



ارزیابی مشخصه‌های مقاومتی خاک ریزدانه حاوی نانواهک

احمدرضا حسن زاده^۱، علی بیگلری فدافن^{۲*}، سید یاسین موسوی^۲ و علیرضا طبرسا^۲

^۱ کارشناسی ارشد عمران- ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان
^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۰۴
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۱۰
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۷-۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۸-۰۱

کلمات کلیدی:

نانو آهک
آزمایش سه محوری
منحنی تنش-کرنش
سختی
چسبندگی

خلاصه: امروزه با توجه به رشد جمعیت، لزوم ساخت و ساز و مناسب نبودن خاک طبیعی موجود در محل برای احداث سازه، بهسازی خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. یکی از روش‌های بهسازی استفاده از افزودنی‌هایی همچون آهک و سیمان در ارتقا کیفیت خاک می‌باشد. از افزودنی‌های نوین در جهت بهسازی خاک می‌توان به نانو مواد اشاره کرد که کارآمدتر و مقرون به صرفه‌تر از افزودنی‌های سنتی می‌باشند. نانو آهک از جمله نانو موادی می‌باشد که می‌تواند به منظور بهسازی خاک مورد استفاده قرار گیرد. از این رو در این پژوهش به بررسی اثر نانو آهک بر روی پارامترهای مقاومتی خاک پرداخته شد. بدین منظور نمونه خاک‌های حاوی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی خاک در سه سن عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تحت آزمایش سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده قرار گرفت. مطابق نتایج مقادیر بیشینه تنش انحرافی نمونه‌ها با افزودن نانو به خاک افزایش می‌یابد و این امر با افزایش درصد نانو آهک در خاک همچنین گذشت زمان عمل‌آوری فزونی می‌یابد. به این ترتیب که حضور ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانوآهک در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز سبب افزایش بیشینه تنش انحرافی در محدوده ۲۱/۳ الی ۳۸/۳، ۲۷ الی ۵۹/۳ و ۲۹/۶ الی ۷۰/۸ برای فشارهای همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. علاوه بر این در نمونه‌های حاوی نانو آهک نسبت به نمونه خاک تمیز افزایش سختی دیده شد. همچنین نتایج افزایش چسبندگی نمونه‌های خاک را تحت تاثیر نانو آهک نشان داد که این امر با گذشت زمان عمل‌آوری افزایش یافت.

۱- مقدمه

نامناسب، بسیار هم اقتصادی می‌باشد [۲]. از افزودنی‌های نوین در بهسازی خاک می‌توان به نانو ذرات اشاره کرد. اخیرا با پیشرفت علم و فناوری نانو، استفاده از نانو ذرات در بهسازی خاک ممکن شده است [۳]. نانو ذرات به علت وجود مساحت سطح بالا دارای واکنش پذیری زیادی با ذرات خاک هستند که منجر به افزایش مقاومت خاک می‌گردد. مطالعات متعددی در بررسی اثر نانو ذرات به عنوان افزودنی در بهسازی خاک صورت گرفته است از جمله آنها می‌توان به تایپودیا و همکاران اشاره کرد که تاثیر افزودن نانوذرات دی‌کلریدکلسیم، اکسیدکلسیم و نیتراپتاسیم بر خاک را بررسی کردند و افزایش مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و خاصیت تراکم پذیری خاک را در اثر نانو ذرات گزارش دادند [۴]. همچنین

با توجه به رشد جمعیت، کمبود زمین و لزوم توسعه ساخت و ساز احداث ساختمان یا جاده بر روی بستر نامناسب دور از انتظار نمی‌باشد. بهسازی خاک یکی از روش‌های اقتصادی و مناسب برای بهبود کیفیت خاک ضعیف و رسیدن به خواص مهندسی مورد نیاز می‌باشد. به طور کلی بهسازی شامل سه روش فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی می‌باشد و از موادی مانند الیاف، سیمان و افزودنی‌های متفاوت برای بهبود مقاومت خاک استفاده می‌گردد [۱]. استفاده از پوزولان‌ها در پروژه‌های ساختمانی نه تنها مقرون به صرفه می‌باشد بلکه در دراز مدت با توجه به هزینه‌های ناشی از مشکلات خاک

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.biglari@gu.ac.ir



طه و طه تاثیر افزودن درصد بهینه نانورس، نانوالومین و نانومس را بر خاک ارزیابی کردند و نشان دادند که منجر به کاهش کرنش انقباض و کرنش تورم می‌شود [۵]. علاوه بر آن ماجد و طه تاثیر رفتار نانومواد مثل نانومس، نانواکسید منیزیم و نانورس با مقادیر ۰/۵ تا ۱ درصد وزنی را بررسی کردند و مشاهده کردند که افزودن هر یک از این مواد نانو به خاک، پارامترهای مقاومتی خاک را ارتقا می‌بخشد و افزایش در حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و کاهش در حدود اتربرگ و شاخص خمیری دیده می‌شود [۶]. عربیا و همکاران در بررسی مخلوط خاک رس و ماسه حاوی درصدهای مختلف نانولوله‌های کربنی نشان دادند که مقاومت فشاری خاک با ۳٪ نانولوله‌های کربنی در حدود ۱۲۰٪ در مقایسه با خاک رس اولیه افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار بسیار کمی از نانولوله‌های کربنی می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت فشاری خاک را بهبود ببخشد [۷]. بهاری و همکاران به بررسی ویژگی‌های مقاومتی خاک لای (ML و MH) تثبیت شده با نانورس پرداختند [۳]. چنگیزی و حداد به مطالعه نانوسیلیس بر روی خاک‌های نرم رسی پرداختند و افزایش زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک را گزارش دادند [۱]. همچنین چنگیزی و حداد طی پژوهشی به بررسی رفتار مقاومتی خاک رس تحت اثر نانوسیلیس پرداختند و نشان دادن با اضافه کردن نانوسیلیس به خاک مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد [۸]. بهمنی و همکاران به بررسی تاثیر نانوذره سیلیس بر روی حدود اتربرگ، تراکم، هدایت هیدرولیکی و مقاومت فشاری خاک بهسازی شده با سیمان پرداختند و با افزایش درصد نانومواد کاهش وزن مخصوص خشک خاک، افزایش درصد رطوبت بهینه خاک را مشاهده کردند [۹]. علاوه بر آن چنگیزی و حداد در پژوهشی نشان دادند که حدود اتربرگ و ظرفیت باربری کالیفرنیا خاک نرم رسی حاوی نانوسیلیس افزایش می‌یابد. همچنین کاهش کرنش گسیختگی و شاخص پلاستیسیته، افزایش مدول الاستیک خاک را به همراه دارد [۱۰]. همچنین هریش و وینتوکومار به ارزیابی خواص ژئوتکنیکی خاک بهسازی شده با نانوسیلیس و نانوزئولیت پرداختند و مشاهده کردند که حدود اتربرگ با افزایش نانوسیلیس افزایش می‌یابد [۱۱]. افزودن نانوزئولیت منجر به کاهش حدود اتربرگ خاک می‌شود و پارامترها مقاومت برشی خاک با افزودن نانوسیلیس و نانوزئولیت بهبود پیدا می‌کند. گاو و همکاران به بررسی تاثیر نانواکسید منیزیم بر روی خاک پرداختند و نشان دادند که افزودن

نانواکسید منیزیم به خاک باعث بهبود نیروی چسبندگی (۱۷/۹) به (۶۰/۴) در آن می‌شود اما تاثیر چندانی بر زاویه اصطکاک ندارد [۱۲]. در این بین می‌توان به گوینداسمی و همکاران اشاره کرد که به ارزیابی اثر نانو آهک در ارتقا کیفیت خاک پرداختند و نشان دادند که مقاومت فشاری محصور نشده خاک با گذشت زمان عمل‌آوری و افزایش درصد نانوآهک افزایش پیدا می‌کند [۱۳]. طه طی گزارشی منتشر کرد که استفاده از نانو موادی چون نانوآهک و نانوآهک باعث افزایش مقاومت فشاری خاک نسبت به نمونه حاوی "خاک و آهک" و "خاک و سیمان" می‌گردد [۱۴]. همچنین پل و همکاران در نمونه ملات حاوی نانوآهک افزایش مقاومت گزارش کردند که این مقدار با افزایش درصد نانوآهک در ملات کم می‌شود حتی در درصدهای بالاتر تبدیل به کاهش مقاومت می‌گردد [۱۵].

