

تأثیر چرخه ذوب و انجماد بر نشست‌های بلندمدت خاک سیلت فروریزی

علیرضا نگهدار^{۱*}، شیما یادگاری^۲ و شیوا رحمانی^۳

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی عمران- خاک و پی، دانشگاه محقق اردبیلی

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- خاک و پی، دانشگاه محقق اردبیلی

(دریافت: ۹۶/۸/۲۱، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۵)

چکیده

گسترده‌ی خاک‌های مسئله‌دار و تأثیر چرخه ذوب و انجماد و به تبع آن دگرگونی در ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های مسئله‌دار مخصوصاً خاک‌های فروریزی بر محققین پوشیده نیست. این آسیب‌ها ناشی از تشکیل لزه‌های یخی در طول چرخه ذوب و انجماد است که به گسستگی پیوند ذرات خاک و تغییر ساختار اولیه منجر می‌گردد. با توجه به این که در مناطق سردسیر احتمال ذوب و یخ مکرر تهدیدی برای ویژگی‌های مقاومتی، تغییر شکل و تراکم و ... خاک‌ها می‌باشد و خاک‌های سیلتی جز خاک‌های فروریزی بوده و در برابر یخبندان بسیار حساس می‌باشند، بدین منظور در این تحقیق، تأثیر چرخه‌های ذوب و انجماد و سطوح تنش بر ساختار و تغییر شکل‌های بلندمدت خاک سیلتی با انجام آزمایش تحکیم یک‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفته و در ادامه مکانیسم خزشی آن با در نظر گرفتن لغزش و تغییر شکل ذرات و براساس ارتباط ضریب تراکم ثانویه و نسبت تخلخل و با استفاده از تصاویر به دست آمده از آزمایش SEM شرح داده شده‌اند. ارتباط غیرخطی بین ضریب تراکم ثانویه و تنش خزشی را مشاهده می‌شود. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد، میزان تغییر شکل‌های خزشی نمونه سیلتی علاوه بر شرایط اشباع بودن نمونه و سطوح تنش خزشی به شمار چرخه‌های ذوب و انجماد نیز بستگی دارد. دوره‌های ذوب و انجماد، لغزش، جهت‌گیری ذرات، تخلخل و ساختار اولیه خاک را تغییر می‌دهد. در طول آزمایش تحکیم، برای نمونه تحت ۱۰ چرخه از فرایند ذوب و انجماد، به دلیل فروپاشیدگی ذرات از همدیگر و کوچک‌تر شدن اندازه ذرات، متوسط نشست‌های تحکیمی بیشتر شده و تغییر شکل‌های خزشی هم افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: چرخه ذوب و انجماد، تحکیم یک‌بعدی، سیلت، تراکم ثانویه، SEM.

۱- مقدمه

تخمین نشست‌ها در طراحی سازه‌های مهندسی و ارزیابی عملکرد آن‌ها اهمیت بسیاری دارد. تغییر شکل‌های بلندمدت خزشی معمولاً در یک نرخ ثابت و یا متغیر با زمان اتفاق می‌افتد. رفتار خزشی خاک‌ها معمولاً با بررسی تراکم ثانویه آن همراه است که ویژگی‌های ویسکوزیته مایع منفذی و ساختار میکروسکوپی خاک از جمله آرایش ذرات، خروج مایع منفذی از فضاها، نحوه آرایش مجدد ذرات در اثر جذب مایع منفذی بر آن مؤثر می‌باشد. رفتار مقاومتی و تغییر شکل خاک‌های تحت دوره ذوب و انجماد، یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک به حساب می‌آید. از دیدگاه‌های متفاوت، تحقیقات فراوانی در زمینه رفتار خاک‌های تحت دوره ذوب و انجماد انجام گرفته است. Benson و Othman (۱۹۹۳)، اثر تراکم و شرایط خارجی گرا دیان دمایی، دمای نهایی، شدت یخ‌زدگی و تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی- ذوب‌شدگی را بر ضریب نفوذپذیری سه خاک رسی

در آب و هوای سرد، خاک در معرض چرخه‌های ذوب و انجماد قرار می‌گیرد که در مهندسی ژئوتکنیک این مسئله اهمیت زیادی دارد. چرخه ذوب انجماد یک فرایند هوازدگی است که اغلب در آب و هوای سرد رخ می‌دهد. در حالت فریزر، شرایط ترمودینامیکی در دمای زیر 0°C، خواص مهندسی خاک مانند نفوذپذیری، درصد آب، رفتار تنش کرنش، مقاومت کم، مدول الاستیک، انسجام و زاویه اصطکاک ممکن است تغییر کند. در طول انجماد، ساختار ذرات معدنی و آب، تغییر می‌یابد و در برخی موارد از طریق ایجاد لزه‌های یخی، ذرات خاک از هم جدا می‌شوند. در برخی موارد، این شرایط می‌تواند تأثیر مشخصی بر جرم توده خاک و ویژگی بیش تحکیمی پس از ذوب و انجماد متوالی داشته باشد. این تأثیرات می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی نامطلوب در مناطق شهری گردد.

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۹۱۴۳۵۱۴۹۷۳.

را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند. الیاف پلی‌پروپیلن نیز باعث بهبود دوام بتن در برابر دوره‌های متناوب یخ و ذوب می‌شوند، در حالی که مقاومت فشاری بتن را تغییر نمی‌دهند. تأثیر الیاف در بهبود دوام بتن، بسیار کمتر از تأثیر نانوذرات می‌باشد.

Simonsen و همکاران (۲۰۰۲)، به بررسی تأثیر چرخه ذوب و انجماد بر مدول ارتجاعی در ۵ نوع خاک مختلف ماسه سیلتی، ماسه درشت‌دانه، خاک یخ‌زده، ماسه خوب دانه‌بندی شده و رس دریایی پرداخت. کاهش مدول ارتجاعی در هر ۵ نوع خاک مشاهده شد که ناشی از افزایش حجم خاک و سست شدن ساختار خاک در طول چرخه ذوب و انجماد می‌باشد.

Anresland و ladany (۲۰۰۴)، پیشنهاد کردند که تکرار چرخه ذوب و انجماد باعث افزایش در نسبت تخلخل مؤثر و افزایش در فعالیت هیدرولیکی خاک را می‌شود.

Wang و همکاران (۲۰۰۷)، به بررسی تأثیر چرخه ذوب و انجماد بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رس متراکم پرداختند. مقاومت نمونه‌ها بعد از ۳ تا ۷ چرخه به حداقل مقدار خود رسید. آن‌ها پیشنهاد کردند که مقاومت طراحی نمونه‌های خاک در مناطق سرد، بایستی مقاومت خاک پس از ۷ چرخه ذوب و انجماد در نظر گرفته شود.

Kumar و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن محصور نشده با گنجاندن الیاف پلی‌استر به خاک رس با قابلیت تراکم بالا به دست می‌آید. آنها دریافتند که افزایش قدرت در حدود ۵۰-۶۸٪ با گنجاندن ۰/۵-۰/۲ از الیاف‌های ۳ میلی‌متری امکان‌پذیر است. این افزایش در مورد الیاف‌های ۶ میلی‌متر و الیاف ۱۲ میلی‌متر حدود ۷۰-۱۱۵٪ بود. مقاومت فشاری با افزایش درصد فیبرها بیشتر می‌شود. این نتایج به خوبی به نتایجی که توسط Tang و همکاران (۲۰۰۶)، انجام شده قابل مقایسه است.

Luo و همکاران (۲۰۱۰)، به مطالعه تأثیر ویژگی‌های دینامیکی خاک‌های اصلاح شده با سیمان و آهک پرداختند. در حالت کلی، تنش‌های دینامیکی در خاک‌های طبیعی از ۰/۱ تا ۰/۲۹ و ۰/۸۵ مگاپاسکال بسته به درصد آهک و سیمان در چرخه ذوب و انجماد افزایش می‌یابد.

Barbier و Abert (۲۰۱۰)، در مطالعات خود در زمینه تأثیر چرخه‌های ذوب و انجماد به این نتیجه رسیدند که چرخه‌های ذوب و انجماد منجر به خشک شدن نمونه‌ها می‌شود. عواقب ناشی از این چرخه‌ها در خصوصیات بلوک‌های خاک خشکی و سخت شدن نمونه‌ها می‌باشد. Salemi و Kyachehr (۱۳۹۰)، به بررسی و مقایسه تأثیر نانوذرات بر دوام رویه‌های بتنی در برابر دوره‌های متناوب ذوب و انجماد و همچنین به بررسی تأثیر کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن بر دوام نمونه‌های بتنی در محیط یخبندان پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات دوام بتن در برابر پدیده یخبندان

Golchinfar و Abbassi (۱۳۹۲)، در بررسی تأثیر ذوب و یخبندان‌های مکرر بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با پنج الیاف پلی‌پروپیلن دوره‌های ذوب و انجماد مختلف را بدون کاهش در مقادیر مقاومت و مدول الاستیک طی کرده و به عنوان مناسب ترین ترکیب برای تثبیت و تسلیح خاک تعیین شدند.

