

مطالعه‌ی تأثیر افزودن آهک و الیاف پلی پروپیلن در میزان تورم و فشار تورمی خاک رس کائولینیت در حضور آب و سولفات سدیم

محمود رضا عبدی* (دانشیار)

حامد میرزایی فو (دانشجوی دکتری)

حسینعلی مومندرحیمی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دربی ۲ - ۳۴، شماره ۱/۱، ص. ۵۳-۴۷

در پژوهش حاضر، با اختلاط الیاف پلی پروپیلن و آهک با کائولینیت و انجام آزمایش تورم توسط دستگاه تحکیم، تغییرات تورم و فشار مخلوط‌ها بررسی شده است. نمونه‌های رس با ۰/۰۵، ۰/۱۰، ۰/۲۰ درصد الیاف و ۱، ۳، ۵ درصد آهک به صورت مجزا و به طور هم زمان مخلوط و سپس یک سری از آنها در آب خالص و سری دیگر با محلول ppm ۱۰۰۰۰ سولفات سدیم اشباع شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف و آهک به طور قابل ملاحظه‌ی باعث کاهش تورم نمونه‌ها می‌شود. افزودن آهک تا ۳٪، بیشترین تأثیر را در کاهش تورم داشته و مقدار الیاف بهینه‌ی نمونه‌ها ۱۰٪ تعیین شده است. لذا آهک، افزودنی مؤثرتری نسبت به الیاف به منظور کنترل و کاهش تورم است، که بیانگر تأثیر گذاری بیشتر عوامل شیمیایی در مقایسه با عوامل فیزیکی است. همچنین افزودن آهک به خاک رس در حضور سولفات سدیم، به طور قابل ملاحظه‌ی باعث افزایش میزان و فشار ناشی از تورم شده است.

abdi@kntu.ac.ir
h.mirzaeifar@dena.kntu.ac.ir
hosseinmohamadrahimi@gmail.com

واژگان کلیدی: تورم، تثبیت، کائولینیت، پلی پروپیلن، سولفات سدیم.

۱. مقدمه

خاک‌های رسی در معرض عوامل جوی (تغییرات رطوبت) تغییر حجم می‌دهند و می‌توانند خسارت‌های جدی به جاده‌ها، بزرگراه‌ها، پل‌ها و ساختمان‌ها وارد کنند. خاک‌های متورم شونده به دلیل جذب آب، ازدیاد حجم می‌دهند و اصطلاحاً متورم می‌شوند. تورم ناشی از «واکنش فیزیکی - شیمیایی خاک و محیط» است، که مقدار آن بستگی به نوع کانی‌های رسی و همچنین پیوند مولکولی موجود در آنها دارد. علاوه بر این، ساختمان توده‌ی رس، ساختار شبکه‌ی بلوری و ظرفیت تبادل کاتیونی نیز در بروز پدیده‌ی تورم نقش به‌سزایی ایفا می‌کنند. خاک‌های متورم شونده به دو گروه خاک‌های ناشی از سنگ‌های آذرین و خاک‌های حاصل از سنگ‌های رسوبی تقسیم می‌شوند، که در گروه اول کانی‌های فلدسپار و پیروکسین به مونتموریلونیت و کانی‌های ثانوی دیگر و گروه دوم به مونتموریلونیت تبدیل می‌شوند.

تورم و خشک شدن متناوب خاک‌های متورم شونده باعث می‌شود که در هر دوره، تورم برگشت ناپذیر به وجود آید.^[۱] پژوهشگران روش‌های بسیاری را به منظور بهسازی و تثبیت خاک‌های متورم شونده با استفاده از مواد شیمیایی، و روش‌های مکانیکی و فیزیکی بررسی و پیشنهاد کرده‌اند. در سال ۱۹۹۸، خاکستر درختان زیتون سوخته

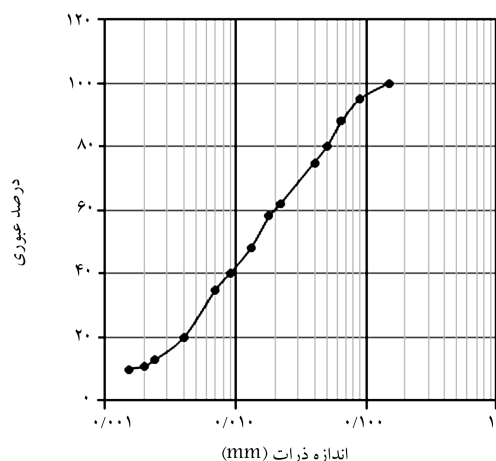
تر و خشک شدن متناوب خاک‌های متورم شونده باعث می‌شود که در هر دوره، تورم برگشت ناپذیر به وجود آید.^[۱] پژوهشگران روش‌های بسیاری را به منظور بهسازی و تثبیت خاک‌های متورم شونده با استفاده از مواد شیمیایی، و روش‌های مکانیکی و فیزیکی بررسی و پیشنهاد کرده‌اند. در سال ۱۹۹۸، خاکستر درختان زیتون سوخته

نوع و غلظت کاتیون‌های موجود در محیط و نوع کانی رسی نیز اهمیت بسیاری در تثبیت خاک با آهک دارد.^[۱-۶] در چند دهه‌ی اخیر، استفاده از مواد مصنوعی پلیمری جهت تسلیح، پایداری و بهبود مشخصات مقاومتی خاک معرفی و به طور گسترده استفاده شده‌اند. الیاف یکی از مواد مذکور است که جهت مسلح سازی خاک مورد توجه متخصصان ژئوتکنیک قرار گرفته و موضوع مطالعات آنان را تشکیل داده است. الیاف با توان کششی بالاست و در نتیجه‌ی ترکیب آن‌ها با خاک، علاوه بر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۲/۴، اصلاحیه ۱۳۹۵/۵/۱۱، پذیرش ۱۳۹۵/۵/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2018.1320



شکل ۱. توزیع دانه بندی کاتولینیت (آزمایش هیدرومتری).

جدول ۲. مشخصات الیاف پلی پروپیلن. [۲۱]

مقدار	خصوصیت
سفید	رنگ ظاهری
منفرد	نوع الیاف
$1 (g/cm^3)$	جرم مخصوص
۲۳ میکرون	قطر
$400 (MPa)$	مقاومت کششی
$160 - 165 (^{\circ}C)$	محدوده‌ی دمای ذوب
پایین	هدایت حرارتی
پایین	هدایت الکتریکی
بالا	مقاومت در برابر اسیدها و قلیاها
بالا	مقاومت در برابر نمک
$20 (mm)$	طول الیاف

جهت جلوگیری از جذب رطوبت و واکنش آهک با دی‌اکسید کربن موجود در هوا، از کیسه‌های نایلونی برای نگهداری آن استفاده شده است.

۳.۲. الیاف، سولفات، و آب مصرفی

الیاف استفاده شده در تهیه‌ی نمونه‌ها از نوع پلی پروپیلن به طول ۲۰ mm بوده است، که از کارخانه‌ی تولید الیاف پلی پروپیلن بنیاد تهیه و مشخصات آن، که توسط تولید کننده فراهم شده است، (جدول ۲). سولفات مصرفی نیز از نوع سدیم با خلوص ۹۰٪ و آب مصرفی برای تهیه‌ی نمونه‌ها، آب لوله‌کشی شهر تهران بوده است.

