

# ارزیابی پتانسیل تورم آزاد خاکهای رسی متراکم شده

ایمان عشایری<sup>۱</sup>، سید شهاب الدین یثربی<sup>۲\*</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار ژئوتکنیک، گروه مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

\* تهران، صندوق پستی ۱۵۹-۱۴۱۱۵

yasrobis@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: اسفند ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: مهر ۱۳۸۴)

**چکیده**- رفتار تورمی معمولاً در خاکهایی مشاهده می شود که به اندازه لازم ذرات ریزدانه رسی داشته باشند. تمایل به جذب آب در این ذرات و تغییر در رطوبت طبیعی خاک در اثر تغییر آب و هوای محل، موجب می شود که خاک گاه تا حد درصد رطوبت حد پلاستیک مرطوب شده و سپس تا پایین تر از حد انقباض، رطوبت خود را از دست دهد. جذب رطوبت باعث ازدیاد حجم خاک و از دست دادن آن، باعث انقباض و کاهش حجم خاک می شود. تغییرات حجمی ناشی از تغییر درصد رطوبت خاک، باعث وارد آمدن خسارت به سازه های موجود در سطح خاک می شود. این نشان دهنده اهمیت مطالعات لازم برای شناسایی رفتار تغییر حجم و فشار تورمی خاکهای ریزدانه است. پتانسیل تغییر حجم به طور مستقیم به میزان فعالیت کانی رسی غالب در خاک و به عبارت دیگر به پلاستیسیته خاک بستگی دارد. در کنار مجموعه عواملی که بیان کننده ترکیبات خاک هستند، مجموعه عوامل محیطی نیز در آزاد شدن این پتانسیل مؤثرند. در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی میزان تأثیر خصوصیات پلاستیک خاک، شرایط تراکم و درصد رطوبت، ۵ نمونه خاک ریزدانه رسی با شاخص خمیری ۱۰ تا ۵۰ درصد مطالعه شد. مطالعات کانی شناسی و تجزیه شیمیایی همراه با آزمایش تورم آزاد بر روی نمونه های متراکم شده از خاکهای مورد مطالعه، انجام شده است. نتایج آزمایشهای انجام شده نشان می دهد که عواملی مانند نوع کانی رسی، کاتیونهای جذب شده به ذرات رس، دامنه خمیری، درصد رس، درصد رطوبت، چگالی و تراکم، مقدار تورم آزاد خاک متراکم شده را تحت تأثیر قرار می دهند.

**کلید واژگان:** خاکهای رسی، خاکهای متورم شونده، تورم آزاد، شرایط تراکم.

## ۱- مقدمه

به طور کلی اغلب سازه هایی که در آنها خاک رس در تماس با آب است، در معرض خطر خرابی ناشی از تورم قرار دارند.

منشأ خاکهای متورم شونده به ترکیب پیچیده ای از شرایط و فرایندها مانند ترکیب مواد اولیه سازنده و درجه هوازدگی این مواد -که تشکیل کانی های رسی را نتیجه می -دهند- وابسته است. در مسائل مکانیک خاک، سه کانی

برای اولین بار در سال ۱۹۳۸ اداره بهسازی زمین ایالات متحد آمریکا مسأله تورم در خاک را از دیدگاه مکانیک خاک شناسایی نمود؛ از آن زمان به بعد مهندسان به این نکته پی بردند که دلایل خرابی ساختمانها می تواند چیزی به غیر از نشست در سازه ها باشد [۱]. راهها، دیوارهای حایل، پی ساختمانها، سدها و

کیلوپاسکال بوده است. عوامل موثر بر تورم آزاد نمونه بر سه بخش زیر تقسیم بندی شده است:

۱-۲- ترکیب خاک: همانطور که به اختصار اشاره شد، تورم تابعی از فعالیت و نوع کانیهای موجود در خاک است. در نتیجه درصد ذرات رس، نوع کانی رسی موجود در خاک و کاتیونهای جذب شده در لایه دوگانه ذرات رس - که تعیین کننده ترکیب خاک است - نقش مؤثری در رفتار تورمی خاکهای ریزدانه دارند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که پتانسیل تورم، با وجود کانی رسی مونت- موریلونیت در خاک نسبت مستقیم دارد [۱]. از طرفی در صورت یکسان بودن نوع کانی، افزایش درصد رس در نمونه نیز باعث افزایش پتانسیل تورم می‌شود [۳]. در کنار مسائل عنوان شده، میزان تأثیر درصد ذرات درشت دانه بر تورم آزاد مطالعه شده است که پتانسیل تورم نمونه خاک ریزدانه بر اثر افزایش درصد ذرات درشت‌تر از ۴/۷۵ میلی- متر و ریزتر از ۹/۵ میلی-متر، کاهش یافته و افزایش درصد این ذرات بیش از ۱۰٪ باعث کاهش شدید در پتانسیل تورم شده است [۴].

