

بررسی اثر کیفیت شیمیایی رطوبت اولیه بر خواص مکانیکی یک خاک متورم‌شونده در چرخه‌های تر و خشک

امین سلطانی*^۱، علی رئیسی استبرق^۲، جمال عبداللهی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳. مربی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۷/۲۷)

چکیده

خاک‌های متورم‌شونده از خاک‌های مشکل‌آفرین در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شوند. این دسته خاک‌ها با جذب آب متورم و با ازدست‌دادن آن منقبض می‌شوند. پدیده تر و خشک شدن این خاک‌ها را اصطلاحاً چرخه‌های تر و خشک می‌نامند. در این پژوهش تأثیر کیفیت شیمیایی آب منفذی بر پتانسیل تورمی و انقباضی یک خاک متورم‌شونده بررسی شد. سی و سه نمونه آزمایشگاهی با آب مقطر، محلول سدیم کلرید (با غلظت ۵۰ گرم بر لیتر)، و کلسیم کلرید (با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر) به روش استاتیکی تهیه شد. آزمایش‌ها در یک دستگاه تحکیم اصلاح‌شده، تحت سر بار ۱۰ کیلوپاسکال، صورت پذیرفت و هنگام اعمال چرخه تر استغراق نمونه‌ها به وسیله آب مقطر انجام شد. نتایج نشان داد پتانسیل تورمی نمونه تهیه‌شده با محلول کلسیم کلرید بیشتر از نمونه‌های تهیه‌شده با آب مقطر و محلول سدیم کلرید است و مقدار پتانسیل تورمی و انقباضی در این نمونه‌ها بعد از گذشت تقریباً پنج چرخه برای آب مقطر و سدیم کلرید و سه چرخه برای کلسیم کلرید به حالت تعادل می‌رسد. از سویی نتایج اندازه‌گیری تغییرات حجم ویژه و وزن واحد حجم خشک نمونه‌های مختلف با آب منفذی متفاوت نشان داد مقادیر آن‌ها نیز با افزایش چرخه‌های متوالی تر و خشک به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسد.

کلیدواژگان: آب منفذی، پتانسیل تورمی و انقباضی، حجم ویژه، وزن واحد حجم خشک.

مقدمه

خاک‌های متورم‌شونده از خاک‌های مشکل‌آفرین و مسئله‌دار در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شوند. تغییر رطوبت در این دسته خاک‌ها به تغییر حجم و وقوع پدیده تورم یا انقباض در آن‌ها می‌انجامد. تغییر حجم ناشی از تغییر رطوبت در این‌گونه خاک‌ها همواره موجب خسارات و آسیب‌های جدی به سازه‌ها و بناهای ساخته‌شده بر آن‌ها- نظیر کانال‌های آبیاری و زهکشی، دیوارهای حایل، بزرگراه‌ها، سنگ‌فرش معابر، تونل‌ها- می‌شود (Jones and Holtz, 1992; Nelson and Miller, 1992; Chen, 1965). خسارات مالی سالیانه ناشی از خاک‌های متورم‌شونده را در ایالات متحده آمریکا حدود دو برابر خسارات ناشی از حوادث و بلایای طبیعی- از جمله سیل، زلزله، توفان، گردباد، آتشفشان- گزارش کردند.

خاک‌های متورم‌شونده منطقه وسیعی از جهان را پوشش داده‌اند (Gourley et al, 1993) و به‌رغم مشکل‌آفرین بودن کاربردی وسیع در پروژه‌های مختلف عمرانی و دفن زباله‌های

شهری و صنعتی و هسته‌ای دارند (Komine and Ogata, 1996; Kröhn, 2003; Siddiqua et al, 2011). برای به‌سازی این دسته خاک‌ها، به منظور اجرای پروژه‌های عمرانی و استفاده از آن‌ها به مثابه پوشش در دفن زباله‌های شهری و صنعتی و به‌خصوص هسته‌ای، لازم است شناختی کافی و دقیق از این خاک‌ها حاصل شود. این شناخت با فعالیت‌های آزمایشگاهی، از جمله اعمال چرخه‌های تر و خشک متوالی بر خاک مورد نظر و ارزیابی پتانسیل تورمی خاک با افزایش چرخه‌های متوالی، میسر است. پژوهشگران مختلف از جمله (Chu and Mou, 1973)،

(Osipov et al, 1987) Basma et al, (1996) Tripathy et al, (2002) Alonso et al, (2005) Parsaee and Estabragh, (2009) و (Tripathy et al, 2009) با آزمایش‌های مختلف بر خاک‌های متورم‌شونده نتیجه گرفتند که افزایش وقوع چرخه‌های تر و خشک متوالی موجب کاهش پتانسیل تورمی و قابلیت جذب آب به وسیله خاک می‌شود و تغییر شکل‌های بازگشت‌ناپذیر (خمیری) خاک به تدریج محو و تغییرات کاملاً برگشت‌پذیر می‌شود. (Popescu, 1980) و (Tawfiq and Nalbantoglu, 2009) نتیجه گرفتند که افزایش تکرار

این پژوهش اثر کیفیت آب منفذی بر پتانسیل تورمی و خواص مکانیکی یک خاک متورم‌شونده، طی چرخه‌های تر و خشک متوالی، بررسی شد.

