

مسیرهای تورمی - انقباضی یک خاک متورم شونده در چرخه‌های تر و خشک با آب شور

مهرداد مقدس^{1*}، علی رئیسی استبرق² و جمال عبداللهی بیک³

تاریخ دریافت: 89/11/06 تاریخ پذیرش: 91/02/13

¹- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه تهران

²- استادیار گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

³- مربی گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

*مسئول مکاتبه: E-mail: m.moghadas@ut.ac.ir

چکیده

خاک‌های متورم شونده خاک‌هایی هستند که بر اثر تغییر رطوبت متورم یا منقبض می‌شوند که این تغییر حجم می‌تواند سبب بالا آمدن سطح زمین و در نتیجه خسارت به سازه‌های روی آن‌ها شود. در این تحقیق رفتار یک خاک متورم شونده تحت چرخه‌های تر و خشک شدن بررسی شد. آزمایشات آزمایشگاهی روی نمونه‌های خاک متراکم شده به روش استاتیکی تحت سربار 10 و 20 کیلو پاسکال در دستگاه تحکیم اصلاح شده انجام شد. تغییر شکل محوری نمونه خاک در حین چرخه‌های تر و خشک و همچنین میزان EC (قابلیت هدایت الکتریکی) آب محفظه دستگاه در طول هر سیکل و نیز انتهای چرخه‌های مختلف اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های همزمان دیگری نیز روی نمونه‌های خاک مشابه نمونه اصلی در دستگاه تحکیم معمولی تحت سربار مشابه صورت پذیرفت. نسبت تخلخل و درصد رطوبت نمونه خاک در چند مرحله در حین چرخه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که تورم و انقباض پس از پنجمین چرخه برگشت پذیر بوده و در این حالت تغییر شکل نمونه خاک به حالت تعادل می‌رسد. مقادیر EC در طول هر چرخه افزایش می‌یابد تا به مقدار ثابتی برسد و با افزایش تعداد چرخه‌ها مقدار آن کاهش می‌یابد. مسیرهای خیس و خشک شدن خاک نیز شبیه منحنی-هائی S شکل بوده و این منحنی‌ها متشکل از یک بخش خطی شکل و دو بخش منحنی شکل می‌باشند و در حالت تعادل این دو مسیر بر یکدیگر منطبق شده و قسمت اعظم تغییر شکل خاک در بخش میانی منحنی و بین خطوط اشباع 50% و 90% به وقوع می‌پیوندد.

واژه‌های کلیدی: تحکیم اصلاح شده، تر و خشک شدن، خاک‌های متورم شونده، شوری، مسیرهای تورمی - انقباضی،

Swell- Shrinkage Paths of a Swelling Soil in Wetting and Drying Cycles with Saline Water

M Moghaddas^{1*}, A Raeesi Estabragh² and J Abdolahi³

Received: 26 January 2011, Accepted: 2 May 2012

¹⁻ MSc Student, Dept. of Hydraulic Structures, Univ. of Tehran, Tehran, Iran,

²⁻ Assis. Prof., Dept. of irrigation and reclamation, Univ. of Tehran,

³⁻ Lecturer, Dept. of irrigation and reclamation, Univ. of Tehran

*Corresponding Author: m.moghadas@ut.ac.ir

Abstract

Expansive soils swell or shrink when subjected to water content changes. These volume changes can give rise to ground uplift which may cause damages to the on site structures. In this research the behavior of an expansive soil was investigated through a number of wetting and drying cycles. Laboratory tests were carried out on statically compacted samples in a modified odometer under surcharge pressures of 10 and 20 kPa. The vertical deformation of the soil sample and EC (electrical conductivity) of the water of the consolidation cell were measured during cycles of wetting and drying. The void ratio and water content of the soil samples were determined at different stages. The results showed that swelling and shrinkage were reversible after the fifth cycle while soil deformation reached the equilibrium condition. The value of EC increased during each cycle and attained to a constant value but it decreased with increasing the number of cycles. Wetting and drying paths were as S shaped curves. These curves consisted of a linear and two curved portions, and in equilibrium condition these paths coincided. The majority of the soil deformations occurred in the middle part of the curves between the degrees of saturation 50% and 90%.

Key words: Expansive soils, Modified odometer, Salinity, Swell- shrink paths, Wetting and drying

مقدمه

های اخیر می‌باشد. محققین متعددی از جمله فردلان و راهاردجو (1993)، کوماین و اگیت (1996)، مارینهو و استوئرمر (1999) و فربر و همکاران (2009) بیان نمودند که عوامل متعددی از جمله رطوبت و نسبت تخلخل اولیه، نوع کانی‌های رسی، واحدهای درشت

خاک‌های متورم شونده در اثر تغییر شرایط طبیعی دچار نوسانات رطوبت می‌شوند که این نوسانات رطوبت سبب تغییر حجم آن‌ها می‌شود و این تغییر حجم، تحت عنوان تورم (افزایش حجم) و انقباض (کاهش حجم) شناخته می‌شود و از موضوعات تحقیقاتی مورد علاقه متخصصین ژئوتکنیک در سال-

