



برآورد میزان تورم پذیری خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد

مهدی خداپرست^{۱*} و مرتضی آذری^۲

^۱ دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

^۲ کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

khodaparast@qom.ac.ir

چکیده: خاک‌های متورم شونده از جمله گروه خاک‌های مسئله‌دار محسوب می‌گردند و پیش‌بینی میزان تورم این نوع خاک‌ها امری مهم است. در تحقیق حاضر به منظور تخمین پتانسیل تورم پذیری خاک‌های با خاصیت خمیری زیاد، سه نوع خاک رسی مختلف از سه منطقه گوناگون از چندین کشور با مشخصات مختلف انتخاب شده‌اند. نمونه‌های سری اول مربوط به خاک رسی از منطقه سوکو کشور اندونزی می‌باشد که غالب کانی‌های تشکیل دهنده آنها از نوع مونت‌موریلونیت بوده و همچنین شاخص خمیری آن بسیار بالا است (بین ۷۰ تا ۱۲۲ درصد). این موجب شده است این خاک پتانسیل تورم بسیار بالایی داشته باشد. نمونه‌های سری دوم مربوط به خاک شهری در شمال عمان است. خاک مورد مطالعه دارای شاخص خمیری بالا بوده و همچنین کانی‌های تشکیل دهنده آن غالباً مونت‌موریلونیت می‌باشد. نمونه‌های خاک سوم که در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته است خاک‌های متراکم شده‌ای متشکل از ترکیب ماسه سیلیکا با رس‌های کائولینیت و بنتونیت با درصدهای مختلف می‌باشد. با توجه به تفاوت در ساختار این خاک‌ها و نوع و میزان کانی‌های تشکیل دهنده و بازه گسترده تغییرات شاخص‌های خمیری این خاک‌ها و هدف تحقیق حاضر که مطالعه رابطه میزان تورم پذیری خاک‌های رسی با خصوصیات خمیری آن می‌باشد، این نمونه‌ها از نقاط مختلف انتخاب شده‌اند. به منظور تخمین پتانسیل تورم پذیری خاک‌های با خاصیت خمیری زیاد، برای مقادیر مختلف شاخص‌های خمیری خاک در نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق، آنالیز رگرسیون چند متغیره اعمال شده و رابطه جدیدی ارائه شده است؛ تا بتوان با تعیین شاخص‌های خمیری خاک در مورد پتانسیل تورمی آنها قضاوت نمود. آسانی و هزینه پایین انجام آزمایش‌های تعیین شاخص‌های خمیری خاک و همچنین گسترده بودن نمونه‌های انتخابی از نقاط مختلف و همچنین ضریب همبستگی نسبتاً بالای آن از ویژگی‌های رابطه ارائه شده می‌باشد.

کلمات کلیدی: پتانسیل تورم خاک، خاک‌های متورم شونده، تورم‌پذیری، خاصیت خمیری زیاد، روابط تجربی

Estimating the Amount of Swelling Potential of Clay Soils with High Plastic Properties

A. Khodaparast and B. Azary

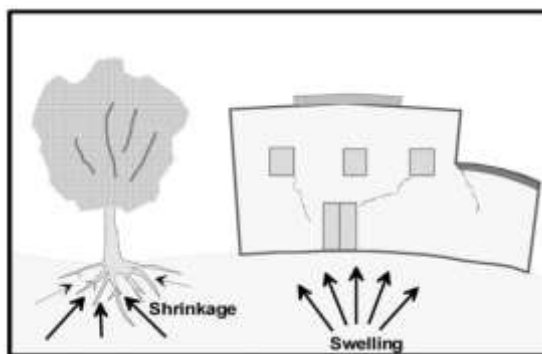
Abstract: Expansive soils are considered among problematic soil groups and the predication of the expansion rate of these soils is important. In the present study, three types of different clay soils with different specifications have been randomly selected from three different areas of some countries. Samples pertaining the first series have been selected from Indonesia, in which montmorillonite is the mixed soil of most of constituent minerals and enjoys an extremely high expansion potential (between 70 to 122%). Samples of the second series have been taken from northern Oman. The montmorillonite soil has a very high plastic property. The percentage of montmorillonite mineral presented in this soil is higher than that of the other clay minerals. Samples of the third soil of this study are the result of a research achieved on compacted soils in which the samples have mainly consist of a combination of silica sand, kaolinite and bentonite with different mineral percentages. In the present study, the soils that have been used fall within the category of fine-grained soils as per the Unified Soil Categorization System. The regression analysis was used by means of Design-Expert software for different values of plastic properties in order to estimate the expansibility of the soils with high plastic properties. Comparing the relationship obtained in this study and that of Seed et al., the correlation coefficient in this study is higher; and lower RMSE and MAE have been obtained here. This suggests the high and proper precision of the relationship.