مطابق آنچه پیش تر گفته شد، مطالعات بسیاری در رابطه با استفاده از نانو ذرات در ارتقا کیفیت خاک انجام شده است اما با این حال اطلاعات جامعی در زمینه استفاده از نانو آهک در بهسازی خاک وجود ندارد. از این رو در این پژوهش به بررسی اثر نانو آهک بر روی خواص مهندسی خاک سیلتی-رسی پرداخته شد و امکان بهسازی خاک این منطقه از طریق افزودن نانو آهک مورد بررسی قرار گرفته است و با انجام آزمایش سه محوری تحکیم نیافته-زهکشی نشده غیر اشباع، خواص مکانیکی خاک حاوی درصدهای مختلف نانو آهک طی سه دوره عمل‌آوری ارزیابی گردید. نتایج این پژوهش می‌تواند اطلاعاتی در رابطه با بهسازی خاک با استفاده از نانو آهک در اختیار پژوهشگران و متخصصین قرار دهد تا بدین منظور هم تکمیل کننده مطالعات پیشین باشد هم اطلاعات مفیدی در رابطه با بهسازی خاک در اختیار متخصصین امر ساخت و ساز قرار دهد تا پاسخگوی نیاز رشد جمعیت باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

نانو آهک مورد استفاده در این پژوهش از شرکت AMERICAN ELEMENTS تهیه گردید و مشخصات فیزیکی ارائه شده توسط شرکت در جدول ۱ نشان داده شده است.

خاک مورد مطالعه از نوع سیلتی-رسی با خاصیت خمیری کم بوده (CL-ML) که درصد رطوبت حد روانی، خمیری و شاخص

جدول ۱: مشخصات فیزیکی نانو آهک
Table 1. Physical properties of nano-lime

اندازه متوسط ذرات (nm)	چگالی توده (g/ml)	دانسیته واقعی (g/cm ³)	ظاهر	وزن مولکولی
۴۵-۱۰	۰/۶۸	۲/۹۳	پودر سفید	۱۰۰/۰۹

جدول ۲: مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه
Table 2. Physical properties of soil

رس (%)	سیلت (%)	ماسه (%)	میزان رطوبت بهینه (%)	تراکم خشک حداکثر (kN/m ³)	چگالی ویژه خاک
۱۴/۰۲	۸۳/۳۷	۲/۶۱	۱۳/۴	۱۸/۷۴	۲/۵۶

جدول ۳: برنامه آزمایشگاهی
Table 3. Experimental program summary

ردیف	نمونه	نانوآهک (درصد وزنی)	زمان عمل آوری (روز)	فشار همه جانبه (kPa)
۱	CS	۰	-	۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰
۲	N _{0.5}	۰/۵	۲۸ و ۱۴،۷	۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰
۳	N ₁	۱	۲۸ و ۱۴،۷	۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰
۴	N ₂	۲	۲۸ و ۱۴،۷	۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰

به خاک اضافه شد. شایان ذکر است که نانوآهک پس از خریداری از شرکت بدون هیچ فرآوری و آماده‌سازی در تهیه نمونه‌ها استفاده گردید. رطوبت نمونه‌ها ۱۵٪ بدست آمده از آزمایش تراکم در نظر گرفته شد، مخلوط همگن حاصل در سه لایه به ضخامت ۲۵/۵ mm در قالب استوانه‌ای جهت دستیابی به وزن مخصوص خشک ۳ kN/m³ کوبیده شد. قطر و ارتفاع نمونه‌ها به ترتیب ۳۷/۶ mm و ۱۵ mm بوده و به منظور حفظ رطوبت، نمونه‌ها تا زمان آزمایش در ظروف پلاستیکی و در دمای محیط قرار گرفتند. خلاصه‌ای از برنامه آزمایشگاهی اجرا شده در جدول ۳ ارائه شده است.

۳- تحلیل نتایج

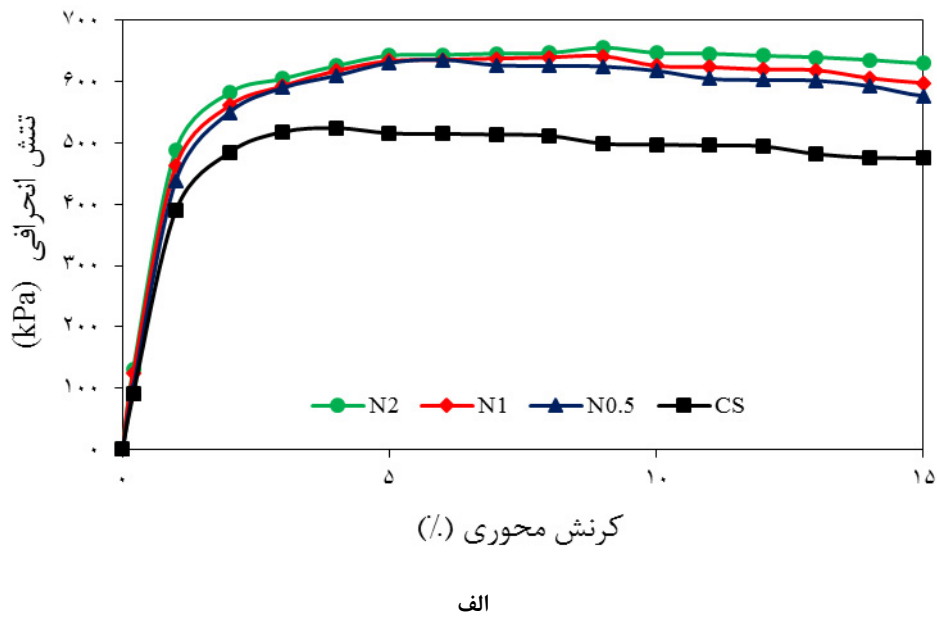
نتایج آزمایش‌های سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده غیر اشباع بر روی نمونه‌های خاک تمیز و حاوی نانوآهک در دو بخش ارائه گردید. بخش نخست به بررسی منحنی تنش-کرنش خاک تحت اثر درصد نانو آهک، زمان عمل آوری و تغییرات فشار همه‌جانبه اختصاص داده شد و در بخش دوم پارامتر چسبندگی خاک مورد بررسی قرار گرفت.

خمیری آن به ترتیب ۲۴/۱۵، ۱۹ و ۶/۱۵ درصد محاسبه شد. همچنین مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ نمایش داده شده است.

