

مطالعه خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی خاکهای گچی متورم شونده و روش‌های بهسازی آنها

جعفر بلوری بزاز*^۱ حمید رجایی^۲

پذیرش مقاله: ۸۸/۶/۴

دریافت مقاله: ۸۷/۷/۲

چکیده:

وجود خاک‌های متورم شونده در سراسر دنیا خسارات جبران ناپذیری را به ساختمان‌ها وارد می‌نماید. خاک‌های گچی در ناحیه جنوب غربی مشهد، به دلیل خاصیت تورم‌زایی که دارند از دیرباز مشکلاتی مانند ایجاد ترک در نمای ساختمان‌ها، شکم دادن دیوارها و برآمدگی کف-سازها را به وجود آورده‌اند. خاک‌های این منطقه عموماً ریزدانه بوده و از نوع ML یا CL محسوب می‌شوند. این پژوهش کوششی برای تعیین مشخصات و بررسی خواص تورمی خاک‌های گچی ML در این منطقه می‌باشد. به این منظور ۶ نمونه از میان نمونه‌هایی که دانه بندی یکسان ولی درصد گچ طبیعی متفاوتی دارند انتخاب شده‌اند. پس از تعیین خصوصیات اصلی ژئوتکنیکی (مقدار گچ، حدود اتربرگ، وزن مخصوص طبیعی و چگالی) این خاک‌ها، اثر میزان گچ بر پتانسیل تورم و فشار تورم بررسی گردید. با توجه به تاثیر به سزای وزن مخصوص بر پتانسیل و فشار تورم، از هر یک از خاک‌های شش گانه ۱۰ نمونه با رطوبت اولیه یکسان و وزن مخصوص مختلف ساخته شده و تغییرات پتانسیل و فشار تورم آنها تعیین گردید. نتایج این تحقیق بیانگر اثر شدید مقدار گچ، میزان تراکم و مقدار رطوبت بر پتانسیل و فشار تورم است. از طرفی بهسازی این‌گونه خاک‌ها که در زمره خاک‌های مسئله‌دار هستند همیشه مورد توجه محققین بوده است. در ادامه این تحقیق نمونه‌ای از خاک‌های فوق با ۱۰/۵۷ درصد گچ و با پتانسیل تورم مشخص انتخاب گردید و به سه روش مختلف بهسازی شامل اختلاط با آهک، اختلاط دو زمانه با آهک و اختلاط با سیمان بهسازی شد. مقدار ماده افزودنی در این سه روش ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد بود که پس از مخلوط و متراکم نمودن، به وزن مخصوص خشک ۱/۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسید. نتایج بهسازی روی این‌گونه خاک‌های متورم شونده نشان می‌دهد که روش اختلاط با سیمان می‌تواند فشار تورم نمونه‌ها را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد و خصوصیات تورمی آنها را به طور قابل توجهی اصلاح نماید.

کلید واژه‌ها: خاک گچی، پتانسیل تورم، فشار تورم، تراکم، وزن مخصوص، بهسازی، آهک، اختلاط دو زمانه، سیمان

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد bolouri@um.ac.ir

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی شریف Hmd_rajae@yahoo.com

* مسئول مکاتبات

مقدمه

خاک‌هایی که قابلیت تورم دارند مشکلات جدی را برای ساختمان‌ها و جاده‌ها به وجود می‌آورند. خاک‌های متورم شونده که انواع مختلفی دارند هنگامی که خشک شوند کاهش حجم داشته و هنگامی که مرطوب شوند متورم شده و اضافه حجم پیدا می‌کنند (Yucel and Hakan, 2003). این‌گونه خاک‌ها در سراسر جهان مشکلات زیادی را برای مهندسی عمران فراهم کرده که مهم‌ترین آنها خسارت به سازه‌ها، روسازی جاده‌ها و کف‌سازی‌ها می‌باشد و این خود موجب فراهم آمدن زمینه‌های تحقیقاتی فراوانی برای بررسی دلایل نشست و روش‌های بهسازی آنها شده است (Ameta et al, 2007). رفتار تورمی معمولاً در خاک‌هایی مشاهده می‌شود که به اندازه کافی دارای ذرات ریزدانه باشند. خاک‌های رسی در حالت طبیعی تا حدودی از خود تورم (در صورت مرطوب شدن) و یا انقباض (در صورت خشک شدن) نشان می‌دهند (Chen, 1988). اما هنگامی که این‌گونه خاک‌ها متراکم می‌شوند مقدار تورم به نسبت درجه تراکم آنها افزایش می‌یابد. تورم خاک‌های رسی نتیجه تشکیل یک غشای نازک آب به دور ذرات خاک است (Yaujun et al, 1999). انیدریت یا سولفات کلسیم خشک نیز با جذب آب به ژپس یا سولفات کلسیم آبدار ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) تبدیل می‌شود که در این فرآیند حجم آن حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد (Bandyopadhyay, 1981). در بسیاری موارد در طبیعت، انیدریت و مصالح رسی با یکدیگر مخلوط شده (مانند سنگ‌های رسی - سولفاتی) و در نتیجه هردو تورم پیدا می‌کنند. پتانسیل تورم و نیز فشار برکنشی که این‌گونه خاک‌ها اعمال می‌نمایند به نوع کانی، میزان تراکم و مقدار رطوبت بستگی دارد. یکی از انواع خاک‌های متورم شونده، خاک‌های ریزدانه گچی است که در بسیاری از مناطق شهری به دلیل مشکلاتی که برای ساختمان‌ها ایجاد کرده‌اند مسئله‌ساز هستند و مطالعه آنها ضروری می‌باشد (Einstein, 1996).

موجود هستند. عمل تراکم که یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های سست است، در مورد خاک‌های گچی متورم شونده نه تنها کارساز نیست بلکه زیانبار نیز هست. زیرا این‌گونه خاک‌ها بر اثر افزایش تراکم به محض اشباع شدن نسبی، به شدت متورم می‌شوند (Shahid and Sahel, 2000).

بهسازی شیمیایی خاک‌های سست در دهه‌های اخیر مورد توجه ویژه مهندسی قرار گرفته است. در حال حاضر آهک با توجه به فراوانی و بهای مناسب آن از مهم‌ترین افزودنی‌های تثبیت کننده است (Wild et al, 1998 and 1999). آهک با بسیاری از خاک‌ها واکنش شیمیایی نشان داده و کانی‌های سیمانی شده‌ای مانند سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم تشکیل می‌شود (Dongxu et al, 2002). مقاومت این کانی‌ها با گذشت زمان بیشتر شده و باعث تثبیت خاک می‌گردد. هر چند آهک تأثیرات مهمی در اصلاح خاک‌های رسی دارد، اما در صورتی که خاک حاوی سولفات قابل حل باشد و یا هنگامی که خاک در معرض آب حاوی سولفات قرار بگیرد، استفاده از آهک نه تنها موثر واقع نخواهد شد بلکه به علت واکنش‌های شیمیایی که بین رس، آهک و سولفات انجام می‌گیرد، کانی‌های ثانویه از قبیل اترینگایت و تاماسایت ایجاد گشته که این کانی‌ها به دلیل جذب آب زیاد، به شدت متورم شده و منجر به خرابی سازه‌هایی سبک نظیر روسازی جاده‌ها می‌گردند. چه بسا روسازی‌هایی که پس از ۶ تا ۲۴ ماه از تاریخ ساخت دارای کیفیت خوبی بوده اما بعد از فراهم شدن شرایط لازم به شدت متورم شده‌اند (Hunter et al, 1988). تجربیات ناموفقی از اصلاح بعضی خاک‌ها با آهک در آمریکا و انگلستان مشاهده شده که در بررسی انجام گرفته حضور سولفات‌های محلول مخصوصاً سولفات کلسیم یا گچ معمولی در خاک آن نواحی، مشخص شده‌اند. اگرچه سولفات کلسیم در بین سولفات‌ها کمترین حلالیت را دارد ولی رایج‌ترین نوع آنها در خاک می‌باشد که عامل تشکیل اترینگایت در حضور آهک و رس است (Mitchell et al, 1986).