Keywords: Swelling potential of soils, Expansive soils, Swelling, High plastic properties, Experimental relationships

۱- مقدمه

هزینه‌های مربوط به خسارت‌های ناشی از خاک‌های متورم شونده نسبتاً بالا هستند و لذا شناسایی آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. رفتار تورمی خاک‌های متورم شونده اغلب موجب حوادثی چون نشست غیر یکنواخت، بلند شدن و جابجایی زمین و ترک‌های روسازی‌ها و آسترهای کانال‌ها می‌گردد [۱]. بازه خسارت‌ها از ترک‌های کوچک رو سازی‌ها یا نازک کاری‌های ساختمان‌ها که خیلی رایج است تا جابجایی‌های جبران‌ناپذیر شمع‌ها و اجزای بناها را شامل می‌شود [۲]. مکانیسم ایجاد خسارت وارد شده به بنا در اثر تورم خاک زیر آن به صورت شماتیک در در شکل شماره یک نشان داده شده است، همچنین تصویری از ساختمانی آسیب دیده در اثر تورم در شکل شماره ۲ آمده است. خاک‌های متورم شونده به عنوان خاک‌هایی که در مواجهه با آب، مقادیر قابل ملاحظه‌ای افزایش حجم نشان می‌دهند توصیف می‌شوند [۳]. به طور کلی برای توصیف توانایی خاک جهت متورم شدن از پتانسیل تورم خاک استفاده می‌شود که به عنوان تغییر حجم نمونه یا فشار مورد نیاز برای مقابله با تورم خاک تعریف می‌شود. میزان درصد تورم نمونه خاک با آزمایش نمونه در دستگاه ادنومتر صورت می‌گیرد و نحوه محاسبه آن به صورت زیر می‌باشد [۴]:

$$\text{درصد تورم} = \frac{\text{ارتفاع اولیه نمونه} - \text{ارتفاع نهایی نمونه}}{\text{ارتفاع اولیه نمونه}} \times 100$$



شکل ۱. نحوه ایجاد خسارت به بنا در اثر تورم پذیری خاک [۵]
Fig. 1. How to create damages to building by swelling [5]



شکل ۲. ساختمان آسیب دیده در اثر تورم خاک زیر بنا [۶]
Fig. 2. A damaged building due to swelling [5]

مکانیزم تورم در رس‌های متورم شونده نسبتاً پیچیده و تحت تاثیر عوامل متعددی است. این فاکتورها در سه دسته زیر می‌توانند قرار بگیرند:

۱) پارامترهای خاک (مبحث کانی شناسی رس، خصوصیات شیمیایی آب موجود در خاک، ساختار خاک، پلاستیسیته، وزن واحد خشک، میزان رطوبت خاک و...)

۲) فاکتورهای محیطی (تغییرات میزان رطوبت، اضافه تنش‌های وارده و...)

۳) تاثیر تنش در خاک [۷].

تحقیقات نشان می‌دهد پارامترهای خمیری و رفتار تغییر حجم خاک‌ها به صورت مستقیم وابسته به اندازه ذرات رس در خاک هستند. به طور کلی ویژگی‌های تورمی کانی‌های رسی همان روند ویژگی‌های پلاستیسیته خود را دنبال می‌کنند، به عبارت دیگر کانی‌های با پلاستیسیته بیشتر پتانسیل تورم بیشتری دارند [۷]. الماشاد و آتا با مطالعه روی چند نمونه خاک رسی اخذ شده از نقاط مختلف دره نیل و آزمایش روی آن‌ها مشاهده کردند افزایش غلظت نمک مخلوط با آب باعث کاهش میزان تورم پذیری در این خاک‌ها می‌شود. آن‌ها معتقد بودند این افزایش نمک باعث کاهش حد مایع و مشخصات تورم پذیری رس‌های مونت موریلونیت با شاخص پلاستیسیته بالا شده است [۸].

افزایش حجم زمانی اتفاق می‌افتد که میزان رطوبت رس تغییر می‌کند. افزایش ناچیز میزان رطوبت در حد یک تا ۲ درصد جهت ایجاد تورم مخرب کافی است. میزان رطوبت اولیه رس نیز میزان تورم را کنترل می‌کند. رس خشک با میزان شاخص خمیری بیش از

برآورد میزان تورم پذیری خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد

می‌شود، حد مایع (LL)، شاخص خمیری (PI)، ضریب تبادل کاتیونی (CEC)، هدایت الکتریکی (E_c) می‌باشد. در این خصوص برخی از مطالعات تجربی جهت پیش بینی پتانسیل تورم در جدول شماره ۱ آمده است. در این مطالعات محققین رابطه‌ی نتایج آزمایشات ادوئومتر را با ویژگی‌های شاخص و فیزیکی خاک‌هایی که مورد مطالعه‌ی آنها بوده بررسی نموده‌اند. برخی مطالعات بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و قسمتی دیگر بر روی نمونه‌های متراکم و بازسازی شده صورت گرفته است. آنچه مشاهده می‌شود این است که نمونه‌های دست نخورده میزان تورم کمتری نسبت به نمونه‌های بازسازی شده نشان می‌دهند.

یاجو و همکاران استفاده از روش های ژئو-الکتریکی در تعیین مدل های پیش بینی تورم پذیری خاک ها را پیشنهاد نمودند؛ آنها مزیت استفاده از این روش ها را غیرمخرب بودن، سرعت بالا و ارزانه‌تر بودن آن ها در مقایسه با دیگر روش های سنتی ژئوتکنیک عنوان کردند [۱۳]. در روابط ارائه شده تعیین پارامترهایی چون ضریب هدایت الکتریکی و ضریب تبادل کاتیونی نیاز به تجهیزات خاص خواهد داشت. هرچند استفاده از سوی دیگر بر اساس مطالعات گذشته پارامترهای خمیری خاک تاثیر زیادی در میزان تورم پذیری نمونه‌ی خاک می‌باشد. البته برخی از محققین معتقد بودند رفتار تورمی خاک به مقدار ذرات رس با سطح مخصوص بالا جهت قادر سازی بیشتر خاک برای جذب آب توسط خاک رس بستگی دارد. همچنین خاصیت جذب آب توسط خاک به ترکیبات معدنی آن وابسته است که منجر به فاکتور شاخص خمیری مختص هر خاک خواهد شد و به همین دلیل فقط اثر شاخص خمیری را در نظر گرفته اند [۱۴].

