



ISSN 2251-7480

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال چهارم، شماره اول، پاییز ۱۳۹۳

بررسی آزمایشگاهی بهسازی یک خاک متورم شونده با استفاده از اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متناوب

امین سلطانی^۱ و علی رئیسی استبرق^{۲*}

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی؛ دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه تهران؛ کرج؛ ایران

(۲*) دانشیار؛ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی؛ دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه تهران؛ کرج؛ ایران
*نویسنده مسئول مکاتبات: raeesi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۳

چکیده

بهسازی مکانیکی خاک‌های مشکل‌ساز در محل احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی جهت جلوگیری از تخریب سازه‌های هیدرولیکی و در نتیجه تلفات آب همواره یکی از مهم‌ترین مسائل مربوط به حفاظت منابع آب و خاک است. خاک‌های رسی متورم شونده منطقه وسیعی از جهان را پوشش داده و همواره موجب بروز خسارات جدی به سازه‌های (بخصوص سازه‌های هیدرولیکی) ساخته شده بر روی آنها می‌گردد. در این کار تحقیقاتی نتایج آزمایشگاهی اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن بر روی یک نمونه خاک رسی متورم شونده حاوی آب منفذی شور (سدیم کلرید با غلظت ۵۰ گرم بر لیتر) برای بهسازی آن ارائه می‌گردد. اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن بر روی نمونه‌های تراکم یافته و تهیه شده از روش تراکم استاتیکی با آب منفذی سدیم کلرید در دستگاه تحکیم اصلاح شده و تحکیم معمولی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که درصد تغییر شکل‌های محوری ناشی از اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک متوالی با تکرار چرخه‌ها به مقادیر ثابتی می‌رسد و مقدار تورم ناشی از مرطوب شدن با مقدار انقباض ناشی خشک شدن تقریباً یکسان می‌گردد. همچنین نتایج تغییرات نسبت تخلخل در مقابل درصد رطوبت (مسیرهای تورمی-انقباضی) طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن نشان داد که شکل عمومی مسیرهای تورمی و انقباضی تقریباً S شکل بوده و پدیده پسماند رطوبت (هیسترسیس) ایجاد شده در خاک با افزایش تعداد چرخه‌های متوالی به تعادل می‌رسد، به طوری که مسیر تورمی و انقباضی در چرخه نهایی (چرخه تعادل) برای خاک مورد آزمایش تقریباً یکسان و بر هم منطبق می‌گردند.

کلید واژه‌ها: حفاظت منابع آب و خاک؛ آب منفذی؛ مسیرهای تورمی-انقباضی؛ هیسترسیس

مقدمه

دارای خاک‌های مشکل‌ساز از جمله خاک‌های متورم شونده می‌باشد (Rahimi and Barootkoob, 2002). این موضوع اصلاح مکانیکی خاک با رویکرد حفاظت از منابع آب و خاک را امری ضروری می‌نماید. خاک‌های متورم شونده رسی در سطح وسیعی از جهان بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک پراکنده شده است (Gourley et al., 1993). قابلیت تورمی و انقباضی این دسته از

یکی از چالش‌های مربوط به حفاظت منابع آب و خاک مدیریت و کاهش تلفات آب انتقالی به وسیله سازه‌های انتقال آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی می‌باشد. از جمله عوامل تشدید کننده هدر رفت آب از سازه‌های انتقال مانند کانال‌های آبیاری، تخریب این سازه‌ها تحت تأثیر احداث آن‌ها در بسترهایی است که

سیمان، آهک، خاکستر بادی، خاکستر لجن و رزین استفاده می‌شود، به طوری که با افزودن این مواد به خاک و وقوع یکسری واکنش شیمیایی، توانمندی تورمی خاک کاهش می‌یابد. در روش فیزیکی (مکانیکی) که به آن مسلح سازی نیز اطلاق می‌گردد، با اعمال بار و یا افزودن موادی از جمله الیاف مصنوعی و طبیعی خواص مکانیکی خاک از جمله توانمندی تورم پذیری بهسازی می‌شود. یکی دیگر از روش‌هایی که در عین سادگی و صرفه اقتصادی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متوالی خاک می‌باشد که در این کار تحقیقاتی آزمایشاتی در خصوص کارایی این روش صورت پذیرفت. بنابراین جهت بهسازی این دسته از خاک‌ها به منظور اجرای پروژه‌های عمرانی با درجه ایمنی مناسب لازم است تا شناخت کافی و دقیق از این خاک‌ها حاصل شود. این امر با اجرای آزمایش‌های آزمایشگاهی از جمله اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متوالی بر روی خاک مورد نظر و ارزیابی توانمندی تورمی و انقباضی خاک با افزایش چرخه‌های متوالی میسر می‌باشد.

محققین با انجام آزمایش‌های چرخه‌های مرطوب و خشک شدن در شرایط مختلف به نتایج متفاوتی دست پیدا کرده‌اند. گروهی از محققین اعمال و افزایش تعداد چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن بر روی خاک متورم شونده را عاملی جهت کاهش توانمندی تورمی خاک و محو شدن تغییر شکل‌های غیر قابل بازگشت و همسان شدن تغییرات ناشی از انقباض و تورم خاک طی هر چرخه گزارش نمودند (Chu and Mu, 1973; Chen et al., 1985; Osipov et al., 1987; Suba Rao and Satyadas, 1987; Chen, 1988; Basma et al., 1996; محققین Tripathy et al., 2002; Alonso et al., 2005). محققین دیگر از جمله Popescu (۱۹۸۰) و Tawfiq و Nabantoglu (۲۰۰۹) افزایش تعداد چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متوالی را سبب افزایش توانمندی تورمی خاک متورم شونده گزارش نمودند. Estabragh و

