

مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر نانوسیلیس در رفتار خزشی خاک رس نرم

علیرضا نگهدار* (استادیار)

آرزو نوری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

شیمیا یادگاری (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۱۳۳-۱۴۰، (یادداشت شنی)

بخش مهمی از مطالعات در مهندسی ژئوتکنیک، اختصاص به مطالعه‌ی تغییرشکل‌های وابسته به زمان خاک دارد. تغییرشکل‌های مذکور به خصوص در سازه‌های بنا شده بر خاک رس نرم ممکن است خسارت‌های جبران ناپذیری را به دنبال داشته باشد. بنابراین داشتن درک درست از رفتار خزشی خاک‌های مذکور اهمیت زیادی دارد. در پژوهش حاضر با استفاده از دستگاه تحکیم یک‌بعدی به بررسی تأثیر نانوسیلیس در درصد‌های پایین در رفتار خزشی خاک رس نرم در سطوح تنش متفاوت پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها براساس ارتباط ضریب تراکم ثانویه و نسبت تخلخل ارزیابی شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، تغییرشکل‌های خزشی پایینی نسبت به نمونه‌های خاک رس نرم نشان می‌دهند. همچنین با افزودن نانوسیلیس تا یک درصد مشخص، نمونه حالت متراکم‌تری می‌گیرد و با افزایش بیشتر درصد نانوسیلیس، تخلخل و ضریب تراکم ثانویه افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: خزش، تحکیم یک‌بعدی، نانوسیلیس، خاک نرم، ضریب تراکم ثانویه.

۱. مقدمه

ترزاقی (۱۹۲۵) به عمل آمد که بیان‌گر تراکم خاک‌های رسی در اثر زائل شدن فشار آب حفره‌ی بوده است.^[۱] مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده‌ی در سال‌های ۱۹۳۶،^[۲] و ۱۹۴۲،^[۳] تأثیر زمان در تراکم‌پذیری رس را بیان می‌کنند. در سال ۱۹۳۶، رابطه‌ی نشست - لگاریتم زمان تحت تنش ثابت برای خاک‌های رسی به صورت خطی بیان شد.^[۳] و در سال ۱۹۴۲، برای اولین بار مدل وابسته به زمان به منظور شرح رفتار خزشی خاک‌های رسی که در آن تحکیم اولیه و تراکم ثانویه به‌عنوان دو فرایند مجزا در نظر گرفته می‌شود، ارائه شد.^[۴] اما در مقابل پژوهشگران دیگری گزارش کردند که این نمودار نمی‌تواند خطی باشد، مگر زمانی که تخلخل به صفر برسد،^[۵] و معمولاً نشست برای خاک‌ها در طول ۲۱ روز به مقدار نهایی خود می‌رسد.^[۶] معمولاً در احداث خاکریز بر روی رس نرم، از روش‌هایی همچون پیش‌بارگذاری و روش تثبیت به‌عنوان روش‌های مؤثر برای بهبود شرایط خاک استفاده می‌شود.^[۷] در این میان، استفاده از مواد نانومقیاس به‌عنوان تثبیت‌کننده، اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده است. نانوذرات به علت سطح و ویژه‌ی فوق‌العاده‌ی بالا و سطوح واکنش‌پذیر با بارها، برهم‌کنش بسیار فعالی با ترکیبات دیگر خاک (از جمله: فاز مایع، کاتیون‌ها، مواد ارگانیک، و مواد معدنی خاک رس) دارند. از جمله‌ی نانوموادها، نانوسیلیس‌ها هستند. نانوسیلیس‌ها شامل مجموعه‌ی ذرات کوچک SiO_2 هستند که از طریق پیوندهای شیمیایی به یکدیگر متصل و ذرات بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند.

با توجه به رشد روزافزون جمعیت و ساختمان‌سازی بر روی خاک‌های نرم، مطالعات آزمایشگاهی، صحرایی و عددی تغییرشکل‌های خاک به خصوص تغییرشکل‌های خزشی خاک‌های نرم ضروری است.^[۱] خاک‌ها با ویژگی‌های متفاوت، رفتارهای مختلفی با گذشت زمان از خود نشان می‌دهند. معمولاً فرایندهای فیزیکی، شیمیایی، و مکانیکی وابسته به زمان می‌تواند منجر به رفتار ترد و یا نرم‌شوندگی، کاهش یا افزایش مقاومت و یا تغییر در یک سری از ویژگی‌های خاک شود. علاوه بر این، تغییرات در ساختار خاک با گذشت زمان می‌تواند در پایداری خاک تأثیر بگذارد.

پیش‌بینی رفتار درازمدت خاک با استفاده از دانش امروزی، چالش مهمی در مهندسی ژئوتکنیک است. زمانی که خاک تحت بارگذاری ثابتی قرار می‌گیرد، تغییرشکل‌هایی را با گذشت زمان تجربه می‌کند که تراکم ثانویه نامیده می‌شوند. تغییرشکل‌های مذکور، شامل نشست سازه بر روی زمین‌های تراکم‌پذیر، حرکات شیب‌های طبیعی و یا گودبرداری شده، فشرده شدن زمین‌های نرم اطراف تونل و ... است.

اولین مطالعات در زمینه‌ی ضریب تراکم ثانویه حدود یک دهه بعد از تئوری

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۲/۱۳۹۵، اصلاحیه ۵/۴/۱۳۹۵، پذیرش ۷/۴/۱۳۹۵.

DOI:10.24200/J30.2018.1356

negahdar@uma.ac.ir
arezoonorio@gmail.com
yadegari.shima@gmail.com

تشکیل می‌شود. در صورت افزودن نانوسیلیس، ژل سیلیکات کلسیم هیدراته، مقاومت خمشی و شکافتگی را نیز افزایش می‌دهد.

رفتار تراکم‌پذیری بالا و مقاومت ساختاری پایین خاک‌های رس نرم به نگرانی مهمی در مهندسی ژئوتکنیک تبدیل شده است. به طوری که با اجرای ساختمان‌ها، خاکریزها و جاده‌ها بر روی خاک‌های رس نرم، اغلب نشست‌های قابل توجهی رخ می‌دهد. در واقع بررسی پژوهشگران نشان می‌دهد که تغییرات رفتار خزشی خاک رس نرم، صفر نیست و اساس مطالعه‌ی پژوهش حاضر بر این موضوع دلالت می‌کند و پژوهشی در سال ۲۰۰۴^[۱] نیز مزید بر علت است. البته لازم به توضیح است در گذشته بیشتر پارامترهای مقاومت برشی، تک‌محوری و سه‌محوری خاک‌های نرم تثبیت شده با نانوسیلیس مطالعه شده‌اند و مطالعه‌ی تغییرشکل‌های خزشی خاک‌های مورد اشاره کمتر بررسی شده و این نیز مشوق بررسی میزان آن در ابتدای پژوهش بوده است. اگرچه در مطالعه‌ی حاضر، تغییرشکل‌های خزشی پایین در مقایسه با خاک‌های لجنی، آلی و پیت مشاهده شده است، ولی هدف اصلی موردی بوده و نتایج آن در بررسی تغییرشکل‌های خاک نرم موجود اطراف دریاچه‌ی شورابیل واقع در استان اردبیل استفاده شده است. در ضمن مقایسه‌ی تأثیر درصدهای مختلف از نانوسیلیس در میزان تغییرشکل‌های خزشی صورت گرفته است. نتایج به دست آمده براساس ارتباط ضریب تراکم ثانویه و نسبت تخلخل و با استفاده از تصاویر به دست آمده از آزمایش SEM شرح داده شده‌اند.

