

اثر شوری بر پتانسیل تورم و انقباض خاک‌های متورم شونده تحت چرخه‌های تر و خشک شدن

رضا گلی کلانپا^۱، حجت احمدی^{۲*}، اسماعیل گلی کلانپا^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۷)

چکیده

خاک‌های متورم شونده از نوع خاک‌های مشکل‌زایی هستند که با تغییر رطوبت، دچار تغییر حجم می‌شوند. این خاک‌ها معمولاً حاوی مقادیر زیادی رس بوده و مقدار تورم آن‌ها بستگی کامل به نوع کانی‌های رسی و پیوندهای مولکولی دارد. همچنین نوع مواد شیمیایی که با این نوع خاک تماس پیدا می‌کند، بر نحوه رفتار آن بسیار اثر گذار می‌باشد. در این پژوهش اثر شوری بر رفتار خاک‌های رسی تحت چرخه‌های تر و خشک بررسی شد. بدین منظور سه نمونه خاک شامل یک نمونه خاک متورم شونده از اطراف دریاچه ارومیه، در حالت بدون شوری و دو نمونه خاک با شوری ۲ و ۴ درصد وزنی، با استفاده از نمک NaCl تهیه شده و آزمایش تورم آزاد بر روی نمونه‌ها در دستگاه تحکیم و در معرض چرخه‌های تر و خشک انجام گرفت و در نهایت تأثیر شوری بر رفتار خاک بررسی گردید. همچنین در طی آزمایشها میزان نمک‌زدایی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد میزان تورم و انقباض در چرخه‌های دوم از بیشترین مقدار برخوردار بوده است. بررسی چرخه‌ها نشان داد که میزان پتانسیل تورم و انقباض پس از پایان حدود ۶ چرخه به مقدار نزدیک به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تحقیق حاضر نشان داد که با افزایش غلظت نمک، از میزان تورم نمونه‌ها کاسته شده است. با افزودن میزان اندکی نمک، پتانسیل تورمی خاک نزدیک به ۴۰ درصد کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات مهندسی خاک، تورم آزاد، شوری، تر و خشک شدن

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه (نویسنده مسئول)

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی

*پست الکترونیک: h.ahmadi@urmia.ac.ir

مقدمه

خاک‌های متورم شونده از گروه خاک‌های مسأله‌دار هستند. این نوع خاک‌ها در اثر تغییر شرایط محیطی دچار نوسانات رطوبت شده و این نوسانات موجب تغییر حجم آن‌ها می‌شود. وقتی این خاک‌ها در اثر کاهش رطوبت خشک شوند، پدیده انقباض روی می‌دهد و افزایش رطوبت بعدی موجب تورم آن‌ها می‌گردد. این دو پدیده تحت عنوان چرخه تر و خشک شهرت دارد که به دلیل اهمیت موضوع، از زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه متخصصین ژئوتکنیک بوده است. خاک‌های متورم شونده معمولاً حاوی مقادیر زیادی رس هستند و مقدار تورم آن‌ها بستگی کامل به نوع کانی‌های رسی و پیوندهای مولکولی دارد (Asgari & Fakher, 1993). تورم خاک همیشه به همراه یک فشار بالابرنده همراه بوده و می‌تواند پایداری سازه‌های بنا شده بر روی آن، خصوصاً سازه‌های سبک و خطی نظیر جاده‌ها، کانال‌ها و خطوط انتقال آب را به صورت جدی تهدید کند. احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2009) ترک‌های طولی در پوشش بتنی کانال‌ها را متأثر از رفتار تورمی خاک گزارش کرده و برای کنترل این نوع از ترک خوردگی، الگوی درزبندی خاصی را در پوشش بتنی پیشنهاد کردند. علاوه بر این، در چنین خاک‌هایی ترک‌های بزرگی در زمان کاهش رطوبت رخ می‌دهد که این موضوع باعث می‌شود که تبخیر از طریق این منافذ و ترک‌ها اتفاق بیافتد و خاک سریعتر رطوبت خود را از دست دهد (Tang et al., 2011). در زمان بارندگی و شرایط مرطوب، جریان‌های ترجیحی از طریق ترک‌ها ایجاد شده و بخش عمده آب بارش می‌تواند از طریق این ترک‌ها از این مسیرها وارد سفره‌های آب زیرزمینی گردد (Morris et al., 1992). بطور مشابه این ترک‌ها باعث افزایش تلفات آب آبیاری به صورت نفوذ عمقی می‌شود (Emdad et al., 2004). بررسی سلحشور و همکاران (Salahshour et al., 2016) در شالیزارهای شمال نشان داد که افزایش شوری می‌تواند موجب گسترش ترک‌های عمقی در خاک شود.

تحقیقات صورت گرفته بر روی رفتار تورمی خاک‌های متورم شونده تحت چرخه‌های تر و خشک بسیار گسترده بوده است. با این حال نتایج حاصله در دو گروه متناقض قابل دسته‌بندی است. دیف و بلومل (Dif & Blomel, 1991) ادعان داشتند که قرار گرفتن یک نمونه خاک در معرض چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن سبب کاهش پتانسیل

تورم آن می‌شود. رینگ (Ring, 1966) نشان داد که آزمایش‌های تورم و انقباض به تنهایی برای تعیین پتانسیل تغییر حجم کافی نیست و پیشنهاد می‌کند تورم و انقباض خاک در پایان چهار چرخه تر و خشک شدن انجام پذیرد. ویلر و همکاران (Wheeler et al., 2003)، آلونسو و همکاران (Allonso et al., 2005) و نوآموز و مسرووری (Nowamooz & Masroory, 2010) اعمال چرخه‌های تر و خشک را روی نمونه‌های خاک متورم شونده از روش تغییر مکش در دستگاه سه محوری یا تحکیم اصلاح شده انجام داده و به این نتیجه رسیدند که پتانسیل تورم در نتیجه اعمال چرخه‌های تر و خشک کاهش می‌یابد. در مقابل، اوسیپو و همکاران (Osipo et al., 1987) به این نتیجه رسیدند که چرخه‌های تر و خشک متوالی سبب افزایش قابل ملاحظه تورم شده به طوری که بین چرخه‌های سوم و بیستم پتانسیل تورم به مقدار بیشینه خود می‌رسد که حدود ۱/۳ تا ۱۰ برابر مقدار تورم اولیه آن است. دی و همکاران (Day et al., 1994) نشان داد که پتانسیل تورم در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن افزایش می‌یابد. توفیق و نباتت اوغلو (Tawfiq & Nabantoglu, 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. الحمود و همکاران (Al-homoud et al., 1995) در بررسی که بر روی رفتار خاک‌های رسی در طی چرخه‌های تر و خشک شدن داشتند، علت افزایش و یا کاهش پتانسیل تورم را مربوط به میزان کاهش رطوبت در طی آزمایشها دانستند. هر چند که ایشان خود این موضوع را در آزمایشهای خود بررسی نکرده بودند. بر اساس توصیه این محققان احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2009) این موضوع را با انتخاب سه نوع خاک مختلف مورد بررسی قرار دادند و با خشک کردن خاک تا نسبت‌های خاصی از رطوبت، رفتار تورمی را مورد ارزیابی قرار دادند. با این حال اثر میزان خشک کردن در رفتار افزایشی یا کاهش‌ی روند تورم ناچیز گزارش شد. تفاوت نتیجه پژوهش‌های انجام شده مبنی بر کاهش یا افزایش پتانسیل تورم پذیری این خاک‌ها می‌تواند ناشی از عاملی تحت عنوان کیفیت آب مطرح شود. البته برخی محققین تاثیر کیفیت املاح بر میزان تورم را مورد بررسی قرار داده اند. مالک و همکاران (Malik et al., 1992) در تحقیقات خود به بررسی اثر محلول‌های با مقادیر Na و Ca مختلف بر تورم‌پذیری، واگرایی و نفوذپذیری و منحنی