خاک‌ها که به دلیل تغییر رطوبت و نوسانات دمایی رخ می‌دهد برای سازه‌های مهندسی از جمله کانال‌های آبیاری، خطوط انتقال آب، دیوارهای حائل، سنگفرش معابر، بزرگراه‌ها و تونل‌ها یک خطر جدی محسوب می‌شود (Mishra et al., 2008). Slosson و Krohn (۱۹۸۰) خسارات وارد شده به سازه‌های بنا شده بر روی خاک‌های متورم شونده در ایالات متحده را سالانه هفت بیلیون دلار گزارش نموده‌اند. Jones و Holtz (۱۹۷۳) میزان خسارات سالانه ناشی از خاک‌های متورم شونده در ایالات متحده را حدود دو برابر خسارات ناشی از بلایای طبیعی از جمله سیل، زلزله، طوفان و گردباد گزارش نمودند. ایران نیز از جمله کشورهایی است که در برخی از مناطق آن خاک‌هایی با قابلیت تورمی بالا وجود دارد. احداث سازه‌های مختلف بخصوص سازه‌های هیدرولیکی بر روی این خاک‌ها و مرطوب شدن خاک به دلایلی نظیر بالا بودن تراز سطح آب زیرزمینی، نفوذ آب‌های سطحی، ترکیب لوله‌ها و نشت از کانال‌های آبیاری موجب تخریب این سازه‌ها می‌گردد. Rahimi و Barootkoob (۲۰۰۲) علت اصلی تخریب پوشش بتنی کانال‌های آبیاری احداث شده در واحد کشت و صنعت شعبیه واقع در خوزستان را قدرت تورمی بالای خاک گزارش و عوامل تشدید کننده آن را حرارت بالای منطقه و تغییرات سطح آب زیرزمینی معرفی نموده‌اند. همچنین این دسته از خاک‌ها به‌رغم مشکل ساز بودن دارای کاربرد وسیعی در دفن زباله‌های شهری، صنعتی و بخصوص هسته‌ای و حفاظت از محیط زیست می‌باشند (Pusch, 2001; Baumgartner et al., 2008; Priyanto et al., 2008).

بهسازی مکانیکی این دسته از خاک‌ها با رویکرد حفاظت از منابع آب و خاک همواره مورد توجه محققین مختلف بوده است. برای بهسازی ساختمان این خاک‌ها و کاهش توانمندی تورمی آن‌ها معمولاً دو روش شیمیایی و فیزیکی (مکانیکی) وجود دارد (Estabragh et al., 2014). در روش شیمیایی از افزودنی‌های شیمیایی از جمله

را فراهم می‌نماید. در تحقیق حاضر اثر اعمال چرخه‌های چرخه‌های مرطوب و خشک شدن بر خواص مکانیکی یک خاک متورم شونده با آب منفذی شور (سدیم کلرید با غلظت ۵۰ گرم بر لیتر) تحت سربار مشخص مورد بررسی قرار گرفت و تغییر شکل محوری (عمودی)، نسبت تخلخل و درصد رطوبت طی چرخه‌های متوالی اندازه‌گیری و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

خاک

خاک موجود نوعی خاک رسی (کائولین) با خاصیت خمیریایی پایین (مطابق با استاندارد ASTM-D4318) و قابلیت تورم‌پذیری متوسط (مطابق با معیار طبقه‌بندی McKeen (۱۹۹۲)) بود از این نظر جهت تهیه خاک متورم شونده مورد نیاز اقدام به تهیه مخلوط‌هایی از کائولین و بنتونیت (با درصد‌های وزنی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) گردید. سپس میزان تورم آزاد مطابق با استاندارد ASTM-D4546 برای مخلوط‌های تهیه شده تعیین و مطابق با معیار طبقه‌بندی McKeen (۱۹۹۲) مخلوط ۸۰٪ کائولین و ۲۰٪ بنتونیت به عنوان خاک متورم شونده اصلی جهت اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن انتخاب گردید. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک اصلی (۸۰٪ کائولین و ۲۰٪ بنتونیت) مطابق با استاندارد ASTM تعیین گردید که در جدول (۱) قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به جدول (۱) خاک اصلی بر اساس معیار طبقه‌بندی متحد (USCS) از نوع رس با پلاستیسیته بالا (CH) می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش‌های شیمیایی خاک مذکور نشان داد که میزان هدایت الکتریکی (EC) و واکنش (pH) عصاره اشباع خاک به ترتیب برابر $13/9$ dS/m و $8/4$ می‌باشد.

همکاران (۲۰۱۳) به بررسی توانمندی تورمی و انقباضی یک خاک متورم شونده طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن با در نظر گرفتن آب محفظه‌ای (مستغرق کننده) با کیفیت‌های شیمیایی متفاوت (مقطر، شور و اسیدی) پرداختند و چنین نتیجه گرفتند که کیفیت آب محفظه‌ای نیز در توانمندی تورمی و انقباضی خاک مؤثر است.

بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که تا کنون تحقیق مشخصی در ارتباط با تعیین اثر کیفیت شیمیایی آب منفذی بر توانمندی تورمی و انقباضی خاک‌های متورم‌شونده طی چرخه‌های مرطوب و خشک شدن صورت نپذیرفته است. این در حالی است که تشکیل خاک‌های متورم شونده در طبیعت ممکن است بنا به دلایل متفاوت از جمله وجود نمک‌ها در آب زیرزمینی و سطحی و هوازدگی تشکیلات و رسوبات رسی، در محیط‌هایی با کیفیت شیمیایی متفاوت آب صورت پذیرد و در نتیجه آب منفذی اولیه آن‌ها متفاوت باشد. همچنین از آنجایی که رفتار فیزیکی و مکانیکی خاک‌های متورم شونده از جمله قدرت تورمی و انقباضی آن‌ها به شدت متأثر از واکنش‌های فیزیکوشیمیایی موجود بین ذرات خاک و آب منفذی است (Barbour and Fredlund, 1989)، از این نظر بررسی اثر کیفیت شیمیایی آب منفذی بر توانمندی تورمی و انقباضی طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن ضروری می‌باشد. رفتار مرطوب و خشک شدن خاک‌های متورم شونده را می‌توان بر اساس تغییرات پارامترهای نسبت تخلخل و درصد رطوبت خاک مورد بررسی قرار داد. تغییرات این دو پارامتر مشخص کننده مسیرهای تورمی-انقباضی یک خاک می‌باشد. این مسیرها طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن زمینه پیش‌بینی تغییر حجم ناشی از تورم و انقباض خاک

می‌باشد (Lambe, 1958; Nelson and Miller, 1992). نمونه‌های آزمایشی به روش استاتیکی در یک قالب مخصوص طراحی شده (شکل ۲-الف) در سه لایه تحت نیروی مشخص و سرعت بارگذاری ثابت $1/5 \text{ mm/min}$ در دستگاه ویژه بارگذاری (شکل ۲-ب) تهیه گردید (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۳)، به طوری که وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت نمونه ساخته شده با مقادیر انتخابی دلخواه بر روی شاخه خشک منحنی استاندارد تراکمی یکسان گردید. در تحقیق حاضر وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت انتخابی جهت ساخت نمونه‌های آزمایشی به ترتیب برابر با $15/7 \text{ kN/m}^3$ و 17% انتخاب که برای رسیدن به مقادیر گفته شده، لازم به سعی و خطا در ساخت نمونه‌های آزمایشی بود و در نهایت با اعمال فشار 1189 kPa به هر لایه این هدف محقق گردید. مطابق با شکل ۲-الف قالب مخصوص طراحی شده از سه بخش بالایی، میانی و انتهایی تشکیل شده، به طوری که نمونه‌های تهیه شده دارای ابعادی برابر با بخش میانی که همان استوانه دستگاه تحکیم (Oedometer) است می‌باشند.



