

تأثیر چرخه‌های تر و خشک‌شدگی بر رفتار تورمی-انقباضی خاک های متورم شونده بهسازی شده با نانوسیلیس، الیاف پلی پروپیلن و سرباره EAF^۱

سجاد شاهسونی^۱، امیر حسین وکیلی^{۲*}، مهدی مخبری^۳

۱- سجاد شاهسونی، دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، استهبان

۲- امیر حسین وکیلی، استاد یار، موسسه آموزش عالی زند شیراز، شیراز

۳- مهدی مخبری، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، استهبان

*a.vakili@zand.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۶/۲

تاریخ دریافت: ۹۸/۸/۱۴

چکیده

خاک‌های متورم شونده جزء خاک‌های مسئله‌داری هستند که در سراسر جهان پراکنده شده‌اند. تغییرات رطوبت در این نوع خاک‌ها موجب تغییر حجم شدید و باعث آسیب و خرابی سازه‌های واقع بر آن می‌شود. خاک‌های رسی متورم شونده در چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی، رفتار تورمی-انقباضی از خود بروز می‌دهند. در این پژوهش رفتار تورمی-انقباضی یک نوع بنتونیت طبیعی با درصد تورم بسیار زیاد و نمونه تثبیت و تسلیح شده با افزودنی‌های نانوسیلیس، الیاف پلی پروپیلن و سرباره کوره آهن با نام EAF بررسی و سعی شد کارایی و دوام این مواد در مواجهه با چرخه‌های تر و خشک‌شدگی متوالی ارزیابی شود. به منظور مطالعه این نوع رفتار، ابتدا تورم اولیه خاک بنتونیت و تأثیر افزودنی‌ها بر تورم آن در دستگاه اودئومتر استاندارد بررسی شد. مطابق نتایج، فرایند هم‌زمان تثبیت و تسلیح دنبال شده در این پژوهش، سبب کاهش ۸۵ درصدی تورم نسبت به نمونه اولیه با درصد تورم ۷۵/۲۶٪ شد. پس از آن، تأثیر چرخه‌های تر و خشک‌شدگی روی رفتار تورمی-انقباضی خاک مینا و نمونه بهینه تثبیت و تسلیح شده در دستگاه اودئومتر اصلاح شده بررسی شد. ثبت تغییر شکل محوری خاک و همچنین تغییرات درصد رطوبت، نسبت تخلخل و درصد اشباع آن حین چرخه‌های تورم و انقباض نشان داد که چرخه‌های تر و خشک‌شدگی موجب کاهش پتانسیل تورم در نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده و نمونه مینا شد. همچنین بررسی تغییرات نسبت تخلخل در مقابل درصد رطوبت خاک اولیه حین چرخه‌های تر و خشک‌شدگی نشان داد که منحنی تغییرات، یک منحنی S شکل بوده و بیشترین نسبت تخلخل و تغییر شکل بین

درصد رطوبت معادل درجه اشباع ۵۰ تا ۹۰ درصد رخ می‌دهد. در حالی که برای نمونه تثبیت و تسلیح شده منحنی تغییرات به صورت S خوابیده بود که عمده تغییرات در درصد رطوبت معادل درجه اشباع ۷۰ تا ۹۰ درصد اتفاق افتاد که نشان می‌دهد در نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده از تأثیر منفی رطوبت بر تغییر حجم کاسته شده و میزان تورم و انقباض در تعداد سیکل‌های کمتری به حالت تعادل می‌رسد. نتایج به دست آمده در کنار آنالیزهای به دست آمده از آزمایش‌های SEM و XRD ثابت کردند که افزودنی‌های استفاده شده در این پژوهش نه تنها پتانسیل تورم را به صورت چشمگیر کاهش دادند، بلکه ضمن کاهش رفتار تورمی-انقباضی دارای دوام مناسب در چرخه‌های تر و خشک‌شدگی متوالی نیز بودند.

واژه های کلیدی: خاک متورم شونده، چرخه‌های تر و خشک‌شدگی، اودنومتر اصلاح شده، تثبیت و تسلیح

مقدمه

خاک‌های متورم شونده در اثر تغییرات شرایط طبیعی دچار نوسانات رطوبت می‌شوند که این نوسانات رطوبت سبب تغییر حجم آنها می‌شود. عوامل متعددی از جمله رطوبت و نسبت تخلخل اولیه، نوع کانی‌های رسی، واحدهای درشت ساختمانی و همین‌طور سربار موجود، در پتانسیل تورمی یک خاک متورم شونده نقش بسیار مهمی را دارد [1,2,3]. این خاک‌ها به دلیل داشتن قابلیت تورم و انقباض در مواجهه با نوسانات فصلی رطوبت برای سازه‌های مهندسی یک مسئله جدی به شمار می‌آیند [4].

در کشور آمریکا خسارات سالانه ناشی از رفتار مخرب خاک‌های متورم شونده در خصوص بزرگراه‌ها، معابر، فرودگاه‌ها، پوشش کانال‌های آبیاری و دیگر سازه‌ها به میزان ۹۰۰۰ میلیون دلار برآورد شده است که به تنهایی بزرگتر از خسارات ناشی از بلایای طبیعی از قبیل سیل، طوفان و زلزله بوده است [5]. رفتار خاک‌های متورم شونده تحت سیکل‌های تر و خشک شدگی یکی از موضوعات مهم در پژوهش‌های فعلی هست. تعدادی از پژوهشگران از جمله آلونسو و همکاران (۲۰۰۵)، ویلر و همکاران (۲۰۰۳) و نوآموز و مسروری (۲۰۰۸) پژوهش‌هایی را روی رفتار خاک‌های متورم شونده تحت سیکل‌های تر و خشک‌شدگی با کنترل مکش انجام دادند [6, 7, 8]. تریپاتی و همکاران (۲۰۰۲) مطالعاتی روی رفتار تر و خشک شدگی با مد نظر قرار دادن تخلخل و رطوبت خاک انجام دادند [9]. همچنین چندین پژوهش نیز بر رفتار خاک‌های متورم شونده تحت افزودنی‌های شیمیایی انجام گرفته است [11,12,13,14].

گروهی از پژوهشگران مانند چو و مو (۱۹۷۳) سوبارائو و ساتیاداس (۱۹۸۷) نمونه‌ای از خاک متورم شونده را تحت سیکل تر و خشک قرار دادند و عنوان نمودند که در هر سیکل تغییر شکل‌های غیر قابل برگشت به وجود می‌آید [15,16]. تریپاتی و همکاران (۲۰۰۲) روی نمونه‌های خاک رسی در دستگاه تحکیم نشان دادند که در چرخه‌های اولیه تغییر شکل ناشی از تورم و انقباض یکسان نیست و چرخه‌های تر و خشک شدگی موجب کاهش تورم می‌شود [9]. همچنین پوپسکو (۱۹۸۰) و توافیق و نالبنست اوغلو (۲۰۰۹) به این نتیجه رسیدند که چرخه‌های تر و خشک‌شدگی موجب افزایش پتانسیل تورم پذیری می‌شود [17-13]. استبرق و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر نوع آب مصرفی بر رفتار تورمی خاک‌های متورم شونده در چرخه‌های تر و خشک شدگی را بررسی نمودند. صرف نظر از نوع آب مصرفی، ایشان گزارش نمودند که با افزایش تعداد سیکل‌های تر و خشک شدگی، پتانسیل تورمی-انقباضی خاک تا حدود ۱۰۰ درصد می‌تواند افزایش یابد. همچنین ایشان بیان نمودند که پتانسیل تورم نمونه خاک متورم شونده اشباع شده با آب مقطر حدود ۱/۴ برابر بیشتر از پتانسیل تورم نمونه‌های مشابه اما اشباع شده با آب‌های اسیدی و یا شور است [18]. همچنین استبرق و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر سربار اولیه بر رفتار تورمی-انقباضی خاک‌های متورم شونده در چرخه‌های تر و خشک شدگی بررسی نمودند و بیان نمودند که چرخه‌های تر و خشک شدگی موجب کاهش تورم شده و در سیکل‌های پنجم به بعد، میزان تورم و انقباض به یک حالت تعادلی می‌رسد [19].

EAF و الیاف پلی پروپیلن از مهمترین اهداف این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

خاک رس متورم شونده استفاده شده در این پژوهش رس بتونیت طبیعی به رنگ سفید مایل به سبز بود. این خاک از قرضه‌های وسیع و گسترده خاک‌های متورم شونده معدن مهرجان، واقع در استان اصفهان و در منطقه دشت کویری که در کیلومتر ۳۴۰ جاده یزد به سمت طبس واقع شده است تهیه شد و علت استفاده خاک رس از این منطقه تهیه رس با بیشترین درصد تورم بوده است که نمایی از محل تهیه خاک در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۱. نمایی از محل قرضه خاک بتونیت



Fig. 1. a view of The bentonite soil source

به منظور تعیین مشخصات خاک مورد مطالعه، آزمایش‌های دانه‌بندی و تراکم و حدود اتر برگ و تعیین G_s به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D4318، ASTM D698، ASTM D422، ASTM D854 انجام شدند که نتایج آن در جدول (۱) آمده است. همچنین جدول (۱) مشخصات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک متورم شونده اولیه را نشان می‌دهد که EC و TDS به ترتیب نشان دهنده درصد سدیم خاک، میزان کل املاح درون خاک و هدایت الکتریکی خاک است. همچنین مشخصات شیمیایی خاک بتونیت (مهمترین اکسیدهای تشکیل دهنده خاک) که از آزمایش XRF به دست آمده در جدول (۲) و منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۲) نشان داده شده است.