با توجه به دلیل شروع پژوهش حاضر با عنایت به نیاز شرکت توسعه‌ی مسکن استان اردبیل و سفارش کار در عمل، خاک مورد مطالعه از مصالح زیر بستر ساختمان‌های شرکت توسعه‌ی مسکن استان اردبیل برداشت شده و در عمل این موضوع نیاز صنعت را در مواجهه با خاک‌های مذکور برطرف کرده است.

۲. رفتار خزشی خاک در شرایط تحکیم یک‌بعدی

زمانی که خاک تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، با زائل شدن فشار آب حفره‌ی، تنش‌های مؤثر با گذشت زمان افزایش می‌یابند، به عبارتی تحکیم اولیه اتفاق می‌افتد. مقدار قابل توجهی از نشست‌ها طی تحکیم اولیه اتفاق می‌افتند. منحنی تحکیم اولیه را می‌توان با رابطه‌ی ۱ بیان کرد:

$$e = e_0 - C_c \log \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (1)$$

که در آن، e نسبت تخلخل، e_0 تخلخل اولیه، σ تنش و σ_0 تنش اولیه (۱ کیلوپاسکال) هستند. به منظور اندازه‌گیری تراکم‌پذیری خاک‌ها از ضریب تراکم‌پذیری (C_c) استفاده می‌شود (ضریب تراکم‌پذیری، شیب منفی منحنی تحکیم اولیه‌ی تخلخل - لگاریتم تنش مؤثر است).

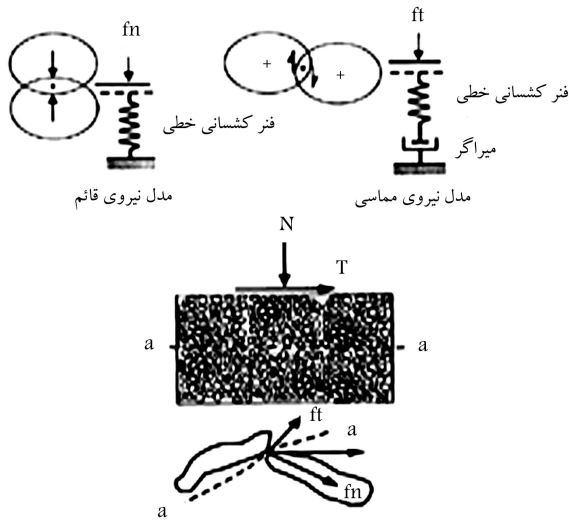
بعد از استهلاک کامل فشار آب حفره‌ی، چنانچه بارگذاری بر روی خاک حفظ شود، تغییرشکل‌های با گذشت زمان اتفاق می‌افتند که تراکم ثانویه یا خزش نامیده می‌شود. برخی پژوهشگران (۱۹۷۶ و ۱۹۷۷) ضریبی با عنوان ضریب تراکم ثانویه تعریف کرده‌اند که به طور کلی مقدار تحکیم ثانویه را مشخص می‌کند (معادله‌ی ۲):^[۱۳]

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (2)$$

که در آن C_{α} ، میزان تراکم ثانویه، Δe تغییر نسبت تخلخل از زمان t_1 تا زمان t_2 در منحنی لگاریتم زمان در برابر نسبت تخلخل و Δt زمان بین t_1 و t_2 هستند. ارتباط کرنش متغیر با زمان در آزمایش تحکیم یک‌بعدی در شکل ۱ ارائه شده است.

برخی پژوهشگران (۱۹۹۲) به منظور بررسی تأثیر نانوذرات سیلیکا در جهت بهبود مقاومت خاک در مقابل تحکیم و نفوذپذیری، با انجام یک سری آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی به این نتیجه رسیدند که مواد مذکور، مقاومت خاک را در مقابل نشست را افزایش و نفوذپذیری را کاهش می‌دهند.^[۸] در پژوهش دیگری در ایالات متحده (۲۰۰۷)، در محلی که خاک آن از نوع ماسه با ویسکوزیته‌ی بالا بود، با استفاده از نانومواد، بهبود ۴۰ درصدی نشست با اعمال زلزله‌ی مصنوعی و ارزیابی نشست اعمال شده در آن گزارش شد.^[۹] همچنین در سال ۲۰۰۹، تحت آزمایش تحکیم یک‌بعدی، به آزمایش سه‌محوری و مقاومت فشاری به منظور بررسی اثر نانوذرات سیلیکا در محدوده‌ی ابعاد ۵ تا ۱۰ نانومتر پرداخته شد و این نتیجه به دست آمد که خاک حاوی نانوذرات در مراحل اولیه، شکل‌پذیر است و متعاقباً کشسان خمیری می‌شود.^[۱۰] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۴، تأثیر افزودن نانوسیلیس در خواص ژئوتکنیکی خاک رسی بررسی شد و نتایج نشان داد که حدود روانی و خمیری خاک رسی با افزایش میزان نانوذرات به ترکیب خاک افزایش می‌یابد، ولی از آنجایی که آهنگ افزایش حد خمیری نسبت به حد روانی بیشتر است، شاخص خمیری کاهش می‌یابد. همچنین افزودن نانوسیلیس تا حد ۱/۵٪، موجب افزایش چگالی خشک ذرات خاک رسی می‌شود و افزودن نانوسیلیس تا حد ۱/۵٪ وزنی خاک خشک، سبب افزایش چسبندگی دانه‌های خاک و افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود و افزایش بیش از آن، تغییر چندانی را موجب نمی‌شود.^[۱۱] در بررسی دیگری در همان سال گزارش شد که با افزودن ۱٪ نانوسیلیس به خاک رس واگرا، پتانسیل واگرایی کاهش می‌یابد و خاک غیرواگرا می‌شود. ذرات نانوسیلیس به علت ریزبودن خود و بالابودن سطح ویژه‌ی آن‌ها و تمایل‌شان به ایجاد واکنش، باعث به وجود آمدن چسبندگی زیادی بین ذرات خاک می‌شوند و از واکنش خاک با آب و فرسایش جلوگیری می‌کنند.^[۱۲]

مطالعات مشخصی در خصوص فعل و انفعالات شیمیایی افزایش نانوسیلیس در خاک رس انجام شده است. برای مثال در مطالعاتی در سال ۱۳۸۸، نشان داده شد که با ریزش ذرات سیلیکا تا حد نانو، می‌توان پیوستگی بهتری در پارامترهای ژئوتکنیکی و ساختاری خاک، از جمله دانه‌بندی خاک ایجاد کرد. به عبارت دیگر، چسبیدن ذرات به یکدیگر و باقی ماندن ساختمان‌های تجمعی بعد از تثبیت، باعث کاهش فضای خالی خاک و افزایش مقاومت و سختی و کاهش تورم می‌شود. همچنین ریز بودن ذرات تا حد نانو باعث ایجاد ساختار متراکم‌تری در خاک می‌شود و این از مزیت‌های نانوسیلیس نسبت به دیگر پوزولان‌هاست. همچنین در مطالعات دیگری (۱۳۹۱) نشان داده شد که افزودن نانوسیلیس، تأثیر مطلوبی در کاهش تشکیل اترینگات در خاک‌های رسی که سولفات محلول با غلظت بالا دارند و باعث تورم می‌شود، دارد و این امر سبب کاهش اثرات نامطلوب از جمله سختی و شکنندگی می‌شود. لازم به ذکر است که در صورت مناسب بودن شرایط و با توجه به کافی بودن سیلیس در المان تسلیح استفاده‌شده، مولکول اترینگات می‌تواند به تاماسیت تبدیل شود. این کانی نیز با جذب ۲۹ مولکول آب تورم‌زاست. علت کاهش تورم با افزایش درصد پوزولان مرتبط را می‌توان به کاهش تشکیل اترینگات ربط داد. تأثیر نانوذرات در خاک به علت ویژگی‌های خاص‌شان است. برخی پژوهشگران (۲۰۱۱) ویژگی‌ها و آثار مذکور را به این صورت بیان کرده‌اند: در مقیاس نانو، نسبت بالاتر سطح به حجم و همچنین ظرفیت بالاتر تبادل کاتیونی وجود دارد. بنابراین برهم‌کنش آن‌ها با دیگر ذرات بسیار فعالانه است. همچنین پژوهش‌ها نشان داده‌اند که وجود نانوالیاف در خاک معمولاً خاصیت آب‌گونی^۱ خاک را افزایش می‌دهد و همچنین مقاومت برشی آن را بالا می‌برد. نانوسیلیس از جمله تقویت‌کننده‌هایی است که با هیدروکسید کلسیم واکنش می‌دهد و ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H)