از طرفی چند معیار درجه تورم پذیری خاک ها را صرفا بر اساس حد مایع و شاخص خمیری نیز به صورت زیر بیان نموده‌اند [۱۵]:

بر این اساس، در مجموع در تحقیق حاضر به بررسی تاثیر پارامترهای خمیری خاک در میزان پتانسیل تورم خاک پرداخته شده است.

۳۵ درصد و حد مایع بیش از ۶۰ درصد معمولا زمانی که رطوبت طبیعی کمتر از ۱۵ درصد هست در معرض خطر تورم است [۹].

ارگولر، زینال آبدین و رسات آروسر نشان دادند زمانی که میزان رطوبت کمتر از ۳۰٪ است فشار حاصل از تورم به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد ولی وقتی بالاتر از ۳۰ یا ۴۰ درصد شد این فشار از بین می‌رود [۱۰].

رحیمی و باروتکوب نشان دادند که خاک‌های حتی با پلاستیسیته و خاصیت خمیری پایین تا متوسط اگر به صورت ذاتی در چگالی‌های بالاتر و میزان رطوبت پایین‌تر متراکم شده باشند می‌توانند به طور محسوس متورم شوند و فشار تورم بالایی به ساختمان‌های مجاور اعمال کنند. پتانسیل و فشار تورم رس با کاهش میزان رطوبت در همان وزن واحد خشک افزایش می‌یابد. پتانسیل تورم می‌تواند با کاهش ۹۵-۹۲ درصد وزن واحد خشک ماکزیمم و با افزایش میزان آب تراکم به ۲-۳ درصد میزان رطوبت بهینه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد [۱۱]. ال-یاکوب و همکاران با انجام آزمایش تورم آزاد روی خاک های مستعد تورم مشاهده نمودند تورم قابل ملاحظه آنها زمانی اتفاق می افتد که میزان درجه اشباع خاک مزبور از ۸۰ درصد تجاوز نماید [۱۲].

وزن واحد خشک رس، یک شاخص تورمی دیگر است. زمانی که وزن واحد خشک افزایش می‌یابد، فشار تورم به طور سریع افزایش می‌یابد. در این خصوص لازم به تذکر است که خاک‌ها با وزن واحد خشک بیش از ۱۷/۶۲ کیلونیوتن بر متر مکعب به طور کلی پتانسیل تورم بالایی نشان می‌دهند [۳].

۲- تاریخچه مطالعات

بر اساس مطالعات محققین گذشته به‌صورت کلی عوامل موثر بر تورم خاک و فشار تورمی حاصل از آن شامل پارامترهای میزان رطوبت (W_n)، وزن مخصوص خشک خاک (γ_d)، میزان کانی های رسی (C) و نوع کانی آن، عمق لایه‌ی متورم شونده (H)، چگالی ویژه خاک (G_s)، فشار قائمی که آزمایش تورم تحت آن انجام

جدول ۱. خلاصه روابط پیش بینی پتانسیل تورم در تحقیقات گذشته

Table 1. Summary of prediction relationships swelling potential in previous studies

Reference	Empirical relationships	Remarks
Işık Yilmaz-2006	$SP = 2.77 + 0.131 LL - 0.27 w_n$	
Işık Yilmaz-2006	$\log SP = 0.36 LL - 0.0833 w_n + 0.458$	
Cimen et al-2012	$\text{Log SP} = 0.0526\gamma_d + 0.033LL - 6.8$	For undisturbed soils, $\gamma_d = \text{lb/ft}^3$
Işık Yilmaz- 2006	$\text{Log SP} = 1/12(0.44LL - w_n + 5.5)$ $\log SP = 1/19.5(6.242\gamma_d + 0.65LL - 130.5)$	For undisturbed soils
Işık Yilmaz-2006	$SP = 0.00216 PI^{2.44}$ $SP = 0.0036 PI^{2.44}$	For undisturbed soils For disturbed soils
Işık Yilmaz- 2006	$SP = 0.2558e^{0.0838PI}$	$\gamma_d = 15.7 - 17.3 \text{ kN/m}^3$ $w_0 = 15 - 20 \%$
Azam at el-2013	$SP = 0.16 PI^{1.188}$	For undisturbed soils
Komine, H. and N. Ogata- 1994	$\text{Log SP} = 0.9 \frac{PI}{w_n} - 1.19$	For undisturbed samples
Komine, H. and N. Ogata- 1994	$SP = 0.00064 PI^{1.37} C^{1.37}$ $SP = (0.0229 PI^{1.45} C) / w_n + 6.38$	For soil compacted to the maximum standard AASHTO unit weight at optimum water content
Sabtan-2005	$SP = 1.0 + 0.06(C + PI - w_n)$	For undisturbed samples, ASTM Method A, $P_s = \text{kPa}$
Komine, H. and N. Ogata- 1994	$SP = 23.82 + 0.7346PI - 0.1458H - 1.7w_n + (0.0025PI)w_n - (0.00884PI)H$	For undisturbed samples, $PI > 40 \%$
	$SP = -9.18 + 1.5546PI + 0.08424H + 0.1 w_n - (0.0432PI)w_n - (0.01215PI)H$	$PI \leq 40 \%$
Işık Yilmaz-2006	$SP = 0.00041 LL^{+4.17} P^{-0.386} w_n^{-2.33}$	$P = \text{surcharge}$
Nwaiwu and Nuhu- 2006	$SP = 11.17 + 0.16E_c - 3.96 G_s$	For disturbed soils
Cimen et al- 2012	$SP = (0.3139\gamma_d^{0.3552} 0.1177w_n^{0.4470}) PI^{0.9626}$	On the Dry Side
	$SP = (0.4768\gamma_d^{0.3888} 0.0033w_n^{1.6045}) PI^{0.7224}$	On the Wet Side
Chu, Y., et al	$\text{Log SP} = -3.1 + 1.85 \times \log(\sigma_s/\sigma_w)$	σ_w : pore water conductivity σ_s : the surface conductivity