شکل ۲. قالب مخصوص (الف) و دستگاه ویژه بارگذاری (ب) برای تهیه نمونه‌های آزمایشی

دستگاه تحکیم اصلاح شده

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

مقدار	مشخصه
۲/۷۵	وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)
۷۴	درصد عبوری از الک $200 (F_{200}) (\%)$
۸۱	حد روانی (LL) (%)
۲۷/۵	حد خمیری (PL) (%)
۵۳/۵	نشانه خمیری (PI) (%)
۲۳/۵	درصد تورم آزاد (S) (%)
CH	طبقه‌بندی متحد (USCS)
۲۲	درصد رطوبت بهینه (ω_{opt}) (%)
۱۶	وزن واحد حجم خشک حداکثر (γ_{dmax}) (kN/m^3)

محلول سدیم کلرید

در تحقیق حاضر از محلول سدیم کلرید با غلظت 50 g/L بر لیتر به عنوان آب منفذی جهت ساخت نمونه‌های آزمایشی استفاده گردید که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی محلول‌های نمک مورد استفاده

مقدار	مشخصه
۵۸/۵	جرم مولی (g/mol)
۴/۸	واکنش (pH) محلول
۷۸/۱۲۵	هدایت الکتریکی محلول (EC) (dS/m)
۴/۸۸	درصد وزنی محلول (%)
۰/۸۶	غلظت مولار محلول (mol/L)
۱/۰۳	چگالی محلول (Mg/m^3)

تهیه نمونه‌های آزمایشی

ابتدا آزمایش تراکم استاندارد بر روی خاک اصلی (مخلوط 80% کائولین با 20% بنتونیت) با استفاده از محلول سدیم کلرید صورت پذیرفت. پس از تعیین منحنی استاندارد تراکمی، نقطه‌ای دلخواه بر روی شاخه خشک منحنی استاندارد تراکمی مربوطه (دارای وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت کمتر نسبت به شرایط بهینه) انتخاب گردید. دلیل انتخاب نقطه روی شاخه خشک منحنی استاندارد تراکمی، ساختمان فلکوله (ریزدانه) و در نتیجه قابلیت تورم پذیری بیشتر خاک در شاخه خشک منحنی

شکل ۳. نمای شماتیک دستگاه تحکیم اصلاح شده جهت اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متوالی (بدون مقیاس)

روش انجام آزمایش

آزمایش تراکم استاندارد

آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM-D698 بر روی خاک اصلی با محلول سدیم کلرید صورت پذیرفت. خواص تراکمی (وزن واحد حجم خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه) برای یک خاک در شرایط استفاده از آب حاوی نمک با غلظت مشخص، تحت تأثیر نمک‌های مورد استفاده می‌باشد (Saddiqua et al., 2011). در تحقیق حاضر از محلول سدیم کلرید با غلظت بالا (۵۰ گرم بر لیتر) استفاده گردید. برای اصلاح درصد رطوبت و وزن واحد حجم خشک و در نتیجه منحنی استاندارد تراکمی در آزمایش تراکم استاندارد از روش پیشنهادی Saddiqua و همکاران (۲۰۱۱) به شرح زیر استفاده گردید:

گام اول- تعیین درجه شوری محلول سدیم کلرید (با غلظت ۵۰ گرم بر لیتر) مطابق با رابطه (۱):

$$r = \frac{W_{\text{salt}}}{W_f} = \frac{\text{TDS}}{\frac{\gamma_f}{g} \times 1000} \quad (1)$$

گام دوم- تعیین درصد رطوبت اصلاح شده با بهره‌گیری از رابطه (۲):

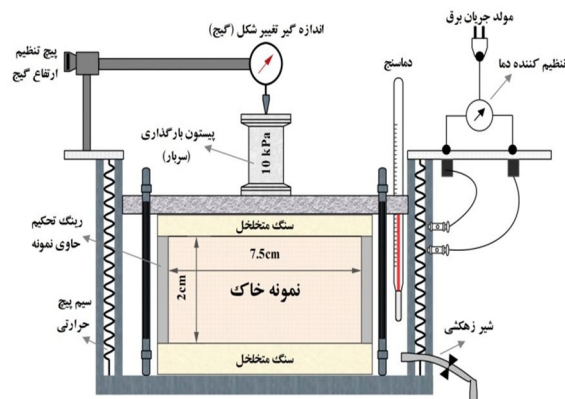
$$(\%) \omega_c = \frac{W_f}{W_s} \times 100 = \frac{\omega}{1 - r(1 + \omega)} \quad (2)$$

گام سوم- تعیین وزن واحد حجم خشک با استفاده از درصد رطوبت اصلاح شده و مطابق با رابطه (۳):

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \omega_c} \quad (3)$$

در روابط بالا: ω_c درصد رطوبت اصلاح شده (%)، W_f وزن محلول سدیم کلرید، W_s وزن ذرات جامد خاک، ω درصد رطوبت اصلاح نشده (%)، r درجه شوری، W_{salt} وزن نمک باقیمانده پس از خشک کردن نمونه درون اتو، TDS غلظت کل مواد جامد محلول (g/L)، γ_f وزن واحد

جهت اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متوالی به نمونه‌های ساخته شده از دستگاه تحکیم اصلاح شده استفاده گردید. با توجه به اینکه یک دستگاه تحکیم معمولی قابلیت ایجاد شرایط دمایی مشخص جهت شبیه‌سازی خشک شدن نمونه‌های آزمایشی در چرخه‌های خشک را دارا نبود، از این نظر با ایجاد یک سری تغییرات، دستگاه تحکیم معمولی اصلاح گردید. نمای شماتیک دستگاه تحکیم اصلاح شده و اجزای تشکیل دهنده آن در شکل ۳ نشان داده شده است (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۳). این دستگاه همانند دستگاه تحکیم معمولی دارای یک محفظه جهت قرار گرفتن نمونه بین دو صفحه متخلخل، اهرم بارگذاری و اندازه‌گیر (گیج) تغییر شکل محوری (عمودی) با دقت ۰/۰۱ میلیمتر می‌باشد. تغییرات ایجاد شده شامل ایجاد یک سامانه گرمایشی با قابلیت تنظیم دما جهت ایجاد شرایط دمایی مشخص درون محفظه دستگاه طی سیکل‌های خشک و تعبیه شیر زهکشی جهت تخلیه آب محفظه در پایان چرخه‌های مرطوب بود. همچنین جهت جلوگیری از هدر رفت انرژی، عایق نمودن و فراهم نمودن شرایط دمایی مشخص از صفحات آزبست به همراه چسب سیلیکون در اطراف محفظه دستگاه تحکیم استفاده گردید. برای کالیبره کردن و اطمینان از ایجاد دمای ثابت 45°C حین چرخه‌های خشک از یک دماسنج معمولی درون محفظه دستگاه نیز استفاده گردید.



