

تأثیر آهک و سیمان بر خصوصیات تورمی خاک رس سولفات

اکبر چشمی

بخش تکتونیک و زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

علی اسحاقی

بخش تکتونیک و زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

جعفر حسن پور

استادیار گروه تکتونیک و زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت ۹۴/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۳۰

a.cheshomi@ut.ac.ir

چکیده

بمنظور بررسی تأثیر آهک و سیمان بر ویژگی‌های تورمی رس سولفات سه گروه نمونه با ترکیب‌های مختلف از رس سولفات و آهک، رس سولفات و سیمان، رس سولفات و آهک و سیمان تولید و درصد تورم، فشار تورم، حد روانی و خمیری آن‌ها قبل و بعد از اضافه کردن افزودنی‌ها مقایسه شده است. اضافه کردن ۳، ۵ و ۷ درصد آهک باعث افزایش درصد و فشار تورم و حد روانی و خمیری خاک شده است. دلیل این افزایش تشکیل کانی میله‌ای شکل و متورم‌شونده اترینگایت است. اضافه کردن ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان به دلیل تشکیل ژل‌های سیمانی باعث کاهش درصد و فشار تورم، حد روانی و حد خمیری خاک شده است. اضافه کردن همزمان آهک و سیمان با درصدهای فوق به خاک مذکور هرچند باعث کاهش حد خمیری خاک شده ولی تأثیر کمی بر درصد و فشار تورم داشته است. بنابراین اصلاح ویژگی‌های تورمی رس‌های سولفات و یا رس‌های در معرض هجوم سولفات با آهک امکان‌پذیر نبوده و استفاده از سیمان پرتلند تیپ دو مناسب‌تر است.

کلمات کلیدی: تورم، آهک، سیمان، رس سولفات، اترینگایت

مقدمه

اثرات مخرب وجود سولفات در خاک‌های تثبیت‌شده با آهک توسط محققین زیادی بیان شده، در برخی پروژه‌ها تورم تا ۳۰ سانتیمتر گزارش شده است (Ouhadi and Yong, 2008). وجود رس، آهک و گچ مانع تشکیل سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم شده و به جای آن‌ها کانی اترینگایت تشکیل می‌شود (Yazici, 2004). ابوسیف (Abu Seif, 2015) تحقیقی در مورد تأثیر آهک زنده بر پتانسیل تورم خاک‌های متورم‌شونده انجام داده و بیان کرد در صورتی که محیط واکنش دارای سولفات باشد، افزودن آهک بیشتر از ۳٪ بدیل تشکیل کانی‌های متورم‌شونده درصد تورم و فشار تورم را افزایش می‌دهد. ویلد و همکاران (Wild et al., 1999) نشان دادند که در صورت بیشتر بودن سولفات از ۱/۸٪، اترینگایت تشکیل شده و تورم افزایش می‌یابد. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر افزودنی‌ها بر تورم خاک رس، خاک رس حاوی ۱/۳۱٪ سولفات محلول در آب انتخاب و درصدهای مختلفی از آهک، سیمان و ترکیب آهک و سیمان به آن اضافه شده و ویژگی‌های تورمی (درصد تورم و فشار تورم) به همراه حدود اتربرگ آن قبل و بعد از افزودن افزودنی‌ها بررسی شده و نهایتاً نوع و درصد بهینه افزودنی مناسب پیشنهاد شده است.

روش کار

خصوصیات مصالح

خواص فیزیکی و کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک رس بر اساس آنالیز XRD در (جدول ۱) ارائه شده است. بر این اساس خاک پایه مورد آزمایش یک رس چاق (CH) حاوی کانی‌های رسی مونت‌موریلونیت و ایلیت و همچنین کلسیت، ژپس و فلدسپات است. آنالیز XRD نمونه در (شکل ۱) ارائه شده است.