گروهی از محققین مانند چو و مو (1973)، سوبارائو و ساتیاداس (1987) و چن (1988) نمونه‌ای از یک خاک رس متورم شونده را تحت سیکل تر قرار دادند تا تورم کامل در آن ایجاد گردد، سپس عمل خشک شدن را انجام دادند به طوری که این عمل تا رسیدن رطوبت نمونه به رطوبت اولیه خود ادامه یابد و نتیجه گرفتند که در هر سیکل تغییر شکل‌های غیر قابل برگشت به وجود می‌آید. تحقیقات آن‌ها و تریپاتی و همکاران (2002) روی نمونه‌های خاک رسی در دستگاه تحکیم نشان می‌دهد که در چرخه‌های اولیه تغییر شکل ناشی از تورم و انقباض یکسان نمی‌باشد و با افزایش تعداد چرخه‌ها از میزان آن کاسته می‌شود. آن‌ها بیان نمودند با تکرار این چرخه‌ها حالت تعادل در نمونه حادث می‌گردد به طوری که تغییر شکل ناشی از تورم و انقباض یکسان بوده و پتانسیل تورم نیز کاهش می‌یابد. چن و همکاران (1985) و پارسایی و همکاران (1389) نیز به این نتیجه رسیدند که چرخه‌های تر و خشک باعث کاهش پتانسیل تورم می‌شود. در مقابل برخی محققین مانند چن و ما (1987) اثر تغییرات چگالی و رطوبت را بر تورم و انقباض یک رس دست خورده بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش چگالی خشک مقدار تورم خاک افزایش و با افزایش میزان رطوبت اولیه میزان تورم کاهش می‌یابد همچنین پوپسکو (1980) در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که چرخه‌های متوالی تر و خشک سبب افزایش پتانسیل تورم خواهد شد. همچنین توفیق و نباتت اوغلو (2009) به این نتیجه رسیدند که در صورتی که خاک در معرض چرخه‌های تورم و انقباض کامل قرار گیرد، پتانسیل تورم پذیری آن افزایش می‌یابد.

تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده همگی موید این مطلب هستند که حالت تعادل تورمی - انقباضی پس از طی 4 تا 6 چرخه به وجود می‌آیند که در بین آن‌ها می‌توان به تحقیقات چو و مو (1973) و سوبارائو و ساتیاداس (1987) اشاره کرد. همانطور که بیان شد

ساختاری¹ و همینطور سربار موجود، در پتانسیل تورمی یک خاک متورم شونده نقش بسیار مهمی را دارا می‌باشند. تغییر حجم این گونه خاک‌ها عمدتاً تحت تاثیر مقدار و نوع کانی‌های رسی قرار دارد به طوری که تغییر حجم در مقیاس‌های زیاد همواره با وجود مقادیر بسیار زیادی از رس‌های فعال همراه می‌باشد. وقتی که این خاک‌ها در اثر کاهش رطوبت خشک می‌گردند، پدیده انقباض روی می‌دهد و افزایش رطوبت بعدی موجب تورم آن‌ها، در نتیجه جذب آب حفره‌ای می‌گردد این دو پدیده تحت عنوان سیکل یا چرخه تر و خشک شهرت دارد.

بررسی منابع نشان می‌دهد که مطالعات متعددی به وسیله محققینی از قبیل چو و مو (1973)، سوبارائو و ساتیاداس (1987)، الحمود و همکاران (1995) و تریپاتی و همکاران (2002) در خصوص بررسی خواص خاک‌های متورم شونده در اثر سیکل‌های تر و خشک در دستگاه تحکیم صورت پذیرفته به طوری که سیکل تر و خشک با افزایش آب به نمونه تا نائل شدن به حداکثر تورم و خشک کردن نمونه به وسیله جریان هوا با ایجاد یک سیستم گرمایشی انجام شده است. وقتی که یک خاک متورم شونده تحت چرخه خیس شدن قرار می‌گیرد حجم نمونه افزایش یافته و خاک متورم می‌گردد. در پدیده تورم معمولاً سه فاز وجود دارد که عبارتند از تورم اولیه، تورم ثانویه و فاز بدون تورم. بر اساس تحقیقات هینز (1923) خشک شدن نیز در سه مرحله متفاوت روی می‌دهد. در مرحله اول که انقباض ساختاری نام دارد، تعداد کمی از حفره‌های بزرگ خاک رطوبت خود را از دست داده و کاهش حجم خاک کمتر از حجم آب از دست رفته می‌باشد. در مرحله دوم که انقباض طبیعی نام دارد، کاهش حجم خاک معادل کاهش حجم آب خواهد بود و در مرحله سوم که انقباض پسماند نام دارد کاهش حجم نمونه خاک کمتر از حجم آب از دست رفته است.

¹ Macrostructure

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده

از آنجایی که هدف این تحقیق بررسی رفتار تورمی- انقباضی² یک خاک متورم شونده تحت تاثیر چرخه‌های تر و خشک شدن است، لذا نیاز به یک خاک متورم شونده وجود داشت و چون خاک در دسترس نوعی خاک رس بود که طبق طبقه بندی مک کین (1992) خصوصیات تورمی متوسطی داشت، اقدام به تهیه مخلوط‌های کائولین و بنتونیت شد زیرا بنتونیت نوعی رس و حاوی کانی مونت موریلونیت بوده و سبب افزایش خاصیت تورمی مخلوط می‌شود. پس از انجام آزمایشات روی مخلوط‌های مختلف، مخلوط حاوی 20 درصد بنتونیت و 80 درصد کائولین جهت انجام آزمایشات اصلی انتخاب گردید. لازم به ذکر است که آزمایشات در آزمایشگاه ژئوتکنیک گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران و در سال 1389 انجام شدند. آزمایشات شناسایی شامل فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مطابق استاندارد ASTM صورت پذیرفته و نتایج آن در جدول شماره 1 مشاهده می‌شود.