۳. آماده سازی نمونه‌ها

به منظور تهیه و آماده سازی نمونه‌ها، ابتدا مقدار مورد نظر کاتولینیت، آهک، و الیاف به صورت خشک با یکدیگر خوب مخلوط شده و سپس به صورت تدریجی، آب لازم افزوده و عمل اختلاط تا رسیدن به یک مخلوط همگن ادامه یافته است. نمونه‌ها با رطوبت بهینه و بیشینه‌ی چگالی خشک حاصل از انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد تهیه شده‌اند. ۱۶ طرح اختلاط، شامل: خاک، خاک تثبیت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک، خاک مخلوط شده با ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد الیاف، و نمونه‌های خاک تثبیت و تسلیح شده به

بهبود خصوصیات و توان باربری، خاک در کشتش هم مقاوم می‌شود. در بررسی‌های انجام شده در زمینه‌ی مذکور، توجه کمتری به بررسی تأثیر تسلیح خاک‌های رسی توسط الیاف معطوف شده و بیشتر مطالعات بر تأثیر الیاف در رفتار خاک‌های ماسه‌یی متمرکز بوده است. [۱۴-۱۱] نقش مخرب سولفات‌ها در بتن و تشکیل کانی تورم زای اترینگایت از مدت‌ها پیش شناخته شده است.

اما نقش مخرب سولفات‌ها در خاک‌های تثبیت شده با آهک هنوز کاملاً شناخته نشده و اولین مرتبه در سال ۱۹۶۲ گزارشی در مورد آن تهیه و ارائه شده است. [۱۵] در سال ۱۹۸۶، مطالعات نسبتاً جدیدی در زمینه‌ی مذکور آغاز و در سال ۱۹۸۷، جزئیات بیشتری در مورد تورم ناشی از سولفات در خاک‌های تثبیت شده با آهک و واکنش‌های شیمیایی انجام شده، [۱۷، ۱۶] و براساس نتایج به دست آمده، تشکیل اترینگایت برای ایجاد تورم ناشی از سولفات در خاک‌های تثبیت شده با آهک ضروری است و جلوگیری از تشکیل و یا کاهش آن منجر به حذف و یا کاهش تورم در خاک‌های مذکور می‌شود. [۱۸-۲۰] و در پژوهش حاضر، تأثیر آهک و الیاف کوتاه پلی پروپیلن به صورت مجزا و هم زمان بر خصوصیات تورمی و فشار ناشی از تورم در حضور آب و سولفات سدیم بررسی و مقایسه شده است. از دستگاه ادمتر و آزمایش تحکیم به منظور اندازه گیری تورم و فشار و از میکروسکوپ الکترونی (SEM) جهت مشاهده‌ی تغییرات ساختاری مخلوط‌های رس - آهک - الیاف استفاده شده است.

۲. مصالح مصرفی

۲.۱. خاک رس

خاک رس مورد استفاده در پژوهش حاضر، با عنوان کاتولینیت و در بسته‌های ۵۰ کیلو گرمی از شرکت خاک چینی ایران تهیه و خصوصیات آن که بر اساس استانداردهای ASTM مربوط تعیین شده، در جدول ۱ ارائه شده است. نمودار دانه بندی کاتولینیت، که از آزمایش هیدرومتری به دست آمده است، در شکل ۱ نشان داده شده و بر اساس سیستم طبقه بندی متحد، در رده‌ی CL، یعنی رس با خصوصیات خمیری کم، قرار گرفته است.

۲.۲. آهک

آهک مصرفی جهت تثبیت نمونه‌ها از نوع شکفته و در کیسه‌های ۴۰ کیلو گرمی از کارخانه‌ی آهک سمنان با چگالی ویژه ۲/۲۸ و عبوری از الک ۲۰۰ بوده است.

جدول ۱. خصوصیات خاک رس.

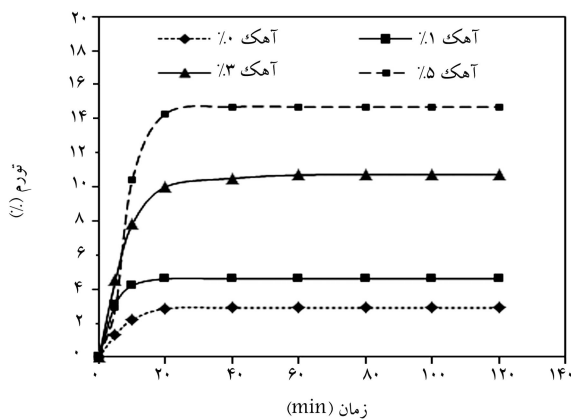
مقدار	استاندارد	آزمایش
-	ASTM D: ۴۲۲-۶۳	هیدرومتری
-	ASTM D: ۴۲۲-۸۷	دانه بندی
۲/۵۹	ASTM D: ۸۵۴-۸۳	چگالی ویژه
۱۸/۴ (%)	ASTM D: ۴۳۱۸-۸۷	رطوبت بهینه
$1/67 (g/cm^3)$	ASTM D: ۴۳۱۸-۸۷	بیشینه‌ی چگالی خشک
۴۵ (%)	ASTM D: ۶۹۸-۷۸	حد روانی
۲۶ (%)	ASTM D: ۶۹۸-۷۸	حد خمیری
۱۹ (%)	ASTM D: ۶۹۸-۷۸	شاخص خمیری
۹/۳	-	pH

موجب می‌شود که ذرات برای جابه‌جایی نسبت به یکدیگر به آب بیشتری نیاز داشته باشند.

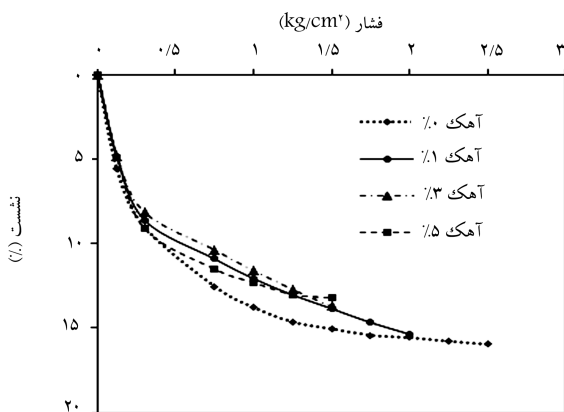
در نتیجه، رطوبت بهینه در مخلوط رس - آهک افزایش می‌یابد. از طرفی در اثر واکنش‌های شیمیایی نسبتاً سریع، مواد پوزولانی نیز در نقاط تماس ذرات باعث سماتنه شدن آنها به یکدیگر می‌شود، که این عمل افزایش فضای خالی بین آنها را در پی دارد، لذا آب بیشتری برای پر کردن فضاهای مذکور مورد نیاز است، که باعث کاهش جرم مخصوص خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. [۲۶، ۵] افزودن الیاف به نمونه‌ها (ردیف‌های ۵، ۶ و ۷) تأثیری در جرم مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی نمونه‌ها نداشته است، که این امر ناشی از عدم توانایی الیاف برای جذب رطوبت و همچنین جرم مخصوص نسبتاً کم آنها در مقایسه با ذرات رس است. [۲۳]

۲.۵. تأثیر آهک در نمونه‌های اشباع شده در آب و سولفات سدیم

نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های تورم و تحکیم نمونه‌های رس و رس تثبیت شده با مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد آهک اشباع شده در آب و سولفات سدیم به صورت تغییرات تورم - زمان و نشست - فشار در شکل‌های ۲ الی ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین تورم توسط خاک رس و به میزان ۱۶ و ۲۴ درصد پس از اشباع شدن به ترتیب در آب و محلول سولفات سدیم حاصل شده است. با



شکل ۲. تغییرات تورم - زمان نمونه‌های رس تثبیت نشده و تثبیت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک در معرض آب.



شکل ۳. تغییرات فشار - نشست نمونه‌های رس تثبیت نشده و تثبیت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک در معرض آب.