مواد و روش‌ها

خاک

خاک استفاده‌شده در پژوهش حاضر از اختلاط یک خاک رسی با خاصیت خمیری پایین (CL) و پتانسیل تورمی کم با درصد‌های گوناگون بنتونیت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) به دست آمد. بدین منظور، ابتدا آزمایش تورم آزاد مطابق استاندارد ASTM-D4546-08 بر نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط‌های خاک-بنتونیت انجام شد و بر اساس معیار طبقه‌بندی McKean (1992) مخلوط ۸۰ درصد خاک معمولی با ۲۰ درصد بنتونیت به منزله خاک متورم‌شونده مناسب انتخاب شد. خاک یادشده بر اساس معیار طبقه‌بندی McKean (1992) پتانسیل تورمی بالایی دارد. مشخصات مکانیکی و شیمیایی این خاک به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ می‌آید.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک استفاده‌شده

مقدار	استاندارد مورد استفاده	مشخصه
۲/۷۵	ASTM-D854	وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)
۷۴	ASTM-D422	درصد عبوری از الک ۲۰۰ (F_{200}) (%)
۸۱		حد روانی (LL) (%)
۲۷/۵	ASTM-D4318	حد خمیری (PL) (%)
۵۳/۵		نشانه خمیری (PI) (%)
۱۴/۲	ASTM-D427	حد انقباض (SL) (%)
۲۳/۵	ASTM-D4546	درصد تورم آزاد (S) (%)
CH	ASTM-D2487	طبقه‌بندی متحد (USCS)
۲۲		درصد رطوبت بهینه (ω_{opt}) (%)
۱۶	ASTM-D698	وزن واحد حجم خشک حداکثر ($\gamma_{d max}$) (kN/m^3)

که میزان اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) آن به ترتیب برابر ۷/۴ و ۰/۱۸ دسی‌زیمنس بر متر بود.

نمک

در پژوهش حاضر برای تعیین اثر کیفیت آب منفذی بر پتانسیل تورمی و انقباضی خاک در چرخه‌های تر و خشک متوالی از نمک‌های سدیم کلرید (NaCl) و کلسیم کلرید ($CaCl_2$) ساخت شرکت Merck Worldwide استفاده شد. برای تعیین غلظت مناسب محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید، به منزله مبنای کار آزمایشگاهی، غلظت‌های مختلفی از این نمک‌ها انتخاب و

چرخه‌های تر و خشک متوالی سبب افزایش پتانسیل تورمی خاک می‌شود. Estabragh *et al.* (2013) پتانسیل تورمی و انقباضی خاک‌های متورم‌شونده را طی چرخه‌های متوالی تر و خشک، با در نظر گرفتن کیفیت آب مستغرق‌کننده (آب محفظه‌ای)، بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اعمال چرخه‌ها به تنهایی تعیین‌کننده مطلق افزایش یا کاهش پتانسیل تورمی خاک نیست و پتانسیل تورمی وابسته به عواملی دیگر، از جمله کیفیت آب مستغرق‌کننده، نیز است.

در شرایط طبیعی ممکن است کیفیت آب منفذی یک خاک متورم‌شونده در اثر عوامل مختلف، از جمله هوازگی، تشکیلات و رسوبات رسی و وجود املاح در آب زیرزمینی و انتقال آن به لایه‌های رسی در اثر نوسانات سطح آب زیرزمینی، دچار تغییر شود. این موضوع می‌تواند به تغییر پتانسیل تورمی این دسته خاک‌ها بینجامد. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد تا کنون کار پژوهشی مشخصی در زمینه بررسی اثر کیفیت آب منفذی بر پتانسیل تورمی یک خاک متورم‌شونده، طی چرخه‌های تر و خشک متوالی، صورت نگرفته است. بنابراین، در

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک استفاده‌شده

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
۴/۹	(meq/lit) Mg^{2+}	۸/۲	pH
۳۵/۶	(meq/lit) Cl^-	۷/۶۱	EC (dS/m)
۰/۱	(meq/lit) CO_3^{2-}	۷۳/۵	(meq/lit) Na^+
۳۱/۱	(meq/lit) HCO_3^-	۰/۰۴	(meq/lit) K^+
۵۰/۸	(meq/lit) SO_4^{2-}	۸/۴۰	(meq/lit) Ca^{2+}

آب

آب به‌کاررفته برای ساخت نمونه‌های آزمایشی و مستغرق کردن آن‌ها درون دستگاه تحکیم اصلاح‌شده از نوع مقطر انتخاب شد

تهیه نمونه

برای ساخت نمونه‌های آزمایشی ابتدا آزمایش تراکم استاندارد مطابق استاندارد ASTM-D698-012 روی خاک اصلی (مخلوط ۸۰٪ خاک معمولی با ۲۰٪ بنتونیت) با آب مقطر، محلول ۵۰ گرم بر لیتر سدیم کلرید و محلول ۲۵۰ گرم بر لیتر کلسیم کلرید انجام شد. مطابق پژوهش Lambe (1958) ساختار خاک‌های چسبنده با خاصیت خمیری بالا در شاخه خشک منحنی استاندارد تراکمی فولکوله و در شاخه تر پراکنده است. به‌علاوه Nelson and Miller (1992) گزارش کردند رس‌های فولکوله نسبت به رس‌های پراکنده خاصیت تورم‌پذیری بیشتری دارند. در نتیجه، با انتخاب نقطه‌ای بر شاخه خشک منحنی استاندارد تراکمی (رطوبت کمتر از مقدار بهینه) اقدام به ساخت نمونه‌های آزمایشی به روش تراکم استاتیکی شد. نمونه‌های آزمایشی در قالبی مخصوص (شکل ۲ الف) تحت سرعت بارگذاری ثابت ۱/۵ میلی‌متر در دقیقه در یک دستگاه بارگذاری ویژه (شکل ۲) به روش تراکم استاتیکی در سه لایه تهیه شد (Soltani et al, 2014)؛ به طوری که فشار وارده به هر لایه یکسان و طوری محاسبه شد که وزن واحد حجم خشک و رطوبت نمونه ساخته‌شده معادل نقطه انتخابی بر روی شاخه خشک منحنی استاندارد تراکمی مربوطه شد. نمونه‌های تهیه‌شده با این روش همگی ابعادی معادل رینگ میانی قالب مخصوص استفاده‌شده، که همان رینگ دستگاه تحکیم (با ارتفاع ۲ سانتی‌متر و قطر ۷/۵ سانتی‌متر) است، دارند.