در این پژوهش از سرباره مجتمع صنعتی ذوب‌آهن پاسارگاد با نام (EAF) استفاده شده که به عنوان مواد زائد کارخانه محسوب می‌شود و استفاده از آن در تثبیت خاک علاوه بر ارزان بودن آن می‌تواند روشی برای حفظ محیط زیست نیز باشد که مشخصات

تثبیت خاک‌های متورم شونده با مواد شیمیایی یکی از روش‌های متداول برای کنترل پتانسیل تورم و رفتار تغییر حجمی خاک است. با وجود مطالعات فراوان روی تثبیت خاک‌ها با کمک سیمان و آهک، محدودیت‌های فراوانی برای استفاده از سیمان در تثبیت خاک‌های با پلاستیسیته و تورم بالا گزارش شده‌اند [20]. به عبارت دیگر کارایی سیمان در فرایند بهسازی خاک‌هایی با شاخص خمیری بیشتر از ۳۰ درصد بسیار پایین گزارش شده است [21]. همچنین مطابق پژوهش‌های انجام گرفته می‌توان فهمید که بعضی از افزودنی‌ها مانند آهک در مرحله اول به خوبی می‌توانند پتانسیل تورم را کاهش دهند ولی پس از قرار گرفتن نمونه خاک متورم شونده اصلاح شده با آهک در چرخه‌های تر و خشک شدگی، پتانسیل تورم خاک افزایش یافته و رفتار تورمی خاک برگشت پذیر است [22] این امر می‌تواند موجب خسارت‌های بعدی به سازه‌ها شود. از طرفی استفاده از مواد سنتی مانند آهک، سیمان و... برای کنترل تورم، با محیط زیست سازگاری مناسبی ندارند و همچنین باتوجه به مطالعات پیشین در مورد آثار تر و خشک شدگی بر تورم همخوانی مناسبی دیده نمی‌شود. پس پژوهشگران تلاش کردند تا برای اصلاح و بهسازی این دسته از خاک‌ها از افزودنی‌های جدید استفاده نمایند که نه تنها دارای کارایی بیشتری باشند بلکه با محیط زیست نیز سازگار باشند. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی رفتار تورمی انقباضی خاک‌های با تورم پذیری بالا و همچنین خاک‌های تثبیت و تسلیح شده در مواجهه با سیکل‌های تر و خشک شدگی متوالی است. هر چند مواد افزودنی استفاده شده در این پژوهش به عنوان موادی با کارکرد مناسب در کنترل پتانسیل تورم شناخته شده‌اند، اما کارایی و قابلیت دوام این مواد در مواجهه با چرخه‌های تر و خشک شدگی متوالی مورد ارزیابی جامع قرار نگرفته است. بنابراین بررسی تاثیر جداگانه و همزمان مواد جدید روی پتانسیل تورم و تاثیر چرخه‌های تر و خشک شدگی بر میزان تورم یک خاک با تورم پذیری بسیار زیاد و مقایسه مسیرهای تورمی انقباضی آن با حالت تثبیت و تسلیح شده با نانو سیلیس، سرباره

بر مبنای نتایج حاصل شده، درصد بهینه نانوسیلیس برای کنترل پتانسیل تورم اندازه گیری شد.

ب- بهسازی همزمان نمونه خاک با نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن: بعد از اندازه گیری بهترین درصد نانوسیلیس، تأثیر الیاف پلی پروپیلن روی تورم نمونه خاک متورم شونده تثبیت شده با نانوسیلیس ارزیابی شد. در این مرحله ابتدا درصد های مشخص الیاف به خاک اضافه شد. سپس میزان ۰/۵ درصد وزنی نانوسیلیس در مقدار مشخصی آب مقطر که معادل رطوبت بهینه نمونه خاک است حل شده، و محلول حاصل به مخلوط خاک و الیاف افزوده شد و کاملاً تا حصول یک مخلوط همگن ورز داده شد. در این مرحله از این مطالعه، درصد بهینه الیاف پلی پروپیلن در کاهش پتانسیل تورم نمونه خاک متورم شونده تثبیت شده با نانوسیلیس اندازه گیری شد.

پ- بهسازی همزمان نمونه خاک با نانوسیلیس، الیاف پلی پروپیلن و سرباره EAF: بعد از اندازه گیری بهترین ترکیب نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن روی تورم، نمونه حاصل با درصد های مختلف سرباره EAF ترکیب شد. در این مرحله ابتدا ۶/۰٪ الیاف را به خاک اضافه کرده و بعد از آن درصد های مشخص سرباره EAF به خاک و الیاف اضافه شد. سپس ۵/۰٪ نانوسیلیس را در آب حل نموده و به ترکیب قبل اضافه و کاملاً تا حصول یک مخلوط همگن ورز داده شد. در این مرحله، درصد بهینه سرباره EAF در کاهش پتانسیل تورم نمونه خاک متورم شونده تثبیت و تسلیح شده با نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن اندازه گیری شد.

لازم به ذکر است که در طول زمان عمل آوری، نمونه های ساخته شده در چند لایه سلفون پیچیده شدند و در پلاستیک با کیفیت مناسب از لحاظ عایق حرارتی و رطوبتی و در دمای آزمایشگاه (۲۰ درجه سانتی گراد) به شکلی نگهداری شدند که رطوبت آنها دچار تغییر نشود.

دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایش های تورم روی خاک بتونیت و نمونه های تثبیت و تسلیح شده از دستگاه تحکیم (اودنومتر) با سربار ۱ kPa استفاده شد (ASTMD ۲۴۳۵) و در ادامه به منظور فراهم آوردن امکان اعمال چرخه های متوالی تر و خشک شدگی بر نمونه خاک، در شرایطی مانند آنچه در طبیعت رخ می دهد با الگو گرفتن از روش استبرق و همکاران (۲۰۱۴)، تغییراتی در دستگاه تحکیم استاندارد صورت گرفت. این

شیمیایی آن با توجه به آزمایش XRF در جدول (۲) ارائه شده است. درصد های سرباره EAF مورد استفاده در این پژوهش برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی خاک در نظر گرفته شد. نانوسیلیس استفاده شده در این پژوهش از نوعی با درجه خلوص بالا است و از شرکت ایستاتیس یزد تهیه شده است. مشخصات نانوسیلیس استفاده شده در جدول (۳) نشان داده شده است. میزان مورد استفاده نانوسیلیس در این پژوهش بین ۰/۱ الی ۰/۹ درصد وزنی خاک در نظر گرفته شده است. در آزمایش های صورت گرفته در این پژوهش از الیاف پلی پروپیلن کارخانه تولید پلی پروپیلن ایران با اندازه ۱۲ میلی متری استفاده شد. درصد های اختلاط الیاف پلی پروپیلن در این پژوهش بین ۰/۱ الی ۱ درصد وزنی خاک است که ویژگی های آن در جدول (۴) آورده شده است.

شکل ۲. نمودار دانه بندی بتونیت استفاده شده در این پژوهش

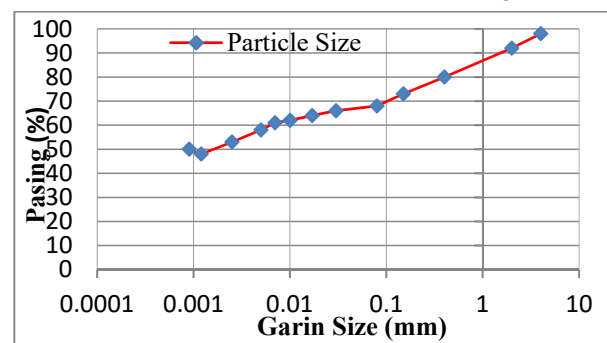


Fig. 2. The particle size distribution curves of bentonite provided for the study

چگونگی تهیه نمونه ها:

در این مطالعه برای بهسازی نمونه ها مراحل زیر دنبال شدند:

الف- افزودن تثبیت کننده نانوسیلیس به تنهایی:

در هنگامی که فقط تثبیت کننده نانو سیلیس در برنامه آزمایش ها استفاده شد، مقدار مشخص نانو سیلیس ابتدا در میزان مشخص آب مقطر معادل رطوبت بهینه نمونه ها حل شده، آنگاه محلول آب و نانوسیلیس به نمونه خاک اضافه شد و مخلوط حاصل کاملاً ورز داده شد و به مدت ۲۴ ساعت درون کیسه های پلاستیکی نگهداری شد تا رطوبت کاملاً همگن شود. در این مطالعه از ترکیب ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ درصد وزنی نانو سیلیس با بتونیت استفاده شد. پس از تهیه و آماده سازی نمونه ها، آزمایش های پتانسیل تورم انجام گرفت و

لایه‌های بالاتر خاک می‌تواند متفاوت باشد. در این پژوهش با توجه اینکه بیشتر خرابی‌های ناشی از تورم در رویه خاک ملاک عمل بود از سربار ۱kPa استفاده شد. پس از اعمال سربار و تنظیم گنج کنترل تغییر شکل، محفظه دستگاه از آب پر می‌شود.