طور هم زمان با مقادیر ذکر شده‌ی آهک و الیاف مطالعه شده است. تورم و فشار ناشی از آن پس از استقرار نمونه‌ها در دستگاه ادنومتر و غرقاب شدن در آب و یا محلول ppm ۱۰۰۰۰ سولفات سدیم اندازه‌گیری و مقایسه شده است.

۴. روش آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

پتانسیل تورم با استفاده از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم قابل ارزیابی است، که در پژوهش حاضر روش مستقیم استفاده شده است. اندازه‌گیری مستقیم فشار و یا تورم خاک در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه ادنومتر ممکن است. از مجموع روش‌های بررسی تورم با استفاده از دستگاه تحکیم، دو روش تورم آزاد و تورم با حجم ثابت به صورت استاندارد در آمده‌اند. به منظور اندازه‌گیری فشار تورم براساس استاندارد ASTM D ۴۶-۴۵ سه روش A، B و C ارائه شده است، که در پژوهش حاضر از روش A استفاده شده است. در روش مذکور، ابتدا نمونه به صورت آزاد متورم و سپس تا رسیدن به ضخامت اولیه، بارگذاری می‌شود. فشار مورد نیاز برای نیل به هدف ذکر شده، «فشار تورم» نامیده می‌شود.

براساس استاندارد ASTM D ۴۶-۴۵، روش A برای نمونه‌های مقایسه‌ی، که در آزمایشگاه ساخته می‌شوند، مناسب است و حساسیتی به دست خوردگی نمونه ندارد، و دلیل اصلی به کارگیری آن در پژوهش حاضر بوده است. حسن دیگر روش A آن است که با استفاده از یک نمونه، علاوه بر تغییرات فشار، مقدار تورم نمونه نیز قابل اندازه‌گیری است. تورم آزاد نمونه‌ها در پژوهش حاضر، برای بیشینه‌ی ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شده است، که براساس نتایج آزمایش‌های مقدماتی بخش اعظم آن طی ۲ الی ۳ ساعت اولیه رخ داده است، که برخی پژوهشگران نیز گزارش کرده‌اند. [۶، ۱]

برای تهیه‌ی نمونه‌ها، ابتدا خاک، آهک و الیاف به صورت خشک با یکدیگر مخلوط و سپس آب مورد نیاز (رطوبت بهینه) تدریجاً به مخلوط اضافه و تا رسیدن به مخلوطی همگن ادامه یافته است. سپس مخلوط مورد نظر طی ۴ مرحله، در قالب تحکیم ریخته و هر لایه توسط انرژی تراکمی یکسان برای رسیدن به بیشینه‌ی چگالی خشک متراکم شده است. جهت جلوگیری از تغییر رطوبت، نمونه‌ها بلافاصله در دستگاه ادنومتر قرار گرفته و توسط آب و یا محلول سولفات سدیم غرقاب شده است. پس از اندازه‌گیری تورم نمونه‌ها برای ۲۴ ساعت، هر نمونه در فواصل ۲ ساعته توسط وزنه‌های ۱ کیلوگرمی تا رسیدن به ارتفاع اولیه (قبل از تورم) بارگذاری و از مجموع بارهای لازم برای رسانیدن ارتفاع نمونه به مقدار اولیه، بخش بر سطح مقطع آن، فشار تورم حاصل شده است.

۵. نتایج

۱.۵. نتایج آزمایش‌های تراکم

خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد انجام شده بر روی طبع اختلاط‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به ردیف‌های ۲ الی ۴ مشاهده می‌شود که افزودن آهک به رس باعث کاهش جرم مخصوص خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه‌ی نمونه‌ها شده است. با افزودن آهک به خاک رس، بلافاصله واکنش تبادل کاتیونی میان ذرات رس و آهک رخ می‌دهد که این امر موجب لخته شدن مخلوط می‌شود. با لخته شدن مخلوط، عمل تراکم سخت تر می‌شود و همین عامل

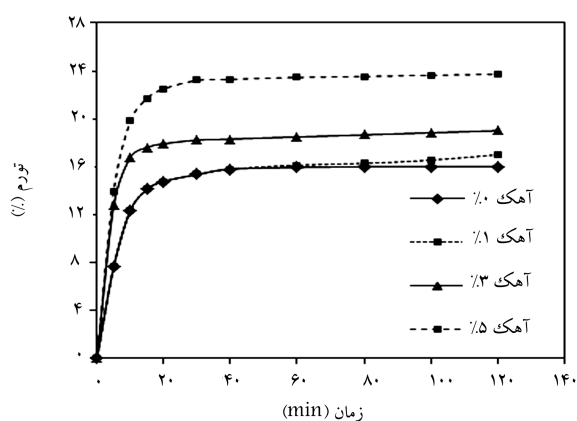
جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد.

ردیف	اختلاط	آهک (%)	الیاف (%)	ω_{op} (%)	ρ_d (g/m^3)
۱	رس	۰	۰	۱۹	۱٫۶۷
۲	رس + ۱٪ آهک	۱	۰	۱۹٫۵	۱٫۶۴
۳	رس + ۳٪ آهک	۳	۰	۲۰	۱٫۶۰
۴	رس + ۵٪ آهک	۵	۰	۲۱٫۱	۱٫۵۸
۵	رس + ۰٫۵٪ الیاف	۰	۰٫۵	۱۹	۱٫۶۷
۶	رس + ۰٫۱٪ الیاف	۰	۰٫۱	۱۹٫۱	۱٫۶۷
۷	رس + ۰٫۲٪ الیاف	۰	۰٫۲	۱۹٫۳	۱٫۶۷
۸	رس + ۱٪ آهک + ۰٫۵٪ الیاف	۱	۰٫۵	۱۹٫۵	۱٫۶۴
۹	رس + ۱٪ آهک + ۰٫۱٪ الیاف	۱	۰٫۱	۱۹٫۴	۱٫۶۴
۱۰	رس + ۱٪ آهک + ۰٫۲٪ الیاف	۱	۰٫۲	۱۹٫۵	۱٫۶۵
۱۱	رس + ۳٪ آهک + ۰٫۵٪ الیاف	۳	۰٫۵	۲۰	۱٫۶۰
۱۲	رس + ۳٪ آهک + ۰٫۱٪ الیاف	۳	۰٫۱	۱۹٫۹	۱٫۶۰
۱۳	رس + ۳٪ آهک + ۰٫۲٪ الیاف	۳	۰٫۲	۱۹٫۹	۱٫۶۰
۱۴	رس + ۵٪ آهک + ۰٫۵٪ الیاف	۵	۰٫۵	۲۱	۱٫۵۸
۱۵	رس + ۵٪ آهک + ۰٫۱٪ الیاف	۵	۰٫۱	۲۱٫۱	۱٫۵۸
۱۶	رس + ۵٪ آهک + ۰٫۲٪ الیاف	۵	۰٫۲	۲۰٫۹	۱٫۵۸

