪ نانو آلومینیوم اکسید گاما) انجام شدند. این تصاویر از روی نمونه‌های با زمان عمل‌آوری بیش از ۱۴ روز تهیه شده است. شکل ۱۲ مشخص می‌کند که ذرات خاک اصلاح نشده دارای مروفولوژی کروی هستند که ممکن است به علت حضور همزمان آب و ذرات رسی و ایجاد چسبندگی آن‌ها با هم باشد که منجر به شکل‌گیری ذرات بزرگتر کروی می‌شود. در نتیجه شکل‌گیری ذرات بزرگتر کروی باعث افزایش منافذ ریز در خاک اصلاح نشده می‌شود.

همچنین بر اساس شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که بر اثر افزودن سیمان به خاک مبنا، ذرات خاک به وسیله ژل سیمانتاسیون به یکدیگر می‌چسبند و باعث کلوخه شدن ذرات می‌شود. به علاوه با توجه به شکل ۱۴ می‌توان گفت که افزودن نانوآلومینیوم به ترکیب خاک و سیمان، منافذ را در گستره بیشتری پُر می‌کند و باعث افزایش تراکم نمونه‌ها می‌شود که ممکن است به علت شکل‌گیری ژل c-s-h بین سیمان و نانو ذرات باشد. این واکنش باعث می‌شود مقاومت نمونه‌ها افزایش یابد که نتایج آزمایش باربری کالیفرنیا و مقاومت فشاری تک محوری موید این مطلب است.



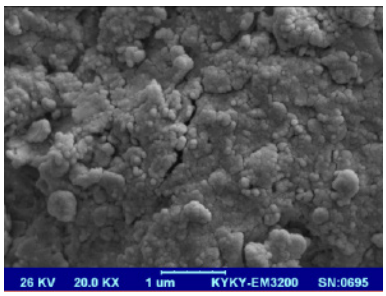
شکل ۱۲: آنالیز SEM نمونه اصلاح نشده

Fig. 12. Unmodified sample SEM analysis



شکل ۱۳: آنالیز SEM نمونه اصلاح شده با ۸٪ سیمان

Fig. 13. SEM analysis of modified sample with 8% cement

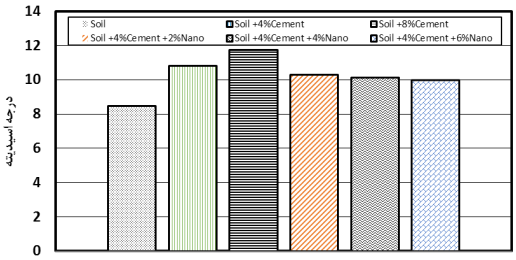


شکل ۱۴: آنالیز SEM نمونه اصلاح شده با ۴٪ سیمان به همراه ۶ درصد نانو آلومینیوم گاما

Fig. 14. Sample analysis of SEM with 4% cement plus 6% nano-aluminum gamma

به منظور تعیین میزان درجه اسیدیته یا pH از نمونه‌های با زمان عمل‌آوری بیشتر از ۲۸ روز استفاده شده است که نتایج آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج این شکل قابل مشاهده است که مقدار pH خاک مبنا برابر با ۸/۴۶ است که نشان می‌دهد خاک مبنا دارای خاصیت قلیایی است. با افزودن سیمان به خاک مبنا، میزان pH نمونه‌ها شروع به افزایش می‌کند، افزایش مقدار pH با افزایش درصد سیمان در نمونه‌ها، رابطه مستقیمی دارد به گونه‌ای که بیشترین میزان pH به ازای ۸٪ سیمان بدست آمده است که مقدار آن ۱۱/۷۵ است. از مقایسه خاک اصلاح شده با ۴٪ سیمان و نمونه‌های اصلاح شده با ۴٪ سیمان همراه با نانوآلومینیوم مشاهده می‌شود که افزودن نانوآلومینیوم سبب کاهش میزان pH می‌گردد و

این روند نزولی با درصد نانوآلومینیوم رابطه مستقیم دارد به گونه‌ای کمترین میزان pH به نمونه حاوی ۶٪ نانوآلومینیوم تعلق دارد که مقدار آن ۹/۹۸ است.