حجم محلول سدیم کلرید (kN/m^3)، g شتاب ثقل (N/kg) و γ_d وزن واحد حجم خشک (kN/m^3) و γ_m وزن واحد حجم مرطوب خاک (kN/m^3) می‌باشد.

اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن

نمونه ساخته شده با استفاده از آب منفذی سدیم کلرید (با غلظت ۵۰ گرم بر لیتر) به درون دستگاه تحکیم اصلاح شده انتقال یافت. سپس با روشن نمودن سامانه گرمایشی دستگاه اقدام به خشک نمودن نمونه تحت سربار ۱۰ کیلوپاسکال گردید. علاوه بر آن تغییر شکل محوری (عمودی) نمونه در زمان‌های مختلف با استفاده از اندازه‌گیر تغییر شکل ثبت گردید. این روند تا ثابت شدن تغییر شکل محوری نمونه ادامه یافت. پس از اتمام چرخه خشک اول، سامانه گرمایشی خاموش و پس از گذشت زمان جهت ایجاد دمای اطاقک درون محفظه دستگاه اقدام به مستغرق نمودن نمونه با آب مقطر و آغاز چرخه مرطوبی اول گردید. تغییر شکل محوری (عمودی) نمونه در زمان‌های مختلف مرطوب شدن نمونه ثبت و روند گفته شده تا ثابت شدن میزان تورم نمونه ادامه یافت. در پایان چرخه مرطوب با استفاده از شیر زهکشی تعبیه شده، آب محفظه‌ای (مستغرق کننده) تخلیه و پس از خشک نمودن محفظه دستگاه مجدد، اقدام به خشک نمودن نمونه و آغاز چرخه مرطوب دوم گردید. روند تکرار چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متوالی تا جایی که میزان تورم و انقباض ناشی از یک چرخه تقریباً با هم مساوی شد ادامه یافت.

با توجه به تغییر قطر نمونه طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن، برای تعیین توانمندی تغییر حجم لازم است تا تغییر شکل محوری (افقی) نیز در زمان‌های مختلف مرطوب و خشک شدن اندازه‌گیری گردد. از آنجایی که دستگاه تحکیم اصلاح شده قادر به اندازه‌گیری تغییر شکل محوری (افقی) حین وقوع یک چرخه خشک و یا مرطوب نمی‌باشد، از این نظر نمونه‌های مشابه با

نمونه اصلی تهیه و همزمان با نمونه اصلی در معرض چرخه‌های مرطوب و خشک قرار گرفتند. به منظور شبیه‌سازی چرخه‌های خشک، نمونه‌ها تحت سربار ۱۰ کیلوپاسکال به درون آون با دمای ثابت 45°C انتقال و در زمان‌های مشخص با استفاده از اندازه‌گیری مستقیم (کولیس) اقدام به تعیین قطر و درصد رطوبت آن‌ها گردید. همچنین تمامی چرخه‌های مرطوب برای نمونه‌های مشابه در دستگاه تحکیم معمولی صورت پذیرفت. تمامی نمونه‌های مشابه در پایان چرخه‌های مرطوب دارای قطری معادل قطر استوانه دستگاه تحکیم (۷۵ میلیمتر) و درصد رطوبتی معادل خط اشباع ۱۰۰٪ گردیدند.

جهت تعیین درصد تغییر شکل محوری و جانبی (درصد انقباض در چرخه‌های خشک و درصد تورم در چرخه‌های مرطوب) به ترتیب از روابط (۴) و (۵) به شرح زیر استفاده گردید:

$$(\%) \varepsilon_H = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (4)$$

$$(\%) \varepsilon_D = \frac{\Delta D}{D_0} \times 100 \quad (5)$$

در روابط بالا: ε_H درصد تغییر شکل محوری (عمودی) (%)، ΔH تغییر ارتفاع نمونه (mm)، H_0 ارتفاع نمونه آزمایشی در ابتدای چرخه مورد بررسی (mm)، ε_D درصد تغییر شکل جانبی (افقی) (%)، ΔD تغییر قطر نمونه (mm) و D_0 قطر نمونه آزمایشی در ابتدای چرخه مورد بررسی می‌باشد.

همچنین جهت تعیین مقدار نسبت تخلخل از رابطه تحکیم در فضای دو بعدی به شرح زیر استفاده گردید:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (6)$$

در رابطه بالا: ΔV تغییر حجم نمونه آزمایشی در چرخه مورد بررسی (mm^3)، V_0 حجم اولیه نمونه آزمایشی در ابتدای چرخه مورد بررسی، Δe تغییر نسبت تخلخل نمونه

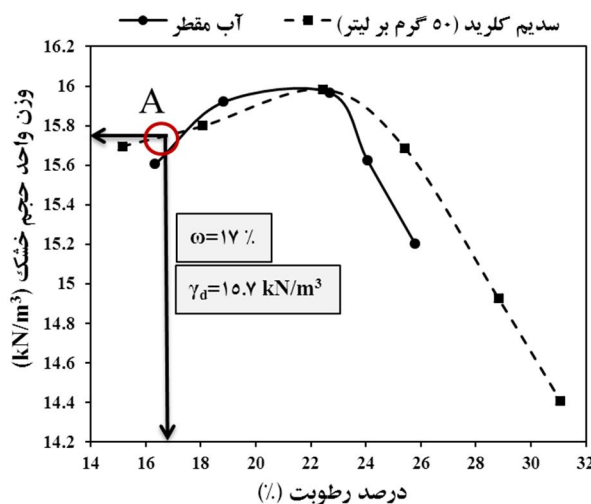
می‌باشد. هرچند مطابق با Saddiqua و همکاران (۲۰۱۱) غلظت‌های بالاتر از مقدار مورد استفاده (۵۰ گرم بر لیتر) به طور کامل موجب تغییر خواص تراکمی و منحنی تراکمی خاک می‌گردد. نقطه انتخابی بر روی شاخه خشک منحنی تراکمی سدیم کلرید (منحنی خط چین) که با "A" مشخص شده است، نشان‌دهنده نقطه‌ای روی شاخه خشک منحنی است که نمونه‌های آزمایشی جهت اجرای چرخه‌های مرطوب و خشک بر اساس آن ساخته می‌شوند. این نقطه دارای وزن واحد حجم خشک 15.7 kN/m^3 و درصد رطوبت بهینه ۱۷٪ می‌باشد.

آزمایشی در چرخه مورد بررسی و e_0 نسبت تخلخل اولیه نمونه آزمایشی در ابتدای چرخه مورد بررسی می‌باشد.