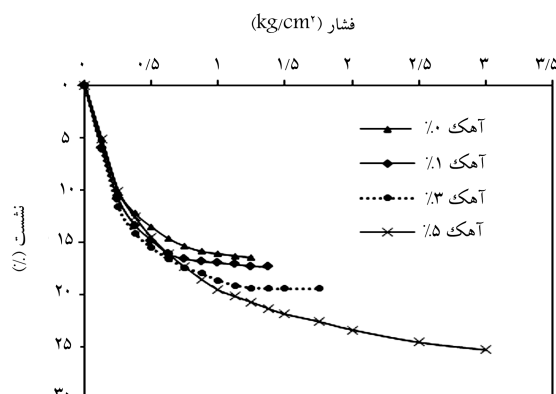
افزودن آهک به خاک رس و سپس اشباع کردن نمونه‌ها در آب و با محلول سولفات سدیم میزان تورم بخصوص نمونه‌های اشباع شده در آب به شدت کاهش یافته است. افزودن ۱، ۳ و ۵ درصد آهک به رس و سپس اشباع کردن نمونه‌ها در آب باعث شده است تا تورم نمونه‌ها از ۱۶٪ به ترتیب به ۱۱، ۵ و ۳ درصد کاهش یابد (شکل ۲). با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که فشار تورم ایجاد شده توسط نمونه‌ی رس اشباع شده با آب پس از حدود ۲ ساعت از شروع آزمایش، $(1/2 \text{ kg/cm}^2)$ است، که برای نمونه‌های رس تثبیت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک به ترتیب $(0.7, 0.8, 0.9)$ به دست آمده است. افزودن آهک به خاک رس در حضور سولفات سدیم، هر چند باعث قدری کاهش در تورم نمونه‌ها می‌شود، لیکن تورم کل نمونه‌ها بسیار قابل ملاحظه بوده است، به طوری که برای نمونه‌های رس مخلوط شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک به ترتیب پس از فقط ۲ ساعت از شروع آزمایش ۱۷، ۱۹ و ۲۴ درصد اندازه‌گیری شده است (شکل ۴). در نمونه‌های تثبیت شده با آهک و اشباع شده توسط محلول سولفات سدیم فشارهای تورم از $(1/2 \text{ kg/cm}^2)$ برای نمونه‌ی رس به $(1.4, 1.8, 2.5)$ به ترتیب برای نمونه‌های تثبیت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک افزایش یافته است (شکل ۵). از آنجایی که اشباع کردن نمونه‌های رس مخلوط شده با آهک توسط سولفات سدیم باعث تشدید میزان تورم می‌شود، فشارهای به مراتب بزرگ تری نیز برای ثابت نگهداشتن حجم نمونه‌ها لازم است. به عنوان مثال، نمونه‌ی رس + ۵٪ آهک اشباع شده در آب و سولفات سدیم به ترتیب باعث تورم ۳ و ۲۴ درصد شده‌اند. به عبارتی، حضور سولفات سدیم در مخلوط، تورم را به میزان ۸ برابر افزایش داده است.

۳.۵. نمونه‌های کاتولنیت + آهک + الیاف اشباع شده با آب

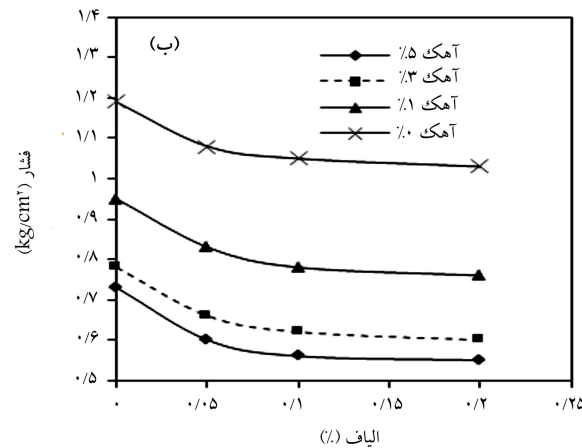
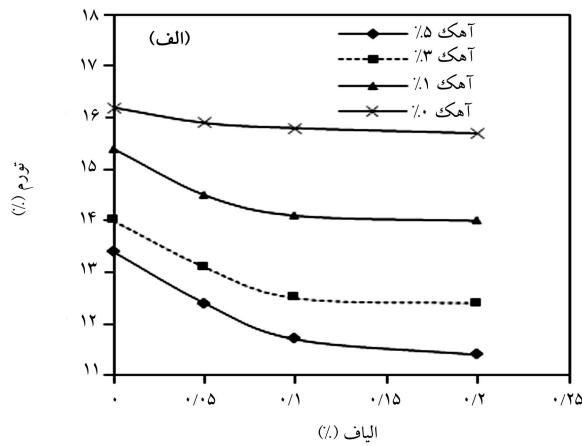
در شکل ۶ (الف و ب) به ترتیب تغییرات تورم و فشار نسبت به آهک برای نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک و مخلوط شده با صفر، ۰٫۵، ۰٫۱ و ۰٫۲ درصد الیاف پلی پروپیلن و اشباع شده در آب نشان داده شده است. مطابق شکل



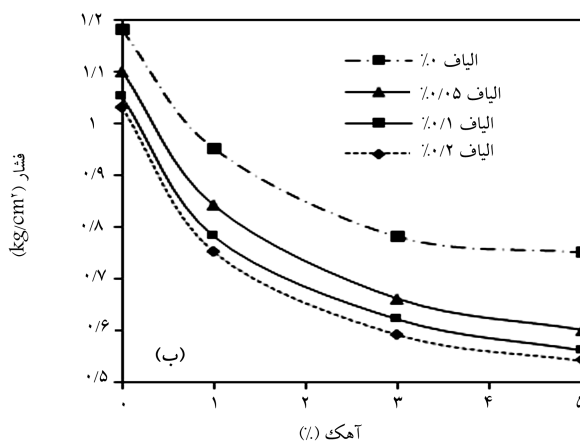
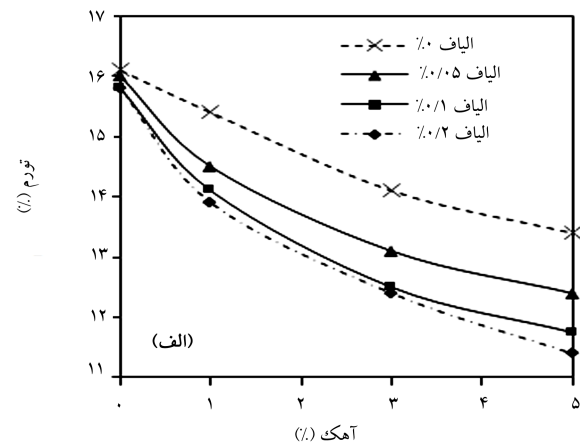
شکل ۴. تغییرات تورم - زمان نمونه‌های رس تثبیت شده و تثبیت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک در معرض سولفات سدیم.



شکل ۵. تغییرات فشار - نشست نمونه‌های رس تثبیت نشده و تثبیت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک در معرض سولفات سدیم.



شکل ۷. تغییرات: (الف) تورم و (ب) فشار نسبت به درصد الیاف نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک در معرض آب.



شکل ۶. تغییرات: (الف) تورم و (ب) فشار نسبت به آهک برای نمونه‌های مخلوط شده با مقادیر مختلف الیاف و اشباع شده با آب.

چند مقادیر مرتبط خیلی فاحش نیست. این رفتار بیان‌گر آن است که با توجه به صاف بودن سطح الیاف، اندرکنش مناسبی بین سطوح الیاف و ذرات رس جهت بسیج مقاومت کششی و جلوگیری از تورم ایجاد نشده است. اگر چه روند کلی تغییرات نزولی است، ولی تأثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن تا درصد خاصی در کاهش میزان تورم و فشار ناشی از آن مؤثر واقع شده و افزایش بیشتر مقدار الیاف، تأثیر چندانی نداشته است.