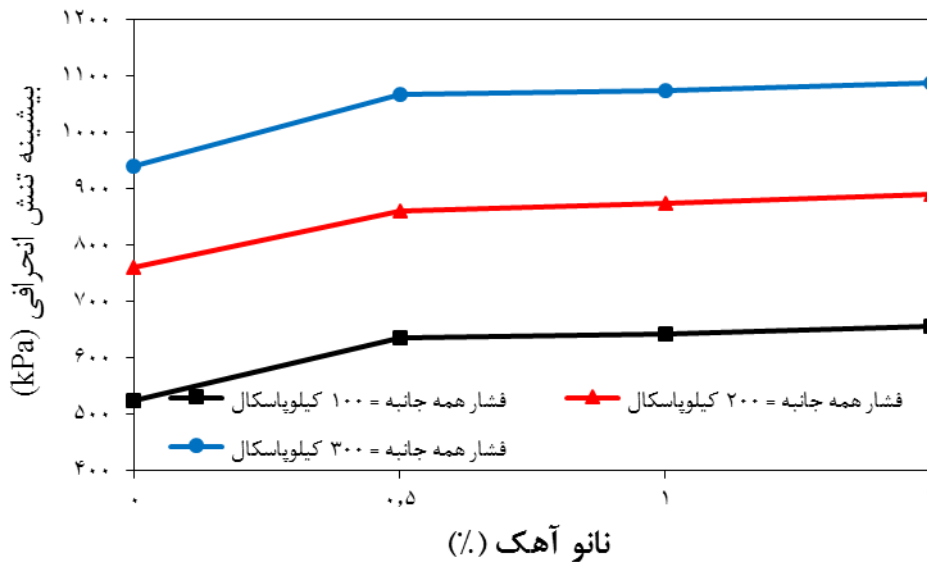
۲-۲- روش‌ها

برای ارزیابی خصوصیات مهندسی خاک حاوی نانو آهک ۳۰ آزمایش سه محوری تحکیم نیافته-زهکشی نشده غیراشباع بر مبنای استاندارد 87-ASTM D2850 بر روی نمونه‌های خاک تمیز و حاوی نانو آهک انجام گرفت. در این پژوهش درصد نانو آهک برای اضافه کردن به خاک و سنین عمل آوری مطابق مطالعات گذشته انتخاب شد [۳، ۱۳]. همچنین فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال برای انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید.

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا خاک عبوری از الک شماره ۱۰ به مدت ۲۴ ساعت در اون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا کاملاً خشک شود. سپس نانو آهک و آب در دو مرحله به خاک اضافه می‌گردند و پس از هر مرحله مخلوط حاصل به وسیله کاردک مخلوط می‌گردد. نانو آهک به میزان ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزن خشک خاک



الف



ب

شکل ۱: نتایج آزمایش نمونه‌های خاک تمیز و حاوی درصد‌های مختلف نانو آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روز، الف. نمودار تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، ب. مقادیر بیشینه تنش انحرافی مربوط به فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال.

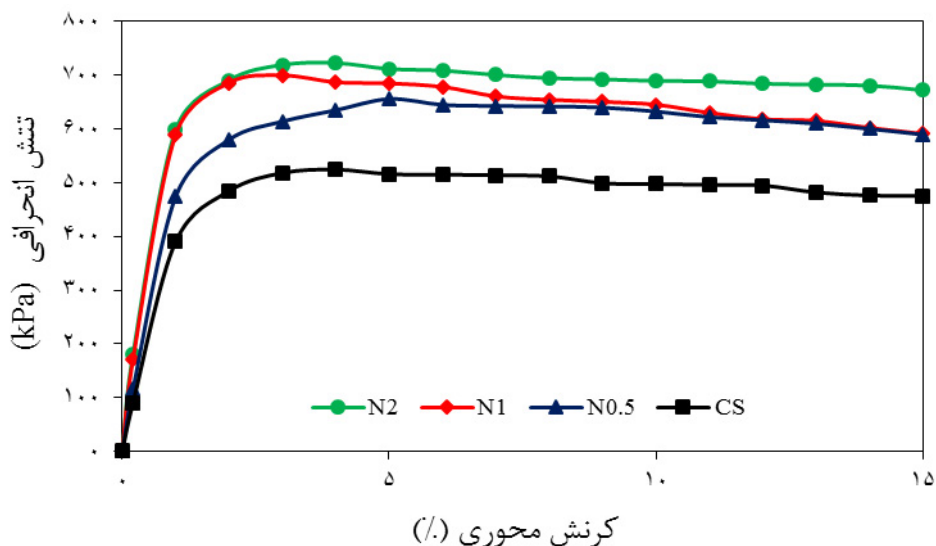
Fig. 1. Result of Clean soil and soil containing different amount of nano-lime after 7 days curing, A. Stress-strain curve under 100 kPa cell pressure, B. Maximum deviator stress for the tests specimens under 100, 200 and 300 kPa cell pressure.

نتایج نشان می‌دهد (شکل ۱، ۲ و ۳) که در هر سه فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال با اضافه کردن نانوآهک به خاک، تنش انحرافی افزایش پیدا می‌کند و این روند با افزایش درصد وزنی نانوآهک افزایش می‌یابد. به این صورت که تنش انحرافی نمونه N_2 بیشتر از نمونه N_1 و هر دو بیشتر از نمونه $N_{0.5}$ می‌باشد. مطابق منحنی تنش-کرنش در شکل ۱، در زمان عمل‌آوری ۷ روز

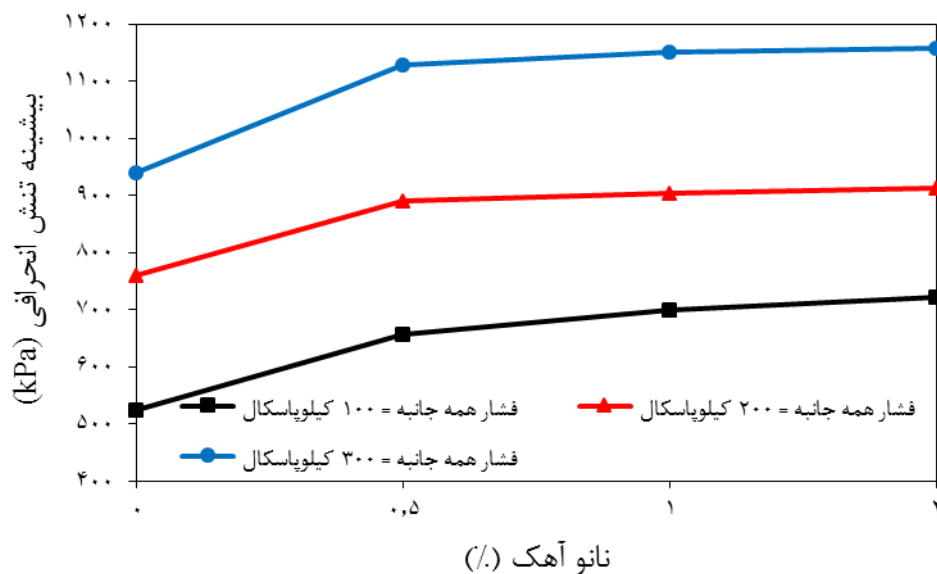
۱-۳- منحنی تنش-کرنش

۱-۱-۳- اثر نانو آهک

منحنی تنش-کرنش همچنین مقادیر بیشینه تنش انحرافی به دست آمده از منحنی تنش-کرنش مربوط به آزمایش نمونه خاک مینا و خاک حاوی درصد‌های مختلف نانوآهک در سنین عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزگی در شکل ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است.