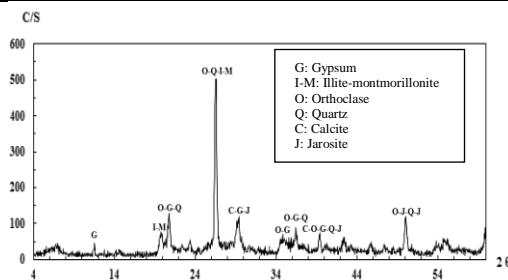
برخی خاک‌های رسی در حضور آب افزایش حجم یافته و متورم می‌شوند، تورم معمولاً در رس‌های غیراشباع با ظرفیت جذب آب زیاد مشاهده می‌شود. خاک متورم‌شونده با کم شدن رطوبت، منقبض و با جذب آب منبسط می‌شود (Khattab et al., 2007). این تغییر حجم باعث اعمال فشار و بروز ترک در مسیر راه‌ها، لوله‌های انتقال، پی ساختمان، فرودگاه، راه‌آهن و غیره می‌شود. بنابراین مطالعه در زمینه شناخت این پدیده و محدود کردن آن ضروری است (Buhler and Cerato, 1999; Yazici, 2004). بهبود خصوصیات خاک‌ها در وضعیت درجا با استفاده از مواد افزودنی طبیعی یا مصنوعی پایدار کردن یا تثبیت خاک نامیده می‌شود (Yazici, 2004). آهک، سیمان، خاکستر بادی، مخلوط آهک و خاکستر بادی، مخلوط آهک و میکرو سیلیس، مخلوط آهک و سرباره کوره ذوب آهن برخی از این افزودنی‌ها هستند (Mutaz and Dafalla, 2015; Yazici, 2004; Zaimoglu et al., 2014). از آهک بعنوان روش اقتصادی در تثبیت خاک‌ها، بطور گسترده استفاده می‌شود (Hunter, 1988؛ عبدی و آذرفر، ۱۳۸۲، طباطبایی و آقایی، ۱۳۸۷؛ رحمانیان دوین و رضایی، ۱۳۹۳). افزودن آهک به خاک رس باعث افزایش یون‌های کلسیم و منیزیم و جایگزین شدن آنها بجای یون‌های سدیم و پتاسیم خاک می‌گردد (Kumar et al., 2007). وجود سولفات در خاک رس تثبیت‌شده با آهک، به دلیل تغییر در واکنش‌های رس و آهک، تورم را افزایش و مقاومت خاک را کاهش می‌دهد. سولفات می‌تواند در خاک وجود داشته باشد، یا از طریق آب زیرزمینی به خاک وارد شود (Wild et al., 1999; Celik and Nalbantoglu, 2013; Kinuthia and Wild,

است. (جدول ۲) نتایج آنالیز شیمیایی خاک رس و مواد افزودنی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود خاک رس مورد استفاده حاوی ۱/۳۱٪ درصد سولفات محلول در آب بوده لذا یک رس سولفات است.

آهک مورد استفاده آهک صنعتی از نوع شکفته به رنگ شیری با چگالی ویژه ۲/۳۷ و سیمان مورد استفاده سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت سیمان تهران به رنگ خاکستری با چگالی ویژه ۳/۱ است. این سیمان مقاومت خوبی در برابر حمله سولفات‌ها دارد. آب مورد استفاده آب مقطر

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی مصالح استفاده شده و نتایج XRD خاک رس

| نتیجه آنالیز XRD | رده‌بندی بر اساس استاندارد یونیفاید | رنگ | چگالی ویژه | رطوبت بهینه (%) | دانسیته خشک حداکثر (gr/cm ³) | نشانه خمیری (%) | حد خمیری (%) | حد روانی (%) |
|---|-------------------------------------|------|------------|-----------------|--|-----------------|--------------|--------------|
| ایلیت - مونتموریلونیت، کوارتز، کلسیت، ژپس، ارتوکلاز و ژوراسیت | CH | شیری | ۲/۶۴ | ۲۹ | ۱/۴۱ | ۸۴/۱ | ۳۵/۹ | ۱۲۰ |



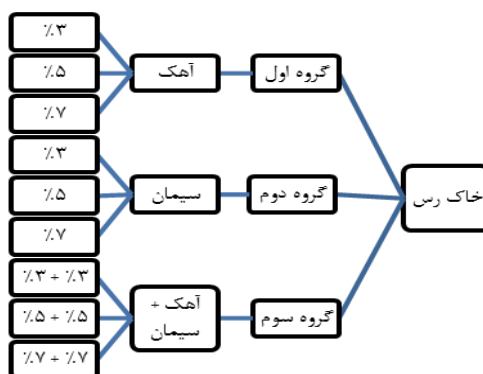
شکل ۱. آنالیز XRD رس

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی خاک رس سولفات و افزودنی‌ها آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌ها

| درصد موجود در نمونه | | | ترکیب شیمیایی | درصد موجود در نمونه | | | ترکیب شیمیایی | درصد موجود در نمونه | | | ترکیب شیمیایی |
|---------------------|-------|--------|-----------------|---------------------|------|--------|-------------------------------|---------------------|------|--------|--------------------------------|
| سیمان | آهک | خاک رس | | سیمان | آهک | خاک رس | | سیمان | آهک | خاک رس | |
| ۰/۱ | ۰/۵ | ۰/۱ | SrO | ۰/۲ | ۰/۲ | ۱/۲ | Na ₂ O | ۱۸/۰ | ۱/۸ | ۶۰/۶ | SiO ₂ |
| ۰/۱> | ۰/۱ | ۰/۱ | Cl | ۰/۸ | ۰/۱> | ۱/۸ | K ₂ O | ۳/۴ | ۰/۷ | ۱۴/۰ | Al ₂ O ₃ |
| ۵/۳ | ۲۸/۷۹ | ۸/۰۳ | L.O.I | ۰/۱> | ۰/۱> | ۰/۱> | P ₂ O ₅ | ۴/۷ | ۰/۳ | ۲/۱ | Fe ₂ O ₃ |
| - | - | ۰/۳۱ | Soluble sulfate | ۰/۳ | - | ۰/۴ | TiO ₂ | ۶۰/۷ | ۶۶/۷ | ۳/۲ | CaO |
| | | | | ۰/۳ | ۰/۱> | ۰/۱ | MnO | ۲/۸ | ۰/۶ | ۱/۳ | MgO |
| | | | | - | - | ۳ | CaCO ₃ | ۳/۱ | ۰/۳ | ۳/۶ | Total SO ₃ |

به‌عنوان مثال نمونه 5L+5C نشان‌دهنده خاک رس شامل ۵ درصد آهک به اضافه شکل آزمایش حدود اتربرگ و درصد تورم به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D4318 و ASTM D4546 بر روی نمونه‌ها انجام شد.

در ترکیب سیمان و آهک مقدار ترکیبات SiO₂، Al₂O₃ و CaO حائز اهمیت است، زیرا این ترکیبات باعث کمک به انجام واکنش‌های پوزولانی می‌شوند. جهت بررسی تأثیر آهک، سیمان و ترکیب آهک و سیمان روی رس سولفات مطابق (شکل ۲) سه گروه نمونه تولید گردید. به جهت اختصار از حرف "L" برای آهک و "C" برای سیمان استفاده شده است.



۲. نمودار جریان نمونه‌های مختلف ساخته شده ۵ درصد سیمان است.

بحث

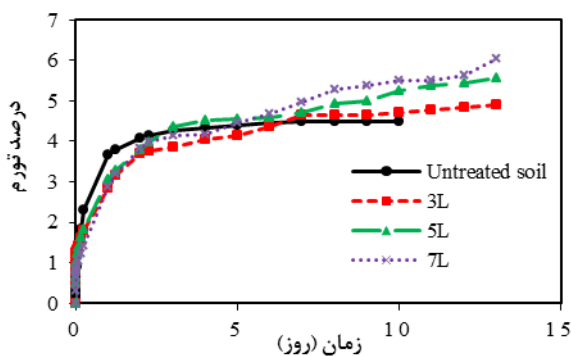
آزمایش‌های انجام شده روی سه گروه نمونه، شامل آزمایش تعیین حدود اتبرگ و تورم (درصد تورم و فشار تورم) می‌باشد. این آزمایش‌ها روی همه نمونه‌های معرفی شده در (شکل ۲) انجام گردید. نتایج آزمایش‌ها در (جدول ۳) ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک رس سولفاته و نمونه‌های تثبیت‌شده

| گروه | نمونه | تورم (%) | فشار تورم (kPa) | LL(%) | PL(%) |
|------|--------|----------|-----------------|-------|-------|
| اول | خاک رس | ۴/۵ | ۹/۹ | ۱۲۰ | ۳۵/۹ |
| | 3L | ۴/۹ | ۱۱ | ۱۰۸ | ۵۹ |
| | 5L | ۵/۵ | ۱۳/۵ | ۱۰۳ | ۵۲/۵ |
| | 7L | ۶ | ۱۵/۴ | ۱۰۴ | ۵۳ |
| دوم | 3C | ۱/۱ | ۲/۸ | ۷۴ | ۴۷ |
| | 5C | ۱/۹ | ۶/۴ | ۸۷/۷ | ۴۷/۵ |
| | 7C | ۲/۱ | ۷/۵ | ۸۹/۷ | ۴۴/۱ |
| سوم | 3L+3C | ۴/۱ | ۸/۳ | ۹۶ | ۵۷ |
| | 5L+5C | ۴/۳ | ۹/۱ | ۹۵/۶ | ۵۲/۵ |
| | 7L+7C | ۴/۵ | ۹/۶ | ۱۰۱ | ۵۷ |

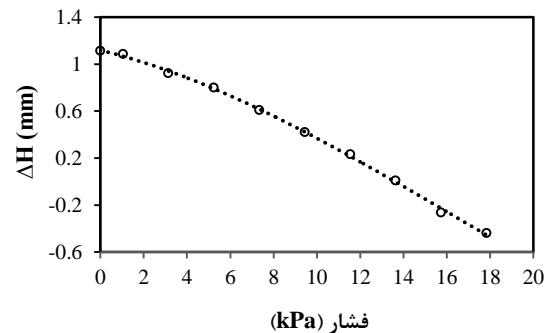
نمونه‌های گروه اول (رس سولفاته تثبیت‌شده با آهک)

در شکل‌های (۵) و (۶) که بر اساس داده‌های (جدول ۳) رسم شده، تغییرات درصد تورم و فشار تورم خاک رس سولفاته تثبیت نشده و تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک مقایسه شده است. افزودن آهک باعث افزایش درصد و فشار تورم رس سولفاته شده است. بنابراین آهک قادر نیست ویژگی‌های تومی رس سولفاته را اصلاح کند.