جدول 1- خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

70	حد روانی (%)
23	حد خمیری (%)
47	شاخص خمیری (%)
14	حد انقباض (%)
2/75	وزن مخصوص دانه‌های جامد (Gs)
73	درصد عبوری از الک شماره 200 (%)
45	درصد رس (کوچکتر از 0/002 میلیمتر)
1/045	فعالیت (A)
18	رطوبت بهینه w (%)
16	وزن واحد خشک بیشینه (kN/m^3)
8/2	pH
7610	EC ($\mu S/cm$)

تغییرات رطوبت موجب تغییرات نسبت تخلخل در خاک می‌گردد بنابراین بررسی مسیر تغییرات آن‌ها با یکدیگر در طول چرخه‌های تر و خشک کمک زیادی به شناخت بهتر مکانیزم تورم و انقباض می‌نماید. تریپاتی و همکاران (2002) به این نتیجه رسیدند که برای نمونه- های متراکم شده‌ای که در معرض چرخه‌های تورم و انقباض قرار می‌گیرند، مسیرهای تورمی انقباضی در دستگاه مختصات نسبت تخلخل¹ بر حسب درصد رطوبت، منحنی‌هایی متشکل از دو بخش دارای انحنا و یک بخش خطی شکل و برای نمونه‌هایی که در معرض چرخه‌های کامل تورم و ناقص انقباض قرار می‌گیرند، منحنی‌هایی متشکل از یک بخش خطی و یک بخش منحنی شکل هستند. در تحقیقات اخیر نیز گروهی از محققین مانند آلونسو و همکاران (2005)، ویلر و همکاران (2003) و نوآموز و مسروری (2010) اعمال سیکل‌های تر و خشک را روی نمونه‌ی خاک متورم شونده از روش تغییر مکش در دستگاه سه محوری یا تحکیم اصلاح شده انجام داده اند و به این نتیجه رسیده اند که پتانسیل تورم در نتیجه اعمال چرخه‌های تر و خشک کاهش می‌یابد.

منابع موجود نشان می‌دهند که در خصوص بررسی مسیرهای تغییرات رطوبت و نسبت تخلخل تحقیقات نسبتاً محدودی صورت پذیرفته و همچنین محققین تاکنون هیچگونه گزارشی از اثر کیفیت آب بر پتانسیل تورمی این خاک‌ها در چرخه‌های تر و خشک ارائه ننموده اند و همگی آن‌ها آب مورد استفاده را شاید آب شرب در نظر گرفته‌اند. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی اثر یک آب حاوی کلرید سدیم (شور) بر پتانسیل تورمی یک خاک متورم شونده در چرخه‌های متوالی تر و خشک و نیز بررسی مسیرهای تغییرات رطوبتی و نسبت تخلخل در هر چرخه می‌باشد.

² Swell-shrink

¹ Void ratio



شکل 1- قالب تراکم مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها

موارد نشان داده شده در شکل 1 عبارتند از: 1- پایه حلقه تحتانی 2- حلقه میانی 3- حلقه فوقانی 4- پایه آلومینیومی 5- صفحه بارگذاری 6- دستگاه تک محوری

دستگاه تحکیم

جهت انجام چرخه‌های تر و خشک متوالی از دستگاه تحکیم استفاده گردید، اما از آنجایی که این دستگاه فقط قادر به انجام چرخه تر می‌باشد اصلاحاتی روی آن انجام گرفت. این دستگاه متشکل از محفظه‌ای است که سنگ متخلخل پایینی، حلقه حاوی نمونه، سنگ متخلخل بالایی، سربار و اندازه‌گیر¹ تغییر شکل محوری که تغییر ارتفاع خاک را اندازه می‌گیرد به ترتیب روی آن قرار می‌گیرند (شکل 2). اصلاحات انجام شده شامل ایجاد یک سامانه گرمایشی با قابلیت فراهم نمودن شرایط دمایی قابل تنظیم در اطراف نمونه جهت خشک کردن آن و انجام چرخه خشک و تعبیه شیر زهکشی جهت تخلیه آب از نمونه در پایان چرخه تر می‌باشد. همچنین از صفحات آربست در اطراف محفظه دستگاه تحکیم استفاده شده که هدف از آن جلوگیری از هدررفت انرژی و ایمنی بیشتر می‌باشد. اندازه‌گیر تغییر شکل عمودی مورد استفاده نیز دارای دقت 0/01 میلی‌متر

همانطور که در جدول 1 دیده می‌شود مخلوط تهیه شده دارای خواص خمیری و عدد فعالیت بالایی است. نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان داد که حداکثر وزن واحد حجم خشک $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ و رطوبت بهینه $\omega_{opt} = 18\%$ می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش دانه‌بندی بیانگر آن است که بخش اعظم خاک مورد استفاده ریز-دانه است. خواص فیزیکی مندرج در جدول 1 نشان می‌دهد که این خاک مطابق سامانه طبقه بندی یونیفاید خاک رسی با خواص خمیری بالا (CH) می‌باشد.

در این تحقیق به منظور اعمال چرخه‌های تر به خاک، از آب حاوی کلرید سدیم استفاده شد که دارای $\text{pH} = 9.33$ و $\text{EC} = 933 \mu\text{S/cm}$ بود.

وسایل مورد استفاده در تحقیق

قالب تهیه نمونه‌ها

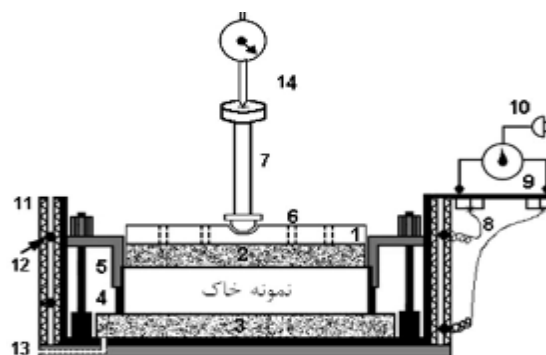
جهت ساخت نمونه‌ها از شیوه تراکم استاتیکی استفاده گردید بدین منظور اقدام به تهیه قالب جدیدی شد. این قالب متشکل از سه حلقه بوده که روی یک پایه آلومینیومی سوار می‌شوند. حلقه پایینی و بالایی از جنس برنز بوده و حلقه میانی همان حلقه تحکیم است. خاک در سه لایه در این قالب ریخته می‌شود. هدف از ساخت قسمت‌های بالایی و پایینی، دادن طول اضافی به نمونه متراکم شده است و در نهایت از حلقه تراشیده و جدا می‌شوند. شکل شماتیک این قالب در شکل 1 قابل مشاهده است.