شکل ۱۵: مقایسه مقادیر pH برای حالت‌های مختلف

Fig. 15. Comparison of pH values for different states

بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش، نشان‌دهنده بهبود قابل ملاحظه‌ای در خصوصیات رفتاری خاک‌های حاوی نانو ذرات است. اهم نتایج بدست آمده در این پژوهش را میتوان به شرح زیر خلاصه کرد؛

- نتایج آزمون حدود اتربرگ نشان داد که افزودن سیمان باعث کاهش نشانه خمیری خاک مبنا شده است، به گونه‌ای که کمترین نشانه خمیری به ازای ۸٪ سیمان رخ داده است. به‌علاوه افزودن نانوآلومینیوم باعث افزایش نشانه خمیری ترکیب خاک و سیمان می‌شود. بیشترین میزان نشانه خمیری برای نمونه‌های حاوی نانوآلومینیوم، به ازای ۲٪ به دست آمده است.
- براساس 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 ۸٪ سیمان بیشترین درصد رطوبت بهینه و کمترین وزن مخصوص خشک بیشینه بدست می آید. به علاوه افزودن نانوآلومینیوم به ترکیب خاک و سیمان سبب کاهش درصد رطوبت بهینه و افزایش وزن مخصوص خشک بیشینه می‌گردد به گونه‌ای به ازای ۶٪ نانوآلومینیوم، کمترین درصد رطوبت بهینه و بیشترین مقدار وزن مخصوص خشک بدست آمده است.
- نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری نشان دادند که افزودن سیمان و نانوآلومینیوم، هردو سبب افزیش مقاومت تک محوری نمونه‌ها می‌شوند. همچنین دیده شد که با افزایش درصد سیمان و نانوآلومینیوم، مقاومت تک محوری افزایش بیشتری می‌یابد و این افزایش با گذشت زمان رابطه‌ای مستقیم دارد. در بازه‌های زمانی کوتاه مدت، تأثیر نانوآلومینیوم در مقایسه با نمونه‌های ۸٪ سیمان بیشتر است اما در بلند مدت بیشترین میزان مقاومت تک محوری به نمونه‌های ۸٪ سیمان و با مقدار حدود ۳۷۵۰ kPa تعلق دارد.
- افزودن سیمان و نانوآلومینیوم سبب افزایش باربری کالیفرنیای نمونه‌ها می‌شود اما نرخ افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی نانومواد در ساعت‌ها و روزهای اولیه بسیار بالا بوده که این ویژگی در بسیاری از پروژه‌ها که محدودیت زمانی در آن‌ها حکم فرماست، بسیار سودمند است. به عنوان مثال با افزودن تنها ۲٪ نانوآلومینیوم به نمونه ۴٪ سیمان ظرف مدت یک روز، مقاومت CBR آن بیشتر از ۶۰٪ در مقایسه با نمونه ۸٪ سیمان بدون ماده نانو افزایش می‌یابد.
- تفسیر تصاویر SEM نشان دادند که با افزودن سیمان به خاک، به دلیل تشکیل ژل سیمانتاسیون، ذرات خاک به یکدیگر می‌چسبند و کلوخه می‌شوند و باعث افزایش منافذ در ترکیب خاک و سیمان می‌گردند. به علاوه مشاهده شد که افزودن نانوآلومینیوم به ترکیب خاک و سیمان، منافذ را در گستره بیشتری پر می‌کند و باعث افزایش تراکم نمونه‌ها می‌شود که این موضوع می‌تواند به علت شکل‌گیری ژل C-S-H بین سیمان و نانو ذرات باشد.
- بر اساس تحلیل نتایج آزمون pH مشاهده شد که متناسب با مقدار سیمان، افزودن سیمان سبب افزایش میزان pH می‌گردد. این درحالی است که در اثر افزودن نانوآلومینیوم، میزان pH کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش درصد نانوآلومینیوم رابطه‌ی مستقیم دارد.
- بطور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که با به‌سازی خاک در ۴ درصد سیمان همراه با ۴ درصد نانوآلومینیوم می‌توان رفتار و مقاومتی مشابه با نمونه خاک تثبیت شده با ۸ درصد سیمان بدست آورد. این موضوع خارج از ارزیابی اقتصادی باعث خواهد شد مصرف سیمان در تثبیت خاک کاهش یابد و به دنبال آن باعث کاهش انرژی مصرفی در ساخت سیمان خواهد شد. این موضوع تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید و مصرف سیمان را که از چالش‌های زیست محیطی دهه‌های اخیر می‌باشد را کاهش خواهد داد.

مراجع

[1] Z. Y., U. A., N. M. R., Effects of cement and lime addition to soft clays on their strength in saturated condition of Mahshahr Port, Journal of Geotechnical Geology, 9(4) (2014) 353-363.

[2] P. G. N., Soil improvement and ground modification methods, Elsevier Inc, ISBN 9780124080768, (2015).

[3] K. K., A. B., Ground improvement-third edition, CRC Press Publication, ISBN 9780415599214, (2012).