کم (ML) بود. از آنجایی که هدف تحقیق انجام آزمایش بر روی یک خاک متورم شونده بود، بدین منظور از شاخصی به نام عدد فعالیت خاک (A) که نسبت شاخص خمیری به درصد ذرات رس می‌باشد، جهت تعیین میزان پتانسیل تورم استفاده شد. این عدد برای خاک مورد استفاده، ۰/۵۳ بود که از نظر تقسیم‌بندی تورمی خاک، در شرایط با پتانسیل تورمی پایین قرار می‌گرفت. لذا از بنتونیت که خصوصیات خمیری بالایی دارد، به میزان ۳۰ درصد وزنی، به خاک مورد استفاده افزوده شد و عدد فعالیت خاک به ۰/۹۱ افزایش یافت. همچنین جهت اعمال تاثیر وجود املاح بر میزان تورم، از سدیم کلرید به عنوان یکی از فراوان‌ترین منبع املاح در طبیعت به میزان ۲ و ۴ درصد وزنی نمونه خاک به نمونه اضافه شد. جدول ۱ مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد. مقادیر ارائه شده برای جدول ۱ طبق آزمایش‌های شناسایی خاک شامل آزمایش‌های حدود آتربرگ، دانه‌بندی و تراکم استاندارد، تورم آزاد به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM D4318, ASTM D698, ASTM D422, ASTM D4546 حاصل شده است.

تهیه نمونه آزمایشی

طبق تحلیل لمب (Lamb, 1965) از منحنی تراکم خاکهای چسبنده و با خاصیت خمیری بالا، ساختار خاک در شاخه خشک آن فولکوله و در شاخه تر آن پراکنده می‌باشد. به همین دلیل به منظور انتخاب شرایط خاک در حالت فولکوله، شرایط اولیه نمونه‌ها برای انجام آزمایشات اصلی منطبق بر شاخه خشک منحنی تراکم انتخاب گردید. بنابراین برای تهیه نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D698 از منحنی تراکم خاک استفاده شد. بدین ترتیب نمونه با رطوبتی کمتر از میزان رطوبت بهینه (۴ درصد کمتر) تهیه شد. بعد از انجام آزمایش تراکم و رسیدن به رطوبتی نزدیک رطوبت بهینه، حلقه فلزی دستگاه ادمتر جهت نمونه برداری، با دقت داخل خاک کوبیده شد و نمونه تهیه گردید. قطر نمونه‌ها در آزمایش‌های انجام شده ۵۰ و ارتفاع هریک ۲۰ میلی‌متر بود.

رطوبتی خاک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تورم‌پذیری و واگرایی با افزایش SAR و کاهش غلظت محلول الکترولیت، افزایش می‌یابد. الاواجی (Alawaji, 1999) به بررسی اثر کیفیت شیمیایی محلول های حاوی غلظت های مختلف $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ و NaNO_3 بر خصوصیات تورم‌پذیری خاک پرداخت و به این نتیجه رسید که پتانسیل تورم‌پذیری، زمان تورم، فشار تورمی و تراکم‌پذیری با افزایش غلظت شیمیایی ماده مورد استفاده کاهش می‌یابد.

همچنین یکی از مهمترین تفاوت در تحقیقات محققان در ارزیابی رفتار تورمی تحت چرخه‌های تر و خشک شدن مربوط به تعداد چرخه‌های مطالعه شده می‌باشد. بطوریکه یزدان دوست و یثربی (Yazdandoost & Yasrobi, 2010) و استبرق و همکاران (Estabragh *et al.*, 2015) این پدیده را در حداکثر ۶ چرخه مورد مطالعه قرار دادند. در حالیکه الیویرا و همکاران (Olioviera *at al.*, 2005) پدیده تر و خشک شدن را تا ۱۸ چرخه مورد بررسی قرار دادند و در برخی موارد بعد از چرخه نهم تغییر رفتار تورمی کامل خاک رسی را گزارش کردند. با توجه به اینکه پدیده‌ی تورم ماهیتی فیزیکوشیمیایی دارد و تورم و انقباض دو روی یک سکه‌اند، لذا به نظر می‌رسد کیفیت آب و نوع مواد ترکیب شونده با نمونه خاک، عاملی موثر بر خصوصیات تورمی-انقباضی خاک در چرخه‌های تر و خشک باشد. با تکیه بر این فرضیه در این تحقیق رفتار تورمی خاک متورم شونده با ترکیب غلظتهای مختلف کلرید سدیم تحت چرخه‌های متعدد تر و خشک مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان نسبت به رفتار متناقض خاکهای متورم شونده تحت چرخه‌های تر و خشک قضاوت دقیق‌تری ارائه کرد. همچنین تاثیر تغییرات شوری خاک که بر اثر بارندگی یا تماس با آب شیرین ایجاد می‌شود، مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده

در این تحقیق برای انجام آزمایش‌ها، از خاک ریزدانه تهیه شده از منطقه تنورسازان ارومیه استفاده شد، که بر اساس طبقه‌بندی سیستم متحد^۱ از نوع خاک سیلتی با خمیرایی

۱- Unified Soil Classification System (USCS)

جدول ۱ - برخی از ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مورد استفاده

properties of the studied	Property	(Value)	Table 1. Physico-chemical soil
	Liquid limit (%)	43.6	
	Plasticity limit (%)	27	
	Plastic Index (%)	16.7	
	Shrinkage limit (%)	21.7	
	Specific Gravity (Gs)	2.95	
	Passed percent	96	
	Clay (%)	38	
	Optimum Moisture (%)	21	
	Maximum dry density (kN.m ⁻³)	1.53	
	pH	8.47	
	EC 0 (dS m ⁻¹)	2.26	
	EC 2 (dS m ⁻¹)	13.5	
	EC 4 (dS m ⁻¹)	23.5	

تغییر شکل خاک فقط به صورت محوری و به شکل تغییر ارتفاع قائم نمونه ظاهر شد که توسط کرنش سنج ثبت می‌گردید، این تغییر شکل تا زمان رسیدن به حداکثر تورم ثبت شده که پایان آن با توجه به استاندارد این آزمایش، حدود ۲۴ ساعت، ادامه داشت.