با جذب آب نمونه شروع به تورم می‌نماید و دچار تغییر حجم می‌شود. تغییر شکل محوری خاک تا زمان رسیدن به بیشینه تورم ثبت می‌شود. پس از این مرحله، اعمال چرخه تر به پایان رسیده و پس از آن نیز شیر زهکشی باز می‌شود و دستگاه کنترل دمایی روشن و در دمای ۵۰ (درجه سانتیگراد) تنظیم می‌شود و این دما در طول چرخه خشک شدن ثابت می‌ماند. با شروع خشک شدن نمونه خاک، به تدریج انقباض نمونه شروع می‌شود که تغییرات ارتفاع نمونه توسط گنج تغییر شکل ثبت شده و این تا زمان ثابت شدن تغییر شکل نمونه که پایان چرخه خشک است ادامه می‌یابد و پس از آن شیر زهکشی بسته و دستگاه اعمال کننده گرما خاموش دوباره خاک اشباع و سیکل بعدی تر و خشک شدگی آغاز می‌شود. مدت زمان یک چرخه تورم و انقباض ۶ روز به طول انجامید که زمان آن بر اساس زمان رسیدن به تورم و زمان رسیدن رطوبت به حد انقباض تعیین شد. تعداد چرخه‌های تر و خشک شدگی در این پژوهش تا مشخص شدن تاثیر آن بر نمونه مورد نظر و رسیدن به تعادل ادامه یافت. همچنین به منظور بررسی تغییرات نسبت تخلخل، درصد رطوبت و درجه اشباع خاک حین چرخه‌های تر و خشک شدگی، هم‌زمان با شروع آزمایش‌های تر و خشک شدگی در دستگاه تحکیم اصلاح شده، نمونه‌های دیگر تهیه و در دستگاه تحکیم معمولی برای انجام آزمایش‌های تر و خشک شدن قرار داده شدند. البته دستگاه‌های تحکیم معمولی تنها قادر به اعمال چرخه‌های تر به نمونه خاک هستند و برای اعمال چرخه‌های خشک به نمونه‌های خاک، باید نمونه‌های تورم یافته در این دستگاه‌ها، در پایان چرخه‌های تورم به دستگاه آون با همان شرایط دمایی (مطابق با شرایط موجود در دستگاه ادنومتر اصلاح شده حین چرخه‌های انقباض) منتقل شوند و در ادامه برای اعمال چرخه تورم بعدی دوباره به دستگاه‌های تحکیم منتقل شوند. پس از شروع آزمایش‌ها تر و خشک شدگی هم‌زمان در دستگاه‌های تحکیم اصلاح شده و معمولی، در تغییر شکل‌هایی معادل یک چهارم تغییر شکل کلی خاک که در دستگاه تحکیم اصلاح شده اصلی رخ می‌دهد، هر بار یکی از نمونه‌های موجود در دستگاه‌های تحکیم

دستگاه شامل یک رینگ ثابت است که به همراه ۲ سنگ متخلخل فوقانی و زیرین، در محفظه دستگاه تحکیم قرار می‌گیرد. سربار مورد نظر توسط صفحه بارگذاری که روی سنگ متخلخل فوقانی قرار می‌گیرند، به نمونه خاک وارد می‌شود و برای تخلیه آب یک شیر زهکشی تعبیه شده، و برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های محوری از گنجی با دقت ۰/۰۱ میلی متر استفاده شد. لازم به ذکر است که چرخه خشک شدگی نیز در همان دستگاه ادنومتر اصلاح شده انجام گرفت. به این منظور از یک سیستم گرمایشی با قابلیت ایجاد دمای ۵۰ درجه استفاده شد. سیستم گرمایشی ذکر شده یک المنت صفحه‌ای مدور بوده که بر پیرامون بدنه دستگاه ادنومتر اصلاح شده نصب شد. در هنگام نیاز به اعمال چرخه خشک شدگی، سیستم گرمایشی روشن می‌شود و از طریق پیرامون قالب دستگاه ادنومتر اصلاح شده حرارت لازم به نمونه خاک درون آن انتقال پیدا می‌کند. برای کنترل دما از یک سیستم دیجیتال با قطع کن خودکار استفاده شد که دارای قابلیت بهتری نسبت به روش اسبرق و همکاران (۲۰۱۴) دارد که نمایی از آن در شکل (۳) قابل مشاهده است.

شکل ۳. نمایی از دستگاه ادنومتر اصلاح شده



Fig. 3. A view of the modified oedometer

اعمال چرخه‌های تر و خشک شدگی

اعمال چرخه‌های تر و خشک شدگی متوالی به نمونه خاک، در دستگاه تحکیم اصلاح شده انجام می‌شود بدین شکل که پس از قرار دادن نمونه خاک در دستگاه، سربار مورد نظر توسط بازوی دستگاه به خاک اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که انتخاب سربار برای اعمال به خاک بر این اساس است که یک خاک متورم شونده ممکن است در شرایط طبیعی در اعماق مختلفی از سطح زمین واقع شده باشد که در نتیجه سربار روی آن با توجه به فشار وارد شده از طرف

معمولی پیاده شده و پس از توزین و اندازه گیری ابعاد، تغییرات درصد رطوبت آن نسبت به حالت اولیه اندازه گیری شده و همچنین تغییرات نسبت تخلخل با استفاده از رابطه (۱) تعیین شد.

$$\frac{\Delta v}{V_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (1)$$

در این رابطه Δv و Δe به ترتیب تغییر حجم و تغییر نسبت تخلخل خاک در هر مرحله از چرخه های تر و خشک و V_0 حجم خاک در شروع آزمایش است. به طور متوسط در هر چرخه تر و یا خشک برای رسم مسیرهای تورمی - انقباضی باید ۴ نمونه خاک از دستگاه های تحکیم پیاده شوند.

نتایج و بحث

در این پژوهش قبل از انجام آزمایش های مربوط به چرخه تر و خشک شدگی، ابتدا تاثیر افزودنی ها بر کنترل تورم خاک اولیه بررسی شد. بنابراین در مرحله اول تاثیر نانوسیلیس بر کنترل تورم نمونه خاک اولیه مورد بررسی قرار گرفت. همان گونه که در شکل (۴) مشاهده می شود، نمونه خاک اولیه با درصد تورم ۷۵/۲۶ درصد در رده خاک های با پتانسیل تورم خیلی زیاد قرار گرفت. تاثیر درصدهای وزنی مختلف نانوسیلیس بر پتانسیل تورم خاک متورم شونده اولیه نیز در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق نتایج بیشترین کاهش پتانسیل تورم برای نمونه تثبیت شده با ۰/۵ درصد نانوسیلیس ثبت شد به شکلی که این ترکیب بهینه (بتونیت + ۰/۵ نانوسیلیس) موجب کاهش ۲۲/۸ درصدی تورم پس از ۱ روز عمل آوری شد. افزودن بیش از ۰/۵ نانوسیلیس به نمونه خاک آثار منفی در کاهش پتانسیل تورم نمونه ها دارد. پس ۰/۵ نانوسیلیس به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. به عبارت کلی، آثار منفی افزودن نانوسیلیس بیش از اندازه (بیشتر از مقدار بهینه)، را می توان به دلایلی مانند شکل گیری تکه های ناپایدار در توده خاک و همیطور کاهش وزن مخصوص نمونه تثبیت شده به علت جایگزینی ذرات خاک با ذرات سبک وزن نانوذرات ارتباط داد. این موارد نیز در مطالعه (Kalhor et al. 2019) گزارش شده اند [23].

فاکتورهای مختلفی مانند واکنش های شیمیایی بین ذرات خاک و نانو، پرشدن فضای حفرات بین ذرات خاک با ذرات نانوسیلیس، تغییر در ترکیبات تشکیل دهنده خاک و تغییر در

نوع کانی های تشکیل دهنده خاک اولیه می توانند به عنوان عوامل اصلاح کننده خاک مورد مطالعه به دلیل افزودن نانوسیلیس قلمداد شوند [23]. همچنین هر عاملی که باعث کاهش ضخامت لایه دو گانه شود پتانسیل افزایش حجم و تورم خاک را کاهش خواهد داد. غلظت و نسبت جذب سدیم (SAR) محلول خاک از عوامل مؤثر در ضخامت لایه دو گانه و در نتیجه تورم پذیری خاک هستند به طوری که ضخامت لایه دو گانه با افزایش غلظت محلول کمتر ولی با افزایش نسبت جذب سدیم بیشتر می شود [24]. از طرفی یون های مانند پتاسیم، کلسیم، آمونیوم و هیدروژن موجب کاهش ضخامت لایه دو گانه و یون سدیم به دلیل شعاع هیدراته بیشتر موجب افزایش آن می شوند. وقتی که ذرات نانوسیلیس با سطح ویژه بسیار زیاد به خاک رس افزوده می شود باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و جایگزینی سریع یون سدیم با سایر کاتیون های تشکیل دهنده نانوسیلیس می شود، بدین ترتیب با خارج شدن سدیم از فاز تبدالی، نسبت سدیم به سایر کاتیون ها و به عبارتی نسبت جذب سدیم کاهش و از سوی دیگر غلظت محلول خاک افزایش می یابد. این عوامل در پایان باعث کاهش ضخامت لایه دو گانه و در نتیجه کاهش پتانسیل تورمی خاک می شود [25] براساس گزارش (Ugwu et al. 2018) در خاک های با درجه فعالیت بالا، نانوسیلیس می تواند حتی در زمان های کوتاه با خاک واکنش نشان داده و باعث قوت نیروهای داخلی ذرات شود و همچنین موجب افزایش نیروهای جاذبه بین ذرات شود و با توجه به اینکه ذرات خاک با یک حالت ژله مانند کاور می شوند دیگر اجازه حرکت آب در ساختار رس را نمی دهند و موجب کاهش پتانسیل تورم می شوند [26].