Ghazavi و همکاران (۱۳۹۳)، به بررسی تأثیر دوره یخبندان-ذوب یخ بر روی منحنی بارگذاری-باربرداری-بارگذاری مجدد آزمایش تحکیم بر روی خاک ریزدانه پرداختند. براساس نتایج این آزمایشات، ضریب C_c با افزایش تعداد دوره‌ها افزایش یافته و پس از دوره سوم تغییرات ثابت شده است. ضریب C_s نیز با افزایش تعداد دوره افزایش پیدا کرده و بعد از دوره سوم تغییرات آن کم شده و تقریباً ثابت شده است.

Padyab و Parvizi (۱۳۹۳)، به بررسی اثر ضایعات لاستیک بر روی مقاومت خاک رس تثبیت شده با آهک در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان، پرداختند. نتایج به دست آمده از مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش آهک به مقدار بهینه ۸ درصد مقاومت خاک رس به شدت افزایش پیدا می‌کند، ولی با افزودن درصد‌های مختلف لاستیک بر خلاف انتظار کاهش مقاومت بوده و همچنین با افزایش دوره‌های ذوب و یخبندان، کاهش مقاومت شدیدتری اتفاق می‌افتد.

محمدی و نوری اسلام (۱۳۹۴)، به بررسی تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف شیشه‌ای در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب پرداختند. جهت بالا بردن مقاومت فشاری بتن، چهار درصد مختلف نانوسیلیس و چهار درصد مختلف الیاف شیشه‌ای جایگزین سیمان را در دو حالت نمونه‌های شاهد و سیکل‌دار مورد بررسی قرار دادند. در بررسی اثر اختلاط نانوسیلیس با الیاف شیشه‌ای بالاترین مقاومت فشاری به ازای ۱ درصد نانوسیلیس و ۰/۶ درصد با الیاف شیشه‌ای حاصل شد.

نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین نشان می‌دهد که، در طول چرخه ذوب و انجماد، حجم آب موجود در خاک افزایش پیدا می‌کند که منجر به تشکیل ترک‌ها و تغییر شکل‌ها، تغییرات حجمی، نشست‌های متفاوت و تغییر در دانسیته خاک می‌شود. برای حل مشکلات مهندسی، لازم است که مکانیسم لنزهای یخی در شرایط ذوب و انجماد را بدانیم. به غیر از خاک، سایر مصالح همچون خاک سیمانی و یا بتن در معرض مشکلات ناشی از

آزمایشگاهی انجام شده توسط Taylor (۱۹۴۲) و Buisman (۱۹۳۶) به طور واضح، تأثیر زمان بر تراکم‌پذیری رس را بیان می‌نمود. Buisman رابطه نشست- لگاریتم زمان را تحت تنش ثابت برای خاک‌های رسی به صورت خطی بیان نمود. Taylor برای اولین بار مدل وابسته به زمان را به منظور شرح رفتار خزشی خاک‌های رسی که در آن تحکیم اولیه و تراکم ثانویه به عنوان دو فرایند مجزا در نظر گرفته می‌شود را ارائه نمود. Zhang و همکاران (۲۰۰۶)، با انجام آزمایش خزش یک بعدی در خاک‌های ماسه‌ای در تنش‌های پایین به این نتیجه رسیدند که نسبت خزشی خاک‌های ماسه‌ای به سطح تنش و دانه‌بندی ماسه بستگی دارد و در تنش‌های بالا تغییر شکل‌های خزشی ماسه با گذشت زمان، با شکستن دانه‌ها افزایش می‌یابد. تغییرات در ساختار ماسه با گذشت زمان پس از اعمال بار در آزمایش تحکیم یک بعدی، توسط Bowman و Soga (۲۰۰۳)، بررسی شد. مشاهده شد که با افزایش بارگذاری در جهت قائم، جهت‌گیری افقی ذرات افزایش می‌یافت (همانند مشاهدات Oda (۱۹۷۲)، Mitchell و همکاران (۱۹۷۶)) و با گذشت زمان، ذرات در جهت موازی با محور عمودی جابه‌جا می‌شوند. Mitchell و Soga (۲۰۰۵) تراکم ثانویه را ناشی از آرایش مجدد ذرات، تماس و لغزش ذرات و خروج مایع منفذی از منافذ ریز تحت تنش‌های ثابت بیان کردند. در تنش‌های خیلی پایین تغییر شکل‌های تماسی، بین ذرات خاک ایجاد می‌شود. تحت این شرایط خاک به صورت الاستیک رفتار می‌کند و تغییر شکل‌ها به صورت برگشت‌پذیر هستند. در تنش‌های پایین معمولاً تغییر شکل‌ها به صورت لغزش و سر خوردن ذرات روی هم اتفاق می‌افتد، در حالی که شکستن دانه‌ها در تنش‌های بالاتر رخ می‌دهد. تحت این دو شرایط خاک به صورت الاستوپلاستیک رفتار می‌کند و اغلب به صورت برگشت‌ناپذیر می‌باشد.

مطابق با نظریه Mesri (۲۰۰۹)، تغییر شکل‌ها را تحت تنش‌های متفاوت در سه ناحیه می‌توان نشان داد:
در ناحیه ۱) سائیدگی و لغزش بین دانه‌ها ایجاد می‌شود.
در ناحیه ۲) شکست دانه‌ها اتفاق می‌افتد.
در ناحیه ۳) دانه‌ها شکسته و خرد شده و از هم جدا می‌شوند.
ناحیه ۱ و ۲ برای ذرات ماسه تحت تنش‌های پایین و ناحیه ۳ در تنش‌های بالا اتفاق می‌افتد.

Lambe (۱۹۵۸)، خروج و استهلاک مایع منفذی از منافذ ریز را از جمله دلایل تراکم ثانویه معرفی نمود. Poskitt و Berry (۱۹۷۲)، به این نتیجه رسیدند که انتقال آب از منافذ کوچک به بزرگ دلیل تراکم ثانویه می‌باشد و در تنش‌های مؤثر ثابت، طی مرحله خزشی، متوسط برخورد ذرات بایستی ثابت باشد. مکانیسم‌ها و فاکتورهای تأثیرگذار بر تراکم ثانویه، توسط محققان زیادی از جمله، Wang و همکاران (۲۰۰۷) و Varatharajan

تشکیل لزه‌های یخی قرار دارند. همچنین، اکثر مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر دوره‌های ذوب و انجماد در زمینه بررسی نفوذپذیری و خواص فیزیکی، مکانیکی و مقاومت فشاری خاک انجام شده و نشست‌های تحکیمی و تغییر شکل‌های خزشی خاک‌های سیلتی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

با توجه به این که در مناطق سردسیر احتمال ذوب و یخ مکرر تهدیدی برای ویژگی‌های مقاومتی، تغییر شکل و تراکم و ... خاک‌ها می‌باشد و خاک‌های سیلتی مورد مطالعه جز خاک‌های فروریزی بوده و در برابر یخبندان بسیار حساس می‌باشند، در این تحقیق، یک سری مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی پارامترهای تحکیمی و رفتار کرنش-زمان خاک سیلتی در شرایط ذوب و انجماد متوالی انجام شده 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.

۲- تغییر شکل‌های بلندمدت خاک در شرایط تحکیم یک‌بعدی

تغییر شکل و مقاومت خاک‌های اشباع تحت تنش، یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک به حساب می‌آید. از دیدگاه‌های متفاوت، تحقیقات فراوانی در زمینه تغییر شکل‌های خزشی انجام گرفته است. تراکم ثانویه به کرنش‌های حجمی که بعد از تحکیم اولیه رخ می‌دهد، اشاره دارد و اصطلاح خزش به منظور نشان دادن کرنش‌های حجمی و یا برشی وابسته به زمان در سرعت کنترل شده توسط مقاومت ویسکوزیته ساختار خاک به کار گرفته می‌شود. سرعت تراکم ثانویه از طریق مقاومت ویسکوز ساختار خاک کنترل می‌شود در حالی که سرعت تحکیم اولیه توسط سرعت خروج آب از درون منافذ خاک کنترل می‌شود. زمانی که خاک در معرض افزایش تنش قرار می‌گیرد، در طول فرایند خزش تغییر در ساختار خاک (در یک نرخ کاهشی که باعث افزایش میزان سختی می‌شود) ادامه پیدا می‌کند. تغییرات در ساختار خاک با گذشت زمان می‌تواند بر پایداری خاک تأثیر بگذارد.