۲-۲- شرایط محیطی: یک نمونه خاک ممکن است بسته به شرایط متنوع محیطی، رفتار تورمی متفاوتی داشته باشد. با توجه به نظر لمب [۵] و السن [۶] که "درصد رطوبت و چگالی خشک نمونه تعیین‌کننده بافت و ساختمان خاکهای متراکم شده است" در نتیجه تورم آزاد نمونه‌هایی که در درصد رطوبت و چگالی خشک متفاوت متراکم شده‌اند، یکسان نخواهد بود. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که نمونه‌هایی که با درصد رطوبت و چگالی خشک کم متراکم شده‌اند، تورم آزاد کمتری دارند. هرچه نمونه‌ها متراکم‌تر یا نسبت تخلخل کمتری داشته باشند پتانسیل تورم بیشتری دارند. علاوه بر درصد رطوبت و چگالی، سایر شرایط محیطی نظیر مقدار سربار روی نمونه، دوره‌های خشک و تر شدگی که خاک در گذشته تجربه کرده نیز در پتانسیل تورم مؤثر است [۸،۷].

رسی مونت-موریلونیت، ایلیت و کائولینیت بیشتر مورد توجه است. مونت-موریلونیت نوعی کانی رسی است که در اغلب خاکهای متورم شونده مشاهده می‌شود [۱]. تشکیل رسهای متورم شونده مثل مونت-موریلونیت به وجود محیطهای بازی و حضور کانیهای فلزی مثل آهن و منیزیم در شرایطی که کاتیونهای موجود در محیط از سیستم خارج نشوند وابسته است. در صورت بالا بودن درجه حرارت و طولانی بودن مدت زمان هوازدگی و سنگهای آهنی در محیط، احتمال تشکیل کائولینیت و در صورت حضور پتاسیم، احتمال تشکیل ایلیت بیشتر است [۲]. علاوه بر خصوصیات کانیهای موجود در خاک، پتانسیل تورم خاک، به شرایط محیطی مانند درصد رطوبت، چگالی خشک، سربار و حالت تنش نیز بستگی دارد [۱].

در این تحقیق رفتار تورمی ۵ نمونه خاک ریزدانه رسی که خصوصیات شیمیایی و نوع کانی آنها مشخص شده مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌هایی از خاکهای مورد مطالعه، با درصد رطوبت و چگالی خشک اولیه متفاوت آماده سازی شده و تحت آزمایش تورم آزاد قرار گرفته است. نتایج این آزمایشها ارزیابی کاملی از میزان تأثیر خصوصیات فیزیکی-شیمیایی، بافت و ساختمان خاک بر پتانسیل تورم به دست می‌دهند.

## ۲- عوامل مؤثر بر تورم خاکهای رسی

تورم آزاد به معنای درصد تغییر حجم نمونه به حجم اولیه آن است در شرایطی که سربار ناچیزی بر روی نمونه قرار دارد. از آنجا که به‌طور معمول آزمایشهای تورم آزاد در دستگاه تحکیم یک‌بعدی انجام می‌شود، این نسبت برابر تغییر ضخامت، به ضخامت اولیه نمونه خواهد بود. سربار مورد استفاده در این تحقیق (حداقل مقدار توصیه شده در ASTM D-4546) برابر ۱

عمدتاً مونت موریلونیت است. خاک S3 نیز دارای ترکیبی از سه کانی مونت موریلونیت، کائولینیت و ایلیت است. مقایسه درصد ریزدانه و درصد ذرات رس و مطالعات کانی شناسی برای این ۵ نمونه نشان می‌دهد که نمونه‌های S4 و S5، بیشتر در مقدار درصد ذرات سیلتی و رسی متفاوتند. نمونه S3 نیز نسبت به دو نمونه S4 و S5 دارای درصد سیلت بیشتر و کانیهایی با فعالیت کمتر است. مطالعات دانه‌بندی نشان می‌دهد که در نمونه S5 ذرات رس بیشترین سهم را داشته و بافت غالب را تشکیل می‌دهند درحالی‌که در سایر نمونه‌ها بافت غالب را ذرات سیلتی می‌سازند. ضریب فعالیت دو نمونه S1 و S2 نیز آنها را در طبقه خاکهای ریزدانه رسی با دامنه خمیری کم قرار می‌دهد.

مطالعه تجزیه شیمیایی بر روی عصاره بخش کوچکتر از ۲ میلی‌متر خاکها انجام شده است. برای تهیه این عصاره مخلوطی به نسبت ۲ به ۱ آب مقطر و خاک تهیه و به مدت یک ساعت در مخلوط‌کن و لرزاننده به‌خوبی مخلوط و سپس مخلوط با ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت یک ساعت سانتریفوژ شد تا عصاره از بخش جامد جدا شود. کاتیونهای سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم موجود در عصاره به روش جذب اتمی اندازه‌گیری شد (جدول ۲). بنابراین آزمایشها، کاتیونهای موجود در خاکهای S4 و S5 که دارای کانی یکسانی بودند، متفاوت است که امکان بررسی تأثیر نوع کاتیون را فراهم می‌سازد.

۲-۳- ترکیب سیال: علاوه بر کلیه شرایطی که گویای ترکیب و وضعیت محیطی نمونه خاک است، رفتار هر نمونه خاک در معرض سیالات با خصوصیات متفاوت نیز متفاوت است. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که رفتار تورمی خاکهای ریزدانه در معرض یک سیال، با بررسی تأثیر سیال بر مشخصات لایه جذبی دوگانه ذرات رس قابل توجیه است. سیالاتی که باعث کاهش ضخامت لایه جذبی دوگانه می‌شوند، منجر به کاهش پتانسیل تورم خاک می‌گردند و سیالاتی که باعث افزایش ضخامت این لایه می‌شوند نیز پتانسیل تورم را افزایش می‌دهند [۹].