الف



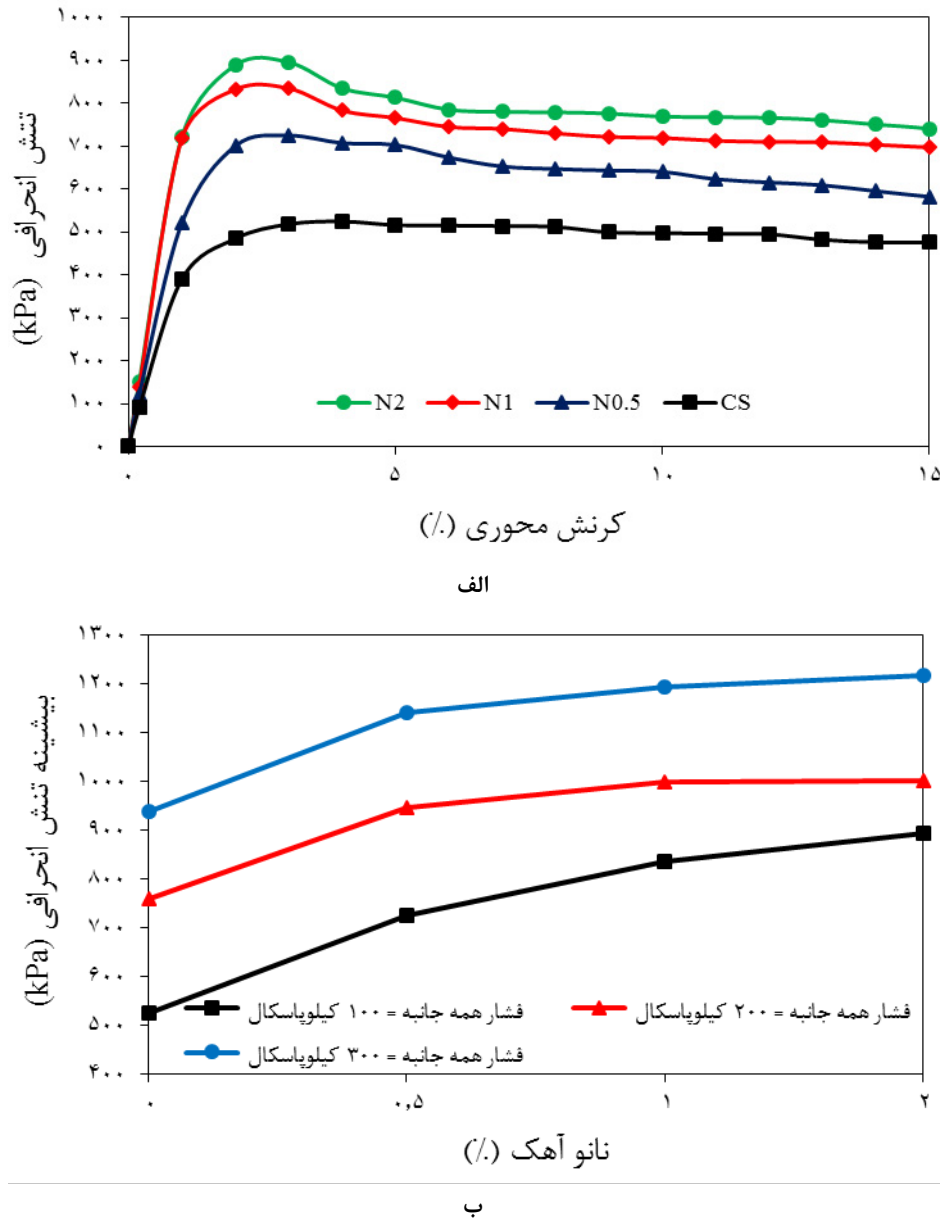
ب

شکل ۲: نتایج آزمایش نمونه‌های خاک تمیز و حاوی درصد‌های مختلف نانو آهک در زمان عمل‌آوری ۱۴ روز، الف. نمودار تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، ب. مقادیر بیشینه تنش انحرافی مربوط به فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال.

Fig. 2. Result of Clean soil and soil containing different amount of nano-lime after 14 days curing, A. Stress-strain curve under 100 kPa cell pressure, B. Maximum deviator stress for the tests specimens under 100, 200 and 300 kPa cell pressure.

نمونه N_2 ، N_1 و $N_{0.5}$ در فشار همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال ۳۱/۸، ۲۷ و ۲۱/۳ درصد و برای فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال ۲۹/۶، ۲۷ و ۲۱/۳ درصد می‌باشد. این طور می‌توان گفت که در سنین اولیه افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی نانو آهک، بیشتر تحت تاثیر توانایی نانوذرات در پرکردن حفرات در حد میکرو و نانو می‌باشد که با کاهش تخلخل باعث افزایش مقاومت می‌گردند. به همین دلیل

رفتار نمونه‌های خاک حاوی نانوآهک به یکدیگر نزدیک است ولی با گذشت زمان عمل‌آوری (شکل ۲ و ۳) تفاوت بین نمودارها بسیار محسوس تر دیده می‌شود. به این صورت که مطابق شکل ۳ در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزگی و فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه N_2 ، N_1 و $N_{0.5}$ به میزان ۷۰/۸، ۵۹/۳ و ۳۸/۳ درصد افزایش در تنش انحرافی بیشینه نسبت به نمونه CS دیده می‌شود، این مقادیر برای



شکل ۳: نتایج آزمایش نمونه‌های خاک تمیز و حاوی درصد‌های مختلف نانو آهک در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، الف. نمودار تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، ب. مقادیر بیشینه تنش انحرافی مربوط به فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال.

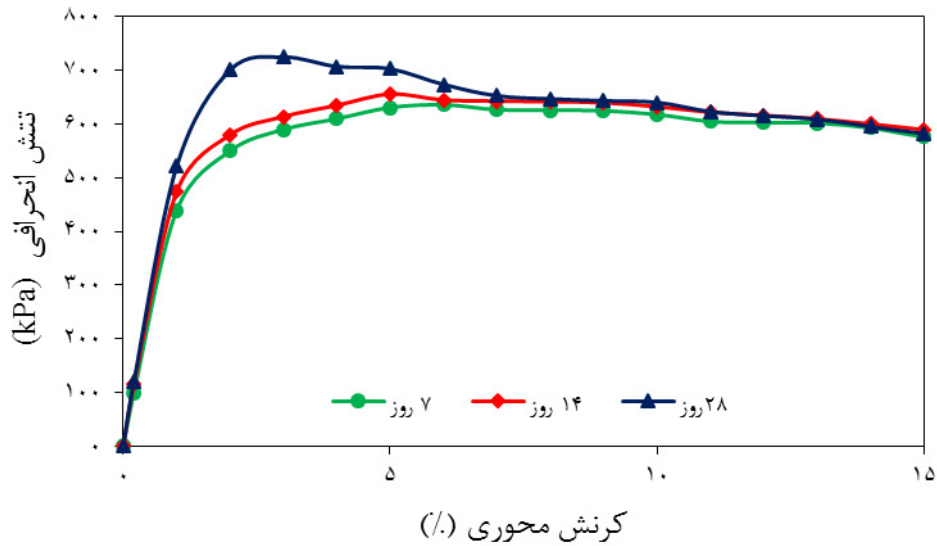
Fig. 3. Result of Clean soil and soil containing different amount of nano-lime after 28 days curing, A. Stress-strain curve under 100 kPa cell pressure, B. Maximum deviator stress for the tests specimens under 100, 200 and 300 kPa cell pressure.