شکل ۵. نمودارهای درصد تورم در برابر زمان (روز) برای نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک به همراه رس سولفاته تثبیت نشده

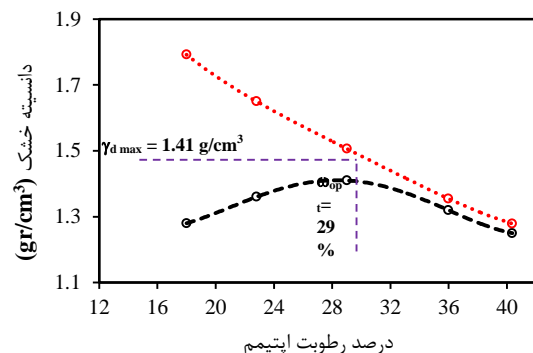
آزمایش فشار تورم نیز مطابق روش A ارائه شده توسط (Sridharan et al., 1986) بر روی تمامی نمونه‌ها صورت گرفت. مطابق این روش پس از تورم کامل نمونه بر روی نمونه بارگذاری صورت می‌گیرد تا نمونه به ارتفاع اولیه خود برسد. پس از اینکه نمونه تحت هر بار به تعادل رسید بارگذاری بعدی اعمال می‌شود. با رسم نمودار تغییرات ارتفاع در برابر فشار، مقدار بارگذاری که برای رساندن ارتفاع نمونه به مقدار اولیه انجام شده است فشار تورم خوانده می‌شود. به عنوان مثال در (شکل ۳) نمودار فشار تورم برای نمونه 5L ارائه شده است.



شکل ۳. نمودار تغییرات ارتفاع نمونه (mm) در برابر فشار برای نمونه 5L. با توجه به شکل فشار تورم نمونه ۱۳/۵ کیلوپاسکال می‌باشد.

مطابق این شکل فشار تورم نمونه 5L برابر ۱۳/۵ کیلوپاسکال است. قبل از آزمایش تورم با انجام آزمایش تراکم استاندارد طبق استاندارد ASTM D698 رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر خاک همانطور که در (شکل ۴) نشان داده شده تعیین گردید. بر این اساس دانسیته خشک حداکثر نمونه ۱/۴۱ گرم بر سانتیمتر مکعب و درصد رطوبت بهینه نمونه ۲۹ درصد می‌باشد. سپس نمونه‌ها با درصد رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر خاک پایه در داخل قالب تورم (قالب دایره‌ای شکل به قطر ۵ سانتیمتر و ارتفاع ۲ سانتیمتر) جایگذاری گردید. بعد از آن قالب حاوی نمونه در دستگاه ادمتر قرار گرفت. برای افزودن آهک (یا سیمان) به خاک ابتدا آهک (یا سیمان) و خاک رس به صورت خشک در درصد‌های مدنظر با هم مخلوط شده سپس رطوبت مورد نیاز به صورت همگن به نمونه اضافه شده است.

بعد از قرار دادن قالب داخل دستگاه به نمونه آب اضافه شد و در فواصل زمانی ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه و سپس ۲، ۴، ۸ و ۲۴ ساعت و بعد از آن هر ۲۴ ساعت تا مدت زمانی که تورم در نمونه انجام می‌شود، میزان آن اندازه‌گیری گردید.