در آزمایش تورم آزاد، نمونه داخل دستگاه تحکیم آزادانه آب اطراف را جذب کرده و متورم می‌شود. در این حالت درصد تورم برابر با تفاضل حجم نمونه پس از تورم و حجم اولیه به صورت درصدی از حجم اولیه خواهد بود. ولی از آنجایی که حلقه حاوی نمونه صلب بوده و تغییر در قطر نمونه امکان‌پذیر نیست، به صورت تغییرات ارتفاع نمونه به ارتفاع اولیه نمونه به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$S_f = \frac{\Delta H}{H_0} * 100 \quad (1)$$

S_f میزان درصد تورم نمونه، ΔH میزان افزایش ارتفاع و H_0 ارتفاع اولیه نمونه می‌باشد. مقدار H_0 در این آزمایش حدود ۲۰ میلی‌متر بود.

اعمال چرخه‌های تر و خشک

اعمال چرخه‌های تر و خشک متوالی به نمونه‌های خاک در دستگاه تحکیم بدین طریق صورت گرفت که ابتدا محفظه دستگاه تحکیم شسته شده و با آب مقطر تمیز گردیده، پس

روش انجام آزمایش تورم آزاد

پس از تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، نمونه‌ها برای انجام آزمایشات اصلی به دستگاه تحکیم^۱ منتقل گردیدند. برای این کار طبق استاندارد ASTM D4546، ابتدا محفظه دستگاه شسته شده و با آب مقطر تمیز گردید تا عاری از هرگونه املاح باشد. سپس سنگ متخلخل پایینی که جهت اشباع شدن در آب مقطر قرار داده شده بود، درون محفظه دستگاه تحکیم قرار گرفت. پس از آن حلقه حاوی نمونه روی آن قرار داده شد، سپس درپوش بیرونی روی نمونه خاک قرار گرفت که توسط پیچ‌های مخصوص حلقه حاوی نمونه را در جای خود تثبیت می‌کرد. سپس سنگ متخلخل بالایی اشباع شده روی نمونه خاک قرار گرفت. پس قرار دادن صفحه فولادی توزیع کننده فشار بر روی سنگ متخلخل، کرنش سنج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر روی آن قرار گرفت و عدد آن روی صفر تنظیم شد (شکل ۱). سپس از آب شرب با میزان EC حدود ۰/۷ دسی زیمنس بر متر جهت غوطه‌ورسازی نمونه و اشباع شدن آن استفاده گردید. بنابراین نمونه در معرض رطوبت قرار گرفت و قدرت جذب آب و تورم را داشت. در نتیجه دچار افزایش حجم گردید و از آنجایی که حلقه حاوی نمونه صلب بوده و از خاک پر بود،

۱- Odometer

اعمال چرخه تر به پایان رسیده و چرخه خشک آغاز گردید. به این شکل که انبساط سنج از روی مجموعه نمونه برداشته شده و آب محفظه تحکیم، تخلیه گردید. پس از تخلیه، نمونه از داخل ملحقات دستگاه خارج شده و در آن در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. این دما در طول آزمایش ثابت بود. همزمان با خشک شدن نمونه، انقباض نمونه به وقوع پیوسته که سبب کاهش ابعاد نمونه می‌گردد. این روند تا مدت زمان ۲۴ ساعت ادامه یافته و میزان کاهش ارتفاع نمونه یادداشت می‌شد.



(ب) بارگذاری نمونه در داخل محفظه

دستگاه تحکیم

b) Loading of specimen in odometer chamber



(الف) محفظه دستگاه تحکیم

a) Odometer chamber

شکل ۱- محفظه تحکیم و روش بارگذاری نمونه در دستگاه تحکیم

Figure 1. Odometer chamber and loading method of specimen

نتایج و بحث

اثر دانسیته خاک بر تورم خاک

شکل ۲، تغییرات میزان تورم خاک را در مقادیر مختلف دانسیته خشک برای نمونه‌های بررسی شده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل دانسیته خشک نمونه‌ها و میزان تراکم رابطه مستقیم با مقدار تورم آزاد اندازه‌گیری شده داشت. این بیانگر این واقعیت است که هرچه دانسیته نمونه بیشتر باشد، میزان تورم آن نیز بیشتر خواهد شد. در واقع دانسیته بیشتر در اثر تراکم بیشتر ایجاد شده و نشانگر تعداد بیشتر ذرات متورم شونده در حجم مشخص می‌باشد. در این وضعیت میزان جذب آب بیشتر و پتانسیل تورم نیز افزایش می‌یابد (Rosenbalm & Zapata, 2016). هر چند، شاید این پدیده بدیهی به نظر برسد، ولی بررسی اولیه از این رفتار نشان می‌دهد که در مقیاس نیمه لگاریتمی، رابطه بین

پس از هر چرخه، مجدداً آب درون محفظه دستگاه ریخته شده و چرخه دوم تر آغاز گردید. اعمال چرخه‌های تر و خشک به نمونه‌ها به همین روند ادامه پیدا کرد تا جایی که تغییر شکل‌های ناشی از تر و خشک شدن در دو چرخه پایانی تقریباً باهم برابر می‌شدند، این چرخه تحت عنوان چرخه تعادلی تورمی-انقباضی مطرح می‌باشد.

اندازه‌گیری تغییرات شوری

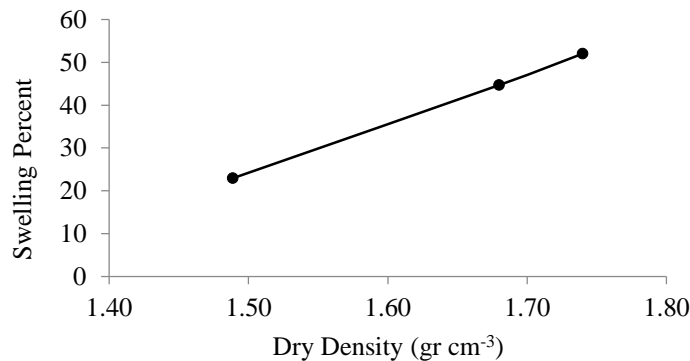
در این تحقیق جهت تعیین چگونگی تغییرات شوری خاک بر اثر انحلال نمک‌های خاک در آب محفظه تحکیم، میزان شوری آب محفظه تحکیم قبل از آغاز چرخه تر و نیز بعد از پایان هر چرخه مورد سنجش قرار گرفت. هدف از انجام این بخش از تحقیق بررسی تغییرات شوری نمونه‌ها طی پدیده تر و خشک شدن بود تا تاثیر این تغییرات بر رفتار حجمی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار بگیرد.

