

رفتار تورمی-انقباضی خاک‌های متورم‌شونده تحت سربار و کیفیت آب مختلف

مهرداد مقدس^{۱*}، علی رئیسی استبرق^۲، جمال عبداللهی^۳

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی گروه آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. مربی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱/۲۶)

چکیده

خاک‌های متورم‌شونده دسته‌ای از خاک‌ها هستند که با قرار گرفتن در معرض تغییر شرایط رطوبتی تغییر حجم غیر متعارفی از خود نشان می‌دهند. این تغییر حجم تهدیدی جدی برای سازه‌های بنا شده بر آن‌هاست. در این تحقیق پتانسیل تغییر حجم این خاک‌ها، وقتی در معرض ترشدن و خشک شدن متوالی قرار می‌گیرند، بررسی شد. بدین منظور نمونه‌های تهیه شده از یک خاک متورم‌شونده به روش تراکم استاتیکی در دستگاه تحکیم اصلاح شده قرار داده شد و آزمایش‌ها تحت تأثیر دو سربار مختلف (۱۰ و ۲۰ کیلوپاسکال) و نیز عمل اشباع کردن با دو نمونه آب با کیفیت مختلف (آب مقطر و اسیدی) به انجام رسید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد تغییر شکل محوری ناشی از تورم و انقباض پس از حدود پنج چرخه یکسان می‌شود. همچنین تغییر کیفیت آب (اسیدی) در کاهش پتانسیل تورمی نقش مهمی دارد.

کلیدواژگان: تحکیم اصلاح شده، چرخه‌های ترشدن و خشک شدن، خاک‌های متورم‌شونده، مسیرهای تورمی-انقباضی

مقدمه

خاک‌های متورم‌شونده در اکثر مناطق دنیا، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، وجود دارند؛ طوری که گستره وسیعی از افریقا و آسیا و امریکا را این خاک‌ها پوشش می‌دهند. این خاک‌ها با جذب رطوبت افزایش حجم پیدا می‌کنند و با کاهش رطوبت منقبض می‌شوند. ترشدن و خشک شدن متوالی این خاک‌ها اصطلاحاً چرخه‌های تر و خشک نامیده می‌شود.

پدیده ترشدن و خشک شدن خاک‌های متورم‌شونده، که بیشتر در مناطق خشک و نیمه‌خشک اتفاق می‌افتد، باعث تغییر شکل زیادی می‌شود که ممکن است سبب خسارت به ساختمان‌ها، کانال‌های آبیاری، و دیگر سازه‌های ساخته شده روی آن‌ها شود و کاهش عمر مفید و کارایی سازه‌ها را به دنبال داشته باشد (Nowamooz and Masrouri, 2008). زیان سالیانه ناشی از خسارت این خاک‌ها در کشور انگلستان ۱۵۰ میلیون پوند و در امریکا ۱۰۰۰ میلیون دلار گزارش شده است که این میزان به‌تنهایی از خسارات ناشی از بلایای طبیعی، نظیر سیل و توفان و زلزله، بیشتر است (Gourly et al., 1993). در ایران نیز این خاک‌ها یکی از عوامل تخریب پوشش بتنی کانال‌های آبیاری است. بنابراین چاره‌جویی برای کاهش خسارات ناشی از

آن حائز اهمیت بسیار است. عوامل متعددی بر پتانسیل تورمی این خاک‌ها مؤثر است که از بین آن‌ها می‌توان به نوع کانی‌های رسی، میزان و شیوه تراکم (Chen, 1988)، و ترکیب سیالی که خاک را مرطوب می‌کند (Gromko, 1974) اشاره کرد.

پتانسیل تورمی و انقباضی یک خاک متورم‌شونده طی چرخه‌های تر و خشک تغییر می‌کند. برخی محققان پیشنهاد کرده‌اند قدرت تورمی و انقباضی این خاک‌ها حداقل پس از چهار چرخه متوالی تر و خشک اندازه‌گیری شود (Ring, 1996). برخی محققان با آزمایش‌های متناوب تر و خشک بر نمونه‌هایی از خاک متورم‌شونده نتیجه گرفتند که در چرخه‌های اولیه مقداری تغییر شکل برگشت‌ناپذیر در نمونه به‌وجود می‌آید، لیکن با افزایش تعداد چرخه نمونه به حالت تعادل می‌رسد؛ طوری که تغییر شکل ناشی از تورم و انقباض یکسان می‌شود و پتانسیل تورمی هم کاهش می‌یابد (Alonso et al., 1999; Tripathy et al., 2002). آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند وجود سربار در این آزمایش‌ها نقش مهمی دارد؛ طوری که با افزایش سربار هم قدرت تورمی کاهش می‌یابد و هم نمونه زودتر به حالت تعادل می‌رسد. برخی محققان چرخه‌های متوالی تر و خشک را سبب افزایش پتانسیل تورم‌پذیری این خاک‌ها دانستند (Obermier, 1974; Popescu, 1980; Day, 1994)، در حالی که برخی دیگر کاهش پتانسیل تورم‌پذیری را از اعمال