در این تحقیق به بررسی اثرهای دو دسته عوامل ترکیب خاک و شرایط محیطی پرداخته شده است.

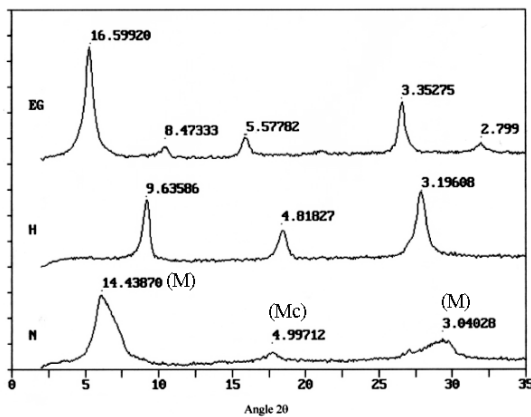
### ۳- مصالح مورد مطالعه در این تحقیق

به منظور مطالعه اثر نوع کانی رسی، درصد ذرات رس و شرایط تراکم بر پتانسیل تورم آزاد خاکهای رسی، ۵ نمونه خاک در این تحقیق مطالعه شده است. جدول ۱ مشخصات فیزیکی ۵ نوع خاک را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این ۵ نمونه خاک محدوده وسیعی از دامنه خمیری را پوشش می‌دهند. مطالعات کانی شناسی برای سه نمونه S3، S4 و S5 انجام شده که نتایج آن در شکل‌های ۱ تا ۳ ارائه شده است. مطابق شکل‌ها کانی رسی خاکهای S4 و S5 بسیار مشابه و

جدول ۱ ترکیب و خصوصیات فیزیکی خاکهای مورد مطالعه

نمونه خاک	درصد ماسه (%)	درصد سیلت (%)	درصد رس (%)	حد روانی (%)	دامنه خمیری (%)	فعالیت خاک (A)	وزن مخصوص	طبقه‌بندی USCS
S1	۲۵	۵۴	۲۱	۲۸	۸	۰/۴	۲/۸۳	CL
S2	۶	۶۸	۲۶	۳۶	۱۶	۰/۶	۲/۸۴	CL
S3	۲۱	۵۱	۲۸	۴۸	۱۹	۰/۷	۲/۷۲	ML
S4	۳۰	۴۱	۲۹	۶۸	۳۹	۱/۳	۲/۵۱	CH
S5	۳۱	۳۱	۳۸	۷۶	۵۰	۱/۳	۲/۶۵	CH

درصد رس: ذرات کوچکتر از ۲ میکرون، A=PI/C



شکل ۳ طیف انکسار اشعه ایکس برای نمونه S5

میکا (Mc)، ایلیت (I)، کائولینیت (K)، مونت موریلونیت (M)،

کوارتز (Q)، کربنات (C)، فلدسپار (F)

این آزمایشها بر روی نمونه‌های متراکم شده این خاکها در نواحی خشک، بهینه و تر منحنی تراکم استاندارد (ASTM D-1557) و اصلاح شده (ASTMD-698) انجام شده است. بازسازی نمونه‌ها به صورت استاتیکی و به وسیله جک هیدرولیکی انجام شده است [۱۰]. نمونه متراکم شده درون قالب آزمایش تورم قرار داده شده و سپس قالب از آب پر می‌شود به طوری که نمونه غرقاب شود. نمونه از اطراف در یک رینگ محصور شده است در نتیجه فقط در یک بعد تغییر شکل می‌یابد. تغییر ارتفاع نمونه بر اثر جذب آب یادداشت می‌شود. آزمایش تا زمان پایان یافتن تورم کوتاه مدت (تورم اولیه) ادامه دارد. شکل ۴ نحوه تعیین مقدار تورم کوتاه مدت یا تورم اولیه را نشان می‌دهد. از روی این نمودار مقدار تورم آزاد اولیه مطابق رابطه ۱ به دست می‌آید.

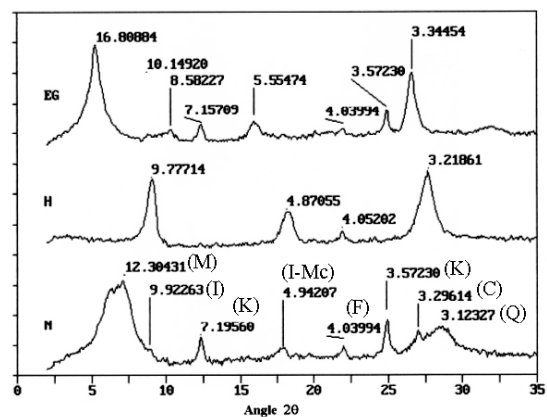
$$S_{wp} = \frac{\Delta h}{H} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $\Delta h$ ، تغییر ارتفاع نمونه و  $H$ ، ارتفاع اولیه نمونه است.

