

اثر دما بر خصوصیات تورمی یک خاک متورمشونده در چرخه‌های خشک و تر

محدثه امینی کلهرودی^{۱*}، علی رئیسی استبرق^۲ و جمال عبدالهی بیگ^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، 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: ۱۳۹۴/۸/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۲/۱۱)

چکیده

در این کار تحقیقاتی خواص مکانیکی یک خاک رسی متورمشونده تحت تاثیر شرایط دمای ثابت و متغیر در چرخه‌های خشک و تر متوالی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های آزمایشگاهی با کیفیت‌های مایع منفذی مختلف آب مقطر، محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید (با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر) به روش تراکم استاتیکی تهیه گردید. آزمایش‌های چرخه‌های خشک و تر روی نمونه‌های ساخته شده در دو دستگاه تحکیم اصلاح شده تحت تاثیر سربار ثابت ۱۰ کیلوپاسکال انجام شد و در طول آزمایش تغییر شکل محوری اندازه‌گیری گردید. در یکی از دستگاه‌ها دما در چرخه‌های خشک و تر متوالی مقدار ثابت ۴۵ درجه سانتی‌گراد و در دستگاه دیگر دمای چرخه‌های خشک ۴۵ درجه و دمای چرخه‌های تر ۲۵ درجه سانتی‌گراد اعمال گردید. نتایج نشان داد در هر یک از حالات برای تمامی نمونه‌ها پتانسیل تورمی تقریباً پس از طی ۵ چرخه به تعادل می‌رسد. هم‌چنین مقایسه مقادیر پتانسیل تورمی نشان می‌دهد که کاهش پتانسیل تورمی در حالت تعادل نسبت به چرخه‌ای که بیشینه درصد تورم در آن اتفاق افتاده است برای نمونه ساخته شده با مایع منفذی مقطر در حالت دمای ثابت در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با مایع منفذی سدیم کلرید و کلسیم کلرید به ترتیب به میزان ۴/۲۵٪ و ۵/۸۵٪ بیشتر می‌باشد هم‌چنین در حالت دمای متغیر این کاهش به ترتیب ۷/۲۱٪ و ۸/۹٪ بیشتر می‌باشد. علاوه بر این مقایسه نتایج در حالت دمای ثابت و متغیر نشان می‌دهد که در حالت دمای ثابت پتانسیل تورمی نمونه‌ها با مایع منفذی سدیم کلرید و کلسیم کلرید در چرخه‌های اولیه بیشتر از حالت دمای متغیر است.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل تورمی، دمای ثابت و متغیر، تحکیم اصلاح‌شده، سربار ۱۰ کیلوپاسکال

مقدمه

خاک‌های متورمشونده خاک‌هایی هستند که در اثر افزایش رطوبت تغییر حجم قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان می‌دهند. فشار ناشی از تورم این خاک‌ها می‌تواند موجب خرابی ساختمان های سبک نظیر پوشش کانال‌های آبیاری، کف سازه‌ها و ... که بر روی آن‌ها ساخته شده، گردد. این نوع خرابی‌ها در بسیاری از پروژه‌ها در نقاط مختلف جهان گزارش شده است. (Jones and Holtz, 1973) میزان خسارت سالانه وارده توسط این خاک‌ها را در ایالت متحده آمریکا حدود دو برابر خسارت ایجاد شده توسط بلایای طبیعی نظیر سیل، زلزله، طوفان، گردباد و ... گزارش کرده‌اند. خاک‌های متورمشونده در ایران نیز یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب پوشش بتنی کانال‌های آبیاری در مناطقی مانند خوزستان، مغان و ... می‌باشد (Ahmadi et al., 2012). علی‌رغم مشکل‌آفرین بودن این نوع خاک‌ها به دلیل نفوذپذیری

پائین‌شان، دارای کاربرد وسیعی در دفن زباله‌های شهری،

صنعتی و به خصوص هسته‌ای می‌باشند.

بررسی تغییرات پتانسیل تورمی و انقباضی خاک‌های متورم شونده طی چرخه‌های خشک و تر توسط پژوهشگرانی از جمله (Dif and Blumel, 1991)، (Al-Homoud et al., 1995)، (Basma et al., 1996)، (Tripathy et al., 2002, 2009)، (Alsono et al., 2005) و (Parsaee et al., 2009) و (Estabragh et al., 2015) انجام شده است. آن‌ها دریافتند که پتانسیل تورمی با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک کاهش می‌یابد اما پژوهشگران دیگری از جمله (Chu and Mou, 1973)، (Osipov et al., 1987) و (Day, 1994) و (Tawfig and Nalbantoglu, 2009) نشان دادند که با اعمال چرخه‌های تر و خشک پتانسیل تورمی خاک افزایش می‌یابد. (Estabragh et al., 2013) به بررسی اثر کیفیت شیمیایی آب مستغرق کننده طی چرخه‌های متوالی تر و خشک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اعمال چرخه‌ها به تنهایی تعیین‌کننده مطلق افزایش

* نویسنده مسئول: amini.mohadeseh@ut.ac.ir

گرفته شد که از مخلوط ۸۰٪ خاک مذکور و ۲۰٪ بنتونیت برای انجام این تحقیق استفاده شود. از این پس این مخلوط به طور خلاصه خاک نامیده می‌شود و برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. خواص فیزیکی و مکانیکی خاک تهیه شده مطابق با استاندارد ASTM تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهد که میزان تورم آزاد این خاک ۲۱/۱٪ می‌باشد و از طرفی آزمایش تراکم استاندارد ۲۲٪ رطوبت بهینه و (۱۶ kN/m³) وزن واحد حجم خشک بیشینه را برای آن نشان داد. هم چنین با استفاده از حدود آتربرگ و درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ خاک مذکور مطابق با سامانه طبقه‌بندی متحد (Unified Soil Classification System) رس با خواص پلاستیسیته بالا (CH) طبقه‌بندی می‌گردد. ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی این خاک به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
۲/۷۵	ASTM-D-854	وزن مخصوص دانه های جامد (G _s)
۹۷/۷	ASTM-D-422	درصد عبوری از الک ۲۰۰ (٪)
۷۸/۱	ASTM-D-4318	حد روانی (LL) (٪)
۲۶	ASTM-D-4318	حد خمیری (PL) (٪)
۵۲	ASTM-D-4318	نشانه خمیری (PI) (٪)
۱۳	ASTM-D-427	حد انقباض (SL) (٪)
CH	ASTM-D-2487	طبقه بندی متحد (USCS)
۲۱/۱	ASTM-D-4546	درصد تورم آزاد (FS) (٪)
۲۲	ASTM-D-698	درصد رطوبت بهینه (W _{opt}) (٪)
۱۶	ASTM-D-698	وزن واحد حجم خشک بیشینه (γ _{dmax}) (kN/m ³)

جدول ۲- ویژگی شیمیایی خاک مورد استفاده

مقدار	واحد اندازه گیری	مشخصه
۸/۴	-	pH
۱۳/۹	(ds/m)	EC
۱۴۲	(meq/Lit)	Na ⁺
۰/۳۴	(meq/Lit)	K ⁺
۲۱	(meq/Lit)	Ca ⁺⁺
۶	(meq/Lit)	Mg ⁺⁺
۴۹	(meq/Lit)	Cl ⁻
۰	(meq/Lit)	CO ₃ ²⁻
۲/۶	(meq/Lit)	HCO ₃ ²⁻
۱۱۲	(meq/Lit)	SO ₄ ²⁻
۳۸/۶۵	-	SAR

آب مقطر

برای ساختن نمونه‌ها و مستغرق کردن آن‌ها در چرخه‌های تر از آب مقطر با pH و EC به ترتیب برابر ۷/۰۴ و ۴۷/۴ (μs/cm) استفاده گردید.

