اثر کیفیت مایع مستغرق‌کننده بر خواص یک خاک متورم‌شونده در چرخه‌های تر و خشک

مسلم بابائی، علی رئیسی استبرق*، جمال عبدالهی، محدثه امینی، غلامعلی وکیلی؛ دانشگاه تهران، گروه آبیاری وآبادانی

تاریخ: دریافت ۹۶/۱۰/۲۰ پذیرش ۹۸/۰۲/۲۹

چکیده

در این پژوهش، اثر مایع‌های مستغرق‌کننده آب مقطر و محلول‌های حاوی غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول بر خواص تورمی یک خاک متورم‌شونده تحت سربار ثابت، با اجرای چرخه‌های تر و خشک بررسی می‌شود. نمونه‌های خاک متراکم‌شده به‌روش تراکم استاتیکی تهیه شد. چرخه‌های تر و خشک با استغراق نمونه‌ها با آب مقطر و محلول‌های ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول در دستگاه تحکیم اصلاح‌شده تحت سربار ۱۰ کیلوپاسکال صورت پذیرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد استفاده از محلول‌های گلیسرول باعث کاهش تعداد چرخه‌ها و رسیدن به حالت تعادل در زمان کوتاه‌تر در مقایسه با آب مقطر می‌شود به‌طوری‌که این روند به غلظت گلیسرول بستگی دارد. نتایج تغییرات نسبت تخلخل در مقابل درصد رطوبت، بیان‌گر به تعادل رسیدن پدیده پسماند با افزایش تعداد چرخه‌ها است. مسیرهای تورمی–انقباضی عموماً به‌صورت S است و بیش‌ترین تغییرشکل خاک بین خطوط اشباع ۴۰ و ۸۰ درصد رخ می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های متورم‌شونده، گلیسرول، چرخه‌های تر و خشک، مسیرهای تورمی–انقباضی، سربار

مقدمه

خاک‌های متورم‌شونده معمولاً به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که پتانسیل کافی برای تورم و انقباض به‌دلیل تغییر مقدار رطوبت دارند. این خاک‌ها سطح وسیعی از جهان به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک را پوشش داده‌اند[۱]. مناطقی که به‌وسیلهٔ این خاک‌ها پوشیده شده

*نویسنده مسئول raeesi@ut.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

و در معرض تغییر حجم ناشی از نوسانات رطوبتی قرار می‌گیرند، مستعد بروز خسارت بر سازه‌های بنا شده روی آنها می‌شود. در ایالات متحده امریکا، هزینهٔ متوسط خسارات ناشی از خاک‌های متورم‌شونده به ساختمان‌ها، جاده‌ها، فرودگاه‌ها و خطوط انتقال آب در حدود ۹ میلیارد دلار در سال تخمین زده شده است که این مقدار بیش از دو برابر تلفات متوسط سالانه ناشی از زلزله‌ها، سیل‌ها، گردبادها و طوفان‌ها در این کشور است [۲]، [۳]. شناخت کافی و دقیق از رفتار این خاک‌ها برای جلوگیری از ورود آسیب به سازه‌هایی که روی آنها بنا می‌شود، ضروری به‌نظر می‌رسد. عوامل متعددی از جمله میزان رطوبت، نوع خاک، میزان سربار و مقدار مواد غیرتورمی بر پتانسیل تورمی این خاک‌ها مؤثر است [٤]، [٥]. به‌طورکلی پتانسیل تورمی این خاک‌ها با افزایش وزن واحد خشک و کاهش میزان رطوبت، افزایش می‌یابد [٦]، [٧].

به‌سازی این دسته از خاک‌ها همواره مورد توجه پژوهش‌گران مختلف بوده است. برای به‌سازی ساختمان این خاک‌ها و کاهش پتانسیل تورمی آنها معمولاً دو روش شیمیایی و مکانیکی وجود دارد [۸]. در روش شیمیایی از افزودنی‌های شیمیایی مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و رزین استفاده می‌شود به‌طوری‌که با افزودن این مواد به خاک با ایجاد یک رشته واکنش‌های شیمیایی، پتانسیل تورمی خاک کاهش می‌یابد. در روش مکانیکی با اعمال سربار و یا افزودن موادی از جمله الیاف مصنوعی و طبیعی موجبات بهبود خواص مکانیکی خاک مانند کاهش پتانسیل تورمی فراهم می‌شود. یکی دیگر از روش‌هایی که در عین سادگی و صرفه اقتصادی بسیار مؤثر واقع شده است، اعمال چرخه‌های تر و خشک متوالی روی خاک متورم‌شونده است. وقتی که این خاک‌ها با کاهش رطوبت خشک می‌گردند، پدیدهٔ انقباض روی می‌دهد و افزایش رطوبت بعدی موجب تورم آن‌ها می‌شود. این دو پدیده تحت عنوان سیکل یا چرخه تر و خشک نامیده می‌شوند. چرخه‌های تر و خشک شدن خاک می‌تواند باعث کاهش پتانسیل تورمی و انقباضی خاک‌های متورم‌شونده شود. در سال‌های اخیر پژوهش‌گران بسیاری، پتانسیل تورمی خاک‌های متورم‌شونده تحت تأثیر چرخه‌های تر و خشک را بررسی کرده‌اند. تعدادی از پژوهش‌گران، نمونه‌های تهیه شده از خاک متورم‌شونده را به حداکثر تورم رساندند و پس از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

آن با اعمال درجه حرارت بر نمونه تا رسیدن به رطوبت اولیه، آن را خشک کردند. آنها دریافتند که با تکرار این عمل در نمونه‌های خاک پس از هر دوره تورم و انقباض، علاوه بر کاهش میزان تورم و انقباض علائم تغییرشکل غیرقابل بازگشت کاهش می‌یابد [۹]، [۱۰]. دیف و بلومل، با انجام چرخه‌های تر و خشک روی نمونه‌هایی از یک خاک متورم‌شونده دریافتند که پس از اعمال حداقل ۳ یا ٤ چرخه تر و خشک شدن، تغییرشکل ناشی از تورم و انقباض کاهش می‌یابد [۱۱]. تریپاتی و همکاران، با انجام چرخه‌های تر و خشک تحت تأثیر سربارهای مختلف روی نمونه‌هایی از یک خاک متورم‌شونده نتیجه گرفتند که با افزایش سربار هم قدرت تورمی این خاک‌ها کاهش می‌یابد و هم میزان تغییرشکل خاک ثابت می‌شود یعنی نمونه زودتر به حالت تعادل می‌رسد [۱۲]. صدیقا و همکاران، اثر کیفیت آب منفذی را بر قدرت تورمی یک خاک رسی متورم‌شونده بررسی کردند [۱۳]. هم‌چنین پژوهش‌گران دیگری مانند استبرق و همکاران، با بررسی اثر کیفیت آب مستغرق‌کننده روی یک خاک متورم‌شونده طی چرخه‌های تر و خشک و با سربار ثابت اعلام کردند که قدرت تورمی و تعداد چرخه‌های لازم برای رسیدن به تعادل تحت تأثیر کیفیت آب مستغرق‌کننده قرار دارد [١٤]. رائو و همکاران، اثر سربار و دانسیته خشک را روی چرخه‌های تر و خشک یک خاک متورم‌شونده بررسی و نتیجه‌گیری کردند که دانسیته خشک عامل مهمی در رسیدن به تعادل می‌باشد [١٥]. استبرق و همکاران، با انجام آزمایش‌های متعدد نتیجه‌گیری کردند که کیفیت آب منفذی نقش مهمی را در زمان رسیدن به تعادل و کاهش قدرت تورمی و انقباضی یک خاک متورم‌شونده رسی دارد [١٦]. پژوهش‌گران بسیاری نتیجه گرفتند که خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های هیدروکربنی تغییر می‌کند [۱۷]-[۲۱]. سینگ و همکاران، با انجام آزمایش‌های مقاومتی روی دو نوع خاک آلوده به مواد هیدروکربنی دریافتند که خواص فیزیکی خاک تغییر کرده و مقاومت آن کاهش می‌یابد [۲۲]. هم‌چنین استبرق و همکاران نتیجه گرفتند که در خاک آلوده به اتانول و گلیسرول، شاخص تحکیم کاهش و مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد و این تغییرات تابعی از غلظت مواد هیدروکربنی است [۲۳]. بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون پژوهشی در مورد تأثیر آلاینده‌های هیدروکربنی بر خواص تورمی و انقباضی خاک‌های رسی در طول چرخه‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