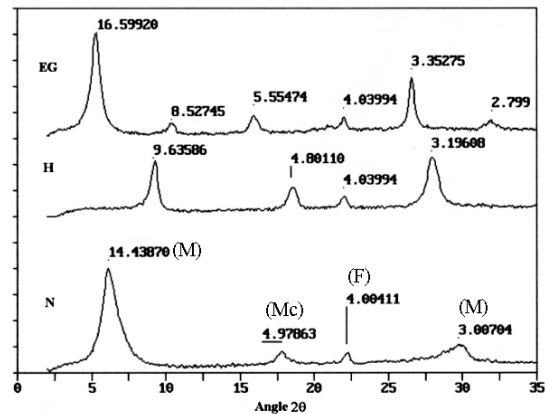
مقادیر درصد رطوبت، چگالی خشک، درصد اشباع و نسبت تخلخل اولیه و نهایی همراه با درصد تورم آزاد اولیه برای ۳۶ آزمایش تورم آزاد در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی خاکهای مورد مطالعه

خاک	کاتیونهای موجود در عصاره خاک (ppm)			
	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	N <sup>+</sup> a
S1	۶	۴۰	۴	۱۰
S2	۱۵۰	۸۰۰	۶	۱۴۰
S3	۳	۸۰۰	۲۰	۸
S4	۱۰	۵۰۰	۱۱	۵۰
S5	۲۰	۰/۵	۲۲۰	۲۱۰



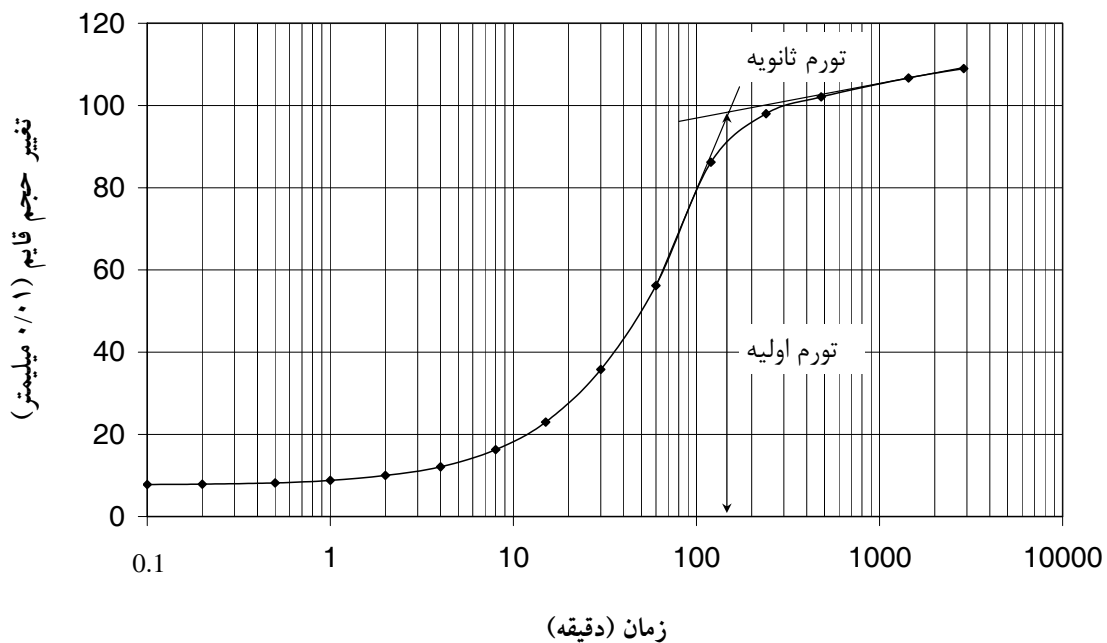
شکل ۱ طیف انکسار اشعه ایکس برای نمونه S3



شکل ۲ طیف انکسار اشعه ایکس برای نمونه S4

#### ۴- برنامه آزمایشهای تورم آزاد

بر روی ۵ نمونه خاک مورد مطالعه ۳۶ آزمایش تورم آزاد مطابق استاندارد ASTM D-4546 انجام شده است.



شکل ۴ روش تعیین تورم اولیه و ثانویه

روی سطوح خود نیاز داشته باشند؛ در حالی که وجود کاتیونهای ضعیفتری مانند  $\text{Na}^+$  و  $\text{K}^+$  به علت دارا بودن لایه جذبی دوگانه بزرگتر - آب بیشتری را برای خشی شدن بارهای منفی جذب می کنند و در نتیجه تورم بیشتری دارند. تشابه نسبی خصوصیات شیمیایی نمونه های S3 و S4 و همچنین تشابه درصد رس موجود در این دو نمونه نشان می دهد که اگرچه وجود ذرات سیلتی بیشتر و کانیایی با فعالیت کمتر در نمونه S3 موجب کمتر شدن قابل توجه حدود آتربرگ S3 از S4 شده است، وجود کانی مونت موریلونیت پتانسیل تورم لازم را در نمونه S3 تامین کرده است.

مطابقت خوبی بین معیار تعریف شده توسط اداره آبادانی زمین ایالات متحد امریکا بر اساس حدود آتربرگ و درصد محتویات کلوییدی و نتایج به دست آمده از آزمایشهای تورم آزاد در این تحقیق مشاهده می شود (جدول ۴). بنابراین اگرچه تحلیل دقیق رفتار تورمی خاکها نیاز به شناسایی کامل آنها دارد اما در کارهای عملی می توان به اطلاعاتی که سه پارامتر درصد رس، حد روانی و دامنه خمیری از ترکیب فیزیکی-شیمیایی خاک در اختیار می دهد استفاده کرد.