با کاهش پتانسیل تورمی خاک نیست و کیفیت آب مستغرق کننده نیز از عوامل تاثیرگذار در پتانسیل تورمی می‌باشد. اثر حرارت بر تغییرات پتانسیل تورمی خاک‌های متورم شونده توسط پژوهشگرانی از جمله (Cui et al., 2002)، (Lloret et al., 2003)، (Cekerevac and Laloui, 2004)، (Cuisinier and Masrouri, 2005)، (Tang et al., 2008)، (Wang et al., 2013) مورد مطالعه قرار گرفت. آنها نتیجه گرفتند که گرما اثر قابل توجهی بر رفتار مکانیکی خاک‌ها دارد. (Volckaert et al., 1993) آزمایش‌های تورم آزاد را روی نمونه‌های یک خاک رسی تحت تاثیر سربار (۳۰ kPa) انجام دادند و نمونه‌ها را با یک نوع آبی که دارای دمای ۲۲ و ۷۷ درجه سانتی‌گراد بود مستغرق کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش دمای آب مستغرق کننده موجب کاهش تورم می‌گردد.

بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که در خصوص بررسی اثر حرارت و کیفیت آب منفذی بر خصوصیات تورمی یک خاک متورم‌شونده در چرخه‌های خشک و تر تحقیقاتی صورت نگرفته است. بنابراین در این کار تحقیقاتی پتانسیل تورمی یک خاک متورم‌شونده با کیفیت‌های مایع منفذی مختلف شامل آب مقطر، محلول سدیم کلرید (با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر) و کلسیم کلرید (با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر) تحت تاثیر شرایط دمایی متغیر و ثابت تحت اثر سرباری ثابت در چرخه‌های خشک و تر مورد بررسی قرار گرفت و میزان تغییرات پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه‌ها در شرایط دمایی متغیر و ثابت با یکدیگر مقایسه گردید. سپس این تغییرات برای نمونه‌ها با کیفیت مایع منفذی یکسان ولی در دو حالت دمای ثابت و متغیر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

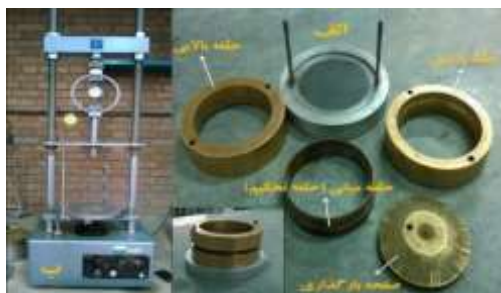
مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این تحقیق خاک، آب مقطر، محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید می‌باشد که در خصوص هر یک به طور خلاصه مطالبی ارائه می‌گردد.

خاک

خاک مورد استفاده از اطراف قزوین تهیه شده که طبق طبقه‌بندی (McKeen, 1992) نوعی رس با قابلیت تورم‌پذیری متوسط بود. لذا برای تهیه خاک متورم‌شونده اقدام به تهیه نمونه‌هایی از خاک موجود و بنتونیت با درصدهای مختلف گردید و پتانسیل تورمی آن‌ها اندازه‌گیری شد. با رسیدن به تعادل تورمی و مقایسه درصد تورمی نمونه‌های مختلف تصمیم

گرم بر لیتر سدیم کلرید و محلول ۲۵۰ گرم بر لیتر کلسیم کلرید انجام شد. بر اساس پژوهش (Lambe, 1958) ساختار خاک‌های چسبنده با خمیریایی بالا در شاخه خشک منحنی تراکم استاندارد فولکوله و در شاخه تر پراکنده می‌باشد. هم-چنین (Nelson and Miller, 1992) گزارش نمودند که رس‌های فولکوله نسبت به رس‌های پراکنده تورم‌پذیری بیشتری را دارند. بنابراین بر روی شاخه خشک منحنی تراکمی آن‌ها نقطه‌ای معادل ۵٪ کمتر از رطوبت بهینه انتخاب و با هدف قرار دادن درصد رطوبت و وزن واحد خشک آن نقطه اقدام به ساخت نمونه‌ها گردید. بنابراین برای ساختن نمونه‌های آزمایشگاهی رطوبت اولیه خاک طبیعی را با افزودن آب مقطر یا محلول نمک به رطوبتی معادل ۵٪ کمتر از رطوبت بهینه رسانده و مخلوط مذکور به منظور توزیع یکنواخت رطوبت، به مدت ۲۴ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی نگه‌داری شد. پس از آن از خاک مذکور آزمایش تعیین رطوبت گرفته شد و پس از حصول اطمینان از درست بودن میزان رطوبت خاک، اقدام به ساخت نمونه گردید. برای ساخت نمونه‌ها به روش استاتیکی از قالب مخصوص استفاده گردید. این قالب متشکل از چهار قسمت عمده می‌باشد که عبارتند از پایه آلومینیومی، بخش پایینی، بخش میانی (حلقه دستگاه تحکیم) و بخش بالایی. نمونه‌ها در این قالب در سه لایه، تحت تاثیر اعمال نیروی مشخص و سرعت بارگذاری (mm/min) ۱/۵ توسط دستگاه بارگذاری تک‌محوری متراکم گردید به طوری که وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت نمونه ساخته شده با مقادیر انتخابی بر روی شاخه خشک منحنی تراکمی مربوطه یکسان گردید. لازم به ذکر است که به منظور ایجاد پیوستگی در لایه‌ها، پس از متراکم کردن هر لایه و قبل از تراکم لایه بعدی، خراش‌هایی در سطح خاک ایجاد گردید. پس از متراکم کردن سه لایه، حلقه میانی خارج گردیده و خاک‌های اضافی از بالا و پایین نمونه حذف شدند. قالب و دستگاه بارگذاری مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲- قالب و دستگاه بارگذاری مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها

محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید

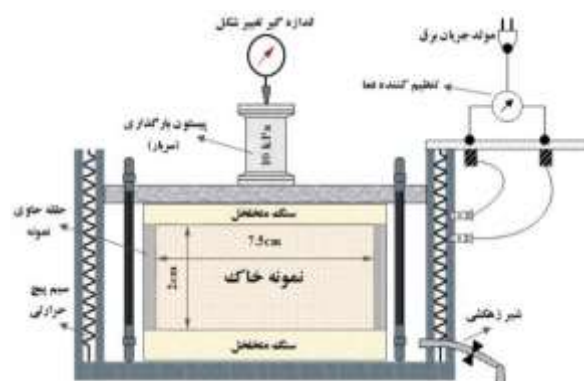
برای ساختن نمونه‌های آزمایشی که مایع منفذی آن‌ها محلول-های سدیم کلرید و کلسیم کلرید می‌باشد از حل نمودن ۲۵۰ گرم هر یک از نمک‌ها (سدیم کلرید و یا کلسیم کلرید) در یک لیتر آب مقطر استفاده گردید. مشخصات فیزیکی و شیمیایی محلول نمک‌های مورد استفاده در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی محلول نمک‌های مورد استفاده

مشخصه	واحد	سدیم کلرید (NaCl)	کلسیم کلرید (CaCl ₂)
جرم مولی (M)	(gr/mol)	۵۸/۴۴	۱۱۰/۹۹
pH		۶/۴۵	۱۰/۳۵
EC	(ds/m)	۳۹۰/۶۲۵	۳۹۰/۶۲۵
غلظت کل مواد جامد (TDS)	(gr/Lit)	۲۵۰	۲۵۰
درصد وزنی محلول	(%)	۲۲/۳	۲۲/۳۳
غلظت مولار محلول (C)	(mol/Lit)	۴/۲۸	۲/۲۵
چگالی محلول (ρ _f)	(mgr/m ³)	۱/۱۲۱	۱/۱۲

دستگاه مورد استفاده

برای انجام چرخه‌های خشک و تر متوالی از دستگاه تحکیم اصلاح‌شده که قبلاً در آزمایشگاه طراحی و ساخته شده بود استفاده شد (جزئیات کامل دستگاه مذکور توسط (Moghadas et al., 2011) بیان شده است). مقطع شماتیک این دستگاه در شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها از دو دستگاه مذکور استفاده گردید که یکی از آنها برای انجام آزمایش‌های چرخه‌ای خشک و تر در دمای ثابت در نظر گرفته شده و دیگری قادر به ایجاد دمای غیرثابت (دمای متغیر) در چرخه‌های خشک و تر به منظور انجام آزمایش‌ها آماده گردیده بود.



شکل ۱- مقطع شماتیک دستگاه تحکیم اصلاح‌شده

تهیه نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌ها ابتدا آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM-D-698 با استفاده از آب مقطر، محلول ۲۵۰

روش انجام آزمایش

آزمایش تراکم استاندارد

و مجدداً چرخه خشک آغاز می‌گردد و این روند تا جایی که میزان انقباض و تورم یکسان شدند، ادامه پیدا کرد. در حالت دوم (دما ثابت) روند فوق روی نمونه‌ها صورت پذیرفت با این تفاوت که سامانه گرمایشی در چرخه‌های تر روشن و تنظیم کننده دما بر روی دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید. در واقع در تمامی چرخه‌های خشک و تر دمای اعمال شده ثابت (۴۵ درجه) بوده و اعمال چرخه‌های خشک و تر تا جایی ادامه می‌یافت که پتانسیل تورمی و انقباضی به عدد ثابتی می‌رسیدند. تغییر شکل محوری نمونه‌های آزمایشی در دو حالت دمای ثابت و متغیر در پایان چرخه‌های خشک و تر متوالی برای نمونه‌های تهیه شده با آب مقطر، محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید.

نتایج و بحث

با توجه به اهمیت لایه پخشیدگی مضاعف در سطح رس، لازم است قبل از بیان کردن نتایج، تئوری این لایه به طور خلاصه شرح داده شود.

لایه پخشیدگی مضاعف

سطوح ذرات رس در شرایط خشک و مرطوب حامل بار منفی می‌باشند. معمولاً برای خنثی نمودن این بار منفی، کاتیون‌ها که دارای بار مثبت می‌باشند و منشا آن‌ها رسوبات نمکی است به سطح ذرات رس می‌چسبند. افزایش آب به خاک موجب می‌گردد که یون‌ها به صورت محلول در اطراف ذرات رس درآیند. معمولاً تجمع کاتیون‌ها با فاصله از سطح ذره رس کاهش می‌یابد. این لایه آب که حاوی ذرات باردار بوده و اطراف ذرات رس را احاطه کرده است تحت عنوان لایه پخشیدگی مضاعف (DDL) نامیده می‌شود. معمولاً هر ذره رس می‌تواند یک لایه پخشیدگی مضاعف داشته باشد. لایه پخشیدگی مضاعف و ذرات مجاور آن ممکن است در عمل متقابل با یکدیگر قرار داشته باشند که این عمل متقابل تحت اثر نیروهای جاذبه (Attractive van der waals forces) یا دافعه (Repulsive forces) صورت می‌پذیرد. این نیروها در تشکیل ساختار خاک نقش مهمی را ایفا می‌کنند. نیروهای جاذبه سبب ایجاد ساختمان فولکوله و نیروهای دافعه سبب تشکیل ساختمان پراکنده در خاک رس می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت کاهش یا افزایش ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف نقش مهمی در تشکیل ساختار خاک دارد به طوری که کاهش آن موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر و تشکیل ساختمان فولکوله می‌گردد. ضخامت این لایه مطابق تئوری ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف (Guoy, 1910) و (Chapman, 1913) به صورت زیر بیان می‌گردد:

در این تحقیق آزمایش تراکم استاندارد بر اساس استاندارد ASTM-D-698 بر روی خاک مورد استفاده با سه نوع مایع منفذی مقطر، محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر انجام گردید. هدف از این آزمایش تعیین میزان درصد رطوبت بهینه و میزان وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک می‌باشد.

آزمایش تورم آزاد

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM-D-4546 صورت پذیرفت. هدف از این آزمایش ارزیابی پتانسیل تورمی خاک موردنظر با کیفیت مایع منفذی مختلف می‌باشد. نمونه‌های تهیه شده با مایع منفذی مختلف را در دستگاه تحکیم قرار داده و بدون اعمال هیچ‌گونه سرباری، نمونه‌ها به حالت مستغرق درآمدند. تغییر ارتفاع نمونه‌ها توسط اندازه‌گیر (گیج) قرائت گردید و این امر تا ثابت شدن میزان تغییر شکل ادامه یافت. میزان تورم آزاد نمونه‌های خاک مورد آزمایش در زمان‌های مختلف تورم با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

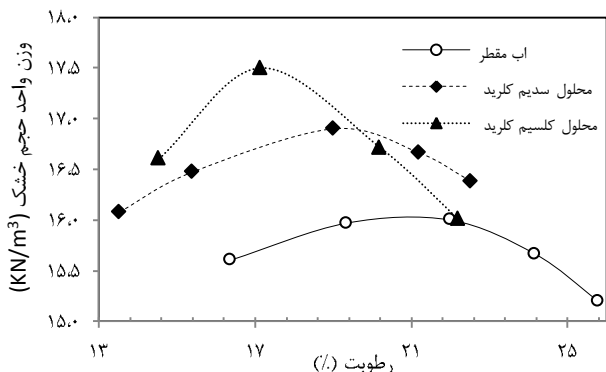
$$FS = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه FS درصد تورم آزاد (٪)، ΔH میزان تغییر شکل (mm)، H_0 ارتفاع اولیه نمونه آزمایشی (mm) می‌باشد.