تر و خشک صورت نگرفته است. هیدروکربن‌ها دسته‌ای از مواد هستند که در ساختار مولکولی آنها، اتم‌های عنصرهای کربن و هیدروژن شرکت دارند. آلاینده‌های هیدروکربنی شامل طیف وسیعی از ترکیبات آلی است که عمدتاً بر اثر پروسه‌های صنعتی تولید و به محیط‌زیست وارد می‌شوند. این ترکیبات در مقایسه با ترکیبات معدنی (غیر از مواد رادیواکتیو) عمدتاً اثرات زیست‌محیطی گسترده‌تری دارند. در مناطق شهری و یا صنعتی ممکن است مواد آلاینده هیدروکربنی وارد آب‌های جاری سطحی و زیرزمینی شود و آب حاصل در مناطق دوردست در پروژه‌های عمرانی مانند بهسازی خاک و غیره استفاده شود. در سال‌های اخیر بررسی اثر چرخه‌های خشک و تر متوالی بر خواص تورمی و انقباضی خاک‌های متورم‌شونده در شرایط مختلف (مایع منفذی، مایع مستغرق‌کننده و سربار) مورد توجه پژوهش‌گران مختلف از جمله استبرق و همکاران [۱۶]–[۲۴] و رزنبالم و زاپاتا [۲۵] قرار گرفته است. بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون اثر آب حاوی گلیسرول به‌عنوان مایع مستغرق‌کننده بر پتانسیل تورمی و انقباضی این خاک‌ها بررسی نشده است. بنابراین هدف از این کار پژوهشی عبارت است از بررسی تأثیر آب حاوی گلیسرول بر پتانسیل تورمی و انقباضی یک خاک متورم‌شونده در چرخه‌های تر و خشک تحت تأثیر سربار ثابت و مقایسهٔ نتایج آن با پتانسیل تورمی و انقباضی ناشی از آب مقطر در طی چرخه‌های تر و خشک و تحت اثر سربار ثابت. در این پژوهش آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک تهیه شده با روش تراکم استاتیکی با استفاده از محلول‌های گلیسرول با غلظت‌های مختلف انجام گرفت و نتایج حاصل با یک‌دیگر مقایسه و در مورد آنها بحث شد. نتایج حاصل از این کار آزمایشگاهی بر اساس تغییرشکل حجمی و رابطه نسبت تخلخل و رطوبت ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

۱. خاک

خاک موجود، نوعی خاک رسی (کائولین) با قابلیت تورم‌پذیری متوسط (مطابق با معیار طبقه‌بندی مک‌کین [۲۶]) بود. بنابراین به‌منظور تهیه خاک متورم‌شونده با پتانسیل تورمی زیاد مخلوط‌هایی از کائولین و بنتونیت (با درصدهای وزنی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) تهیه شد. سپس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

میزان تورم آزاد آنها مطابق با استاندارد ASTM-D4546-08 برای مخلوط‌های تهیه شده، تعیین شد. از مخلوط‌های تهیه شده مخلوط ۸۰٪ کائولین و ۲۰٪ بنتونیت به‌عنوان خاک متورم‌شونده مطابق با معیار طبقه‌بندی مک‌کین [۲۶] برای اعمال چرخه‌های تر و خشک انتخاب شد. مشخصات مکانیکی و فیزیکی خاک اصلی (۸۰٪ کائولین و ۲۰٪ بنتونیت) مطابق با استاندارد ASTM تعیین شد، که در جدول ۱ قابل مشاهده است و خاک انتخاب شده براساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) از نوع رس با خواص پلاستیسیته بالا (CH) است. نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان می‌دهد وزن واحد حجم خشک بیشینه این خاک ۱۶/۲۷ kN/m^3 و رطوبت بهینه آن ٪۱۸/۱۱ است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک استفاده شده

مشخصه	مقدار
حد روانی (٪)	۶۷
حد خمیری (٪)	۳۰
شاخص خمیری (٪)	۳۷
درصد عبوری از الک ۲۰۰	۱۰۰
درصد میزان رس (کوچک‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر)	۸۸
درصد میزان سیلت	۱۲
طبقه‌بندی متحد (USCS)	CH
تورم آزاد (٪)	۲۸/۱۵
رطوبت بهینه (٪)	۱۸/۱۱
وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m^3)	۱۶/۲۷
وزن مخصوص (G_S)	۲/۷۵

۲. آب

آب مقطر استفاده شده دارای اسیدیته ۷/۴ و هدایت الکتریکی ۰/۱۸ دسی‌زیمنس بر متر است. از این آب برای تهیه نمونه‌ها و مستغرق کردن آنها و نیز تهیهٔ محلول گلیسرول با غلظت‌های مورد نظر استفاده شد.

۳. گلیسرول

گلیسرول به‌عنوان ماده آلاینده به‌علت محلول بودن در آب انتخاب شد. گلیسرول در کارخانه‌های شیمیایی، صنایع داروسازی و غیره، استفاده می‌شود و فاضلاب این تأسیسات که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

حاوی آن است، وارد آب‌های سطحی می‌شود. گلیسرول استفاده شده طبق اطلاعات ارائه شده به‌وسیلهٔ تولیدکننده آن دارای چگالی ۱/۲٦ (g/cm^3)، ثابت دی‌الکتریک ٤۰/۱ و گرانروی ۱۵۰۰ (cp) است. در این پژوهش از گلیسرول با غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد (حجمی–حجمی با آب مقطر) استفاده شد. لازم به ذکر است که ثابت دی‌الکتریک غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول به‌صورت میانگین حجمی محاسبه شد. چگالی محلول ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول به‌ترتیب ۱/۰۲ و ۱/۰٤۵ (g/cm^3)، ضرایب ثابت دی‌الکتریک برای محلول ۱۰ درصد ۷٤/۹ و محلول ۲۰ درصد ۷۱/۸ و گرانروی آنها نیز به‌ترتیب ۱/۲۵ و ۱/۹ است.