نتایج و بحث

تراکم استاندارد

منحنی استاندارد تراکمی برای خاک اصلی در شرایط استفاده از آب مقطر و محلول سدیم کلرید در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است میزان وزن واحد حجم خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه برای هر دو آزمایش تقریباً یکسان و به ترتیب برابر 16 kN/m^3 و ۲۲٪ محاسبه گردید. نتایج حاصل بیانگر عدم تأثیر غلظت‌های پایین نمک در خواص تراکمی خاک



شکل ۴. منحنی تراکم استاندارد خاک اصلی مورد استفاده به ازای آب منفذی مقطر و محلول سدیم کلرید

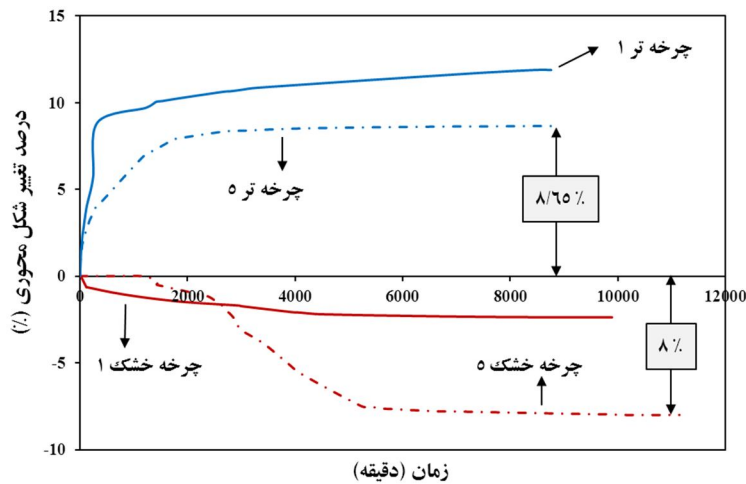
که برای چرخه‌های خشک بعدی که نمونه دارای رطوبت اشباع می‌باشد، میزان درصد انقباض در زمان‌های اولیه (۱ روز) تقریباً صفر باقی می‌ماند، سپس تغییرات زیاد و مجدد با افزایش زمان به مقدار ثابتی می‌رسد که در منحنی چرخه خشک ۵ به وضوح قابل مشاهده است. همانطور که در شکل نشان داده شده نیز مشخص شده است درصد انقباض و تورم نهایی در چرخه اول به ترتیب برابر با ۲/۳۷۵٪ و ۱۱/۸۸۲٪ می‌باشد که نشان دهنده ۹/۵۱٪ تغییر شکل غیر قابل بازگشت در خاک مورد آزمایش می‌باشد. افزایش تکرار چرخه‌های مرطوب و خشک شدن موجب کاهش میزان تغییر شکل‌های غیر قابل بازگشت خاک

چرخه‌های مرطوب و خشک شدن

شکل ۵ درصد انقباض ناشی از خشک شدن و درصد تورم ناشی از مرطوب شدن نسبت به زمان را طی چرخه اول و پنجم نشان می‌دهد. میزان درصد تورم در زمان‌های اولیه مرطوب شدن زیاد و با گذشت زمان کاهش می‌یابد، به طوری که پس از گذشت تقریباً ۶ روز برای تمامی چرخه‌های مرطوب شدن به مقدار ثابتی می‌رسد. همچنین رفتار منحنی درصد انقباض در برابر زمان برای چرخه اول که نمونه دارای میزان رطوبت اولیه کم (۱۷٪) می‌باشد مشابه به منحنی‌های تورمی می‌باشد، این در حالی است

خشک شدن اصطلاحاً تعادل تورمی-انقباضی نامیده می‌شود. وقوع تعادل تورمی-انقباضی در خاک طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن بیانگر آن است که خاک از لحاظ ساختمانی به یک شرایط پایدار رسیده است.

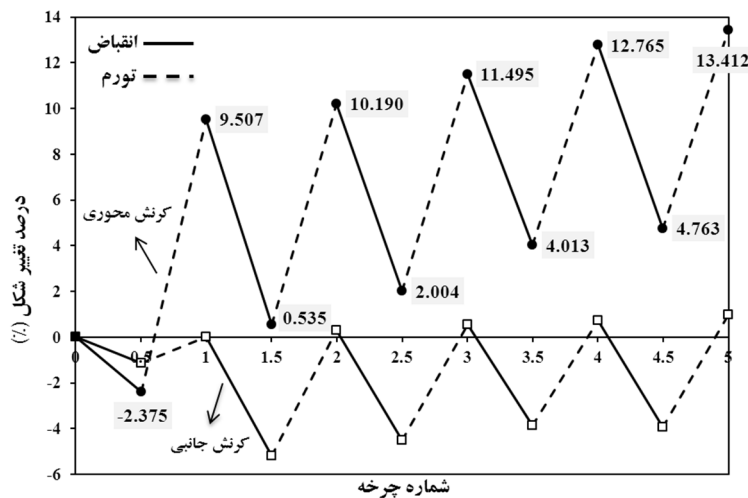
می‌گردد، به طوری که در چرخه پنجم مقدار آن تقریباً محو یا ثابت می‌گردد. همانطور که در شکل نیز مشخص است درصد انقباض و تورم نهایی در چرخه پنجم به ترتیب برابر با ۸٪ و ۸/۶۵٪ می‌باشد که بیانگر ۰/۶۵ تغییر شکل غیر قابل بازگشت است. ثابت و یا محو شدن میزان تغییر شکل خاک طی چرخه‌های متوالی مرطوب و



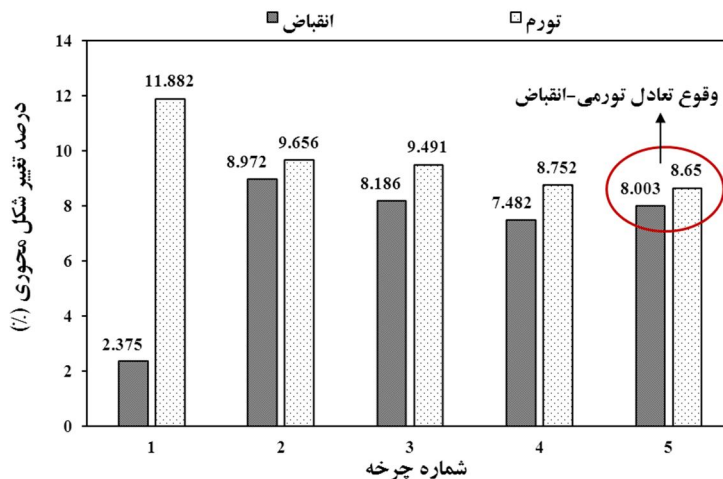
شکل ۵. درصد تغییر شکل محوری ناشی از انقباض و تورم در برابر زمان طی چرخه‌های مرطوب و خشک شدن اول و پنجم

از خشک شدن بیشتر می‌باشد و اختلاف بین آن‌ها در چرخه پنجم و بعد از آن تقریباً محو می‌گردد که بیانگر وقوع تعادل تورمی-انقباضی می‌باشد. همچنین میزان تورم و در نتیجه توانمندی تورم پذیری خاک طی چرخه‌های متوالی دچار کاهش گردیده است.