شکل ۳ متوسط درصد تورم آزاد برای سه نمونه خاک با میزان شوری‌های متفاوت را نشان می‌دهد. طبق داده‌های این شکل، مشاهده می‌شود که میزان درصد تورم در چرخه دوم برای سه نمونه خاک با میزان شوری صفر، دو و چهار درصد به ترتیب برابر ۹/۳۵، ۱۰/۶ و ۹/۸۸ درصد می‌باشد درحالی‌که این میزان برای چرخه اول به ترتیب برابر ۴/۷۲، ۸/۰۳ و ۴/۴۸ می‌باشد.

میزان تورم و دانسیته خشک کاملاً خطی می‌باشد. البته برای اثبات کامل این موضوع، نیاز به بررسی‌ها و داده‌های بیشتری است.

تأثیر چرخه‌ها بر تورم و انقباض

در این بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف از نمک اضافه شده به نمونه خاک متورم شونده مورد بررسی قرار گرفته که



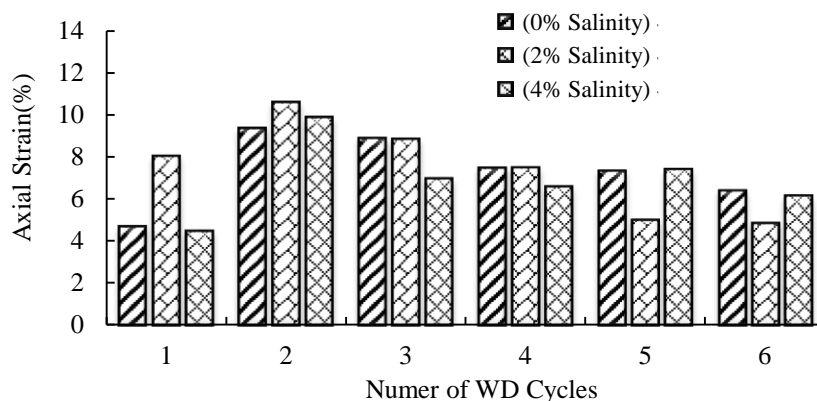
شکل ۲- تغییرات میزان تورم نسبت به تغییرات دانسیته خشک نمونه‌های خاک با ۲ درصد شوری
Figure 2. Variation of swelling versus soil dry density for 2% salinity soil samples

می‌چسبند و ذرات درشت‌تری را تشکیل می‌دهند. به طوری که ساختمان خاک مانند شرایط شروع آزمایش‌ها نمی‌باشد. صفا دوست (Safadoust, 2016) با انجام آزمایش‌های مختلف سیکلهای تر و خشک شدن و مطالعه ساختمان خاک در طی این فرآیند، چسبیدن ذرات به هم در اثر تر و خشک شدن را گزارش کرده است. بدین ترتیب با چسبیدن ذرات ریز به هم، ذرات درشت‌تر به وجود آمده که دارای سطح ویژه کمتری نسبت به ذرات ریز اولیه خاک است. لذا قدرت جذب آب و فرم‌پذیری آنها کاهش یافته و در نتیجه سبب کاهش پتانسیل تورمی خاک می‌شود. همچنین پس از هر چرخه، تغییر شکل غیرقابل برگشت بوجود می‌آید که این عامل باعث می‌شود درصد تورم‌پذیری با افزایش چرخه‌ها کاهش یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که میزان درصد تورم در هر کدام از نمونه‌ها به صورت جداگانه با افزایش چرخه‌ها تقریباً به یک مقدار نسبتاً ثابتی کاهش می‌یابند. در حقیقت می‌توان گفت نمونه خاک بعد از طی حدود شش چرخه، به یک مقدار ثابتی همگرا شده و از این چرخه به بعد میزان درصد تورم قابل پیش‌بینی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اعمال چرخه‌های تر و خشک

ملاحظه می‌گردد که میزان درصد تورم هر کدام از نمونه‌ها با شوری متفاوت، در چرخه دوم بیشتر از مقدار آن در چرخه اول است. رفتار مشابه در آزمایش‌های احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2009) گزارش شده است. این بدان جهت است که میزان رطوبت اولیه در ابتدای چرخه دوم (بدلیل خشک شدن در پایان چرخه اول)، کمتر از مقدار آن در ابتدای چرخه اول بوده است. به عبارتی میزان رطوبت در ابتدای دوره تر شدن در میزان تورم نقش دارد. بدیهی است که نمونه مرطوب نسبت به نمونه خشک تمایل کمتری برای جذب آب دارد. لذا میزان تورم در چرخه دوم بیشتر از مقدار تورم اولیه می‌باشد. به این ترتیب برای تحلیل بهتر است مقایسه داده‌های حاصله پس از چرخه دوم انجام بگیرد. زیرا پس از سیکل دوم، نمونه‌ها از نظر رطوبتی در شرایط یکسان قرار می‌گیرند. زیرا همه نمونه‌ها در شرایط یکسانی خشک شدند. بنابراین از این نظر تفاوتی با یکدیگر نداشتند. با توجه به شکل ۳ با افزایش چرخه‌ها تا چرخه ششم (چرخه تعادلی)، پتانسیل تورمی کاهش پیدا کرده است. این تغییر را می‌توان به این شکل بیان نمود که در چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن ذرات رس به هم

مطالعات مشاهده شده است (Rosenblam & Zapata, 2016; Kalkan 2011).