Terzaghi در سال ۱۹۲۵، تئوری تحکیم یک‌بعدی را به منظور بیان تغییرات حجمی در طول تحکیم اولیه با چندین فرضیه بیان نمود که امروزه کاربرد گسترده‌ای دارد. همچنین، اولین تحقیقات در زمینه ضریب تراکم ثانویه حدود یک دهه بعد از تئوری Terzaghi به عمل آمد که بیانگر تراکم خاک‌های رسی در اثر زایل شدن فشار آب حفره‌ای بود. ضریب تراکم ثانویه (C_α) پارامتر مهمی جهت شرح رفتار خزشی و تراکم ثانویه می‌باشد.

یک سری تحقیقاتی در زمینه ضریب تراکم ثانویه حدود یک دهه بعد از تئوری Terzaghi به عمل آمد که بیانگر تراکم خاک‌های رسی در اثر زایل شدن فشار آب منفذی بود. مطالعات

تغییر شکل‌ها، تخمین بزرگی و مقدار نشست‌های کلی سازه و یا زمین خاکی که تحت سیکل ذوب و انجماد قرار می‌گیرد، قابل استفاده می‌باشد.

۳-۱- مواد پژوهش

خاک استفاده شده در آزمایش از دانه‌های بسیار ریز کوارتز و ذرات پولکی شکل حاصل از متلاشی شدن کانی‌های میکادار تشکیل شده است. لای‌ها ذرات ریز معدنی خاک، حد فاصل رس و ماسه، با قطر بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۲ میلی‌متر هستند. نمونه‌های سیلتی در درصد رطوبت اپتیمم ۲۰٪ و با وزن مخصوص $1/5 \text{ gr/cm}^3$ متراکم شده و داخل قالب دستگاه تحکیم قرار می‌گیرند. مشخصات خاک سیلتی استفاده شده در آزمایش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک سیلتی

مشخصه	واحد	مقادیر
درصد رطوبت	%	۲۰
وزن مخصوص ذرات جامد (γ_s)	kN/m^3	۱۴/۴۰
وزن مخصوص (γ)	kN/m^3	۱۶/۴
حد روانی (W_L)	%	۳۰/۲۲
حد خمیری (W_P)	%	۲۷/۵۵
نشانه خمیری	-	۲/۶۷
نسبت تخلخل (e)	-	۰/۷۸۱
چگالی نسبی (G_s)	g/cm^3	۲/۶۶
زاویه اصطکاک (ϕ)	°	۳۲/۲
چسبندگی (c)	kN/m^2	۰/۳۴

۳-۲- تعیین مسئله‌دار بودن خاک

اصولاً از نظر مهندسی تمامی خاک‌هایی که احداث سازه بر روی آنها مطمئن نبوده و نیز تحت تأثیر شرایط آب و هوایی قرار دارند، خاک‌های مسئله‌دار نامیده می‌شوند. خاک‌های مسئله‌دار در گونه‌های مختلفی از جمله متورم شونده، جاذب آب، فروریزی، سست و غیره یافت می‌شوند.

خاک‌های سیلتی در برابر آسیب یخبندان بسیار حساس هستند. اگر سطح آب زیرزمینی به اندازه کافی نزدیک باشد، رطوبت به علت مویبندی بالا، بالا کشیده می‌شود، که منجر به تشکیل عدسی‌های یخ در خاک‌های در معرض دمای انجماد می‌شود. طبق گفته ثورتن (۱۹۷۲) که معیار برای تعیین سیلت‌های فروریزی را مشخص می‌کند: وزن مخصوص در جای سیلت دست نخورده کمتر از ۸۰ پوند بر فوت مکعب است. و حداکثر وزن مخصوص خشک مربوط به تراکم استاندارد کمتر از ۱۰۴ پوند بر فوت مکعب (۱۶۶۶ کیلوگرم بر متر مکعب) است. همچنین خاک‌های فروریزی به طور طبیعی از ذرات سیلت و

(۲۰۱۱)، مورد مطالعه قرار گرفته و اغلب آن‌ها بر این باورند که تغییر شکل‌ها بر اثر لغزش و آرایش مجدد ذرات در تنش‌های ثابت اتفاق می‌افتد و مکانیسم‌های خزشی ناشی از تغییر شکل، برخورد، لغزش ذرات بر روی هم و تراکم منافذ کوچک می‌باشد.

Zhecao wang (۲۰۱۰)، آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی بر روی ماسه اوتاوا و نمونه‌های کائولونیتی در تنش‌های بالا نشان دادند که نرخ خزش با شکستن ذرات همراه است و میزان آن‌ها با زمان بیشتر می‌شود. همچنین در نمونه‌های کائولونیتی با افزایش در تنش میزان تغییر شکل‌های خزشی کم‌تر می‌شد.

Varatharajan (۲۰۱۱)، یک سری مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار خزشی رس کائولونیتی تحت آزمایش تحکیم یک‌بعدی را انجام دادند. نتایج نشان می‌داد که تغییر در سطوح تنش و نرخ خزش با هم رابطه معکوسی دارند. Ye و همکاران (۲۰۱۴)، یک سری مطالعات آزمایشگاهی در خصوص تراکم ثانویه بنتونیت متراکم با انجام یک سری آزمایش‌های ادنومتر تحت کنترل مکش در تنش‌های بالا انجام دادند. ارتباط بین ضریب تراکم ثانویه و سطوح تنش در مکش‌های مختلف و همچنین ارتباط بین نسبت تخلخل با زمان نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تراکم ثانویه با افزایش تنش بیشتر می‌شود. همچنین یک ارتباط غیرخطی بین این دو پارامتر در مکش‌های متفاوت مشاهده گردید.

نگهدار و یادگاری (۲۰۱۷)، یک سری مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار خزشی خاک همچون تأثیر سطوح تنش، تاریخچه تنش و آب منفذی بر روی نمونه‌های ماسه رس‌دار در دو حالت خشک و اشباع انجام دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌داد که در نمونه‌های اشباع به دلیل توانایی لغزش بالا و اصطکاک پایین، ذرات به آسانی بر روی هم می‌لغزند، بنابراین با افزایش تنش خزشی و برخورد ذرات، نمونه متراکم‌تر و میانگین نیروهای داخلی کوچک‌تر می‌شود. بنابراین ساختار خاک پایدارتر و تغییر شکل‌های خزشی کمتری در سطوح تنش‌های بالاتر اتفاق می‌افتد. در حالی که در نمونه خشک با افزایش تنش تغییر شکل‌های خزشی بیشتر می‌شود و با گذشت زمان لغزش و تماس ذرات با هم افزایش می‌یابد.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

با توجه به این که در مناطق سردسیر احتمال ذوب و یخ مکرر تهدیدی برای ویژگی‌های مقاومتی، تغییر شکل و تراکم و ... خاک‌ها می‌باشد و خاک‌های سیلتی جز خاک‌های فروریزی بوده و در برابر یخبندان بسیار حساس می‌باشند، بدین منظور در این تحقیق به بررسی تغییر شکل‌های و نشست‌های نمونه خاک سیلتی می‌پردازیم. نتایج به دست آمده از این مطالعه در پیش‌بینی بهتر

آزمایش خزشی تک مرحله‌ای در تنش‌های ۳۰۰-۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال بر روی نمونه‌های سیلتی متراکم در رطوبت اپتیمم انجام شده و نمونه‌ها در این آزمایش به مدت ۷ روز بارگذاری می‌شوند. در نمونه‌های اشباع بارگذاری به صورت پله‌ای، به فاصله زمانی ۶۰ دقیقه، به منظور استهلاک فشار آب حفره‌ای اعمال شده است. شکل (۱) نمایی از دستگاه تحکیم یک بعدی و دیتالاگر متصل به آن را نشان می‌دهد. در هر آزمایش، تخلخل اولیه و نهایی نمونه‌ها با تعیین درصد رطوبت از طریق خشک کردن نمونه در گرمخانه با دمای ۱۰۵ سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت به دست آمده است.



شکل ۱- دستگاه تحکیم یک بعدی و دیتالاگر

۳-۲- ارائه و تفسیر نتایج

آزمایش‌ها جهت ارزیابی ارتباط بین رفتار دراز مدت و چرخه‌های ذوب و انجماد و پیش‌بینی دقیق از تغییرات در ویژگی ژئوتکنیکی خاک سیلتی متراکم انجام شده است. چرخه‌های ذوب و انجماد تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر منحنی کرنش-زمان دارند، به طوری که در نمونه‌های سیلتی متراکم، شاهد افزایش تغییر شکل‌های قائم با افزایش چرخه‌های ذوب و انجماد هستیم. تغییرات درجه حرارت با زمان در نمونه‌های تحت دوره ذوب و انجماد در شکل (۲) نشان داده شده است. نمونه‌های سیلتی ابتدا در دمای ۲۴- درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت داخل دستگاه ذوب و انجماد قرار گرفته و بلافاصله پس از فرایند انجماد، دمای دستگاه افزایش پیدا کرده و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۲+ درجه قرار می‌گیرند. هر نمونه در دوره‌های ذوب و انجماد ۰-۲، ۲، ۵ و ۱۰ به ترتیب قرار داده می‌شوند. شکل (۲) نمایی از دستگاه ذوب و انجماد را نشان می‌دهد. تغییرات دمایی برای هر نمونه تحت سیکل ذوب و انجماد در شکل (۳) نشان داده شده است.