¹ Gauge

متراکم کردن هر لایه و قبل از تراکم لایه بعدی، خراش-هایی در سطح خاک ایجاد شد. لازم به ذکر است که در هر لایه مقدار نیروی وارد به خاک در سه لایه به گونه-ای انتخاب شد که وزن واحد خشک نمونه به مقدار انتخابی برابر با $15/8$ کیلونیوتن بر متر مکعب، برسد. که رسیدن به این هدف نیازمند انجام سعی و خطا بود و در نهایت مقدار فشار 860 کیلوپاسکال برای هر لایه انتخاب شد.

تعیین زمان لازم برای اعمال چرخه‌های تر و خشک قبل از انجام آزمایش چرخه‌های تر و خشک احتیاج به دانستن زمان لازم جهت رسیدن نمونه اشباع کامل و تورم حداکثر و همینطور انقباض کامل بود. لذا نمونه-هایی مشابه نمونه اصلی ساخته شد و در دستگاه تحکیم معمولی قرار داده شد و با اضافه نمودن آب، تغییر شکل محوری با زمان تعیین گردید و این عمل ادامه یافت تا تغییر شکل محوری به مقدار ثابتی رسید. سپس با تعیین درصد تورم $(\Delta H/H)$ و زمان، نمودار شکل رسم شد (شکل 3) که ΔH تغییر شکل محوری و H ارتفاع اولیه نمونه می‌باشد. همانطور که مشاهده می-شود زمان لازم برای حداکثر تورم حدود 4 روز می-باشد. نمونه مذکور سپس از دستگاه تحکیم خارج و به اون منتقل شد و تغییرات حجمی و وزنی آن اندازه‌گیری شد تا اینکه به مقدار ثابتی رسید و با رسم نمودار درصد تغییر حجم و زمان (شکل 4)، زمان لازم برای انقباض کامل تعیین گردید. همانطور که در شکل 4 مشاهده می‌شود در نقطه اول نمودار در زمان 60 دقیقه درصد تغییر حجم خاک حدود 15 درصد می‌باشد که با افزایش زمان از درصد تغییر حجم خاک کاسته شده و پس از حدود 6 روز تغییرات آن ناچیز می‌شود. بنابراین پس از تعیین زمان‌های مربوطه نمونه‌های مورد نظر در دستگاه تحکیم اصلاح شده تحت سربارهای 10 و 20 کیلوپاسکال قرار داده شدند.

بود. شکل شماتیک این دستگاه در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2- شکل شماتیک دستگاه تحکیم اصلاح شده مورد استفاده

موارد نشان داده شده در این شکل عبارتند از:
1- صفحه بارگذاری-2 سنگ متخلخل بالایی-3 سنگ متخلخل پایینی-4 حلقه نمونه-5 محفظه دستگاه تحکیم-6 روزنه ورود آب-7 پیستون بارگذاری-8 سیم-9 کنترل کننده دما-10 مولد برق-11 عایق آزبست-12 سیم پیچ حرارتی-13 شیر زهکشی-14 اندازه‌گیر تغییر شکل.

تهیه نمونه‌ها

جهت تهیه نمونه‌ها از منحنی تراکم خاک استفاده شد بدین ترتیب که نقطه‌ای روی شاخه خشک این منحنی انتخاب و با درصد رطوبت و وزن واحد خشک متناظر با آن اقدام به تهیه نمونه‌ها شد به طوری که نقطه انتخابی دارای درصد رطوبت $13/5$ درصد و وزن واحد حجم خشک $15/8 \text{ kN/m}^3$ باشد. در ابتدا خاک مورد استفاده به رطوبت $13/5$ درصد ($4/5$ درصد کمتر از رطوبت بهینه)، رسانده شد و به منظور پراکندگی یکنواخت رطوبت نمونه خاک به مدت 24 ساعت در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شد. سپس در سه لایه جداگانه در قالب تهیه شده، توسط دستگاه تک محوری با سرعت بارگذاری $1/5$ میلی متر بر دقیقه متراکم شد. همچنین به منظور ایجاد پیوستگی در لایه‌ها، پس از

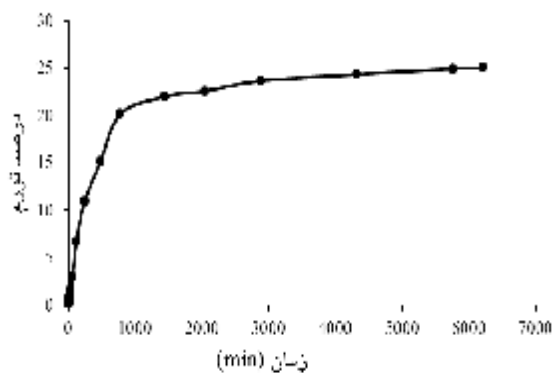
شده و سیستم گرمایشی نیز خاموش می‌گردد و مجدداً چرخه تر آغاز شد. این روند تا جایی که میزان تورم و انقباض یکسان شدند، ادامه پیدا کرد.