شکل ۲. نیروهای مماسی و عمودی در برخورد ذرات.

عمودی و نیروهای برشی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. تغییرات کوچک در نسبت نیروهای مماسی و عمودی در یک برخورد می‌تواند تأثیر زیادی در میزان لغزش در همان برخورد داشته باشد. این تغییرات اگر در ناحیه‌ی برشی رخ دهند، می‌توانند باعث افزایش یا کاهش در میزان خزش شوند. مطابق با شکل ۲، چنانچه متوسط نسبت نیروهای مماسی به عمودی کاهش یابد، تغییرشکل‌های خزشی کاهش می‌یابند. در حالی که افزایش این نسبت می‌تواند منجر به افزایش میزان خزش و یا گسیختگی شود. در برخی از موارد، تغییرات ساختاری ممکن است باعث نیمه پایدار شدن ساختار خاک شود. در بعضی موارد، بعد از اینکه کرنش‌ها به یک مقدار معین برسند، فرایند انتقال نیروهای ذرات از کاهش نیروهای مماسی به افزایش نیروهای عمودی معکوس می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی آغاز گسیختگی خزشی و در نهایت فروپاشی ساختار است.^[۲۱]

۳. مطالعات آزمایشگاهی

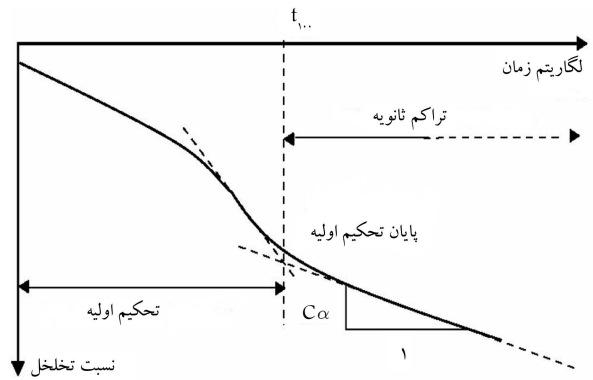
در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از آزمایش تحکیم یک‌بعدی، تأثیر تثبیت خاک رس نرم با نانوسیلیس در درصد‌های وزنی مختلف در تغییرشکل‌های درازمدت خاک در سطوح تنش متفاوت مطالعه و مکانیسم خزشی براساس ضریب تراکم ثانویه و با در نظر گرفتن لغزش و برخورد ذرات شرح داده شده است.

۱.۳. مواد پژوهش

۱.۱.۳. خاک رس نرم

خاک استفاده‌شده در آزمایش حاضر از خاک اطراف دریاچه‌ی شورابیل واقع در استان اردبیل تهیه شده است. شکل ۳، نمودار دانه‌بندی را مطابق با استاندارد ASTM D 422-63 نشان می‌دهد. با توجه به اینکه اختلاط خاک و نانوسیلیس در رطوبت بهینه‌ی خاک انجام می‌شود، آزمایش تراکم نیز روی خاک انجام شده است. نمونه‌های رس نرم در درصد رطوبت بهینه‌ی ۲۰٪ و با وزن مخصوص 1.6 gr/cm^3 ، متراکم می‌شوند و داخل قالب دستگاه تحکیم قرار می‌گیرند. منحنی تراکم نمونه‌ی رس نرم در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

به منظور مطالعه‌ی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ی خاک رس نرم،



شکل ۱. ارتباط کرنش - زمان در آزمایش تحکیم یک‌بعدی.

برخی پژوهشگران (۱۹۶۰) نیز بیان کرده‌اند که ضریب تحکیم ثانویه به جز در فشار پیش‌تحکیمی، مستقل از تنش مؤثر است.^[۱۴] همچنین در سال ۱۹۶۲، رفتار خزشی سیلت آلی دست‌نخورده و بازسازی‌شده مطالعه و بیان شده است که با افزایش تنش مؤثر، مقدار ضریب تحکیم ثانویه تا یک نقطه‌ی مشخص، افزایشی سریع دارد و بعد از آن با آهنگ کندتری کاهش می‌یابد.^[۱۵] در سال ۱۹۶۹ نیز نشان داده شده است که C_{α} ، به مقدار نسبت تنش مؤثر به تنش پیش‌تحکیم‌یافتگی وابسته است و پیشینه‌ی مقدار آن در تنش‌های بیشتر از تنش پیش‌تحکیمی روی می‌دهد.^[۱۶] همچنین در سال ۱۹۷۳، یک سری آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی بر روی رس آلی رسوبی مصنوعی به منظور بررسی ارتباط بین تنش خزشی و تراکم ثانویه ($\sigma_{creep-C_{\alpha}}$) انجام شده و براساس نتایج به دست آمده، در رس‌های عادی تحکیم‌یافته، مقادیر C_{α} با افزایش σ_{creep} کاهش و برای رس‌های بیش‌تحکیم‌یافته در فشارهای کمتر از فشارهای بیش‌تحکیمی، مقادیر C_{α} با افزایش σ_{creep} افزایش می‌یابد. برخی پژوهشگران (۱۹۸۷)، نیز علت تراکم ثانویه را ناشی از ۳ عامل کاهش نسبت تخلخل و افزایش نیروهای جاذبه بین ذرات، افزایش آب‌گونی خاک و تغییرات شیمیایی دانسته‌اند.^[۱۷] همچنین پژوهشگران دیگری (۲۰۰۵) تراکم ثانویه را ناشی از آرایش مجدد ذرات، تماس و لغزش ذرات و خروج مایع منفذی از منافذ ریز تحت تنش‌های ثابت بیان کرده‌اند.^[۱۸]

تغییرشکل‌های خاک‌ها در سطح میکروسکوپی که می‌توان به صورت تغییرشکل‌های تماسی، لغزش و سرخوردن دانه‌ها بر روی هم و شکست دانه‌ها بیان کرد. تغییرشکل‌های مذکور در سطوح تنش متفاوتی می‌توانند ایجاد شوند.^[۱۹] در تنش‌های خیلی پایین، تغییرشکل‌های تماسی بین ذرات خاک ایجاد می‌شود. تحت این شرایط خاک به صورت کشسان رفتار می‌کند و تغییرشکل‌ها به صورت برگشت‌پذیر هستند. در تنش‌های پایین، معمولاً تغییرشکل‌ها به صورت لغزش و سرخوردن ذرات روی هم اتفاق می‌افتد، در حالی که شکست دانه‌ها در تنش‌های بالاتر رخ می‌دهد، لذا خاک به صورت کشسان خمیری رفتار می‌کند و اغلب به صورت برگشت‌ناپذیر است. مطابق با نظریه‌ی مسری (۲۰۰۹)،^[۲۰] تغییرشکل‌ها را می‌توان تحت تنش‌های متفاوت در ۳ ناحیه نشان داد: در ناحیه‌ی ۱، ساییدگی و لغزش بین دانه‌ها ایجاد می‌شود؛ در ناحیه‌ی ۲، شکست دانه‌ها اتفاق می‌افتد؛ در ناحیه‌ی ۳، دانه‌ها شکسته، خرد و از هم جدا می‌شوند. نواحی ۱ و ۲ برای ذرات ماسه تحت تنش‌های پایین و ناحیه‌ی ۳ در تنش‌های بالا اتفاق می‌افتد.