* نویسنده مسئول: m.moghadam@ut.ac.ir

جدول ۱. خواص فیزیکی خاک استفاده شده

حد روانی (%)	۷۰
حد خمیری (%)	۲۳
شاخص خمیری (%)	۴۷
حد انقباض (%)	۱۴
وزن مخصوص دانه‌های جامد (Gs)	۲٫۷۵
درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰	۷۳
درصد رس (کوچک‌تر از ۰٫۰۰۲ میلی‌متر)	۴۵
فعالیت (A)	۱٫۰۴۵
رطوبت بهینه (%0)	۱۸
وزن واحد خشک بیشینه (kN/m ³)	۱۶

آب استفاده شده

در این تحقیق از دو نوع آب با کیفیت مختلف به منظور خیس و اشباع کردن نمونه‌ها استفاده شد که عبارت‌اند از آب مقطر و آب اسیدی، که خصوصیات شیمیایی آن‌ها در جدول ۲ می‌آید.

جدول ۲. مشخصات کیفی آب‌های استفاده شده

نوع آب	EC (μs/cm)	pH
آب مقطر	۱۴	۷٫۲
آب اسیدی	۱۹	۵٫۵

تهیه نمونه‌ها

به منظور اعمال چرخه‌های تر و خشک به نمونه خاک، باید خاک متراکم می‌شد که در این تحقیق از شیوه تراکم استاتیکی برای این کار استفاده شد. نمونه‌های تهیه شده دارای رطوبت ۱۳٫۵ درصد (۴٫۵ درصد کمتر از رطوبت بهینه) و وزن واحد خشک ۱۵٫۸ کیلونیوتن بر متر مکعب بودند که در بخش خشک منحنی تراکم استاندارد قرار داشتند. تهیه نمونه‌ها بدین صورت بود که ابتدا رطوبت مورد نیاز به خاک انتخابی اضافه و عمل اختلاط انجام شد. سپس در کیسه‌های نایلونی، که قابلیت تبادل رطوبت با هوا را نداشت، به مدت ۲۴ ساعت به منظور توزیع یکنواخت رطوبت قرار داده شد. برای انجام دادن تراکم استاتیکی، قالب جدیدی طراحی و ساخته شد و با به‌کارگیری این قالب باری معادل ۸۶۰ کیلوپاسکال در سه لایه جداگانه به خاک وارد شد. گفتنی است سرعت بارگذاری توسط دستگاه بارگذاری مورد استفاده ۱٫۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. قالب تهیه نمونه‌ها و دستگاه بارگذاری استفاده شده در تحقیق در شکل ۱ می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این قالب متشکل از پایه آلومینیومی است که سه حلقه روی آن سوار می‌شود و حلقه میانی همان حلقه تحکیم است که آزمایش‌های اصلی روی آن انجام می‌شود. هدف از استفاده از دو حلقه دیگر دادن طول اضافی به نمونه بود که پس از استخراج حلقه اصلی خاک‌های اضافی از اطراف آن تراشیده می‌شد.

چرخه‌های تر و خشک نتیجه گرفتند (Allam and Sridharan, 1981; Dif and Blumel, 1991; Alhomoud *et al.*, 1995). همچنین برخی محققان در تحقیقات خود نشان داده‌اند تغییر حجم خاک در حال انقباض مستقل از وزن واحد حجم خشک اولیه است (Birle *et al.*, 2008).

بررسی منابع نشان می‌دهد گرچه تحقیقات زیادی در خصوص خاک‌های متورم‌شونده، از جمله سیکل‌های تر و خشک، صورت گرفته است، اثر کیفیت آب بر خصوصیات تورمی این خاک‌ها تحت تأثیر چرخه‌های تر و خشک متوالی نبوده است؛ در حالی که کیفیت آب می‌تواند در زمینه کاهش یا افزایش پتانسیل تورمی و انقباضی و همین‌طور تعداد چرخه‌های تر و خشک لازم برای رسیدن به حالت تعادل مؤثر باشد. بنابراین، هدف این تحقیق بررسی خصوصیات تورمی یک خاک متورم‌شونده، شامل تغییر حجم و ارتفاع خاک و تغییرات نسبت تخلخل و مسیرهای تورم و انقباضی خاک در چرخه‌های متوالی ترشدن و خشک‌شدن، با استفاده از دو سربار ۱۰ و ۲۰ کیلوپاسکال، است که مسیر خیس و اشباع کردن آن‌ها با دو نوع آب با کیفیت متفاوت انجام شد. چون کیفیت آب می‌تواند دلیل یکسان‌نبودن نتایج محققان پیشین در ارتباط با کاهش یا افزایش پتانسیل تورم با افزایش تعداد چرخه‌ها باشد. آن‌ها درباره کیفیت آب مورد استفاده خود بحث نکرده‌اند و از آنجا که کیفیت آب در مناطق مختلف متفاوت و بر پتانسیل تورم‌پذیری خاک مؤثر است لازم است اثر آن بر پتانسیل تورم‌پذیری خاک مشخص شود.