اعمال چرخه‌های خشک و تر

اعمال چرخه‌های خشک و تر متوالی به نمونه خاک که شامل دو حالت می‌باشد در دستگاه تحکیم اصلاح شده صورت پذیرفت. در حالت اول (دما متغیر) نمونه‌های ساخته شده با مایع منفذی مقطر، محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید (با غلظت ۲۵۰ گرم بر لیتر) که در دو طرف آن سنگ متخلخل قرار داده شده را به دستگاه انتقال داده و با روشن کردن سامانه گرمایشی و قرار دادن تنظیم کننده دما بر روی دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد، اقدام به خشک کردن نمونه‌ها تحت تاثیر سربار ۱۰ کیلوپاسکال گردید. تغییر شکل محوری نمونه‌ها توسط اندازه‌گیر (گیج) ثبت گردید و پس از ثابت شدن تغییر شکل نمونه‌ها، چرخه تر آغاز گردید به این ترتیب که سامانه گرمایشی در حالت خاموش قرار گرفته سپس اقدام به مستغرق نمودن نمونه‌ها با آب مقطر گردید. تغییر شکل محوری نمونه‌ها در حالت چرخه تر ثبت و پس از ثابت شدن تغییر شکل نمونه‌ها و در نتیجه اتمام چرخه تر با استفاده از شیر زهکشی آب محفظه‌ای تخلیه شده و سامانه گرمایشی در حالت روشن و بر روی دمای ۴۵ درجه قرار گرفته

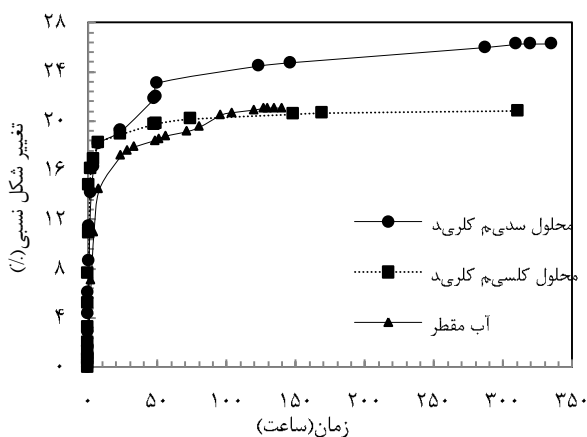
سطح رس، با نیروی بیشتری جذب آن می‌گردد. بنابراین یون کلسیم به علت ظرفیت بالاتر و شعاع هیدراته پائین تر نسبت به یون سدیم با نیروی بیشتری جذب ذره رس می‌گردد و موجب کاهش بیشتر ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف می‌شود.



شکل ۳- منحنی تراکم استاندارد به ازای استفاده از مایع منفذی مقطر، محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید

آزمایش تورم آزاد

نتایج آزمایش تورم آزاد نمونه‌های حاوی مایع منفذی مقطر، سدیم کلرید و کلسیم کلرید در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد نمونه‌های حاوی سدیم کلرید پس از حدود ۳۳۵ ساعت و کلسیم کلرید پس از حدود ۳۱۰ ساعت به تعادل می‌رسند در حالی که نمونه حاوی آب مقطر پس از حدود ۱۴۰ ساعت به تعادل می‌رسد.



شکل ۴- منحنی تورم آزاد

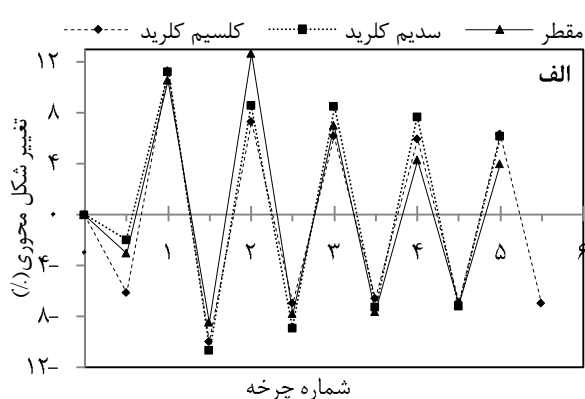
همان‌طور که در شکل مشخص است میزان تورم آزاد نمونه خاک ساخته شده با مایع منفذی مقطر، محلول سدیم-کلرید و کلسیم کلرید به ترتیب برابر ۲۱/۱٪، ۲۶/۳٪ و ۲۰/۸٪ اندازه‌گیری گردید. مشاهده می‌گردد که نمونه ساخته شده با مایع منفذی کلسیم کلرید تورم کمتری را نسبت به نمونه ساخته شده با مایع منفذی سدیم کلرید ایجاد می‌کند. هم‌چنین نتایج آزمایش تراکم نشان داد که کاهش ضخامت لایه مضاعف در

$$\frac{1}{K} = \sqrt{\frac{\epsilon k T}{8 \Pi n_0 e^2 v^2}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

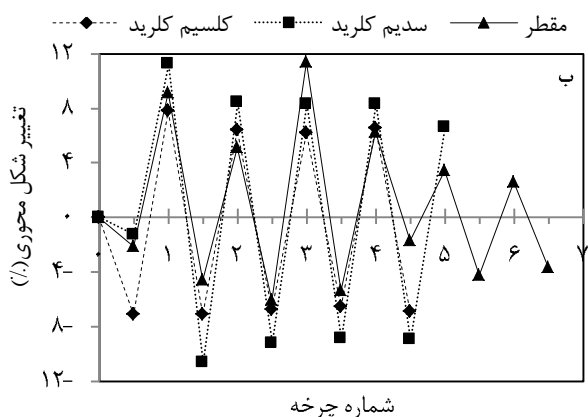
که در این رابطه $\frac{1}{K}$ ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف، ϵ ثابت دی الکتریک حلال، k ثابت بولتزمن، T دمای مطلق (K)، n_0 غلظت یونی (ion/cm^3)، e بار الکتریکی یک الکترون (esu)، v ظرفیت (بار) یون می‌باشد.