ماسه ریز به علاوه مقدار کمی رس تشکیل می‌شوند. می‌توان گفت که خاک آزمایش شده در تحقیق از نوع فروریزشی می‌باشد. فروریزش به کاهش حجم ناگهانی خاک در اثر از دست دادن مقاومت عامل پیوند دهنده ذرات خاک اطلاق می‌شود و میزان فروریزش ایجاد شده به نسبت تخلخل اولیه خاک وابسته است.

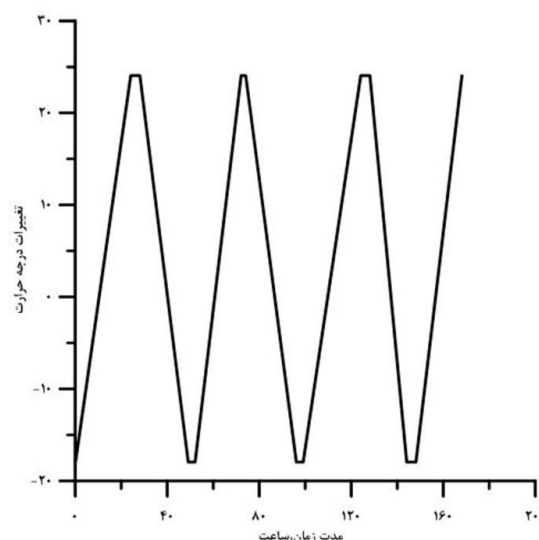
۳-۳- روش پژوهش

مجموعه‌ای از آزمایش‌ها به منظور بررسی تأثیر چرخه‌های ذوب و انجماد بر تغییر شکل‌های بلندمدت انجام شده است. برای هر یک آزمایش، ۳ نمونه آماده و در معرض ۰، ۲ و ۵ چرخه‌های انجماد ذوب قرار می‌گیرند. آزمایش‌ها به وسیله دستگاه استاندارد تحکیم یک بعدی و در تنش ثابت، مطابق با استاندارد ASTM D2435/D2435M-11 بر روی نمونه‌های سیلتی متراکم شده انجام شده است. ابتدا نمونه‌های سیلتی خشک شده در هوا با وزن ۱۰۹ گرم، با رطوبت ۲۰٪ به طور یکنواخت مخلوط شده و سپس داخل قالب دستگاه براساس استاندارد ASTM متراکم شده است. تمام نمونه‌های آماده شده، با قطر ۶۰ میلی متر و ارتفاع ۲۲ میلی-متر هستند. رطوبت ۲۰٪ برای آماده سازی نمونه انتخاب می‌شود، زیرا تراکم نمونه در رطوبت پایین‌تر بسیار دشوار است. در رطوبت بیشتر از ۲۰ درصد، ذرات خاک ترکیب آب را بیشتر جذب می‌کنند و به یکدیگر می‌چسبند. بنابراین، ترکیب یکنواختی به دست نخواهد آمد. لازم به ذکر است که قبل از شروع تراکم نمونه، در داخل قالب با یک روان کننده اصطکاک بین قالب و نمونه به حداقل رسانده می‌شود. بعد از برداشتن هر نمونه از قالب، نمونه بلافاصله با یک لایه پلاستیکی برای محافظت از تبخیر آب پوشیده می‌شود. برای یخ زدن و مراحل ذوب، نمونه‌ها در یخچال در دمای ۱۸- °C به مدت ۲۴ ساعت و سپس در ۲۴ °C برای مرحله ذوب به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می‌شوند. این‌ها درجه حرارت‌هایی هستند که در برخی از پژوهش‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفتند، براساس استاندارد ASTM D560 و مطالعه‌ای که توسط Binbin و Yaling (۲۰۱۴)، انجام شد. در طول آزمایش تحکیم نمونه‌ها در حالت اشباع قرار گرفته اند. در خاک‌های اشباع دقت رفتار خزشی وابسته به نحوه بارگذاری می‌باشد. بنابراین با کنترل بار، خاک‌های اشباع فرآیندی از تحکیم را بعد از اعمال تنش‌های کل تجربه می‌کنند و بعد از زایل شدن فشار آب منفذی، رفتار خزشی درستی از خود نشان می‌دهند. بنابراین در این مطالعه زمان لازم جهت زایل شدن فشار آب منفذی برای خاک‌های اشباع با کنترل بار وارده t_{100} در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، از منحنی کاساگرانده به منظور تعیین زمان مورد نیاز به منظور کامل شدن تحکیم اولیه (t_{100})، ضریب تراکم ثانویه (C_α) و تخلخل در پایان تحکیم اولیه (eEOP) استفاده شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های نمونه با افزایش تنش، افزایش پیدا کرده و تا رسیدن به سطح مشخصی از تنش، نرخ افزایش تغییر شکل‌ها کاهش پیدا می‌کند. از طرفی در طول چرخه ذوب و انجماد، با افزایش درجه تخلخل نمونه‌ها، مقادیر تغییر شکل‌ها در طول بارگذاری بیشتر می‌شود. همچنین در سطوح تنش‌های اعمالی، نمونه سیلتی رفتار کرنش نرم‌شوندگی از خود نشان می‌دهد. ارتباط نسبت تخلخل با زمان در آزمایش‌های خزشی فشاری تک مرحله‌ای بر روی نمونه‌های سیلتی در چرخه های ۰، ۲، ۵ و ۱۰ به ترتیب در شکل‌های (۵)، (۶)، (۷) و (۸) آورده شده است. آزمایش خزشی فشاری تک مرحله‌ای بر روی نمونه‌های سیلتی اشباع شده با آب در تنش‌های ۳۰۰-۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است. در اثر تکرار ذوب و انجماد چرخه فروپاشیدگی در ساختار خاک ایجاد می‌شود و این عامل باعث افزایش درجه تخلخل و به دنبال آن افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود. بدین ترتیب فشار آب حفره‌ای سریع‌تر مستهلک شده و زمان شروع تغییر شکل‌های خزشی کاهش پیدا می‌کند. مقایسه‌ای از برخی از نتایج مطالعات انجام شده تاکنون (Varatharajan، ۲۰۱۱، Wang، ۲۰۱۰، Ye و همکاران ۲۰۱۴ و نگهدار ۲۰۱۷، که در بخش دو اشاره گردید) در ارتباط با تغییر شکل‌های خزشی خاک‌ها و تغییرات ضریب تراکم ثانویه با تنش در شکل (۹) نشان داده شده است.

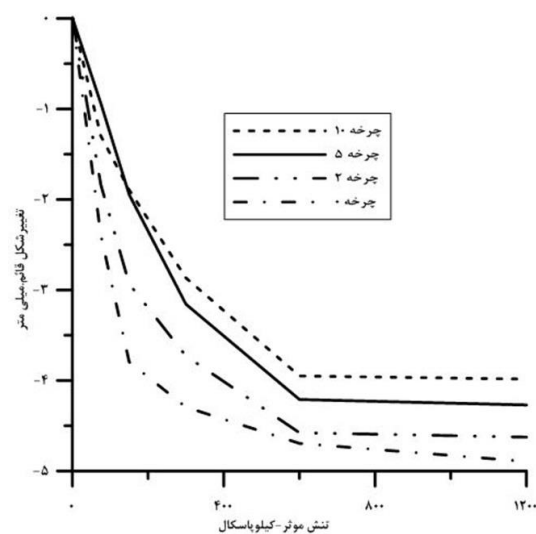


شکل ۲- دستگاه ذوب و انجماد

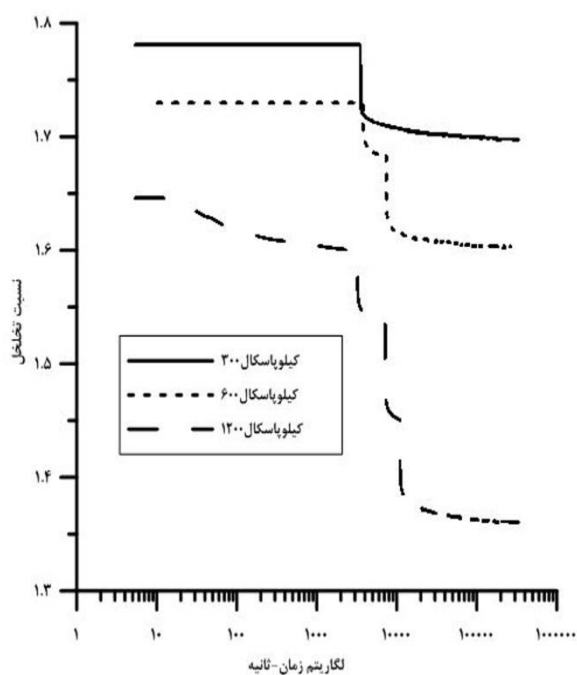


شکل ۳- ارتباط درجه حرارت با زمان در دوره ذوب و انجماد

ارتباط تخلخل در پایان تحکیم اولیه با سطوح تنش اعمالی در طول چرخه ذوب و انجماد در شکل (۴) نشان داده شده است.