٤. تهیهٔ نمونه‌های آزمایشی

برای تهیه نمونه‌های استفاده شده، ابتدا نقطه‌ای دلخواه که دارای رطوبت ۱٤٪ (٪٤ کم‌تر از رطوبت بهینه) و وزن واحد حجم خشک ۱۵/۷ (kN/m^3) است، روی شاخه خشک منحنی تراکم استاندارد خاک استفاده شده (۸۰٪ کائولین و ۲۰٪ بنتونیت) انتخاب شد. در شاخه خشک منحنی تراکمی، ساختمان ذرات خاک به‌صورت فولکوله است و در نتیجه قابلیت تورم‌پذیری بیش‌تری دارد [۲۷]، [۲۸]. برای ساخت نمونه‌ها با افزودن آب، رطوبت اولیه خاک به‌میزان رطوبت ۱٤٪ انتخابی روی شاخه خشک منحنی رسانده شد و به‌منظور توزیع یکنواخت رطوبت در ذرات خاک به‌مدت ۲٤ ساعت در پلاستیک دربسته نگه‌داری شد. هم‌چنین برای تهیه نمونه‌های یکنواخت و قابل تکرار، یک قالب از فولاد ضد زنگ طراحی و ساخته شد. قالب طراحی‌شده شامل سه بخش بالایی، میانی و انتهایی بود به‌طوری‌که ابعاد بخش میانی دقیقاً برابر قالب دستگاه تحکیم (ادئومتر) است. هم‌چنین قالب ساخته شده دارای یک پیستون بود که برای متراکم کردن نمونه داخل قالب استفاده می‌شد. در سطح داخلی قالب قبل از متراکم کردن نمونه به‌منظور کاهش اصطکاک در هنگام تراکم از روغن سیلیکون استفاده شد. نمونه‌ها در سه لایه و با انجام روش تراکم استاتیکی در یک دستگاه بارگذاری تهیه شدند. بار وارده به هرلایه از روش سعی و خطا و با سرعت ثابت بارگذاری ۱/۵ (mm/min) به‌منظور رسیدن به وزن واحد حجم خشک انتخابی ۱۵/۷ (kN/m^3)، در نهایت به میزان ۸۰۰ کیلوپاسکال برای هر لایه انتخاب شد. قبل از قرار دادن لایه بعدی،

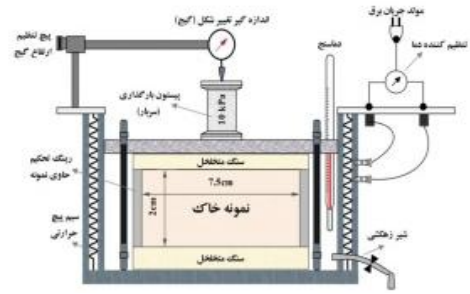
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

شیارهایی در سطح لایه متراکم شده به‌منظور برقراری پیوند مناسب بین لایه‌های مجاور خاک اعمال شد.



۱. حلقه پایینی
۲. حلقه میانی
۳. حلقه بالایی
٤. پایه آلومینیومی
۵. صفحه بارگذاری
٦. دستگاه تک‌محوری

شکل ۱. قالب تراکم استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها



شکل ۲. نمای شماتیک دستگاه تحکیم اصلاح شده برای اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی

۵. دستگاه تحکیم اصلاح‌شده

به‌منظور اعمال چرخه‌های تر و خشک و برای انجام آزمایش تحت تأثیر دمای کنترل شده ٤۵ درجهٔ سانتی‌گراد و سربار ثابت، تغییراتی در دستگاه تحکیم معمولی داده شد. چنان‌که در شکل ۲ نشان داده شده است با ایجاد یک رشته تغییرات، دستگاه شامل یک قالب ثابت می‌باشد تا تورم و انقباض نمونه‌ها را تحت تأثیر سربار ثابت و درجه حرارت کنترل‌شده اندازه‌گیری کند. این دستگاه همانند دستگاه تحکیم معمولی دارای یک محفظه برای قرار

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

گرفتن نمونه بین دو صفحه متخلخل، اهرم بارگذاری و اندازه‌گیر (گیج) تغییرشکل محوری (عمودی) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر است. تغییرات ایجاد شده شامل ایجاد یک سامانه گرمایشی با قابلیت تنظیم دما به‌منظور ایجاد شرایط دمایی مشخص درون محفظه دستگاه طی چرخه‌های خشک و تعبیه شیر زهکشی برای تخلیه آب محفظه در پایان چرخه‌های تر است. هم‌چنین برای جلوگیری از هدررفت انرژی، عایق شدن و فراهم کردن شرایط دمایی مشخص از صفحات آزبست به‌همراه چسب سیلیکون در اطراف محفظه دستگاه تحکیم استفاده شد. برای کالیبره کردن و اطمینان از ایجاد دمای ثابت ٤٥ درجهٔ سانتی‌گراد طی چرخه‌های خشک نیز از یک دماسنج معمولی درون محفظه دستگاه استفاده شد.

٦. چرخه‌های تر و خشک

آزمایش‌های چرخه‌های تر و خشک روی نمونه‌های مستغرق شده با آب مقطر و محلول گلیسرول با درصدهای مختلف انجام گرفت و نمونه‌های مستغرق‌شده با آب مقطر به‌عنوان مرجع برای مقایسه استفاده شد. قبل از شروع آزمایش‌های اصلی به‌منظور اطلاع یافتن از حداکثر زمان تر و خشک شدن در یک چرخه کامل، روی نمونه تهیه‌شده در دستگاه تحکیم معمولی آزمایش انجام شد. نمونه در دستگاه تحکیم معمولی تحت تأثیر سربار ۱۰ کیلوپاسکال قرار داده شد، سپس با آب مقطر مستغرق شد. مدت زمان رسیدن به تورم حداکثر با ثبت داده‌های مورد نظر حدود ٦ روز به طول انجامید. سپس نمونه متورم‌شده با قالب از دستگاه خارج و در آون تحت تأثیر همان سربار ۱۰ کیلوپاسکال و دمای ٤٥ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شد و به‌طور منظم درصد رطوبت و تغییر شکل این نمونه اندازه‌گیری شد تا این‌که به مقدار ثابتی رسید. بنابراین طول مدت خشک شدن کامل حدود ۷ روز ثبت شد. در نتیجه انجام یک چرخه تر و خشک به‌مدت زمان حدود ۱۳ روز نیاز داشت. پس از پایان اولین چرخه مجدداً با کنترل شرایط دما و سربار، چرخه دوم آغاز شد. این روند تا یکسان شدن میزان تورم و انقباض ادامه یافت.