جدول ۱. مشخصات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک متورم شونده

Soil property	Standard method	Value
Soil type		Bentonite clay
Clay content (%)	ASTM D422	48.5
Silt content (%)	ASTM D422	19.5%
Sand content (%)	ASTM D422	32%
Liquid Limit (LL, %)	ASTM D4318	211
Plastic Limit (PL, %)	ASTM D4318	41
Plasticity Index (PI, %)	ASTM D4318	170
Soil classification based on unified soil classification system (USCS)	ASTM D2487	CH
Specific gravity (G_s)	ASTM D854	2.77
Soil activity (A)	ASTM D653	3.50
Maximum dry density (gr/cm^3)	ASTM D 698	1.50
Optimum moisture content (%)	ASTM D 698	25
Swelling potential (%)	ASTM D4546	75.26
Swelling pressure (kPa)	ASTM D4546	220
Unconfined compressive strength (kg/cm^2)	ASTM D2166	191.7
PS (%)		67.9
TDS (mg/lit)		31.96
$\text{EC} \times 10^3 (\text{ms}/\text{cm})$		2.56
Mg^{2+} (Meq/lit)		1.44
Ca^{2+} (Meq/lit)		0.1
K^{+} (Meq/lit)		8.72
Na^{+} (Meq/lit)		21.7
pH	ASTM D4972	9.22

Table 1. The physical, mechanical, and chemical properties of the expansive soil

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک بتونیت و سرباره (EAF)

Formula	Concentration (%)	
	Soil	EAF
SiO_2	64.59	23
Al_2O_3	11.75	4.5
CaO	3.14	34
Fe_2O_3	2.36	16.5
MgO	3.77	12.4
K_2O	0.69	-
Na_2O	2.95	-
P_2O_5	0.042	-
TiO_2	0.17	-
MnO	0.046	-
LOI	10.33	9.6

Table 2. Chemical compositions of the expansive clay and EAF slag

جدول ۳. مشخصات شیمیایی نانو سیلیس (صنایع نانو سیلیس ایستاتیس یزد)

Properties	Quantity
Chemical formula	SiO_2
Molar mass (gr/mol)	60.08
Bulk mass (kg/m^3)	200-1430
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	1710
Boiling point ($^{\circ}\text{C}$)	2230
Degree of purity (%)	99
Color	White
Moisture (%)	5

Table.3. The properties of nanosilica

جدول ۴. مشخصات الیاف پلی پروپیلن (کارخانه تولید پلی پروپیلن ایران)

Tensile strength(Mpa)	Length(mm)	Melting point	Water absorption	Specific Gravity(gr/cm ³)	Diameter(um)
350-400	12	160-170	0	0.91	22

Table.4. The properties of Polypropylene Fiber

شکل ۴. تغییرات پتانسیل تورم خاک بنتونیت بهسازی شده با درصدهای

مختلف نانوسیلیس

شکل ۵. تغییرات پتانسیل تورم خاک بنتونیت بهسازی شده با ۰/۵ درصد

نانوسیلیس و درصدهای مختلف الیاف

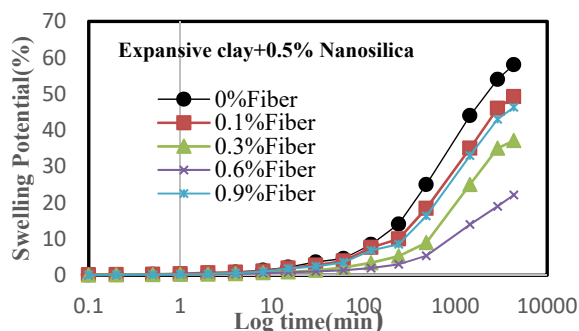


Fig. 5. Temporal swelling potential variations of bentonite treated by 0.5% of nanosilica and different amounts of fiber

شکل ۶. تغییرات پتانسیل تورم خاک بنتونیت بهسازی شده با ۰/۵ درصد

نانوسیلیس و ۰/۶ درصد الیاف و درصد های مختلف سرباره EAF

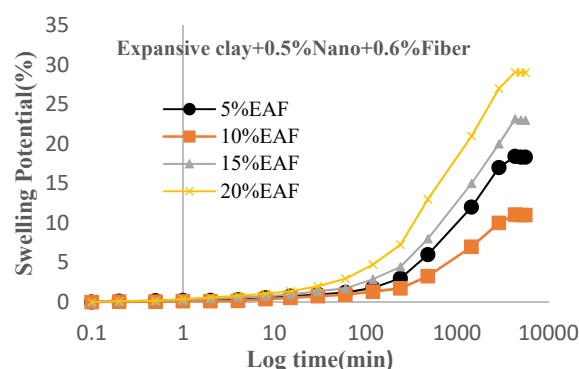


Fig. 6. Temporal swelling potential variations of bentonite treated by 0.5% of Nanosilica and 0.6%Fiber and different amounts of EAF slag

ترکیب بهینه (بنتونیت + ۰/۵٪ نانوسیلیس + ۰/۶٪ الیاف پلی پروپیلن + ۱۰٪ سرباره) بدست آمد که موجب کنترل ۸۵ درصدی تورم تحت سربار ۱ کیلو پاسکال و در نمونه یک روزه شد. همان گونه که در جدول (۲) نشان داده شده نوع سرباره مصرفی علاوه بر سیلیسی بودن دارای کلسیم بالایی است و در واقع وجود سرباره به دلیل افزایش یون های $(OH)^-$ موجب افزایش

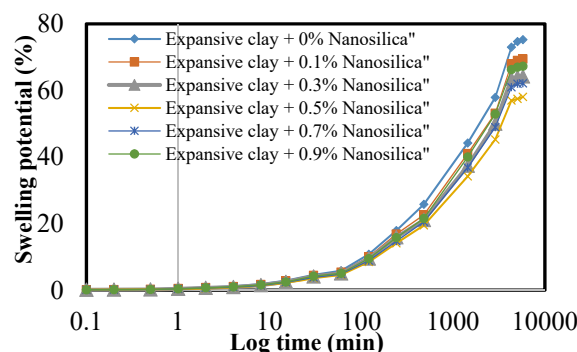


Fig. 4. Temporal swelling potential variations for the bentonite treated by different amounts of nanosilica

در ادامه تأثیر درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن بر پتانسیل تورم نمونه خاک بنتونیت تثبیت شده با ۰/۵ درصد نانوسیلیس مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۵) نشان داده شده است. در این قسمت از پژوهش، ترکیب بهینه (بنتونیت + ۰/۵٪ نانوسیلیس + ۰/۶٪ الیاف) بدست آمد که موجب کاهش ۷۰ درصدی تورم شد. با توجه به نتایج ارائه شده می توان به تأثیر مثبت الیاف بر کاهش تورم خاک های متورم شونده اشاره کرد چرا که افزودن رشته های الیاف به خاک موجب درگیری دانه های خاک با الیاف شده و همچنین موجب فشردگی بیشتر ذرات خاک به یکدیگر و افزایش مقاومت فشاری بین ذرات می شود و از طرفی شکل پذیری محیط را بهبود می بخشد و همچنین هنگام تغییر شکل محیط و جابه جایی این ذرات، الیاف ها افزایش طول داده و تنش های کششی در آنها بسیج شده، و موجب کاهش تورم می شود [27]. در ادامه تأثیر درصدهای مختلف سرباره (EAF) روی نمونه بنتونیت تثبیت شده با ۰/۵٪ نانوسیلیس و تسلیج شده با ۰/۶٪ الیاف مورد بررسی قرار گرفت. همان گونه که در شکل (۶) قابل مشاهده است.

اولین سیکل هست. در پایان سیکل دوم مقدار تغییر شکل برگشت ناپذیر از مقدار ۹ درصد به ۴ درصد کاهش یافته و مقدار تغییر شکل‌ها با افزایش تعداد سیکل‌ها به صورت تدریجی کاهش یافته تا اینکه در سیکل پنجم نمونه به تعادل می‌رسد. پس پتانسیل تورم خاک که در چرخه اول ۷۵ درصد بوده، در چرخه پنجم به ۴۴ درصد کاهش یافته که نشان دهنده کاهش ۴۱ درصدی تورم نسبت به چرخه اول است. به عبارت دیگر مقدار تغییر شکل غیر قابل برگشت تجمعی نمونه در پایان سیکل پنجم که سیکل تعادل نمونه نیز هست برابر با ۴۱ درصد می‌باشد.

شکل ۸ تاثیر سیکل‌های تر و خشک شدگی روی تغییر شکل‌های محوری خاک رس متورم شونده بهسازی شده

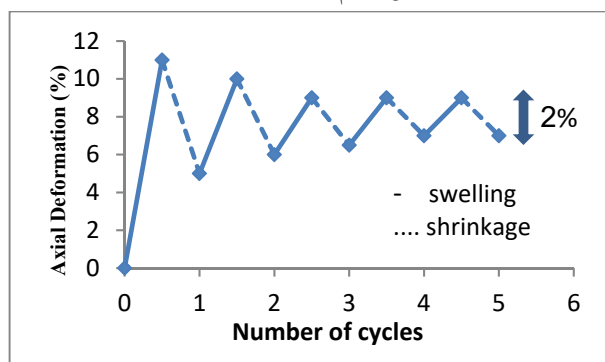


Fig. 8. Wetting and drying cycles impact on the axial deformations of the improved expansive clay

با بررسی شکل (۸) که مربوط به نمونه تثبیت و تسلیح شده است مشاهده شد که پتانسیل تورم در چرخه اول ۱۱ درصد بوده و پس از قرار گرفتن در چرخه‌های تر و خشک شدگی به میزان ۸/۸ درصد کاهش یافته و به میزان ۲ درصد رسیده است. همچنین از چرخه سوم به بعد می‌توان گفت که تغییرات تورم و انقباض ثابت شده است و یا به عبارتی دیگر پس از این مرحله تغییر شکل محوری ناشی از تورم و انقباض نمونه‌ها با هم برابر است. این شرایط را حالت تعادل تورمی انقباضی می‌گویند. بنابراین کاهش رفتار تورمی و انقباضی در اثر اعمال سیکل‌های تر و خشک شدگی برای نمونه بهسازی شده و به تعادل رسیدن نمونه مذکور در تعداد سیکل‌های کمتر از مهمترین نتایج این پژوهش است.

pH و فراهم شدن شرایط برای انجام واکنش پوزولانی می‌شود و این شرایط باعث انحلال سیلیکا و آلومینا موجود در خاک شده، و سبب تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته و کلسیم آلومینات هیدراته می‌شود. ایجاد این ژل‌ها باعث کاهش پراکندگی و ایجاد ساختار مجتمع و کاهش ضخامت لایه دوگانه گردیده و موجب کاهش پتانسیل تورم می‌شود [28]. پس از تعیین مقدار بهینه افزودنی‌ها در کاهش پتانسیل تورم، چرخه‌های تر و خشک متوالی به نمونه خاک بنتونیت اولیه و نمونه تثبیت و تسلیح شده با نانوسیلیس، الیاف پلی پروپیلن و سرباره EAF اعمال شد. در هر ۲ نمونه، تعداد چرخه‌های تر و خشک شدگی به اندازه‌ای ادامه یافت که تغییر شکل محوری حاصل تر شدن خاک با میزان تغییر شکل محوری ناشی از خشک شدن آن برابر شد و با ثبت نسبت تغییر ارتفاع (ΔH) به ارتفاع اولیه (H_0) آن کرنش محوری خاک در چرخه‌های تر و خشک بدست آمد. در شکل‌های (۷ و ۸) تغییرات کرنش محوری خاک بنتونیت و نمونه تثبیت و تسلیح شده به ازاء سربار ۱ کیلو پاسکال نشان داده شده است.