همچنین در بررسی تأثیر آرایش مجدد ذرات (۱۹۸۷)، با مدل المان محدود گسسته که به لغزش و برخورد ذرات داخلی می‌پردازد، نتیجه گرفته شده است که سرعت لغزش دو ذره به میزان نسبت نیروهای برشی به عمودی بستگی دارد. برخورد

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک رس نرم.

CBR	ϕ°	C (kg/cm^2)	%w	γ_{dmax} (gr/cm^3)	PI	PL	LL	Gs	رده‌ی خاک	رنگ ظاهری
۳٫۷	۱۱٫۸	۰٫۲۵	۲۱	۱٫۶	۱۵٫۸۹	۲۴	۴۲٫۱۵	۲٫۵	CL	رس به رنگ قهوه‌یی روشن مایل به زرد ولای

جدول ۲. نتایج آزمایش XRF بر روی نمونه‌های خاک رس نرم.

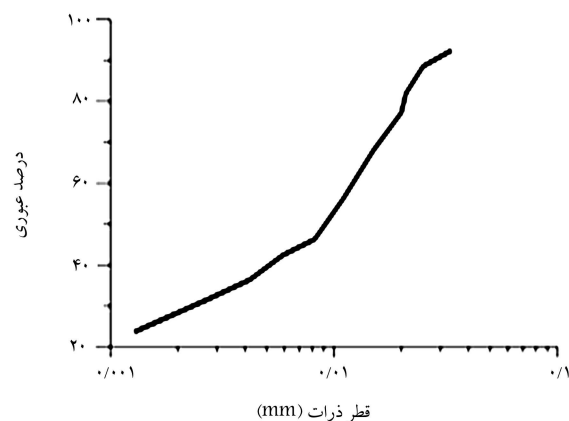
Sr	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	SO ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	L.O.I	ترکیب درصد %
۰٫۴۰	۴٫۱۵۸	۰٫۷۳	۱۳٫۹	۲٫۹۷	۲٫۹۷	۴۶٫۶۸	۰٫۲۳	۰٫۹۲	۱۲٫۹۳	۳٫۳۴	۱۳٫۰۳	

مقاومت خاک خواهد داشت. همان‌طور که مشخص است، سیلیسیم دی‌اکسید یا سیلیکا SiO_2 ، فراوان‌ترین ماده‌ی سازنده‌ی پوسته‌ی زمین است، نانوسیلیس جزء سوپر پوزولان‌هاست که در صورت استفاده‌ی صحیح، تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت خاک دارد. سیلیسیم دی‌اکسید یا سیلیکا، ماده‌ی سفیدرنگ با دمای ذوب و جوش بالاست. این ترکیب با فرمول شیمیایی SiO_2 در طبیعت به دو شکل بلوری و بی‌شکل یافت می‌شود. خطرات احتمالی نانوذراتی که در هوا پخش می‌شوند، یعنی آنروسول‌ها، اهمیت بیشتری دارند. ملاحظات تئوری در مورد نانوذراتی که از چگالش بخار به دست می‌آیند، از سال ۱۹۶۰ آغاز و تا اواخر دهه‌ی ۹۰ ادامه یافت و با انجام مشاهده‌های تجربی به تدریج بازبینی شد. نانوسیلیس‌های پائروژنیک و سل‌های نانوسیلیس، دو گروه عمده از نانوسیلیس‌ها هستند. روش‌های مختلف تولید مواد مذکور منجر به برخی تفاوت‌ها در خصوصیات آن‌ها می‌شود. سل‌های نانوسیلیس ذرات مجرای پایدار در محیط آبی هستند و سائز کلوخه‌یی برای آن‌ها متصور نیست، در حالی که در روش تولید نانوسیلیس‌های پائروژنیک، ذرات به هم فیوز می‌شوند و کلوخه‌های اولیه با ابعاد تا ۱۰۰ نانومتر را ایجاد می‌کنند، کلوخه‌های اولیه نیز به هم می‌چسبند و توده‌هایی با ابعاد از چند میکرومتر تا چند صد میکرومتر را تولید می‌کنند. با توجه به سطح ویژه‌ی بالای ذرات نانوسیلیس و کاهش مقدار نانوسیلیس در اثر پراکندگی ذرات در اختلاط مستقیم با خاک و از طرفی چون واکنش بهتر بین ذرات خاک و نانوذرات در حضور رطوبت انجام می‌گیرد، نحوه‌ی اختلاط نانوسیلیس با خاک به این صورت بوده است که ابتدا درصد‌های مختلف از نانوسیلیس با درصد رطوبت بهینه خاک مخلوط و سپس به خاک اضافه شده و پس از تراکم شدن براساس وزن مخصوص بیشینه، داخل قالب دستگاه تحکیم قرار گرفته است.

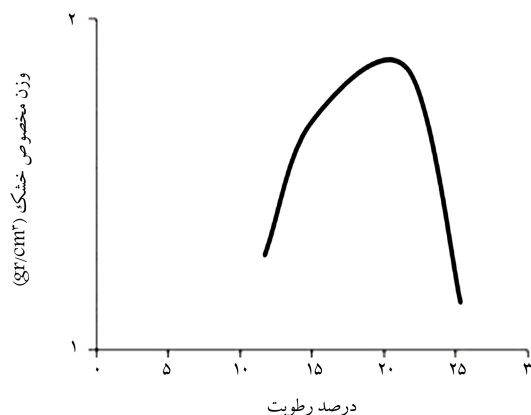
۲.۳. روش پژوهش

آزمایش‌ها به‌وسیله‌ی دستگاه استاندارد تحکیم یک‌بعدی و تحت کنترل تنش، مطابق با استاندارد ASTM D11-2435 در دو حالت تک‌مرحله‌یی و چندمرحله‌یی، بر روی نمونه‌های خاک رس نرم در دو حالت با نانوسیلیس با درصد‌های وزنی ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ و بدون نانوسیلیس، به منظور بررسی تأثیر افزودن نانوسیلیس در تغییر شکل‌های خزشی در سطوح تنش متفاوت انجام شده است. تغییر شکل‌های قائم توسط دیتالاگر و حس‌گرهای جابه‌جایی LVDT با دقت 10^{-6} میلی‌متر ثبت و بعد از انجام محاسبات مرتبط در نمودارهای نیمه‌لگاریتمی نسبت تخلخل - زمان ترسیم شده‌اند.