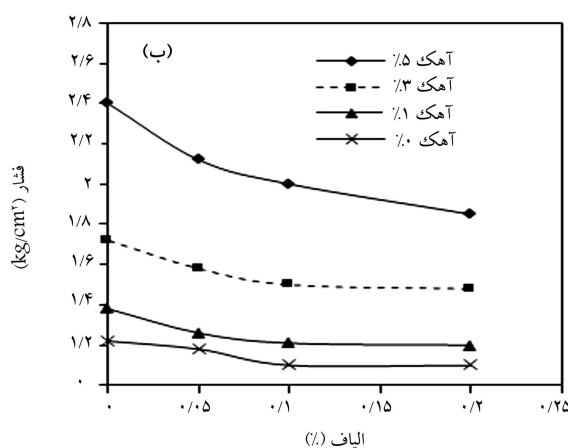
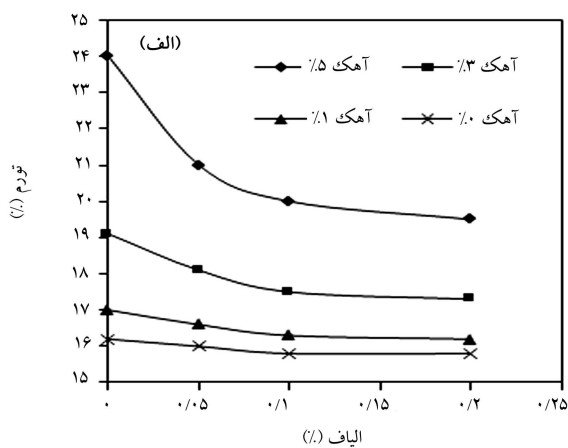
با توجه به شکل ۷ - ب به خوبی می‌توان مشاهده کرد که فشارهای ناشی از تورم نمونه‌ها، با افزودن ۰/۵ و ۰/۱ درصد الیاف به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش و افزایش میزان الیاف به ۰/۲ تقریباً بی تأثیر بوده است. به عنوان مثال، تورم نمونه‌ی رس (بدون آهک و الیاف) ۱۶/۲٪ اندازه‌گیری شده است، که پس از مخلوط شدن با ۰/۲ الیاف به ۱۵/۸٪ رسیده است، که بیان‌گر ۲/۵٪ کاهش است. افزودن ۰/۵ آهک و ۰/۲ الیاف پلی پروپیلن باعث شده است که تورم به ۱۱/۳٪ تقلیل یابد، که کاهش در حدود ۳۰٪ نشان داده است.

۴.۵. نمونه‌های کائولنیت + آهک + الیاف اشباع شده با سولفات سدیم در شکل ۸ (الف و ب) تغییرات تورم و فشار نسبت به درصد آهک برای نمونه‌های تثبیت شده و مخلوط شده با مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن و اشباع شده توسط سولفات سدیم نشان داده شده است. علی‌رغم تأثیرات مثبت آهک در اصلاح خواص تورمی خاک‌های رسی، افزودن آن با وجود سولفات سدیم بسیار نامطلوب

۶ - الف، می‌توان مشاهده کرد که افزودن آهک و در عین حال مخلوط کردن نمونه‌ها با الیاف پلی پروپیلن به صورت تصادفی باعث شده است که میزان تورم کاهش یابد. مشاهده می‌شود که تحت یک درصد ثابت آهک، افزایش میزان الیاف باعث کاهش بیشتر تورم شده است. بیشترین تغییرات در نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵ آهک و مخلوط شده با مقادیر مختلف الیاف به نمایش گذاشته شده است، به طوری که تورم نمونه‌ی رس + ۰/۵ آهک، تقریباً بوده است، که با اضافه کردن مقادیر ۰/۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد الیاف به ترتیب به ۱۲/۵، ۱۱/۷ و ۱۱/۴ درصد تقلیل یافته است.

فشارهای ناشی از تورم نمونه‌های مذکور نیز رفتاری غیر خطی نشان می‌دهند و با افزایش درصد آهک و میزان الیاف افزوده شده، به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش نشان داده‌اند. به عنوان مثال، بیشترین فشار تورم $1/2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ توسط نمونه‌ی رس و کمترین فشار $0/55 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ برای نمونه‌ی رس + ۰/۵ آهک + ۰/۲ الیاف به دست آمده است، که کاهش در حدود ۲/۲ برابر را نشان می‌دهد. به منظور بررسی و مشاهده‌ی هر چه بهتر تأثیر الیاف در رفتار تورمی و فشارهای ناشی از آن، تغییرات تورم و فشار نسبت به درصدهای مختلف الیاف برای نمونه‌های مذکور در شکل‌های ۷ (الف و ب) نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش میزان الیاف افزوده شده به نمونه‌ها، درصد تورم و فشار ناشی از آن بدون توجه به درصد آهک افزوده شده کاهش یافته است. حتی نمونه‌های رس مخلوط شده با فقط الیاف نیز کاهش تورم و فشار نشان داده‌اند، هر

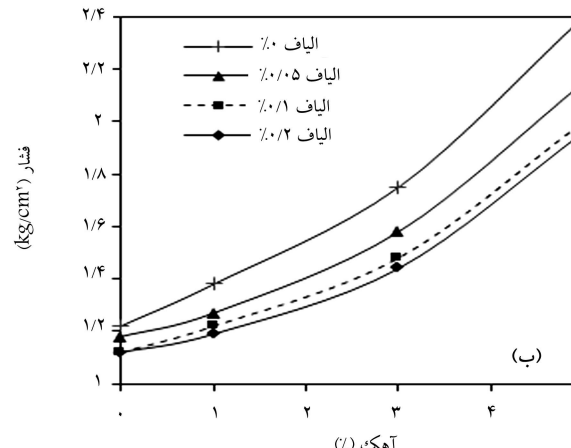
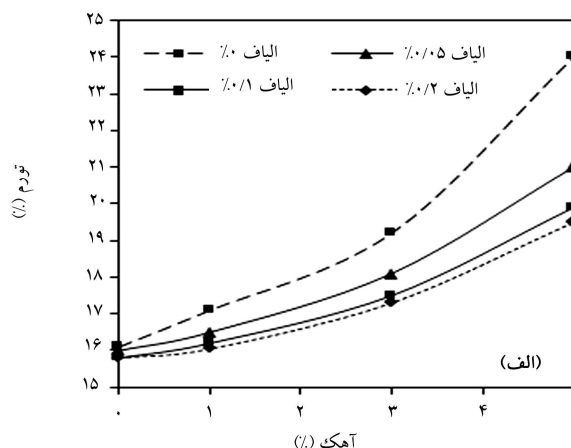


شکل ۹. تغییرات: (الف) تورم و (ب) فشار نسبت به درصد الیاف نمونه‌های تثبیت شده با آهک و اشباع شده با سولفات سدیم.

شده است، که با افزودن ۵٪ آهک و در حضور سولفات سدیم به $2/4 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ افزایش یافته است، که یک تغییر ۹۲ درصدی را نشان می‌دهد.