همچنین به منظور بررسی تغییرات نسبت تخلخل و درصد رطوبت خاک و رسم مسیرهای تورمی انقباضی در حین چرخه‌های تر و خشک، همزمان با آزمایشات چرخه‌های تر و خشک در دستگاه تحکیم اصلاح شده، نمونه‌هایی مشابه نمونه اصلی تهیه شده و در دستگاه‌های تحکیم معمولی تحت همان سربار قرار داده شد. همانطور که ذکر گردید این دستگاه تنها قادر به اعمال چرخه تر به نمونه‌ها بوده لذا برای اعمال چرخه خشک، نمونه‌ها به آون با شرایط دمایی مشابه دستگاه تحکیم اصلاح شده و تحت همان سربار، انتقال داده شدند و در ادامه برای اعمال چرخه تر بعدی به دستگاه تحکیم منتقل شدند. پس از شروع آزمایشات در دستگاه‌های تحکیم اصلاح شده و معمولی، حدوداً همزمان با تغییر شکل‌های معادل با یک چهارم 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 رابطه 1 محاسبه شد.

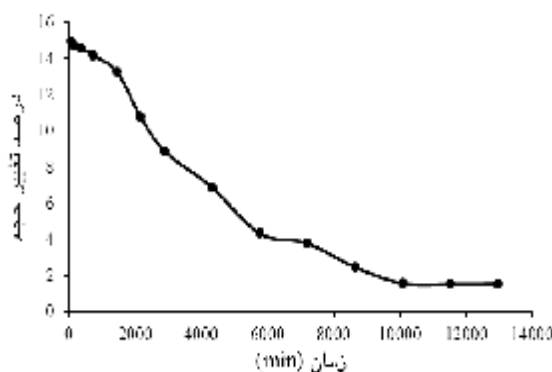
$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad [1]$$

در رابطه فوق ΔV و Δe به ترتیب تغییر حجم و تغییر نسبت تخلخل نمونه خاک در هر مرحله از چرخه‌های تر و خشک و V_0 و e_0 به ترتیب حجم اولیه خاک و نسبت تخلخل در شروع آزمایش می‌باشند. به طور میانگین در هر چرخه تر و هر چرخه خشک 5 نمونه از دستگاه‌های تحکیم معمولی استفاده گردیدند.

به منظور بررسی تغییرات EC آب موجود در محفظه دستگاه تحکیم در حین آزمایشات، با استفاده از یک EC متر هدایت الکتریکی آب مخزن در چهار چرخه اول با زمان اندازه‌گیری شد و نتایج حاکی از ثابت شدن هدایت الکتریکی در روز اول چرخه تر بود. نمودار این تغییرات در شکل 5 مشاهده می‌شود.



شکل 3- تغییر حجم نمونه با زمان در حالت تر شدن



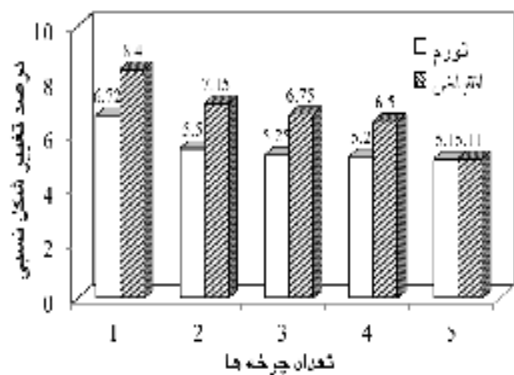
شکل 4- تغییر حجم نمونه با زمان در حالت خشک شدن

اعمال چرخه‌های تر و خشک

پس از ساخت نمونه طبق شرایط ذکر شده، نمونه در دستگاه تحکیم اصلاح شده قرار گرفته و تحت تاثیر سربار 10 و 20 کیلو پاسکال به طور جداگانه اجازه تورم به نمونه داده شده بدین شکل که آب به محفظه دستگاه اضافه شده و نمونه در معرض چرخه تر قرار گرفت. تغییر شکل محوری خاک توسط اندازه‌گیر تغییر شکل عمودی ثبت گردیده و پس از ثابت شدن تغییر شکل آن (که حدوداً 4 روز زمان نیاز داشت)، چرخه خشک آغاز شد. به این ترتیب که آب از محفظه دستگاه توسط شیر زهکشی تخلیه و سیستم گرمایشی در حالت روشن قرار گرفته و چرخه خشک آغاز می‌گردد. تغییر شکل محوری خاک در حالت چرخه خشک نیز اندازه‌گیری شده و پس از ثابت شدن تغییر شکل که نیازمند زمانی برابر با حدود 6 روز بود شیر زهکشی بسته

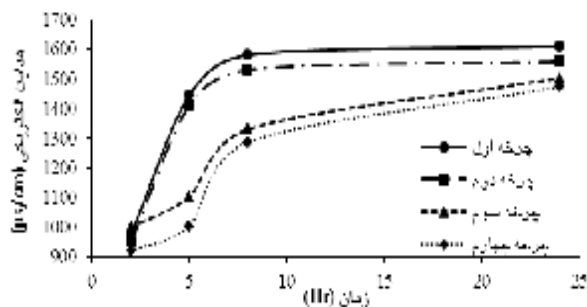
چرخه پنجم این اختلاف تقریباً از بین می‌رود و حالت تعادل حاکم می‌گردد. در ارتباط با نتایج مربوط به سربار 20 کیلو پاسکال نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود با این تفاوت که نمودار آن در اثر سربار بیشتر زیر نمودار مربوط به 10 کیلو پاسکال قرار گرفته است که اثر سربار در جلوگیری از تورم و افزایش انقباض را نشان می‌دهد.