شکل‌های ۶ و ۷ نشان دهنده میزان درصد تورم و انقباض (درصد تغییر شکل محوری) خاک مورد آزمایش طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن می‌باشد. همانطور که آشکار است میزان تورم ناشی از مرطوب شدن طی چرخه‌های متوالی همواره از میزان انقباض ناشی



شکل ۶. درصد تغییر شکل محوری و جانبی خاک طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن



شکل ۷. مقایسه درصد انقباض و تورم طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن

منفذی بر ساختمان و در نتیجه توانمندی تورمی خاک لازم است تا به خصوصیات میکروسکوپی بافت خاک نظیر لایه پخشیدگی مضاعف (DDL) و تغییرات آن توجه نمود. ترکیب شیمیایی آب منفذی موجود درون خلل و فرج خاک می‌تواند با تغییر در ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف سبب تغییر در توانمندی تورمی خاک گردد، به طوری که کاهش ضخامت این لایه در اثر افزایش نیروی جاذبه بین ذرات رسی با بار الکتریکی منفی و کاتیون‌ها با بار الکتریکی مثبت موجب کاهش توانمندی تورمی خاک می‌گردد. کاهش در ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف را نیز می‌توان در خصوصیات شیمیایی آب منفذی نظیر

عوامل مؤثر بر توانمندی تورمی خاک متورم شونده رسی را می‌توان در وهله اول نوع کانی‌های تشکیل دهنده ذرات رس دانست، به طوری که کانی‌های با سطح ویژه بیشتر دارای قابلیت جذب آب بیشتر و در نتیجه توانمندی تورمی بالاتر می‌باشند. در میان کانی‌های رسی معروف مونت موریلونیت، کائولینیت و ایلیت به ترتیب دارای سطح ویژه و توانمندی تورمی زیاد تا کم می‌باشند. از جمله عوامل دیگری که می‌تواند بر توانمندی تورمی رس تأثیرگذار باشد کیفیت شیمیایی آب منفذی است. ترکیب آب منفذی بر شکل‌گیری ساختمان خاک نقش بسزایی ایفا می‌کند. به منظور شناخت نحوه تأثیر کیفیت آب

۰/۶۲۲۱ اندازه‌گیری گردید. مرحله مرطوب شدن در این چرخه با افزایش میزان رطوبت و مقدار نسبت تخلخل همراه است به طوری که در پایان تورم، میزان رطوبت خاک بر روی خط ۱۰۰٪ اشباع قرار می‌گیرد. میزان رطوبت و نسبت تخلخل در انتهای چرخه مرطوب اول به ترتیب برابر با ۳۱٪ و ۰/۸۵۶۶ مشاهده گردید. مرطوب و خشک شدن سایر چرخه‌های متوالی نیز در شکل‌های ۸-ا ب الی ۸-ث قابل مشاهده می‌باشد. با بررسی شکل ۸ مشاهده می‌گردد که میسرهای رفت و برگشتی تورم و انقباض در چرخه‌های ابتدایی با یکدیگر دارای فاصله و اختلاف است، این در حالی است که با افزایش تکرار، چرخه‌ها بر هم تقریباً منطبق می‌گردند. این وضعیت که در شکل ۸-ث به وضوح قابل مشاهده می‌باشد، بیانگر وقوع تعادل تورمی-انقباضی و پایدار شدن ساختمان خاک می‌باشد. بررسی شکل ۸ نشان می‌دهد که مسیره‌های تورمی-انقباضی اغلب داری شکلی همانند *S* می‌باشد. مسیره‌های ترسیم شده را می‌توان متشکل از دو بخش منحنی شکل در ابتدا و انتها و یک بخش خطی در بخش میانی دانست، به طوری که تغییرات نسبت تخلخل با میزان رطوبت خاک در ابتدا و انتهای مسیره‌های تورمی و انقباضی ملایم و در بخش خطی (میانی) شدید می‌باشد. این نتایج قبلاً نیز توسط محققینی از جمله Haines (۱۹۲۳)، Ho و همکاران (۱۹۹۲)، Sitharam و همکاران (۱۹۹۵)، Tripathy و همکاران (۲۰۰۲) و Ito و Azzam (۲۰۱۰) نیز گزارش شده است. اختلاف مکش و در نتیجه نسبت تخلخل خاک در یک رطوبت ثابت برای حالت مرطوب و خشک شدن تحت عنوان پدیده پسماند (Hysteresis) نامیده می‌شود. کاهش پتانسیل تغییر حجم و وقوع تعادل تورمی-انقباضی طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن را می‌توان حذف تدریجی پدیده پسماند دانست (Basma et al., 1996; Tripathy et al., 2002). همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود مسیره‌های تورمی-انقباضی با افزایش تعداد چرخه‌های

واکنش (pH) و تأثیر آن بر ساختمان خاک جست و جو کرد. Mesri و Olson (۱۹۷۱) و Abdullah و همکاران (۱۹۹۹) چنین نتیجه گرفتند که در مقادیر پایین واکنش (pH=۴) ساختمان خاک فولکوله (لخته) و در مقادیر بالا (pH=۹) ساختمان خاک پراکنده می‌باشد.