نتایج به دست آمده نشان می دهد که میزان حساسیت کمیت تغییر حجم نمونه هایی که در ناحیه تر متراکم شده اند، با نمونه هایی که در ناحیه خشک متراکم شده اند، متفاوت است. منحنی تورم آزاد بر حسب درصد رطوبت، نقطه بیشینه ای در ناحیه خشک منحنی تراکم دارد. درصد رطوبت متناظر با مقدار بیشینه تورم، بسته به نوع خاک، بین صفر تا پنج درصد رطوبت در ناحیه خشک قرار دارد.

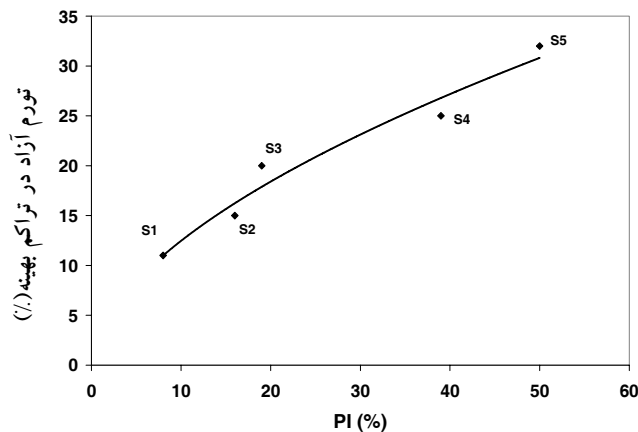
## ۵- تأثیر ترکیب خاک بر پتانسیل تورم

شکل ۵ درصد تورم آزاد اولیه ۵ خاک مورد مطالعه را در نقطه تراکم بهینه نسبت به دامنه خمیری نشان می دهد. با توجه به مطالعات کانی شناسی انجام شده، خاکهای S4 و S5 کانی مونت موریلونیت دارند. تفاوت مشاهده شده در درصد تورم این دو نمونه، می تواند ناشی از تفاوت در درصد رس و کاتیونهای جذب شده به سطوح ذرات رس باشد. وجود نسبت بیشتری از کاتیون دو ظرفیتی  $\text{Ca}^{2+}$  باعث می شود که ذرات رس، به آب کمتری برای خشی شدن بار الکتریکی منفی بر

جدول ۳ نتایج آزمایشهای تورم آزاد

$S_{wp}$ (%)	$e_f$	$e_i$	$Sr_f$	$Sr_i$	$\gamma_{af}$ ( $kN/m^3$ )	$\gamma_{di}$ ( $kN/m^3$ )	$w_f$ (%)	$w_i$ (%)	نمونه
			(%)	(%)					
۱۰/۵	۰/۸۱	۰/۶۲	۸۸	۳۹	۱۵/۳	۱۷/۱	۲۵/۳	۸/۷	S1-S-1
۸	۰/۶۵	۰/۵	۹۱	۷۶	۱۶/۹	۱۸/۵	۲۰/۷	۱۳/۴	S1-S-2
۵	۰/۶۴	۰/۵۶	۸۹	۸۲	۱۶/۹	۱۷/۸	۲۰/۱	۱۶/۳	S1-S-3
۱۶/۸	۰/۷۱	۰/۴۵	۹۴	۵۰	۱۶/۲	۱۹/۱	۲۳/۸	۸	S1-M-1
۱۵/۳	۰/۶۷	۰/۴۳	۸۹	۶۴	۱۶/۶	۱۹/۴	۲۱/۲	۹/۷	S1-M-2
۹/۲	۰/۵۷	۰/۴۴	۹۱	۸۶	۱۷/۷	۱۹/۳	۱۸/۲	۱۳/۳	S1-M-3
۴/۴	۰/۵۷	۰/۵	۹۳	۸۹	۱۷/۷	۱۸/۵	۱۸/۷	۱۵/۷	S1-M-4
۱۳/۳	۱	۰/۷۷	۸۸	۳۱	۱۳/۹	۱۵/۷	۳۱/۴	۸/۴	S2-S-1
۱۵/۳	۰/۹	۰/۶۵	۸۹	۴۴	۱۴/۶	۱۶/۹	۲۸/۳	۱۰	S2-S-2
۱۵/۶	۰/۸۷	۰/۶۱	۸۸	۵۶	۱۴/۸	۱۷/۳	۲۷/۲	۱۲	S2-S-3
۱۳/۶	۰/۸	۰/۵۸	۸۹	۶۷	۱۵/۴	۱۷/۶	۲۵/۳	۱۳/۹	S2-S-4
۶/۶	۰/۶۷	۰/۵۶	۹۲	۸۶	۱۶/۷	۱۷/۸	۲۱/۷	۱۷/۱	S2-S-5
۳/۲	۰/۶۸	۰/۶۲	۹۱	۸۷	۱۶/۵	۱۷/۱	۲۱/۸	۱۹/۲	S2-S-6
۱۹	۱/۰۳	۰/۶۹	۸۷	۳۳	۱۳/۷	۱۶/۵	۳۱/۷	۷/۹	S2-M-1
۲۰/۳	۰/۹۵	۰/۶	۸۶	۴۲	۱۴/۳	۱۷/۴	۲۸/۸	۸/۹	S2-M-2
۱۹/۵	۰/۸۷	۰/۵۶	۹۱	۵۰	۱۴/۹	۱۷/۹	۲۷/۸	۹/۸	S2-M-3
۱۷/۹	۰/۸	۰/۵۲	۹۰	۷۰	۱۵/۵	۱۸/۳	۲۵/۴	۱۲/۸	S2-M-4
۱۵/۴	۰/۷	۰/۴۸	۹۳	۸۳	۱۶/۴	۱۸/۸	۲۳	۱۴	S2-M-5
۳/۸	۰/۶۵	۰/۵۷	۸۹	۸۷	۱۶/۹	۱۷/۸	۲۰/۳	۱۷/۳	S2-M-6
۲۱	۱/۰۸	۰/۶۹	۹۰	۳۶	۱۲/۸	۱۵/۸	۳۶	۹/۳	S3-1
۲۰/۶	۱/۰۷	۰/۶۷	۸۷	۴۳	۱۲/۹	۱۶	۳۴/۳	۱۰/۵	S3-2
۲۱/۴	۰/۹۹	۰/۶۱	۸۸	۶۶	۱۳/۴	۱۶/۶	۳۲/۱	۱۴/۷	S3-3
۲۰	۰/۹۶	۰/۶	۸۷	۷۳	۱۳/۶	۱۶/۷	۳۰/۶	۱۶	S3-4
۱۴/۷	۰/۸۸	۰/۶۴	۹۱	۸۶	۱۴/۲	۱۶/۳	۲۹/۳	۲۰/۱	S3-5
۸/۲	۰/۸۸	۰/۷۴	۹۰	۸۶	۱۴/۲	۱۵/۳	۲۹/۲	۲۳/۵	S3-6
۲۳/۵	۱/۱۳	۰/۷	۹۴	۳۸	۱۱/۶	۱۴/۵	۴۲	۱۰/۷	S4-1
۲۲/۷	۱/۰۴	۰/۶۵	۹۴	۵۳	۱۲/۱	۱۴/۹	۳۹/۲	۱۳/۶	S4-2
۲۴/۴	۰/۹۴	۰/۵۵	۹۷	۷۳	۱۲/۶	۱۵/۸	۳۶/۵	۱۶	S4-3
۲۴/۴	۰/۹۲	۰/۵۴	۹۸	۸۹	۱۲/۸	۱۶	۳۵/۷	۱۹	S4-4
۱۷/۷	۰/۸۵	۰/۵۷	۹۷	۹۳	۱۳/۳	۱۵/۶	۳۳/۱	۲۱/۳	S4-5
۱۰/۴	۰/۸۳	۰/۶۵	۹۷	۹۲	۱۳/۴	۱۴/۹	۳۲/۳	۲۴	S4-6
۲۹/۳	۱/۱۶	۰/۶۷	۹۲	۳۵	۱۲	۱۵/۵	۴۰/۳	۸/۹	S5-1
۳۲/۱	۱/۱۳	۰/۶۱	۹۵	۴۸	۱۲/۲	۱۶/۱	۴۰/۵	۱۱/۱	S5-2
۳۴/۴	۱/۰۹	۰/۵۵	۹۶	۶۷	۱۲/۴	۱۶/۷	۳۹/۴	۱۳/۹	S5-3
۳۰	۱/۰۱	۰/۵۵	۹۵	۸۲	۱۲/۹	۱۶/۸	۳۶/۵	۱۶/۹	S5-4
۲۲/۱	۰/۹۶	۰/۶	۹۶	۹۰	۱۳/۳	۱۵/۴	۲۵/۵	۲۰/۴	S5-5