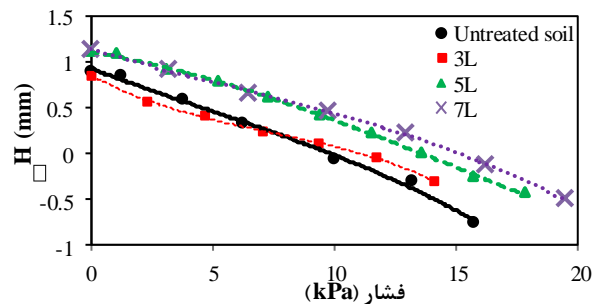


شکل ۴. نمودار تراکم خاک رس سولفاته تثبیت نشده

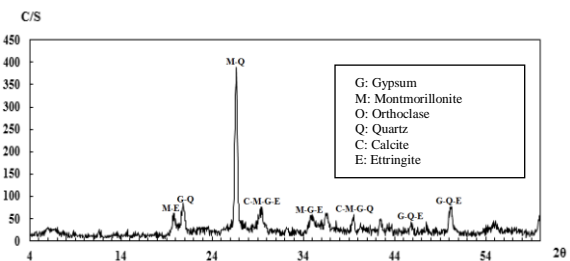
مکانیزم واکنش‌های شیمیایی بین رس سولفات‌ها و آهک که منجر به تشکیل اترینگایت می‌شود قبلاً توسط (Rajasekaran, 2005) گزارش شده است. در ابتدا در حضور آب واکنش هیدراتاسیون آهک شکل می‌گیرد، سپس هیدروکسید کلسیم تولید شده تجزیه شده و تولید Ca^{2+} و OH^- می‌کند. این پدیده pH محیط را افزایش داده و باعث حل شدن کانی‌های رس می‌شود، این واکنش‌ها در کنار حل شدن کانی‌های سولفات، باعث تشکیل اترینگایت می‌شود.

(شکل ۹) تغییرات حد خمیری، حد روانی و شاخص خمیری نمونه‌های خاک رس تثبیت شده با آهک بلافاصله بعد از تثبیت و بعد از تورم را نشان می‌دهد. انجام آزمایش حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های تثبیت شده با آهک بلافاصله بعد از تثبیت نشان می‌دهد حد روانی و شاخص خمیری خاک کاهش یافته، تکرار آزمایش روی نمونه بعد از تورم (۱۳ روز بعد از اضافه شدن آهک) نشان می‌دهد که حد روانی و شاخص خمیری افزایش یافته است. کاهش حد روانی و شاخص خمیری بلافاصله بعد از آزمایش به دلیل انجام واکنش‌های تبادل کاتیونی است که جزو واکنش‌های سریع بوده و بلافاصله بعد از اضافه کردن آهک به خاک رس انجام می‌شود. افزایش حد روانی و شاخص خمیری بعد از کامل شدن تورم به دلیل تشکیل کانی اترینگایت است. این کانی محصول واکنش‌های پوزولانی بین خاک رس سولفات‌ها و آهک بوده که نیاز به زمان دارد. به همین دلیل اثر آن روی ویژگی‌های خمیری خاک بعد از ۱۳ روز مشخص شده است.

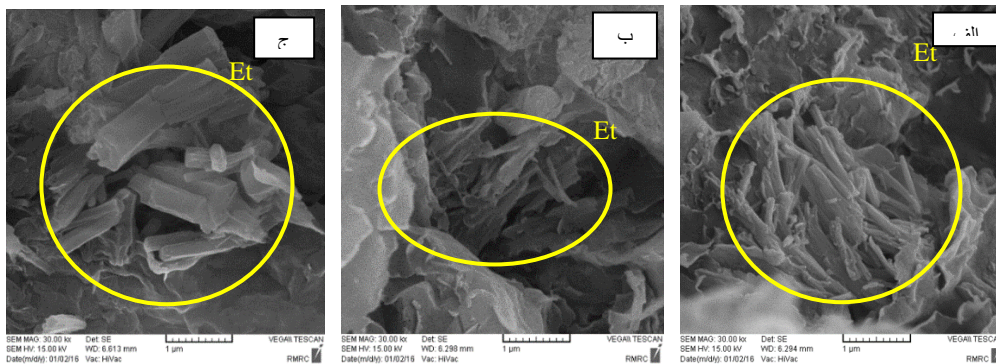
آنالیز XRD نمونه (شکل ۷) و تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی برای نمونه‌های 3L، 5L و 7L در شکل (۸ الف، ب و ج)، تشکیل کانی اترینگایت در این مخلوط را نشان می‌دهد. تشکیل کانی اترینگایت در این مخلوط را نشان می‌دهد.



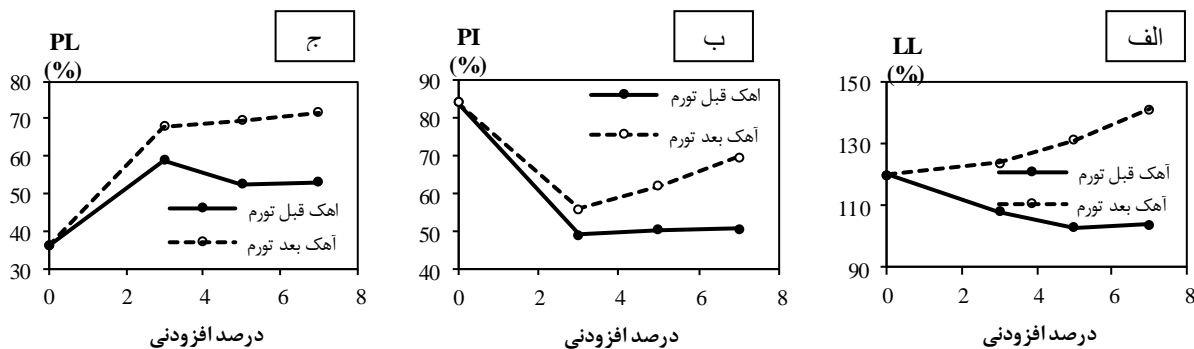
شکل ۶. نمودارهای تغییرات ارتفاع نمونه (mm) در برابر فشار (kPa) برای نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک به همراه رس سولفات‌ها تثبیت نشده