آزمایش تراکم استاندارد

نتایج مربوط به آزمایشات تراکم در شکل (۳) آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نمونه آب مقطر دارای رطوبت بهینه ۲۲٪ و وزن واحد حجم خشک $16 \text{ (KN/m}^3\text{)}$ می‌باشد در صورتی که نمونه‌های حاوی سدیم کلرید دارای رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک ۱۹٪ و $16/9 \text{ (KN/m}^3\text{)}$ و کلسیم کلرید ۱۷/۵٪ و $17/1 \text{ (KN/m}^3\text{)}$ می‌باشد. مقایسه این اعداد نشان می‌دهد که وجود محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید موجب افزایش وزن واحد حجم خشک و کاهش رطوبت بهینه نسبت به آب مقطر می‌گردد و این نشانگر آنست که خاک در اثر اضافه شدن این محلول‌ها به سمت فولکوله شدن حرکت می‌کند و طی مرحله فولکوله شدن، ذرات به یکدیگر می‌چسبند و تشکیل ساختار درشت‌دانه را می‌دهند. در واقع می‌توان گفت افزودن سدیم کلرید و کلسیم کلرید موجب کاهش ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف می‌شود و خاک به سمت فولکوله شدن (که شامل چسبیدن ذرات به یکدیگر می‌باشد) حرکت می‌کند در نتیجه سطح ویژه و جذب آب آن‌ها کاهش می‌یابد که این موضوع سبب کاهش رطوبت بهینه و افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه می‌شود. از طرفی با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت که کاهش ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف در نمونه ساخته شده با محلول کلسیم کلرید بیشتر از سدیم کلرید است. پژوهشگرانی از جمله (Buckman and Brady, 1975, and Chen and Brain, 1975, Shainberg, and Letey, 1984) و (Hanson et al., 1999) دلیل کاهش بیشتر ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف در حضور محلول کلسیم کلرید نسبت به سدیم کلرید به عنوان مایع منفذی را مربوط به اختلاف یون‌های سدیم و کلسیم از نظر ظرفیت و شعاع هیدراته آنها دانستند. به طوری که ذرات رس تمایل بیشتری به جذب یون کلسیم نسبت به یون سدیم را دارند. کاتیون با ظرفیت بالاتر با نیروی بیشتری نسبت به کاتیونی که دارای ظرفیت پائین تری است، جذب ذره رس می‌گردد و در شرایطی که دو کاتیون دارای ظرفیت یکسانی باشند، کاتیونی که دارای شعاع هیدراته کمتری است به علت نزدیکی بیشتر به



شکل ۵ الف- درصد تغییر شکل محوری نمونه‌های آزمایشی در دمای ثابت



شکل ۵ ب- درصد تغییر شکل محوری نمونه‌های آزمایشی در دمای متغیر

شکل (۵ الف) میزان تغییر شکل محوری نمونه‌های حاوی مایع منفذی مختلف را در دمای ثابت (۴۵ درجه) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در دمای ثابت تعادل پتانسیل تورمی و انقباضی بعد از سپری شدن تقریباً ۵ چرخه به تعادل می‌رسد. معمولاً آزمایش‌های مذکور برای هر نمونه با کیفیت مایع منفذی مورد نظر جهت رسیدن به تعادل، به مدت زمانی تقریباً معادل ۷۵ روز احتیاج داشت. همان‌طور که در شکل (۵ الف) مشاهده می‌گردد در چرخه اول پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه‌های حاوی مایع منفذی مقطر به ترتیب برابر ۳٪ و ۱۳/۵۳٪، سدیم کلرید ۱/۹۵٪ و ۱۳/۲٪ و کلسیم کلرید ۶/۱۵٪ و ۱۷/۴۵٪ می‌باشد. در چرخه دوم میزان پتانسیل انقباضی تمامی نمونه‌ها نسبت به چرخه اول افزایش یافته است و میزان آن در چرخه دوم برای نمونه ساخته شده با آب مقطر ۶/۳۳ برابر، سدیم کلرید ۱۱/۲۳ برابر و کلسیم کلرید ۳/۴۵ برابر چرخه اول می‌باشد. میزان پتانسیل تورمی نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر و سدیم کلرید نسبت به چرخه اول افزایش یافته و مقدار آن برای نمونه حاوی مایع منفذی مقطر ۱/۵۶ برابر و سدیم-کلرید ۱/۴۶ برابر چرخه اول می‌باشد در صورتی که میزان

نمونه ساخته شده با محلول کلسیم کلرید بیشتر از نمونه‌های حاوی مایع منفذی مقطر و سدیم کلرید می‌باشد به عبارت دیگر میزان فولکوله شدن ساختمان این نمونه بیشتر از دو نمونه دیگر می‌باشد. در واقع می‌توان گفت که به علت تبادل یونی بین کاتیون Ca^{2+} و ذره رس، خمیریایی خاک کاهش می‌یابد و کاهش خمیریایی خاک موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر و ایجاد ساختار دانه‌ای می‌شود و در نتیجه سطح ویژه و ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف ذرات کاهش می‌یابد و موجب کاهش تورم نسبت به نمونه ساخته شده با محلول سدیم کلرید می‌گردد.

به طور کلی مکانیزم تورم نمونه خاک را می‌توان چنین توصیف نمود که نمونه خاک در شرایط غیر اشباع دارای دو نوع مکش شامل مکش ماتریک و مکش اسمزی می‌باشد. مکش ماتریک عبارتست از اختلاف فشار هوا (U_a) و فشار مایع منفذی (U_w) و با صرف نظر کردن از عامل فشار هوا، مکش ماتریک را می‌توان قرینه فشار مایع منفذی ($-U_w$) تعریف نمود. مکش اسمزی ناشی از املاح موجود در مایع منفذی می‌باشد و مقدار آن بستگی به نوع و مقدار املاح موجود در نمونه دارد. با مستغرق کردن نمونه خاک غیر اشباع، مکش ماتریک در اثر افزایش رطوبت نمونه کاهش یافته و در زمان اشباع کامل صفر می‌گردد و مکش اسمزی باقی می‌ماند و موجب ادامه عمل جذب آب توسط خاک می‌شود. طبق رابطه (۳) و با توجه به ثابت بودن سربار و افزایش فشار مایع منفذی (به دلیل پیدایش مکش اسمزی)، تنش موثر کاهش می‌یابد. با کاهش تنش موثر اتصال بین ذرات ضعیف‌تر شده و تورم راحت‌تر صورت می‌گیرد (Barbour and Fredlund, 1989). از آنجایی که نمونه ساخته شده با مایع منفذی سدیم کلرید تورم بیشتری را نسبت به کلسیم کلرید ایجاد می‌کند می‌توان نتیجه گرفت که مکش اسمزی نمونه ساخته شده با سدیم کلرید بیشتر از کلسیم کلرید می‌باشد.

$$\sigma' = \sigma - U_w \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در رابطه بالا σ' تنش موثر، U_w فشار مایع منفذی و σ سربار اعمال شده به نمونه خاک که برای تمام نمونه‌ها ثابت و برابر ۱۰ کیلوپاسکال می‌باشد.

چرخه‌های خشک و تر

نتایج مربوط به درصد تغییر شکل محوری نمونه‌های حاوی مایع منفذی مقطر، سدیم کلرید و کلسیم کلرید در دو حالت دمای ثابت و متغیر در شکل‌های (۵ الف) و (۵ ب) نشان داده شده است.