با مخلوط کردن ۲٪ الیاف با رس و همچنین افزودن ۵٪ آهک، فشار تورم نمونه‌ها به ترتیب $1/1 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ و $1/9$ تقلیل یافته است، که کاهش به ترتیب برابر ۱۲ و ۲۱ درصد را نشان می‌دهد. این امر به علت واکنش‌های شیمیایی بین رس، آهک و سولفات سدیم است، که در نتیجه واکنش‌های مذکور، کانی‌های متورم شونده‌ی به نام‌های اترینگایت و یا توماسایت^۱ تشکیل می‌شود، که با جذب مقدار زیادی آب به شدت متورم می‌شوند؛ لذا اهداف تثبیت خاک حاصل نمی‌شود.^[۲۵،۲۴]

به منظور بررسی و مشاهده‌ی هر چه بهتر تأثیر الیاف در رفتار تورمی و فشارهای ناشی از آن، تغییرات تورم و فشار نسبت به درصد الیاف برای نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک و اشباع شده با محلول سولفات سدیم در شکل ۹ (الف و ب) نشان داده شده است. از شکل‌های مذکور به وضوح مشاهده می‌شود که تورم و فشار ناشی از الیاف در نمونه‌های کاتولینیت تسلیح شده ولیکن تثبیت نشده، با افزایش درصد عوامل تسلیح، تغییرات زیادی نکرده است. افزودن ۱٪ آهک به نمونه‌های رس مخلوط شده با الیاف در حضور سولفات سدیم، باعث افزایش اندکی در تورم و فشار ناشی از آن نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده شده است. افزایش میزان آهک به ۳ و ۵ درصد باعث شده است که تورم و فشار به شدت افزایش یابد، ولیکن تأثیر الیاف در کاهش تورم و فشار ناشی از آن در نمونه‌های مذکور مشهودتر است. به عنوان مثال، افزودن کمینه‌ی ۱ و بیشینه‌ی ۵ درصد آهک به نمونه‌های رس مخلوط



شکل ۸. تغییرات: (الف) تورم و (ب) فشار نسبت به درصد آهک نمونه‌های مخلوط شده با مقادیر مختلف الیاف در معرض سولفات سدیم.

و باعث تشدید تورم نمونه‌ها شده است. از شکل ۸ - الف مشاهده می‌شود که تورم نمونه‌های رس تثبیت شده، به شدت با افزایش درصد آهک افزایش یافته است، و افزودن الیاف پلی پروپیلن هر چند باعث کاهش تورم تحت یک درصد خاص آهک شده است، ولیکن روند کلی تغییرات افزایشی بوده است.

نمونه‌های رس تثبیت نشده ولیکن مخلوط شده با درصد‌های مختلف الیاف، تورمی در حدود ۱۶٪ نشان داده‌اند، که افزودن الیاف تا ۲٪ وزنی نیز تأثیر آن چنانی در کاهش میزان تورم نمونه‌های مذکور نداشته است. افزودن الیاف به نمونه‌ها با افزایش درصد آهک در کاهش تورم نمونه‌ها مؤثرتر بوده است، به طوری که بیشترین تأثیر در نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ آهک قابل مشاهده است. افزودن ۵٪ و ۸٪ درصد الیاف، تورم نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ آهک را از ۲۴٪ به ترتیب به ۲۰ و ۲۱ درصد کاهش داده و افزایش میزان الیاف به ۲٪، تأثیر خیلی زیادی در کاهش هر چه بیشتر تورم نداشته است.

تغییرات فشار نسبت به درصد آهک برای نمونه‌های مخلوط شده با مقادیر مختلف الیاف نیز به خوبی نشان می‌دهد که اشباع کردن نمونه‌ها در سولفات سدیم باعث افزایش فشار ناشی از تورم شده است (شکل ۸ - ب). هر چند افزودن آهک و الیاف پلی پروپیلن تا حدودی فشار تورم نمونه‌ها را کاهش می‌دهد، ولیکن روند کلی تغییرات به صورت افزایشی بوده است، که بیانگر تأثیر تخریبی سولفات سدیم در رفتار نمونه‌های تثبیت شده و تسلیح شده است. به عنوان مثال، فشار ناشی از تورم نمونه‌های رس تثبیت شده و تسلیح نشده با الیاف $1/25 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ اندازه‌گیری

۱۶/۲ به ۱۱/۸ درصد تقلیل داده است، که کاهش ۲۷ درصدی را نشان می دهد.

مشاهده می شود که تثبیت با آهک در مقایسه با تسلیح توسط الیاف پلی پروپیلن در کاهش تورم و فشار ناشی از آن بسیار مؤثرتر بوده است. مهم ترین علت اصلاح خواص تورمی، واکنش های شیمیایی بین ذرات رس و آهک است. حضور آهک باعث تغییرات اساسی در اسکلت و دانه بندی خاک رس می شود. در نتیجه واکنش های تبادل کاتیونی بین ذرات رس و آهک، خصوصیات خمیری، تورم و جمع شدگی رس بلافاصله اصلاح می شود و باعث می شود که تمایل و توان ذرات رس و آهک برای جذب آب و بنابراین تورم، به شدت کاهش یابد. همچنین مواد پوزولانی ناشی از واکنش آهک و ذرات رس باعث به هم چسبیدن ذرات و افزایش مقاومت کلی مخلوط می شود، که در برابر نیروهای ناشی از تورم به خوبی مقاومت می کند. مکانیزم اصلاح خواص تورمی در تسلیح به وسیله الیاف پلی پروپیلن، فیزیکی بوده و ناشی از اندرکنش ذرات رس و الیاف در سطوح تماس است. به دلیل صاف بودن سطح الیاف، اندرکنش خاک - الیاف نسبتاً ضعیف است و نمی تواند به طور مؤثری باعث بسج مقاومت کششی الیاف و بنابراین جلوگیری از تورم نمونه ها شود. همچنین در شکل ۱۰ (الف و ب)، تأثیر اشباع کردن نمونه های تثبیت شده و یا تسلیح شده الیاف کائولینیت در سولفات سدیم جهت مقایسه نشان داده شده است. همان گونه که از شکل ۱۰ - الف مشاهده می شود، حضور سولفات سدیم باعث شده است تا تورم کائولینیت پس از تثبیت با بیشینه ۵٪ آهک به ۲۴٪ بالغ شود، که افزایش ۵۰ درصدی را نشان می دهد.

افزودن الیاف به نمونه های مذکور جهت مقابله با تورم، اصلاً مؤثر واقع نشده و باعث کاهش میزان تورم از ۱۶/۲ به ۱۵/۸ درصد شده است. حضور سولفات سدیم و واکنش با آهک باعث تشدید شرایط و تولید ترکیب های شیمیایی اترینگایت شده است، که بسیار تورم زاست. رفتار نمونه های مذکور نیز به وضوح نشان می دهد که تثبیت شدن و بنابراین ترکیب های شیمیایی تولید شده، بر تورم بسیار تأثیر گذارتر از تسلیح (اندرکنش فیزیکی بین خاک و الیاف) است.

۷. میکروسکوپ الکترونی (SEM)

از میکروسکوپ الکترونی برای بررسی و مشاهده تغییرات ناشی از افزودن آهک به خاک رس در حضور سولفات سدیم استفاده شده است (شکل ۱۱: الف، ب و ج). با توجه به شکل ۱۱ - الف می توان مشاهده کرد که کائولینیت از ذرات پولکی شکل شش وجهی با لبه های کاملاً منظم و متمایز تشکیل شده است. با افزودن آهک به خاک رس و اشباع کردن نمونه ها در آب، لبه های ذرات پولکی شکل رس نامنظم و ساختار مخلوط، متراکم تر و یک پارچه تر شده است (شکل ۱۱ - ب).

این تغییرات ناشی از حل شدن سیلیکا و آلومینای موجود در لبه های ذرات رس در محیط قلیایی با pH بالای ایجاد شده توسط آهک است. اشباع کردن نمونه های رس تثبیت شده با ۵٪ آهک در سولفات سدیم باعث تغییرات اساسی در ساختار مخلوط شده است و مشاهده می شود که اترینگایت به صورت المان های سوزنی و یا میله بی شکل روی سطح ذرات رس و یا در لابه لای آنها تشکیل شده است (شکل ۱۱ - ج). در نتیجه تولید اترینگایت، فضاهای بین دانه بی ذرات رس توسط این عناصر اشغال و باعث تشکیل شبکه های پیوسته شده است.