مواد و روش‌ها

خاک استفاده شده

برای آزمایش‌ها از خاکی استفاده شد که مطابق طبقه‌بندی (McKeen, 1992) دارای قدرت تورمی زیادی بود. این خاک از منطقه اطراف کرج تهیه و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن مطابق استانداردهای ASTM تعیین شد. این خصوصیات در جدول شماره ۱ می‌آید. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود عدد فعالیت این خاک بیشتر از ۱ است که نشان می‌دهد قابلیت تورم‌پذیری آن بالاست. همچنین بخش اعظم خاک ریزدانه است و مطابق طبقه‌بندی یونیفاید رس با خواص خمیری بالا (CH) است. آزمایش تراکم استاندارد نیز نشان داد وزن واحد خشک حداکثر این خاک ۱۶ کیلونیوتن بر متر مکعب و رطوبت بهینه آن ۱۸ درصد است.

پس از قرارگرفتن نمونه در دستگاه تحکیم اصلاح‌شده، آب به محفظه دستگاه اضافه شد و این امکان فراهم آمد تا نمونه آزادانه آب جذب کند و تحت تأثیر سربارهای ثابت مورد استفاده متورم شود. تغییر شکل محوری خاک با اندازه‌گیر تغییر شکل قرائت شد و پس از رسیدن به حالت تعادل، که نمونه به بیشینه تورم خود رسید، شیر زهکشی دستگاه باز و آب محفظه تخلیه شد و ترموستات دستگاه در حالت روشن قرار گرفت و چرخه خشک تحت همان سربار آغاز شد و با ثبت تغییر شکل محوری پس از ثابت‌شدن آن تغییر شکل دوباره چرخه تر آغاز شد و به همین ترتیب چرخه‌ها ادامه پیدا کرد تا اینکه میزان تغییر شکل محوری در حالت تر و خشک یکسان شد. در این حالت میزان تورم و انقباض با ادامه چرخه‌ها تغییر چندانی نداشت. گفتنی است در حالت استفاده از سربار ۱۰ کیلوپاسکال چرخه‌های تر ۴ روز و چرخه‌های خشک ۵ روز به طول می‌انجامدند؛ در حالی که این مقادیر به‌ازای سربار ۲۰ کیلوپاسکال به‌ترتیب برابر ۲ و ۳ روز بودند. دستگاه اصلی ساخته‌شده فقط قادر به اندازه‌گیری تغییر شکل محوری نمونه است و چون حین عمل خشک‌شدن و تورمی سیکل‌های متوالی حجم نمونه (شامل قطر و ارتفاع) تغییر می‌کند، به منظور تعیین نسبت تخلخل و درصد رطوبت خاک حین چرخه‌های تر و خشک، به ساخت نمونه‌های مشابه با نمونه اصلی اقدام شد و تحت شرایط یکسان با نمونه اصلی در دستگاه‌های تحکیم معمولی قرار داده شد و در فواصل زمانی متناسب هر بار یکی از نمونه‌ها انتخاب و درصد رطوبت و ابعاد آن اندازه گرفته شد و نسبت تخلخل آن با استفاده از رابطه ۱ به‌دست آمد.

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (\text{رابطه ۱})$$

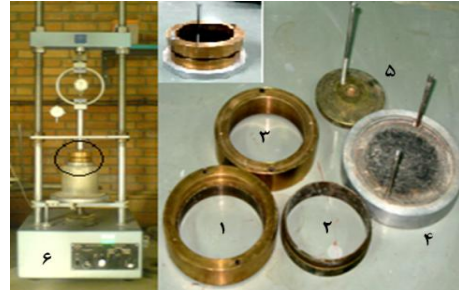
ΔV و Δe به‌ترتیب تغییر حجم و تغییر نسبت تخلخل نمونه خاک در هر مرحله از چرخه‌های تر و خشک و V_0 و e_0 به‌ترتیب حجم اولیه خاک و نسبت تخلخل در شروع آزمایش است.

از آنجا که دستگاه‌های تحکیم معمولی فقط قادر به اعمال چرخه تر به نمونه خاک بودند، به منظور اعمال چرخه خشک، نمونه‌ها به گرم‌خانه با شرایط دمایی و سربار مشابه نمونه اصلی منتقل می‌شدند.

نتایج

تغییرات کرنش محوری خاک

پس از قرارگرفتن نمونه در دستگاه اصلی، تغییرات کرنش محوری خاک اندازه‌گیری شد و مقدار آن‌ها در پایان چرخه‌ها



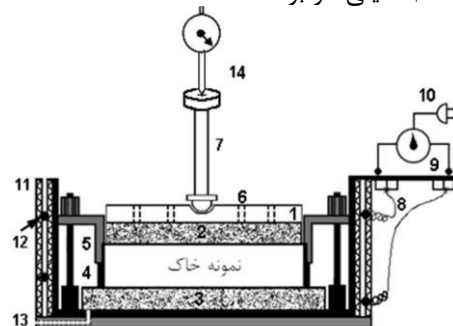
شکل ۱. قالب استفاده‌شده برای تهیه نمونه‌ها

موارد نشان‌داده‌شده در شکل ۱ عبارت‌اند از:

۱. حلقه پایینی؛ ۲. حلقه میانی؛ ۳. حلقه بالایی؛ ۴. پایه آلومینیومی؛ ۵. صفحه بارگذاری؛ ۶. دستگاه بارگذاری.