یکی از روش‌هایی که مشکل تورم مجدد خاک‌های تثبیت شده با آهک را کاهش می‌دهد روش افزودن آهک در دو مرحله می‌باشد. در این روش خاک در دو مرحله با آهک

خاک‌های گچی دارای خاصیت تغییر حجم شدید بوده (Chen, 1975) و در طبیعت با تراکم و وزن مخصوص بسیار پایین (مانند 1.2 g/cm^3) تا تراکم بالا (نظیر 1.8 g/cm^3)

- ۶) افزودن آهک به روش دومرحله‌ای به خاک‌های گچی برای اثر کاهش تورم
- ۷) اختلاط خاک گچی با سیمان در جهت بهسازی این خاک‌ها
- ۸) مقایسه سه روش اختلاط معمولی و دومرحله‌ای با آهک و سیمان بر میزان کاهش یا افزایش تورم

مطالعات آزمایشگاهی

به منظور انجام این تحقیق گام‌های زیر برداشته شده است:

- ۱) نمونه‌برداری
- ۲) دانه بندی، طبقه‌بندی و تعیین مشخصات مکانیکی و مقدار گچ نمونه‌ها
- ۳) اندازه‌گیری پتانسیل تورم و تعیین فشار تورم
- ۴) انتخاب یکی از نمونه‌ها و بررسی روش بهسازی بر رفتار تورمی این نمونه به ۳ روش اختلاط معمولی با آهک، اختلاط دوزمانه (دو مرحله‌ای) با آهک و اختلاط باسیمان. در بخش‌های زیر جزئیات کارهای آزمایشگاهی و نتایج به-دست آمده شرح داده شده است.

۱- روش نمونه‌برداری و انتخاب نمونه

بر اساس تحقیقات محلی در منطقه و مطالعات قبلی در منطقه جنوب غربی مشهد، ۱۴ نقطه انتخاب گردید و از عمق حدود یک تا ۲ متر (که معمولاً تراز قرارگیری فونداسیون اغلب ساختمان‌هاست) نمونه‌برداری انجام شد. پس از دانه‌بندی و طبقه‌بندی نمونه‌ها مقدار گچ آنها تعیین شد. با توجه به اینکه خاک این منطقه عموماً ریزدانه بوده و از نوع ML یا CL است، تحقیق حاضر فقط بر روی مشخصات و خواص تورمی خاک‌های ML که فراوانی بیشتر داشتند متمرکز شد. سپس با توجه به تشابه دانه‌بندی و نزدیکی مقدار گچ نمونه‌ها، ۶ نمونه انتخاب شده و آزمون‌های تکمیلی روی نمونه‌های انتخابی انجام پذیرفت. در انتها با توجه به اهمیت بهسازی خاک‌های گچی، یکی از نمونه‌ها انتخاب شده و روش‌های گوناگون بهسازی شامل اختلاط معمولی با آهک، اختلاط دومرحله‌ای با آهک و اختلاط باسیمان بر رفتار تورمی خاک‌های گچی و نیز پتانسیل تورم و فشار تورم بررسی شد.

ترکیب شده و در فاصله زمانی بین این دو مرحله مقداری از واکنش‌های تورم‌زا انجام شده و کانی‌های تورم‌زا تولید می‌شوند که با توجه به عدم استفاده باربری از خاک در این مرحله و قرار نگرفتن سازه بر روی آن، مشکل تورم مطرح نخواهد بود (Prakash et al, 1996). سپس با افزودن آهک در مرحله دوم و تراکم نمودن مجدد مخلوط، تورم خاک اصلاح می‌شود.

تثبیت با سیمان که یکی از تثبیت‌کننده‌های شیمیایی است برای خاک‌های سیلتی بسیار موثر می‌باشد. دلیل کارایی این روش هیدراته شدن سیمان در حضور آب اندک و ایجاد چسبندگی بین مصالح می‌باشد که طی این فرآیند مقاومت مصالح تثبیت شده به میزان زیاد افزایش می‌یابد (فاخر و عسکری، ۱۳۷۲).

اهداف

با توجه به خسارات جبران ناپذیری که خاک‌های گچی متورم شونده روی سازه‌ها داشته‌اند بررسی رفتار این گونه خاک‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Shahid and Sahel, 2000). از طرفی حضور خاک‌های متورم شونده در شهرها و ایجاد مشکلات فراوان موجب شده تا بهسازی این گونه خاک‌ها به منظور حذف و یا کاهش تورم همیشه مورد توجه مهندسان قرار گیرد. به منظور بهسازی این گونه خاک‌ها شناخت خصوصیات مکانیکی آنها در درجه اول اهمیت است. در این تحقیق و در راستای شناخت رفتار خاک‌های گچی سیلتی و نیز بهسازی این گونه خاک‌ها، محورهای زیر مورد توجه قرار گرفته است:

- ۱) تعیین خصوصیات اصلی ژئوتکنیکی خاک‌های گچی شامل تعیین مقدار گچ، حدود اتربرگ، وزن مخصوص طبیعی و چگالی
- ۲) بررسی اثر میزان گچ بر پتانسیل (مقدار) تورم و فشار ناشی از آن
- ۳) تاثیر تراکم بر پتانسیل و فشار تورم
- ۴) بررسی تاثیر رطوبت اولیه در مقدار فشار تورم
- ۵) اثر اختلاط معمولی آهک با خاک گچی و افزایش تراکم

۲- آزمایش های اولیه

جهت شناسایی و تعیین خواص نمونه ها آزمایش های اولیه بر روی آنها انجام شده و نتایج آن در جدول ۱ خلاصه شده است. هم چنین نمودار دانه بندی نمونه های شش گانه مورد مطالعه نیز در شکل ۱ نشان داده شده است. شماره گذاری نمونه ها بر حسب مقدار گچ آنها می باشد به گونه ای که فقط بخش صحیح آن در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال S09 نشان دهنده نمونه با درصد گچ بین ۹ تا ۱۰ درصد است. همان گونه که ملاحظه می گردد افزایش مقدار گچ باعث کاهش وزن مخصوص طبیعی شده اما تاثیر ویژه ای روی G_s و PI ندارد.

تورم این نوع خاک ها می شود. به منظور بررسی دقیق تر این پدیده، ۱۰ نمونه با وزن مخصوص مختلف اما با رطوبت اولیه یکسان و برابر $w=7.5\pm 1\%$ برای هریک از شش نوع خاک بیان شده در جدول ۱ (در جمع ۶۰ نمونه) ساخته شد. البته باید یادآور شد نمونه ها با ریختن مقدار معین خاک در قالب دستگاه تحکیم و متراکم نمودن آن با کوبه ای ویژه انجام می گرفت و گاهی وزن مخصوص دو نمونه به یکدیگر نزدیک می شد. اندازه گیری مقدار و فشار تورم بر اساس استاندارد ASTM D-4546-Method A انجام گرفت.