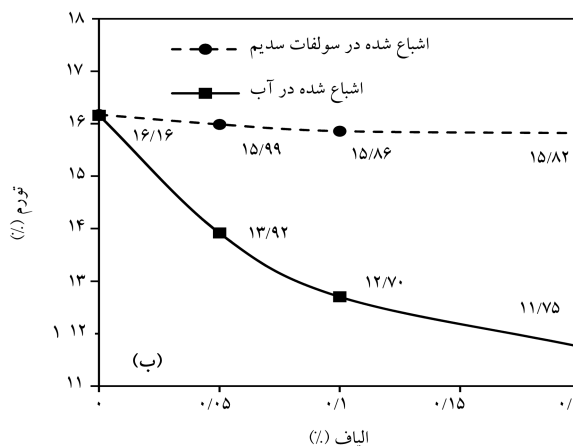
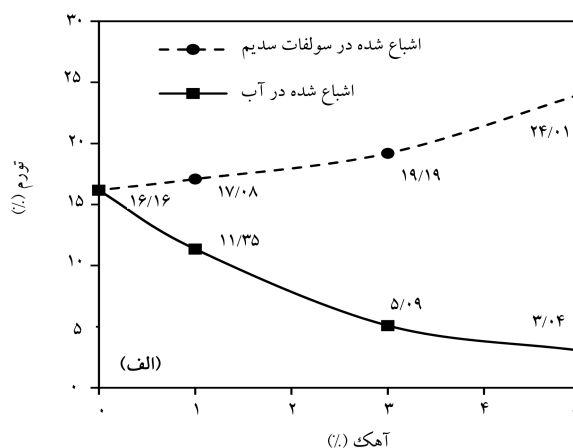
بر این اساس می توان گفت که تورم و فشار نسبتاً زیاد نمونه های رس + ۵٪ آهک اشباع شده با سولفات سدیم به دلیل تشکیل و رشد اترینگایت است. تشکیل

شده با درصدهای مورد مطالعه الیاف به ترتیب باعث کاهش تورم از ۱۶/۸ به ۱۶/۵ (۵٪ کاهش) و از ۲۴ به ۱۹/۵ درصد (۱۹٪ کاهش) شده است.

هر چند با وجود سولفات سدیم از لحاظ تورم و فشار ناشی از آن شرایط بسیار نامطلوب است، ولیکن به نظر می رسد که ترکیب های حاصل از واکنش های شیمیایی صورت گرفته بین ذرات رس و آهک در حضور سولفات سدیم، باعث بسج بیشتر مقاومت کششی نمونه های مخلوط شده با الیاف شده است. بیشترین کاهش در نرخ تورم و فشار نمونه ها با افزودن الیاف تا ۰/۱٪ وزن خشک خاک حاصل شده و افزایش میزان الیاف به ۰/۲٪، تأثیر بسیار کمتری داشته است.

۶. مقایسه ی تأثیر آهک و الیاف به طور مجزاء در تورم

شکل ۱۰ (الف و ب)، به منظور مقایسه ی تأثیر آهک و الیاف در بهبود خواص تورمی کائولینیت اشباع شده در آب و سولفات سدیم ارائه شده است. نتایج ارائه شده در شکل مذکور مربوط به نمونه های تثبیت شده و یا تسلیح شده بوده است، تا از تأثیر اندرکنش الیاف و آهک به صورت هم زمان در مخلوط ها صرف نظر شود. از شکل ۱۰ - الف مشاهده می شود که تثبیت با آهک باعث کاهش تورم کائولینیت اشباع شده در آب از ۱۶/۲ به ۳ درصد یعنی کاهش ۸۱٪ شده است؛ در حالی که تسلیح با الیاف (شکل ۱۰ - ب)، تورم نمونه ها را از



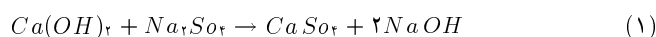
شکل ۱۰. مقایسه ی میزان تأثیر: (الف) آهک و (ب) الیاف به تنهایی در تورم نمونه های رس اشباع شده با سولفات سدیم و آب.

واکنش‌های کوتاه مدت بیشتر در خصوصیات فیزیکی، از قبیل: حدود اتربرگ و توزیع دانه بندی خاک تأثیر گذار است و واکنش‌های دراز مدت باعث تشکیل مواد پوزولانی و بنابراین تغییر خصوصیات مقاومتی و تراکم پذیری خاک می‌شود.

هیدروکسید کلسیم خود یک ماده‌ی چسباننده نیست، ولیکن با انجام واکنش شیمیایی با عمدتاً سیلیکات و آلومینات موجود در ذرات رس، مواد سیمانی همانند کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و یا کلسیم آلومینات هیدراته (C-A-H) تولید می‌کند، که مقدار آنها با گذشت زمان افزایش می‌یابد. هیدروکسید کلسیم استفاده شده به عنوان ماده‌ی تثبیت کننده، در آب حل می‌شود و باعث افزایش تمرکز الکترولیت‌ها و pH آب حفره‌یی و نتیجتاً حل شدن Al_2O_3 و SiO_2 از درون ساختار ذرات رس می‌شود.

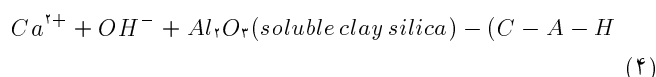
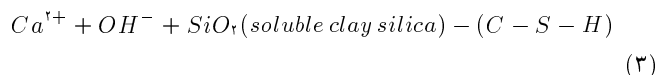
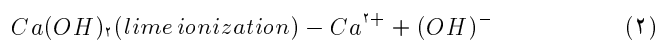
ترکیب‌های سیمانی C-S-H و C-A-H سطح ذرات رس را می‌پوشانند و بنابراین باعث تغییر لایه‌ی الکتریکی دوگانه در سطوح ذرات رس می‌شوند. حفره‌های ریز بین ذرات رس توسط محلول هیدروکسید کلسیم و سیلیکات و آلومینات حل شده، اشغال می‌شوند و تدریجاً با آب درون حفره‌های ترکیب‌های سیمانی مذکور به تعادل می‌رسند. بنابراین اختلاف تمرکز زیادی برای بروز پدیده‌ی اسمزی ایجاد نمی‌شود و در نتیجه باعث کاهش توانایی ذرات رس برای تورم می‌شود. [۲۳، ۲۲، ۹، ۸] پروسه‌ی مذکور باعث جانشینی یون‌ها، فولوکولاسیون و واکنش‌های پوزولانی می‌شود.

مشکلات مربوط به واکنش‌های رس - آهک با وجود سولفات‌ها، بستگی به نوع حلالیت، تمرکز سولفات، و میزان رس موجود دارد. [۲۶] حضور سولفات سدیم در سیستم خاک، باعث تبدیل آهک به ژلیس^۲ غیر قابل حل و هیدروکسید سدیم می‌شود و بنابراین آهک موجود برای واکنش با ذرات رس را کاهش می‌دهد (رابطه‌ی ۱): [۲۸، ۲۷]

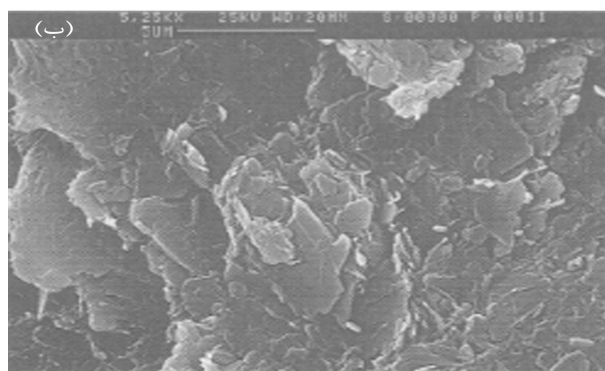
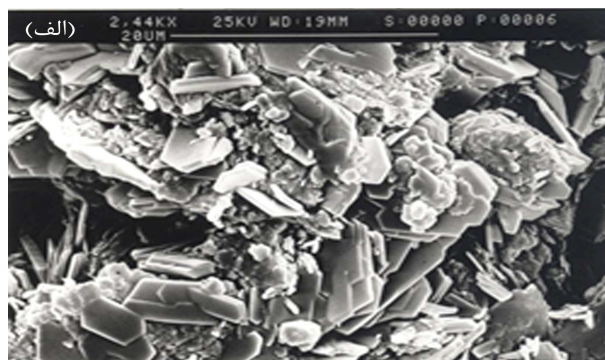