شکل ۲. قالب مخصوص (الف) و دستگاه بارگذاری ویژه (ب) جهت ساخت نمونه‌های آزمایشی

روش آزمایش

آزمایش تراکم استاندارد

آزمایش تراکم استاندارد مطابق استاندارد ASTM-D698-012 با آب مقطر، محلول سدیم کلرید، و کلسیم کلرید انجام شد. با توجه به محسوس بودن وزن نمک استفاده‌شده در محلول‌های سدیم کلرید و کلسیم کلرید (۵۰ و ۲۵۰ گرم در ۱ لیتر آب)،

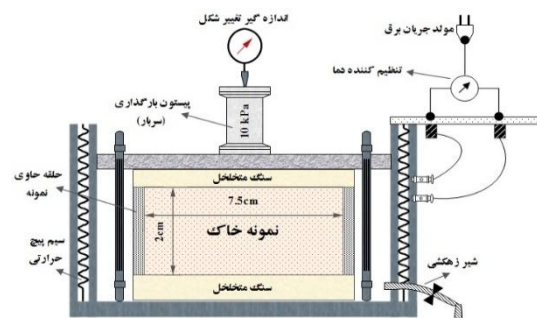
آزمایش‌های تراکم استاندارد و تورم آزاد بر آن‌ها انجام شد و نتایج با نتایج حاصل از آب مقطر مقایسه شد. حداقل غلظت محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید، که در آن تفاوتی معنادار و قابل ملاحظه مشاهده شد، به ترتیب برابر ۵۰ و ۲۵۰ گرم بر لیتر تعیین شد. بنابراین، از محلول ۵۰ گرم بر لیتر سدیم کلرید و ۲۵۰ گرم بر لیتر کلسیم کلرید برای انجام دادن آزمایش‌ها استفاده شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی محلول نمک‌های استفاده‌شده در جدول ۳ می‌آید.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی محلول‌های نمک استفاده‌شده

مشخصه	محلول ۵۰ gr/lit	محلول ۲۵۰ gr/lit
جرم مولی (g/mol)	۵۸/۴۴	۱۱۰/۹۹
اسیدیته (pH) محلول	۴/۸	۹/۳
هدایت هیدرولیکی محلول (EC) (dS/m)	۷۸/۱۲۵	۳۹۰/۶۲۵
غلظت کل مواد جامد محلول (g/lit) (TDS)	۵۰	۲۵۰
درصد وزنی محلول (%)	۴/۸۸	۲۲/۳۳
غلظت مولار محلول (mol/lit)	۰/۸۶	۲/۲۵
چگالی محلول (Mg/m ³)	۱/۰۳	۱/۱۲

دستگاه تحکیم اصلاح‌شده

در این بررسی برای اعمال چرخه‌های تر و خشک متوالی از دستگاه تحکیم اصلاح‌شده استفاده شد. از آنجا که دستگاه تحکیم معمولی فقط قادر به اجرای چرخه تر است، برای اجرای چرخه خشک تغییراتی در دستگاه تحکیم ایجاد شد. بدین منظور، یک سامانه گرمایشی عایق‌بندی‌شده، با قابلیت تنظیم دمای محفظه دستگاه تحکیم (با خطای $\pm 5^{\circ}\text{C}$)، برای اعمال چرخه‌های خشک و یک شیر زهکشی برای تخلیه آب مستغرق‌کننده (محفظه‌ای) در انتهای چرخه‌های تر روی دستگاه تحکیم اولیه تعبیه و نصب شد (Soltani et al, 2014). نمای کلی و اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه تحکیم اصلاح‌شده در شکل ۱ می‌آید.



شکل ۱. نمای کلی و اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه تحکیم اصلاح‌شده (بدون مقیاس)

با توجه به اینکه دستگاه تحکیم اصلاح شده طی چرخه‌های تر و خشک متوالی قادر به تعیین تغییر شکل جانبی (افقی) نمونه‌های آزمایشی نیست، هم‌زمان با آزمایش‌های اصلی چرخه‌های تر و خشک در دستگاه تحکیم اصلاح شده نمونه‌های مشابه با نمونه‌های اصلی تهیه و در آون با دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد (برای اجرای چرخه‌های خشک) و در دستگاه تحکیم معمولی (برای اجرای چرخه‌های تر) تحت سربار مشابه (۱۰ کیلوپاسکال) قرار گرفت و در پایان هر چرخه قطر نمونه‌ها به روش مستقیم با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شد. قطر همه نمونه‌های آزمایشی در پایان چرخه‌های تر برابر با قطر رینگ دستگاه تحکیم (۷۵ میلی‌متر) بود. درصد تغییر شکل (درصد کرنش) جانبی (ϵ_d) برای هر چرخه با استفاده از رابطه ۵ به شرح زیر محاسبه شد:

$$\epsilon_d (\%) = \frac{\Delta D}{D_0} \times 100 \quad (\text{رابطه ۵})$$

ϵ_d درصد کرنش جانبی (٪)، ΔD تغییر شکل جانبی نمونه آزمایشی (mm)، D_0 قطر اولیه نمونه آزمایشی یا قطر رینگ دستگاه تحکیم (۷۵ میلی‌متر) است.

برای محاسبه نسبت تخلخل نمونه‌های آزمایشی طی چرخه‌های متوالی تر و خشک از رابطه ۶، که همان رابطه تحکیم خاک در فضای دوبعدی است، به شرح زیر استفاده شد:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (\text{رابطه ۶})$$

ΔV تغییر حجم نمونه آزمایشی (mm^3)، V_0 حجم اولیه نمونه آزمایشی، Δe تغییر نسبت تخلخل نمونه آزمایشی، و e_0 نسبت تخلخل اولیه نمونه آزمایشی در چرخه بررسی شده است. پس از محاسبه نسبت تخلخل طی چرخه‌های متوالی، وزن واحد حجم خشک نمونه‌های آزمایشی طی چرخه‌های متوالی با استفاده از رابطه ۷ به شرح زیر محاسبه شد:

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w \quad (\text{رابطه ۷})$$

γ_d وزن واحد حجم خشک نمونه آزمایشی (kN/m^3)، G_s چگالی دانه‌های جامد خاک (۲/۷۵)، γ_w وزن واحد حجم آب (۹/۸۱ کیلو نیوتن بر متر مکعب)، و e نسبت تخلخل نمونه آزمایشی است.