برآورد میزان تورم پذیری خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد

این مطالعه در اندونزی انجام شده است. نمونه‌های خاک رسی هستند و رنگی سیاه و متمایل به خاکستری دارند. مشخصات خاک اولیه و نمونه خاک ترکیب شده در جدول شماره ۳ نشان داده شده‌اند. جهت ایجاد شاخص های خمیری و عدد فعالیت‌های متفاوت در نمونه‌هایی که روی آن‌ها تحقیق شده بود خاک منطقه با بنتونیت سدیمی مخلوط شده و روی نمونه‌های آماده شده آزمایش‌های ادوئومتر صورت گرفته است. تست تورم روی نمونه‌های ساخته شده در رطوبت اولیه ۳۲٪ و چگالی خشک 1.26 گرم بر سانتی متر مربع انجام شده است. تصویر شماره ۳ نشان دهنده نقشه منطقه مورد مطالعه فوق الذکر می‌باشد.

در خاک منطقه سوکو و خاک مخلوط غالب کانی‌های تشکیل دهنده از نوع مونت موریلونیت هستند (49.94 تا 50.74 درصد) که این خاک پتانسیل تورم بسیار بالایی دارد.

جدول 2. بررسی پتانسیل تورم‌پذیری خاک‌ها بر اساس شاخص پلاستیسیته و حد مایع [۱۵]

Table 2. Investigation of soil swelling potential based on plasticity index and liquid limit [15]

Swelling Potential	Liquid Limit (%)	Plasticity Index
Low	30 >	0 - 15
Medium	30 - 40	10 - 35
High	40 - 60	20 - 55
Very high	60 <	35 <

۳- مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر سه نوع خاک رسی مختلف به صورت تصادفی از سه منطقه گوناگون از چندین کشور با مشخصات مختلف انتخاب شده‌اند. داده‌های مربوط به مشخصات این سه نمونه خاک از پژوهش دیگر محققین برداشت شده است. نمونه‌های سری اول حاصل از تحقیق سودجیان‌تو و همکارانش می‌باشد [۱۶].

جدول 3. مشخصات خاک منطقه سوکو و نمونه خاک‌های مخلوط شده تحت آزمایش

Table 3. General soil properties of Soko region and soil mix sample under testing

PROPERTY	Soko	Mix 1	Mix 2	Mix 3
Water Content, wn (%)	63.59	54.80	50.81	46.77
Unit weight, γ (t/m ³)	1.51	1.51	1.51	1.51
Specific Gravity, Gs	2.62	2.59	2.56	2.53
Clay content (%)	95.60	94.53	94.87	95.13
Na-bentonite	0	6.78	13.57	20.35
SiO ₂	64.98	62.00	62.54	62.63
Al ₂ O ₃	20.67	23.04	22.73	22.69
Fe ₂ O ₃	5.39	10.27	9.74	9.38
TiO ₂	0.24	0.26	0.25	0.25
CaO	3.55	1.27	1.30	1.34
MgO	3.57	1.67	1.69	1.74
Na ₂ O	1.05	1.15	1.43	1.65
K ₂ O	0.55	0.34	0.30	0.32
Montmorillonite (%)	76.10	50.11	50.48	50.94
Feldspar (%)	16.20	16.03	16.67	17.90
Alpha Quartz (%)	5.30	6.80	6.63	6.47
Halloysite (%)	4.30	13.03	12.89	12.10
Cristobalite (%)	0.90	14.03	13.33	12.59



شکل 3. نقشه منطقه مورد مطالعه در پژوهش سودجیانتهو و همکاران [۱۶]

Fig. 3. The map of the studied region in Sudjianto's et al research [16]

نیروی ۲۵ کیلوپاسکال قرار گرفته و نمونه‌ها در وزن خشک ماکزیمم خود درون قالب آزمایش متراکم شده‌اند. مشاهده می‌گردد که با توجه به مقادیر حد روانی و شاخص خمیری نمونه‌ها عمدتاً از نوع رسی و لای با خاصیت خمیری بالا هستند.

نمونه‌های خاک سوم که در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته است حاصل تحقیقات نایاک و کریستنسن روی خاک‌های متراکم شده بوده است [۱۷]. نمونه‌های مورد مطالعه عمدتاً متشکل از ترکیب ماسه سیلیکا با رس‌های کائولینیت و بنتونیت با درصد‌های مختلف بوده است. از میان خاک‌های مورد بررسی در تحقیق مذکور آن قسمتی که نمونه‌ها طبق طبقه‌بندی یونیفاید در رده‌ی خاک‌های ریزدانه بوده‌اند برای مطالعه‌ی حاضر انتخاب شده‌اند. نمونه‌ها تحت میزان رطوبت نزدیک به رطوبت بهینه و چگالی متناظر طبق استاندارد آزمایش تراکم آشتو آماده شده‌اند.

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش مقدمه از شاخص‌های مؤثر در میزان تورم پذیری خاک‌ها نوع و میزان کانی‌های تشکیل دهنده خاک‌های رسی است.