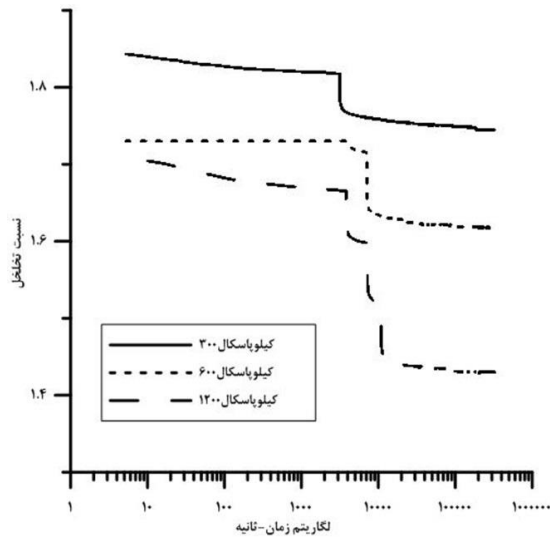


شکل ۴- ارتباط ارتباط تخلخل در پایان تحکیم اولیه با سطوح تنش اعمالی در طول چرخه ذوب و انجماد

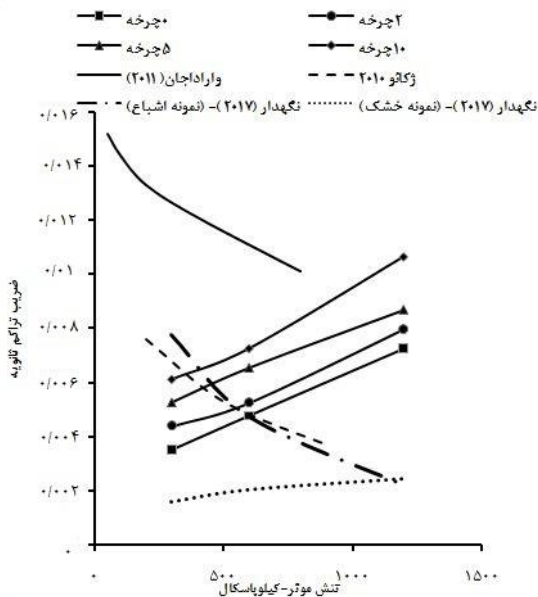


شکل ۵- ارتباط نسبت تخلخل با زمان در آزمایش‌های خزشی فشاری تک مرحله‌ای بر روی نمونه‌های سیلتی در چرخه ۰ در تنش‌های ۳۰۰-۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال

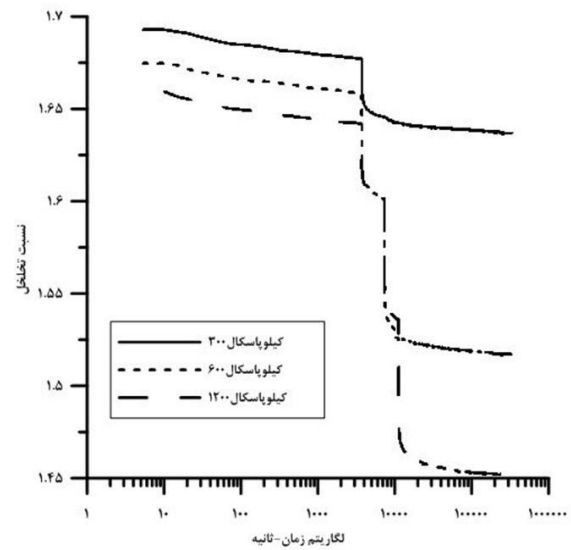
طرفی، میزان تغییر شکل‌های خزشی نمونه سیلتی علاوه بر شرایط اشباع بودن نمونه و سطوح تنش خزشی به شمار چرخه‌های ذوب و انجماد نیز بستگی دارد. دوره‌های ذوب و انجماد، لغزش، جهت-گیری ذرات، تخلخل و ساختار اولیه خاک را تغییر می‌دهد. به طوری که با افزایش شمار چرخه، به دنبال افزایش میزان تخلخل و فروپاشیدگی ساختار خاک در اثر ذوب و انجمادهای متوالی، میزان ضریب تراکم ثانویه افزایش می‌یابد.



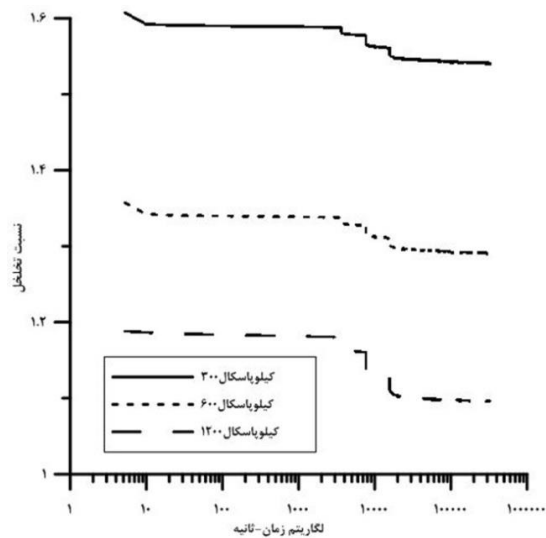
شکل ۸- ارتباط نسبت تخلخل با زمان در آزمایش‌های خزشی فشاری تک مرحله‌ای بر روی نمونه‌های سیلتی در چرخه ۱۰ در تنش‌های ۳۰۰-۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۹- ارتباط ضریب تراکم ثانویه و سطوح تنش در طول چرخه ذوب و انجماد



شکل ۶- ارتباط نسبت تخلخل با زمان در آزمایش‌های خزشی فشاری تک مرحله‌ای بر روی نمونه‌های سیلتی در چرخه ۲ در تنش‌های ۳۰۰-۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۷- ارتباط نسبت تخلخل با زمان در آزمایش‌های خزشی فشاری تک مرحله‌ای بر روی نمونه‌های سیلتی در چرخه ۵ در تنش‌های ۳۰۰-۶۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوپاسکال

می‌توان مشاهده کرد که یک ارتباط غیرخطی بین ضریب تراکم ثانویه و تنش خزشی وجود دارد. مقادیر C_{α} با افزایش تنش خزشی در نمونه‌های اشباع افزایش می‌یابد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که در نمونه‌های اشباع به دلیل توانایی لغزش بالا و اصطکاک پایین، ذرات به آسانی بر روی هم می‌لغزند، بنابراین با افزایش تنش خزشی و برخورد ذرات، نمونه متراکم‌تر و میانگین نیروهای داخلی کوچک‌تر می‌شود. بنابراین ساختار خاک پایدارتر و تغییر شکل‌های خزشی کمتری با افزایش تنش اتفاق می‌افتد. از

جمله ضریب تحکیم، مدول الاستیسیته و ضریب تراکم ثانویه بر روی نمونه سیلتی اشباع در طول چرخه‌های ذوب و انجماد در جدول (۳) آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد مدول الاستیسیته در طول چرخه ذوب و انجماد افزایش پیدا می‌کند. شکل (۱۱) تصاویر SEM گرفته شده از نمونه‌های سیلتی که در معرض چرخه‌های ذوب و انجماد قرار گرفته اند را نشان می‌دهد.