تا حدود شش چرخه باعث کاهش پتانسیل تورمی خاک می‌گردد و از این به بعد اعمال چرخه‌های اضافی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان تورم نخواهد داشت. رفتار مشابه پس از طی چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن در بسیاری از



شکل ۳- تورم آزاد برای سه نمونه خاک با شوری متفاوت

Figure 3. Free swelling for 3 investigated soils with different salinity

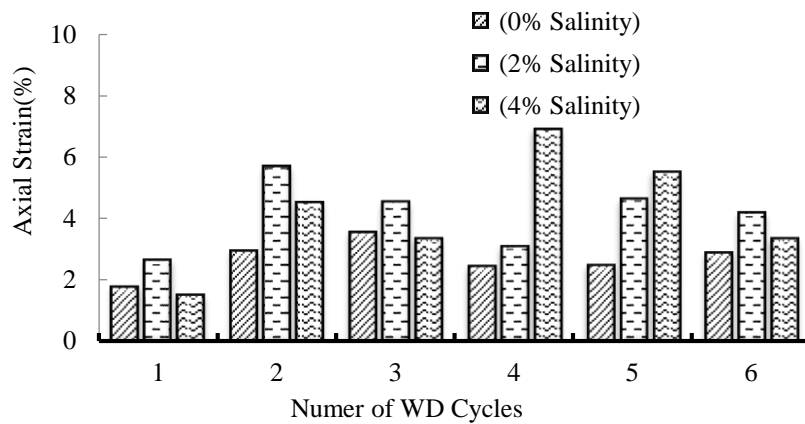
همکاران (Moghadas *et al.*, 2012) مطابقت کامل دارد. شکل ۵ تغییرات میزان شوری آب محفظه تحکیم در انتهای مرحله تر در هر سیکل را نشان می‌دهد. بطوریکه با افزایش تعداد چرخه‌ها و گسترش ترکها، میزان مهاجرت یونها هم بیشتر شده و به دلیل کاهش میزان شوری خاکها، میزان انقباض با وجود افزایش چرخه‌ها بیشتر شده است.

شکل ۶ تصویر نمونه‌های بررسی شده پس از طی هر چرخه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل به دلیل گسترش شدید ترکها در چرخه چهارم، سطح تماس خاک با آب محفظه بیشتر شده و مسیر خروج یونها از خاک به شدت کوتاه تر شده و در طی این چرخه‌ها از میزان نمکهای خاک به مقدار قابل توجهی کاسته شده است. از آنجاییکه پس از هر چرخه آب محفظه با آب شیرین تعویض شده است، لذا پس از طی چندین چرخه میزان نمک موجود در خاک هم کمتر شده و در نهایت شرایط متعادلی ایجاد شده است. تصاویر منتشر شده از طرف احمدی و همکاران (Ahmadi *et al.*, 2009) از نمونه‌های بررسی شده کاملاً با تصاویر ارایه شده در اینجا مطابقت دارد. طبق شکل ۵، در تکرار اول نمونه با شوری ۴ درصد، میزان شوری آب محفظه تحکیم در آغاز آزمایش و در انتهای چرخه اول برابر با ۵۱۹ میکرو زیمنس بر متر و در انتهای چرخه سوم به مقدار ۸۲۰ میکرو

شکل ۴ متوسط درصد انقباض برای سه نمونه خاک با شوری‌های متفاوت را نشان می‌دهد. طبق داده‌های این نمودار، مشاهده می‌شود که میزان درصد انقباض چرخه دوم برای سه نمونه خاک با میزان شوری صفر، دو و چهار درصد به ترتیب برابر ۳، ۵/۷ و ۴/۵ درصد می‌باشد. درحالیکه این میزان برای چرخه اول به ترتیب برابر ۱/۸، ۲/۶ و ۱/۵ درصد می‌باشد. می‌توان دریافت که این روند نیز تقریباً مشابه روند درصد تورم آزاد می‌باشد. در حقیقت میزان درصد انقباض چرخه دوم در تمام نمونه‌ها، بیشتر از مقدار آن در چرخه اول است. همچنین مقدار درصد انقباض چرخه دوم برای تمام نمونه‌ها بجز نمونه با شوری ۴ درصد، بیشتر از سایر چرخه‌ها نیز می‌باشد. البته داده‌ها در چرخه‌های دیگر با هم تفاوت اندکی داشته و در نگاه اول اینطور به نظر می‌رسد که از روند مشخصی پیروی نمی‌کنند. علت عدم پیروی از یک روند مشخص می‌تواند به دلیل تغییرات شوری بر اثر تماس با آب شیرین در طی چرخه‌های تر و خشک است. از آنجاییکه با پیشرفت روند آزمایش و تعداد چرخه‌ها، اشباع شدن نمونه‌ها در شروع هر مرحله با آب شیرین اتفاق می‌افتاد لذا یونهای سدیم تحت پدیده پخشیدگی به خارج از خاک مهاجرت می‌کنند. در نتیجه از غلظت نمک در داخل خاک کاسته می‌شود. این نتیجه با نتایج مقدس و

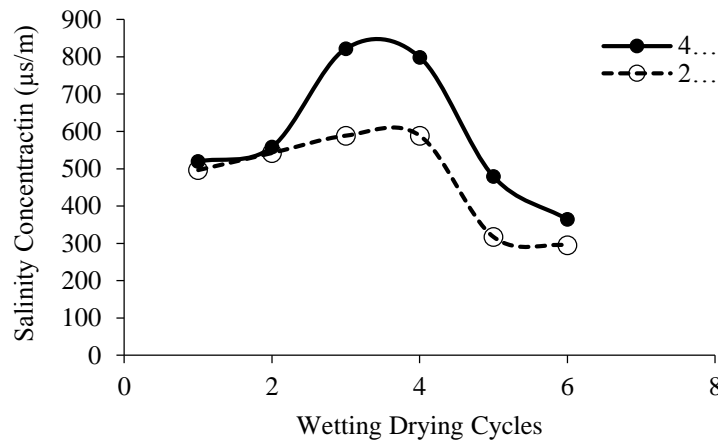
ناچیز خواهد بود. بر اساس یافته‌های سلحشور و همکاران (Salahshour *et al.*, 2016) چنین ترک‌هایی در خاک‌های شور هرچند باعث تهویه بهتر خاک می‌شوند، ولی موجب تبخیر زیاد و از دست رفتن رطوبت می‌شوند در عین حال در زمان آبیاری نفوذ عمقی بیشتری برای آب آبیاری رخ داده و راندمان آبیاری کاهش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان استنباط کرد که اثری که شوری در رفتار خاک تورمی از خود نشان داده، ماندگار بوده و پس از شستشوی نمکها رفتار تورمی خاک از نظر کمی کاملاً به سمت یک خاک غیر شور تغییر نمی‌کند.