شکل ۷. آنالیز XRD نمونه تثبیت شده با آهک



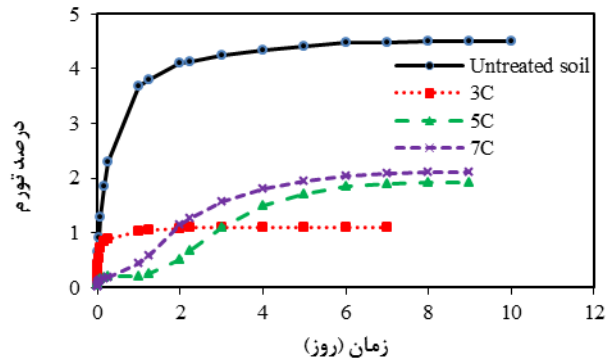
شکل ۸. کانی‌های اترینگایت تشکیل شده در نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک، (الف) نمونه 7L، (ب) نمونه 5L، (ج) نمونه 3L.



شکل ۹. تغییرات حدود اتربرگ با اضافه کردن آهک بلافاصله بعد از اضافه کردن و بعد از انجام تورم (۱۳ روز)، (الف) حد روانی (ب) حد خمیری (ج) نشانه خمیری

نمونه‌های گروه دوم (رس سولفاته تثبیت شده با سیمان)

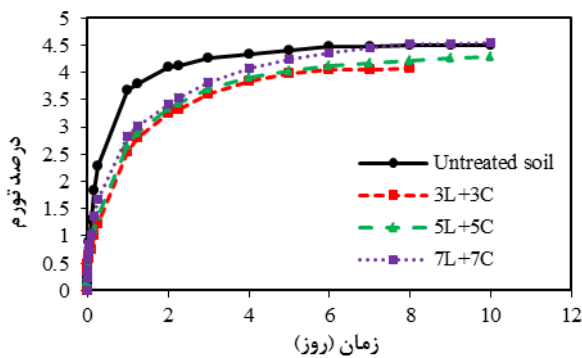
با توجه به داده‌های (جدول ۳) در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نمودارهای درصد تورم و فشار تورم نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در مقایسه با خاک رس سولفاته تثبیت نشده نشان داده شده است.



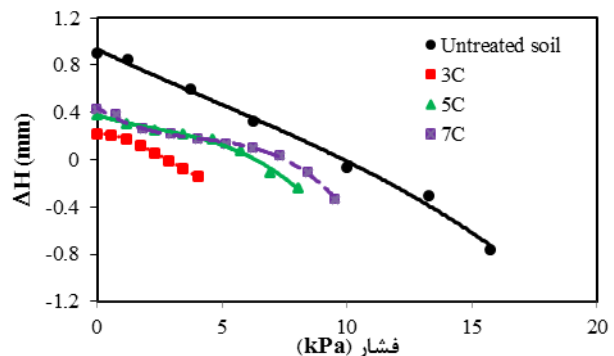
شکل ۱۰. نمودارهای درصد تورم در برابر زمان (روز) برای نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان به همراه رس سولفاته تثبیت نشده

نمونه‌های گروه سوم (رس سولفاته تثبیت شده با آهک و سیمان)

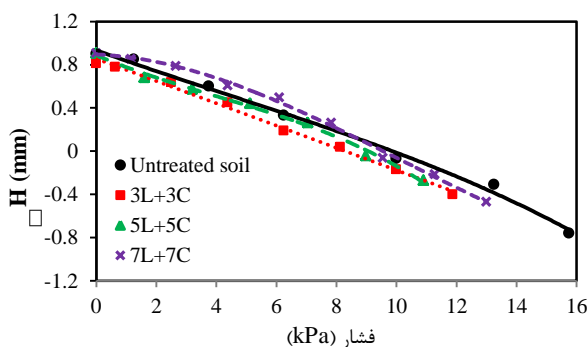
با توجه به داده‌های (جدول ۳) در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نمودارهای درصد تورم و فشار تورم نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان در مقایسه با خاک رس سولفاته تثبیت نشده نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نمودارهای درصد تورم در برابر زمان (روز) برای نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک و سیمان به همراه رس سولفاته تثبیت نشده