جدول ۲- ضریب فشردگی نمونه سیلتی تحت دوره‌های ذوب

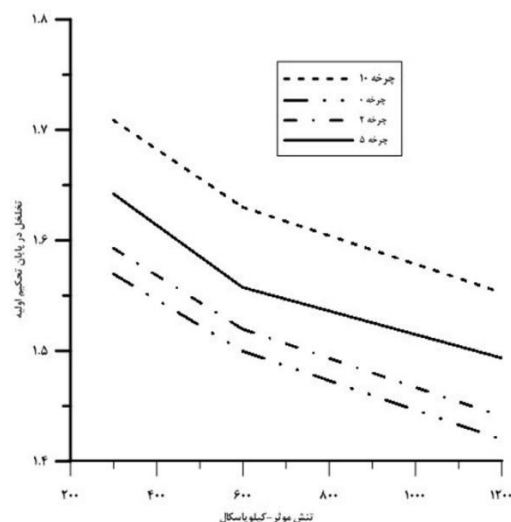
و انجماد	
تعداد چرخه ذوب و انجماد	(Cc) شاخص تراکم
۰	۰/۳۲۰۴۸
۲	۰/۳۴۰۲۲
۵	۰/۳۲۴۴۱۷
۱۰	۰/۳۹۳۹۷

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های خزشی انجام شده بر نمونه سیلتی

تحت دوره‌های ذوب و انجماد				
سطوح تنش	چرخه ذوب و انجماد	ضریب تراکم ثانویه	ضریب تحکیم اولیه (mm ² /sec)	مدول الاستیسیته (kPa)
۱۵۰	۰	-	۱/۲۳۳۵	۱۹۱۷/۲۶
	۲	-	۱/۱۴۶۵	۳۸۳۴/۵۲
	۵	-	۱/۳۴۳۹۶	۷۶۶۹/۰۵
	۱۰	-	۱/۴۸۲۸۴	۱۵۳۳۸
۳۰۰	۰	۰/۰۰۵۲۵۵	۱/۳۲۹۵۸	۲۵۲۷/۶۸
	۲	۰/۰۰۳۷۲۴	۱/۲۶۷۸۱	۵۰۵۵/۳۶
	۵	۰/۰۰۴۳۹۰	۱/۳۷۰۷۸	۱۰۱۱۰/۷۳
	۱۰	۰/۰۰۶۱۳۲۰	۱/۵۴۵۲۱	۲۰۲۲۱/۴۶
۶۰۰	۰	۰/۰۰۶۵۳۹	۱/۴۲۸۰۰	۱۹۳۵/۴۷
	۲	۰/۰۰۴۷۹۰	۱/۴۰۸۸۰	۳۸۷۰/۹۴
	۵	۰/۰۰۵۲۶۳	۱/۴۴۹۳۰	۷۷۴۱/۸۸
	۱۰	۰/۰۰۷۲۷۳	۱/۵۸۳۰۹	۱۵۴۸۳/۷۷
۱۲۰۰	۰	۰/۰۰۸۶۶۸	۱/۴۸۹۶۰	۱۶۲۰/۰۴
	۲	۰/۰۰۷۲۷۶	۱/۳۹۳۱۰	۳۲۴۰/۰۹
	۵	۰/۰۰۷۹۸۲	۱/۴۶۴۴۰	۶۴۸۰/۱
	۱۰	۰/۰۱۰۶۶۲	۱/۶۰۴۳۶۰	۱۲۹۶۰/۳

مشاهده می‌شود با افزایش چرخه‌های ذوب و انجماد تا ۲ چرخه، تغییر چندانی در ساختار خاک اتفاق نمی‌افتد و تخلخل افزایش چندانی پیدا نمی‌کند. پس از این که نمونه در معرض ذوب و یخ مکرر قرار گرفت، ترک‌هایی به دلیل وجود لندهای یخی در منافذ خاک ایجاد می‌شود و تخلخل خاک افزایش یافته و در ساختار خاک از هم پاشیدگی اتفاق می‌افتد. در طول مرحله انجماد، کریستال‌های یخ تشکیل می‌شوند و پس از آن در مرحله ذوب این بلورها شروع به ذوب شدن کرده و آب آزاد در نمونه ظاهر می‌شود.

بر اساس مقایسه نتایج در شکل (۹) می‌توان به این مسئله اشاره نمود که در سطوح تنش‌های متوسط، در نمونه‌های اشباع تغییر شکل‌های خزشی با افزایش تنش کمتر می‌شود که دلیل آن را می‌توان به متراکم شدن ذرات با افزایش تنش اشاره کرد. ولی در نمونه‌های خشک در سطوح تنش‌های اعمالی، نرخ تغییر شکل‌ها بیشتر می‌شود. از طرفی در طول چرخه‌های ذوب و انجماد چون در ساختار خاک فروپاشیدگی ذرات اتفاق می‌افتد و تخلخل نمونه‌ها بیشتر می‌شود، شاهد افزایش نرخ تغییر شکل‌ها هستیم. ارتباط نسبت تخلخل در پایان تحکیم اولیه و لگاریتم تنش خزشی در آزمایش‌های خزشی تک‌مرحله‌ای بر روی نمونه‌های سیلتی در طول چرخه ذوب و انجماد در شکل (۱) آورده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش بیشتر چرخه‌های ذوب و انجماد، تخلخل خاک افزایش یافته و در ساختار خاک از هم پاشیدگی اتفاق می‌افتد. تصاویر به دست آمده از SEM هم نشان دهنده همین مسئله می‌باشد. در حالت کلی، از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر تخلخل در پایان تحکیم اولیه، تماس ذرات، ویژگی‌های سطحی و تأثیر لایه آب مضاعف بر سطح خاک می‌باشد. علاوه بر این نسبت منافذ کوچک به منافذ بزرگ به ویژگی‌های مایع منفذی نیز بستگی دارد. تحت تأثیر مایع منفذی ویژگی‌های سطحی ذرات تغییر پیدا می‌کند به طوری که تخلخل در پایان تحکیم اولیه کاهش پیدا می‌کند. اما در نمونه‌های قرار گرفته تحت دوره‌های ذوب و انجماد، به دلیل ایجاد فروپاشیدگی در ساختار خاک نسبت منافذ افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۰- ارتباط نسبت تخلخل در پایان تحکیم اولیه و تنش خزشی در آزمایش‌های خزشی تک‌مرحله‌ای بر روی نمونه‌های سیلتی در طول چرخه ذوب و انجماد

ضریب فشردگی به دست آمده از شکل در جدول (۲) آورده شده است. همچنین نتایج به دست آمده از آزمایش خزشی از

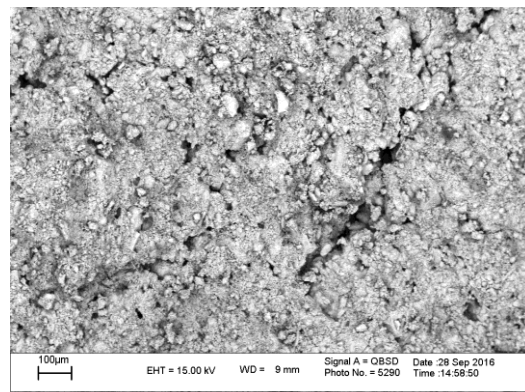
آب آزاد به بخش‌های کمتری از نمونه با توجه به نیروی گرانش حرکت می‌کند. در نتیجه، قسمت‌های بالایی نمونه رطوبت خود را از دست داده و این پدیده منجر به افزایش در ارتفاع نمونه‌ها می‌شود. {R2-3} مکانیسم تغییر در مقادیر تغییر شکل‌ها را به این صورت می‌توان بیان کرد که قبل از فرایند انجماد ذرات خاک به صورت کاملاً فشرده در کنار هم قرار گرفته و مقاومت بالایی دارند. در طول فرایند انجماد و توسعه لنزهای یخی، ذرات خاک در اثر تشکیل یخ، از هم جدا شده و به دنبال آن با ذوب شدن یخ‌ها، ناحیه ضعیف برشی در طول لنزهای یخی ایجاد می‌شود. بنابراین با افزایش نسبت تخلخل نمونه‌ها، مقاومت خاک هم کاهش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های Zhen Dong Cui و همکاران، (۲۰۱۴)، هم تطابق دارد، که نشان دادند در طول فرایند ذوب و انجماد، ناپیوستگی و جداسدن ذرات خاک اتفاق می‌افتد و ساختار خاک بهم می‌ریزد.