واکنش پذیری عالی نانوآهک و وجود کاتیون کلسیم با درجه خلوص بالا در نانوآهک بر می‌گردد [۱۳].

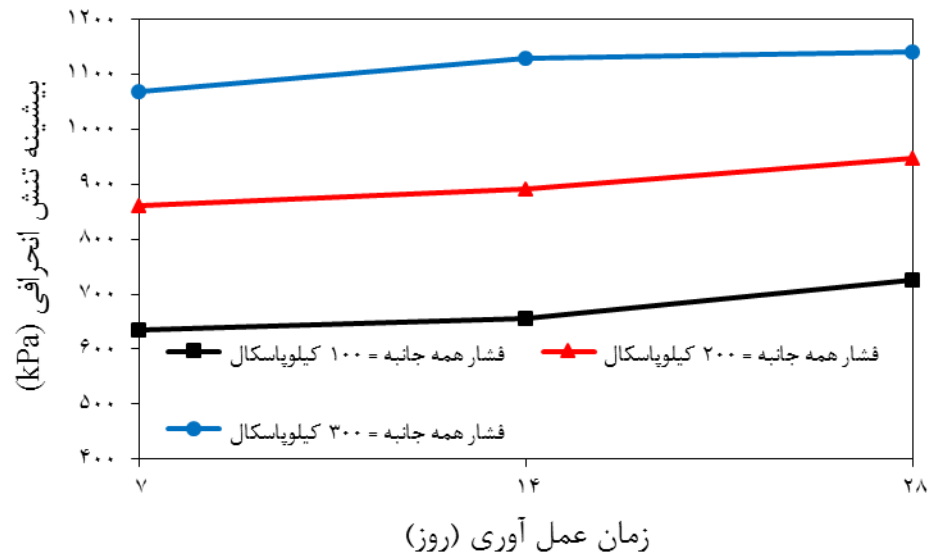
۲-۱-۳- اثر زمان عمل‌آوری

منحنی تنش-کرنش همچنین مقادیر بیشینه تنش انحرافی به دست آمده از منحنی تنش-کرنش مربوط به آزمایش نمونه خاک حاوی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانوآهک با در نظر گرفتن زمان عمل‌آوری به

رفتار نمونه‌های حاوی نانوآهک به هم نزدیک است اما با گذشت زمان، بیشینه تنش انحرافی به علت توانایی بالای نانوآهک در جذب و متراکم کردن ذرات خاک افزایش می‌یابد. متراکم کردن به خاطر قابلیت کاتیون ۲ بار مثبت اتفاق می‌افتد. کاتیون دو بار مثبت کلسیم جای کاتیون تک ظرفیتی هیدروژن یک بار مثبت و سدیم یکبار مثبت را می‌گیرد و با این کار نیروی دافعه کاهش پیدا می‌کند و یک اتصالی بین سطح منفی یون‌های ذرات رس ساخته می‌شود. این به



الف



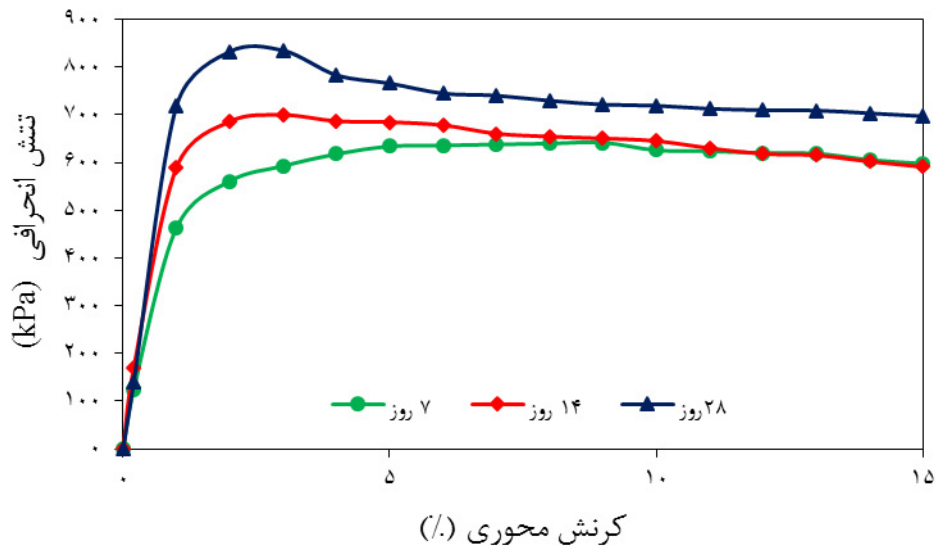
ب

شکل ۴: نتایج آزمایش نمونه‌های خاک حاوی ۵/۰ درصد نانو آهک، الف. نمودار تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، ب. مقادیر بیشینه تنش انحرافی مربوط به فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال.

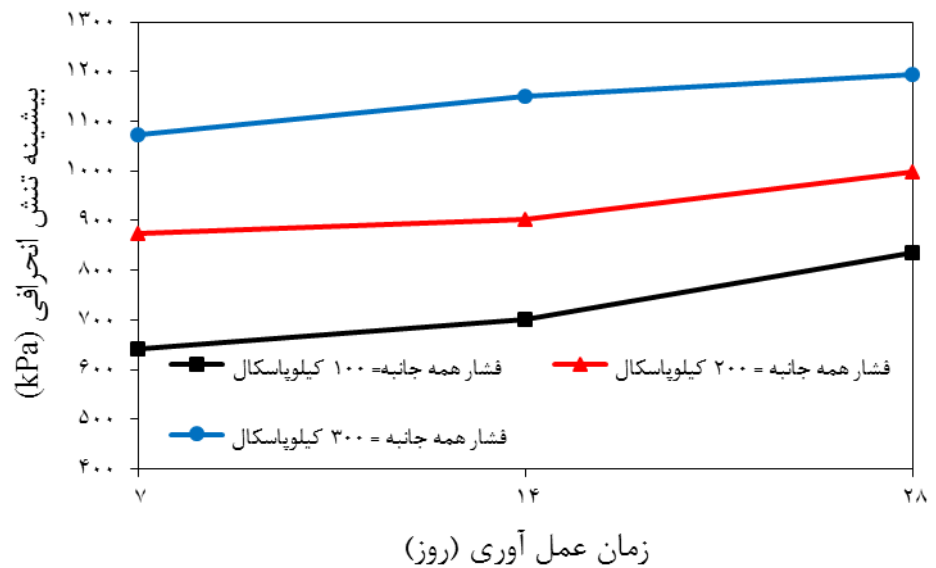
Fig. 4. Result of soil containing 0.5% of nano-lime, A. Stress–strain curve under 100 kPa cell pressure, B. Maximum deviator stress for the tests specimens under 100, 200 and 300 kPa cell pressure.

افزایش در بیشینه تنش انحرافی دیده می‌شود این روند برای نمونه N_1 (شکل ۵) ۹ و ۱۹/۲ درصد و برای نمونه N_2 (شکل ۶) به میزان ۱۰ و ۲۳/۹ درصد می‌باشد. در مجموع می‌توان گفت میزان افزایش تنش انحرافی با گذشت زمان عمل‌آوری از ۷ روز به ۲۸ روز برای نمونه N_2 نسبت به N_1 و نمونه N_1 نسبت به $N_{0.5}$ بیشتر است. به بیانی دیگر اثر گذاری گذشت زمان با افزایش درصد نانو بر نمونه خاک افزایش می‌یابد.