ترتیب ۰/۸۶ برابر و ۰/۹۱ برابر چرخه اول می‌باشد در صورتی‌که میزان پتانسیل تورمی نمونه ساخته شده با سدیم کلرید نسبت به چرخه اول افزایش یافته و مقدار آن ۱/۵۳ برابر چرخه اول می‌باشد. در چرخه آخر میزان پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه حاوی مایع منفذی مقطر به ترتیب به مقادیر ۶/۲۵٪ و ۶/۸٪، سدیم کلرید ۱۷/۲۸٪ و ۱۵/۵۹٪ و کلسیم کلرید ۱۳/۴۵٪ و ۱۳/۱٪ می‌رسد. در این حالت نیز مشابه حالت دمای ثابت، تعادل پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه حاوی مایع منفذی سدیم کلرید بیشتر از نمونه‌های حاوی مایع منفذی کلسیم کلرید و آب مقطر می‌باشد و نیز اعمال چرخه‌های خشک و تر سبب کاهش پتانسیل تورمی گردیده است. هم‌چنین مشاهده می‌گردد که بیشینه درصد تورم برای نمونه‌های ساخته شده با مایع منفذی مقطر در چرخه سوم، سدیم کلرید در چرخه دوم و کلسیم کلرید در چرخه اول اتفاق افتاده است و مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۱۷/۵٪، ۱۹/۰۸٪ و ۱۴/۹٪ می‌باشد. در واقع آغاز کاهش پتانسیل تورمی برای نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر از چرخه چهارم، سدیم کلرید از چرخه سوم و کلسیم کلرید از چرخه دوم به بعد می‌باشد. با اعمال چرخه‌های خشک و تر متوالی بر روی نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر، سدیم کلرید و کلسیم کلرید، میزان کاهش پتانسیل تورمی خاک در آخرین چرخه تر نسبت به چرخه‌ای که بیشینه درصد تورم در آن اتفاق افتاده است معادل ۱۰/۷٪، ۳/۴۹٪ و ۱/۸٪ می‌باشد. در این حالت نیز مشابه حالت دمای ثابت اعمال چرخه‌های خشک و تر متوالی سبب کاهش بیشتر پتانسیل تورمی در نمونه حاوی مایع منفذی مقطر نسبت به نمونه‌های ساخته شده با مایع منفذی سدیم کلرید و کلسیم کلرید می‌شود. هم‌چنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که در حالت تعادل پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه حاوی مایع منفذی سدیم کلرید بیشتر از نمونه‌های حاوی مایع منفذی کلسیم کلرید و آب مقطر می‌باشد که علت آن پراکنده شدن ذرات و بیشتر بودن نیروهای دافعه در این نمونه می‌باشد.

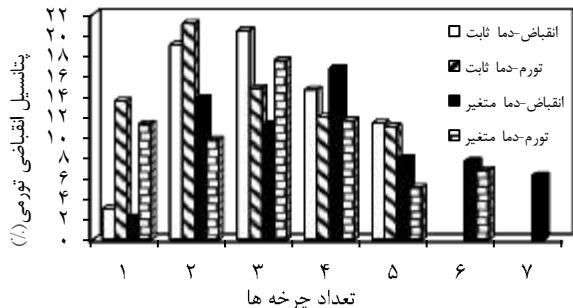
میزان تغییر شکل محوری نمونه‌های حاوی مایع منفذی مختلف در چرخه‌های خشک و تر متوالی در دمای متغیر در شکل (۵ ب) نشان داده شده است. در این حالت نمونه با مایع منفذی مقطر پس از ۶ چرخه و نمونه‌های حاوی مایع منفذی سدیم کلرید و کلسیم کلرید پس از ۵ چرخه به تعادل می‌رسند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در چرخه اول میزان پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه ساخته شده با مایع منفذی مقطر به ترتیب برابر ۲/۱۵٪ و ۱۱/۳٪، سدیم کلرید ۱/۲۸٪ و ۱۲/۵۱٪ و کلسیم کلرید ۷/۱٪ و ۱۴/۹٪ می‌باشد. با اعمال کردن چرخه‌های خشک و تر دوم، پتانسیل انقباضی تمامی نمونه‌ها نسبت به چرخه اول افزایش می‌یابد و میزان افزایش آن برای نمونه ساخته شده با آب مقطر ۶/۴ برابر، سدیم کلرید ۱۷/۱۱ برابر و کلسیم کلرید ۲/۱۱ برابر نسبت به چرخه اول می‌باشد. میزان پتانسیل تورمی نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر و کلسیم کلرید نسبت به چرخه اول کاهش یافته و مقادیر آنها به

با بررسی شکل‌های (۵ الف) و (۵ ب) می‌توان نتیجه گرفت که تکرار و اعمال چرخه‌های خشک و تر متوالی، موجب کاهش پتانسیل تورمی و رسیدن خاک به حالت ثابتی از نظر قرارگیری ذرات در کنار هم می‌شود. (Bolt, 1956) علت تغییر حجم در خاک‌ها را عمل متقابل کاتیون، آب و ذرات خاک و تغییر ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف بیان نمود. در نتیجه مکانیزم پیدایش تورم در خاک را می‌توان توسط این لایه توجیه کرد، به طوری که گسترش این لایه موجب افزایش تورم و کاهش ضخامت آن به کاهش تورم می‌انجامد. کاهش پتانسیل تورمی طی چرخه‌های خشک و تر را می‌توان ناشی کاهش ضخامت لایه مضاعف دانست که با کاهش این لایه، ذرات خاک به یکدیگر می‌چسبند و سبب ایجاد ساختمان فولکوله می‌شود و در نتیجه سطح ویژه آن‌ها کاهش می‌یابد که کاهش سطح ویژه، کاهش قابلیت جذب آب و کاهش میزان تورم را در پی دارد.