۵- نتیجه‌گیری

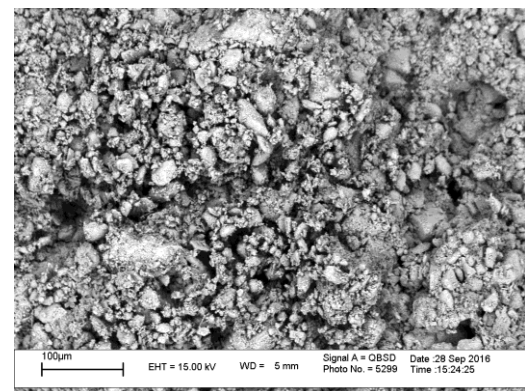
تخمین نشست‌ها در طراحی سازه‌های مهندسی و ارزیابی عملکرد آن‌ها اهمیت بسیاری دارد. در مناطق سردسیر خاک‌های بستر سازه‌ها در مقابل چرخه ذوب و انجماد حساس می‌باشند، بنابراین شناخت رفتار کرنش-زمان آن‌ها ضروری می‌باشد. در این پژوهشی، آزمایش تحکیم در حالت تک‌مرحله‌ای بر روی نمونه‌های خاک سیلتی که تحت دوره‌های ذوب و انجماد قرار گرفته، انجام شده است. تأثیر شمار چرخه‌های ذوب و انجماد، سطوح تنش، و آب حفره‌ای بر پارامترهای تحکیمی و نشست‌های خزشی مورد مطالعه قرار گرفته، ساختار خاک با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM)، مورد مطالعه قرار گرفته و مکانیسم خزشی با در نظر گرفتن لغزش، برخورد و تغییر شکل ذرات، شرح داده شده است.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند:

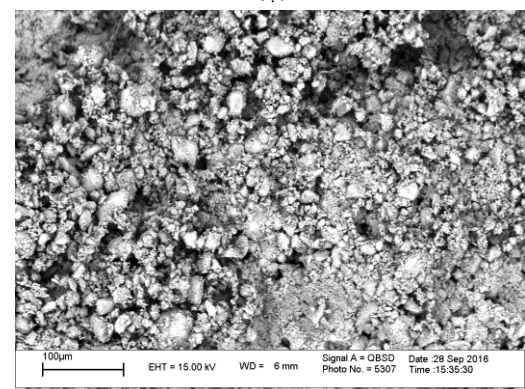
- ۱- مکانیسم تغییر در میزان تغییر شکل‌ها را به این صورت می‌توان بیان کرد که قبل از فرایند انجماد ذرات خاک به صورت کاملاً فشرده در کنار هم قرار گرفته و مقاومت بالایی دارند. در طول فرایند انجماد و توسعه لنزهای یخی، ذرات خاک در اثر تشکیل یخ، از هم جدا شده و به دنبال آن با ذوب شدن یخ‌ها، ناحیه ضعیف برشی در طول لنزهای یخی ایجاد می‌شود. بنابراین با افزایش نسبت تخلخل نمونه‌ها، مقاومت خاک هم کاهش می‌یابد.
- ۲- با افزایش تنش، تغییر شکل‌های نمونه افزایش پیدا کرده و پس رسیدن به سطح مشخصی از تنش، نرخ افزایش تغییر شکل‌ها کاهش پیدا می‌کند. از طرفی در طول چرخه ذوب و انجماد، با افزایش نسبت تخلخل نمونه‌ها، مقادیر تغییر شکل‌ها و نشست‌های تحکیمی و خزشی در طول بارگذاری بیشتر می‌شود.



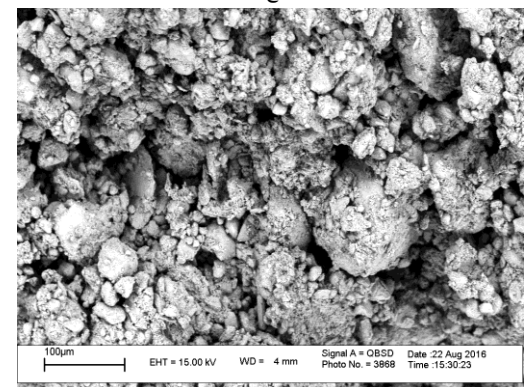
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۱- تصاویر SEM گرفته شده از نمونه‌های سیلتی در معرض: (الف) ۰ چرخه، (ب) ۲ چرخه، (ج) ۵ چرخه، (د) ۱۰ چرخه ذوب و انجماد

- Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119, 276-294.
- Berry PL, Poskitt TJ, "The consolidation of peat", *Geotechnique*, 1972, 22(1), 27-52.
- Bowman ET, Soga K, "Creep, ageing and microstructural change in dense granular materials", *Soils and Foundations*, 2003, 43(4), 107-117.
- Chamberlain EJ, Iskander I, Hunsiker SE, "Effect of freeze-thaw on the permeability and macrostructure of soils. Proceedings of the International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agriculture, Range, and Forest Lands", Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, U.S.A. Special Report 90-1, 1990, 145-155.
- Clemence SP, Finbarr AO, "Design Consideration for Collapsible Soils", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1981, 107 (3).
- Ghazavi M, Roustayi V, Safai A, "The effect of melting and ice cycle on the loading- unloading curve in consolidation test", *The first National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1393.
- Graham J, Au VCS, "Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses", *Canadian Geotechnical Journal*, 1980, 22 (1), 69-78.
- Golchinfar N, Abbassi N, "The effect of freeze and thaw cycles on the mechanical properties of clays stabilized with lime and polypropylene fiber." *Journal of Civil Engineering and Environment University of Technology*, 1392, 45 (2), 1-12.
- Jang S, Wan-Shin Park, Hyun-Do Yun, "Influence of Rapid Freeze-Thaw Cycling on the Mechanical Properties of Sustainable Strain-Hardening Cement Composite (2SHCC)", *Materials*, 2014, 7, 1422-1440, doi: 10.3390/ma7021422.
- Wang Z, "Soil creep behaviour-laboratory testing and numerical modeling", PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 2010.
- Konrad JM, Morgenstern NR, "A Mechanistic Theory of Ice Lens Formation in Fine-Grained Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 1980, 17 (1), 473-486.
- Kyachehr B, Salemi N, "laboratory investigation of the effects of nanoparticles on the durability of concrete surfaces under the freeze and thaw cycle", Master's thesis, Ministry of Science, Research and Technology, Isfahan University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 1390.
- Lambe TW, "The structure of compacted clay", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 1958, 82(2), 1-34.
- Luo Lifang, Henry Lin, Shuangcai Li, "Quantification of 3-D Soil Macropore Networks in Different Soil Types and Land Uses Using Computed Tomography", *Journal of Hydrology* 2010, 393(1), 53-64.
- Mesri G, "Coefficient of secondary compression", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1973, 99(1), 123-137.
- Mitchell JK, Soga K, "Fundamentals of soil behavior", 3rd ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.
- ۳- زمانی که خاک منجمد می‌شود جبهه یخ زده در خاک پیشروی می‌کند. یخ‌زدگی آب باعث افزایش در فشار یخ و کاهش در فشار آب حفره‌ای می‌شود. به دلیل کاهش فشار آب حفره‌ای در جبهه یخ‌زده آب از لایه‌های زیرین به طرف مرزهای یخ زده و درون خاک‌های یخ‌زده حرکت می‌کند و حرکت آب باعث می‌شود ترک‌های انقباضی قائم در خاک زیر جبهه یخ زده شکل بگیرند. با پیشروی جبهه یخ‌زده این ترک‌ها با یخ پر شده وقتی یخ‌ها ذوب می‌شوند ترک‌ها، مجرای برای جریان آب شده و نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. بدین ترتیب فشار آب حفره‌ای سریع‌تر مستهلک شده و زمان شروع تغییرشکل‌های خزشی کاهش پیدا می‌کند.
- ۴- یک ارتباط غیرخطی بین ضریب تراکم ثانویه و تنش خزشی وجود دارد. مقادیر C_{α} با افزایش تنش خزشی در نمونه‌های اشباع کاهش می‌یابد. در نمونه‌های اشباع به دلیل توانایی لغزش بالا و اصطکاک پایین، ذرات به آسانی بر روی هم می‌لغزند، بنابراین با افزایش تنش خزشی و برخورد ذرات، تغییر شکل‌های خزشی کمتری در سطوح تنش‌های بالاتر اتفاق می‌افتد. میزان تغییر شکل‌های خزشی نمونه سیلتی علاوه بر شرایط اشباع بودن نمونه و سطوح تنش خزشی به شمار چرخه‌های ذوب و انجماد نیز بستگی دارد. دوره‌های ذوب و انجماد، لغزش، جهت‌گیری ذرات، تخلخل و ساختار اولیه خاک را تغییر می‌دهد.
- ۵- در طول آزمایش تحکیم، برای نمونه تحت ۱۰ چرخه از فرایند ذوب و انجماد، به دلیل فروپاشیدگی ذرات از همدیگر و کوچک‌تر شدن اندازه ذرات، نشست‌های تحکیمی افزایش پیدا می‌کند. بدین ترتیب در نظر داشتن تأثیر چرخه‌های ذوب و انجماد در ساخت ساختمان‌ها و خاکریزها ضروری به نظر می‌رسد.

۶- مراجع

محمدی ی، نوری اسلام س، "بررسی تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف شیشه‌ای در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۴، ۴۵، ۸۷-۹۵.

نگهدار ع، یادگاری ش، هوشمند س، "بررسی رفتار خزشی خاک ماسه رس‌دار تحت آزمایش تحکیم یک بعدی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۴، ۴۵، ۶۵-۷۴.

ASTM D560/D560M-16. "Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement, Book of Standards", 4(8).

ASTM D2435 / D2435M-11, "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

Arman A, Thornton SI, "Identification of Collapsible Soils in Louisiana", *Highway Research Rec.*, 1973, 426, 14-32.