عنوان متغیر اصلی در شکل ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. مقایسه نتایج (شکل ۴، ۵ و ۶) نشان می‌دهد که با گذشت زمان و پیشرفت اندرکنش بین خاک و نانوآهک در طول زمان عمل‌آوری میزان بیشینه تنش انحرافی افزایش می‌یابد. نتایج مشابه توسط گوینداسمی و همکاران گزارش شد [۱۳]. مطابق شکل ۴ در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال با گذشت زمان عمل‌آوری از ۷ به ۱۴ روز و از ۱۴ به ۲۸ روز برای نمونه $N_{0.5}$ به میزان ۳/۱ و ۱۰/۵ درصد



الف



ب

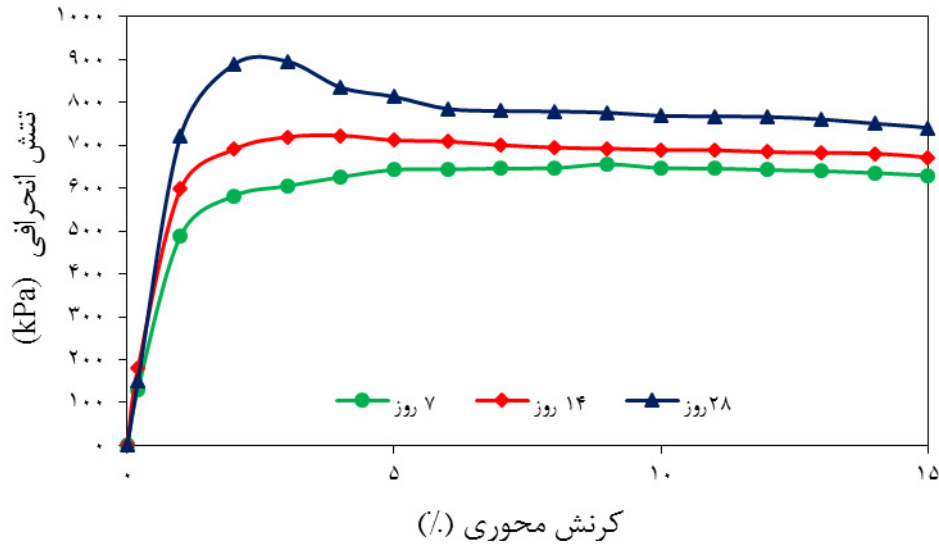
شکل ۵: نتایج آزمایش نمونه‌های خاک حاوی ۱ درصد نانو آهک، الف. نمودار تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، ب. مقادیر بیشینه تنش انحرافی مربوط به فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال.

Fig. 5. Result of soil containing 1% of nano-lime, A. Stress-strain curve under 100 kPa cell pressure, B. Maximum deviator stress for the tests specimens under 100, 200 and 300 kPa cell pressure.

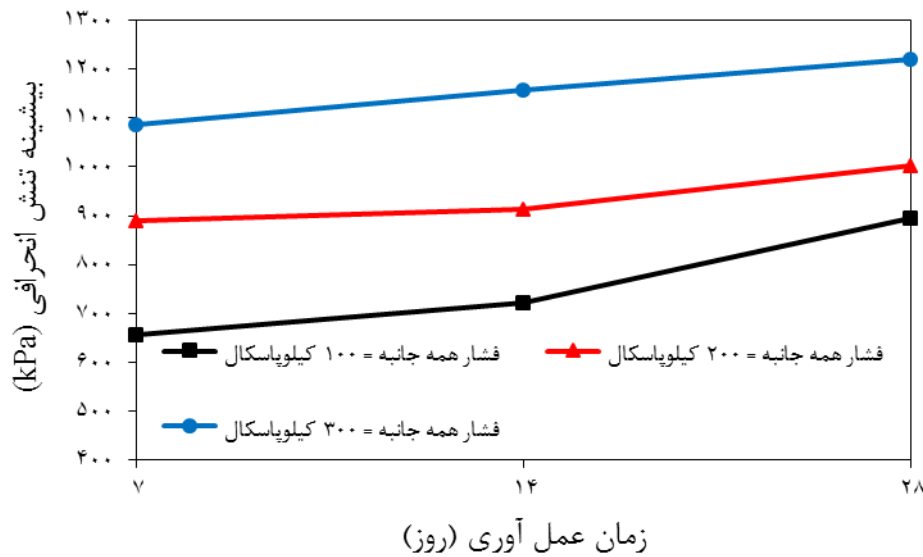
دست می‌آید به بیانی دیگر مقدار E_{50} برابر با نسبت نصف بیشینه تنش انحرافی به کرنش نظیر آن می‌باشد. در شکل ۷ مقادیر E_{50} مربوط به نمونه خاک تمیز و حاوی مقادیر مختلف نانوآهک در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال ارائه شده است. مطابق نتایج افزودن نانو آهک به خاک منجر به افزایش مدول

۳-۱-۳- اثر نانو آهک بر سختی

مقاومت نمونه خاک در برابر تغییر شکل تحت اثر نیروی اعمالی را سختی می‌نامند. سختی خاک را با مدول الاستیسیته آن می‌سنجند. روش‌های متفاوتی برای محاسبه مدول الاستیسیته خاک وجود دارد که یکی از آن‌ها مدول سکانت ۵۰ درصد (E_{50}) می‌باشد. در این روش، شیب خط گذرنده از مبدا و یک دوم مقدار بیشینه تنش انحرافی به



الف



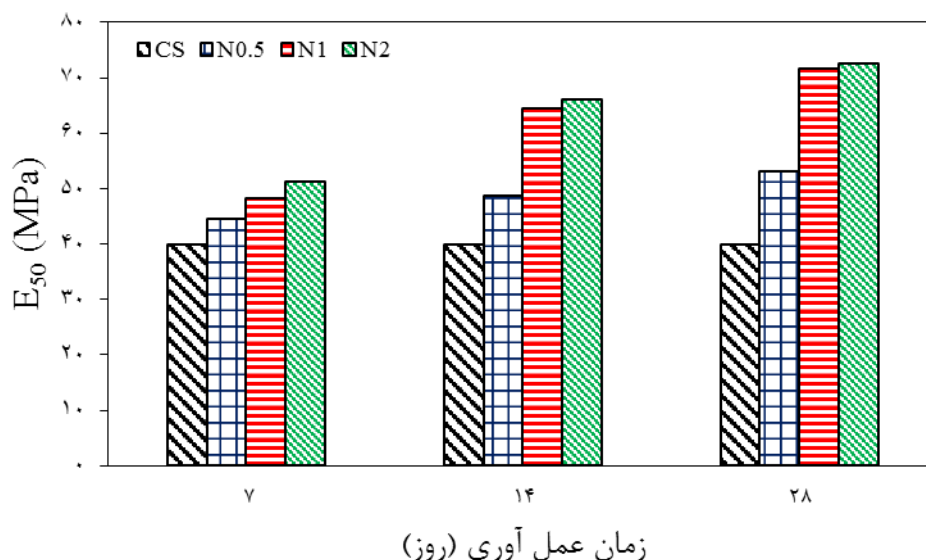
ب

شکل ۶: نتایج آزمایش نمونه‌های خاک حاوی ۲ درصد نانو آهک، الف. نمودار تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، ب. مقادیر بیشینه تنش انحرافی مربوط به فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال.