۳-۱ تغییرات تورم با زمان

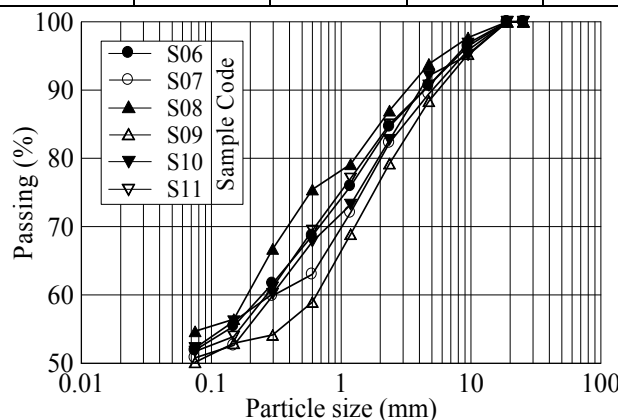
در این تحقیق برای اندازه گیری درصد تورم آزاد از مجموعه دستگاه تحکیم استفاده شده است. برای تعیین میزان و تغییرات تورم با زمان، نمونه با رطوبت $w=7.5\pm 1\%$ در قالب ویژه دستگاه تحکیم ساخته شده و قالب حاوی نمونه در محفظه بارگذاری این دستگاه قرار می گرفت. برای تعیین پتانسیل (درصد) تورم، سرباری روی نمونه اعمال نمی شد و

۳- پتانسیل تورم

تغییرات حجمی (کاهش یا افزایش حجم) خاک های گچی به عواملی نظیر کانی های رسی، مقدار گچ و میزان تراکم بستگی دارد. اما برای یک خاک مشخص با مقدار معین گچ، وزن مخصوص نقش مهمی را ایفا می کند. خاک های گچی با تراکم کم، نشست را به دنبال داشته حال آنکه تراکم زیاد موجب

جدول ۱- مشخصات شیمیایی و فیزیکی نمونه های مورد آزمایش

شماره نمونه	S11	S10	S09	S08	S07	S06
درصد گچ	11.13	10.57	9.78	8.31	7.18	6.06
PI	7.3	4.2	9.9	11.7	6.6	2.6
وزن واحد حجم طبیعی (g/cm^3)	1.34	1.33	1.49	1.49	1.58	1.64
G_s	2.65	2.61	2.60	2.71	2.68	2.59

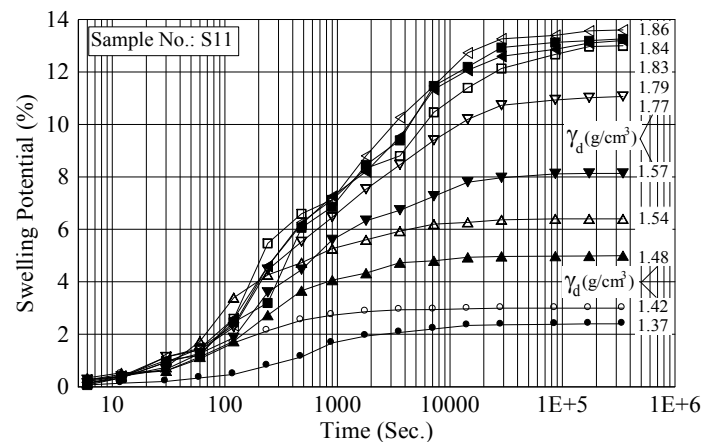
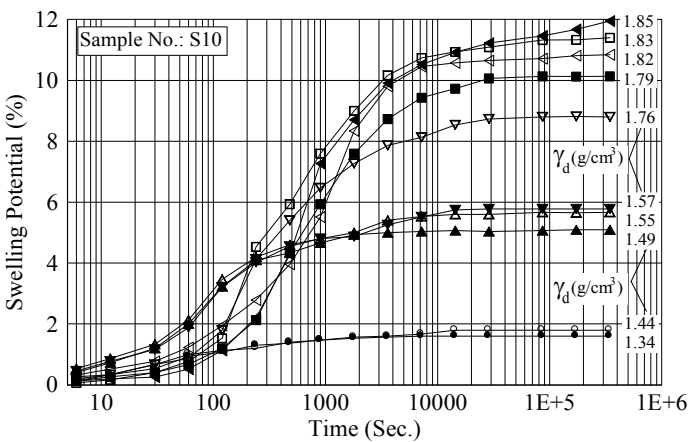
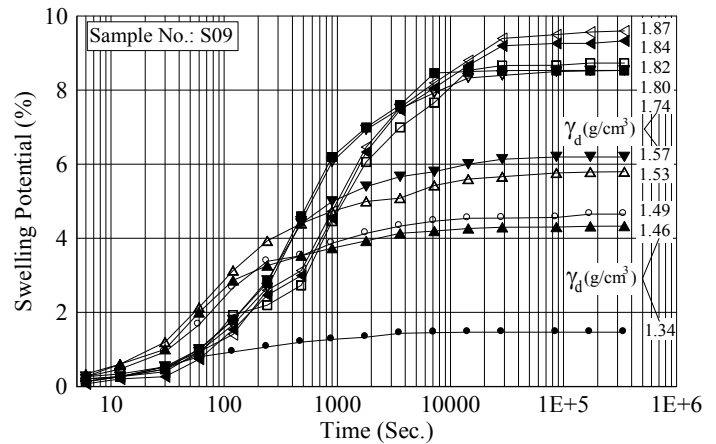
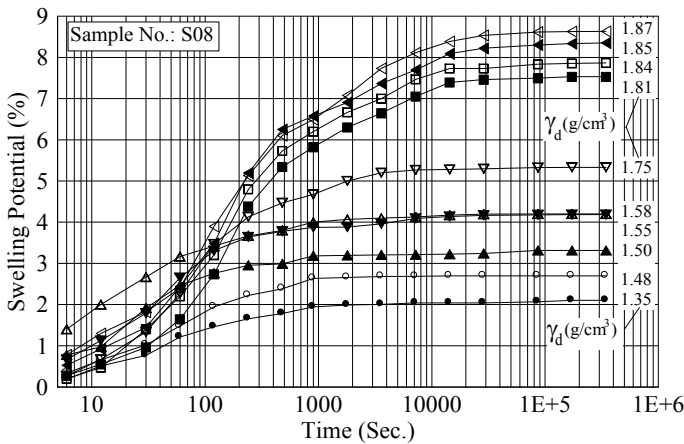
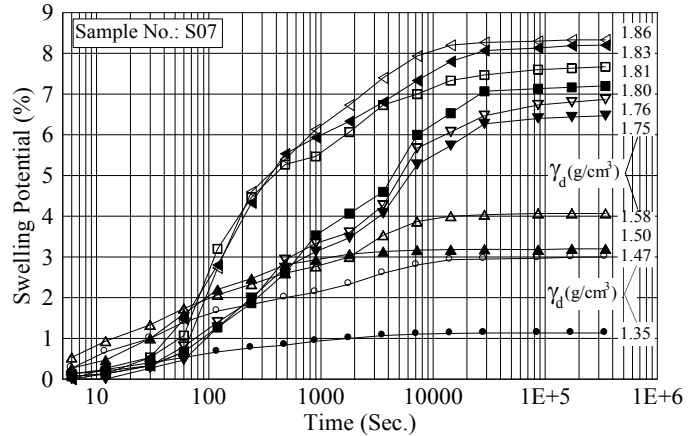
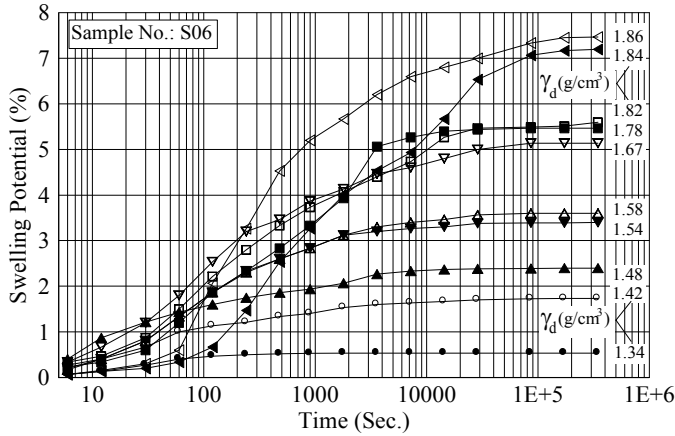


شکل ۱- نمودار دانه بندی نمونه های مورد آزمایش

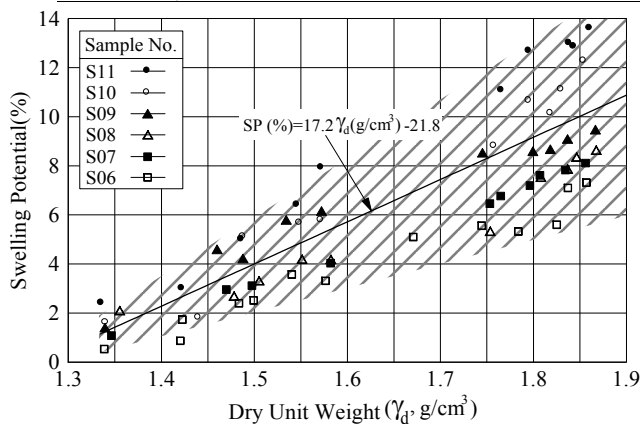
شد. شکل ۲ نمودار تورم- زمان را برای برای شش نوع خاک نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در اشکال فوق دیده می‌شود نمودار تورم- زمان را به دو بخش کاملاً مجزا می‌توان تقسیم کرد: بخش اول که تورم اولیه نامیده شده به گونه‌ای است که درصد بالای تورم در این زمان اتفاق می‌افتد. با توجه به نمودارها تورم اولیه در