شکل 7 قدر مطلق (بزرگی) تغییر شکل‌های نسبی محوری ناشی از تورم و انقباض را در چرخه‌های متوالی تر و خشک به طور نمونه به ازای سربار 10 کیلو پاسکال نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشهود است در چرخه اول میزان تغییر شکل ناشی از چرخه خشک به مراتب بیشتر از چرخه تورم است و این امر نشان دهنده آن است که در حالت خشک و انقباض در نمونه فشردگی و تراکم به وجود می‌آید. به عبارت دیگر نسبت به حالت تورم مقداری تغییر شکل برگشت ناپذیر در نمونه حادث می‌گردد و این پدیده در چرخه‌های بعدی با اختلاف کمتری مشهود است به طوری که در چرخه پنجم این اختلاف (ناشی از دو تغییر شکل تورم و انقباض)، به صفر می‌رسد به عبارتی نمونه به صورت ماده‌ای ارتجاعی عمل می‌نماید.



شکل 7- درصد تغییر شکل ناشی از تورم و انقباض در چرخه‌های متوالی با سربار 10 کیلو پاسکال.

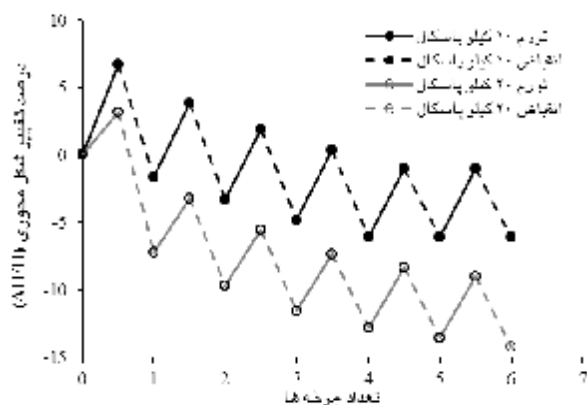
شکل‌های 8- الف تا 8- د تغییرات نسبت تخلخل و درصد رطوبت را در هر چرخه تر و خشک متوالی نشان می‌دهد. شکل 8- الف وضعیت اولیه نمونه خاک



شکل 5- تغییرات هدایت الکتریکی آب مخزن با زمان در چرخه‌های متوالی

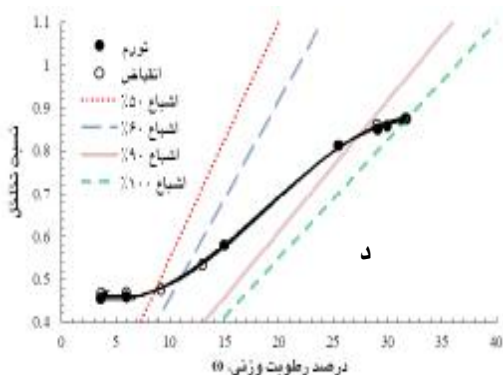
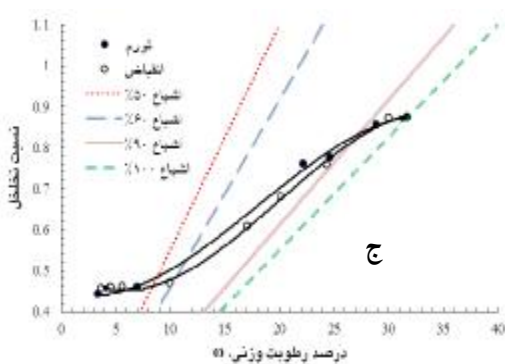
نتایج و بحث

نتایج حاصل از تغییر شکل‌های محوری نمونه خاک تحت سربار 10 و 20 کیلو پاسکال در چرخه‌های متوالی تر و خشک در شکل شماره 6 مشاهده می‌شود.



شکل 6- تغییر شکل محوری خاک در چرخه‌های تر و خشک متوالی

همانگونه که مشهود است در مرحله اول در اثر خیس شدن نمونه تحت سربار 10 کیلو پاسکال، تورم حاصله در آن معادل 6/7 درصد است لیکن در اثر خشک شدن و انقباض، تغییر شکلی برابر 8/4 درصد به وجود می‌آید که نشان دهنده متراکم شدن نمونه می‌باشد. در چرخه دوم بزرگی پتانسیل تورم خاک 5/5 درصد است که در مقایسه با مقدار آن در چرخه اول کاهش معادل 1/2 درصد دارد که بیانگر کاهش قدرت تورمی خاک است. اختلاف بین تغییر شکل ناشی از تورم و انقباض در این چرخه هم وجود دارد لیکن مقدار آن نسبت به چرخه اول کمتر است به طوری که در

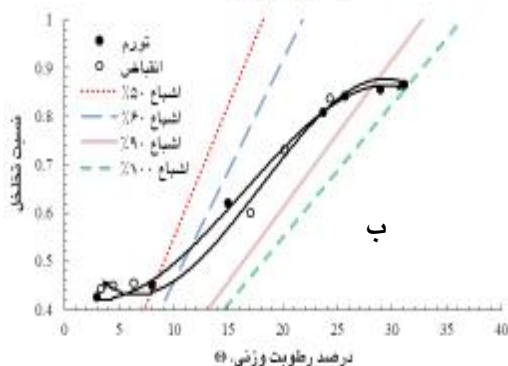
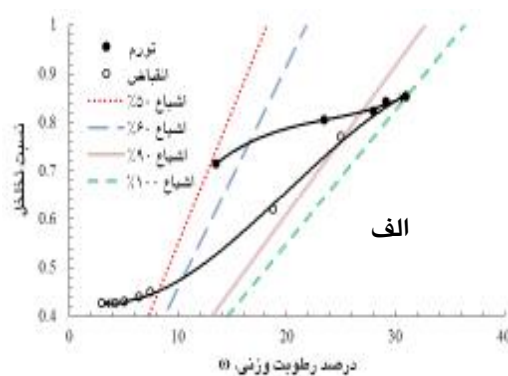