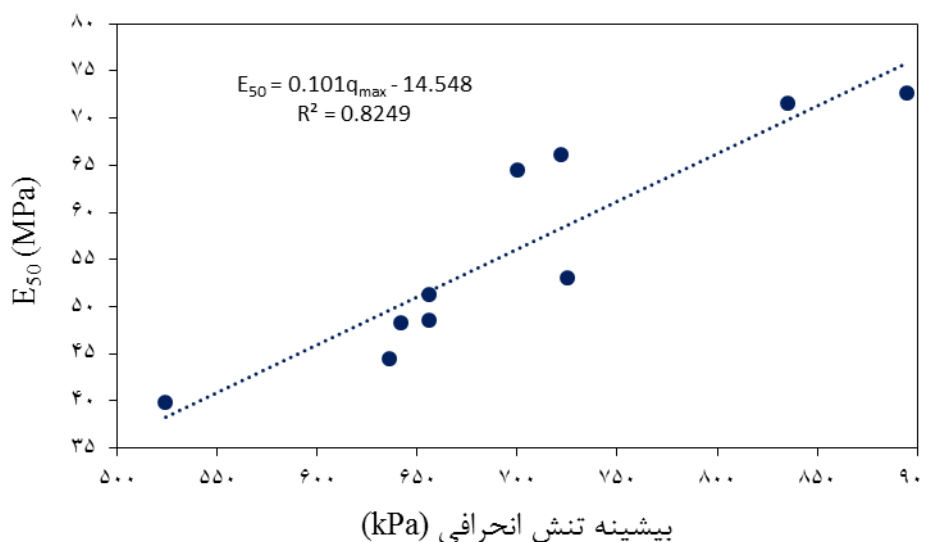
Fig. 6. Result of soil containing 2% of nano-lime, A. Stress-strain curve under 100 kPa cell pressure, B. Maximum deviator stress for the tests specimens under 100, 200 and 300 kPa cell pressure.

درصد و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به میزان ۳۳/۴، ۷۹/۸ و ۸۲/۶ درصد می‌باشد. افزایش درگیری و قفل و بست ذرات خاک همچنین سیمانی شدن ذرات در حضور نانو آهک باعث افزایش مقاومت نمونه خاک در برابر تغییر شکل می‌شود از این رو مدول الاستیسیته نمونه خاک با افزودن نانو آهک افزایش می‌یابد از سوی دیگر با گذشت

الاستیسیته نمونه می‌گردد و این اثر با افزایش درصد نانو آهک در خاک افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه در زمان عمل‌آوری ۷ روز با افزودن ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانو آهک به خاک مدول الاستیسیته نمونه به میزان ۱۱/۸، ۲۱/۵ و ۲۸/۷ درصد نسبت به خاک مبنا افزایش یافت. این مقادیر در زمان عمل‌آوری ۱۴ روز به میزان ۲۲/۱، ۶۱/۹ و ۶۶/۱



شکل ۷: مقادیر مدول سکانت ۵۰ درصد برای نمونه خاک مینا و حاوی درصد‌های مختلف نانوآهک در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال.
Fig. 7. The secant modulus of elasticity (E₅₀) for Clean soil and soil containing different amount of nano-lime under 100 kPa cell pressure.



شکل ۸: رابطه بین مدول سکانت ۵۰ درصد نمونه‌های خاک و بیشینه تنش انحرافی در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال.
Fig. 8. Relation between secant modulus of elasticity and maximum deviator stress for the tests specimens under 100 kPa cell pressure.

نمونه خاک را با افزایش درصد نانوگزارش دادند [۱۶]. برخی از مطالعات مقادیر مدول الاستیسیته نمونه‌های خاک را بر اساس مقادیر بیشینه تنش انحرافی مورد بررسی قرار دادند و رابطه خطی $E_{50} = a \cdot q_{max}$ را بین مدول الاستیسیته (E_{50}) و بیشینه تنش (q_{max}) ارائه دادند که در آن a یک عدد ثابت می باشد [۱۷-۱۹]. در شکل ۸ تغییرات بیشینه تنش انحرافی نمونه‌های خاک بر اساس مدول الاستیسیته آن رسم شده است و بر اساس آن می‌توان بیان کرد

زمان عمل‌آوری مقدار مدول الاستیسیته نمونه خاک حاوی نانو آهک افزایش می‌یابد که علت این مهم را می‌توان پیشرفت روند سیمانی شدن ذرات خاک در طول زمان عمل‌آوری دانست. شایان ذکر است که چنگیزی و حداد در آزمایش تک محوری با افزودن نانو SiO_2 به خاک رس افزایش در مقدار مدول الاستیسیته نمونه خاک مینا مشاهده کردند [۸]. همچنین کوتناپی و چوبیستی با انجام آزمایش سه محوری بر روی ماسه حاوی نانو سیلیکا، افزایش مدول الاستیسیته

جدول ۴: پارامتر چسبندگی خاک تمیز و خاک حاوی نانواهک مربوط به حالت تنش کل براساس نتایج آزمایش سه محوری تحکیم نیافته- زهکشی نشده

Table 4. Cohesion of Clean soil and soil containing nano-lime obtained from unconsolidated undrained triaxial test results

ردیف	نمونه	زمان عمل‌آوری (روز)	چسبندگی (کیلوپاسکال)
۱	CS	-	۹۰
۲	N _{0.5}	۷	۱۱۴
۳	N _{0.5}	۱۴	۱۱۵
۴	N _{0.5}	۲۸	۱۴۷
۵	N ₁	۷	۱۲۱
۶	N ₁	۱۴	۱۳۶
۷	N ₁	۲۸	۱۷۰
۸	N ₂	۷	۱۲۷
۹	N ₂	۱۴	۱۴۵
۱۰	N ₂	۲۸	۱۷۹

فشارهای همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال دیده می‌شود. گذشت زمان عمل‌آوری نیز منجر به افزایش بیشینه تنش انحرافی می‌گردد و می‌توان گفت میزان افزایش تنش انحرافی با گذشت زمان عمل‌آوری از ۷ روز به ۲۸ روز برای نمونه N₂ نسبت به N₁ و نمونه N₁ نسبت به N_{0.5} بیشتر است. به بیانی دیگر اثر گذاری گذشت زمان با افزایش درصد نانو بر نمونه خاک افزایش می‌یابد. بررسی سختی نمونه‌ها نشان داد که افزودن نانو آهک به خاک منجر به افزایش مدول الاستیسیته نمونه می‌گردد و این اثر با افزایش درصد نانو آهک در خاک افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه در زمان عمل‌آوری ۷ روز با افزودن ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانو آهک به خاک مدول الاستیسیته نمونه به میزان ۱۱/۸، ۲۱/۵ و ۲۸/۷ درصد نسبت به خاک مبنا افزایش می‌یابد و این روند افزایشی با گذشت زمان عمل‌آوری افزایش یافت. نتایج نشان دادند که تحت تاثیر افزودن نانواهک، تغییرات در چسبندگی قابل توجه می‌باشد به این صورت که برای نمونه N_{0.5} در سن عمل‌آوری ۲۸ روز مقدار چسبندگی به میزان ۵۷ کیلوپاسکال و برای نمونه N₁ و N₂ مقدار ۸۰ و ۸۹ کیلوپاسکال نسبت به خاک تمیز افزایش می‌یابد.