وزن روی نمونه فقط شامل صفحات فوقانی و برابر 1 kPa بود. سپس این محفظه از آب پر شده تا قالب حاوی نمونه کاملاً در آب مستغرق گردد. جذب تدریجی آب توسط نمونه تورم آن را به دنبال داشت. مقدار تورم در فواصل زمانی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰، ۱۴۴۰، ۲۸۸۰، ۵۷۶۰ دقیقه و تا رسیدن به تورم ثابت قرائت



شکل ۲- نمودار تورم- زمان شش نمونه خاک با تراکم (وزن مخصوص)های گوناگون



شکل ۳- نمودار تغییرات پتانسیل تورم بر حسب وزن مخصوص متفاوت برای شش نوع خاک مورد آزمایش

البته باید یادآور شد این رابطه در محدوده خاک‌های مورد آزمایش صادق بوده و با توجه به پراکندگی داده‌ها خیلی دقیق نمی‌باشد، اما می‌تواند به عنوان یک راهنما برای تخمین اولیه میزان تورم در خاک‌های ML گچی مورد استفاده واقع شود.

۳-۳ محاسبه فشار تورم

خاک‌هایی که دارای پتانسیل تورم هستند اگر به دلیل وجود سربار امکان تورم آزاد را نداشته باشند، به سازه‌های فوقانی فشار وارد می‌آورند که در صورت سبک بودن این سازه‌ها به آنها خسارت جدی وارد می‌آورند. به منظور تعیین فشار تورم پس از قرار دادن قالب حاوی نمونه در محفظه بارگذاری دستگاه تحکیم و مستغرق نمودن آن در آب و اتمام تورم نمونه، با اعمال سربارهای مناسب و تدریجی تورم حاصل حذف می‌گردد. سربار اعمال شده که جهت حذف و به عبارتی صفر نمودن تورم ایجاد شده می‌باشد نباید از مقدار مورد نیاز افزون گردد، زیرا ممکن است موجب نشست حتی به مقدار بسیار اندک گردد. فشار ناشی از این سربار به نمونه فشار تورم گفته می‌شود. شکل ۴ تغییرات فشار تورم را برای شش نوع خاک که از هر کدام ده نمونه با وزن مخصوص متفاوت تهیه شده نشان می‌دهد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش وزن مخصوص فشار تورم افزایش می‌یابد. در حالت کلی می‌توان گفت هنگامی که وزن مخصوص کمتر از حدود $\gamma_d = 1.6 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ باشد، میزان فشار تورم ناچیز بوده اگر چه همین مقدار برای بالا زدگی

۳ ساعت اول صورت می‌گیرد. بخش دوم که تورم ثانویه نامیده شده و شامل تورم بلند مدت خاک می‌باشد، پس از به پایان رسیدن تورم اولیه بوقوع می‌پیوندد. مقدار تورم ثانویه نسبت به مقدار تورم اولیه ناچیز است. از طرف دیگر نتایج بیانگر اثر مستقیم مقدار گچ بر مقدار تورم می‌باشد، به عبارتی با افزایش مقدار گچ تورم نمونه افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در تراکم حدود $\gamma_d = 1.86 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ میزان تورم نمونه S06 کمتر از هشت درصد بوده حال آنکه مقدار آن برای نمونه S11 به حدود چهارده درصد می‌رسد. با توجه به نتایج نشان داده شده نکات زیر را می‌توان استنباط نمود:

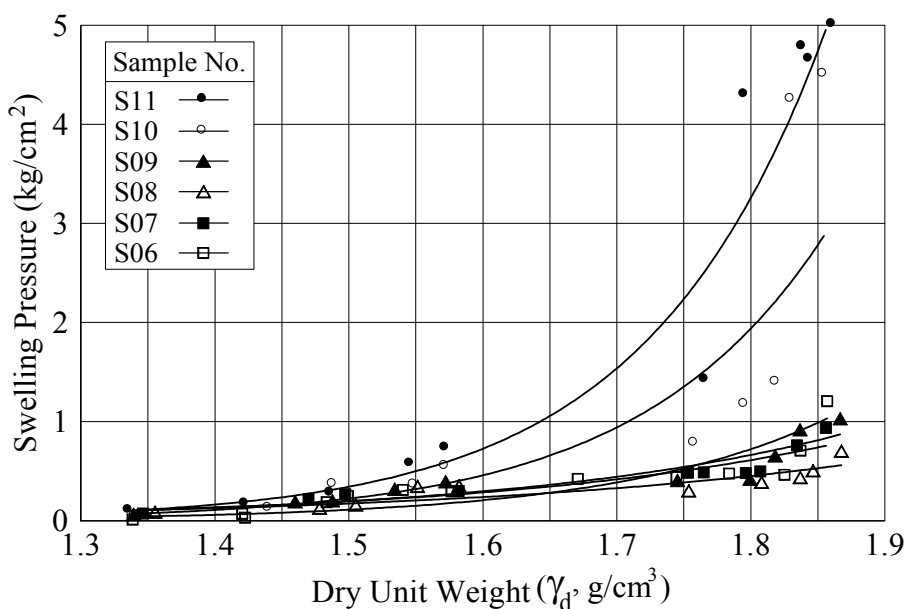
- روند افزایش تورم با افزایش مقدار گچ دارای حرکت شتابداری است، به عبارتی با بالا رفتن درصد گچ روند افزایش تورم شتاب می‌گیرد.
- به نظر می‌رسد که افزایش تورم با افزایش درصد گچ برای تراکم‌های بالا صادق بوده و در درصد‌های تراکم پایین، با افزایش درصد گچ تاثیر ویژه روی تورم مشاهده نمی‌شود.

۲-۳ تعیین درصد تورم

پتانسیل تورم را (که معمولاً بر حسب درصد افزایش حجم بیان می‌شود) می‌توان بر حسب وزن مخصوص بر اساس روش ذکر شده در قسمت قبل (ASTM D-4546-Method A) تعیین نمود. همان‌گونه که بیان شد، پتانسیل و فشار تورم نه تنها به مقدار گچ موجود در خاک بستگی دارد بلکه به شدت متاثر از میزان تراکم (وزن مخصوص) می‌باشد. شکل ۳ تغییرات بیشینه تورم (تورم نهایی، شکل ۲) را برای شش نوع خاک مورد آزمایش که هر یک با ۱۰ وزن مخصوص متفاوت تهیه شدند نشان می‌دهد.

با اندکی دقت می‌توان دریافت که با افزایش مقدار گچ میزان تورم افزایش می‌یابد. از طرفی برای یک نوع خاک با مقدار معین گچ، با افزایش وزن مخصوص میزان تورم افزایش خواهد یافت. با استفاده از کلیه داده‌ها می‌توان رابطه‌ای را بین پتانسیل تورم (SP) و وزن مخصوص خشک، γ_d (بر حسب g/cm^3) به صورت زیر برقرار نمود:

$$SP (\%) = 17.2 \gamma_d (\text{g/cm}^3) - 21.8 \quad (1)$$



شکل ۴- نمودار تغییرات فشار تورم بر حسب وزن مخصوص‌های متفاوت برای شش نوع خاک مورد آزمایش

را برای این نمونه خاک نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش رطوبت اولیه، فشار تورم و به ویژه پتانسیل تورم کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که ذکر گردید اصولاً پتانسیل و نیز فشار تورم به میزان تراکم و مقدار رطوبت بستگی دارد (Einstein, 1996). با توجه به جذب آب سولفات کلسیم خشک (انیدریت، CaSO_4) و تبدیل آن به ژپس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) حجم آن حدود ۳۰ تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد (Bandyopadhyay, 1981).