شکل 8- تغییرات نسبت تخلخل و درصد رطوبت در چرخه‌های تر و خشک اول تا چهارم

نتیجه‌گیری کلی

شکل شماره 7 نشان می‌دهد که با افزایش چرخه‌های تر و خشک تغییر شکل نسبی نمونه خاک کاهش می‌یابد به طوری که از چرخه پنجم به بعد تغییر شکل‌های ناشی از تورم و انقباض تقریباً یکسان است. این پدیده نشان دهنده آن است که ساختار خاک در چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن تغییر می‌کند به طوری که از چرخه پنجم به بعد ساختمان خاک به یک وضعیت پایدار می‌رسد و تغییر شکل ناشی از عمل تر و خشک شدن در آن به حالت برگشت پذیر تبدیل می‌گردد. طی انجام چرخه‌های مذکور پتانسیل تورمی کاهش یافته به طوری که میزان تغییر شکل نسبی ناشی از تورم تحت سربار 10 کیلو پاسکال در اولین چرخه 6/72 درصد بوده که این مقدار در چرخه پنجم به 5/1 درصد می‌-

را نشان می‌دهد که دارای درصد رطوبت 13/5 درصد و نسبت تخلخل 0/714 و درجه اشباع تقریباً 50 درصد است. با افزایش درصد رطوبت، نسبت تخلخل و درجه اشباع نمونه نیز افزایش می‌یابد به طوری که در پایان مرحله تورم در چرخه مذکور درصد رطوبت و نسبت تخلخل و درجه اشباع نمونه به حدود صد درصد می‌رسد. مرحله خشک شدن در این چرخه با کاهش رطوبت و نسبت تخلخل همراه است. همانطور که در شکل 8- الف مشاهده می‌شود در انتهای این مرحله رطوبت نمونه به 3 درصد و نسبت تخلخل به 0/43 رسیده است. مسیرهای تغییرات نسبت تخلخل و درصد رطوبت در شکل‌های 8-ب تا 8-د هم مشاهده می‌شود. نتیجه دیگری که از این مسیرها قابل مشاهده است تغییرات عمده تورم و انقباض در قسمت میانی منحنی‌ها یعنی در فاز دوم تورم و فاز دوم انقباض است. به طور متوسط عمده تغییرات نسبت تخلخل خاک در بین خطوط اشباع 50 و 90 درصد رخ می‌دهد.



ماتریک و اسمزی است. مکش ماتریک ناشی از نیروی موئینگی و مکش اسمزی ناشی از وجود املاح است. وقتی که نمونه خاک در شرایط اولیه رطوبتی در دستگاه تحکیم جهت انجام چرخه‌های تر و خشک قرار داده شود در حالت غیر اشباع می‌باشد با افزودن آب در داخل محفظه دستگاه تحکیم، آب به سمت نمونه حرکت می‌کند تا اینکه مکش ماتریک کاملاً حذف گردد و مقدار آن به صفر برسد که این عمل با اشباع کامل نمونه عملی است. پس از آن مکش اسمزی ظاهر می‌گردد که موجب حرکت آب از غلظت کمتر به بیشتر می‌شود. این عمل باعث می‌گردد که فشار آب حفره‌ای در داخل نمونه افزایش یافته و چون نمونه تحت سربار ثابت قرار دارد لذا تنش موثر بین ذرات کاهش می‌یابد و این عمل سبب فاصله گرفتن ذرات و ایجاد تورم می‌شود (باربور و فردلانند 1989). علاوه بر پدیده‌های فوق در حالت اشباع کامل نمونه پدیده‌های دیگر که تحت عنوان پخشیدگی² نامیده می‌شود نیز ممکن است ظاهر گردد. این پدیده تحت تاثیر گرا دیان غلظت صورت می‌پذیرد و معمولاً موجب انتقال املاح از غلظت بیشتر به کمتر می‌شود (باربور و فردلانند 1989). نتایج آزمایشات شیمیائی مندرج در شکل 8 نشان می‌دهد که EC آب مخزن دستگاه تحکیم نسبت به حالت اولیه خود با افزایش تعداد چرخه‌ها افزایش می‌یابد که نشان دهنده انتقال املاح از نمونه به آب مخزن دستگاه تحکیم است زیرا EC بیانگر میزان املاح در آب است. بنابراین کاهش کاتیون‌ها در آب حفره‌ای موجب کاهش نیروهای جاذبه و پیدایش نیروهای دافعه می‌گردد که موجب افزایش ضخامت لایه مضاعف دوگانه و تورم خاک می‌گردد. از آنجائی که آزمایشات با آب شور انجام گرفته و آب مخزن حاوی املاح بوده است، انتقال املاح به آب مخزن کم بوده و مانع تورم زیاد خاک شده است.