شکل ۷. تاثیر سیکل‌های تر و خشک شدگی بر تغییر شکل‌های محوری خاک رس متورم شونده

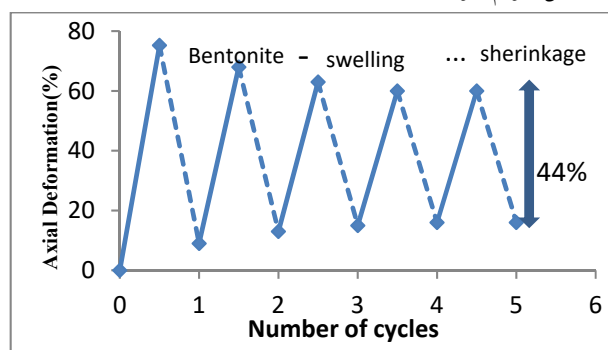


Fig. 7. Wetting and drying cycles impact on the axial deformations of expansive clay.

با توجه به شکل (۷ و ۸) قابل مشاهده است که تغییر شکل محوری نمونه خاک بنتونیت و نمونه تثبیت و تسلیح شده حین چرخه‌های متوالی تر و خشک کمتر از مقدار آن در چرخه اول تورم است. براساس شکل (۷)، مقدار تغییر شکل محوری نمونه اصلاح نشده در پایان اولین سیکل تر و اولین سیکل خشک شدگی به ترتیب برابر با ۷۵/۲۶ و ۶۶/۲۶ درصد است که بیانگر مقدار ۹ درصد تغییر شکل برگشت ناپذیر در نمونه در پایان

وقوع حالت تعادل تورمی- انقباضی در نتیجه کاهش پتانسیل تغییر حجم خاک در چرخه های تر و خشک شدن متوالی است، پیش از این نیز در پژوهش هایی از قبیل (subbaRao and satyadas (1987 و chu and mou (1973) گزارش شده است. آنها با قرار دادن نمونه های رسی بهم خورده در معرض چرخه کامل تورم و سپس خشک نمودن آنها تا رطوبت اولیه نمونه نشان دادند که تر و خشک شدن تناوبی خاک، کاهش پتانسیل تورم و انقباض خاک را به دنبال دارد [15, 16] همچنین توافیق ونالبت اغلو (۲۰۰۹) با انجام چرخه های کامل تورم و انقباض روی یک خاک متورم شونده بیان نمودند که این شرایط موجب افزایش تورم پذیری خاک می شود، در حالی که آنها قراردان خاک متورم شونده در معرض چرخه های تورم کامل و ناقص انقباض را موجب کاهش پتانسیل تغییر حجم خاک گزارش نمودند و دلیل کاهش قدرت تورمی رس ها را در تر و خشک شدن متوالی کاهش پدیده هیستریزس (Hysteresis) یا پسماند دانستند [17]. بر اساس منحنی مشخصه آب و خاک، تغییرات رطوبت با درجه اشباع خاک در حالت خشک شدن بیشتر از حالت تر شدن آن است. به عبارت دیگر در یک رطوبت با درجه اشباع خاص، میزان مکش خاک برای حالت خشک بیشتر از حالت تر است. منشاء این اختلاف را باید در شکل خلل و فرج خاک جستجو کرد. با وجود تصورات موجود در یکسان بودن قطر لوله های موئین در خاک، خلل و فرج خاک در راستای پیوسته خود ابعاد متفاوتی دارند و لوله های موئین بدون رعایت نظام معینی با اقطار مختلف به هم مرتبط می شوند و آب منفذی در هندسه غیر یکنواخت و نامنظم فضاهای خاک در تماس با فاز جامد خاک است. با خشک شدن خاک، ذرات به هم نزدیک شده و امکان چسبیدن و تشکیل ذرات دانه ای به وجود می آید که این امر و همچنین وارد شدن هوا به درون منافذ خاک موجب تغییر زاویه تماس صفحات خاک با مایع منفذی نسبت به حالت اولیه می شود. در نتیجه در مرحله خیس

شدن خاک، لایه مجاور فاز جامد به علت افزایش فضای بین ذرات اثر کمتری خواهد داشت که این امر موجب پدیده هیستریزس یا پسماند می شود، این پدیده عامل اصلی چروکیده و به هم چسبیده شدن ذرات خاک است. پدیده پسماند نشان دهنده این نکته است که در مکش معینی، رطوبت خاک حین جذب آب، کمتر از رطوبت آن حین دفع آب است. همچنین براساس پژوهش های برخی از پژوهشگران خاک متورم شونده قرار گرفته در معرض چرخه های متوالی تر و خشک شدگی، پس از هر چرخه نشانی از خستگی را بروز می دهد که در نتیجه آن، قابلیت تورم خاک پس از هر چرخه نسبت به چرخه های قبل تا رسیدن به حالت تعادل کاهش می یابد [30]. در ادامه برای بررسی تاثیر چرخه های تر و خشک شدگی بر رفتار تورمی-انقباضی خاک اولیه و بهسازی شده، مسیرهای تورم-انقباض برای هر دو نمونه خاک ذکر شده با انداز گیری تغییرات نسبت تخلخل در مقابل تغییرات درصد رطوبت برای سیکل های مختلف ترسیم شدند.

شکل (۹) نشان دهنده مسیرهای تورمی-انقباض خاک بتونیت اولیه به همراه خطوط اشباع ۵۰ و ۷۰ و ۹۰ و ۱۰۰ درصد است. دراین شکل ها نقاط ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ نشان دهنده موقعیت نمونه خاک در پایان چرخه خشک شدن در سیکل های مختلف است ضمن آنکه F, E, D, C, B نشان دهنده موقعیت خاک در پایان چرخه های کامل تر در سیکل های گوناگون هستند. نسبت تخلخل (e) و درصد رطوبت (W) اولیه نمونه ها در این اشکال با نقطه A نشان داده شده است. مراحل متوالی رفتاری خاک در اثر چرخه های تر و خشک شدن خاک به ترتیب زیر است (الف) ایجاد تورم از نقطه A تا نقطه B و سپس رخ دادن انقباض از نقطه B تا نقطه ۱. (ب) تورم از نقطه ۱ تا نقطه C و انقباض از نقطه C تا نقطه ۲ اتفاق می افتد. برای دیگر چرخه های تر و خشک نیز به صورت مشابه روند فوق تا رسیدن به حالت تعادل تکرار می شود. ضمن آنکه با

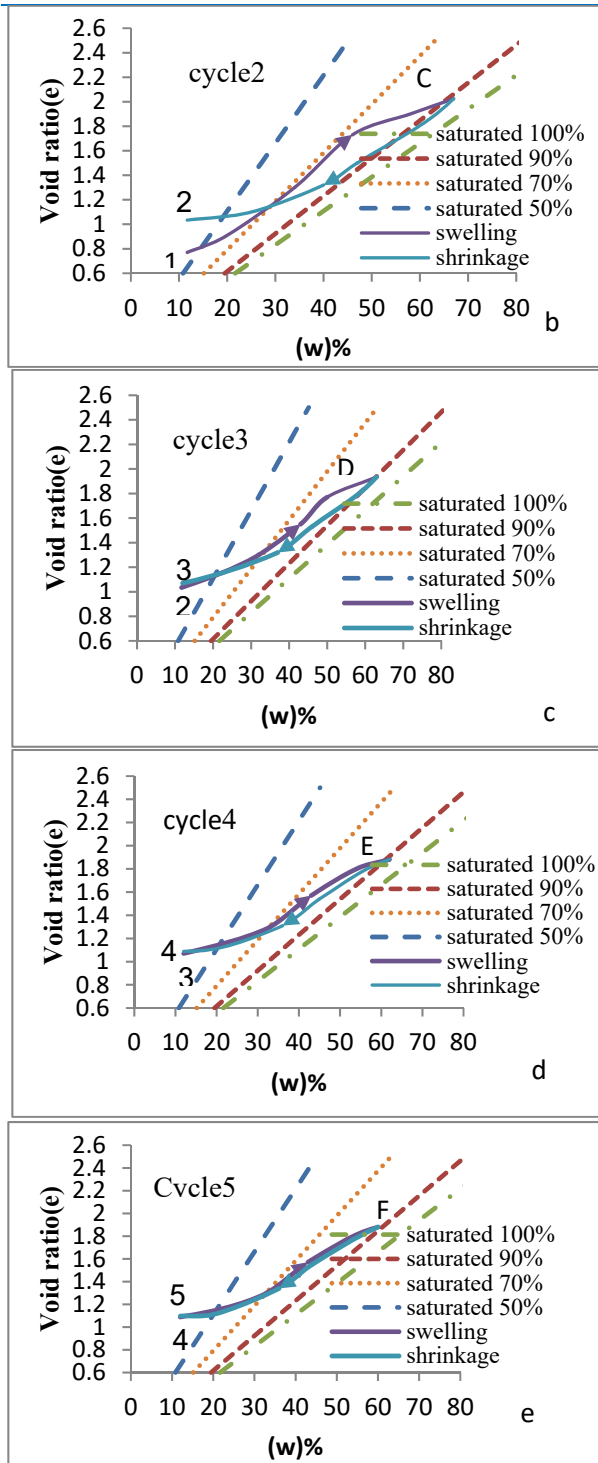
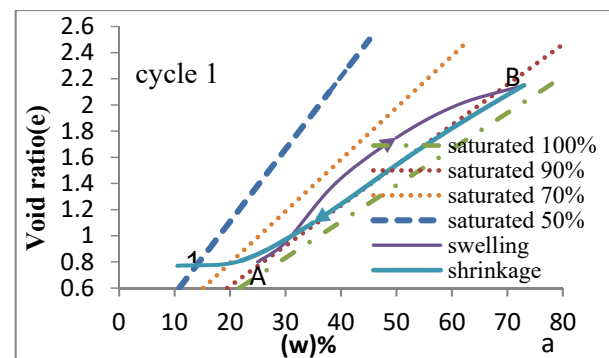


Fig. 9. Swelling-shrinkage paths of expansive clay during the wetting and drying cycles.