نمونه‌های سری دوم مربوط به تحقیق عامر علی الراواس و همکاران مربوط به شهری در شمال عمان است موقعیت جغرافیایی این منطقه در شکل ۴ نشان داده شده است [۶]. خاک مورد مطالعه دارای شاخص خمیری بالا (۲۰.۵ درصد) و عدد فعالیت ۱.۰۳ بود. به طور کلی شاخص خمیری و عدد فعالیت بالاتر میزان پتانسیل تورم بالاتری را نتیجه می‌دهد. میزان درصد کانی مونت موریلونیت (۴۳ درصد) در این خاک نسبت به دیگر کانی‌های موجود در این خاک بالاتر می‌باشد. از طرفی نتایج نشان می‌دهند که مونت موریلونیت به عنوان فعال‌ترین کانی رسی شناخته می‌شود. با این وجود و داشتن ظرفیت تبادل کاتیونی بالا این خاک مستعد تورم پذیری می‌باشد. در تحقیق مذکور تاثیر افزودنی‌های مختلف چون آهک، سیمان، ترکیب سیمان و آهک و ساروج روی خاک تورم‌پذیر منطقه مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای تورمی خاک مخلوط به دست آمده است. اضافه کردن مواد مذکور به خاک مورد بررسی با تغییر در پارامترهای خمیری و حد مایع خاک باعث ایجاد درصد‌های تورم خاک مختلف در خاک شده است. نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه جهت تخمین میزان پتانسیل تورمی آن تحت آزمایش ادوئومتر و تحت

برآورد میزان تورم پذیری خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد

خمیری خاک می شود. همانطور که مشاهده شد در نمونه های سری اول غالب کانی های تشکیل دهنده از نوع مونت موریلونیت هستند (49.94 تا 50.74 درصد) همچنین شاخص خمیری آن بسیار بالا است (71.32 تا 122.80 درصد) که موجب شده است این خاک پتانسیل تورم بسیار بالایی داشته باشد. نمونه های سری دوم دارای شاخص خمیری بالا (20.5 درصد) و عدد فعالیت 1.03 بوده است. همچنین کانی های تشکیل دهنده آن مونت موریلونیت (۴۳ درصد) پالیگورسکیت و ایلیت (۲۳ درصد) و کائولینیت (۱۶ درصد) است. نمونه های خاک سوم که در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته است خاک های مترکم شده ای است که عمدتاً متشکل از ترکیب ماسه سیلیکا با رس های کائولینیت و بنتونیت با درصد های مختلف بوده است. با توجه به تفاوت در ساختار این خاک ها و نوع و میزان کانی های تشکیل دهنده و بازه گسترده تغییرات شاخص های خمیری این خاک ها رفتار تورمی آن ها متفاوت می باشد.

۴- بحث و بررسی نتایج

ویژگی های تورمی کانی های رسی روندی مشابه شاخص های خمیری خود دارند [۷، ۱۸]. از آنجا که آزمایش های مربوط به شناسایی کانی های تشکیل دهنده خاک نیاز به تجهیزات خاص دارد و در مقایسه با تعیین شاخص های خمیری خاک امری دشوار تر است، در این تحقیق ابتدا سعی شده تا رابطه ی پتانسیل تورم پذیری نمونه ها با هر کدام از پارامترهای پلاسیسیته ی خاک به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد سپس رابطه ای کلی جهت پیش بینی میزان پتانسیل تورم پذیری خاک های رسی ارائه شود.

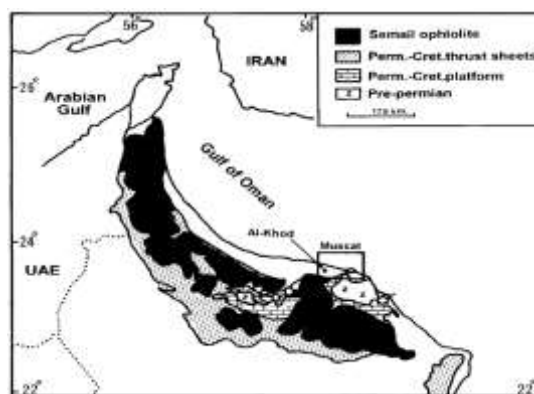
الف- حد مایع

از شاخص های موثر در میزان تورم پذیری خاک میزان شاخص حد مایع خاک می باشد. از اینرو محققین مختلف میزان درجه تورم پذیری خاک ها را براساس میزان حد مایع به تنهایی و یا در ترکیب با دیگر پارامترها بیان نموده اند [۳، ۱۹، ۲۰].

جدول 4. مشخصات خاک مورد آزمایش توسط عامر علی الراوس و همکاران [۶]

Table 4. Properties of the tested soil by Amer Al-Rawaset al. [6]

Characteristics	Values and descriptions
Colour	Yellow
Depth(m)	1.2
Natural water content (%)	8.9
Field dry unit weight (kN/m ³)	17
Specific gravity	2.8
Passing No. 200 sieve (%)	60
Clay content (%)	20
Cation exchange capacity (meq/100 g)	70
Optimum water content (%)	21
Maximum dry unit weight (kN/m ³)	17.5
Montmorillonite	43
Palygorskite	23
Illite	23
Kaolinite	16
Sodium (Na)	41
Calcium (Ca)	6
Magnesium (Mg)	1
Potassium (K)	1



شکل ۴- محل قرار گیری منطقه مورد مطالعه در شمال عمان (الخود) [۶]

Fig. 4. Location of Studied Area in North of Oman [6]

میزان واکنش پذیری کانی های مختلف رسی با توجه به تفاوت سطح موثر در تماس با آب آن ها و میزان این کانی ها در هر ترکیب خاک باعث تفاوت شاخص های

جدول 5. پتانسیل تورم و مشخصات خمیری نمونه خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق

Table 5. The swelling potential and plasticity properties of the studied soils in this research

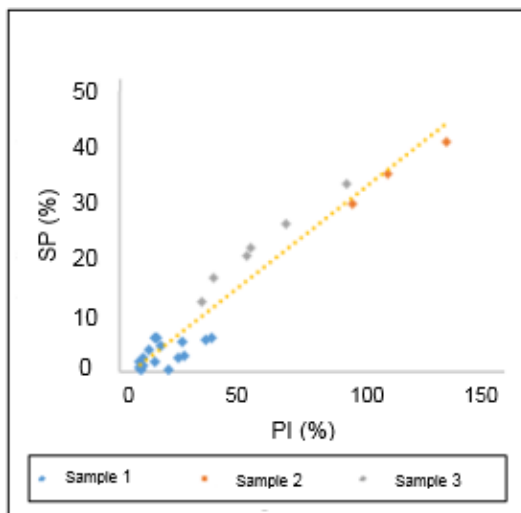
Reference	LL	PI	SP	Soil Type
Sudjianto et al. 2011	60	25	2.7	MH
Sudjianto et al. 2011	57	19	0	MH
Sudjianto et al. 2011	54	9	0	MH
Sudjianto et al. 2011	62	24	5.43	MH
Sudjianto et al. 2011	59	16	4.57	MH
Sudjianto et al. 2011	54	12	3.67	MH
Sudjianto et al. 2011	61	33	5.96	CH
Sudjianto et al. 2011	54	35	6.1	CH
Sudjianto et al. 2011	55	15	6.04	MH
Sudjianto et al. 2011	53	14	6	MH
Sudjianto et al. 2011	56	8	1.4	MH
Sudjianto et al. 2011	54	10	2.45	MH
Sudjianto et al. 2011	56	23	2.2	MH
Sudjianto et al. 2011	51	8	0.25	MH
Sudjianto et al. 2011	49	14	1.62	ML
Sudjianto et al. 2011	50	10	0.9	MH
Amer A. Al-Rawas et al-2005	119.75	87.83	32.02	CH
Amer A. Al-Rawas et al-2005	13.6.66	100.44	37.94	CH
Amer A. Al-Rawas et al-2005	163.03	122.8	43.82	CH
Nayak and Christensen-1971	75.6	48.1	21.8	CH
Nayak and Christensen-1971	55.9	31.3	13.3	CH
Nayak and Christensen-1971	66.8	35.9	17.9	CH
Nayak and Christensen-1971	107.2	85.1	35.8	CH
Nayak and Christensen-1971	70.7	94.4	23.4	CH
Nayak and Christensen-1971	89.9	62.5	28.2	CH

$$SP = -17.94575 + 0.42455 LL, R^2 = 0.85 \quad (1)$$

که در آن SP پتانسیل تورم پذیری خاک و LL حد روانی خاک می باشد.

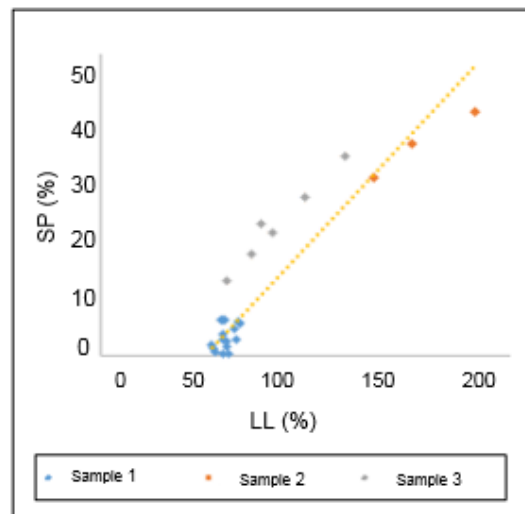
در تحقیق حاضر رابطه پتانسیل تورم و حد مایع داده‌ها طبق رابطه (1) بدست آمده است و در شکل شماره 5 نشان داده شده است:

برآورد میزان تورم پذیری خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد



شکل 6. رابطه پتانسیل تورم و شاخص خمیری

Fig. 6. The relation of swelling potential and plasticity index



شکل 5. رابطه پتانسیل تورم و حد مایع

Fig. 5. The relation of swelling potential and liquid limit

از این رو در ادامه سعی می‌شود با اعمال آنالیز رگرسیون خطی چند متغیره سعی شده است تا اثر همزمان شاخص خمیری و حد مایع بررسی گردد. جهت ساده بودن مدل پیش بینی رابطه پیشنهادی خطی در نظر گرفته شده و رابطه شماره (۴) بدست آمده است:

(۴)

$$SP = 0.04915 - 0.08438 LL + 0.49052 PI \quad R^2 = 0.93$$

که در آن SP پتانسیل تورم پذیری، LL حد روانی و PI شاخص خمیری خاک می باشد.

جهت تخمین میزان خطا در مقایسه مقادیر تخمین زده شده با مقادیر واقعی روش‌های مختلفی وجود دارد. طبق نظر عمر سیمین و همکاران روش خطای مجذور میانگین (RMSE) و خطای مطلق (MAE) طبق روابط (۵) و (۶) بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{i,me} - X_{i,es})^2}{N}}$$

(۵)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{i,me} - X_{i,es}|$$

(۶)

مقدار N برابر تعداد داده‌ها، $X_{i,me}$ مقدار پتانسیل تورم اندازه‌گیری شده بر اساس آزمایش و $X_{i,es}$

ب- شاخص خمیری

از مهم‌ترین پارامترها در اکثر روابط پیش‌بینی میزان پتانسیل تورم خاک‌ها میزان شاخص خمیری می‌باشد. در میان روابط ارائه شده در جدول شماره یک حتی بعضی از محققین رابطه‌ی پتانسیل تورم را صرفاً بر اساس این پارامتر ارائه نموده‌اند. در این میان رابطه‌ی ارائه شده توسط سید و همکاران که برای نمونه‌های دست خورده می‌باشد طبق رابطه (۲) ارائه شده است:

$$SP = 0.0036PI^{2.44}$$

(۲)

که در آن SP پتانسیل تورم پذیری خاک و PI شاخص خمیری خاک می باشد.