زیمنس بر متر رسیده است. در حقیقت با تکرار چرخه‌ها، با وجود کاهش مقدار نمک موجود در نمونه‌ها، به دلیل گسترش ترکها در سیکلهای بعدی، مسیر خروج یونها کوتاهتر شده و در نتیجه میزان خروج نمک از نمونه‌ها بیشتر شده و شوری خاک هم به همین ترتیب کم شده است و در اصطلاح نمک زدایی در نمونه‌ها اتفاق افتاده است. در چرخه‌های بعدی با کاهش شوری نمونه خاک، در نهایت در چرخه پنجم و ششم که همان چرخه تعادلی است، مقدار شوری آب محفظه به مقدار ثابتی تنزل پیدا کرده است. در واقع کاهش میزان شوری نمونه خاک تا چرخه تعادلی اتفاق افتاده و از این چرخه به بعد کاهش شوری



شکل ۴ - درصد انقباض برای سه نمونه خاک با شوری متفاوت

Figure 4. Percent of Shrinkage for 3 investigated soils with different salinity

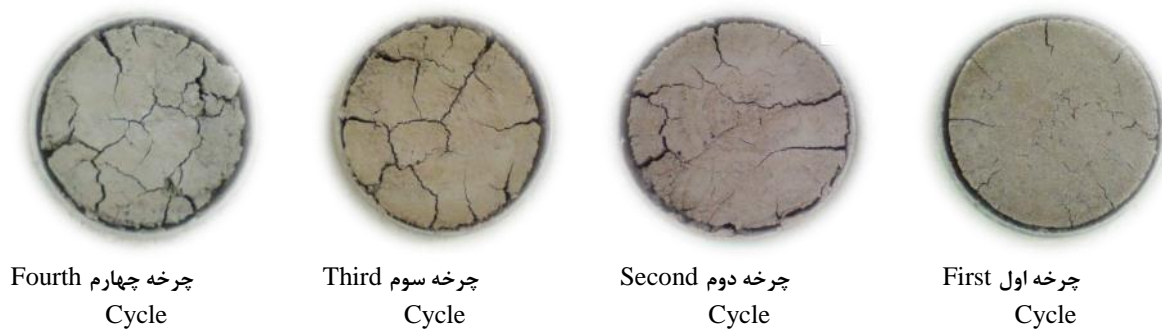


شکل ۵ - تغییرات شوری آب محفظه تحکیم در انتهای چرخه‌های تر و خشک برای دو آزمایش متفاوت

Figure 5. Salinity variation of water in odometer chambers at the end of wetting and drying cycles in two different test

یکدیگر می شوند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با وجود تفاوت در روند درصد تورم و انقباض با اعمال چرخه ها، این میزان در نهایت به یک مقدار ثابت و یکسانی همگرا می شوند. در اینجا چرخه ششم به عنوان چرخه تعادلی مطرح بوده و از این چرخه به بعد، میزان درصد تورم و انقباض مقدار یکسانی خواهند داشت. اعمال چندین چرخه تر و خشک کردن نشانه های خستگی در خاک به وجود می آورد که سبب کاهش پتانسیل تورم پذیری می شود.

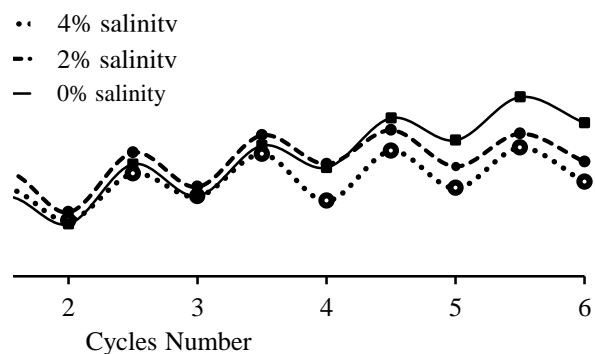
با توجه به مقایسه شکل ۳ و ۴ می توان دریافت که در تمامی چرخه ها میزان تورم بیشتر از انقباض می باشد، در حقیقت نمونه با اعمال چرخه ها، بیشتر متورم شده و کمتر منقبض شده است. یعنی در کل افزایش چرخه های تر و خشک منجر به تورم برگشت ناپذیر در خاک شده است. البته ملاحظه می شود که تفاوت مقادیر درصد تورم و انقباض در چرخه های اولیه بیشتر بوده و در چرخه های پایانی کمتر می باشد. اما این تفاوت در نهایت به مقدار ناپذیری رسیده و مقدار درصد تورم و انقباض تقریباً برابر با



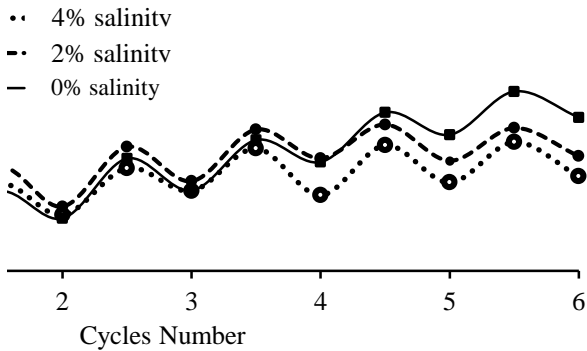
شکل ۶- چگونگی گسترش خلل و فرج خاک در پایان چرخه های خشک
Figure 6. Expanding of cracks over specimens at the end of drying cycles

شکل ۷ درصد تغییر شکل تجمعی در چرخه های تر و خشک برای سه نمونه با شوری متفاوت را نشان می دهد. با توجه به این نمودار، در پایان چرخه ششم میزان تورم و انقباض در هر سه نمونه با شوری متفاوت به حالت تعادلی رسیده اند. در حقیقت اعمال چرخه های متوالی تر و خشک به نمونه خاک مورد آزمایش، سرانجام شرایطی را به دنبال داشت که در آن تغییر شکل محوری حاصل از تر شدن خاک با میزان انقباض ناشی از خشک شدن آن برابر گردید و منجر به وقوع حالت تعادلی شد که در این شرایط تغییر شکل های برگشت پذیر در آن به وجود آمده و پس از چرخه ششم، چرخه تر و خشک تاثیری در رفتار تورمی نداشته و می توان نتیجه گرفت که جهت کنترل آسیب های حاصل تورم و انقباض، حداقل شش بار اعمال این چرخه بر روی مصالح قبل از قرارگیری سازه ضروری خواهد بود. البته دقت در رفتار تورمی مربوط به سیکل های آخر تر و خشک شدن نمونه ها نشان می دهد که نمونه های حاوی شوری سریعتر به تعادل رسیده اند و مقدار تورم و انقباض پس از چرخه چهارم تقریباً یکسان شده است. در حالیکه برای نمونه با