در ادامه می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

-افزودن نانو آهک مقدار بیشینه تنش انحرافی را تا حداکثر مقدار ۷۰/۸ درصد نسبت به خاک مبنا افزایش می‌دهد. این مقدار با گذشت

که رابطه خطی $E_{50} = 14.548 - 0.101q_{max}$ با ضریب همبستگی ۰/۸۲ بین مقادیر مدول سکانت و بیشینه تنش انحرافی نمونه‌ها وجود دارد.

۳-۲- پارامتر چسبندگی

مقادیر چسبندگی (C) خاک بر اساس نتایج آزمایش سه محوری با رسم پوش گسیختگی موهر-کولمب در فشارهای همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به دست آمده و در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج تغییرات تحت اثر نانو در چسبندگی قابل توجه می‌باشد و با افزایش درصد نانواهک و گذشت سن عمل‌آوری میزان رشد چسبندگی افزایش می‌یابد به این صورت که برای نمونه N_{0.5} در سن عمل‌آوری ۲۸ روز مقدار چسبندگی به میزان ۵۷ کیلوپاسکال و برای نمونه N₁ و N₂ مقدار ۸۰ و ۸۹ کیلوپاسکال نسبت به خاک تمیز افزایش اتفاق می‌افتد. نانومواد به خاطر سطح ویژه بالایی که نسبت به اندازه و حجم‌شان دارند، دارای واکنش پذیری بسیار بالایی می‌باشند. در نتیجه واکنش بین نانواهک و ذرات خاک، فرآیند سیمانی شدن صورت می‌گیرد که پیوستگی بیشتر ذرات خاک را به همراه دارد [۱۳] این عامل باعث افزایش چسبندگی نمونه‌های حاوی نانواهک نسبت به خاک تمیز می‌شود. نتیجه مشابه توسط چنگیزی و حداد [۱] در بررسی اثر نانو ذرات SiO₂ بر روی خاک رس گزارش شد و با افزایش درصد نانو در نمونه‌های خاک افزایش چسبندگی را مشاهده کردند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور ارزیابی اثر نانواهک بر پارامترهای مقاومتی خاک نمونه‌های حاوی ۰، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانواهک در رطوبت ۱۵ درصد و وزن مخصوص خشک ۱۵ kN/m³ تهیه گردید. اثر گذاری زمان عمل‌آوری و درصد نانواهک تحت آزمایش سه محوری تحکیم نیافته-زهکشی نشده غیر اشباع مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج با افزودن نانواهک به خاک، تنش انحرافی افزایش پیدا می‌کند و این روند با افزایش درصد وزنی نانواهک افزایش می‌یابد و تنش انحرافی نمونه N₂ بیشتر از نمونه N₁ و هر دو بیشتر از نمونه N_{0.5} می‌باشد. به این صورت که در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز بیشینه تنش انحرافی نمونه حاوی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانواهک در محدوده ۲۱/۳ الی ۳۸/۳، ۲۷ الی ۵۹/۳ و ۲۹/۶ الی ۷۰/۸ درصد افزایش برای

- treatment on geotechnical properties of a Penang soft soil, *Journal of Asian Scientific Research*, 2(11) (2012) 587.
- [7] Y. Huang, L. Wang, Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review, *Environmental Earth Sciences*, 75(6) (2016) 497.
- [8] F. Changizi, A. Haddad, Effect of nano-SiO₂ on the geotechnical properties of cohesive soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(2) (2016) 725-733.
- [9] S.H. Bahmani, B.B. Huat, A. Asadi, N. Farzadnia, Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement, *Construction and Building Materials*, 64 (2014) 350-359.
- [10] F. Changizi, A. Haddad, Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Ground Improvement*, 170(2) (2017) 62-71.
- [11] P. Hareesh, V. Kumar, Assessment of nano materials on geotechnical properties of clayey soils, in: international conference on engineering innovations and solutions. E-ISSN, 2016, pp. 2348-8352.
- [12] L. Gao, K.-y. Ren, Z. Ren, X.-j. Yu, Study on the shear property of nano-MgO-modified soil, *Marine Georesources & Geotechnology*, 36(4) (2018) 465-470.
- [13] P. Govindasamy, M.R. Taha, J. Alsharif, K. Ramalingam, Influence of nanolime and curing period on unconfined compressive strength of soil, *Applied and Environmental Soil Science*, 2017 (2017).
- [14] M.R. Taha, Recent Developments in Nanomaterials for Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2018, pp. 02004.
- [15] S.C. Paul, A.S. van Rooyen, G.P. van Zijl, L.F. Petrik, Properties of cement-based composites using nanoparticles: A comprehensive review, *Construction and Building Materials*, 189 (2018) 1019-1034.
- [16] S.S. Kutanaei, A.J. Choobbasti, Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(6) (2016) 579-593.
- زمان عمل‌آوری و افزایش درصد نانو آهک می‌تواند رشد بیشتری را هم نشان دهد.
- افزودن نانو آهک مقدار چسبندگی خاک را تا حداکثر ۸۹ کیلوپاسکال نسبت به خاک مبنا افزایش می‌دهد. این مقدار نیز با گذشت زمان عمل‌آوری و افزایش درصد نانو آهک می‌تواند رشد بیشتری را هم نشان دهد.
- افزودن نانو آهک به خاک باعث افزایش مدول سکانت (E_{50}) خاک می‌گردد.
- مطابق نتایج این مطالعه استفاده از نانوآهک یک روش مناسبی برای بهسازی خاک ضعیف می‌باشد که در آن مقاومت، مدول سکانت و چسبندگی خاک را به صورت موثری افزایش می‌دهد. با توجه به پیشرفت و توسعه ساخت و ساز، این روش می‌تواند در جهت ارتقا خاک پی ساختمان‌ها و جاده‌ها مورد استفاده قرار بگیرد. شایان ذکر است که استفاده از نانومواد در مقایسه با روش‌های دیگر منجر به صرفه‌جویی در وقت، هزینه، کاهش مصرف انرژی، افزایش کیفیت مصالح می‌شود.

مراجع

- [1] F. Changizi, A. Haddad, 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.
- [2] H. Bahadori, A. Hasheminezhad, F. Taghizadeh, Experimental Study on Marl Soil Stabilization Using Natural Pozzolans, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2) (2018) 04018363.
- [3] M. Bahari, M. Nikookar, M. Arabani, A.K. Haghi, H. Khodabandeh, Stabilization of silt by nanoclay, in: Proc. of 7th National Congress on Civil Engineering, 2013, pp. 7-8.
- [4] J. Taipodia, J. Dutta, A. Dey, Effect of Nanoparticles on Properties of Soil, in: Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, 2011, pp. 15-17.
- [5] M.R. Taha, O.M.E. Taha, Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior, *Journal of Nanoparticle Research*, 14(10) (2012) 1190.
- [6] Z.H. Majeed, M.R. Taha, Effect of nanomaterial

with different types of randomly distributed fibers,
Arabian Journal of Geosciences, 11(6) (2018) 122.

[17] A. Boz, A. Sezer, T. Özdemir, G.E. Hızal, Ö.A. Dolmacı,
Mechanical properties of lime-treated clay reinforced

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Hasanzadeh, A. Biglari Fadafan, S.Y. Mousavi, A. Tabarsa, *Evaluation of Resistance Parameters of Fine-Grained Soil Containing Nano-Lime*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11) (2021) 2899-2912.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16198.6152](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16198.6152)