با توجه به این‌که دستگاه تحکیم اصلاح‌شده فاقد امکان اندازه‌گیری تغییرات جانبی نمونه‌ها است، به‌منظور بررسی تغییرات نسبت تخلخل و درصد رطوبت خاک و هم‌چنین رسم مسیرهای تورمی–انقباضی در طی چرخه‌های تر و خشک هم‌زمان با انجام آزمایش‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

چرخه‌های تر و خشک در دستگاه تحکیم اصلاح‌شده، نمونه‌هایی مشابه نمونه اصلی تهیه شده و در دستگاه‌های تحکیم معمولی تحت تأثیر همان سربار قرار داده شد. چنان‌که ذکر شد این دستگاه تنها قادر به اعمال چرخه تر به نمونه‌ها است بنابراین برای اعمال چرخه خشک، نمونه‌ها به آون با شرایط دمایی مشابه دستگاه تحکیم اصلاح‌شده و تحت تأثیر همان سربار، انتقال داده شدند و در ادامه برای اعمال چرخه تر بعدی به دستگاه تحکیم معمولی منتقل شدند. پس از شروع آزمایش‌ها در دستگاه‌های تحکیم اصلاح‌شده و معمولی، حدوداً هم‌زمان با تغییرشکل‌های معادل با یک چهارم مدت زمان تورم و انقباض نهایی، هر بار یکی از نمونه‌های موجود در دستگاه تحکیم معمولی خارج شده و درصد رطوبت آن محاسبه و نسبت تخلخل آن با استفاده از رابطهٔ (۱) محاسبه شد.

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{1+e} \quad (۱)$$

در رابطهٔ (۱) ΔV و Δe به‌ترتیب تغییر حجم و تغییر نسبت تخلخل نمونه خاک در هر مرحله از چرخه‌های تر و خشک و V_0 و e_0 به‌ترتیب حجم اولیه خاک و نسبت تخلخل در شروع آزمایش است. برای اندازه‌گیری ΔV در چرخه‌های تر و خشک اقدام به اندازه‌گیری میزان تغییر قطر نمونه استفاده شده در دستگاه تحکیم معمولی با استفاده از کولیس شد. هم‌چنین میزان تغییر ارتفاع نمونه به‌وسیلهٔ اندازه‌گیر[1] دستگاه تحکیم به ثبت رسیده بود. با محاسبه ΔV از طریق مقادیر قطر و ارتفاع اندازه‌گیری شده، با استفاده از رابطهٔ (۱) میزان تغییر نسبت تخلخل محاسبه شد. به‌طور میانگین برای هر چرخه تر و یا هر چرخه خشک ۵ نمونه، مشابه نمونه اصلی در دستگاه‌های تحکیم معمولی استفاده شد.

نتایج

در شکل ۳ نتایج تورم آزاد نمونه‌های مستغرق‌شده با آب مقطر و محلول‌های ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول ارائه شده است.

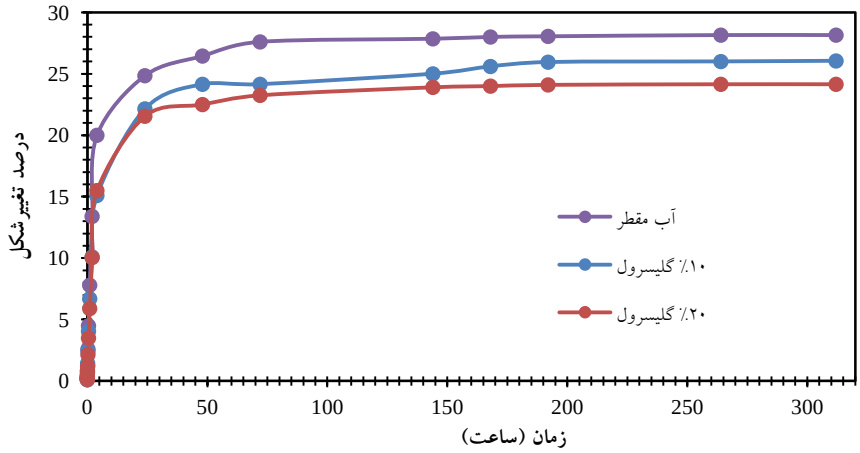
چنان‌که ملاحظه می‌شود با گذشت ۳۱۲ ساعت نمونه‌ها به حداکثر مقدار تورم خود رسیده‌اند. مقدار تورم نهایی برای نمونه مستغرق‌شده با آب مقطر ۲۸/۱۵ درصد و نمونه‌های

1. Gauge

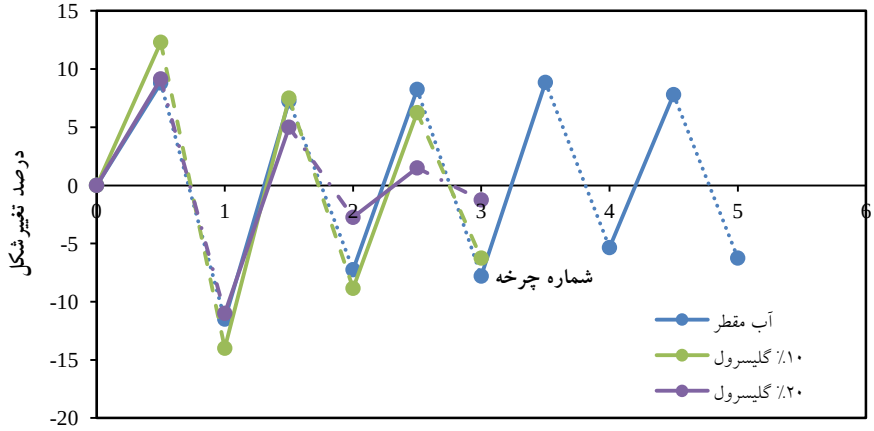
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

مستغرق‌شده با محلول ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول به‌ترتیب برابر ۲۶/۰۵ و ۲٤/۱۵ درصد است. با توجه به منحنی نتایج تورم آزاد، تورم نهایی نمونه مستغرق‌شده با محلول ۱۰ درصد گلیسرول ۲/۱ درصد و با محلول ۲۰ درصد گلیسرول ٤ درصد، نسبت به نمونه مستغرق‌شده با آب مقطر کاهش یافته‌است. با افزایش غلظت گلیسرول نیز پتانسیل تورمی خاک استفاده شده کاهش یافته است.