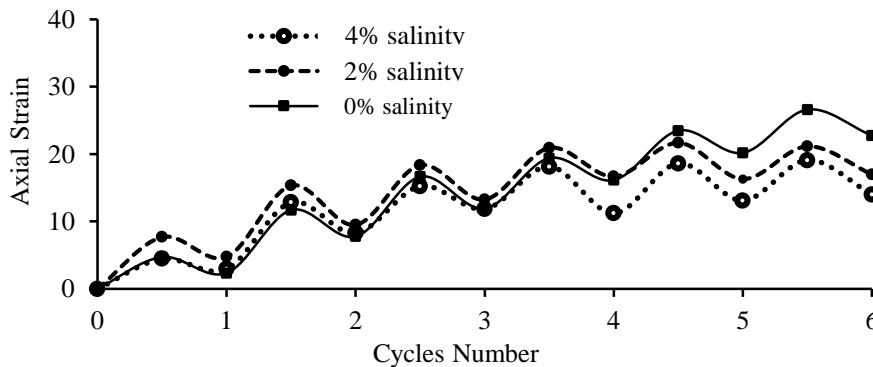
برای بررسی بهتر پتانسیل تورمی-انقباضی نمونه ها با شوری های مختلف، از نمودار درصد تغییر شکل تجمعی استفاده شده است. چنانچه که گفته شد بدلیل بیشتر بودن درصد تورم از درصد انقباض در هر چرخه، تغییر شکل های برگشت ناپذیر در هر چرخه بوجود می آید. تغییر شکل های باقی مانده و برگشت ناپذیر در نمودار درصد تغییر شکل تجمعی به طور واضح قابل مشاهده است.



تحت عنوان کیفیت و نوع مواد شیمیایی ترکیب شونده با خاک و همچنین غلظت این مواد می‌باشد. علاوه بر این تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن می‌تواند باعث قضاوت اشتباه در روند تورمی خاک گردد. بطوریکه تا چرخه چهارم از سیکل‌های بررسی شده در



شکل ۷، مقدار تورم در نمونه حاوی ۲٪ شوری بیشتر از خاک طبیعی بوده در حالیکه پس از این چرخه روند تغییرات تورمی این دو خاک نسبت به هم دچار تغییر می‌گردد.



شکل ۷- مقایسه درصد تغییر شکل تجمعی برای سه نمونه خاک با شوری متفاوت

Figure 7. Comparison of cumulative axial deformation for three investigated soil samples with different salinity

وجود شوری‌های متفاوت در نمونه‌ها نیز تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ویژگی‌های تورمی خاک‌های متورم شونده داشته است. به طوری که وجود شوری، موجب کاهش بیشتر پتانسیل تورمی این خاک‌ها شده است. در حقیقت نمک سدیم کلرید افزوده شده به نمونه باعث افزایش نیروی جاذبه بین بارهای موجود در سطح رس و کاتیون‌ها شده و از تورم زیاد جلوگیری کرده است. نمونه با شوری ۴٪ وزنی، در پایان چرخه‌ها به تعادلی تورمی-انقباضی کمتری نسبت

شوری طبیعی (بدون افزودن نمک) روند تغییرات حجم کلی نمونه در حالت صعودی قرار دارد. هر چند که نرخ و شیب آن نسبت به سیکل‌های اول کمتر شده است.

نکته قابل توجه دیگری که از شکل ۷ قابل استنباط است، این است که در انتهای چرخه‌های تر و خشک اولیه، (تا چرخه چهارم) بیشترین مقدار تورم تجمعی مربوط به نمونه حاوی ۲ درصد شوری می‌باشد. این نتیجه مهم بیان کننده این مطلب است که علاوه بر کیفیت شیمیایی آب و نوع نمک‌های موجود در خاک، مقدار و غلظت این نمک‌ها در نوع رفتار و پتانسیل تورمی خاک بسیار تاثیر گذار می‌باشد. به نظر می‌رسد در درصدهای خاصی، وجود نمک‌ها و کاتیونهای سدیم باعث تشدید و افزایش پتانسیل تورمی در چرخه‌های اولیه تر و خشک می‌گردد. ولی تعیین بحرانی‌ترین غلظت نمک در افزایش پتانسیل تورمی نیاز به تحقیقات بیشتر و انتخاب غلظت‌های متفاوت دارد.

با این حال می‌توان گفت تفاوت نتیجه پژوهش‌های انجام شده توسط محققین مبنی بر کاهش یا افزایش پتانسیل تورم‌پذیری خاک‌های متورم‌شونده ناشی از وجود عاملی

البته عمده این تغییرات به دلیل کاهش گرادیان شوری با افزایش چرخه‌های تر و خشک مربوط می‌شود و این نکته‌ای است که در هیچ یک از تحقیقات قبلی مورد توجه محققان نبوده است. لذا جهت تعیین و قضاوت بهتر در انجام چنین تحقیقاتی افزایش تعداد چرخه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. البته با توجه به آنچه که در نمودارهای فوق دیده می‌شود، در تمامی این نمونه‌ها میزان پتانسیل تورم با افزایش تعداد چرخه‌ها کاهش پیدا کرده است. همچنین علاوه بر آن،

تورم‌پذیری در اثر اعمال شش چرخه در تمامی نمونه‌ها، به یک مقدار ثابت رسیده و کاهش می‌یابد. بنابراین جهت کنترل آسیب‌های حاصل از تورم، حداقل ۶ بار اعمال این چرخه بر روی مصالح قبل از قرارگیری سازه ضروری است. اعمال چرخه‌های تر و خشک نشان داد میزان تورم در چرخه دوم بیشتر از مقدار آن در چرخه اول است. این بدان جهت است که میزان رطوبت اولیه در ابتدای چرخه دوم، کمتر از مقدار آن در ابتدای چرخه اول است. همچنین میزان تورم چرخه دوم از مقادیر آن برای چرخه‌های بعدی نیز بیشتر است. کیفیت آب و نوع مواد شیمیایی ترکیب شونده با خاک، تاثیر زیادی در تغییرات تورم‌پذیری خاک دارند. بطوریکه اعمال چرخه‌های تر و خشک و نیز افزودن شوری، باعث کاهش قابل ملاحظه تورم‌پذیری خاک‌های متورم شونده می‌شود. این روش می‌تواند روشی کاربردی در جهت کنترل تورم در سازه‌های مهندسی از جمله بستر سازه‌های سبک، خطوط انتقال آب، دیوار حائل، سنگفرش معابر، بزرگراه‌ها باشد.

به سایر نمونه‌ها رسیده است. مطالعه تماس طولانی مدت انواع مختلف کاتیونها به مدت بیش از ۷۰۰ روز بر رفتار خاک‌های متورم شونده (بدون اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن) توسط وانگ و همکاران (Wang et al., 2014) کاهش پتانسیل تورمی را در تاثیر کاتیونها بر لایه مضاعف دانسته‌اند. بدین ترتیب این روش می‌تواند روشی کاربردی در جهت کنترل تورم در سازه‌های مهندسی از جمله کانال‌های آبیاری، خطوط انتقال آب، دیوار حائل، سنگفرش معابر، بزرگراه‌ها و تونل‌ها که یک خطر جدی محسوب می‌شود، استفاده گردد.