در پژوهش حاضر، رفتار خزشی خاک رس نرم با استفاده از ضریب تراکم ثانویه (C_α) در آزمایش تحکیم یک‌بعدی بررسی شده است. از منحنی کاساگرانده به منظور تعیین زمان موردنیاز به منظور کامل شدن تحکیم اولیه (t_{100})، ضریب تراکم



شکل ۳. منحنی توزیع اندازه‌ی دانه‌بندی خاک نمونه‌ی رس نرم.

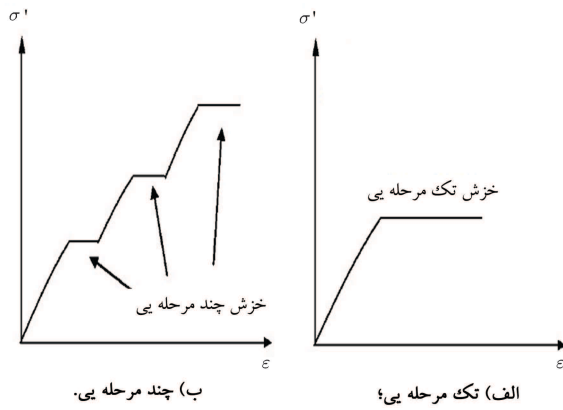


شکل ۴. منحنی تراکم خاک نمونه‌ی رس نرم.

آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتزرگ، برش مستقیم، تعیین چگالی نسبی (CBR) و آزمایش Xray انجام شده است. مشخصات خاک مورد مطالعه در جدول ۱ و همچنین نتایج آزمایش XRF بر روی نمونه‌ی خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

۲.۱.۳. نانوسیلیس

نانوسیلیس شامل مجموعه‌یی از ذرات کوچک SiO_2 است که از طریق پیوند شیمیایی به یکدیگر متصل و ذرات بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. نانوسیلیس استفاده‌شده در آزمایش حاضر، درصد خلوص بالا دارد و به شکل پودر سفیدرنگ است که از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان (ثانی) خریداری شده است. شماره‌ی شناسایی نانوسیلیس ۴-۵۴۵-۲۳۱ است. در تحقیقات مشابه عنوان شده است که نانوسیلیس جزء سوپر پوزولان‌هاست که در صورت استفاده‌ی صحیح، تأثیر قابل توجهی در افزایش



شکل ۵. مراحل انجام آزمایش.



شکل ۶. دستگاه تحکیم‌بندی یک‌بعدی و LVDT.

۴. ارائه و تفسیر نتایج

خاک‌ها با ویژگی‌های متفاوت، رفتارهای مختلفی با گذشت زمان از خود نشان می‌دهند. معمولاً فرایندهای فیزیکی، شیمیایی، و مکانیکی وابسته به زمان می‌تواند منجر به رفتار ترد و یا نرم‌شوندگی، کاهش یا افزایش مقاومت، و یا تغییر در یک سری از ویژگی‌های خاک شود. علاوه بر این، تغییرات در ساختار خاک با گذشت زمان می‌تواند در پایداری خاک تأثیر بگذارد. پیش‌بینی رفتار درازمدت خاک با استفاده از دانش امروزی، چالش مهمی در مهندسی ژئوتکنیک است.

در پژوهش حاضر، رفتار خزشی خاک رس نرم با استفاده از ضریب تراکم ثانویه C_α در آزمایش تحکیم یک‌بعدی بررسی شده است. از منحنی کاساگرانده به منظور تعیین زمان موردنیاز به منظور کامل شدن تحکیم اولیه (t_{100})، ضریب تراکم ثانویه (C_α) و تخلخل در پایان تحکیم اولیه (e_{EOP}) استفاده شده است.

آزمایش تحکیم در حالت‌های تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای بر نمونه‌ی رس نرم تثبیت‌شده با نانوسیلیس انجام شده است. تأثیر سطوح تنش و درصد نانوسیلیس در تغییر شکل‌های خزشی مطالعه و مکانیسم خزشی با در نظر گرفتن لغزش، برخورد و تغییر شکل ذرات شرح داده شده است. ارتباط نسبت تخلخل در مقابل زمان در آزمایش تحکیم یک‌بعدی، در نمونه‌ی رس نرم تثبیت‌شده با نانوسیلیس در درصد‌های وزنی ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و در تنش‌های ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب در شکل‌های ۷ الی ۱۰ مشاهده می‌شود. بارگذاری پله‌ای، تحکیم اولیه و تراکم ثانویه به طور واضح در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار خاک متأثر از تنش‌های وارده و درصد نانوسیلیس است. به طوری که در

جدول ۳. زمان مورد نیاز جهت پایان تحکیم اولیه.

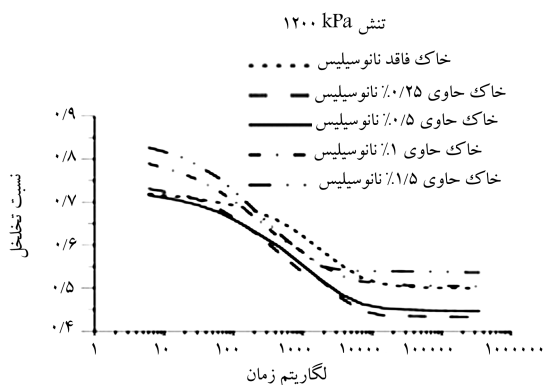
تنش اعمالی (کیلوپاسکال)	درصد نانوسیلیس	زمان پایان تحکیم اولیه (t_{100}) (ثانیه)
۱۵۰	۰	۳۶۰۰
	۰٫۲۵	۳۶۰۰
	۰٫۵	۳۶۰۰
	۱	۱۸۰۰
	۱٫۵	۱۸۰۰
	۰	۷۲۰۰
۳۰۰-۶۰۰	۰٫۲۵	۷۲۰۰
	۰٫۵	۷۲۰۰
	۱	۳۶۰۰
	۱٫۵	۳۶۰۰
	۰	۷۲۰۰
	۰٫۲۵	۷۲۰۰
۱۲۰۰	۰٫۵	۷۲۰۰
	۱	۳۶۰۰
	۱٫۵	۱۸۰۰
	۰	۷۲۰۰

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی نانوسیلیس.

چگالی (gr/cm^3)	۲٫۴
اندازه‌ی ذرات (nm)	۲۰-۳۰
مساحت سطح ویژه (m^2/gr)	۱۸۰-۶۰۰
خالوص	۹۹٪ به بالا

ثانویه (C_α) و تخلخل در پایان تحکیم اولیه (e_{EOP}) استفاده شده است. مطابق با منحنی کاساگرانده، زمان موردنیاز جهت پایان تحکیم اولیه‌ی نمونه‌ی خاک رس نرم در حالت‌های تثبیت‌شده با و بدون نانوسیلیس، با ضخامت ۲۰ میلی‌متر تحت شرایط زهکشی قائم در جدول ۳ و خصوصیات فیزیکی نانوسیلیس در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

در شکل ۵، نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها نشان داده شده است. در حالت تک‌مرحله‌ای، نمونه‌ی خاک تا تنش مؤثر مشخصی بارگذاری می‌شود و در همان سطح از تنش، رفتار خزشی بررسی می‌شود. در حالت چندمرحله‌ای، نمونه تحت تنش‌های مؤثر متفاوتی از مقدار کم تا زیاد قرار داده می‌شود. شکل ۶، نمایی از دستگاه تحکیم یک‌بعدی و LVDT را نشان می‌دهد. در مرحله‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها، جهت اختلاط بهتر خاک با نانوسیلیس، ابتدا نانوسیلیس با رطوبت بهینه و سپس با خاک مخلوط شده است. در هر آزمایش، تخلخل اولیه و نهایی نمونه‌ها با تعیین درصد رطوبت از طریق خشک کردن نمونه در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت به دست آمده است.