Benson CH, Othman MA, "Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ", ASCE

- Zhen-Dong Cui Peng-Peng He Wei-HaoYang, "Mechanical properties of a silty clay subjected to freezing-thawing", *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 98, 26-34.
- Mitchell JK, "Fabric of natural clays and its relation to engineering properties", *Procs, Highway Research Board* 1956, 35, 693-713.
- Navarro V Alonso EE, "Secondary compression of clays as a local dehydration process", *Geotechnique*, 2001, 5(10), 859-869.
- Negahdar A, Yadegari S, "Investigation of Parameters Affecting Creep Behavior of Sandy Clay Soil in Laboratory Conditions", *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2017, 11 (1), 80-90.
- Oda M, "Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material", *Soils and Foundations*, 1972, 12, 17-35.
- Othman MA, "Effect of freeze-thaw on the structure and hydraulic conductivity of compacted clay", Ph.D. Thesis, University of Wisconsin Madison, Wisconsin, USA, 1992.
- Padyab F, Parvizi M, "The effect of waste tires on clay stabilized with lime resistance against melting and freezing cycles", *The first National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1393.
- Qi JL, Zhang JM, Zhu YL, "Influence of freezing-thawing on soil structure and its soils mechanics significance", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (Supp. 2)*, 2004, 260-269.
- Qi J, Vermeer PA, Cheng G, "A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties", *Permafrost and Periglac. Process*. 2006, 17, 245-252.
- Simonsen E, Janoo V, Isacsson U, "Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions", *Journal of Cold Regions Engineering*, 2002, 16, 28-50.
- Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement, *Book of Standards*, 4(8).
- Tang C, Shi B, Zhao L, "The interfacial shear strength of fiber reinforced soil", *Geotextile and Geomembrance*, No. 28, 2010, 54-62.
- Terzaghi K, *Principles of soil Mechanics IV. Settlement and consolidation of clay Engineering News-Record*, 1925, 95. 874-878.
- Varatharajan S, "1D comperssion creep behavior of kaolinite and bentonite clay", department of civil engineering Calgary, Alberta, 2011.
- Wang D, Ma W, Niu YH, Chang X, Wen Z, "Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay". *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 48, 34-43.
- Wang YH, Xu D, "Dual porosity and secondary consolidation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2007, 133(7), 793-801.
- Yaling C, Binbin H, "Effect of freezing and thawing on shear behavior and structural strength of artificially structural loess", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 19, 6201-6212.
- Ye WM, XL Lai Q, Wang YG, Chen B, Chena YJ, Cui "An experimental investigation on the secondary compression of unsaturated GMZ01 bentonite", *Appl. Clay Sci.*6, 2014.

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Study on Effect of Freeze and Thaw Cycles (FTC) on Creep Settlement of Silty Soil

Alireza Negahdar*, Shima Yadegari, Shiva Rahmani

Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 12 November 2017; Accepted: 15 July 2018

Keywords:

Freeze and thaw cycle, Consolidation test, Silty soil, Secondary compression, SEM.

1. Introduction

Soil properties are affected by environmental conditions. Exposing of soil under multiple freeze thaw cycles may damage soil structure due to generated forces by water freezing and changes in mechanical and deformation features. Silty soils are highly susceptible for frost damage under the F-T cycles so, it is important to investigate their thermal and mechanical behavior. Thermal changes in susceptible soil often lead to irreversible creep deformation. The freeze and thaw cycles change soil engineering properties and mechanical behaviors by varying soil structure (Othman., 1992). A lot of research has devoted to study the effect of freeze-thaw cycles on the geotechnical properties of various soils (Wang et al., 2007). But, less laboratory works have studied the effect of freeze-thaw cycles on long term deformation and consolidation parameter of silty soil. Therefore, the aim of this paper is to determine the magnitude and rate of volume changes of soil specimen under 10 repeated cycles freeze and thaw which subjected to different vertical stresses.

2. Methodology

2.1. Experimental study

For freezing and thawing phases, specimens are placed in a refrigerator according to ASTM (D-560) test method. Deformation mechanisms are explained based on contacts of particle and relationship between coefficient of secondary compression and changes in void ratio. Also, microstructure changes of the soil samples are analyzed using scanning electron microscope (SEM).

To determine the effects of freeze and thaw cycles on the creep parameter of soil, consolidation tests are performed accordance to ASTM (D11-2435) on the samples before and after the freeze and thaw cycles. In all tests, the sample with a specified mass are poured into the confining ring. In water-saturated sample, the loadings increase from 0 to 50 kPa for a duration of 60 minutes between two consecutive loads to complete the dissipation of excess pore water pressure that was performed by Negahdar et al (2015). For freezing and thawing phases, specimens are placed in a refrigerator at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 24 h and then at $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ for thawing phase for 24 h. Single stage tests at the stresses of 300, 600 and 1200 kPa are carried out on water-saturated samples.

3. Results and discussion

The relationship between coefficient of secondary compression (C_{α}) and stress level (σ_{creep}) of samples in single stage tests during freezing and thawing cycles are shown in Figure 1.

Test results indicate that the freeze-thaw action has significant effect on the deformation properties of soil. There is an approximately nonlinear relationship between C_{α} and σ_{creep} . The values of C_{α} in saturated samples

* Corresponding Author

E-mail addresses: negahdar@uma.ac.ir (Alireza Negahdar), yadegari.shima@uma.ac.ir (Shima Yadegari), shiva.rahmani70318@gmail.com (Shiva Rahmani).

increase with stress level. In saturated samples due to the higher sliding ability and lower frictional, particles slide very easily, thus more creep deformations occur in higher stress levels (Varatharajan, 2011).

The rate creep of deformations of silty samples depends on stress levels and the number of cycles of freezing and thawing. In general, the repeated cycle of freeze and thaw lead to orientation of particles and the disintegration of particles and soil structure. So that, 20 percent increase in average consolidation settlement occurs during 10 cycles of freeze and thaw. Also, the increase in stress level causes to increase in the coefficient of secondary compression during cycles of freeze and thaw.

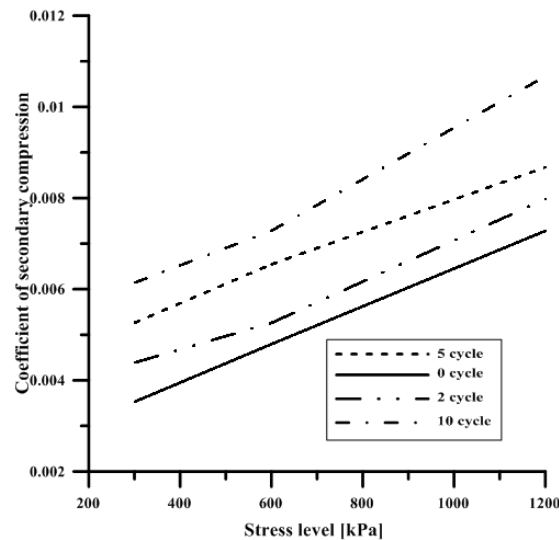


Fig. 1. Relationship between coefficient of secondary compression (C_{α}) and stress level (σ_{creep}) of samples in single stage tests during freezing and thawing cycles

4. Conclusions

In this study, consolidation tests are carried out on silty samples which subjected to freezing and thawing cycles. The effect of the number cycles of freezing and thawing and stress level on the consolidation and creep parameters are studied. Also structure of soil using electron microscopy (SEM) are studied and the mechanism of creep by the slip, and deformation of particle is described. The results showed that:

With increasing stress level, deformation of the sample increases and after reaching to certain level of stress, increase rate of deformation decreases. However, during the cycle of freezing and thawing, by increasing the porosity samples, the value of consolidation and creep deformation increase.

The repeated cycle of freeze and thaw lead to orientation of particles and the disintegration of particles and soil structure. So that, 20 percent increase in average consolidation settlement occurs during 10 cycles of freeze and thaw. Also, the increase in stress level causes to increase in the coefficient of secondary compression during cycles of freeze and thaw.

5. References

- Negahdar A, Yadegari Sh, Houshmandi S, "Analysis of Creep Behavior of Sandy Clay Soil under 1D Consolidation Test", Journal of Civil and Environmental Engineering, 2015, 45, 65-74.
- Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement, Book of Standards, 4(8).
- Othman MA, "Effect of freeze-thaw on the structure and hydraulic conductivity of compacted clay", Ph.D. Thesis, University of Wisconsin Madison, Wisconsin, USA, 1992.
- Varatharajan S, "1D compression creep behavior of kaolinite and bentonite clay", Department of Civil Engineering Calgary, Alberta, 2011.
- Wang D, Ma W, Niu YH, Chang X, Wen Z, "Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay", Cold Regions Science and Technology, 2007, 48, 34-43.