بنابراین هنگامی که به نمونه (که در قالب متراکم نشده) آب افزوده شود در طول ۲۴ ساعت آب جذب کرده و بخشی از تورم آن انجام می‌شود و هنگامی که نمونه ساخته می‌شود خاکی است که آب جذب کرده و بخشی از تورم آن انجام شده است. بنابراین هرچه مقدار رطوبت اولیه بیشتر باشد تورم نهایی کاهش یافته و در نتیجه فشار تورم نیز کاهش می‌یابد. دقیقاً به همین دلیل یکی از روش‌های بهسازی افزودن آب به نمونه حاوی گچ خشک و تراکم مجدد آن پس از انجام تورم اولیه می‌باشد.

سازه‌های سبک کافی است و در مناطقی که میزان گچ بالاست در صورت افزایش تراکم خاک، خطر جدی ساختمان‌ها را بیشتر تهدید خواهد کرد. این ۶ نمونه خاک مورد آزمایش را می‌توان به دو گروه با مقدار گچ کمتر و بیشتر از ده درصد تقسیم نمود. با تقریب کافی می‌توان مقدار فشار تورم (SP) را بر حسب وزن مخصوص خشک، γ_d برای این دو گروه به ترتیب با روابط ۲ و ۳ بیان نمود:

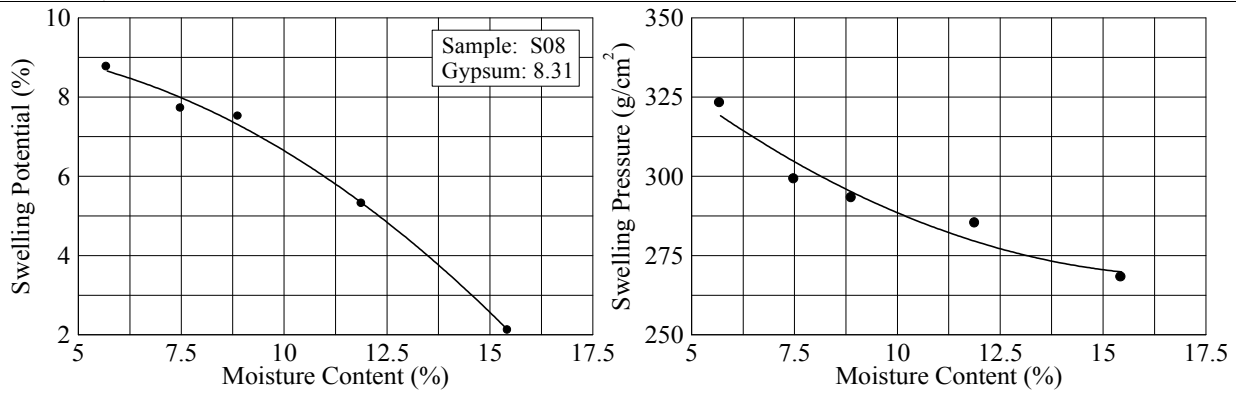
$$SP \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 4.39 \times 10^{-6} \times e^{7.35 \gamma_d \text{ (g/cm}^3\text{)}} \quad (2)$$

$$SP \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 6.63 \times 10^{-4} \times e^{3.82 \gamma_d \text{ (g/cm}^3\text{)}} \quad (3)$$

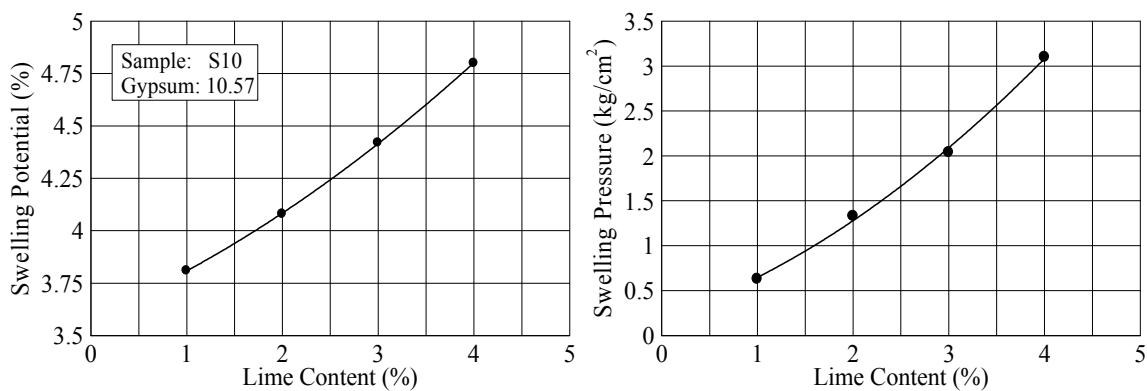
بدیهی است این روابط فقط برای تخمین اولیه است و حالت کلی نمی‌تواند داشته باشد.

۳-۴ تاثیر رطوبت اولیه بر پتانسیل و فشار تورم

برای بررسی اثر رطوبت اولیه بر پتانسیل و نیز فشار تورم، خاک شماره S08 با ۸.۳۱٪ گچ با وزن مخصوص خشک $\gamma_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$ اما با درصد رطوبت‌های مختلف ساخته شد و پس از نگهداری نمونه به مدت ۲۴ ساعت، آزمایش تورم روی آنها انجام گردید. شکل ۵ تغییرات درصد و فشار تورم



شکل ۵ - نمودار تغییرات درصد و فشار تورم برای نمونه شماره S08 با 8.31% گچ بر حسب رطوبت اولیه



شکل ۶ - تاثیر مقدار آهک بر پتانسیل تورم و فشار تورم خاک شماره S10 با وزن مخصوص خشک 1.83 g/cm³

۷/۵ درصد، به گونه‌ای مخلوط و متراکم گردید که وزن مخصوص خشک آن ۱/۸۳ گرم بر سانتی متر مکعب شد. پس از اشباع نمودن نمونه، پتانسیل تورم و فشار تورم (به مدت ۴ هفته و بر اثر اشباع شدن) اندازه‌گیری شد. تغییرات پتانسیل و فشار تورم برای این نمونه که با درصدهای مختلف آهک تثبیت شده در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آهک از ۱ تا ۴ درصد، تورم افزایش یافته است. با این وجود پتانسیل تورم و فشار تورم نمونه تثبیت شده با آهک از نمونه بدون آهک که به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۴/۵ kg/cm² می‌باشد، (شکل ۳) کمتر است. این نتیجه بیان‌گر تاثیر آهک بر کاهش تورم است. اما باید توجه داشت در شرایط مناسب، امکان واکنش شیمیایی بین رس، آهک و سولفات وجود داشته که در این حال موجب تولید کانیهای تورم‌زای جدیدی مانند اترینگایت می‌شود. همچنین با تبدیل اترینگایت به تاماسایت (که در دمای زیر ۱۵ درجه انجام می‌شود) تورم نمونه افزایش

روش‌های گوناگون بهسازی

به منظور بررسی روش‌های گوناگون بهسازی، خاک شماره S10 که حاوی گچ زیادی بوده (10.57%) و نیز فراوانی آن در منطقه بیشتر از سایر نمونه‌ها است، انتخاب گردید. به منظور بررسی روش بهسازی بر رفتار تورمی خاک‌های گچی این منطقه، این خاک به ۳ روش:

- (۱) اختلاط معمولی با آهک
- (۲) اختلاط دومرحله ای با آهک
- (۳) اختلاط باسیمان

بهسازی شده و پتانسیل تورم و فشار تورم تعیین شد. در بخش‌های زیر جزئیات کارهای آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده شرح داده شده است.