در ادامه نمونه تثبیت و تسلیح شده با نانوسیلیس، سرباره EAF و الیاف پلی پروپیلن تحت چرخه های تر و خشک شدگی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۱۰) قابل مشاهده می باشد. با توجه به شکل (۱۰) می توان بیان نمود که تغییرات نسبت تخلخل در برابر تغییرات درصد رطوبت به نسبت نمونه اولیه، برای نمونه

رسیدن به حالت تعادل، مسیرهای تورمی انقباضی بر هم هماهنگ شده و روی مسیر یکسانی قرار گرفتند. چرخه اول شکل (۸) وضعیت اولیه نمونه خاک (نقطه A) را نشان می دهد که دارای درصد رطوبت ۲۵ درصد و نسبت تخلخل ۰/۸ است. با افزایش درصد رطوبت، نسبت تخلخل و درجه اشباع نمونه افزایش می یابد به طوری که در پایان مرحله تورم در چرخه مذکور درجه اشباع نمونه به نزدیک ۹۵ درصد می رسد. مرحله خشک شدن در این چرخه با کاهش رطوبت و نسبت تخلخل همراه است. همان گونه که در چرخه اول شکل (۸) دیده می شود در انتهای مرحله خشک شدگی رطوبت نمونه به ۱۰/۵ درصد و نسبت تخلخل به ۰/۷۷ رسیده است. موارد ذکر شده شامل ترسیم مسیرهای تورم-انقباض در فضای مختصاتی درصد رطوبت-نسبت تخلخل تا سیکل پنجم تکرار شدند. نتایج نشان می دهند که تغییرات عمده تورم و انقباض در فاز دوم تورم و فاز دوم انقباض و عمده تغییرات نسبت تخلخل خاک در بین خطوط ۵۰ تا ۹۰ درصد اشباع رخ داده است و با ادامه چرخه های تر و خشک شدگی، مسیرهای تورم و انقباض به یکدیگر نزدیکتر شده و به یک حالت تعادلی رسیده است و شکل آن به صورت S شکل است.

شکل ۹. مسیرهای تورمی - انقباضی خاک رس متورم شونده در سیکل های تر و خشک شدگی



شکل ۱۰. مسیرهای تورمی - انقباضی خاک رس متورم شونده بهسازی شده طی سیکل‌های تر و خشک شدگی

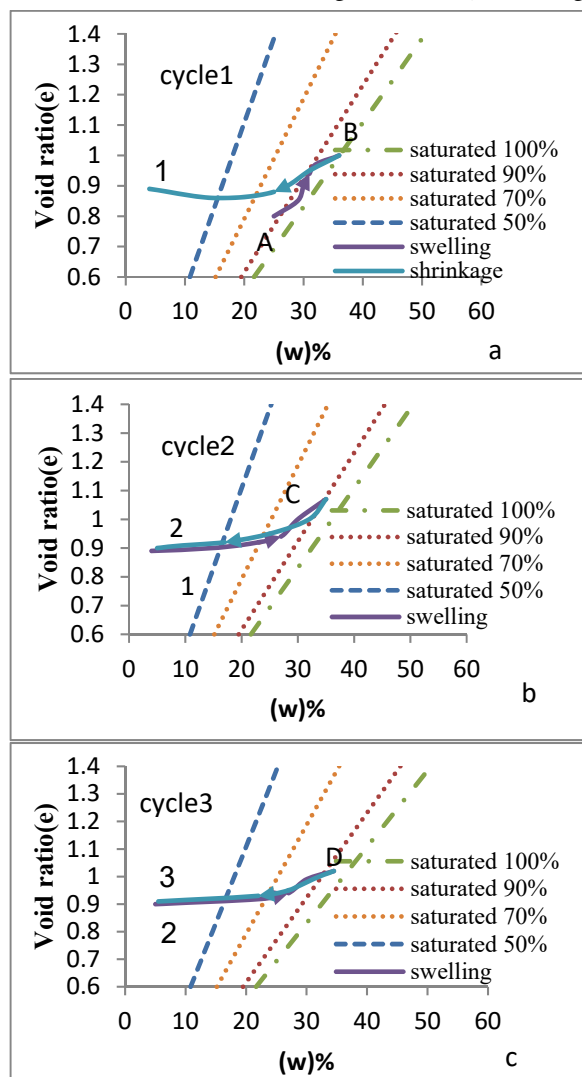


Fig. 10. Swelling-shrinkage paths for improved expansive clay during wetting and drying cycles.

جهت تفسیر بهتر تأثیر افزودنی‌ها بر کاهش پتانسیل تورم و مقایسه رفتار تورمی انقباضی نمونه اولیه و نمونه بهسازی شده، نمودارهای مسیرهای تورمی انقباضی در سیکل تعادل هر دو نمونه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به نمودار می توان تأثیرات مثبت نمونه بهسازی شده را پس از قرارگرفتن در معرض سیکل‌های تر و خشک شدگی مشاهده کرد بطوریکه نمودار از یک حالت S شکل به حالت S خوابیده درآمده و نمودار درحالت بهسازی شده به سمت راست و پایین شیف‌ت پیدا کرده است که با نتایج حاصل از مطالعات (Tripathy et al 2002, Stabragh et al. 2013) که با بهسازی خاک با

بهسازی شده کمتر می باشد. با ادامه یافتن چرخه های تر و خشک شدگی نیز از پتانسیل تورمی نمونه کاسته شده و در چرخه سوم به حالت تعادلی رسیده است. شکل مسیرهای تورمی انقباضی برای نمونه بهسازی شده به حالت S خوابیده شبیه تر است و یکی از دلایل آن این است که ساختار خاک در نمونه های تثبیت و تسلیح شده زودتر از نمونه های اولیه به یک وضعیت پایدار می رسد. همچنین قسمت عمده تغییرات نسبت تخلخل خاک در بین خطوط اشباع ۷۰ و ۹۰ درصد به وجود می آید. ضمناً تأثیر پذیری نمونه بهسازی شده در مقابل تغییرات رطوبتی درمقایسه با خاک بتئونیت کاهش می یابد به نحوی که درجات اشباع کمتر از ۷۰ درصد تأثیر زیادی بر خصوصیات تورمی انقباضی نمونه مورد مطالعه ندارند. تحقیقات برخی از محققین درمورد ساختار خاک‌های متورم شونده قبل و بعد چرخه های تر و خشک شدگی نشان دادند که ریز ساختار خاک پس از هرچرخه تر و خشک شدن دچار تغییراتی می شود که کاهش خصوصیات تورمی خاک را به دنبال دارد [30] این تغییرات ریزساختاری بعد از هرچرخه فرم یکنواختی پیدا می کند که تر و خشک شدن های بعدی خاک تغییری در آن ایجاد نخواهد کرد. بعبارت دیگر، آرایش جدید در ریز ساختار خاک پس از هرچرخه تر و خشک شدن، موجب کاهش قابلیت تورم پذیری خاک می گردد و در ادامه رسیدن خاک به یک ساختار ثابت و پایدار، توجیه کننده حالت تورمی - انقباضی آن می باشد. همچنین نتایج نشان دادند که افزودنیهای نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن و سرباره EAF تأثیر مثبتی جهت کاهش تورم دارند و به خوبی می توانند جایگزین مناسبی بجای مواد سنتی مانند آهک و سیمان و... باشند بطوریکه پس از قرارگرفتن در معرض چرخه های تر و خشک شدگی نیز موجب کاهش تورم گردیده و هیچگونه برگشت پذیری تورم نشان داده نشد. لذا این مواد از دوام مناسب نیز برخوردارند.

ژل مانند شده که ناشی از سیمانی شدن خاک بوده و به خوبی قابل تمایز با نمونه اولیه هستند.

شکل ۱۲. تصاویر SEM (a) رس متورم شونده بهسازی نشده و (b) رس متورم شونده بهسازی شده

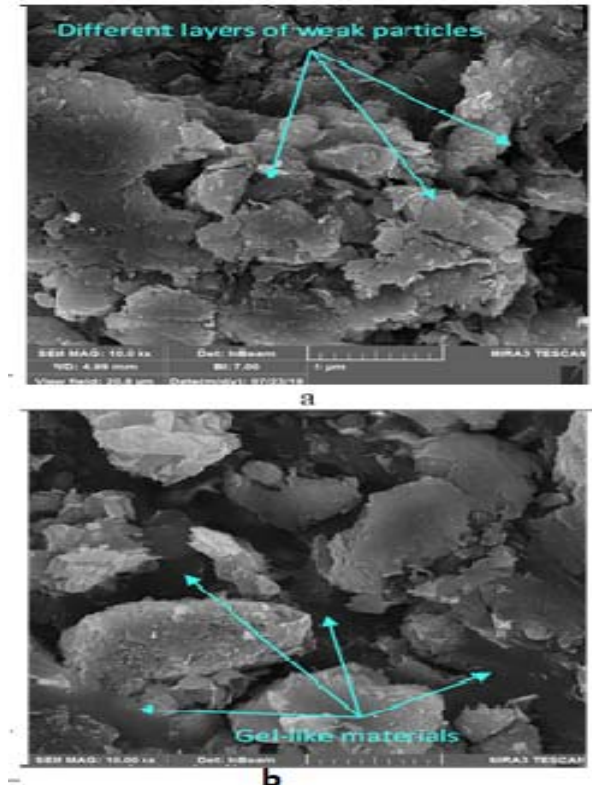


Fig. 12. SEM micrographs: a) untreated expansive clay and b) treated expansive clay