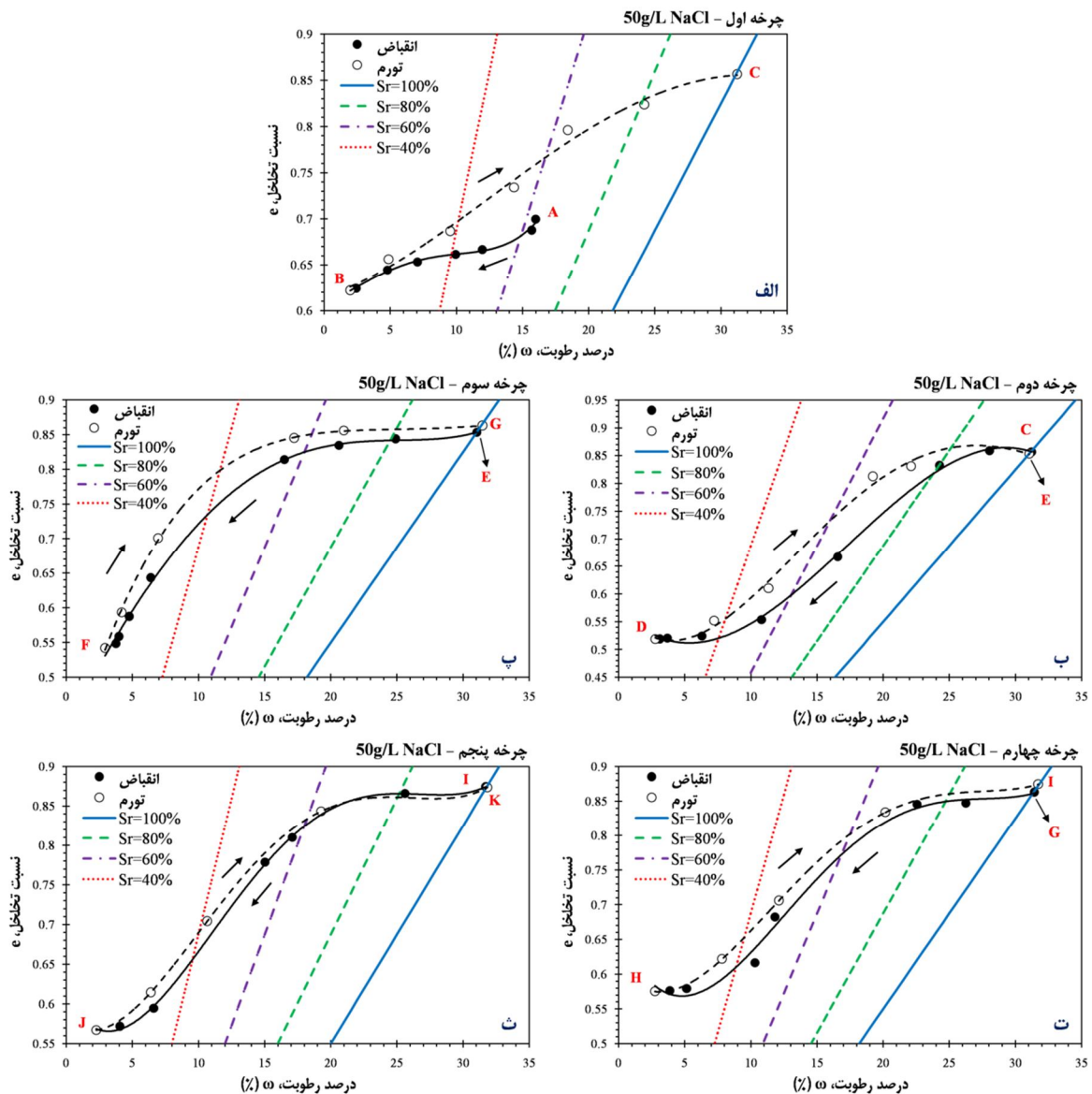
مطابق با شکل ۷ مشخص می‌گردد که میزان توانمندی تورمی خاک طی چرخه‌های متوالی در حال کاهش است و از چرخه پنجم به بعد تقریباً ثابت می‌گردد. دلیل این امر را می‌توان کاهش ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف طی چرخه‌های متوالی تحت تأثیر تشکیل ساختمان فولکوله دانست. علاوه بر آن می‌توان سطح ویژه ذرات را نیز در کاهش توانمندی تورمی خاک سهیم دانست، به طوری که ذرات بسیار ریز طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن به یکدیگر چسبیده و ذرات درشت‌تر را تشکیل می‌دهند که موجب ایجاد ساختمان درشت دانه‌تر با توانمندی تورمی پایین‌تر می‌گردد. محققین بسیاری از جمله Al-Homoud و همکاران (۱۹۹۵) و Tripathy و همکاران (۲۰۰۲) نیز کاهش سطح ویژه ذرات طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن را گزارش نموده‌اند.

مسیره‌های تورمی و انقباضی

تغییرات نسبت تخلخل در برابر درصد رطوبت به همراه خطوط اشباع ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ برای خاک مورد آزمایش با آب منفذی محلول سدیم کلرید (با غلظت ۵۰ گرم بر لیتر) برای ۵ چرخه مرطوب و خشک شدن متوالی در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸-الف که وضعیت اولیه خاک را نشان می‌دهد، خاک با میزان رطوبت ۱۷٪ و نسبت تخلخل اولیه ۰/۶۹۹۸ در معرض چرخه خشک قرار می‌گیرد و با کاهش میزان رطوبت و مقدار نسبت تخلخل تا پایان یافتن چرخه خشک ادامه می‌یابد، به طوری که در پایان چرخه خشک میزان رطوبت و نسبت تخلخل به ترتیب برابر با ۲٪ و

تقریباً تمامی چرخه‌ها بین خطوط اشباع ۴۰٪ و ۶۰٪ قرار گرفته است. این خطوط را می‌توان مرز بین تغییر فازهای انقباضی خاک دانست، به طوری که خاک با رسیدن به خط اشباع ۶۰٪ از فاز انقباض ساختاری عبور نموده و وارد مرحله انقباض نرمال می‌شود. همچنین با رسیدن به خط اشباع ۴۰٪ از حالت انقباض نرمال وارد مرحله انقباض باقیمانده می‌گردد.

متوالی به سمت همانند شدن پیش می‌روند، به طوری که در چرخه پنجم تقریباً بر هم منطبق گشته و اثر پسماند از بین می‌رود. مطابق با تحقیقات Haines (۱۹۲۳) خشک شدن یک خاک طی سه مرحله انقباض ساختاری (Structural shrinkage)، انقباض نرمال (Normal shrinkage) و انقباض باقیمانده (Residual shrinkage) صورت می‌پذیرد. با بررسی مسیرهای تورمی-انقباضی در شکل ۸ مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تغییرات برای



شکل ۸. تغییرات نسبت تخلخل با درصد رطوبت (مسیرهای تورمی و انقباضی) طی چرخه‌های متوالی مرطوب و خشک شدن

نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی برای بهسازی یک خاک متورم شونده رسی آزمایش چرخه‌های مرطوب و خشک شدن بر روی نمونه‌های آزمایشی تهیه شده با آب منفذی شور (سدیم کلرید با غلظت ۵۰ گرم بر لیتر) تحت سربار مشخص صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های محوری و جانبی نمونه‌های آزمایشی با افزایش تعداد چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متوالی کاهش می‌یابد، به طوری که پس از ۵ چرخه متوالی به مقدار ثابتی می‌رسد. نتایج حاصل از تغییرات نسبت تخلخل در برابر درصد رطوبت (مسیرهای تورمی-انقباضی) نشان می‌دهد که در چرخه‌های اولیه فاصله منحنی‌های تورمی و انقباضی بسیار زیاد است، لیکن با افزایش اعمال تعداد چرخه‌های متوالی فاصله بین مسیرهای ناشی از مرطوب شدن و مسیرهای ناشی از خشک شدن کاهش و در چرخه تعادل بر یکدیگر تقریباً منطبق می‌گردند. شکل عمومی مسیرهای تورمی و انقباضی تقریباً k شکل بوده و تغییرات شدید نسبت تخلخل با درصد رطوبت در بخش خطی منحنی مشاهده می‌شود. در چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متوالی پدیده پسماند رطوبت (هیسترسیس) در نمونه خاک به وجود می‌آید که با تکرار این چرخه‌ها، این پدیده کاهش می‌یابد، به طوری که در حالت تعادل این پدیده تقریباً محو می‌گردد و ساختار خاک حالتی ثابت پیدا می‌کند.