یافته‌ها و بحث

تراکم استاندارد

نتایج آزمایش تراکم استاندارد برای نمونه تهیه شده با آب منفذی مقطر، محلول سدیم کلرید، و کلسیم کلرید در شکل ۳ می‌آید. بر اساس نتایج، وزن واحد حجم خشک حداکثر و درصد

لازم است برای محاسبه رطوبت و در نتیجه وزن واحد حجم خشک در هر مرحله آزمایش تراکم استاندارد وزن نمک نیز لحاظ شود. برای اصلاح میزان رطوبت و در نتیجه وزن واحد حجم خشک در هر مرحله آزمایش تراکم استاندارد از روابط پیشنهادی *Siddiqua et al* (2011)، به شرح زیر، استفاده شد:

$$\omega_c (\%) = \frac{W_f}{W_s} \times 100 = \frac{\omega}{1-r(1+\omega)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$r = \frac{W_{\text{salt}}}{W_f} = \frac{\text{TDS}}{\rho_f \times 1000} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1+\omega_c} \quad (\text{رابطه ۳})$$

ω_c درصد رطوبت اصلاح شده (٪)، W_f وزن محلول حاوی نمک (gr)، W_s وزن ذرات جامد خاک (gr)، ω درصد رطوبت اصلاح نشده (٪)، r درجه شوری، W_{salt} وزن نمک باقی‌مانده پس از خشک کردن نمونه درون آون (gr)، TDS غلظت کل مواد جامد محلول (g/L)، ρ_f وزن واحد حجم محلول حاوی نمک (Mg/m^3)، γ_d وزن واحد حجم خشک خاک (kN/m^3)، و γ_m وزن واحد حجم مرطوب خاک (kN/m^3) است.

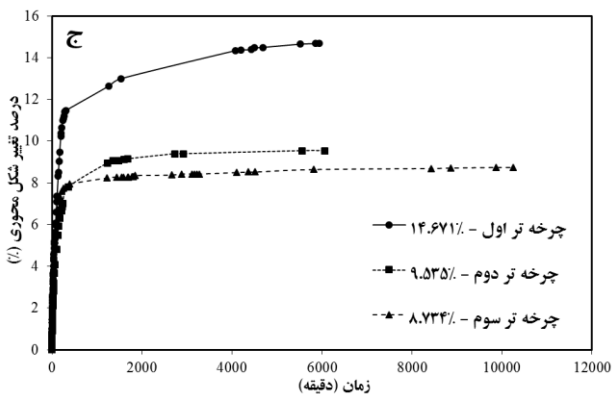
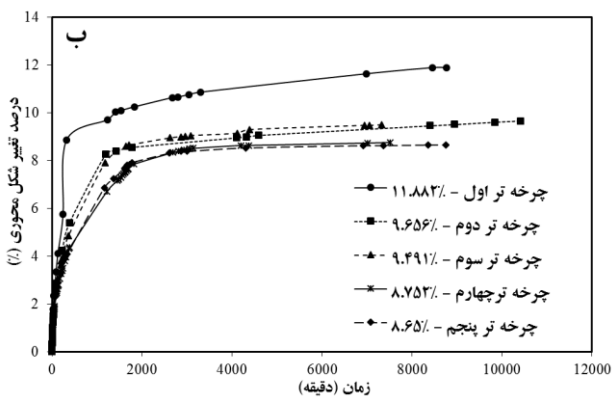
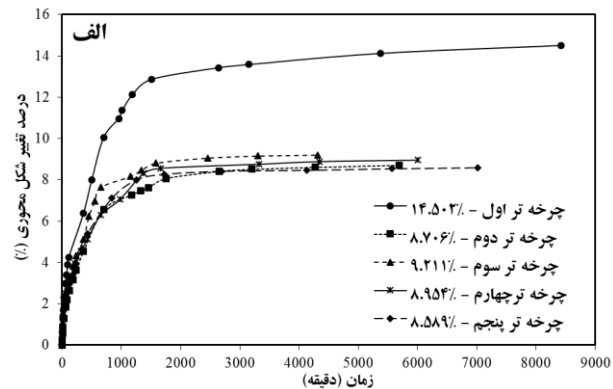
آزمایش چرخه‌های تر و خشک

نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر، محلول سدیم کلرید، و کلسیم کلرید درون دستگاه تحکیم اصلاح شده قرار گرفت. آزمایش با ایجاد چرخه خشک صورت پذیرفت. بدین منظور، نمونه‌ها تحت دمای ثابت ۴۵ درجه سانتی‌گراد و سربار ۱۰ کیلوپاسکال خشک شد. تغییر شکل محوری (عمودی) نمونه‌ها در زمان‌های مختلف با استفاده از گیج موجود در دستگاه تحکیم اصلاح شده ثبت و درصد تغییر شکل (درصد کرنش) محوری (ϵ_a) برای هر چرخه با استفاده از رابطه ۴ تعیین شد. این عمل تا ثابت شدن تغییر شکل عمودی برای هر نمونه (نمونه با آب منفذی مقطر، محلول سدیم کلرید، و کلسیم کلرید) ادامه یافت. پس از اتمام چرخه خشک، محفظه دستگاه از آب مقطر پر و نمونه‌ها وارد چرخه تر شدند و تغییر شکل عمودی آن‌ها در زمان‌های مختلف ثبت شد. پس از ثابت شدن تغییر شکل عمودی و در نتیجه اتمام چرخه تر، با استفاده از شیر زهکشی، آب مستغرق کننده (محفظه‌ای) تخلیه و چرخه خشک بعدی آغاز شد. این روند برای اجرای چرخه‌های خشک و تر بعدی، تا جایی که میزان انقباض و تورم در دو چرخه متوالی تقریباً یکسان شود، تکرار شد.

$$\epsilon_a (\%) = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (\text{رابطه ۴})$$

ϵ_a درصد کرنش محوری (٪)، ΔH تغییر شکل محوری (عمودی) نمونه آزمایشی (mm)، و H_0 ارتفاع اولیه نمونه آزمایشی در ابتدای هر چرخه (mm) است.