تست (XRD) روی نمونه‌های بهسازی نشده و بهسازی شده نیز انجام گرفت که نتایج آن در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند. مطابق نتایج، خاک متورم شونده چندین پیک شامل کانی‌های کوارتز و مونت موریلونیت را نشان می‌دهد در حالیکه در نمونه بهسازی شده، کاهشی چشمگیر در شدت این کانی‌ها مشاهده می‌شود و در بعضی حالت‌ها نیز هم‌زمان با حذف پیک‌های مرتبط با این کانی‌ها، پیک‌هایی متناظر با مصالح سیمانی شده شامل (CSH) مشاهده می‌شود. این نتایج تایید کننده تغییرات چشمگیر در ریز ساختار خاک به علت بهسازی با مواد استفاده شده در این پژوهش است، که سبب کاهش پتانسیل تورم و افزایش مقاومت نمونه‌ها نیز شد. هر چند طبق نتایج پیک‌های جدید متناظر با (CSH) برای نمونه بهسازی شده یافت شدند، شدت پیک‌های متناظر با (CSH) خیلی زیاد نیست و این نوع رفتار برای نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس،

افزایش سربار جهت کاهش تورم خاک استفاده نموده‌اند همخوانی دارد. بنابراین بهسازی خاک با استفاده از نانوسیلیس و زباله صنعتی نیز می‌تواند نتایج یکسانی در خصوص کنترل تورم خاک پس از سیکل‌های تر و خشک شدگی در مقایسه با روش‌های مکانیکی داشته باشد. همچنین با توجه به شکل (۱۱) می‌توان مشاهده نمود که نمونه تثبیت شده کمتر تحت تاثیر تغییرات رطوبت قرار دارند و میزان دامنه تغییرات نسبت تخلخل بسیار کمتر از نمونه اولیه است [9-18].

شکل ۱۱. مسیرهای تورمی- انقباضی خاک متورم شونده اولیه و بهسازی شده در شرایط تعادلی

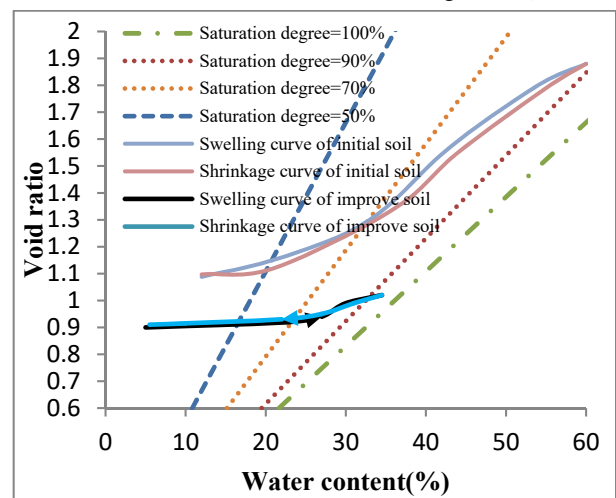


Fig. 11. Equilibrium condition of swelling-shrinkage paths for the initial and improved expansive clay

برای بررسی تاثیر تثبیت کننده‌ها بر ریز ساختار خاک، آزمایش SEM روی خاک اولیه و خاک تثبیت شده انجام گرفت که در شکل (12a,b) نشان داده شده است. شکل‌های (a) و (b) به ترتیب نشان دهنده ساختار خاک متورم شونده و نمونه بهسازی شده هستند. در شکل (۱۲a) ساختار لایه‌ای و ضعیف ذرات خاک قابل مشاهده است و اصولاً تعداد لایه‌های زیاد و اندازه کوچک ذرات با سطح مقطع زیاد منجر به جذب آب زیاد و پتانسیل بالای تورم می‌شود. باتوجه به شکل (۱۲b) می‌توان مشاهده نمود که از میزان لایه‌ای بودن خاک کمتر شده و ساختار خاک متراکم‌تر شده است که این امر نهایتاً موجب جذب آب کمتر و موجب کاهش پتانسیل تورم خاک شده است. این نتایج با پژوهشهای برخی دیگر از پژوهشگران همچون (Kalkan ۲۰۱۱) نیز همخوانی دارد [31]. همچنین باتوجه به شکل b می‌توان مشاهده نمود که مواد و ذرات خاک به صورت

نتیجه گیری

در ابتدا با بررسی و تأثیر افزودن های نانوسیلیس و زباله صنعتی و الیاف پلی پروپیلن بر خاک متورم شونده بتونیت، مشخص شد که ترکیب (بتونیت + ۰/۵ درصد نانوسیلیس + ۰/۶ درصد الیاف و ۱۰ درصد زباله صنعتی) برای کنترل تورم بهینه است که موجب کاهش تورم از میزان ۷۵/۲۶ درصد نمونه اولیه به ۱۱ درصد در نمونه های یک روزه شد که کاهش ۸۵ درصدی تورم نسبت به نمونه اولیه را به دنبال داشت. پس از آن با اعمال یکسری آزمایش های تر و خشک شدگی تحت سربار ثابت ۱ کیلو پاسکال روی یک نمونه خاک بتونیت متورم شونده و نمونه تثبیت و تسلیح شده، به بررسی رفتار تورمی و انقباضی آن تحت چرخه های متوالی تر و خشک شدگی پرداخته شد که براساس آنها موارد ذیل قابل نتیجه گیری است.

- شرایط تعادل برای یک خاک با تورم پذیری بالا به ازاء فشار ۱ کیلو پاسکال، بعد از پنج چرخه تر و خشک اتفاق افتاد و همچنین پتانسیل تورم نیز نسبت به حالت اولیه به میزان ۴۱ درصد کاهش یافت.

- شرایط تعادل برای خاک متورم شونده تثبیت و تسلیح شده با نانوسیلیس، زباله صنعتی و الیاف پلی پروپیلن نیز به ازاء فشار ۱ کیلو پاسکال، بعد از چرخه سوم اتفاق افتاد و همچنین پتانسیل تورم نیز به نسبت حالت اولیه به میزان ۸۱/۸ درصد کاهش نشان داد به عبارت دیگر می توان گفت علاوه بر اینکه مواد افزودنی فوق باعث کاهش تورم شده اند، حتی موجب کاهش سیکل های تر و خشک شدگی برای رسیدن به حالت تعادل شده است. به عبارت دیگر مشخص شد که افزودنی ها نه تنها پتانسیل تورم را به صورت چشمگیر کاهش دادند، بلکه دارای دوام مناسب در چرخه های تر و خشک شدگی متوالی نیز بودند.

مسیرهای تورمی و انقباضی براساس پارامترهای نسبت تخلخل - درصدرطوبت، برای نمونه خاک مینا با تورم پذیری بالا که در معرض چرخه های تر و خشک

مطابق انتظار است. مهمترین دلیل همچنین رفتاری را می توان به مصرف شدن (CH) به وسیله ذرات نانوسیلیس به علت واکنش های پوزولانی ارتباط داد [32].

شکل ۱۳. نمودار XRD بتونیت و بتونیت بهسازی شده

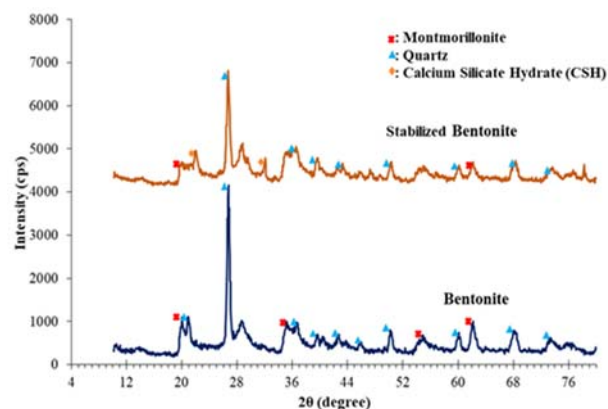


Fig. 13. XRD patterns of bentonite and improved stabilized bentonite sample

در پایان لازم به ذکر است که قبل از هرگونه استفاده در پروژه های بهسازی خاک، یک مقایسه اقتصادی لازم است که بین تثبیت کننده های سنتی و جدید انجام گیرد. هر چند هزینه خالص اولیه نانوسیلیس بیشتر از تثبیت کننده های سنتی مانند آهک و سیمان است، اما نانوسیلیس دارای مزیت های متعددی در مقایسه با سیمان و آهک هست که از آن جمله می توان به مواردی مانند سازگاری مناسب با محیط زیست، سرعت در استفاده و ساخت و ساز با آن اشاره کرد. همچنین هزینه کمتری برای انتقال نانوسیلیس به محل پروژه پرداخت می شود که مهمترین دلیل آن نیاز به حجم کمتری از نانوسیلیس - معمولاً کمتر از ۱ درصد وزنی خاک - برای تثبیت خاک است [34-35]. به علاوه سرباره EAF به عنوان مواد زائد کارخانه فولاد شناخته می شوند که نه قابل فروش و استفاده هستند و نه نیاز به آماده سازی خاصی دارند. به دلیل حجم بالای تولید این مصالح غیر قابل استفاده در جهان و ایران، به همراه مشکلات ناشی از نگهداری این مواد که مسائل و مشکلات عدیده زیست محیطی و اشغال محیط کارخانه ها را در پی دارد، استفاده از این مصالح در پروژه های تثبیت خاک می تواند کاهش دهنده مخاطرات زیست محیطی و هزینه های ناشی از دپو و نگهداری و اشغال محیط و افزایش دهنده توسعه پایدار باشد.