شکل ۳. نتایج تورم آزاد آب مقطر و محلول‌های ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول



شکل ٤. درصد تغییرشکل محوری خاک طی چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن تحت سربار ۱۰ کیلوپاسکال

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

شکل ٤ نشان‌دهندهٔ تغییرشکل محوری نمونه‌های خاک استفاده شده در طول چرخه‌های تر و خشک متوالی و با سربار ۱۰ کیلو پاسکال است. با توجه به این نتایج با گذشت ۵ چرخه، تغییرشکل محوری نمونه مستغرق‌شده با آب مقطر به تعادل رسیده و در این چرخه تغییرشکل برگشت‌ناپذیر رخ داده است. چنان‌که در این شکل ملاحظه می‌شود میزان تورم در چرخه ۵ نسبت به چرخه ۱ کاهش یافته است و مقدار تورم و انقباض در این چرخه تقریباً برابر است. در چرخه ۵ میزان انقباض و تورم نهایی به‌ترتیب برابر با ۷/۸ و ٦/۲۵ درصد است که بیان‌گر ۱/۵۵ درصد تغییرشکل برگشت‌ناپذیر است. با استفاده از محلول ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول چنان‌که در شکل ٤ مشاهده می‌شود، نمونه‌های استفاده شده در چرخه سوم به تعادل رسیده‌اند. میزان تورم کاهش یافته و اختلاف تورم و انقباض در چرخه سوم محو شده است که نشان‌دهندهٔ وقوع تعادل تورمی–انقباضی است. در چرخه سوم میزان تورم و انقباض نمونه مستغرق‌شده با محلول ۱۰ درصد گلیسرول با هم برابر و به میزان ٦/۲۵ است و تورم و انقباض محلول ۲۰ درصد گلیسرول به‌ترتیب ۱/۵ و ۱/۲۵ درصد است. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که استفاده از محلول گلیسرول علاوه بر کاهش میزان تورم باعث کاهش تعداد چرخه‌های تر و خشک جهت وقوع تعادل تورمی–انقباضی می‌شود و این کاهش به غلظت محلول گلیسرول استفاده شده بستگی دارد.

چنان‌که در شکل ٤ مشاهده می‌شود با اعمال چرخه‌های تر و خشک، پتانسیل تورمی خاک تهیه شده کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش تعداد چرخه‌ها مشاهده می‌شود که علاوه بر کاهش بیش‌تر پتانسیل تورمی، میزان اختلاف تورم و انقباض کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در چرخهٔ ۵ آب مقطر و چرخهٔ ۳ در محلول‌های ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول، این اختلاف تقریباً از بین می‌رود و میزان تورم ناشی از تر شدن با انقباض شاخه خشک برابر می‌شود. در این حالت تعادل تورمی–انقباضی اتفاق افتاده است. از طرفی چنان‌که در شکل ٤ ملاحظه می‌شود، نمودارهای چرخه‌های تر و خشک محلول‌های ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول در زیر نمودار آب مقطر قرار گرفته است که به معنای کاهش بیش‌تر پتانسیل تورمی نسبت به آب مقطر است. با ورود املاح موجود در محلول‌های گلیسرول در بین ذرات خاک ذرات بیش‌تری بهم چسبیده و نمونه‌های استفاده شده ساختار دانه‌ای بیش‌تری به‌خود می‌گیرد که این روند با افزایش غلظت گلیسرول شدت بیش‌تری یافته است به‌طوری‌که محلول ۲۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

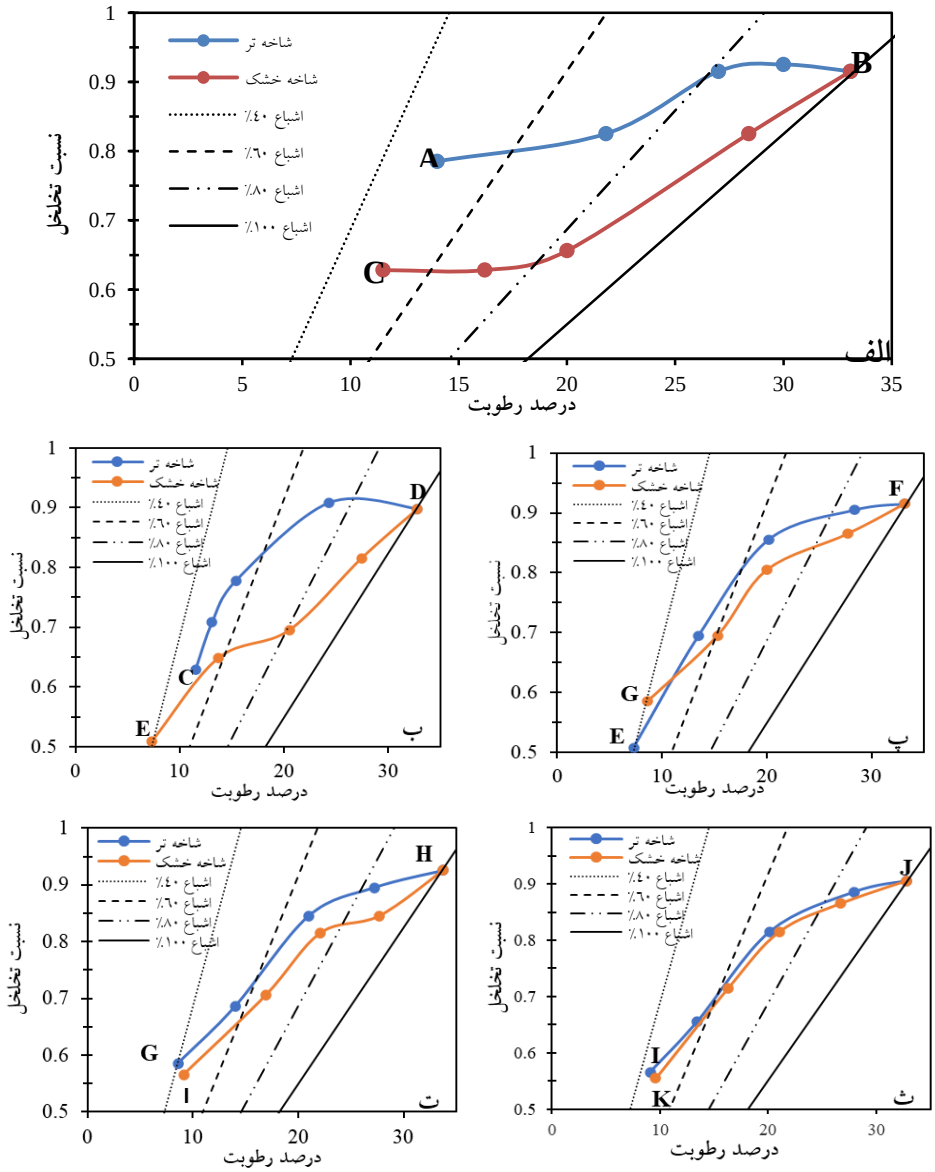
درصد گلیسرول با کم‌ترین میزان پتانسیل تورمی، تأییدکنندهٔ این مطلب است. با استفاده از محلول‌های ۱۰ درصد و ۲۰ درصد گلیسرول تعداد چرخه‌های تر و خشک کاهش یافته و نمونه‌های خاک استفاده شده زودتر به حالت تعادل رسیده است.

چنان‌که قبلاً بیان شد دستگاه تحکیم فقط قادر به اندازه‌گیری تغییرشکل محوری است. برای ثبت تغییرات جانبی نمونه‌ها طی چرخه‌های تر و خشک شدن از نمونه‌های مشابه نمونه‌های اصلی استفاده شد که نتایج آن در شکل‌های ۵ الف تا ث و با درصد نسبت تخلخل و رطوبت ارائه شده است.