برای داده‌های مورد مطالعه در این تحقیق رابطه‌ی پتانسیل تورم با شاخص خمیری به شکل رابطه (۳) به دست آمده و در شکل شماره ۶ نشان داده شده است:

$$SP = -2.74751 + 0.41426 \times PI \quad R^2 = 0.93$$

(۳)

در این پژوهش روابط شماره ۱ و ۳ طبق مدل پیش بینی تک متغیره خطی به دست آمده‌اند. جهت بررسی آنالیز رگرسیون بین متغیرهای مورد مطالعه از نرم افزار دیزاین اکسپرت استفاده شده است [۲۱].

همانگونه که مشاهده می‌شود در میان پارامترهای خمیری خاک، شاخص خمیری بیشترین میزان همبستگی را با پتانسیل تورمی خاک‌ها دارد.

نشان دهنده میزان پتانسیل تورم پیش بینی شده می باشد. این میزان خطاها نشان دهنده مقدار متوسط تفاوت بین همه داده های اندازه گیری شده و تخمین زده شده می باشد. مقدار خطای کمتر نشان دهنده دقت بهتر مدل پیش بینی خواهد بود [۳].

جدول 6. مقایسه پتانسیل تورم نمونه های مورد مطالعه طبق مدل حاضر و مدل ارائه شده توسط سید و همکاران

Table 6. Comparison of the swelling potential of the studied samples according to the present model and the proposed model by Seed et al

LL	PI	Actual swelling Potential (%)	Proposed Relationship (Equation (4))	Seed et al Equation (2)
75.6	48.1	21.8	17.69	45.79
55.9	31.3	13.3	10.91	16.05
66.8	35.9	17.9	12.43	22.43
107.2	85.1	35.8	33.37	184.22
70.7	94.4	23.4	18.61	48.86
89.9	62.5	28.2	23.67	86.75
119.75	87.83	32.02	33.90	198.97
13.6.66	100.44	37.94	40.28	276.03
163.03	122.8	43.82	44.99	450.76
60	25	2.7	7.66	9.27
57	19	0	4.98	4.75
54	9	0	0.41	0.77
62	24	5.43	7.06	8.39
59	16	4.57	3.43	3.12
54	12	3.67	1.84	1.55
61	33	5.96	11.40	18.26
54	35	6.1	12.78	21.08
55	15	6.04	3.20	2.67
53	14	6	2.85	2.25
56	8	1.4	0	0.85
54	10	2.45	0.89	0.99
56	23	2.2	6.95	7.57
51	8	0.25	0.12	0.58
49	14	1.62	3.09	2.25
50	10	0.9	1.13	0.99
Root Mean Square Error (RMSE)			3.41	105.33
Mean Absolute Error(MAE)			2.88	45.50
Coefficient of Correlation(R ²)			0.93	0.88

در جدول شماره ۶ مقادیر میزان تورم با مقادیر حاصل شده بر اساس مدل پیش بینی توسط رابطه های ۱ تا ۴ و

برآورد میزان تورم پذیری خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد

۵- نتیجه‌گیری

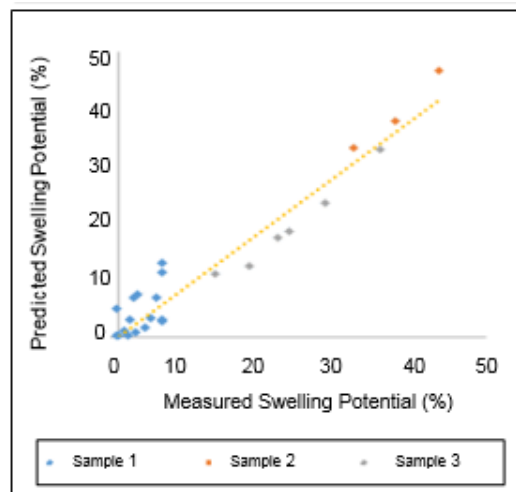
در این پژوهش نشان داده شد که طبق تحقیقات گذشته پارامترهای خمیری خاک تاثیر زیادی در میزان تورم پذیری خاک‌ها دارند که در این میان شاخص خمیری نسبت به حد مایع خاک تاثیر بیشتری دارد.

از این رو با استفاده از داده‌های سه نوع خاک رس مختلف به صورت تصادفی از سه منطقه گوناگون از چند کشور با مشخصات مختلف و در نظر گرفتن تاثیر هم زمان هر دو پارامتر شاخص خمیری و حد مایع بر میزان پتانسیل تورم خاک‌های رسی، رابطه جدیدی (رابطه شماره ۴)

ارائه گردید که میزان دقت قابل قبولی دارد (ضریب همبستگی ۰/۹۳). از آنجایی که در رابطه مذکور فقط از شاخص‌های خمیری خاک استفاده شده است و این شاخص‌ها در آزمایشگاه به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد، رابطه ارائه شده جهت تخمین سریع و آسان پتانسیل تورم پذیری خاک‌های رسی دست خورده پیشنهاد می‌گردد. این رابطه برای هر نمونه از خاک‌های ریزدانه دست خورده با خاصیت خمیری بالا که حد مایع و شاخص خمیری مشابه با مقادیر مذکور در خاک‌های مورد مطالعه داشته باشند قابل استفاده می‌باشد.