- mixtures in cyclic controlled-suction Drying and wetting. *Eng. Geol.* 8,213-226.
- [7] Wheeler, S.J., Sharma, R.S., Buisson, M.S.R., 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behavior in unsaturated soils. *Géotechnique* 53 (1), 41-54.
- [8] Nowamooz, H., Masroufi, F., 2008. Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests. *Engineering Geology* 101, 154-164.
- [9] Tripathy, S., Subba Rao, K.S., Fredlund, D.G., 2002. Water content-void ratio swell-shrink Path so compacted expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal* 39, 938-959.
- [10] Argaw, A.A., Nihar, R.P. (2016). Behavior of expansive soil Treated with Steel Slag Rice Husk Ash, and Lime. *ASCE, ISSN.899-1561*.
- [11] Castellanos, E., Villar, M.V., Romero, E., Lloret, A., Gens, A., 2008. Chemical impact on the hydro-mechanical behavior of high density FEBEX bentonite. *Physics and Chemistry of the Earth* 33, 516-526.
- [12] Musso, G., Romero, E., Gens, A., Castellanos, E., 2003. The role of structure in the chemically induced deformations of FEBEX bentonite. *Applied Clay Science* 23(1-4), 229-237.
- [13] Popescu, M. (1980). Behaviour of Expensive Soils with crumb structures. In: *Proceeding of 4 th International Conference on Expansive Soils, Denver, Colo.*, Vol. 1, pp. 158-171.
- [14] Rao, S.M., Shivananda, P., 2005. Role of osmotic suction in swelling of salt amended clays. *Canadian Geotechnical Journal* 42(1), 307-315.
- [15] Chu, T.Y. and Mou, C.H., 1973. Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction. In: *Proceeding of the 3rd International Conference on Expansive Soils, Haifa*, pp. 177-185.
- [16] Subba Rao, K.S. and Satya das, G.C. (1987). Swelling Potentials With cycles of swelling and partial shrinkage. In: *Proceeding of 6 nd International Conference on Expansive Soils, New Delhi, India*, Vol. 1, pp 137-147.
- [17] Tawfiq, S. and Nalbantoglu, Z. (2009). Swell-Shrink behavior of expansive clays. In: *Proceeding of 2 nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, North Cyprus*, pp. 336-341.
- [18] Estabragh, A.R., Moghadas, M., Javadi, A.A., 2013. Effect of quality of water on the behavior of expansive soil during wetting and drying. *Soils Found.* 53 (5), 617-627.

شدگی قرار گرفته یک منحنی S شکل را نشان می‌دهد که این حالت در نمونه تثبیت و تسلیح شده به حالت S خوابیده است که نشانگر تغییرات کمتر تخلخل در برابر تغییرات درصد رطوبت است.

-تغییر فازهای انقباض در درجات اشباع معینی صورت می‌گیرد. بدین صورت که در نمونه اصلی درجه اشباع ۹۰ درصد مرز گذر انقباض از فاز ساختاری به نرمال و همچنین درجه اشباع ۵۰ درصد مرز گذر انقباض از فاز نرمال به پسماند است که تغییر فاز آخر، در رطوبتی معادل با حد انقباض خاک روی می‌دهد.

-در نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده بیشترین تغییرات در فاصله درجه اشباع ۷۰ و ۹۰ درصد رخ می‌دهد در نتیجه می‌توان بیان نمود که نمونه‌های تثبیت و تسلیح شده تغییرات تورمی انقباضی کمتری در برابر تغییرات رطوبت از خود نشان می‌دهند و درجه اشباع ۷۰ درصد مرز گذر انقباض از فاز نرمال به پسماند است.

-اعلام تعارض منافع:

-نویسندگان اعلام می‌دارند هیچگونه تعارض منافی وجود ندارد.

منابع

- [1] Ferber, V., Auriol, J.C., Cui, Y.J., Magnan, J.P., 2009. On the swelling potential of compacted high plasticity clays. *Engineering Geology* 104, 200-210.
- [2] Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- [3] Al-Mukhtar, M., Khatib, S., and Alcover, J. F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139, 17-27.
- [4] Mishra, A.K., Dhawan, S., Rao, S.M. (2007). Analysis of Swelling and Shrinkage Behavior of Compacted Clays. *Geotechnical and Geological Engineering and International Journal*, Vol. 26, pp. 289-298.
- [5] Jones, D.E., Jones, K.A., 1987. Treating expansive soils. *Civil Engineering* 57 (8), 62-65.
- [6] Alonso, E.E., Romero, E., Hoffmann, C., Carcia-Escudero, E., 2005. Expansive bentonite -sand

- modified by silica fume. *Applied Clay Science* 52, 345-352.
- [32] Bahmani, S. H., Huat, B. K., Asadi, A., and Farzadnia, N. 2014. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement. *Construction and Building Materials*, 64, 350–359.
- [33] Hu, A., K., Chen, X., Chen, J., and Ren, X. 2018. Laboratory investigation of the effect of nano-silica on unconfined compressive strength and frost heaving characteristics of silty clay. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*; 55(9), 353-357.
- [34] Vakili AH, Shojaei SI, Salimi M, bin Selamat MR, Farhadi MS (2020) Contact erosional behaviour of foundation of pavement embankment constructed with nanosilica-treated dispersive soils. *Soils Found*.
- [19] Estabragh, A.R., Parsaei ,B.,Javadi, A.A.,2014 Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil. *Soils Found*. 55 (2),304–314.
- [20] Al-Rawas, A. A., and Goosen, M. F. (Eds.). (2006). *Expansive soils: recent advances in characterization and treatment. Taylor and Francis*. p. 526
- [21] Goodarzi, A.R., Akbari, H.R., Salimi, M., (2016), Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume, *Applied Clay Science* 132–133 (2016) 675–684.
- [22] Ekrem Kalkan., 2011. Impact of wetting-drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume. *Applied clay science* 52, 345-352.
- [23] Kalhor, A., Ghazavi, M., Roustaei, M., and Mirhosseini, S. M. 2019. Influence of nano-SiO₂ on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, doi:10.1016/j.coldregions.2019.03.011.
- [24] Abbasi, N. 2011. The role of anions in dispersion potential of clayey soil. *J. Agri. Eng. Res.* 12(3):15-30.
- [25] Huang, T. 2011. Clay Stabilization with Nano particles. *Patent No. US 20110000672 A1. US 12/277,825*.
- [26] Ugwu, O.O., Ogboin, A.S., Nwoji, C.U., 2018. Characterization of Engineering Properties of Active Soils Stabilized With Nanomaterial for Sustainable Infrastructure Delivery. *Front. Built Environ.* 4:65. doi: 10.3389/fbuil.2018.00065.
- [27] Antonio A.S. Correia ,Paulo J. Venda Oliveira, Dione G. Custodio.(2015). Effect of polypropylene fibers on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilized with binders. *Geotextiles and Geomembranes*, 43, 97-106.
- [28] Al- Mukhtar, M., Khattab, S., & Alcover, J. F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139, 17-27.
- [29] Alonso, E.E., Romero, E., Hoffmann, C., Carcia-Escudero, E., 2005. Expansive bentonite –sand mixtures in cyclic controlled-suction Drying and wetting. *Eng. Geol.* 8, 213–226.
- [30] AlHomoud, A.S., Basma, A.A., Husein Malkawi, A. I., Al-Bashabsheh, M.A., 1995. Cyclic swelling behavior of clays. *J. Geotech. Eng.* 121(7), 562–565.
- [31] Kalkan, E. 2011. Impact of wetting–drying cycles on swelling behavior of clayey soils

The effect of wetting and drying cycles on the swelling-shrinkage behavior of the expansive soils improved by Nanosilica, polypropylene fibres and EAF slag

Sajad Shahsavani¹, Amir Hossein Vakili^{2*}, and Mehdi Mokhberi³

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zand Institute of Higher Education, Shiraz, Iran. Young Researcher and Elite Club, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.

*a.vakili@Zand.ac.ir

Abstract

The problematic expansive soils are spread in all parts of the world. The water content variations cause large soil volume changes and consequently, great losses on the infrastructure. The expansive clayey soils show swelling - shrinkage behaviour respectively in wetting and drying cycles. In this study, the swelling-shrinkage behaviour of a natural severely expansive bentonite was verified in its natural state and after being improved by nanosilica, polypropylene fibres, and the EAF slag. Firstly, the swelling potential of the natural soil was determined and then, different combinations of the stabilizers' effects on the swelling potential were assessed by means of oedometer tests under 1 kPa loading. The swelling potential of the untreated expansive clay sample was measured as 75.26%, thus the soil sample provided for the study was considered in the very high expansion category. The results indicated that the swelling potential of one-day cured samples by the addition of 0.5% of nanosilica decreased by 22.8%. The improvement by means of 0.5% of nanosilica and 0.6% of polypropylene fiber, and the optimum composition of 0.5% of nanosilica, 0.6% of polypropylene fibers, and 10% of EAF slag decreased the swelling potential by 70 and 85%, respectively. Afterwards, the wetting and drying cycles' effects on the swelling and shrinkage of the natural soil and that of the best identified combination of additives were verified by means of modified oedometer. The measurement of the axial deformation of soil, void ratio, and the saturation ratio during the swelling-shrinkage cycles indicated that the wetting and drying cycles caused the reduction of swelling potential of both untreated/natural and improved expansive soil samples. Additionally, the variation of void ratio versus soil water content during the wetting and drying cycles showed that the variation was an S-shape curve, which was almost a horizontal S shape for the improved soil. It was observed that the equilibrium occurred in lower number of wetting and drying cycles for the improved sample, compared to that of the natural soil. In addition, for the untreated samples, the highest void ratio variations occurred at saturation degree between 50 and 90%. However, for improved soil sample, the highest void ratio variations were recorded at saturation degree between 70 and 90%, reflecting the reduction of negative effects of water content variations on volume changes when the expansive soil samples were improved. Consequently, it was concluded that the additives used in the study not only decreased the swelling potential of expansive soil samples with very high expansion degree, but also decreased the swelling-shrinkage behaviour of the soil and increased the durability of the samples during wetting and drying cycles.

Keywords: Expansive soil, wetting and drying cycles, modified oedometer, soil improvement.