شکل‌های ۵ الف تا ث مسیرهای تورمی و انقباضی چرخه‌های تر و خشک آب مقطر را با خطوط اشباع ٤٠، ٦٠، ٨٠ و ١٠٠ درصد نشان می‌دهد .با توجه به شکل ۵ الف، نقطهٔ A که وضعیت خاک اولیه را با رطوبت ١٤ درصد و نسبت تخلخل ۰/۷۸ نشان می‌دهد در معرض چرخه تر قرار می‌گیرد و با افزایش رطوبت نسبت تخلخل نیز افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در انتهای چرخه تر به نقطه B با رطوبت ۳۳/۱ درصد و نسبت تخلخل ۰/۹۱ می‌رسد. با توجه به شکل ۵ الف، ملاحظه می‌شود که نمونه در این نقطه روی خط اشباع قرار دارد. با شروع شاخه خشک از نقطه B در این شکل و با گذشت زمان، رطوبت نمونه و نسبت تخلخل آن کاهش می‌یابد تا در نقطه C به مقدار ۱۱/۵ درصد و ۰/٦۳ می‌رسد. با توجه به شکل ۵ ب، در چرخهٔ ۲ مجدداً نمونه از نقطه C که شروع چرخه تر است، تورم یافته و رطوبت و نسبت تخلخل آن افزایش می‌یابد تا به نقطهٔ D و در حالت اشباع قرار می‌گیرد. در نقطه D رطوبت و نسبت تخلخل نمونه به‌ترتیب برابر با ۳۲/۸ درصد و ۰/۹ است. با اعمال چرخه خشک، رطوبت و نسبت تخلخل نمونه کاهش یافته تا به نقطه E می‌رسد که رطوبت آن ۷/۳ درصد و نسبت تخلخل ۰/۵ است. در شکل ۵ پ، چرخهٔ ۳ مشاهده می‌شود که همان روند تغییرات رطوبت و نسبت تخلخل را دارد. در این چرخه و چرخه‌های ٤ شکل ۵ ت و ث، منحنی تغییرات شاخه‌های تر وخشک بهم نزدیک می‌شوند، به‌طوری‌که در چرخه ۵ تقریباً بر یک‌دیگر منطبق می‌شوند. منحنی تغییرات تر و خشک تقریباً به شکل S است و بیش‌ترین تغییرات رطوبت و نسبت تخلخل بین خطوط اشباع ٤٠٪ و ٨٠٪ اتفاق می‌افتد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

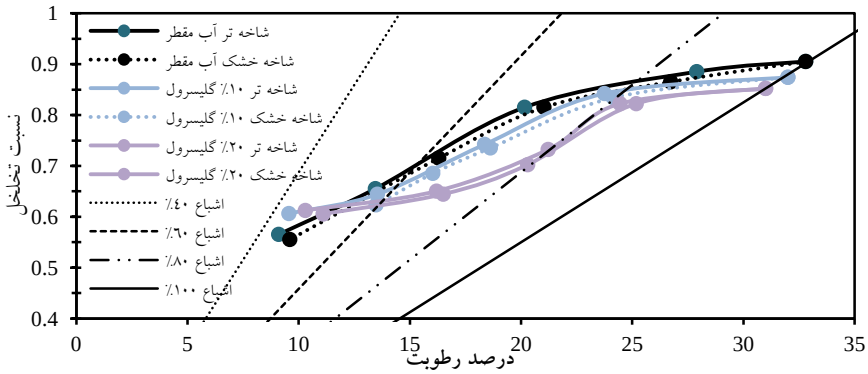


شکل ۵ . تغییرات نسبت تخلخل با درصد رطوبت (مسیرهای تورمی و انقباضی) طی چرخه‌های متوالی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

با بررسی شکل ۵ مشاهده می‌شود که مسیرهای رفت و برگشتی تورم و انقباض در چرخه‌های ابتدایی با یک‌دیگر دارای فاصله و اختلاف است و این در حالی است که با افزایش تعداد چرخه‌ها، این مسیرها تقریباً برهم منطبق می‌شوند. این وضعیت که در شکل‌های ۵ ت و ث به‌وضوح قابل مشاهده است، بیان‌گر وقوع تعادل تورمی–انقباضی و پایدار شدن ساختمان خاک است. بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که مسیرهای تورمی–انقباضی اغلب شکلی همانند S دارند.

مسیرهای ترسیم‌شده را می‌توان متشکل از دو بخش منحنی‌شکل در ابتدا و انتها و یک بخش خطی در بخش میانی دانست، به‌طوری‌که تغییرات نسبت تخلخل با میزان رطوبت خاک در ابتدا و انتهای مسیرهای تورمی و انقباضی ملایم و در بخش خطی (میانی) شدید است.



شکل ٦ . تغییرات نهایی نسبت تخلخل با درصد رطوبت (مسیرهای تورمی و انقباضی) طی چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن آب مقطر و محلول‌های ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول

در شکل ٦ مسیرهای تورمی و انقباضی نهایی مربوط به آب مقطر و محلول‌های ۱۰ و ۲۰ درصد گلیسرول نشان داده شده است. مسیرهای تورمی و انقباضی محلول‌های گلیسرول در زیر نمودار آب مقطر قرار گرفته‌اند که با نتایج نمودارهای شکل ٤ هم‌خوانی دارد. این نمودار اثر محلول‌های گلیسرول در جلوگیری از افزایش تورم و انقباض را نشان می‌دهد که با افزایش غلظت، این کاهش شدت بیشتری نیز می‌یابد. در چرخهٔ نهایی، مسیرهای تر و خشک هر سه نمودار تقریباً برهم منطبق شده که نشان‌دهندهٔ وقوع تعادل تورمی و انقباضی است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

بحث

تورم و انقباض پدیده‌ای است که مخصوص خاک‌های رسی و چسبنده است به‌طوری‌که نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده این خاک‌ها نقش مهمی در این فرایند دارد. ذرات خاک‌های رسی معمولاً بار منفی دارند که با کاتیون‌ها و آنیون‌های اطراف خود به حالت تعادل درآمده‌اند. وقتی‌که این خاک‌ها در معرض رطوبت قرار می‌گیرند کاتیون‌ها و آنیون‌های اطراف این ذرات در آب به‌صورت محلول در می‌آیند که تمرکز و تراکم آن‌ها با فاصله گرفتن از ذره رسی تغییر می‌کند، تا آنجاکه این ذرات باردار به حالت تعادل درمی‌آیند. این لایه آب که حاوی ذرات باردار بوده است و اطراف ذرات رسی را احاطه کرده، به لایهٔ مضاعف دوگانه (DDL) معروف است. ضخامت این لایه به عوامل متعددی از جمله ضریب دی‌الکتریک مایع بین ذرات، درجه حرارت و غیره، بستگی دارد. تغییر در ضخامت این لایه تحت تأثیر نیروهای دافعه و جاذبه بین لایه‌های مضاعف، موجب بروز ساختارهای مختلف در خاک می‌شود. معمولاً کاهش این ضخامت موجب تشکیل ساختمان فولکوله و به‌عکس افزایش آن، ساختمان پراکنده را به‌وجود می‌آورد. در ساختمان فولکوله ذرات بهم چسبیده و در حالت پراکنده تقریباً جدا از یک‌دیگرند. از آن‌جاکه قدرت تورمی خاک مورد نظر تحت تأثیر شرایط یک‌سان به سطح ویژه ذرات آن بستگی دارد (به‌طوری‌که هرچه میزان سطح ویژه ذره بیش‌تر باشد قدرت تورمی افزایش و هرچه سطح ویژه کاهش یابد، قدرت تورمی نیز کاهش می‌یابد) بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در حالت ساختمان فولکوله، به‌علت چسبیدن ذرات بهم و تشکیل ذرات درشت‌تر، سطح ویژه ذره کاهش یافته و قدرت تورمی نسبت به خاک پراکنده کاهش می‌یابد.