رسد (شکل‌های 6 و 7). این تغییرات نشان دهنده آن است که خواص اولیه خاک رسی مقداری تغییر کرده است. این تغییر را می‌توان به این شکل بیان نمود که در چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن ذرات رس به هم می‌چسبند و ذرات درشت تری را تشکیل می‌دهند به طوری که دانه‌بندی خاک مانند شرایط اولیه آن نمی‌باشد. ذرات درشت تر به وجود آمده دارای سطح ویژه کمتری نسبت به ذرات ریز اولیه خاک است لذا قدرت جذب آب و فرم‌پذیری آن‌ها کاهش یافته به طوری که این تغییرات سبب کاهش پتانسیل تورمی خاک می‌شود. این نتایج با کارهای تحقیقاتی محققینی همچون سوبا راثو و ساتیاداس (1987) و الحمود و همکاران (1995) و تریپاتی و همکاران (2002) کاملاً مطابقت دارد. آن‌ها نیز کاهش پتانسیل تورمی خاک متورم شونده را در چرخه‌های تر و خشک متوالی ناشی از پدیده تشکیل ذرات درشت تر با قدرت جذب آب کمتر بیان نمودند. شکل‌های مندرج در شکل 8 نیز این مسئله را بهتر نشان می‌دهد که ساختمان خاک در چرخه‌های متوالی تر و خشک دچار تغییراتی می‌گردد. در شکل 8 الف فاصله بین دو منحنی در حالت خیس و خشک شدن نمونه زیاد است ولی با تکرار چرخه‌ها این فاصله کاهش می‌یابد به طوری که در چرخه چهارم دو منحنی خیلی نزدیک به هم قرار می‌گیرند. اختلاف مکش خاک و به عبارت دیگر نسبت تخلخل نمونه در یک رطوبت ثابت در حالت تر شدن و خشک شدن تحت عنوان پس‌ماند¹ نامیده می‌شود. همانگونه که در شکل 8 مشاهده می‌شود حذف تدریجی پدیده پس‌ماند در نتیجه اعمال چرخه‌های تر و خشک در نتیجه تغییر در ساختمان خاک اتفاق می‌افتد که این نتایج با یافته‌های محققینی همچون تریپاتی و همکاران (2002) تطابق کامل دارد.

در خاک‌های غیر اشباع مکش وجود دارد که تحت عنوان مکش کل نامیده می‌شود و متشکل از مکش

² Diffusion¹ Hysteresis

شوند پایدار نباشند و موجب ریزش و تغییر شکل بیشتر در نمونه گردند.

سپاسگزاری

بدینوسیله از معاونت علمی و پژوهشی دانشگاه تهران که در تامین منابع مالی این تحقیق مساعدت نمودند تشکر و قدردانی می گردد.

همانطور که در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده است در چرخه‌های اولیه میزان تغییر شکل نسبی ناشی از انقباض بیشتر از تورم است این مسئله می‌تواند ناشی از آن باشد که علاوه بر این که وجود سربار نقش بسیار مهمی را دارد در اثر عمل انتقال املاح امکان ایجاد منافذ ظاهری بسیار ریز در نمونه می‌باشد و این منافذ در هنگام اعمال چرخه خشک که خالی از آب می-

منابع مورد استفاده

- پارسایی ب، رئیسی استبرق ع و مرادی م، 1389. بررسی رفتار تورمی - انقباضی یک خاک متورم شونده. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، جلد چهارم و یکم، شماره 1. صفحه‌های 87 تا 94.
- Al-Homoud AS, Basma A, Husein Malkavi AI and AL-Bashabshah MA, 1995. Cyclic swelling behavior of clays. *J. of Geotechnical Engineering ASCE* 121: 562-565.
- Allonso EE, Romero E, Hoffmann C and Garcia Escudero E, 2005. Expansive bentonite- sand mixtures in cyclic controlled -suction drying and wetting. *J. of Engineering Geology* 81: 213-226.
- Barbour SL and Fredlund DG, 1989. Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils. *Can Geotech Journal* 26: 551-562.
- Chen, FH, 1988. *Foundation on Expansive Soils*. Elsevier Science Publishing Inc, New York.
- Chen FH and Ma GS 1987. Swelling and shrinkage behavior of expansive clays. Pp. 127-129. *Proceeding of the 6th International Conference on Expansive Soils*. New Delhi, India.
- Chen XQ, Lu ZW and He XF, 1985. Moisture movement and deformation of expansive soils. Pp 2389-2392. *Proceedings of the First International Conference of Soil Mechanics*. Found Eng, San Francisco, USA.
- Chu TY and Mou CH, 1973. Volume change characteristic of expansive soils determined by controlled suction test. Pp.177-185. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*. Haifa, Israel.
- Ferber V, Auriol JC, Cui YJ and Magnan JP, 2009. The swelling potential of compacted high plasticity clays. *Engineering Geology* 104: 200-210.
- Fredlund DG and Rahardjo H, 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons Inc, New York.
- Hains WB, 1923. The volume changes associated with variations of water content in soil. *Journal of Agricultural Science* 13: 296-310.
- Komine H and Ogate N, 1996. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian Geotechnical Journal* 31-4: 478-490.
- Marinho FA and Stuermer M, 1999. The influence of compaction energy on the SWCC of a residual soil. Pp. 125-191. *Advances in Unsaturated Geotechnics*. Geotechnical Special Publication, ASCE.
- McKeen RG, 1992. A model for predicting expansive soil behavior. Pp. 1-6. *Proceeding of the 7th Internatioanal Conference on Expansive Soils*. Dallas, USA.
- Nowamooz H and Masroori F, 2010. Influence of suction cycles on the soil fabric of compacted swelling soil. *Comptes Rendus Geoscience Journal* 342: 901-910.

- Popescu M, 1980. Behaviour of expansive soils with crumb structures. Pp. 158-171. Proceeding of the 4th International Conferences on Expansive Soils. Denver, USA.
- Subba Rao KS and Satyadas GS, 1987. Swelling potentials with cycles of swelling and partial shrinkage. Pp. 137-147. Proceeding of the 6th Internatioanal Conference on Expansive Soils. New Delhi, India.
- Tawfiq S and Nabantoglu Z, 2009. Swell-shrink behavior of expansive clays. Pp. 336-341. Proceeding of the 2nd International Conference on Expansive Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Nicosia, North Cyprus.
- Tripathy S, Subba Rao KS and Fredlund DG, 2002. Water content void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. Canadian Geotechnical Journal 39: 938-959.
- Wheeler SJ, Sharma RS and Buisson MSR, 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress strain behavior in unsaturated soils. Geotechnique 53(1): 41-54.