نتیجه‌گیری کلی

خاک‌های متورم شونده دارای رفتار پیچیده‌ای می‌باشند. در این تحقیق یک سری آزمایش جهت شناخت بهتر این رفتار انجام گردید که نتایج زیر حاصل شد. هر چه وزن واحد حجم خشک نمونه بیشتر باشد، باعث چسبیدن ذرات به یکدیگر شده و نیروی دافعه بین ذرات بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان تورم آن نیز بیشتر خواهد شد. پتانسیل

References

- Aboghoobar H. M. 1993. Influence of irrigation water quality on soil infiltration. *Irrigation Science*, 14(1): 15-19
- Ahmadi H., Rahimi H., and Rostami M. 2009. Optimizing the location of contraction-expansion joints in canal lining. *Irrigation and Drainage*, 58(1): 116-1125.
- Asgari F., and Fakher A. 1993. Geotechnical properties of expansive and dispersive soils Tehran University: *Jahad Daneshgahi*. (In Persian)
- Alawaji H. 1999. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures with liquids, *Applied Clay Science* 15: 411-430.
- Alonso E.E., Romero E., Hoffmann C., and Garcia Escudero E. 2005. Expansive bentonite- sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting. *Journal of Engineering Geology*, 81: 213-226.
- Barootkoob S.h., and Rahimi H. 1995. Cracking reasons of concrete lining in Khoozestan province. Msc. Thesis, University of Tehran. (In Persian)
- Emdad M. R., Raine S. R., Smith Rod J., and Fardad H. 2004. Effect of water quality on soil structure and infiltration under furrow irrigation. *Irrigation Science*, 23(2): 55-60.
- Chen F.H. 1965. The use of piers to prevent uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soils, *In: Proceeding of International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils*, Texas.
- Chen F.H., and Ma G.S. 1987. Swelling and shrinkage behavior of expansive clays. pp. 127-129. *Proceeding of the 6th International Conference on Expansive Soils*. New Delhi, India.
- Day R.W. 1994. Swell-Shrink Behavior of Compacted Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120 (2): 618-623
- Dif A.E., and Blumel W.F. 1991. Expansive soils with cyclic drying and wetting. *Geotechnical Testing Journal*, 14 (1): 96-102
- Estabragh A., R., Parsaei B., and 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
- Kalkan, E. 2011. Impact of wetting-drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume. *Applied Clay Science*, 52(4), pp.345-352.

- Lambe T.W. 1958. The structure of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 84: 1-34.
- Malik M., Mustafa M.A., and Letey J. 1992. Effect of mixed Na/Ca solutions on Swelling, dispersion and transient water flow in unsaturated montmorillonitic soils. 52: 17-28.
- Moghaddas M., Estabragh R. A., and Abdolahi J. 2012. Swell-shrinkage paths of a swelling soil in wetting and drying cycles with saline water. *Journal of Water and Soil Science*. 22 (3):128-138
- Morris P.H., Graham J., and Williams D.J. 1992. Cracking in drying soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 263-277.
- Nelson J. D., and Miller D. J. 1992. *Expansive Soils: Problems and Practices in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley & Sons Inc.
- 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.
- Oliveria T. S., Costa M. L., and Schaefer C.E. 2005. Water-dispersible clay after wetting and drying cycles in four Brazilian oxisols. *Soil and Tillage Research*, 83:260-269
- Osipov V.I., Bik N.N. and Rumjantseva N.A. 1987. Cyclic swelling of clays applied. *Clay Science Journal*, 2(7), 363-374.
- Ring, G.W. 1966. Shrink-Swell Potential of Soils. Highway Research Board. National Research Council, pp. 1-11.
- Rosenbalm D., and Zapata C.E., 2016. Effect of wetting and drying cycles on the behavior of compacted expansive soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 40: 16-19.
- Safadoust A., 2016. Effects of the number of wetting-drying cycles on structure stability, particle size distribution and pore system of soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 46 (4): 759-767
- Salahshour D. F., Davat-Gar N., Yazdani, M. R., and Sadraddini A. A. 2016. Effect of increasing salinity of irrigation water on trend of shrinkage cracking development in paddy fields. *Iraninan Journal of Soil Research*, 30(2), 173-186.
- Tang C.S., Shi B., Liu C., Suo W.B. and. Gao L. 2011. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science*. 52: 69-77
- Tawfiq S., and Nabantoglu Z. 2009. Swell-shrink behavior of expansive clays. *In: Proceeding of the 2nd International Conference on Expansive 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: 938-959.
- Wheeler S.J., Sharma R.S. and Buisson M.S.R. 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress strain behavior in unsaturated soils. *Geotechnique*. 53(1): 41-54.
- Yazdandoust F., and Yasrobi S. 2010. Effect of cyclic wetting and drying on swelling behavior of polymer-stabilized expansive clays. *Applied Clay Science*, 50: 461-468

The Effect of Salinity on the Swelling Behavior of Expansive Soils under Wetting and Drying Cycles

Reza Goli Kalanpa¹, Hojjat Ahmadi^{2*}, Esmail Goli Kalanpa²

Received: February 2015

Accepted: August 20163

Abstracts

Expansive soils are known as problematic soils that show volume change while subjected to moisture content variation. Changing volume of such soils, specially the basis of light structure like base of canals with rigid lining lead to cause high costs. This type of soils evolves more clay and the magnitude of expansion depends upon to the type of minerals and molecular connections. Furthermore the type of chemical materials which is added to the soil, precise an explanatory definition of engineering properties of the soil. In this research the effect of salinity on the behavior of clayey soils under wetting and drying cycle was investigated. In this regards, three expansive soil sample from Lake Urmia basin including zero, two and four weighty percent of NaCl were prepared and free swelling tests under wetting and drying cycles with monitoring of salinity variation were conducted. The results of this investigation revealed that the maximum expansive is referring to the second cycle, as well the expansive behavior after 6 cycle decrease significantly. Also, the achievements of this study confirmed that in the specimens including salt the gravity forces between ions over clays and cation increases and it cause to decrease of swelling. Whereas, in the specimens including 4% salinity the minimum expansive was shown that this may practical as a simple method to control the expansive behavior of clays.

Keywords: Engineering properties, Free swelling, Salinity, Wetting-drying

1- MSc Student of Hydraulic Structures, Urmia University

2- Associate Professor, Department of water engineering, Urmia University

3- Associate Professor, Department of Soil science, University of Mohaghegh Ardabili

*Corresponding Author Email: h.ahmadi@urmia.ac.ir