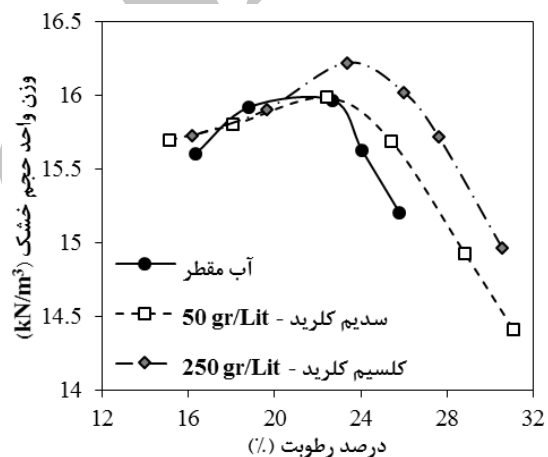
ب، و ۴ ج نشان می‌دهد میزان تورم برای نمونه تهیه شده با محلول کلسیم کلرید (۱۴٫۶۷٪) نسبت به آب مقطر (۱۴٫۵۰٪) و محلول سدیم کلرید (۱۱٫۸۸٪) بیشتر است.



شکل ۴. پتانسیل تورمی نمونه‌های آزمایشی حاوی آب منفذی مقطر (الف)، محلول سدیم کلرید (ب)، و محلول کلسیم کلرید (ج) طی چرخه‌های متوالی تر و خشک

تغییر شکل محوری (عمودی) و جانبی (افقی) نمونه‌های آزمایشی تهیه شده با آب منفذی مقطر، محلول سدیم کلرید، و کلسیم کلرید طی چرخه‌های متوالی تر و خشک در شکل ۵ می‌آید. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، چرخه اول برای هر سه نمونه با خشک شدن آغاز شد. با بررسی این شکل مشخص می‌شود پتانسیل تورمی نمونه حاوی آب منفذی کلسیم کلرید نسبت به آب مقطر و محلول سدیم کلرید بیشتر است. همچنین، برای یک نمونه مشخص در چرخه‌های ابتدایی میزان

رطوبت بهینه برای آب مقطر و محلول سدیم کلرید تقریباً برابر و به ترتیب ۱۵٫۹۸ کیلونیوتن بر متر مکعب و ۲۲٫۴ درصد بود. این موضوع بیانگر عدم تأثیر غلظت‌های پایین نمک در خواص تراکمی خاک است. برای محلول کلسیم کلرید، که غلظت بالایی (۲۵۰ گرم در ۱ لیتر آب) دارد، میزان وزن واحد حجم خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه به ترتیب برابر ۱۶٫۲۲ کیلونیوتن بر متر مکعب و ۲۳٫۶ درصد است. این تغییر بیانگر آن است که وجود نمک با غلظت‌های بالاتر می‌تواند بر خواص تراکمی خاک تأثیرگذار باشد؛ هرچند این تغییرات ممکن است چندان محسوس نباشد. دلیل این موضوع را می‌توان اثر کلسیم کلرید بر ساختار خاک دانست؛ یعنی لغزش ذرات خاک در شرایط وجود محلول کلسیم کلرید به آسانی صورت پذیرفته است. این نتایج با نتایج *Siddiqua et al* (2011) مطابقت دارد.



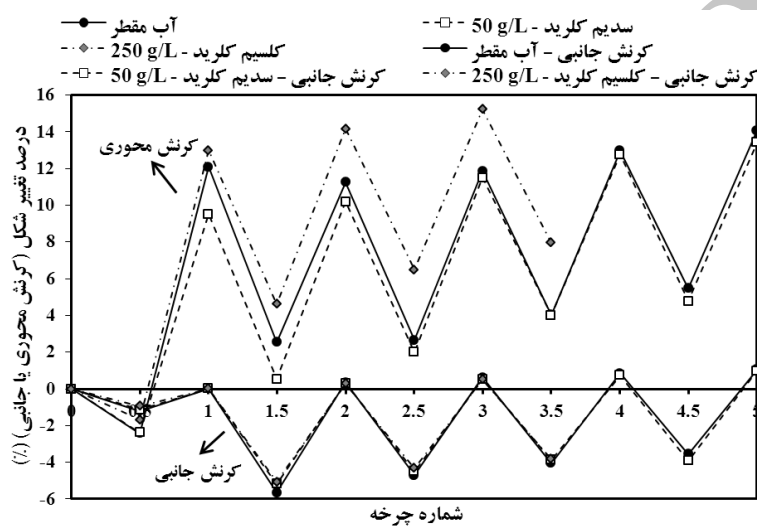
شکل ۳. منحنی تراکم استاندارد به‌ازای استفاده از آب مقطر، محلول سدیم کلرید، و کلسیم کلرید