شکل ۱۱. نمودارهای تغییرات ارتفاع نمونه (mm) در برابر فشار (kPa) برای نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف سیمان به همراه رس سولفاته تثبیت نشده



شکل ۱۳. نمودارهای تغییرات ارتفاع نمونه (mm) در برابر فشار (kPa) برای نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک و سیمان به همراه رس سولفاته تثبیت نشده

افزودن همزمان آهک و سیمان با درصد‌های ۳، ۵ و ۷ باعث شده درصد تورم نسبت به خاک رس تثبیت نشده به ترتیب ۱۹/۸٪، ۴/۴٪ و ۰٪ کاهش پیدا کند، همچنین فشار تورم نیز به ترتیب ۱۶/۲٪، ۸/۱٪ و ۳٪ درصد کاهش پیدا کرده است. در نمونه‌های این گروه با توجه به نتایج،

همان‌گونه که در (شکل ۱۰) مشاهده می‌شود تورم نمونه تثبیت نشده بعد از ۷ روز پایان یافته است. اما تورم نمونه تثبیت شده با ۳ درصد سیمان بعد از ۳ روز تمام شده و تورم نمونه‌های دارای ۵ و ۷ درصد سیمان بعد از ۷ روز پایان یافته است. با افزودن سیمان با درصد‌های ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی خاک درصد تورم به ترتیب ۶/۷۵٪، ۳/۵۳٪ و ۲/۲۴٪ نسبت به نمونه تثبیت نشده، کاهش یافته است. بنابراین سیمان مورد استفاده در این تحقیق باعث کاهش قابل توجهی در درصد تورم و فشار تورم خاک رس مورد مطالعه و در نتیجه باعث اصلاح خصوصیات تورمی خاک رس شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که ۳ درصد سیمان تأثیر بیشتری در کاهش تورم خاک رس سولفاته داشته است. نتایج حدود اتربرگ نشان می‌دهد که سیمان تأثیر قابل توجهی در کاهش حد خمیری خاک داشته است که در این مورد نیز ۳ درصد سیمان نسبت به درصد‌های دیگر بیشترین کاهش را داشته است. اضافه شدن سیمان به خاک رس باعث انجام واکنش‌های پوزولانی و

محلول در آب، باعث افزایش درصد و فشار تورم خاک می‌شود. بنابر این آهک نمی‌تواند برای بهبود ویژگی‌های تورمی رس سولفات‌ها استفاده شود. با افزایش درصد آهک، درصد و فشار تورم افزایش می‌یابد. هر چند بلافاصله بعد از اضافه کردن آهک حد روانی و خمیری خاک کاهش یافته لیکن با گذشت زمان بدلیل واکنش‌های پوزولانی و تشکیل کانی اترینگایت این حدود افزایش پیدا می‌کنند. افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان پرتلند تیپ دو باعث کاهش درصد و فشار تورم خاک رس سولفات‌ها شده است. این افزودنی حد روانی و خمیری خاک را نیز کاهش می‌دهد. دلیل این کاهش انجام واکنش‌های تبادل کاتیونی و واکنش‌های پوزولانی است که منجر به تشکیل ژل‌های سیمانی در نمونه شده است. بیشترین کاهش با افزودن ۳٪ سیمان اتفاق افتاده لذا این مقدار سیمان به عنوان درصد بهینه معرفی می‌شود. افزودن همزمان آهک و سیمان با درصد‌های یکسان و برابر (۳، ۵ و ۷ درصد از هر کدام) تغییر جزئی در درصد و فشار تورم ایجاد نموده در نتیجه استفاده از این ترکیب توصیه نمی‌شود. بنابر این در خاک‌های رسی حاوی سولفات یا خاک‌های رس در معرض هجوم سولفات استفاده از آهک برای اصلاح ویژگی‌های تورمی مناسب نبوده و سیمان پرتلند تیپ دو می‌تواند گزینه مناسبی باشد.

افزودن همزمان ۳ درصد آهک و سیمان نسبت به درصد‌های دیگر کاهش بیشتری در درصد و فشار تورم ایجاد کرده است. با توجه به شکل ۱۲ تورم نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان بعد از ۸ روز تمام شده، در حالیکه تورم نمونه‌های تثبیت شده با آهک (شکل ۵) بعد از ۱۳ روز همچنان ادامه داشته است. بنابر این سیمان باعث کاهش زمان تورم و کاهش اندک درصد تورم و فشار تورم نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با آهک شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده از اضافه کردن هر یک از این مواد به طور جداگانه، می‌توان گفت تشکیل توأم اترینگایت و میل به افزایش حجم نمونه بدلیل افزایش آهک و انجام واکنش‌های سیمانی شدن و تشکیل ژل-های سیمانی و جلوگیری از افزایش حجم نمونه بدلیل افزودن سیمان باعث شده که ویژگی‌های تورمی نسبت به نمونه تثبیت نشده چندان تغییر نکرده است. با این حال نتایج حدود اتربرگ نشان می‌دهد که ترکیب آهک و سیمان باعث کاهش حد خمیری نسبت به خاک رس سولفات‌ها تثبیت نشده گردیده است.