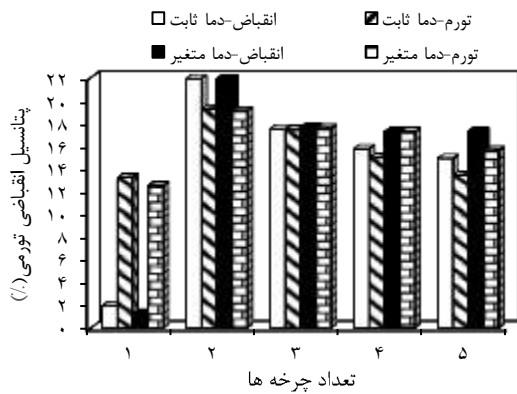
پتانسیل تورمی نمونه حاوی مایع منفذی کلسیم کلرید نسبت به چرخه اول کاهش یافته و مقدار آن ۰/۹۹ برابر چرخه اول می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌گردد که بیشینه مقدار تورم برای نمونه‌های ساخته شده با مایع منفذی مقطر و سدیم کلرید در چرخه دوم اتفاق افتاده و مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۲۱/۱٪، ۱۹/۲۵٪ می‌باشد و برای نمونه کلسیم کلرید در چرخه اول (۱۷/۴۵٪) اتفاق افتاده است. در واقع کاهش پتانسیل تورمی برای نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر و سدیم کلرید از چرخه سوم به بعد آغاز می‌گردد و این کاهش برای نمونه ساخته شده با کلسیم کلرید از چرخه دوم به بعد می‌باشد. در چرخه آخر میزان پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه حاوی مایع منفذی مقطر به ترتیب به مقادیر ۱۱/۳۷٪ و ۱۱٪، سدیم کلرید ۱۴/۹٪ و ۱۳/۴٪ و کلسیم کلرید ۱۳/۲۵٪ و ۱۳/۲٪ می‌رسد. با اعمال چرخه‌های خشک و تر متوالی بر روی نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر، سدیم کلرید و کلسیم کلرید پتانسیل تورمی خاک در چرخه تر آخر نسبت به چرخه‌ای که بیشینه درصد تورم در آن اتفاق افتاده است، سبب کاهش معادل ۱۰/۱٪، ۵/۸۵٪ و ۴/۲۵٪ شده است. پس می‌توان گفت اعمال چرخه‌های خشک و تر متوالی سبب کاهش بیشتر پتانسیل تورمی در نمونه حاوی مایع منفذی مقطر نسبت به نمونه‌های ساخته شده با مایع منفذی سدیم کلرید و کلسیم کلرید می‌شود. هم‌چنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که در حالت تعادل پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه حاوی مایع منفذی سدیم کلرید بیشتر از نمونه‌های حاوی مایع منفذی کلسیم کلرید و آب مقطر می‌باشد که علت آن پراکنده شدن ذرات و بیشتر بودن نیروهای دافعه در این نمونه می‌باشد.

میزان تغییر شکل محوری نمونه‌های حاوی مایع منفذی مختلف در چرخه‌های خشک و تر متوالی در دمای متغیر در شکل (۵ ب) نشان داده شده است. در این حالت نمونه با مایع منفذی مقطر پس از ۶ چرخه و نمونه‌های حاوی مایع منفذی سدیم کلرید و کلسیم کلرید پس از ۵ چرخه به تعادل می‌رسند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در چرخه اول میزان پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه ساخته شده با مایع منفذی مقطر به ترتیب برابر ۲/۱۵٪ و ۱۱/۳٪، سدیم کلرید ۱/۲۸٪ و ۱۲/۵۱٪ و کلسیم کلرید ۷/۱٪ و ۱۴/۹٪ می‌باشد. با اعمال کردن چرخه‌های خشک و تر دوم، پتانسیل انقباضی تمامی نمونه‌ها نسبت به چرخه اول افزایش می‌یابد و میزان افزایش آن برای نمونه ساخته شده با آب مقطر ۶/۴ برابر، سدیم کلرید ۱۷/۱۱ برابر و کلسیم کلرید ۲/۱۱ برابر نسبت به چرخه اول می‌باشد. میزان پتانسیل تورمی نمونه‌های ساخته شده با آب مقطر و کلسیم کلرید نسبت به چرخه اول کاهش یافته و مقادیر آنها به

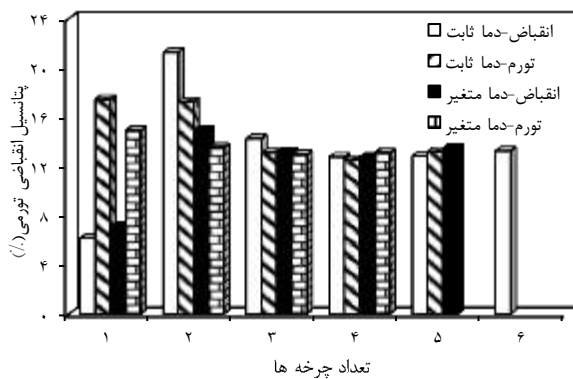
می‌باشد بنابراین در شرایط دمای ثابت افزایش دما موجب افزایش ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف و در نتیجه موجب افزایش میزان تورم می‌گردد.



شکل ۶ الف- پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه‌های حاوی مایع منفذی مقطر



شکل ۶ ب- پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه‌های حاوی محلول سدیم کلرید



شکل ۶ ج- پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه‌های حاوی محلول کلسیم کلرید

نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی اثر کیفیت مایع منفذی بر پتانسیل انقباضی و تورمی یک خاک رسی متورم‌شونده در درجه حرارت ثابت و متغیر تحت تاثیر سربار ثابت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

میزان پتانسیل انقباضی و تورمی یک خاک رسی متورم-شونده بر اثر اعمال چرخه‌های خشک و تر در دو حالت دمای ثابت و متغیر کاهش می‌یابد تا به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد.

پژوهشگرانی از جمله (Subba and Satydas, 1987)، (Al-Zhang et al., 1995)، (Tripathy et al., 2002)، (Homoud et al., 2006) کاهش پتانسیل تورمی طی چرخه‌های خشک و تر را در اثر کاهش سطح ویژه و تشکیل ساختمان درشت‌دانه‌تر گزارش نمودند. هم‌چنین می‌توان گفت که در هر دو حالت دمای ثابت و متغیر، پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه خاک تابعی از کیفیت مایع منفذی اولیه که در ساخت نمونه مورد استفاده قرار گرفته می‌باشد. این نتیجه با نتایج پژوهشگرانی از جمله (Seed and Chan, 1959)، (Barden and Sides, 1970) و (Barbour and Fredlund, 1989) مطابقت دارد. آنها چنین نتیجه گرفتند که خواص فیزیکی و شیمیایی مایع منفذی مانند pH، درجه حرارت، ثابت دی الکتریک، نوع یون‌های محلول و..... تاثیر بسزایی بر پتانسیل تغییر حجم دارد به طوری که عمل متقابل بین مایع منفذی و ذرات رس می‌تواند موجب کاهش یا افزایش ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف و در نتیجه تغییر ساختمان خاک گردد.