چرخه‌های تر و خشک

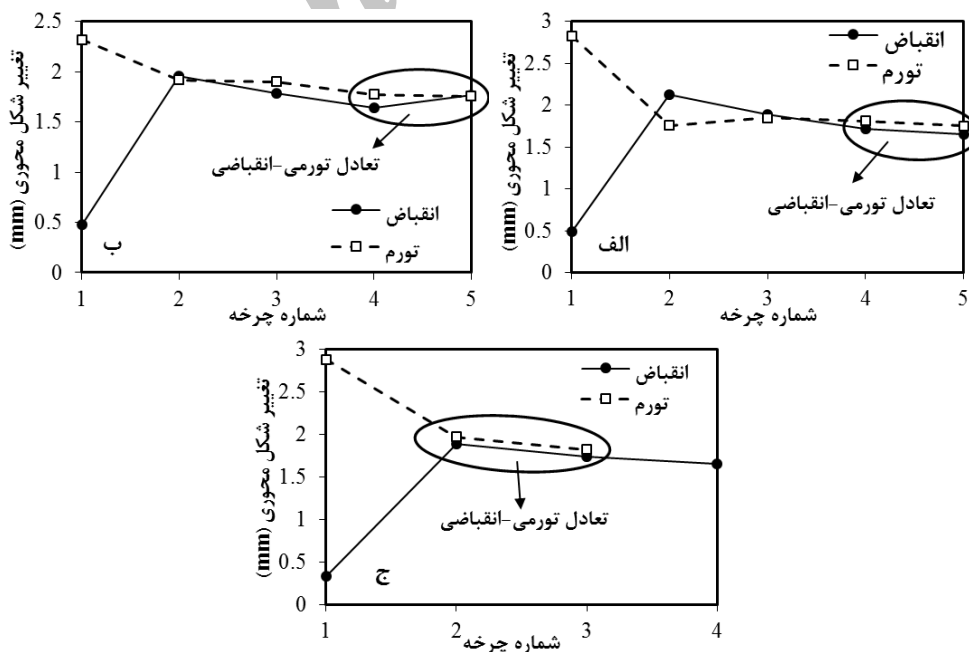
یک چرخه یا سیکل به مجموع مراحل تر و خشک شدن نمونه اطلاق می‌شود. شکل ۴ تغییرات ناشی از تورم (خیس شدن) نمونه‌های حاوی آب منفذی مقطر (شکل ۴ الف)، محلول سدیم کلرید (شکل ۴ ب)، و محلول کلسیم کلرید (شکل ۴ ج) با زمان را طی چرخه‌های متوالی تر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، میزان تورم (تغییر شکل محوری) در زمان‌های اولیه تر شدن نمونه‌ها زیاد است و با گذشت زمان کاهش می‌یابد؛ به طوری که تغییرات به مقداری ثابت می‌رسد. همچنین افزایش تعداد چرخه‌ها موجب کاهش پتانسیل تورمی نمونه‌ها (نسبت به چرخه قبلی) می‌شود؛ مثلاً، میزان تورم برای نمونه تهیه شده با محلول سدیم کلرید (شکل ۴ ب) در چرخه اول ۱۱٫۸۸ درصد و در چرخه پنجم ۸٫۶۵ درصد بود که کاهش معادل ۳٫۲۳ درصد را نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۴ الف، ۴

چرخه برای محلول کلسیم کلرید) برای هر نمونه تقریباً محو یا ثابت می‌شود. این وضعیت را تعادل تورمی-انقباضی می‌نامند. پیدایش وضعیت تعادل تورمی-انقباضی بیانگر آن است که خاک از نظر ساختمانی به وضعیتی پایدار رسیده و تغییر شکل‌های ناشی از خشک و تر شدن به حالت برگشت‌پذیر تبدیل شده است. وقوع تعادل تورمی-انقباضی در شکل ۶ الف برای آب مقطر، ۶ ب برای محلول سدیم کلرید، و ۶ ج برای محلول کلسیم کلرید طی چرخه‌های متوالی تر و خشک می‌آید.

تغییر شکل ناشی از خشک و تر شدن در یک چرخه یکسان نیست. به عبارت دیگر، تغییر شکل بازگشت‌ناپذیر در نمونه ایجاد می‌شود؛ مثلاً، برای نمونه حاوی آب منفذی سدیم کلرید میزان تغییر شکل ناشی از خشک و تر شدن در چرخه اول به ترتیب ۲/۳۸ و ۱۱/۸۸ درصد بود که بیانگر ۹/۵ درصد تغییر شکل بازگشت‌ناپذیر است. افزایش تعداد چرخه‌های متوالی کاهش میزان تغییر شکل بازگشت‌ناپذیر را به دنبال دارد؛ به طوری که پس از طی تعداد چرخه‌های مشخص (پنج چرخه برای نمونه حاوی آب منفذی مقطر و محلول سدیم کلرید و سه



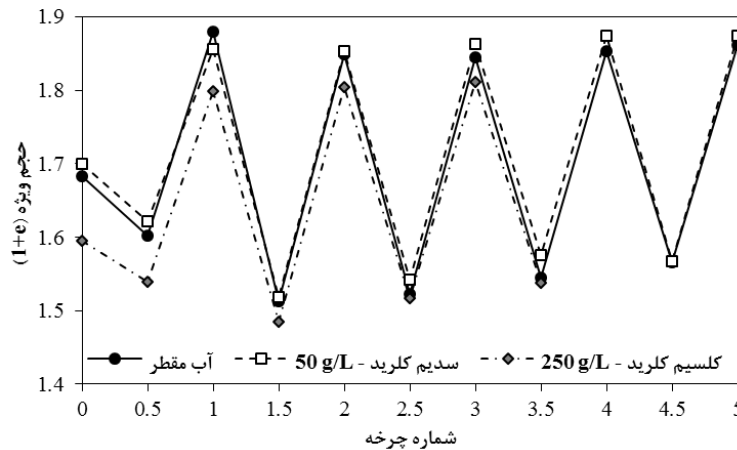
شکل ۵. تغییر شکل محوری (عمودی) و جانبی (افقی) نمونه‌های آزمایشی طی چرخه‌های تر و خشک متوالی