نمونه‌های تهیه شده برای انجام چرخه‌های تر و خشک در حالت غیراشباع است و دارای دو مکش ماتریک و اسمزی هستند. وقتی که نمونه‌ها در دستگاه آزمایش قرار داده می‌شوند در حالت استغراق، مایع به داخل فضای آنها نفوذ می‌کند تا به حالت اشباع برسد و مکش ماتریک از بین رود. از آن‌جاکه نمونه‌ها با آب مقطر و آب حاوی گلیسرول مستغرق می‌شوند بنابراین مایع نفوذیافته دارای ضرایب دی‌الکتریک مختلف است که چون ضریب دی‌الکتریک محلول‌های گلیسرول کم‌تر از آب است بنابراین ضخامت لایه مضاعف نسبت به‌حالت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

استفاده از آب مقطر کم‌تر می‌شود و این کاهش ضخامت با افزایش غلظت گلیسرول افزایش می‌یابد، بنابراین نمونه‌های مستغرق شده با آب حاوی گلیسرول به ساختمان فولکوله تمایل پیدا می‌کنند و چسبیدن ذرات به یکدیگر کاهش سطح ویژه را در پی دارد. پس از اشباع شدن نمونه، مکش اسمزی بین نمونه اشباع و مایع مستغرق‌کننده ایجاد می‌شود که در این مرحله امکان مهاجرت مولکول‌های گلیسرول به داخل نمونه وجود دارد به‌طوری‌که چسبیدن ذرات به‌هم شدت می‌یابد. از طرفی با تکرار چرخه‌های تر و خشک برای نمونه مستغرق‌شده با آب مقطر، موجب چسبیدن ذرات بهم و کاهش تورم می‌شود. بنابراین کاهش پتانسیل تورمی نمونه مستغرق‌شده با آب مقطر ناشی از تکرار چرخه‌ها و چسبیدن ذرات به یک‌دیگر است که این نتایج با پژوهش‌های پژوهش‌گرانی مانند تریپاتی و همکاران [۱۲] و استبرق و همکاران [١٤] و [۱۹] مطابقت دارد. برای نمونه‌های مستغرق‌شده با آب حاوی گلیسرول علاوه بر اثر ضریب دی‌الکتریک، تکرار چرخه‌ها هم مؤثر است.

از طرفی منحنی تغییرات رطوبت با درجه اشباع در مقابل مکش خاک را منحنی مشخصه خاک می‌نامند. منحنی مذکور در حالت افزایش مکش (خشک شدن) تا مکش مشخص و سپس کاهش مکش (تر شدن) تا یک مکش معین برهم منطبق نیست. این پدیده (اختلاف مکش بین دو منحنی در یک درجه اشباع مشخص) را پسماند[1] گویند. دلایل مختلفی برای بیان علت این پدیده را پژوهش‌گران مختلف از جمله دنین و ریدلی [۲۹] و فردلاند و راهارجو [۵] بیان کرده‌اند. یکی از این دلایل را می‌توان یکنواخت نبودن فضای بین ذرات در حالت خشک و تر شدن بیان کرد. به‌عبارتی ساختمان خاک در حالت خشک با حالت تر یک‌سان نیست. چنان‌که در شکل ٤ مشاهده شد تغییرشکل محوری پس از چرخه ۵ برای نمونه مستغرق‌شده با آب مقطر و چرخه ۳ برای نمونه‌های مستغرق‌شده با محلول‌های گلیسرول به تعادل می‌رسد. در این حالت منحنی تغییرات نسبت تخلخل در حالت تر و خشک تقریباً برهم منطبق هستند. اگر خشک شدن نمونه را افزایش مکش و تر شدن آن را کاهش مکش در نظر بگیریم، بنابراین هر چرخه شامل افزایش و کاهش مکش است. از آن‌جاکه در چرخه‌های نهایی منحنی تغییرات نسبت تخلخل و رطوبت برهم منطبق هستند

1. Hysteresis

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

این نتیجه حاصل می‌شود که در چرخه مذکور ساختار خاک در دو حالت ذکر شده تقریباً یک‌سان است و پدیده پسماند حذف شده است.

چنان‌که بیان شد خاک‌های متورم‌شونده از خاک‌های مشکل‌آفرین محسوب می‌شوند. بهسازی این خاک‌ها برای کاربرد در احداث پروژه‌های عمرانی و نیز به‌منظور ایمنی سازه‌هایی که قرار است روی آنها احداث شود، ضروری است. بهسازی این خاک‌ها با روش‌های معمولی مانند اختلاط با سیمان یا آهک امری مشکل است و ممکن است فاقد توجیه اقتصادی باشد. یکی از روش‌های اجرایی که در مقایسه با روش‌های مذکور هزینهٔ کم‌تری دارد، اجرای چرخه‌های تر و خشک با مستغرق کردن خاک موجود در سایت در فواصل مختلف است. این روش مطابق پژوهش‌های انجام شده موجب کاهش قدرت تورمی و انقباضی می‌گردد. در این پژوهش به اثر آب حاوی گلیسرول به‌عنوان مایع مستغرق‌کننده و اثر آن بر پتانسیل تورمی و انقباضی در چرخه‌های تر و خشک پرداخته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش مؤید کاهش قابل توجه پتانسیل تورمی و انقباضی خاک و رسیدن به تعادل در تعداد چرخه‌های تر و خشک کم‌تری است. بنابراین می‌توان آب حاوی گلیسرول نشات گرفته از کارخانه‌ها و مجتمع‌های صنعتی را به مناطقی که دارای خاک‌های متورم‌شونده هستند، انتقال داد و با لحاظ کردن مسائل زیست‌محیطی نسبت به اصلاح و بهسازی آنها اقدام کرد.