$S_{wp}$  چگالی خشک  $\gamma_d$ ، درصد رطوبت  $w$ ، تراکم اصلاح شده  $M$ ، تراکم استاندارد  $S$ ، درصد تورم اولیه  $S_{wp}$ ،  
حالت بعد از آزمایش  $f$ ، حالت پیش از آزمایش  $i$ ، نسبت تخلخل  $e$ ، درصد اشباع  $Sr$ .



شکل ۵ تورم آزاد اولیه در نقطه تراکم بهینه برای خاکهای مورد مطالعه

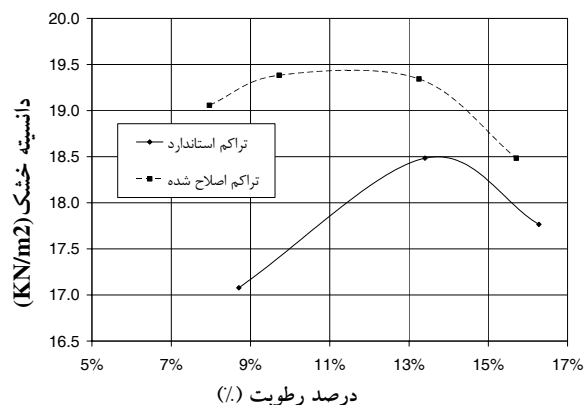
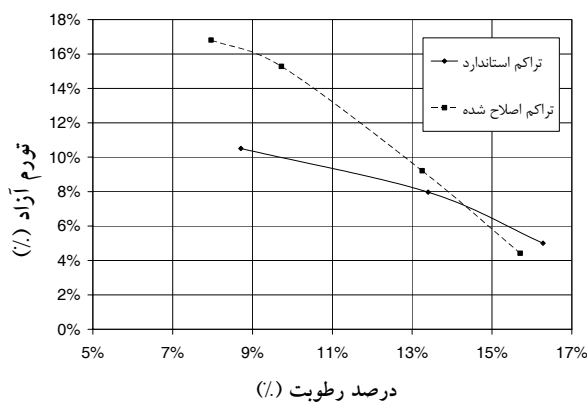
جدول ۴ معیار اداره آبادانی زمین ایالات متحد آمریکا برای طبقه‌بندی پتانسیل تورم خاکهای رسی [۱]