۱- بهسازی به روش اختلاط معمولی با آهک

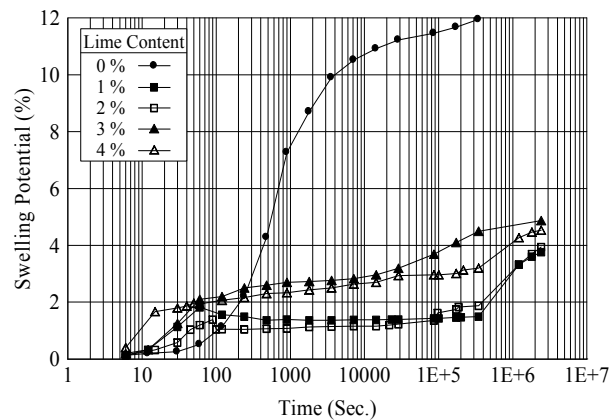
در این مرحله خاک شماره S10 را با ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد (وزنی) آهک مخلوط کرده و پس از افزایش رطوبت آن به

افزافه می‌شود. بدیهی است برای افزودن مجدد آهک باید مخلوط قبلی را کاملاً خرد نمود که این عمل موجب شکسته شدن بافت‌های متورم شده خاک می‌گردد.

به منظور بررسی اثر اختلاط دو مرحله ای آهک، ابتدا ۵۰ درصد آهک مورد نظر یعنی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد آهک با خاک شماره S10 مخلوط شده و پس از رساندن رطوبت نمونه به ۷/۵ درصد، آن را داخل ظرف پلاستیکی ویژه قرارداد و در آن کاملاً بسته شده تا رطوبت نمونه کاملاً محفوظ بماند. پس از یک ماه، ۵۰ درصد دیگر آهک به نمونه افزوده شده و پس از مخلوط کردن آزمایش پتانسیل تورم آزاد و فشار تورم روی نمونه‌ها انجام گرفت. شکل ۸ تاثیر آهک بر پتانسیل تورم و فشار تورم نمونه S10 که به روش دو مرحله‌ای با آهک مخلوط گردیده را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار تورم در روش اختلاط دو مرحله‌ای، با افزایش میزان آهک کاهش یافته و مقدار کل تورم در این روش نسبت به روش اختلاط معمولی کمتر است. برای بررسی رفتار دراز مدت خاک‌های بهسازی شده با آهک به روش اختلاط دو زمانه، تورم نمونه‌ها به مدت ۴ هفته قرائت شد (شکل ۹). برخلاف روش اختلاط معمولی روند افزایشی تورم پس از مدت ۴ هفته تقریباً خاتمه پیدا کرده و در حقیقت حداکثر تورم در آنها حاصل شده است.

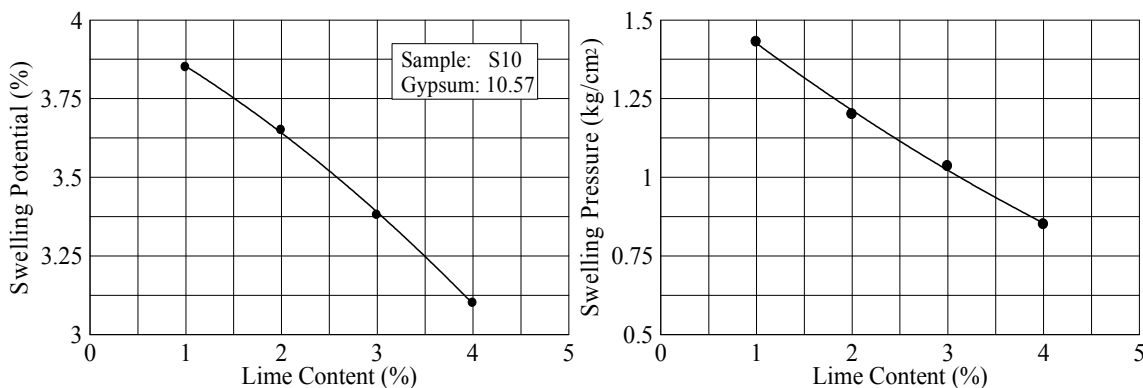
چشم‌گیری می‌یابد (Ferris et al, 1995). برای بررسی رفتار درازمدت خاک‌های بهسازی شده با آهک به روش اختلاط معمولی، تورم نمونه‌ها به مدت ۴ هفته قرائت شد. نتایج بیان‌گر این نکته است که روند افزایش تورم خیلی زودتر نسبت به حالتی که خاک بهسازی نشده متوقف می‌گردد (شکل ۷).



شکل ۷- تغییرات پتانسیل تورم با زمان برای خاک شماره S10 تثبیت شده با درصد آهک‌های مختلف

۲- بهسازی به روش اختلاط دو مرحله‌ای با آهک

اساس روش اختلاط دو مرحله‌ای آهک به این‌گونه است که ابتدا در یک مرحله ۵۰ درصد آهک به خاک افزوده می‌شود. حضور آهک در خاک پس از مدت زمانی موجب تشکیل کانی‌های تورم‌زا می‌شود. سپس ۵۰ درصد آهک باقی‌مانده



شکل ۸- تاثیر مقدار آهک بر پتانسیل تورم و فشار تورم خاک شماره S10 با وزن مخصوص خشک 1.83 g/cm^3 بهسازی شده

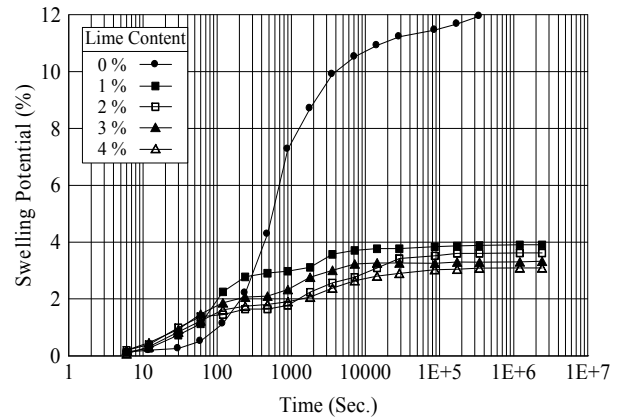
به روش اختلاط دو زمانه آهک

شبهه روش اختلاط دو مرحله‌ای آهک، روند افزایشی تورم پس از مدت ۴ هفته تقریباً خاتمه پیدا کرده و در حقیقت حداکثر تورم در آنها حاصل شده است.

۴- مقایسه روش‌های بهسازی خاک‌های گچی

به منظور مقایسه انواع روش‌های مختلف بهسازی خاک‌های گچی جهت کاهش پتانسیل تورم و فشار تورم خاک شماره S10 (با ۱۰/۵۷ درصد گچ و وزن مخصوص خشک ۱/۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) نتایج آزمایش‌ها بر روی این نمونه در جدول ۲ خلاصه شده است. در این جدول S. و S. Po. به ترتیب پتانسیل تورم (برحسب درصد) و فشار تورم (برحسب kg/cm^2) می‌باشد.

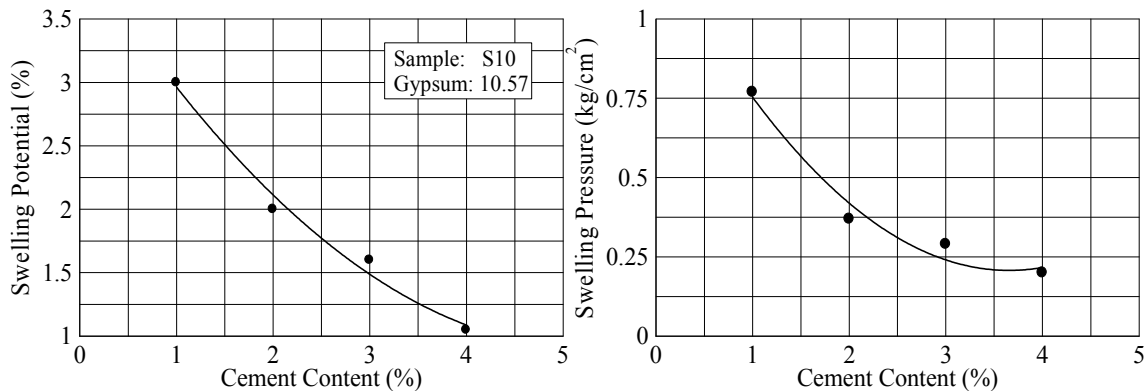
نتایج جدول هم‌چنین به صورت نموداری در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با توجه به جدول ۲ می‌توان گفت که روش اختلاط با سیمان مناسب‌تر از روش اختلاط با آهک چه به صورت معمولی و یا دو مرحله‌ای می‌باشد. هم‌چنین روش اختلاط دو مرحله‌ای آهک در کنترل تورم نسبت به روش اختلاط معمولی کارآمدتر است، ضمن این‌که در روش اختلاط معمولی انتظار می‌رود که به علت واکنش‌های شیمیایی و تشکیل کانی‌های تورم‌زا مثل اترینگایت در دراز مدت مقدار تورم بیشتر گردد (Hunter, 1988 and Mitchell, 1986).