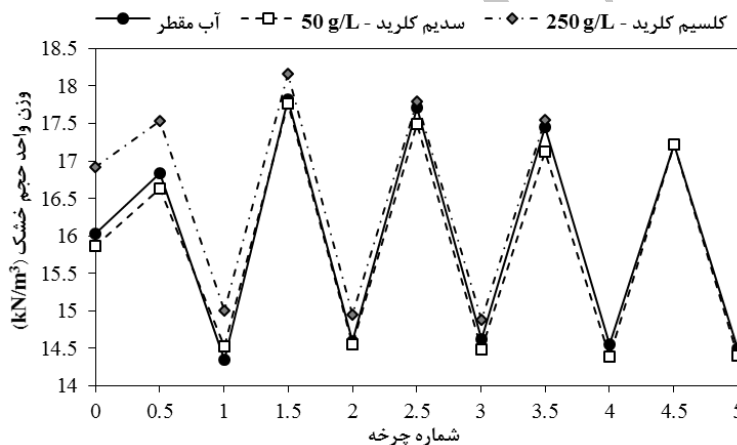
شکل ۶. وقوع تعادل تورمی-انقباضی طی چرخه‌های تر و خشک متوالی برای نمونه حاوی آب منفذی مقطر (الف)، محلول سدیم کلرید (ب)، و محلول کلسیم کلرید (ج)

همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، مقادیر حجم ویژه و وزن واحد حجم خشک با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک متوالی به مقادیری ثابت می‌رسد.

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات حجم ویژه ($1+e$)، نسبت تخلخل (e) و وزن واحد حجم خشک نمونه‌های آزمایشی طی چرخه‌های متوالی تر و خشک است.



شکل ۷. تغییرات حجم ویژه برای نمونه‌های آزمایشی طی چرخه‌های تر و خشک متوالی



شکل ۸. تغییرات وزن واحد حجم خشک برای نمونه‌های آزمایشی طی چرخه‌های تر و خشک متوالی

عمل متقابل با یک‌دیگر قرار دارند. این عمل متقابل تحت تأثیر نیروهای جاذبه یا دافعه صورت می‌پذیرد. عمل متقابل یادشده در تشکیل ساختمان خاک نقشی بسزا ایفا می‌کند؛ به طوری که در شرایط قالب‌بودن نیروهای جاذبه ساختمان فولکوله (لخته) و در غیر این صورت ساختمان پراکنده به خاک می‌دهد.

پژوهشگرانی چون Seed and Chan (1959) و Barden and Sides (1970) به این نتیجه رسیدند که ساختمان خاک تأثیری بسزا بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک دارد. به طور کلی می‌توان گفت ساختمان خاک به نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده رس، خواص فیزیکی و شیمیایی آب منفذی، مانند اسیدیته (pH)، درجه حرارت، ثابت دی‌الکتریک، نوع یون‌های محلول، و ... بستگی دارد؛ به طوری که عمل متقابل بین آب منفذی و ذرات خاک می‌تواند موجب کاهش یا افزایش

نتایج نشان داد میزان تورم نمونه تهیه‌شده با محلول کلسیم کلرید بیشتر از نمونه‌های تهیه‌شده با آب مقطر و محلول سدیم کلرید است. اصولاً ذرات رس بارهای الکتریکی منفی در سطوح خود حمل می‌کنند و کاتیون‌های قابل تبادل جذب این بارها می‌شوند. در شرایط خشک‌بودن خاک رسی، کاتیون‌ها با اتصال بسیار محکم و پایدار به سطوح ذرات رس وصل‌اند. افزودن آب به خاک موجب شناور شدن کاتیون‌ها می‌شود؛ به طوری که بیشترین غلظت کاتیون‌ها در مجاورت سطح ذرات رس است و با افزایش فاصله از ذرات رس کاهش می‌یابد. بنابراین، یک لایه پخشیدگی اطراف ذرات رس تشکیل می‌شود که در آن نیروی جاذبه بین ذرات رسی با بار الکتریکی منفی و کاتیون‌ها با بار الکتریکی مثبت وجود دارد که لایه پخشیدگی مضاعف (DDL) نامیده می‌شود. این لایه و ذرات مجاور آن در

ریز طی چرخه‌های متوالی به یک‌دیگر می‌چسبند و ذرات درشت‌دانه‌تری ایجاد می‌کنند که موجب کاهش سطح ویژه ذرات و در نتیجه کاهش پتانسیل تورمی آن‌ها می‌شود. این نتایج با نتایج پژوهشگرانی چون Subba Rao and Satyadas (1987)، Al-Homoud *et al.* (1995)، و Tripathy *et al.* (2002) کاملاً مطابقت دارد. پژوهشگران یادشده نیز کاهش پتانسیل تورمی طی چرخه‌های تر و خشک متوالی را در اثر کاهش سطح ویژه و تشکیل ساختمان درشت‌دانه‌تر گزارش کردند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر یک سری آزمایش‌های چرخه‌های تر و خشک بر نمونه‌های تهیه‌شده با آب منفذی مقطر، محلول سدیم کلرید، و کلسیم کلرید تحت سربار ۱۰ کیلوپاسکال صورت پذیرفت. طبق نتایج به‌دست‌آمده و تحلیل آن‌ها موارد زیر قابل بیان است:

۱. پتانسیل تورمی یک خاک متورم‌شونده وابسته به میزان اسیدیته (pH) آب منفذی اولیه نمونه‌های آزمایشی است؛ به طوری که پتانسیل تورمی در شرایط قلیایی (محلول کلسیم کلرید) افزایش و در شرایط اسیدی (محلول سدیم کلرید) کاهش می‌یابد.

۲. تورم و انقباض پدیده‌هایی برگشت‌پذیرند و پس از چند چرخه به حالت تعادل می‌رسند. به عبارت دیگر، میزان انقباض ناشی از خشک‌شدن با میزان تورم ناشی از ترشدن خاک تقریباً یکسان می‌شود.

۳. افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک در به‌تعادل‌رسیدن مقادیر حجم ویژه و وزن واحد حجم خشک مؤثر است.

ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف و تغییر ساختمان خاک شود. Olson (1974) و Abdullah *et al.* (1999) با بررسی اثر تغییرات اسیدیته آب منفذی در تشکیل ساختمان خاک به این نتیجه رسیدند که در pH=۹ ساختمان پراکنده و در pH=۵ ساختمان فولکوله ایجاد می‌شود. در پژوهش حاضر محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید به ترتیب دارای اسیدیته ۴/۸ و ۹/۳ بود. بنابراین، مطابق نتایج Olson (1974) و Abdullah *et al.* (1999) نمونه خاک تهیه‌شده با آب منفذی سدیم کلرید دارای ساختمان فولکوله و نمونه تهیه‌شده با محلول کلسیم کلرید دارای ساختمان پراکنده است. Bolt (1965) علت تغییر حجم خاک‌ها را عمل متقابل کاتیون، آب و خاک، و تغییر ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف اعلام کرد. در نتیجه، مکانیزم پیدایش تورم در خاک را می‌توان با لایه پخشیدگی مضاعف توجیه کرد؛ گسترش این لایه به افزایش میزان تورم و کاهش ضخامت آن به کاهش تورم می‌انجامد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان تورم نمونه تهیه‌شده با محلول کلسیم کلرید نسبت به نمونه تهیه‌شده با محلول سدیم کلرید بیشتر است؛ که آن را می‌توان ناشی از تشکیل ساختمان پراکنده تحت تأثیر اسیدیته دانست.

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در پدیده تورم سطح ویژه ذرات است. افزایش سطح ویژه ذرات موجب افزایش قابلیت جذب آب به وسیله ذرات و در نتیجه افزایش میزان تورم آن‌ها می‌شود. کاهش میزان پتانسیل تورمی طی چرخه‌های متوالی تر و خشک نسبت به چرخه قبل را می‌توان ناشی از کاهش سطح ویژه ذرات طی این چرخه‌ها دانست؛ به طوری که ذرات بسیار

REFERENCES

- Abdullah, W. S., Alshibli, K. A., and Al-Zou'bi, M. S. (1999). Influence of pore water chemistry on the swelling behavior of compacted clays. *Applied Clay Science*, 15(5), 447-462.
- Al-Homoud, A. S., Basma, A. A., Husein Malkawi, A. I., and Al Bashabsheh, M. A. (1995). Cyclic swelling behavior of clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), 562-565.
- Alonso, E. E., Romero, E., Hoffmann, C., and García-Escudero, E. (2005). Expansive bentonite-sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting. *Engineering Geology*, 81(3), 213-226.
- Barden, L. and Sides, G. R. (1970). Engineering behavior and structure of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*, 96(4), 1171-1200.
- Basma, A. A., Al-Homoud, A. S., Husein Malkawi, A. I., and Al-Bashabsheh, M. A. (1996). Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays. *Applied Clay Science*, 11(2), 211-227.
- Bolt, G. H. (1956). Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays. *Geotechnique*, 6(2), 86-93.
- Chen, F. H. (1965). The use of piers to prevent uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soils. In *Proceeding of International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils*, Texas.
- Chu, T. Y. and Mou, C. H. (1973). Swelling volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction test. In *Proc. of 3rd Int. Conf. on Expansive Soils* (Vol. 1, 177-185).
- Estabragh, A. R., Moghadas, M., and Javadi, A. A. (2013). Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying. *Soils and Foundations*, 53(5), 617-627.
- Gourley, C. S., Newill, D., and Schreiner, H. D. (1993). *Expansive soils: TRL's research strategy*.

- In Proceedings of first international symposium on engineering characteristics of arid soils.
- Jones, D. E. and Holtz, W. G. (1973). Expansive soils-the hidden disaster. *Civil Engineering* 43, 87-89.
- Komine, H. and Ogata, N. (1996). Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1), 11-22.
- Kröhn, K. P. (2003). New conceptual models for the resaturation of bentonite. *Applied clay science*, 23(1), 25-33.
- Lambe, T. W. (1958). The structure of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 84, 1-34.
- McKeen, R. G. (1992). A model for predicting expansive soil behavior. In *Proc., 7th Int. Conf. on Expansive Soils (Vol. 1, 1-6)*.
- Nelson, J. D. and Miller, D. J. (1992). *Expansive soils: problems and practices in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons Inc.
- Olson, R. E. (1974). Shearing strengths of kaolinite, illite, and montmorillonite. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(11), 1215-1229.
- Osipov, V. I., Bik, N. N., and Rumjantseva, N. A. (1987). Cyclic swelling of clays. *Applied clay science*, 2(4), 363-374.
- Parsaee, B. and Estabragh, A. R. (2009). Evaluation of volume change potential in clayey soils during wetting and drying cycles. MSc dissertation, University of Tehran, Karaj. (In Farsi)
- Popescu, M. (1980). Behaviour of expansive soils with a crumb structure. In *Expansive Soils (158-171)*. ASCE.
- Seed, H. B. and Chan, C. K. (1959). Structure and strength characteristics of compacted clays. Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California.
- Siddiqua, S., Blatz, J., and Siemens, G. (2011). Evaluation of the impact of pore fluid chemistry on the hydromechanical behaviour of clay-based sealing materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2), 199-213.
- Soltani, A., Estabragh, A. R., Hoorfar, A., and Abdullahi, J. (2014). Effect of initial moisture quality on the mechanical behavior of an expansive soil during wetting and drying. In *Proceeding of 8th National conference on Civil Engineering, Babol, Iran*.
- Subba Rao, K. S. and Satyadas, G. G. (1987). Swelling potential with cycles of swelling and partial shrinkage. In *Proceedings, 6th International Conference on Expansive Soils (Vol. 1, 137-142)*.
- Tawfiq, S. and Nalbantoglu, Z. (2009). Swell-Shrink behavior of expansive clays. In *Proceeding of 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, North Cyprus (336-341)*.
- Tripathy, S. and Rao, K. S. S. (2009). Cyclic swell-shrink behaviour of a compacted expansive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(1), 89-103.
- Tripathy, S., Rao, K. S., and Fredlund, D. G. (2002). Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Canadian geotechnical journal*, 39(4), 938-959.