اعمال چرخه‌های تر و خشک

به منظور اندازه‌گیری تغییرات کرنش محوری خاک در چرخه‌های متوالی یکی از نمونه‌ها به دستگاه تحکیم اصلاح‌شده منتقل شد. این دستگاه همان دستگاه تحکیم است، با این تفاوت که اصلاحاتی روی آن انجام گرفته است. زیرا دستگاه تحکیم معمولی فقط قادر به اعمال چرخه تر به نمونه‌هاست؛ ولی دستگاه تحکیم اصلاح‌شده قابلیت اعمال چرخه‌های تر و خشک را با هم دارد. قسمت‌های مختلف این دستگاه در شکل ۲ می‌آید. این دستگاه متشکل از محفظه‌ای است که سنگ متخلخل پایینی، حلقه حاوی نمونه، درپوش، سنگ متخلخل بالایی، سربار، و اندازه‌گیر تغییر شکل محوری به‌ترتیب روی آن قرار می‌گیرند. اصلاحات انجام‌شده بر دستگاه شامل تعبیه یک سامانه گرمایشی با قابلیت تنظیم دما در اطراف نمونه خاک و ایجاد یک شیر زهکشی به منظور تخلیه آب در پایان چرخه‌های تر است. به منظور جلوگیری از هدررفت انرژی و تأمین ایمنی بیشتر آزمایش از صفحات آزیست در اطراف محفظه دستگاه استفاده شده است. همچنین اندازه‌گیر به‌کاررفته در تحقیق دارای دقت ۰/۰۱ میلی‌متر بود.



شکل ۲. برش شماتیک دستگاه تحکیم اصلاح‌شده مورد استفاده

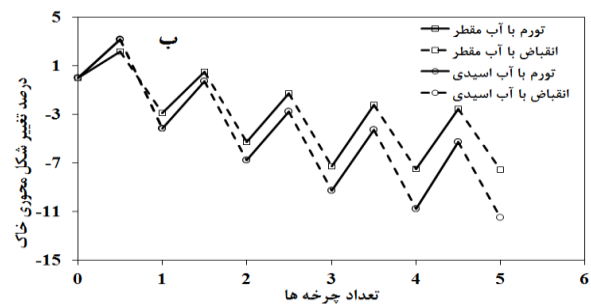
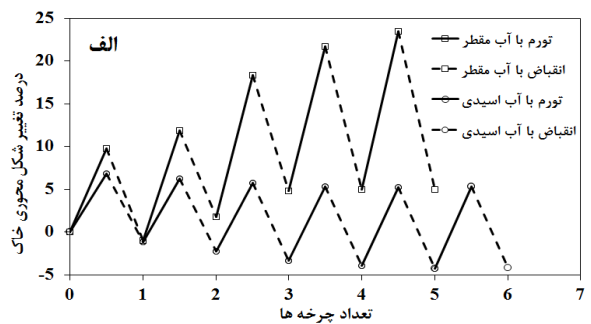
موارد نشان داده شده در این شکل عبارت‌اند از:

۱. صفحه بارگذاری؛ ۲. سنگ متخلخل بالایی؛ ۳. سنگ متخلخل پایینی؛ ۴. حلقه نمونه؛ ۵. محفظه دستگاه تحکیم؛ ۶. روزنه ورود آب؛ ۷. پیستون بارگذاری؛ ۸. سیم؛ ۹. کنترل‌کننده دما؛ ۱۰. مولد برق؛ ۱۱. عایق آزیست؛ ۱۲. سیم‌پیچ حرارتی؛ ۱۳. شیر زهکشی؛ ۱۴. اندازه‌گیر تغییر شکل.