شکل ۹- تغییرات پتانسیل تورم با زمان برای خاک شماره S10 تثبیت شده به روش اختلاط دو مرحله‌ای آهک و با درصد آهک‌های مختلف

۳- بهسازی با سیمان

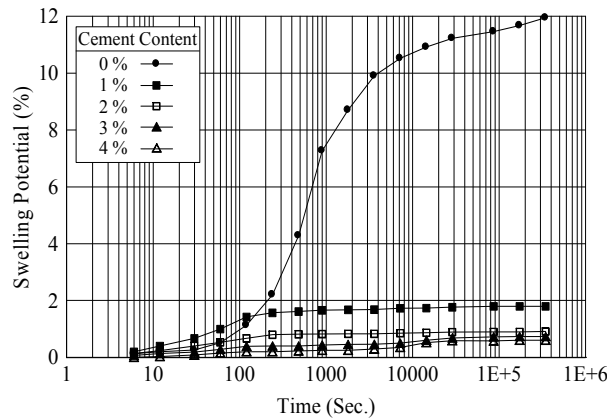
سیمان به لحاظ ویژگی‌های آن همیشه به عنوان یکی از مواد تثبیت کننده در بهبود خصوصیات خاک استفاده شده است. در این تحقیق خاک شماره S10 با ۱۰/۵۷ درصد گچ و وزن مخصوص خشک ۱/۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب با ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد (وزنی) سیمان مخلوط شده و پس از رساندن رطوبت نمونه آن به ۷/۵ درصد آزمایش تورم روی آن انجام شد. شکل ۱۰ تاثیر سیمان را بر پتانسیل تورم و فشار تورم خاک شماره S10 نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد اثر سیمان بر کاهش تورم بیش از دو روش دیگر است. برای بررسی رفتار دراز مدت خاک‌های بهسازی شده با سیمان، تورم نمونه‌ها به مدت ۳ هفته قرائت شد (شکل ۱۱).



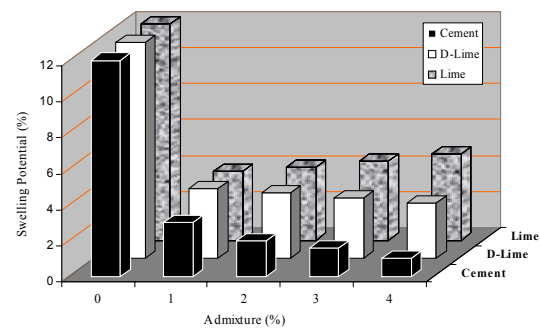
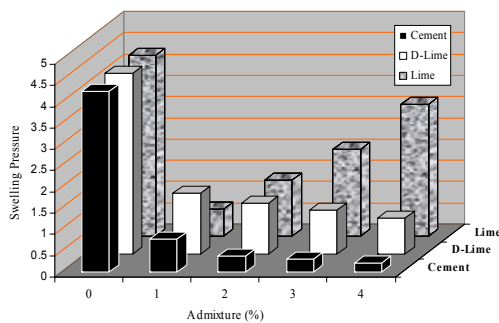
شکل ۱۰- تاثیر مقدار سیمان بر پتانسیل تورم و فشار تورم خاک شماره S10 با وزن مخصوص خشک 1.83 g/cm^3

جدول ۲- خلاصه مشخصات مکانیکی نمونه شماره S10

4		3		2		1		درصد ماده افزودنی
S. Pr.	S. Po.	S. Pr.	S. Po.	S. Pr.	S. Po.	S. Pr.	S. Po.	روش بهسازی
5.10	4.82	2.04	4.42	1.33	4.07	0.630	3.81	اختلاط معمولی با آهک
0.85	3.10	1.04	3.38	1.20	3.65	1.43	3.85	اختلاط دوزمانه با آهک
0.20	1.05	0.29	1.60	0.37	2.02	0.77	3.03	اختلاط با سیمان



شکل ۱۱- تغییرات پتانسیل تورم با زمان برای خاک شماره S10 تثبیت شده با سیمان



شکل ۱۲- نمودار مقایسه‌ای اثر انواع روش‌های بهسازی بر میزان پتانسیل تورم و فشار تورم

لایه تثبیت شده، مشکل تورم را به لایه پایین انتقال دهد. به عبارتی کاربرد دومرحله‌ای آهک تنها در صورتی می‌تواند مفید باشد که خاک طبیعی حاوی سولفات قابل حل بوده و فاقد کانی‌های سولفید باشد. علاوه بر مشکلات ذکر شده باید توجه کرد مقدار پتانسیل و فشار تورم در این روش تفاوت چشم‌گیری با روش اختلاط معمولی آهک ندارد، به عنوان مثال مقدار پتانسیل و فشار تورم با یک درصد آهک در روش

باتوجه به شرایط موجود، بهسازی به روش دومرحله‌ای با آهک چندان توصیه نمی‌شود زیرا در روش دومرحله‌ای علاوه بر خطای ناشی از عدم قابلیت پیش‌بینی میزان سولفات واقعی، استفاده از آهک بیشتر از حد نیاز، ممکن است نتواند در واکنش‌های پوزولانی شرکت کند و این آهک اضافه، با جریان آب شسته شده و با حرکت به سمت پایین با خاک اصلاح نشده زیرین واکنش نشان داده و با تشکیل اترینگایت در زیر

سازه مورد نظر سبک باشد متراکم نمودن خاک (که معمولترین روش برای جلوگیری از نشست خاک‌های پوک است) تورم آن را به دنبال خواهد داشت و موجب وارد آمدن خسارت به ساختمان شده که راه حل مناسب جایگزین نمودن خاک گچی با خاک مرغوب و یا بهسازی آن با یک افزودنی نظیر سیمان است که تورم را مهار نماید.

- افزودن آهک و اختلاط به روش معمول یکی از بهترین روش‌های بهسازی است که به مقدار زیاد می‌تواند پتانسیل تورم و نیز فشار تورم را کاهش دهد. اما باید دقت داشت که حضور سولفات در خاک تاثیری بر روی واکنش‌های آنی بین خاک و آهک نداشته و نتایج کوتاه مدت آزمایش نمی‌تواند ضامن رضایت بخش بودن آن در دراز مدت باشد. زیرا تاثیر منفی سولفات‌ها بر خاک‌های اصلاح شده با آهک مربوط به واکنش‌های دراز مدت و پوزولانی می‌باشد. یکی از نکات قابل توجه در این روش افزایش پتانسیل و فشار تورم با افزایش مقدار آهک است که این ممکن است به علت واکنش‌های شیمیایی و تشکیل کانی‌های تورم‌زا مثل اترینگایت باشد.