نتیجه‌گیری

رس‌های با قابلیت تورم که حاوی سولفات هستند یا در معرض هجوم سولفات قرار می‌گیرند در برابر افزودنی‌های که برای اصلاح آنها استفاده می‌شود نسبت به رس‌های فاقد سولفات عکس‌العمل متفاوتی از خود نشان می‌دهند. افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد آهک به رس حاوی ۱/۳۱٪ سولفات

منابع

- رحمانیان دوفین. س.، رضایی. ف.، ۱۳۹۳، استفاده از آهک برای اصلاح خاک‌های فروریزی منطقه سمنان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دانشگاه شهید چمران اهواز، دوره ۴، شماره ۱۲.
- طاهرخانی، ح.، سلامی، ح.، ۱۳۹۲، مقایسه تثبیت‌کننده‌های آهک، سیمان و CBR PLUS برای تثبیت خاک رس، مجله مهندسی حمل و نقل، سال پنجم، شماره ۲، ص ۲۶۳-۲۷۴.
- عبدی. م.، آذرفر. پ.، ۱۳۸۲، تأثیر کلرید سدیم بر مقاومت فشاری و خواص خمیری کائولینیت تثبیت شده با آهک، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ص ۳۰۵-۳۱۲.
- هاشمی طباطبایی. س.، آقای آرابی. ع.، ۱۳۸۷، مقایسه تأثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده، نشریه علوم زمین، سال هفدهم، شماره ۶۷، ص ۱۴-۲۱.
- Abu Seif. E.S.S., 2015, Efficiency of Quicklime in Reducing the Swelling Potential of Pulverized Expansive Shale, Northern Jeddah, Saudi Arabia, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol:74, p: 637-650.
- ASTM, 1996, One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils, Designation: D4546-96.
- ASTM, 1998, Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils, Designation: D4318.
- ASTM, 2004, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, Designation: D698
- Buhler. R.L., Cerato. A.B., 1999, Stabilization of Oklahoma Expansive Soils Using Lime and Class C Fly Ash, Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization, GSP, No:162, p: 1-10.
- Celik. E., Nalbantoglu. Z., 2013, Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on the Swelling Properties of Lime-Stabilized Sulfate-Bearing Soils, Engineering Geology, Vol:163, p: 20-25.
- Hunter. D., 1988, Lime Induced Heave in Sulfate-Bearing Clay Soils, Journal of Geotechnical Engineering, Vol:114, No:2, p: 150-167.
- Khattab. S.A.A., Al-Mukhtar. M., Fleureau. J.M., 2007, Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol:19, No:4, p: 358-366.
- Kinuthia. J.M., Wild. S., 2001, Effects of Some Metal Sulphates on the Strength and Swelling Properties of Lime-Stabilised Kaolinite, International Journal of pavement Engineering, Vol:2, No:2, p: 103-120.
- Kumar. A., Walia. B.S., Bajaj. A., 2007, Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol:19, No:3, p: 242-248.
- Mutaz. E., Dafalla. M.A., 2014, Chemical Analysis and X-ray Diffraction Assessment of Stabilized Expansive Soils, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol:73, p: 1063-1072.
- Ouhadi. V.R., Yong. R.N., 2008, Ettringite Formation and Behavior in Clayey Soils, Applied Clay Science, Vol: 42, No:1-2, p: 258-265.

- Rajasekaran. G., 2005, Sulphate Attack and Ettringite Formation in the Lime and Cement Stabilized Marine Clays, Ocean Engineering, Vol: 32, p: 1133-1159.
- Sridharan. A., Rao. A.S., Sivapullaiah. P.V., 1986, Swelling Pressure of Clays, Geotechnical Testing Journal, Vol:9, p: 24-33.
- Wild. S., Kinuthia. J.M., Jones. G.I., 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, Vol:51, No:4, p: 257-277.
- Yazici. V., 2004, Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS), GBFS-Lime Combinations and GBFS Cement, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, <http://www.etd.lib.metu.edu.tr/upload/12604946/index.pdf>
- Zaimoglu. A.S., Tan. O., Akbulut. K.R., 2015, Optimization of Consistency Limits and Plasticity Index of Fine-grained Soils Modified with Polypropylene Fibers and Additive Materials, KSCE Journal of Civil Engineering, p: 1-8.