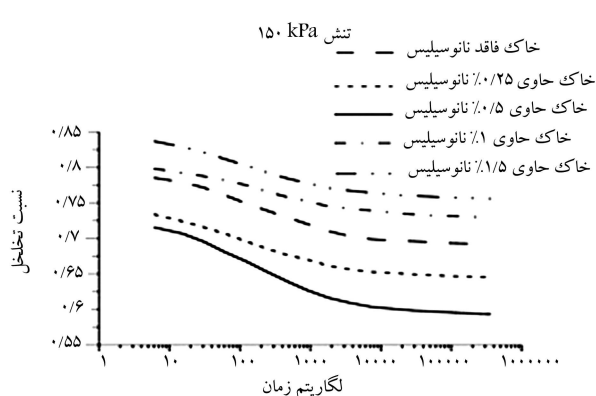
شکل ۱۰. ارتباط نسبت تخلخل با زمان در آزمایش خزشی تک مرحله‌یی در خاک تثبیت شده با ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ درصد با و بدون نانوسیلیس در سطح تنش ۱۲۰۰ کیلوپاسکال.

جدول ۵. مقادیر ضریب فشردگی و ضریب تغییر حجم m_v نیمه‌لگاریتمی تنش و نسبت تخلخل در آزمایش چند مرحله‌یی.

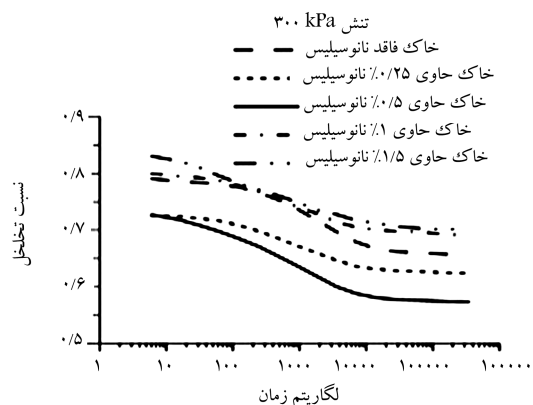
ضریب تغییر حجم m_v (m^3/MN)	ضریب فشردگی (C_c)	درصد نانوسیلیس
$2,566 \times 10^{-4}$	۰٫۲۸۶	۰
$2,146 \times 10^{-4}$	۰٫۲۴۵	۰٫۲۵
$2,140 \times 10^{-4}$	۰٫۲۳۹	۰٫۵
$2,580 \times 10^{-4}$	۰٫۲۷۲	۱
$2,746 \times 10^{-4}$	۰٫۲۷۸	۱٫۵

در تنش‌های ۱۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ کیلو پاسکال، با افزودن ۰٫۲۵ و ۰٫۵ درصد نانوسیلیس به خاک، نسبت تخلخل خاک کاهش یافته و خاک حالت متراکم‌تری پیدا کرده است. دلیل این امر، سطح ویژه بالای ذرات و بار سطحی آن‌هاست، که باعث فعل و انفعالات بین‌ذره‌یی و قرار گرفتن نانوذرات در داخل منافذ خاک و افزایش قفل و بست بین دانه‌ها می‌شود. اما از ۰٫۵٪ به بالا به دلیل تجمع و وجود تخلخل درون‌ذره‌یی نانوسیلیس در درون سوراخ‌ها و جذب و آب‌پوشی بالا در طی فرایند، افزایش در نسبت تخلخل خاک مشاهده شده است. در سطح تنش ۱۲۰۰ کیلو پاسکال با افزایش درصد نانوسیلیس، نمودار نسبت تخلخل - زمان با شیب تندتری تغییر پیدا کرده است. به طوری که بعد از پایان تحکیم اولیه، تخلخل بالایی را نشان می‌دهند. این امر می‌تواند ناشی از خصوصیات خود خاک باشد. چون خاک مورد مطالعه، خاک نرم است، لذا در سطح تنش بالا، خاک نرم ظرفیت تحمل این سطح از تنش را ندارد و دچار از هم پاشیدگی می‌شود. شکل ۱۱، ارتباط ضریب تراکم ثانویه با تنش خزشی وارده در آزمایش خزشی تک مرحله‌یی را نشان می‌دهد. برخلاف نظریه‌ی والکر که رابطه‌ی بین ضریب تراکم ثانویه و تنش را خطی بیان می‌کند، یک رابطه‌ی غیرخطی مشاهده می‌شود.

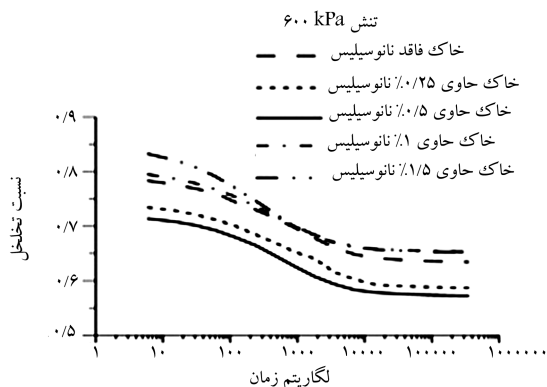
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، تغییر شکل‌های خزشی پایینی نسبت به نمونه‌ی فاقد نانوسیلیس از خود نشان می‌دهند. از طرفی یک رابطه‌ی کاملاً غیرخطی بین لگاریتم تنش مؤثر و ضریب تراکم ثانویه مشاهده می‌شود. به طوری که تا تنش ۳۰۰ کیلو پاسکال، ضریب تراکم ثانویه با شیب تند افزایش دارد و سپس با افزایش تنش تا ۶۰۰ کیلو پاسکال با شیب تند کاهش می‌یابد و با افزایش تنش تا ۱۲۰۰ کیلو پاسکال، دوباره افزایش تغییر شکل‌های خزشی مشاهده می‌شود. شکل ۱۲، ارتباط نسبت تخلخل و تنش خزشی در خاک تثبیت شده با



شکل ۷. ارتباط نسبت تخلخل با زمان در آزمایش خزشی تک مرحله‌یی در خاک تثبیت شده با ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ درصد با و بدون نانوسیلیس در سطح تنش ۱۵۰ کیلو پاسکال.

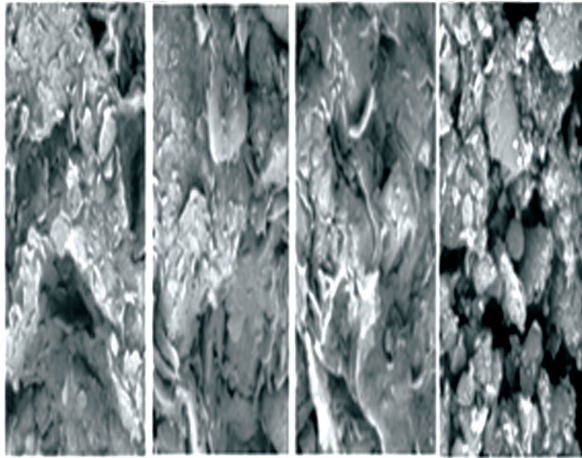


شکل ۸. ارتباط نسبت تخلخل با زمان در آزمایش خزشی تک مرحله‌یی در خاک تثبیت شده با ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ درصد با و بدون نانوسیلیس در سطح تنش ۳۰۰ کیلو پاسکال.