درجه تورم (کیفی)	پتانسیل تورم محتمل	حد انقباض	شاخص خمیری	درصد محتویات کلونیدی (کوچکتر از ۱ میکرون)
بسیار زیاد	بیشتر از ۳۰	کمتر از ۱۱	بیشتر از ۳۵	بیشتر از ۲۸
زیاد	۲۰-۳۰	۷-۱۲	۲۵-۴۱	۲۰-۳۳
متوسط	۱۰-۳۰	۱۰-۱۶	۱۵-۲۸	۱۳-۲۳
کم	کمتر از ۱۰	بیشتر از ۱۵	کمتر از ۱۸	کمتر از ۱۵

نمونه  $(\Delta V_v)$ ، از تغییر حجم فاز آب و هوا ناشی می‌شود، بنابراین رابطه (۲) بین تغییرات حجمی فاز سیال برقرار است.

$$\frac{\Delta V_v}{V_0} = \frac{\Delta V_w}{V_0} + \frac{\Delta V_a}{V_0} \quad (2)$$

که  $(\Delta V_w/V_0)$ ، تغییرات نسبی تغییر حجم فاز آب و  $(\Delta V_a/V_0)$ ، تغییرات نسبی تغییر حجم فاز هوا را نشان می‌دهد. مقادیر این تغییرات نسبی برای نقطه پایانی تورم آزاد نمونه‌های خاک S5 در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۶ بررسی تأثیر چگالی و انرژی تراکم بر تورم آزاد (خاک S1)

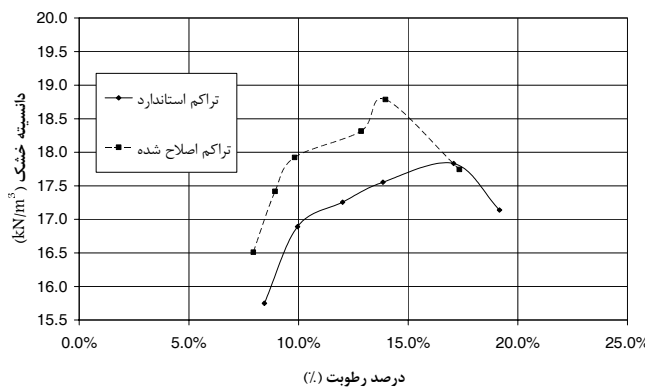
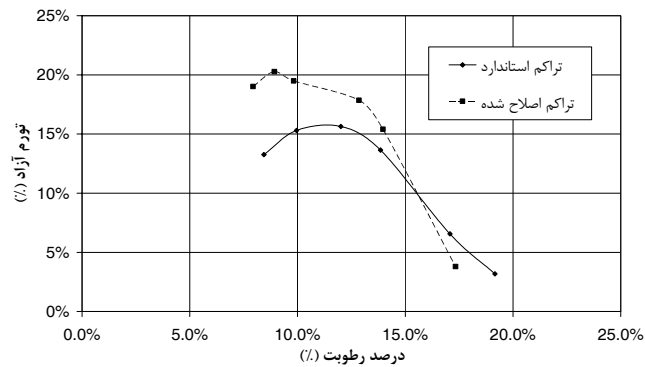
## ۶- تأثیر چگالی بر پتانسیل تورم

شکلهای ۶ و ۷ تأثیر چگالی بر تورم آزاد را برای دو خاک S1 و S2، نشان می‌دهند. همانطوری که مشاهده می‌شود افزایش چگالی خشک (یا افزایش انرژی تراکم) باعث افزایش تورم می‌شود. این افزایش برای نمونه‌هایی که در ناحیه خشک متراکم شده‌اند محسوس‌تر است. از سوی دیگر نمونه‌هایی که در ناحیه تر متراکم شده‌اند -به علت نزدیکتر شدن به درصد اشباع ۱۰۰٪- حساسیت کمتری نسبت به چگالی دارند. بیشتر بودن چگالی خشک در صورت یکسان بودن درصد رطوبت، به معنای نزدیکتر بودن ذرات رس و کمتر بودن حفره‌های بین ذرات است. در این صورت بر اثر جذب آب توسط ذرات رس تغییر حجم بیشتری حاصل می‌شود.

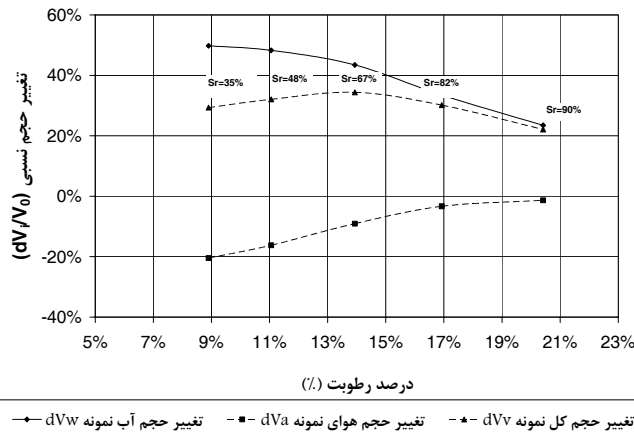
همانطوری که در شکلهای ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد رطوبت اولیه نمونه‌ها در ناحیه تر، میزان تورم آزاد نمونه‌ها در هر دو سطح تراکم کاهش می‌یابد. این مسأله به علت نزدیکتر شدن نمونه‌ها به درصد اشباع اولیه ۱۰۰ درصد و کاهش پتانسیل جذب آب آنها است که در بند ۷ توضیحات بیشتر ارائه شده است.