[4] M. M., E. Z. Stabilization of pavement subgrade by using fly ash activated by cement, American Journal of Civil Engineering and Architecture, 3(6) (2015) 218-224.

[5] S. K. D., M. H., lime stabilization of soils: reappraisal, Journal of Materials in Civil Engineering, 24(6) (2012) 26-37.

[6] B., S., J. B., H. A. T., Stabilization of clay soils by Portland cement or lime–a critical review of literature, PCA R&D Publication, (2003) 16-24.

[7] D. J., A. P., Static and dynamic properties of sand-cement,

[19] N. C. and C. J. L., Hydraulic conductivity of clay mixed with nanomaterials, Canadian Geotechnical Journal, 52(6) (2014) 808-811.

[20] R. A., N. H., The reasons for introducing nano-silica in cementations layer in pavement, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19(1) (2014) 1761-1768.

[21] B. S., H. B., A. A., F. N., Stabilization of residual soil using SiO2 nanoparticles and cement, Construction and Building Materials, 64(3) (2014) 350-359.

[22] Ch. F., H. A., Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO2 and recycled polyester fiber, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7(4) (2015) 367-378.

[23] L. N., W. W., Y. J., T. F., Ch. X., Short age direct shear behavior of seashore soft soil reinforced by cement and nano-titanium dioxide, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 20(3) (2015) 1087-1093.

[24] T. M.R., Y. T., Effects of carbon nanotube on kaolinite: Basic geotechnical behavior, World Journal of Engineering, 7(2) (2010) 472-473.

[25] K. S.S., H. R. D., Ch. T. J., L. J. B., Comparison of innovative nano fly ash with conventional fly ash and nano-silica, Canadian Journal of Civil Engineering, 41(5) (2014) 396-402.

[26] Kh. N., A. M. F., M. M., M. K., K. F., The properties of nano-kaolin mixed with kaolin, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 20(1) (2015) 731-738.

[27] T. M. R., Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures, Nanotechnology in Construction, 3(2) (2009), 377-382.

[28] M. Z. H., T. M. R., J. I. T., Stabilization of soft soil using nanomaterials, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 8(4) (2014) 503-509.

[29] P. R., A. P. D., Improvement of bearing capacity of soft clay using nanomaterials, International Journal of Asian Scientific Research, 5(1) (2015) 125-136.

[30] L. H. L., H. D. H., L. D. F., L. C. K., Cohesive soil stabilized using sewage sludge ash/cement and nano aluminum oxide, International Journal of Transportation Science and Technology, 1(1) (2012) 83-100.

[31] ASTM D4546, One-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, (2000).

Journal of the Geotechnical Engineering Division, 105(3) (1979) 419-436.

[8] M. J. K., D.R. F., Review and evaluation of soil-cement pavements, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 126(1) (1961) 1123-1144.

[9] M. Z. H., T. M. R., A Review of stabilization of soils by using nanomaterials, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7(2) (2013) 576-581.

[10] Sh. S. S., F. L., A. E. H., Review of nano additives in stabilization of Soil, 7th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri University of Science and Technology, (2013).

[11] K. M., B. K., Nanotechnology in geotechnical engineering, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, 261(1) (2011) 524-528.

[12] F. Z., P. A. R., E. T., Improvement in the hydraulic properties of Kaolinite with adding nanoclay, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 47(3) (2016) 39-46. (In Persian)

[13] M. M. A., H. S. M., Evaluation of shear strength parameters of modified clay with different percentages of lime and nanosilica, Master's Thesis for Civil Engineering, Shahroud University of Technology, (2016). (In Persian)

[14] R., J. M., N. Sh. M., Specification of the authors of the paper The study of the effect of nanoscale additives on the properties of earthquake engineering (a case study of Zanjan clay), The first national conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, (2016). (In Persian)

[15] Zh. G., Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils, Geo-Denver 2007 Congress, New Peaks in Geomechanics, (2007) 1-13.

[16] G. M., S. P., Applications of nano-mechanics in geotechnical engineering, proceeding of the International Workshop on Micro-Geomechanics across Multiple Strain Scales, Cambridge, UK, (2007) 107.

[17] M. M., N. M., Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay, Journal of Advance Science and Technology Research, 3(3) (2013) 37-46.

[18] Zh. S., W. W., S. X., Ch. X., L. T., Direct shear behavior of nanometer magnesia reinforced cement soil with 28days age, The Open Mechanical Engineering Journal, 8(1) (2014) 509-513.

Please cite this article using:

S. Ghaffarpour Jahromi, H. Zahedi, Investigating the Effecting of Nano Aluminum on Mechanical and Volumetric Properties of Clay, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(3) (2018) 597-606.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12241.5157