نتیجه‌گیری

در این کار پژوهشی اثر محلول گلیسرول بر پتانسیل تورمی و انقباضی یک خاک متورم‌شونده در طول چرخه‌های تر و خشک تحت تأثیر سربار ثابت بررسی شد و نتایج آن با نتایج حاصل از حالت استفاده از آب مقطر به‌عنوان مایع مستغرق‌کننده در چرخه‌های تر و خشک مقایسه شد که نتایج نشان می‌دهد:

۱. با افزایش تعداد چرخه‌ها تغییرشکل محوری و جانبی نمونه خاک استفاده شده کاهش می‌یابد و در نهایت مقدار افزایش حجم ناشی از تورم با کاهش حجم انقباضی برابر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

می‌شود. در این حالت تغییرشکل برگشت‌ناپذیر در خاک رخ می‌دهد، ساختار خاک به حالت نسبتاً پایداری رسیده و تعادل تورمی و انقباضی رخ می‌دهد.

۲. نتایج حاصل از مسیرهای تورمی-انقباضی به‌صورت تغییرات نسبت تخلخل و درصد رطوبت نشان می‌دهد که در چرخه‌های اولیه فاصله بین میزان تورم و انقباض زیاد است. با افزایش چرخه‌ها این فاصله کاهش یافته تا در چرخه‌های نهایی حذف شده و نمودارها برهم منطبق می‌شوند. پدیده پسماند ظاهر شده در طول چرخه‌های تر و خشک به‌تدریج کاهش می‌یابد و در حالت تعادل اثر این پدیده تقریباً محو می‌شود.

۳. نتایج حاصل از استفاده از محلول‌های گلیسرول در مقایسه با آب مقطر نشان‌دهندهٔ کاهش تغییرشکل‌های محوری و جانبی نمونه نسبت به حالت استفاده از آب مقطر است. این محلول‌ها تعداد چرخه‌های تر و خشک را نسبت به آب مقطر کاهش داده و بنابراین خاک متورم‌شونده در مدت زمان کوتاهتری به حالت نسبتاً پایداری می‌رسد.

منابع

1. Gourley C. S., Newill D., Schreiner H. D., "Expansive soils: TRL's research strategy, In Proc.", 1st Int. Symp, on Engineering Characteristics of Arid Soils (1993, July).

2. Jones D. E., Jones K. A., "Treating expansive soils", Civil Engineering 57 (8) (1987) 62=65.

3. Driscol R., Crilly M., "Subsidence damage to domestic building, Lessons learned and questions remaining", London: Foundation for the Built Environment Report, Construction Communication (2000).

4. Hanafy E. A. D. E., "Swelling/shrinkage chatracteristic curve of desiccated expansive lays", Geotechnical Testing Journal 14 (2) (1991) 206-211.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

5. Fredlund D. G., Rahardjo H., "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Sons, NewYork, USA (1993).
6. Marinho F. A. M., Stuermer M., "The influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil, Advances in Unsaturated Geotechnics.Geotechnical Special Publication", ASCE, Colorado, Denver, USA (2000) 125-141.
7. Ferber V., Auriol J. C., Cui Y. J., Magnan J. P., "On the swelling potential of compacted high plasticity clays", Engineering Geology 104 (2009) 200-210.
8. Estabragh A. R., Rafatjo H., Javadi A. A., "Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques", Geosynthetics International, 21(3) (2014) 233-243.
9. Rao K. S., Satyadas G. C., "Swelling potential with cycles of swelling and partial shrinkage", In: Proceedings 6th Conference on Expansive Soils,New Delhi, India, Vol. 1, (1987) 137-147.
10. Chen F. H., "Foundation on Expansive Soils", 2nd ed. Elsevier Science Publishing Co., NewYork, USA (1988).
11. Dif A. F., Blumel W. F., "Expansive soils under cyclic drying and wetting", Geotechnical Testing Journal 14 (1) (1991) 96-102.
12. Tripathy S., Subba Rao K. S., Fredlund D. G., "Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils", Canadian Geotechnical Journal 39 (2002) 938-959.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

13. Siddiqua S., Blatz J., Siemens G., "Evaluation of the impact of pore fluid chemistry on the hydromechanical behaviour of clay-based sealing materials", Canadian Geotechnical Journal, 48 (2) (2011) 199-213.

14. Estabragh A. R., Parsaei B., Javadi A. A., "Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil", Soils and Foundations, 55 (2) (2015) 304-314.

15. Zhao N. F., Ye W. M., Chen Y. G., Chen B., Cui Y. J., "Investigation on swelling-shrinkage behavior of unsaturated compacted GMZ bentonite on wetting-drying cycles", Bulletin of Engineering Geology and the Environment (2017) 1-11.

16. Estabragh A. R., Soltani A., Javadi A. A., "Effect of pore water chemistry on the behaviour of a kaolin–bentonite mixture during drying and wetting cycles", European Journal of Environmental and Civil Engineering, published online (2018).

17. Chen J., Anandarajah A., Inyang H., "Pore fluid properties and compressibility of kaolinite.Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering", 126 (9) (2000) 798-807.

18. Kaya A., Fang H. Y., "The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils", Canadian Geotechnical Journal, 37 (5) (2000) 943-950.

19. Graham J., Yuen K., Goh T. B., Janzen P., Sivakumar V., "Hydraulic conductivity and pore fluid chemistry in artificially weathered plastic clay", Engineering geology, 60 (1) (2001) 69-81.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

20. Singh S. K., Srivastava R. K., John S., "Settlement characteristics of clayey oils contaminated with petroleum hydrocarbons", Soil & sediment contamination, 17 (3) (2008) 290-300.

21. Di Matteo L., Bigotti F., Ricco R., "Compressibility of kaolinitic clay contaminated by ethanol-gasoline blends", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137 (9) (2010) 846-849.

22. Singh S. K., Srivastava R. K., John S., "Studies on soil contamination due to used motor oil and its remediation", Canadian Geotechnical Journal, 46 (2009) 1077-1083.

23. Estabragh A. R., Beytolahpour I., Moradi M., Javadi A. A., "Mechanical behavior of a clay soil contaminated with glycerol and ethanol", European Journal of Environmental and Civil Engineering, 20 (5) (2016) 503-519.

24. Estabragh A. R., Moghadas M., Javadi A. A., "Hydrochemical Effect of Different Quality of Water on the Behaviour of an Expansive Soil During Wetting and Drying Cycles", Irrigation and Drainage, 65 (3), (2016) 371-381.

25. Rosenbalm D., Zapata C. E., "Effect of wetting and drying cycles on the behavior of compacted expansive soils", Journal of Materials in Civil Engineering, 29 (1) (2016) 04016191.

26. McKeen R. G., "A model for predicting expansive soil behavior", In Proc., 7th Int. Conf. on Expansive Soils (Vol. 1, pp. 1-6). Reston, VA: ASCE (1992, August).

27. Nelson J. D., Miller D. J., "Expansive soils: problems and practices in foundation and pavement engineering", John Wiley & Sons Inc. (1992).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]

28. Lambe T. W., "The structure of compacted clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 84 (1958) 1-34.

29. Dineen K., Ridley A. M., "The soil moisture characteristic curve. The influence of hysteresis on its measurement and interpretation", In Proceedings of the XI Pan-American conference on soil mechnics and foundation engineering, 1013,Vol. 1018, (1999, August).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.2.4]