## ۷- روابط تغییر حجم در خاکهای غیر اشباع

پدیده تورم همراه با افزایش درصد اشباع خاک روی می‌دهد. در خاکهای غیر اشباع دو سیال آب و هوا در ترکیب خاک وجود دارند. تغییر حجم کل حفره‌های



شکل ۷ بررسی تأثیر چگالی و انرژی تراکم بر تورم آزاد (خاک S2)



شکل ۸ تغییر حجم نسبی فاز آب و هوا برای نمونه‌های خاک S5

مشخص کاهش می‌یابد؛ اما در نمونه‌هایی که درصد اشباع کم و نسبت تخلخل بالای اولیه دارند، فاز هوا پیوسته بوده و به راحتی قابل جایگزینی با آب جذب شده هستند، بنابراین به عنوان مثال این نمونه خاک در درصد رطوبت ۸/۹ حدود ۵۰ درصد حجم اولیه خود آب جذب می‌کند و از طرف دیگر به اندازه ۲۰ درصد حجم اولیه، حجم

همانطوری که در این شکل مشاهده می‌شود نمونه‌هایی که با درصد رطوبت و چگالی خشک اولیه کمتری آماده‌سازی شده‌اند، دارای تغییر حجم نسبی فاز آب بیشتری از نمونه‌هایی هستند که با درصد رطوبت بیشتری متراکم شده‌اند. به همین ترتیب تغییرات حجم نسبی فاز هوا نیز با افزایش درصد رطوبت روی منحنی تراکم



حفره‌های اشغال شده از هوا کاهش می‌یابد؛ در نتیجه حجم کل حفره‌های نمونه به اندازه ۳۰ درصد حجم اولیه افزایش می‌یابد. با اضافه شدن درصد رطوبت اولیه نمونه‌ها و همچنین افزایش چگالی خشک آنها، فاز هوای نمونه، پیوستگی خود را از دست داده و آب دیگر به راحتی نمی‌تواند هوا را از نمونه خارج کرده و جایگزین آن شود. این مسأله در حالی است که نمونه همچنان به طور نسبی خشک بوده و پتانسیل جذب آب بالایی دارد. بدین ترتیب جذب آب موجب تغییر حجم بیشتری می‌شود. به عنوان مثال نمونه‌ای که دارای درصد رطوبت ۱۳/۹ است، حدود ۴۵ درصد حجم اولیه آب جذب می‌کند و حدود ۱۰ درصد حجم اولیه، هوا از نمونه خارج می‌شود بنابراین حجم حفره‌ها به اندازه ۳۵ درصد حجم اولیه افزایش می‌یابد. با بیشتر شدن درصد اشباع اولیه نمونه پتانسیل جذب آب نمونه با شیب بیشتری کاهش می‌یابد در نتیجه نسبت تغییر حجم حفره‌های خاک کمتر از مقادیر قبلی می‌شود.

#### ۹- منابع

- [1]Chen, F. H., "Foundations on expansive soils", Elsevier Science Publishers, 1988.
- [2]Twenhofel, W. H., "Principles of sedimentation", 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., 1950.
- [3]Basma, A. A., "Prediction of expansion degree for natural compacted clays", Geotechnical testing Journal, GTJODJ, Vol. 16, No. 4, 1993.
- [4]Day, R. W., "Expansion of compacted gravelly clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 6, 1991.
- [5]Lambe, T., W. 1958. The structure of compacted clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 84(SM2).
- [6]Olsen, H., W. 1962. Hydraulic flow through saturated clay. Proceeding of Ninth National Conference on Clays and Clay Minerals.

۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق برای بررسی تأثیر نوع کانی، ترکیب خاک و شرایط تراکم نمونه‌ها بر پتانسیل تورم، ۵ نمونه خاک ریزدانه مطالعه شده است. مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌هایی که با درصد رطوبت و چگالی خشک متفاوتی آماده‌سازی شده بودند، انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشها، موارد زیر حاصل شده است:

۱- درصد تورم آزاد به صورت مستقیم با نوع کانی رسی و درصد ذرات رس موجود در نمونه مرتبط است. از میان کانیهای رسی، وجود کانی مونت‌موریلونیت در نمونه، تأمین کننده پتانسیل تورم است. از میان کاتیونهای جذب شده به ذرات رس کاتیونهای تک ظرفیتی که لایه دوگانه بزرگتری ایجاد می‌کنند، پتانسیل تورم بیشتری دارند.

۲- در این تحقیق به منظور توصیف کمی نوع کانی موجود در نمونه‌ها، از شاخصهای حد روانی و دامنه

[9] Barbour, S. L., Fredlund, D. G., "Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils", Canadian Geotechnical Journal, No. 26, 1989.

[۱۰] عشایری، ایمان، "ارزیابی میزان تأثیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و شرایط تراکم بر پتانسیل تورم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲

[7] Dif, A. E, Bluemel, W. F., "Expansive soils under cyclic drying and wetting", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 14, No. 1, 1991.

[8] Day, R. W., "Swell-Shrink behavior of compacted clay", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 3, 1994.