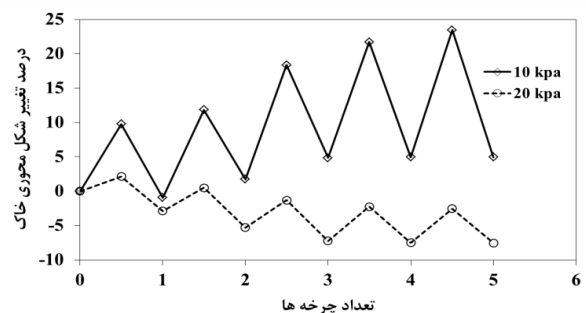
مسیرهای تورمی-انقباضی حین چرخه‌ها

به منظور بررسی تغییرات نسبت تخلخل حین چرخه‌ها، مسیرهای تورمی-انقباضی رسم شد. این مسیرها تغییرات نسبت تخلخل با درصد رطوبت را حین چرخه‌ها نشان می‌دهند؛ مثلاً مسیرهای تورمی-انقباضی کیفیت آب اسیدی و به‌ازای سربار ۲۰ کیلوپاسکال در شکل ۵ می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود در چرخه‌های الف و ب و ج منحنی‌های چرخه‌های تر و خشک از هم جداست؛ به گونه‌ای که به‌ازای ۱ درصد رطوبت مشخص میزان نسبت تخلخل در حالت خشک‌شدن و ترشدن متفاوت است، ولی با افزایش چرخه‌های تر و خشک این فاصله کم می‌شود، طوری که در نمودار د، یعنی در چرخه چهارم، این منحنی‌ها کاملاً بر هم منطبق شده و حالت Sمانند به خود گرفته‌اند. این نتایج با نتایج برخی محققان (Tripathy *et al.*, 2002) تطابق کامل دارند. همچنین همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بیشتر تغییرات نسبت تخلخل در چرخه اول در بازه درصد اشباع ۴۰ تا ۱۰۰ درصد به وقوع می‌پیوندد که با افزایش تعداد چرخه‌ها این بازه کاهش می‌یابد و بیشترین تغییرات نسبت تخلخل در بازه ۴۰ تا ۹۰ درصد رخ می‌دهد. نمودارهای حالت تعادل تورمی-انقباضی به‌ازای کیفیت آب مقطر و آب اسیدی با سربار ۲۰ کیلوپاسکال در شکل ۶ می‌آید. همان‌طور که دیده می‌شود به‌ازای ۱ درصد رطوبت مشخص نسبت تخلخل در حالت استفاده از آب مقطر بیشتر از نسبت تخلخل در حالت استفاده از آب اسیدی است که این مطلب تأییدی بر نتایج به‌دست‌آمده از تغییر شکل محوری خاک است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در چرخه‌های اولیه به‌ازای ۱ درصد رطوبت معین نسبت تخلخل خاک در حالت خشک‌شدن و ترشدن متفاوت است که این ناشی از وجود پدیده هیسترسیس^۱ است. چون پدیده هیسترسیس عبارت است از یکسان‌نبودن مکش خاک در حالت ترشدن و خشک‌شدن در رطوبتی مشخص. ولی با افزایش تعداد چرخه‌ها از شدت این پدیده کاسته می‌شود و در نهایت در چرخه چهارم منحنی ترشدن و خشک‌شدن خاک بر هم منطبق و پدیده هیسترسیس حذف می‌شود؛ که این امر ناشی از تغییر ساختار خاک طی چرخه‌های تر و خشک متوالی است.

به‌دست آمد؛ که نتیجه آن به‌ازای دو سربار ۱۰ و ۲۰ کیلوپاسکال و دو کیفیت آب در اشکال ۳ و ۴ قابل مشاهده است. شکل ۳ الف درصد تغییر شکل محوری خاک را در چرخه‌های متوالی به‌ازای سربار ۱۰ کیلوپاسکال برای کیفیت‌های آب مقطر و آب اسیدی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ الف مشاهده می‌شود به‌ازای آب مقطر میزان درصد تورم و انقباض در چرخه اول به ترتیب ۹٫۷۵ و ۱۰٫۷ درصد است که این مقادیر در چرخه پنجم تقریباً با هم برابر می‌شود و به مقدار ۱۸٫۵ درصد می‌رسد. در حالت استفاده از آب اسیدی میزان درصد تورم و انقباض به ترتیب برابر ۶٫۸۵ و ۸ درصد در چرخه اول است و در چرخه ششم این مقادیر به ترتیب برابر ۹٫۶ و ۹٫۵ درصد می‌شود. همچنین درصد تغییر شکل محوری به‌ازای سربار ۲۰ کیلوپاسکال در شکل ۳ ب دیده می‌شود و شکل ۴ درصد تغییر شکل آب مقطر را در حالت استفاده از دو سربار نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل‌های ۳ تا ۵ نشان می‌دهد افزایش سربار سبب کاهش پتانسیل تورم خاک می‌شود.



شکل ۳. درصد تغییر شکل محوری در چرخه‌های تر و خشک متوالی به‌ازای الف سربار ۱۰ کیلوپاسکال و ب سربار ۲۰ کیلوپاسکال با دو کیفیت مختلف

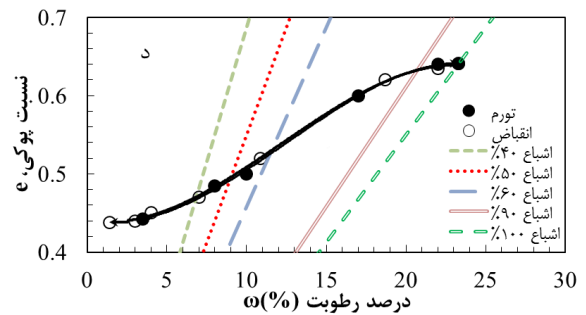
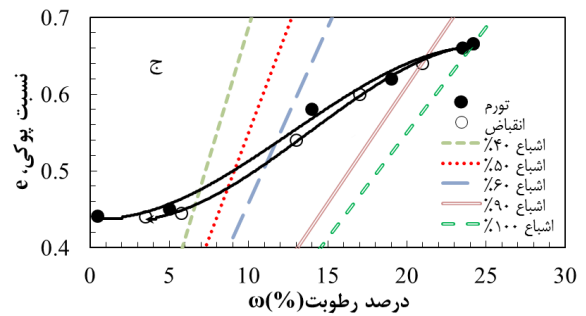
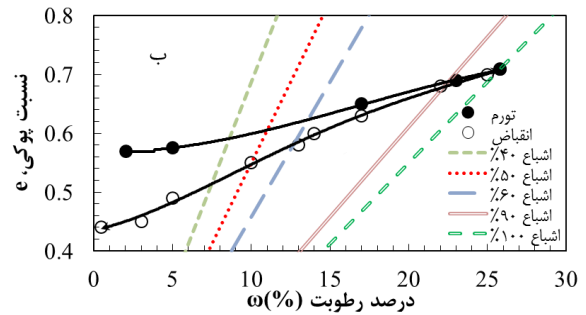
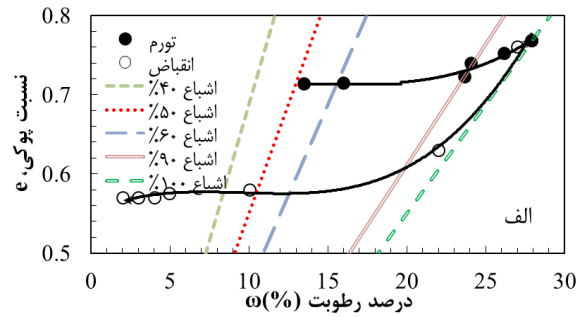