مراجع

- [1] Komine, H. and N. Ogata, "Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite", Canadian geotechnical journal, 31(4): p. 478-490. 1994.
- [2] Al-Mhaidib, A.I., "Swelling behaviour of expansive shales from the middle region of Saudi Arabia", Geotechnical & Geological Engineering, 16(4): p. 291-307. 1998.
- [3] Çimen, Ö., S.N. Keskin, and H. Yıldırım, "Prediction of swelling potential and pressure in compacted clay", Arabian Journal for Science and Engineering, 37(6): p. 1535-1546. 2012.
- [4] Nwaiwu, C. and I. Nuhu, "Evaluation and prediction of the swelling characteristics of Nigerian black clays", Geotechnical & Geological Engineering, 24(1): p. 45-56. 2006.



شکل 7. مقایسه پتانسیل تورم پیش بینی شده و اندازه‌گیری شده (با توجه به رابطه شماره ۴)

Fig. 7. Comparison of measured and predicted swelling potential (Equation 4)

برای رابطه‌ی ارائه شده‌ی نهایی مقادیر خطای مجذور میانگین و خطای مطلق به ترتیب برابر 3.41 و 2.88 حاصل شده است که این مقادیر نسبت به مقادیر مشابه حاصل شده از رابطه‌ی سید و همکاران کمتر می‌باشد. بنابراین اگر خاکی با مقادیر شاخص خمیری و حد مایع در محدوده مقادیر مربوط به خاک‌های مورد مطالعه در اختیار باشد برای تخمین میزان پتانسیل تورم پذیری آنها می‌توان از رابطه (۴) استفاده نمود.

همانطور که پیش تر ذکر شد به دست آوردن شاخص‌های خمیری خاک در مقایسه با دیگر پارامترهای موثر در روابط تعیین پتانسیل تورمی خاک در آزمایشگاه به راحتی و با هزینه پایین تری صورت می‌گیرد. همچنین میزان تورم پذیری خاک‌ها و دیگر خصوصیات رفتاری رس‌ها با این شاخص‌ها رابطه مستقیمی دارند. بنابراین می‌توان گفت رابطه نهایی بدست آمده در این تحقیق از جهات زیر حایز اهمیت می‌باشد:

- الف: راحتی بدست آوردن پارامترهای موثر در رابطه
- ب: صرفه جویی در زمان و هزینه جهت پیش بینی رفتار تورم پذیری رس‌ها
- پ: دقت نسبتا بالا با ضریب همبستگی نسبتا زیاد و میزان خطای کم
- ت: استفاده از نتایج نمونه‌های خاک چند منطقه مختلف

and activity in swelling vertical of expansive soil", 2011.

[17] Nayak, N.V. and R. Christensen, "Swelling characteristics of compacted expansive soils", Clays and Clay Minerals, 19(4): p. 251-261. 1971.

[18] Seed, H. and R. Lundgren, "Prediction of swelling potential for compacted clays", Journal of the soil mechanics and foundations division, 88(3): p. 53-88. 1962.

[19] Yilmaz, I., "Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity", Engineering Geology, 85(3): p. 295-301. 2006.

[20] Thomas, P., J. Baker, and L. Zelazny, "An expansive soil index for predicting shrink-swell potential", Soil Science Society of America Journal, 64(1): p. 268-274. 2000.

[21] Expert, D., "Reference Manual". Version 7.0.0., 2005.

[5] Sabtan, A. A., "Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia", Journal of Asian Earth Sciences, 25(5): p. 747-757. 2005.

[6] Al-Rawas, A.A., A. Hago, and H. Al-Sarmi, "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman", Building and Environment, 40(5): p. 681-687. 2005.

[7] Nelson, J. and D. Miller, "Treatment of Expansive Soils Problem and Practice in Foundation and Pavement", John Willey & Sons, Inc., New York. 1992,

[8] Elmashad, M.E. and A.A. Ata, "Effect of seawater on consistency, infiltration rate and swelling characteristics of montmorillonite clay", HBRC Journal, 12(2): p. 175-180. 2016.

[9] Snethen, D. "Evaluation of expedient methods for identification and classification of potentially expansive soils", in Fifth International Conference on Expansive Soils : Preprints of Papers. 1984. Institution of Engineers, Australia. 1984

[10] Erguler, Z.A. and R. Ulusay, "A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey) Clay", Engineering Geology, 67(3): p. 331-352, 2003.

[11] Rahimi, H. and S. Barootkoob, "Concrete canal lining cracking in low to medium plastic soils", Irrigation and Drainage, 51(2): p. 141-153. 2002.

[12] Al-Yaqoub, T.H., J. Parol, and D. Znidarcic, "Experimental investigation of volume change behavior of swelling soil", Applied Clay Science, 137: p. 22-29. 2017.

[13] Chu, Y., et al., "Evaluation on expansive performance of the expansive soil using electrical responses", Journal of Applied Geophysics, 148: p. 265-271. 2018.

[14] Azam, S., et al., "Study on swelling properties of an expansive soil deposit in Saskatchewan, Canada", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72(1): p. 25-35. 2013.

[15] Chen, F.H., Foundations on expansive soils. Vol. 12. 2012: Elsevier.

[16] Sudjianto, A.T., K.B. Suryolelono, and I.B. Mochtar, "The effect of variation index plasticity