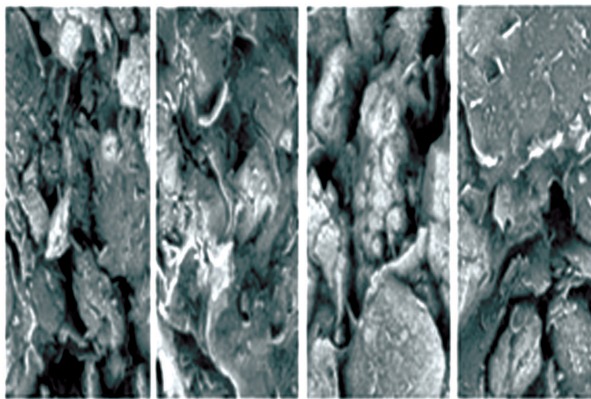
شکل ۹. ارتباط نسبت تخلخل با زمان در آزمایش خزشی تک مرحله‌یی در خاک تثبیت شده با ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ درصد با و بدون نانوسیلیس در سطح تنش ۶۰۰ کیلو پاسکال.

سطوح تنش ثابت، با افزایش درصد نانوسیلیس، اضافه فشار آب حفره‌یی سریع‌تر مستهلک می‌شود و زمان پایان تحکیم اولیه (t_{100}) کاهش می‌یابد. مطابق با نظریه‌ی نول می‌توان گفت ذرات نانوسیلیس در بین فضاهای خالی خاک رس نرم قرار گرفته و نفوذپذیری، کاهش و مقاومت خاک در برابر نشست افزایش یافته است.



شکل ۱۱. ۱/۵٪ نانوسیلیس. (ج) ۱٪ نانوسیلیس؛ (ب) ۰/۵٪ نانوسیلیس؛ (الف) ۰/۲۵٪ نانوسیلیس؛

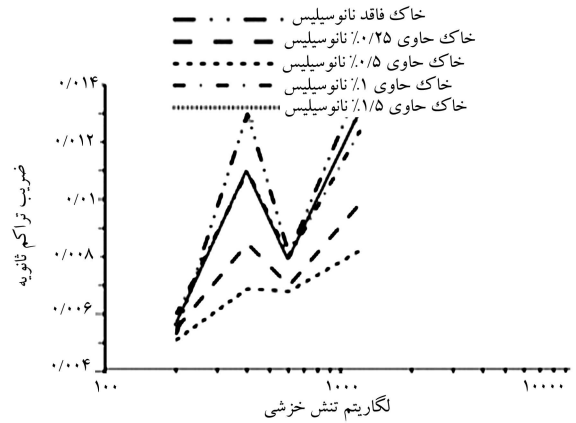
شکل ۱۳. نتایج آزمایش SEM روی نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و نمونه‌ی بدون نانوسیلیس تحت تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال.



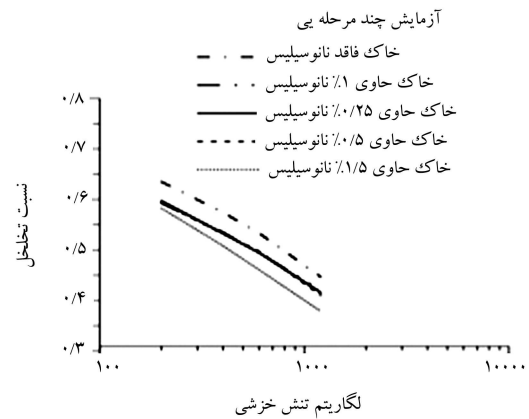
شکل ۱۴. نتایج آزمایش SEM روی نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵٪ نانوسیلیس تحت تنش

شکل ۱۴. نتایج آزمایش SEM روی نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵٪ نانوسیلیس تحت تنش

با نمودارهای حاصل از آزمایش‌های خزشی و نتیجه‌گیری در مورد تشخیص نوع خاک مطابقت دارد. شکل ۱۳، تأثیر مقدار نانوسیلیس در ساختار خاک در یک تنش ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. ساختار پوسته‌ی و صفحه‌ی شکل خاک رس نرم به وضوح در تصاویر حاصل قابل رؤیت است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن نانوسیلیس تا ۰/۵٪ وزنی و قرارگرفتن نانوذرات در داخل منافذ خاک و افزایش قفل و بست بین دانه‌ها، خاک منسجم‌تر شده است، ولی با افزایش بیشتر درصد نانوسیلیس، به دلیل تخلخل درون‌ذره‌ی نانوسیلیس در درون سوراخ‌ها نسبت تخلخل افزایش یافته است. شکل ۱۴، نتایج SEM روی نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵٪ نانوسیلیس تحت تنش ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. با افزایش تنش، تخلخل کاهش یافته و در تنش ۱۲۰۰ کیلوپاسکال، ساختار خاک به هم ریخته است، که نشان می‌دهد خاک نرم ظرفیت تحمل این سطح از تنش را ندارد و دچار از هم پاشیدگی می‌شود. مراحل بارگذاری، سطوح تنش اعمالی، تخلخل نمونه‌ها و مدت زمان اعمال بار در جدول ۶ ارائه شده است. نانوسیلیس تحت تنش ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. با افزایش تنش، تخلخل کاهش یافته و در تنش ۱۲۰۰ کیلوپاسکال، ساختار خاک به هم ریخته



شکل ۱۱. ارتباط ضریب تراکم ثانویه با تنش در نمونه‌ی خاک رس نرم تثبیت شده با نانوسیلیس در آزمایش خزشی تک مرحله‌ی.



شکل ۱۲. ارتباط نسبت تخلخل با تنش خزشی در خاک تثبیت شده با ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد با و بدون نانوسیلیس در تنش ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ در آزمایش چندمرحله‌ی.

۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد با و بدون نانوسیلیس در آزمایش چندمرحله‌ی در تنش‌های ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. مقدار ضریب فشردگی و ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش چندمرحله‌ی برای درصد‌های مختلف نانوسیلیس در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند نمونه‌های حاوی نانوسیلیس ضریب فشردگی کمتری در مقایسه با نمونه‌های فاقد نانوسیلیس هستند. البته با افزایش درصد نانوسیلیس تا ۰/۵ درصد وزنی ضریب فشردگی مذکور کاهش پیدا کرده است. این امر نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیس سبب افزایش مقاومت در برابر نشست می‌شود، اما در مقادیر بیشتر از ۰/۵٪، ضریب فشردگی افزایش پیدا می‌کند. نمونه انسجام خود را از دست می‌دهد و حفره‌های موجود در آن افزایش می‌یابد.

۱.۴. میکروسکوپ SEM

میکروسکوپ SEM^۲ نوعی میکروسکوپ الکترونی است، که قابلیت عکس برداری از سطوح با بزرگ‌نمایی ۱۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیکی کمتر از ۱ تا ۲۰ نانومتر بسته به نوع نمونه را دارد، که کاربردهای بسیاری در فناوری نانو پیدا کرده است. عکس برداری SEM روی یک سری از نمونه‌هایی که تحت آزمایش تحکیم یک‌بعدی قرار گرفته‌اند، انجام شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش انجام شده

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های خزشی انجام شده بر نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس و فاقد نانوسیلیس.