شکل ۴. درصد تغییر شکل محوری در چرخه‌های تر و خشک متوالی به‌ازای کیفیت آب مقطر با دو سربار مختلف

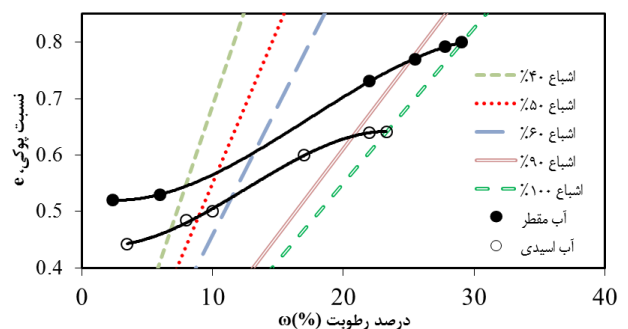
1. Hysteresis

یافته‌ها و بحث

همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود، میزان پتانسیل تورم و انقباض در حالت استفاده از آب مقطر و آب اسیدی در هر دو سربار استفاده‌شده با افزایش تعداد چرخه‌ها افزایش می‌یابد و این افزایش در حالت استفاده از آب مقطر بیشتر است. همچنین به‌ازای سربار ۱۰ کیلوپاسکال این افزایش بیشتر است. زیرا سربار بیشتر همچون عاملی در مقابل فشار تورم عمل می‌کند. همچنین افزایش پتانسیل تورم و انقباض در همهٔ حالت‌ها در چرخه‌های اول بیشتر است و به‌تدریج با افزایش تعداد چرخه‌ها از میزان افزایش آن کاسته می‌شود؛ طوری که اختلاف پتانسیل تورم در دو چرخهٔ متوالی با افزایش چرخه‌ها کمتر می‌شود و از چرخهٔ چهارم به بعد به مقدار ناچیزی می‌رسد که معمولاً در این حالت میزان تورم و انقباض با هم برابر است و از آن به تعادل تورمی-انقباضی یاد می‌شود. شکل ۴ مقادیر پتانسیل تورم و انقباض در حالت استفاده از آب مقطر در دو سربار ۱۰ و ۲۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. در چرخهٔ آخر میزان پتانسیل تورم نسبت به چرخهٔ اول در حالت استفاده از سربار ۱۰ و ۲۰ کیلوپاسکال به ترتیب حدود ۹۰ و ۱۳۰ درصد افزایش یافته است. همچنین شکل‌های ۳ الف و ۳ ب نشان می‌دهد در حالت استفاده از آب اسیدی پتانسیل تورم در چرخهٔ آخر نسبت به چرخهٔ اول در حالت استفاده از سربار ۱۰ و ۲۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۴۰ درصد و ۷۵ درصد افزایش می‌یابد. نتیجه‌ای که از این داده‌ها به‌دست می‌آید افزایش میزان تورم با افزایش تعداد چرخه‌هاست. این پدیده در نمونهٔ مستغرق شده با آب مقطر تحت سربار ۱۰ کیلوپاسکال به‌روشنی قابل مشاهده است. شکل ۴ نشان می‌دهد در حالت استفاده از آب مقطر در کلیهٔ چرخه‌ها میزان تورم و انقباض در حالت استفاده از سربار ۱۰ کیلوپاسکال بیشتر از سربار ۲۰ کیلوپاسکال است که این مطلب بیانگر اثر سربار در کاهش پتانسیل تورم و انقباض خاک است. در زمینهٔ رسیدن به تعادل تورمی و انقباضی پس از طی تعدادی چرخهٔ ترشدن و خشک‌شدن، نتایج با تحقیقات برخی محققان مطابقت کامل دارد (Ring, 1996; Alonso *et al.*, 1999; Tripathy *et al.*, 2002). ولی در زمینهٔ اثر چرخه‌های متوالی تر و خشک بر افزایش یا کاهش پتانسیل تورم، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از افزایش پتانسیل تورم با افزایش تعداد چرخه‌هاست که با نتایج برخی محققان مطابقت دارد (Obermeier, 1974; Day, 1994; Popescu, 1980). ولی با نتایج برخی محققان دیگر مغایر است (Allam and Sridharan, 1981; Dif and Blumel, 1991; Alhomoud *et al.*, 1995).