شکل‌های (۶ الف)، (۶ ب) و (۶ ج) مقایسه پتانسیل انقباضی و تورمی را در دو حالت دمای ثابت و متغیر برای نمونه‌های ساخته شده با مایع منفذی مقطر، محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید نشان می‌دهد. روند تغییرات برای مایع منفذی مقطر (۶ الف) به این صورت است که در تمامی چرخه‌ها (به غیر از چرخه تر سوم و چرخه خشک چهارم) میزان پتانسیل انقباضی و تورمی در دمای ثابت بیشتر از دمای متغیر می‌باشد. در چرخه سوم، عامل دما سبب چسبیدن ذرات به یکدیگر و کاهش قدرت جذب آب شده است بنابراین در چرخه تر سوم پتانسیل تورمی در حالت دمای ثابت کمتر از دمای متغیر می‌باشد هم‌چنین این عامل سبب کاهش پتانسیل انقباضی در چرخه خشک چهارم نیز شده است. شکل (۶ ب) مقایسه نتایج را برای نمونه ساخته شده با محلول سدیم کلرید نشان می‌دهد به طوری که در چرخه‌های اول و دوم میزان پتانسیل تورمی در دمای ثابت بیشتر از دمای متغیر است ولیکن در چرخه‌های بعدی جهت تغییرات به سمت دمای متغیر تغییر می‌کند و میزان آن نسبت به دمای ثابت افزایش می‌یابد. در خصوص محلول کلسیم کلرید (۶ ج) روند تغییرات مشابه محلول سدیم کلرید می‌باشد و می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های ساخته شده با دو محلول سدیم کلرید و کلسیم کلرید در چرخه‌های اولیه علت افزایش پتانسیل تورمی در دمای ثابت در مقایسه با دمای متغیر، افزایش ضخامت لایه مضاعف و در نتیجه افزایش نیروهای دافعه می‌باشد و با توجه به رابطه (۲) درجه حرارت یکی از عوامل تاثیرگذار در ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف

نمونه ساخته شده با مایع منفذی مقطر بیشتر از حالت دمای متغیر می‌باشد.

پتانسیل انقباضی و تورمی در دمای ثابت و متغیر برای نمونه‌های تهیه شده از یک نوع مایع منفذی با یکدیگر یکسان نمی‌باشد به طوری که در چرخه‌های اولیه میزان پتانسیل انقباضی و تورمی نمونه‌های ساخته شده با مایع منفذی سدیم-کلرید و کلسیم کلرید در حالت دمای ثابت بیشتر از دمای متغیر می‌باشد.

میزان پتانسیل انقباضی و تورمی در دو حالت دمای ثابت و متغیر تابعی از نوع و کیفیت مایع منفذی اولیه می‌باشد.

مقایسه نتایج نمونه‌های ساخته شده با سه نوع مایع منفذی نشان می‌دهد که نمونه حاوی مایع منفذی مقطر بیشترین کاهش را در پتانسیل تورمی نسبت به دو نمونه ساخته شده با مایع منفذی سدیم کلرید و کلسیم کلرید در هر دو حالت دمای ثابت و متغیر دارد.

در حالت دمای ثابت میزان پتانسیل انقباضی و تورمی

REFERENCES

- Ahmadi, H., Rahimi, H., and Rostami, M. E (2012). Control of swelling of soil under canal lining by wetting and drying cycles. *Irrigation and Drainage*, 61(4), 527-532.
- 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.
- Barbour, S. L., Fredlund, D. G. (1989). Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4): 551-562.
- Barden, L. and Sides, G. R. (1970). Engineering behavior and structure of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 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.
- Buckman, H.O., and Brady, N.C. (1967). The nature and properties of soils. The MacMillan Company , New York, USA.
- Cekerevac, C., Laloui, L. (2004). Experimental study of thermal effect on the mechanical behaviour of a clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28 (3), 209-228.
- Chapman, D. L. (1913). A contribution to the theory of Electro-Capillarity. *Philosophical Magazine*. 25(6), 475-481.
- Chen, Y., and Brain, A.(1975). Scanning electron microscope (SEM) observations of soil structure changes induced by sodium-calcium exchange in relation to hydraulic conductivity. *Soil Science*, 120(6), 428-436.
- Chu, T. Y. and 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. pp. 177-185.
- Cui, Y.J., Yahia-Aissa, M., Delage, P. (2002). A method for the volume change behaviour of heavily compacted swelling clays. *Engineering Geology*, 64, 233-250.
- Cuisinier, O., Masrouri, F. (2005). Hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil over a wide suction range. *Engineering Geology*, 81, 204-212
- Day, R. W. (1994). Swell-shrink behavior of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120, 618-623.
- Dif, A. F. and Blumel, W. F. (1991). Expansive soils with cyclic drying and wetting. *Geotechnical testing Journal*, 14, 96-102.
- 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.
- Estabragh, A. R., Parsaei, B., Javadi, A. A. (2015). Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil. *Soils and Foundations*, 55(2): 304-314.
- Guoy, G. (1910). Sur la constitution de la charge électrique la surface d'unelectrolyte. *Annue Phisique*, Paris, 4(9), 457-468.
- Hanson, B., Grattan, S. R. and Fulton, A.(1999). Agricultural salinity and drainage. University of California Irrigation Program, university of California, Davis, USA.
- Jones, D. E. and Holtz, W. G. (1973). Expansive soils the hidden disaster. *Civil Engineering*, 43, 87-89.
- Lambe, T. W. (1958). The structure of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85(2), 10 -34.
- Lloret, A., Villar, M.V., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X., Alonso, E.E. (2003). Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. *Geotechnique*, 53 (1), 27-40.
- Mckeen, R. G. A.(1992). Model for predicting expansive soil behavior. In: *Proceeding of the 7th Internatioanal Conference on expansive soils*, Dallas, USA, pp.1-6.
- Moghadas, M. and Estabragh, A. R. (2011). Effect of water quality on behavior of swelling and

- properties of a clay soil during wet and dry cycles. MSc dissertation, University of Tehran, Karaj. (In Farsi)
- Nelson, J. D., and Miller, D. J. (1992). Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering. John Wiley and Sons Inc., New York, USA
- 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)
- Seed, H. B. and Chan, C. K. (1959). Structure and strength characteristics of compacted clays. Institute of *Transportation and Traffic Engineering*, University of California, USA.
- Shainberg, I., and Latey, J. (1984). Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 61, 21-57.
- Subba Rao, K. S. and Satyadas, G. G. (1987). Swelling potential with cycles of swelling and partial shrinkage. In: *Proceeding of the 6th International Conference on Expansive Soils*, New Dehli, India, pp.137-142.
- Tang, A.M., Cui, Y.J., Barnel, N.(2008). Thermo-mechanical behaviour of a compacted swelling clay. *Geotechnique* 58 (1), 45-54.
- Tawfiq, S. and Nalbantoglu, Z. (2009). Swell-Shrink behavior of expansive clays. In: *Proceeding of the 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Nicosia, North Cyprus, pp.336-341.
- 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.
- 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.
- Volckaert, G., Bernier, F., Alonso, E., Gens, A., Samper, J., Villar, M., Martin, P.L., Cuevas, J., Compos, R., Thomas, H., Imbert, C. and Zingarelli, V. (1993). Model development and validation of the thermal-hydraulic-Mechanical and geomechanical behavior of the clay barrier. Annual progress report on CEC, contract, No f12W-CT90-OO33 and FI2W-CT91-O102.
- Wang, Qiong, Minh Tang, Anh, Yu-Jun, Cui, Delage, Pierre, Barnichon, JeanDominique, Ye, Wei-Min (2013). The effect of technological voids on the hydro-mechanical behavior of compacted bentonite-sand mixtures. *Soils and Foundations* 53 (2), 232-245.
- Zhang R., Yang, H. and Zheng, J. (2006). The effect of vertical pressure on the deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soil*, Arizona, USA, pp. 894-905.