C_{α} ضریب تراکم ثانویه	C_V ضریب تحکیم mm^2/sec	e_{EOP} تخلخل در پایان تحکیم اولیه	e_0 تخلخل اولیه‌ی نمونه	$\sigma (kPa)$ تنش (کیلوپاسکال)	نمونه
۰٫۰۰۵۳۲	۰٫۱۱۴	۰٫۷۰۲۳۷	۰٫۷۹۱۰۰	۱۵۰	فاقد نانوسیلیس
۰٫۰۰۵۵۱	۰٫۱۱۴	۰٫۶۵۶۳۲	۰٫۷۴۱۰۰	۱۵۰	با ۲۵ درصد نانوسیلیس
۰٫۰۰۵۱۱	۰٫۱۱۴	۰٫۶۰۹۱۴	۰٫۷۲۸۰۰	۱۵۰	با ۵ درصد نانوسیلیس
۰٫۰۰۶۰۳	۰٫۲۲۸	۰٫۷۴۴۷۷	۰٫۸۰۱۰۰	۱۵۰	با ۱ درصد نانوسیلیس

خاک می‌شوند، فشار آب حفره‌یی کمتر می‌شود و در مدت زمان کمتری جای خود را به تنش مؤثر می‌دهد.

۲. با افزایش تنش، در منحنی نسبت تخلخل - لگاریتم زمان، انحناء منحنی بیشتر شده است و نشست بیشتر، یا کاهش سریع تخلخل مشاهده می‌شود.

۳. برخلاف نظریه‌ی والکر، که رابطه‌ی بین ضریب تحکیم ثانویه و تنش وارده را به صورت خطی بیان کرده است، یک رابطه‌ی کاملاً غیرخطی بین لگاریتم تنش مؤثر و ضریب تراکم ثانویه مشاهده می‌شود. در سطوح تنش پایین (۰٫۳ مگاپاسکال)، ضریب تراکم ثانویه با شیب تند افزایش و با افزایش سطح تنش (۰٫۶ مگاپاسکال)، کاهش پیدا می‌کند. اما در سطوح تنش‌های بالاتر (۱٫۲ مگاپاسکال)، نرخ خزش به دلیل شکست و آرایش مجدد ذرات افزایش می‌یابد. در واقع در تنش‌های بالاتر از ظرفیت باربری خاک، ذرات خاک متراکم‌تر می‌شوند، نیروهای جاذبه‌ی خود را به نیروهای دافعه می‌دهد و نرخ خزش افزایش می‌یابد.

۴. نمونه‌های حاوی نانوسیلیس ضریب فشردگی کمتری در مقایسه با نمونه‌های فاقد نانوسیلیس هستند. البته با افزایش درصد نانوسیلیس تا ۰٫۵٪ وزنی، به دلیل افزایش مقاومت در برابر نشست، ضریب فشردگی کاهش پیدا می‌کند. اما در مقادیر بیشتر از ۰٫۵٪، ضریب فشردگی افزایش پیدا می‌کند.

است که نشان می‌دهد خاک نرم ظرفیت تحمل این سطح از تنش را ندارد و دچار از هم پاشیدگی می‌شود. مراحل بارگذاری، سطوح تنش اعمالی، تخلخل نمونه‌ها و مدت زمان اعمال بار در جدول ۶ ارائه شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، آزمایش‌های خزشی تک‌مرحله‌یی و چندمرحله‌یی در سطوح تنش‌ی متفاوت در حالت خشک و اشباع به منظور بررسی تأثیر نانوسیلیس در رفتار خزشی نمونه‌ی خاک رس نرم انجام شده و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها براساس ارتباط ضریب تراکم ثانویه (C_{α}) و تخلخل (Δe) بیان شده و این نتایج به دست آمده است:

۱. رفتار خاک متأثر از تنش وارده و درصد نانوسیلیس به‌کار رفته است. با افزایش نانوسیلیس تا ۰٫۵٪، زمان پایان تحکیم اولیه همانند خاک فاقد نانوسیلیس است، اما با افزایش بیشتر درصد نانوسیلیس، زمان شروع تغییرشکل‌های خزشی کاهش پیدا می‌کند. اضافه فشار آب حفره‌یی زودتر زائل و تنش وارده توسط اسکلت خاک تحمل می‌شود. در واقع ذرات نانوسیلیس در بین حفره‌های خاک رس قرار می‌گیرند و باعث کاهش در نفوذپذیری و سیال موجود در بین منافذ

پانوشته‌ها

1. thixotropy
2. scanning electron microscope

منابع (References)

- Havel, F. "Creep in soft soils", Ph D Thesis, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University (2004).
- Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York (1996).
- Buisman, A.S.K. "Results of long duration settlement tests", *Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Harvard University, Massachusetts, USA, **1**(3), pp. 103-106 (22-26 June, 1936).
- Taylor, D.W. "Research on consolidation of clays", Report Serial No. 82, Department of Civil Engineering MIT, Cambridge (1942).
- Lo, K.Y. "Secondary compression of clays", *ASCE*, **87**(4), pp. 61-88 (1961).
- Wahls, H.E., "Analysis of primary and secondary consolidation", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division American Society of Civil Engineers*, **88**, pp.207-231 (1962).
- Elsawy, M. and Kamal, M. "Influence of aging on bearing capacity of circular footing resting on soft", *HBRC Journal*, **9**(2), pp. 256-262 (2013).
- Noll, M.R., Bartlett C. and Dochat, T.M. "In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica", *Water Well Journal*, **11**, pp. 443-458 (1992).

9. Gallagher, P.M., Conlee, C.T. and Rollins, K.M. "Full-scale field testin of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk", *ASCE Journal*, **133**(2), pp. 2-186 (2007).
10. Burton, C. "Laboratory testing of strength fracture behaviour and hydraulic conductivity", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**(6) ,pp. 603-607 (2009).
11. Majdi, M., Urumieyi, A. and Nikudel, M.R. "Investigation of the effect nanosilica on geotechnical engineering of clay soil", *The First National Conference of Soil Mechanic and Foundation Engineering*, University of Rajayi, Tehran, pp. 55-56 (3-4 Dec, 2014).
12. Fatahi, M., Ladarian, F. and Khazayi, V. "Investigation of the effects of bentonite and nanosilica in stabilization of divergent soil", *The First National Conference of Soil Mechanic and Foundation Engineering*, University of Rajayi, Tehran, pp. 72-78 (3-4 Dec, 2014).
13. Mesri, G. and Godlewski, P.M. "Time- and Stress Compressibility inter relationship", *Joural of Geotechnical Engineering*, **103**(5), pp. 417-430 (1977).
14. Newland, P. L. and Allely, B. H. "A study of the consolidation characteristics of a clay", *Geotechnique*, **10**(2), pp. 62-74 (1960).
15. Wahls, H.E. "Analysis of primary and secondary consolidation", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division American Society of Civil Engineers*, **88**(6), pp. 207-231 (1962).
16. Walker, L.K. "Secondary settlement in sensitive clays", *Canadian Geotechnical Journal*, **6**(2), pp. 219-222 (1969).
17. Mesri, G. and Castro, A. " C_α/C_c concept and K_0 during secondary compression", *Journal of Geotechnical Engineering*, **113**(3), pp. 230-247 (1987).
18. Mitchell, J.K. and Soga, K., *Fundamentals of Soil*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New Jersey (2005).
19. Mitchell, J.K. and Soga, K., *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New Jersey (2005).
20. Mesri, G. and Vardhanabhuti, B. "Compression of granular materials", *Canadian Geotechnical Journal*, **46**(4), pp. 369-392 (2009).
21. Kuhn, M.R. "Micromechanical aspects of soil creep", PhD thesis, University of California, Berkeley (1987).