- در روش اختلاط دومرحله‌ای افزودن آهک، اصلاح خاک در دو فاصله زمانی باعث کاهش تورم خاک نسبت به روش اختلاط معمولی آهک می‌شود. در مرحله اول اختلاط، عمده کانی‌های تورم‌زا مثل اترینگایت ایجاد شده و در تماس با آب موجود در خاک قبل از تراکم، متورم شده و بنابراین در شرایط اشباع بعد از تراکم افزایش تورم قابل ملاحظه‌ای نخواهند داشت. افزودن آهک در مرحله دوم عمده‌تاً در واکنش‌های پوزولانی و سیمانی شدن شرکت کرده و باعث افزایش مقاومت خاک و کاهش تورم آن می‌شود. در این حالت، به عکس آنچه در روش اختلاط معمولی دیده شد، با افزایش مقدار آهک پتانسیل و فشار تورم کاهش می‌یابد. اما باید توجه نمود اگرچه در این روش امکان تورم مجدد کاهش می‌یابد ولی نسبت به روش اختلاط معمولی تفاوت چشم‌گیری در کم نمودن پتانسیل تورم نداشته و هزینه بیشتری خواهد داشت.

اختلاط معمولی به ترتیب $۳/۸۱\%$ و $۰/۶۳ \text{ kg/cm}^2$ و با چهار درصد آهک در روش اختلاط دوزمانه $۳/۱۰\%$ و kg/cm^2 $۰/۸۵$ می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود حتی با مصرف چهار درصد آهک در روش دومرحله‌ای، مقدار فشار تورم از روش معمولی بیشتر است. حال آنکه مقدار آهک مصرفی در این روش نسبت به روش معمولی چهار برابر شده است و نیز به زمان اجرای بیشتر نیاز داشته و مشکلات و هزینه بالاتری به پروژه تحمیل خواهد کرد (Prakash, 1996).

نتیجه‌گیری

خاک‌های ریزدانه سیلتی گچی رفتار مکانیکی ویژه‌ای دارند که به عوامل متعددی نظیر مقدار گچ، وزن مخصوص طبیعی، میزان رطوبت و نوع خاک بستگی دارد (Azma, 2003). بخشی از مناطق شهر مشهد پوشیده از این نوع خاک‌ها است که به دلیل تورم خساراتی به سازه‌ها وارد می‌کنند. بنابراین بهسازی این‌گونه خاک‌ها همیشه مورد توجه محققین بوده است. به این منظور ضمن بررسی اثر روش‌های گوناگون بهسازی، نمونه‌ای با افزودنی‌های مختلف بهسازی گردید. آزمون‌های انجام شده بر روی این خاک‌ها به نتایج زیر منتهی گردید:

- با افزایش مقدار گچ اصولاً پتانسیل تورم و نیز فشار تورم افزایش می‌یابد. نتایج بیان‌گر اثر مخرب گچ بر فشار تورم است به گونه‌ای که برای نمونه‌های با بیش از ده درصد گچ، پتانسیل تورم به حدود ۱۴ درصد و فشار تورم به 4.5 kg/cm^2 می‌رسد که این مقدار فشار برکنش می‌تواند خسارت جبران‌ناپذیری به سازه‌ها اعمال نماید.
- میزان تراکم اثر مستقیم بر پتانسیل تورم دارد. برای خاکی با مقدار گچ معین با افزایش میزان تراکم تورم افزایش می‌یابد که این موضوع علت اصلی وارد آمدن خسارت به سازه‌های سبک می‌باشد. اما بدیهی است در هر حال برای جلوگیری از نشست باید خاک متراکم شود. بنابراین با توجه به نتایج آزمایش‌ها، اگر سربار سازه‌ای که قرار است روی خاک‌های این منطقه ساخته شود بیش از فشار تورم باشد احداث آن مشکل خاصی پدید نمی‌آورد. ولی اگر

به ترتیب حدود ۱۲٪ و $4/5 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشد، با افزودن فقط ۱ درصد سیمان به حدود ۳٪ و $0/77 \text{ kg/cm}^2$ کاهش می‌یابد (جدول ۲). حال آنکه با افزایش سیمان از ۱ به ۴ درصد، پتانسیل و فشار تورم نمونه به حدود ۱٪ و $0/2 \text{ kg/cm}^2$ می‌رسد که این کاهش در مقابل بهای افزایش سیمان چشم‌گیر نیست. در هر حال با توجه به احتمال پایین واکنش پوزولانی سیمان با گچ (پس از تثبیت) سیمان می‌تواند به عنوان بهترین ماده افزودنی در نظر گرفته شود.

• روش اختلاط با سیمان می‌تواند خصوصیات تورمی خاک‌های گچی را به طور قابل توجهی نسبت به روش اختلاط با آهک اصلاح نماید. با افزایش درصد سیمان مقدار تورم این‌گونه خاک‌ها به میزان زیادی کاهش می‌یابد. افزایش درصد سیمان کاهش بیشتری در مقدار تورم نسبت به افزایش درصد آهک ایجاد می‌کند ولی به نظر می‌رسد افزودن بیشتر از ۳ تا ۴ درصد وزنی سیمان به خاک‌های گچی ML تاثیر چندانی نداشته باشد. به عبارتی پتانسیل و فشار تورم نمونه بدون ماده افزودنی که

منابع

- فاخر، ع. و عسگری، ف. (۱۳۷۲)، تورم و واگرایی خاکها از دید مهندسی ژئوتکنیک، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران
- Ameta N. K., Purohit D. G. M., and Wayal A. S., 2007, Characteristics, Problems and Remedies of Expansive Soils of Rajathan, India, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.12, Bundle E, pp 1-8.
- Azma, S., Abduljawwad, S. N. and Al-Amoudi, O. S. B., 2003, Volume Change Behavior of Arid Calcareous Soils, *Journal of Natural Hazards Review*, Vol. 4, No. 2.
- Bandyopadhyay S. S. (1981) Prediction of Swelling Potential for Natural Soil, ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 107, No. GTS7.
- Chen R. H. (1975) *Foundations on Expansive Soils*, Elsevier Science Publishers.
- Chen F. H. (1988) The Basic Physical Properties of Expansive Soils, *Proceeding of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, Haifa, Israel.
- Dongxu L., Zhongzi X., Zhimin L., Zhihua P. and Cheng L. (2002) The Activation and Hydration of Glassy Cementitious Materials, *Cement and Concrete Research Journal*, Elsevier Science Ltd. Vol.32 pp.1145-1152.
- Einstein H. H. (1996) "Tunneling in difficult ground", *Swelling Behavior And Identification of Swelling Rocks*, *Rock Mechanics, Rock Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 113 –117.
- Ferris G. A., Eades J. L., Graves R. E. and McLellan G. H. (1995) Improved Characteristics in Sulfate Soils Treated with Barium Compounds Before Lime Stabilization, *Transportation Research Record*, 1259, pp. 45-51.
- Hunter D. (1988) Lime Induced Heave in Sulfate, Bearing Clay Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 2, pp. 150-167.
- Mitchell J. K. (1986) Practical Problems from Surprising Soil Behavior, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 3, pp. 259-289.
- Prakash B. S., Kota D. H., Hazlett D. and Perin L. (1996), *Sulfate-Bearing Soils : Problems with Calcium-Based Stabilizers*, *Transportation Research Record 1546 TRR*, pp. 62-69.
- Shahid A. and Sahel N. A. (2000) Influence of Gypsification on Engineering Behavior of Expansive Clays, ASCE, *Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering*, Vol. 126, No. 6, pp. 538-542.
- Wild S., Kinuthia J. M., Jones G. I., and Higgins D. D. (1998) Effects of Partial Substitution of Lime with Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on the Strength Properties of Lime-Stabilized Sulphate-Bearing Clay Soils, *Engineering Geology Journal*, Elsevier Science Ltd. Vol. 51 pp. 37-53.
- Wild S., Kinuthia J. M., Jones G. I., and Higgins D. D. (1999) Suppression of Swelling Associated with Ettringite Formation in Lime Stabilized Sulphate Bearing Clay Soils by Partial Substitution of Lime with Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Engineering Geology Journal*, Elsevier Science Ltd. Vol. 51 pp. 257-277.

- Yaujun D.; Shenglin L. and Shigenori H. (1999), Swelling-Shrinkage Properties and Soil Improvement of Compacted Expansive Soil, Journal of Engineering Geology No. 53, pp. 351-358.
- Yucel G. and Hakan K. (2003) Environmental Effects on Expansive Soils, First International Conference on Environmental Research and Assessment, Bucharest, Romania.