فهرست منابع

- سلطانی، ا.، استبرق، ع. ر.، هورفر، ع. و عبدالمهی، ج. ۱۳۹۳. ارزیابی کیفیت شیمیایی رطوبت اولیه بر پتانسیل تورمی یک خاک متورم شونده در چرخه‌های تر و خشک. هشتمین کنفرانس ملی عمران، بابل، ایران.
- Abdullah, W. S., Alshibli, K. A., & 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., & 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., & García-Escudero, E. 2005. Expansive bentonite-sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting. *Engineering geology*, 81(3): 213-226.
- Barbour, S. L., & Fredlund, D. G. 1989. Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4): 551-562.
- Basma, A. A., Al-Homoud, A. S., Husein Malkawi, A. I., & Al-Bashabsheh, M. A. 1996. Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays. *Applied Clay Science*, 11(2): 211-227.
- Baumgartner, P., Priyanto, D., Baldwin, J.R., Blatz, J.A., Kjartanson, B.H., and Batenipour, H. 2008. Preliminary results of onedimensional consolidation testing on bentonite clay-based sealing components subjected to two pore-fluid chemistry conditions. Nuclear Waste Management Organisation, Toronto, Ont. Technical Report, TR-2008-04.
- Chen, FH. 1988. *Foundation on Expansive Soils*. Elsevier Science Publishing Inc., New York.
- Chen, X. Q., Lu, Z. W., & He, X. F. 1985. Moisture movement and deformation of expansive soils. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, California, 4: 2389-2392.
- Chu, T. Y. & Mou, C. H. 1973. Swelling volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction test. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, Haifa, Israel, 1: 177-185.
- Estabragh, A. R., Moghadas, M., & 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.
- Estabragh, A. R., Rafatjo, H., & Javadi, A. A. 2014. Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques. *Geosynthetics International*, 21(3), 233-243.
- Gourley, C. S., Newill, D., & Schreiner, H. D. 1993. Expansive soils: TRL's research strategy. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils*, City University, London, England.
- Haines, W. B. 1923. The volume-changes associated with variations of water content in

- Priyanto, D.G., Blatz, J.A., Siemens, G.A., Offman, R., Boyle, J.S., and Dixon, D.A. 2008. The effects of initial conditions and liquid composition on the one-dimensional consolidation behavior of clay-based sealing materials. Nuclear Waste Management Organization, Toronto, Ont. Technical Report, TR-2008-06.
- Pusch, R. 2001. Experimental study of the effect of high porewater salinity on the physical properties of a natural smectite clay. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB International AB), Stockholm, Sweden. Technical Report, SKB-TR 01-07.
- Rahimi, H., & Barootkoob, S. H. 2002. Concrete canal lining cracking in low to medium plastic soils. *Irrigation and Drainage*, 51(2), 141-153.
- Siddiqua, S., Blatz, J., & 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.
- Sitharam, T. G., Sivapullaiah, P. V., & Subba Rao, K. S. 1995. Shrinkage behaviour of compacted unsaturated soils. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, France, 1: 195-200.
- Subba Rao, K. S., & Satyadas, G. G. 1987. Swelling potential with cycles of swelling and partial shrinkage. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Expansive Soils*, New Delhi, India, 1: 137-142.
- Tawfiq, S., & Nalbantoglu, Z. 2009. Swell-Shrink behavior of expansive clays. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Nicosia, North Cyprus, 336-341.
- Tripathy, S., Rao, K. S., & Fredlund, D. G. 2002. Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4): 938-959.
- soil. *The Journal of Agricultural Science*, 13(03): 296-310.
- Ho, D. Y. F., Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. 1992. Volume change indices during loading and unloading of an unsaturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2): 195-207.
- Ito, M., & Azam, S. 2010. Determination of swelling and shrinkage properties of undisturbed expansive soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), 413-422.
- Jones, D. E. & Holtz, W. G. 1973. Expansive soils-the hidden disaster. *Civil Engineering*, 43: 87-89.
- Krohn, J. P., & Slosson, J. E. 1980. Assessment of expansive soils in the United States. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, USA, 596-608.
- 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: *Proceedings of the 7th International Conference on Expansive Soils*, Dallas, USA, 1: 1-6.
- Mesri, G., & Olson, R. E. 1971. Consolidation characteristics of montmorillonite. *Geotechnique*, 21(4), 341-352.
- Mishra, A. K., Dhawan, S., & Rao, S. M. 2008. Analysis of swelling and shrinkage behavior of compacted clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(3): 289-298.
- Nelson, J. D., & Miller, D. J. 1992. *Expansive soils: problems and practices in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons Inc.
- Osipov, V. I., Bik, N. N., & Rumjantseva, N. A. 1987. Cyclic swelling of clays. *Applied clay science*, 2(4): 363-374.
- Popescu, M. 1980. Behaviour of expansive soils with a crumb structure. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, USA, 158-171.



Laboratory study of expansive soil treatment using consecutive wetting and drying cycles

Amin Soltani¹ and Ali Raeesi Estabragh^{2*}

1) Msc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran

2*) Associate Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran

Corresponding author email: raeesi@ut.ac.ir

Received: 10-10-2013

Accepted: 02-02-2014

Abstract

Treating problematic soils at the location of irrigation and drainage networks in order to prevent hydraulic structure failure and thus water losses is considered an important issue regarding water and soil conservation. Expansive soils are found in many parts of the world and are considered a worldwide problem as they cause extensive damage to structures (especially hydraulic). This paper presents the laboratory results of wetting and drying cycles for expansive clay prepared with saline (sodium chloride with a concentration of 50 g/L) to improve its quality. Soil samples were prepared by static compaction using saline water and wetting and drying cycles by a modified and conventional Oedometer apparatus. Results indicated that axial deformation caused by consecutive wetting and drying cycles decreases and reaches equilibrium after five consecutive cycles thus causing the amount of swelling and shrinkage to be equal. Furthermore swelling and shrinkage paths (void ratio versus water content paths) indicate that the general shape of a wetting or drying cycle is an S-shaped curve which will reach equilibrium thus eliminating hysteresis caused by wetting and drying in the final cycle causing identical swelling and shrinkage paths.

Keywords: hysteresis; pore water; swelling and shrinkage paths; water and soil conservation