شکل ۵. مسیرهای تورمی-انقباضی در حالت استفاده از آب اسیدی به‌ازای سربار ۲۰ کیلوپاسکال (الف) چرخهٔ اول، (ب) چرخهٔ دوم، (ج) چرخهٔ سوم، (د) چرخهٔ چهارم



شکل ۶. مسیرهای تورمی-انقباضی در حالت تعادل و استفاده از سربار ۲۰ کیلوپاسکال به‌ازای آب مقطر و اسیدی

دلیل آن شاید استفاده از آب با کیفیت‌های متفاوت باشد. زیرا در تحقیقات قبلی اشاره‌ای به کیفیت شیمیایی آب و خاک به‌کاررفته نشده است و کیفیت آب و خاک استفاده‌شده توسط محققان مختلف قطعاً یکسان نیست. بنابراین، کیفیت آب عامل مؤثری در میزان پتانسیل تورمی خاک از طریق تأثیر در مکش اسمزی به‌شمار می‌رود. خاک‌ها به‌طور کلی دارای دو مکش ماتریک و اسمزی هستند. ابتدا که خاک خشک است با عمل استغراق مکش ماتریک σ و آب تحت اثر جریان اسمزی از درون محفظه دستگانه تحکیم وارد نمونه خاک می‌شود. سپس، آب حفره‌ای خاک تحت اثر خاصیت پخشیدگی^۱ به درون محفظه حرکت می‌کند و تبادل یونی صورت می‌گیرد و از آنجا که خاک غشایی تراوا است املاح نیز همراه آب جابه‌جا می‌شوند و در نتیجه املاح خاک، به‌ویژه یون سدیم، به درون محفظه دستگانه تحکیم منتقل و این عمل سبب افزایش نیروی دافعه بین ذرات رس می‌شود که افزایش حجم و تورم خاک را به دنبال دارد. دلیل این پدیده را می‌توان به این صورت تشریح کرد که سطح رس پوشیده‌شده از بارهای منفی است که با یون‌های مثبت خاک نیروی جاذبه ایجاد می‌کنند و با خروج این یون‌ها نیروی دافعه‌ای بین بارهای موجود در سطح رس ایجاد می‌شود که افزایش ضخامت لایه مضاعف و افزایش تورم خاک را به دنبال دارد. دلیل دیگر تورم بیشتر در حالت استفاده از آب مقطر در مقایسه با حالت استفاده از آب اسیدی این است که پس از پایان چرخه‌های تر و با اشباع‌شدن خاک مکش ماتریک خاک σ می‌شود و چون خاک تحت بار ثابت است مکش اسمزی شروع می‌شود و مطابق رابطه $\sigma' = \sigma - u_w$ میزان فشار آب منفذی زیاد می‌شود و تنش مؤثر کاهش می‌یابد و در نتیجه افزایش حجم صورت می‌گیرد. همچنین انتقال املاح از آب حفره‌ای داخل نمونه به مخزن آب، که حاوی آب با کیفیت مورد نظر است، به شدت متأثر از کیفیت آب مخزن است؛ طوری که هر چه گرادیان املاح موجود بین آب مخزن و آب حفره‌ای بیشتر باشد، تحت اثر خاصیت اسمزی، آب بیشتری جذب خاک و املاح بیشتری همراه آب در مرحله پخشیدگی از خاک خارج می‌شود. این عمل افزایش نیروی دافعه بین ذرات و کاهش غلظت آب حفره‌ای را به دنبال دارد که سبب افزایش ضخامت لایه مضاعف و در نتیجه افزایش تورم خاک می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۳ الف و ۳ ب مشاهده می‌شود، تورم خاک در حالت استفاده از سربار ۱۰ کیلوپاسکال با افزایش کلی

حجم نمونه همراه است؛ در حالی که در حالت استفاده از سربار ۲۰ کیلوپاسکال تورم در هر مرحله در حالت انقباض^۲ خاک شروع می‌شود که این مطلب اثر سربار را در جلوگیری از تورم خاک نشان می‌دهد. درباره علت به‌تبادل رسیدن پتانسیل تورم بعد از چند چرخه تر و خشک باید گفت که با اعمال هر چرخه خشک خلل‌وفرج ریزی در خاک ایجاد می‌شود که با افزایش تعداد چرخه‌ها اندازه این خلل‌وفرج نیز افزایش می‌یابد و سرانجام با ثابت‌شدن اندازه خلل‌وفرج خاک الگوی پرشدن و خالی‌شدن خاک در چرخه‌ها یکسان می‌شود. در این حالت تعادل تورمی-انقباضی رخ می‌دهد و پتانسیل تورم و انقباض یکسان می‌شود.

همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، مسیرهای تورمی-انقباضی تقریباً S شکل هستند و بیشترین تغییرات نسبت تخلخل در فاصله خطوط اشباع ۴۰ تا ۹۰ درصد به‌وقوع می‌پیوندد. این خطوط مرز تغییر فازهای تورمی و انقباضی هستند. به عبارت دیگر، تغییرات تورمی-انقباضی خاک در سه مرحله رخ می‌دهد که بیشترین تغییرات در بخش میانی به‌وقوع می‌پیوندد. این نتایج با نتایج محققان دیگر از قبیل Tripathy et al. (2002) هماهنگی کامل دارد که تأییدی بر درستی نتایج حاصله است. همچنین، به‌ازای چرخه تعادل، مسیرهای تورمی-انقباضی به‌ازای دو کیفیت آب مقطر و آب اسیدی در حالت سربار ۲۰ کیلوپاسکال در شکل ۶ مشاهده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود به‌ازای ۱ درصد رطوبت معین میزان نسبت تخلخل در حالت استفاده از آب مقطر بیشتر از حالت استفاده از آب اسیدی است که این مطلب نتایج به‌دست‌آمده در زمینه تغییر شکل محوری خاک را در دو کیفیت استفاده‌شده تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد تغییر شکل‌های تورمی خاک‌های متورم‌شونده برگشت‌پذیر است و پس از طی تعداد چرخه به تعادل می‌رسد. به عبارت دیگر، میزان تورم و انقباض حدوداً یکسان می‌شود. همچنین مقایسه رفتار تورمی و انقباضی خاک در حالت استفاده از دو کیفیت آب نشان می‌دهد پتانسیل تورم‌پذیری خاک در حالت استفاده از آب مقطر بیشتر از آب اسیدی است. با افزایش سربار اعمال‌شده به خاک پتانسیل تورم کاهش و پتانسیل انقباض خاک افزایش می‌یابد. ولی در روند افزایشی پتانسیل تورم با افزایش تعداد چرخه‌ها تأثیری ندارد.

EC: هدایت الکتریکی
 pH: اسیدیته
 ΔV : تغییر حجم خاک
 V_0 : حجم اولیه خاک
 Δe : تغییر نسبت تخلخل
 e_0 : نسبت تخلخل اولیه
 σ : تنش در خاک
 σ' : تنش مؤثر در خاک
 U_w : فشار آب حفره‌ای

مسیرهای تورمی- انقباضی نسبت تخلخل- درصد رطوبت منحنی‌هایی s شکل هستند که وقوع تورم و انقباض را در سه مرحله نشان می‌دهد. با وقوع حالت تعادل تورمی- انقباضی منحنی‌های s شکل ناشی از تورم و انقباض روی مسیر یکسانی قرار می‌گیرند که حذف پدیده هیستریزیس را با اعمال چرخه‌های تر و خشک متوالی نشان می‌دهد.

فهرست علائم

A: فعالیت خاک

Gs: وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک

REFERENCES

- Alhomoud, A., Basma, A., Malkavi, A. I., and Albashabshah, M. A. (1995). Cyclic swelling behavior of clays. *Journal of geotechnical engineering*. 121, 562-565.
- Allam, M. and Sridharan, S. (1981). Effect of wetting and drying on shear strength. *Journal of geotechnical engineering*. 107, 421-438.
- Alonso, E., Vaunat, J., and Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behavior of expansive clays. *Journal of engineering geology*. 54, 173-183.
- Birle, E., Heyer, D., and Vogt, N. (2008). Influence of the initial water content and dry density on the soil-water retention curve and the shrinkage behavior of a compacted clay, *Journal of Acta Geotechnica*. 3, 191-200.
- Chen, F. H. (1988). *Foundation on expansive soils*. (2nd ed.). Elsevier science publishing co, Inc, New York.
- Day, R. W. (1994). Swell-Shrink behavior of compacted clay. *Journal of geotechnical engineering*. 3, 618-623.
- Dif, A. F. and Blumel, W. F. (1991). Expansive soils with cyclic drying and wetting. *Geotechnical testing Journal*. 14, 96-102.
- Gourly, C. H., Newill, D., and Schreiner, C. H. (1993). Expansive soils: TRL's research strategy. 1st int. *Symp. On Engineering characteristics of arid soils, London*.
- Gromko, G. J. (1974). Review of expansive soils, *Journal of the geotechnical engineering, ASCE*, 100, 667-687.
- Mckeen, R. G. A. (1992). Model for predicting expansive soil behavior. *Proceeding of the 7th Internatioanal Conference on expansive soils, Dallas, USA*.
- Nowamooz, H. and Masrouri, F. (2008). Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic. *Journal of engineering geology*, 101, 154-164.
- Obermeier, S. F. (1974). Evaluation of laboratory techniques for measurement of swell potential of clays. *Proceedings, Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction, Denver, Colorado*.
- Popescu, M. (1980). Behaviour of expansive soils with crumb structures. *Proceeding of the 4th International Conferences on Expansive Soils, Denver, Colorado*, pp 158-171.
- Ring, G. W. (1996). Shrink- swell potential of soils. *Journal of Highway research board*, 119. 17-21.
- Tripathy, S., Subba Rao, K. S., and Fredlund, D. G. (2002). Water content void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 39, 938-959.