حضور هیدروکسید کلسیم باعث افزایش pH و بنابراین میزان حل شدن سیلیکا از درون ساختار رس نیز می‌شود و ترکیب‌های حاصل شده، توانایی زیادی برای جذب آب و تورم دارند و آثار مخربی در خصوصیات و بنابراین رفتار خاک دارند. با افزودن آهک به خاک، واکنش‌های پوزولانی انجام و ترکیب‌های^۳ C-S-H و C-A-H^۴ ایجاد می‌شود، که در صورت وجود سولفات قابل حل با تمرکز بالا در خاک، با کلسیم آهک و آلومینای خاک رس واکنش می‌دهند و ترکیب^۵ C-A-S-H تشکیل می‌شود که با گذشت زمان بر مقدار آن افزوده می‌شود.

در صورتی که تمرکز سولفات در خاک خیلی بالا نباشد، در آن صورت مونو سولفو آلومینات^۶ تشکیل خواهد شد. تشکیل و رشد ترکیب C-A-S-H به دلیل قابلیت تورم زیاد، بسیار مضر است. [۳۴-۳۰، ۲۹، ۲۷، ۲۵] واکنش‌ها و ترکیب‌های ذکر شده را به صورت روابط^۲ الی^۴ می‌توان نوشت.



ترکیب‌های دقیق حاصل از واکنش‌ها بستگی به مقدار pH، قابلیت حل سیلیکا و آلومینا، نوع کانی رس، و شرایط عمل آوری دارد. [۳۵، ۳۳، ۳۲، ۲۹، ۸] اشباع کردن نمونه‌های تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با الیاف پلی پروپیلن در محلول سولفات سدیم،



شکل ۱۱. میکروگراف نمونه‌های: (الف) کاتولنیت، (ب) کاتولنیت + ۵٪ آهک (اشباع با آب) و (ج) کاتولنیت + ۵٪ آهک (اشباع با سولفات سدیم).

چنین ترکیب‌هایی در نمونه‌های رس + ۵٪ آهک اشباع شده در آب که، کمترین تورم و فشار تورم را به نمایش گذاشته‌اند، مشاهده نشده است.

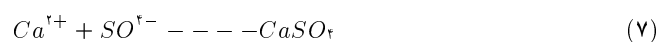
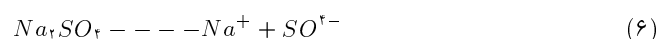
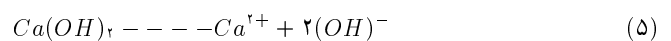
۸. تفسیر نتایج

تورم کاتولنیت ناشی از جذب رطوبت در سطح ذرات رس است. واکنش بین آهک و ذرات کاتولنیت به نحوی صورت می‌پذیرد که باعث اصلاح خصوصیات رس و جلوگیری از جذب رطوبت و تورم می‌شود. تغییرات در خصوصیات تورم - جمع شدگی و رفتار مقاومتی خاک تثبیت شده با آهک، عمدتاً از هیدراتاسیون خاک، جانشینی یون‌ها و واکنش‌های پوزولانی نشأت می‌گیرد. دیگر مکانیزم‌ها همانند کربوناتسیون باعث تغییرات جزئی در مقاومت می‌شود و بنابراین عموماً از آن صرف نظر می‌شود. واکنش‌های کوتاه مدت، شامل: هیدراتاسیون و فولوکولاسیون ناشی از جانشینی یون‌ها و واکنش‌های دراز مدت شامل سماتاسیون و کربوناتسیون می‌شود. [۲۵، ۲۴]

- افزودن آهک به کاتولینیت باعث اصلاح خواص تورمی آن شده است و کاهش میزان تورم نمونه‌ها با افزودن ۱ تا ۳ درصد آهک، از نرخ بیشتری در مقایسه با افزایش میزان آهک از ۳ به ۵ درصد برخوردار است. تغییرات در خصوصیات تورمی رس تثبیت شده با آهک، عمدتاً ناشی از هیدراتاسیون خاک، جانمایی یون‌ها، و واکنش‌های پوزولانی است.
- افزودن الیاف پلی پروپیلن به صورت تصادفی به کاتولینیت باعث کنترل و کاهش تورم نمونه‌ها شده است، به طوری که تا ۸٪ الیاف، نرخ بیشتری داشته و با افزایش میزان الیاف از ۸ به ۲ درصد، نرخ تغییرات تقلیل یافته است.
- تثبیت با آهک در مقایسه با تسلیح توسط الیاف پلی پروپیلن به صورت تصادفی در کنترل و کاهش تورم نمونه‌های کاتولینیت مؤثرتر بوده است، که این امر بیان‌گر تأثیر بیشتر واکنش‌های شیمیایی در خصوصیات فیزیکی - شیمیایی مخلوط در مقایسه با تأثیر فیزیکی عوامل تسلیح است.
- هیدروکسید کلسیم با ایجاد محیط با pH بالا و واکنش شیمیایی با SiO₂ و Al₂O₃ موجود در ذرات رس، مواد سیمانی همانند کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و یا کلسیم آلومینات هیدراته (C-A-H) تولید می‌کند، که مقدار ترکیب‌های مذکور با گذشت زمان افزایش می‌یابد و باعث تغییر در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌ها می‌شود.
- افزودن آهک به خاک رس با وجود سولفات سدیم، نه فقط به بهبود خواص تورمی کمک نکرده است، بلکه باعث تشدید شرایط لازم برای ایجاد تورم و فشارهای ناشی از آن شده است. حضور سولفات سدیم در سیستم خاک تثبیت شده با هیدروکسید کلسیم، باعث تبدیل آهک به ژئیس غیر قابل حل و هیدروکسید سدیم و بنابراین افزایش pH و میزان حل شدن سیلیکا از درون ساختار رس می‌شود. ترکیب‌های شیمیایی حاصل شده، توانایی زیادی برای جذب آب و تورم دارند و آثار مخربی در خصوصیات و بنابراین رفتار خاک تثبیت شده می‌گذارند.
- اشباع کردن نمونه‌های رس تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با الیاف پلی پروپیلن در محلول سولفات سدیم، باعث تشکیل اترینگایت و بنابراین تضعیف سیستم خاک تثبیت شده و تسلیح شده به مرور زمان می‌شود. آنیون‌های سولفات با کلسیم و آلومینای موجود ترکیب و باعث تشکیل اترینگایت غیر قابل حل در مخلوط خاک - آهک در حضور سولفات سدیم و بنابراین افزایش پوکی می‌شود.
- اترینگایت یا هگزا کلسیم آلومینات تری سولفات هیدرات در محیط‌های با pH و فعالیت زیاد سولفات، رسوب گذاری می‌شود و اغلب زمانی که یک ماده‌ی شیمیایی با پایه‌ی کلسیم به عنوان تثبیت کننده به خاک حاوی سولفات افزوده می‌شود، تشکیل می‌شود.

باعث تجمیع کاتیون‌های تک ظرفیتی اطراف ذرات رس و واکنش احتمالی با آنها می‌شود، که باعث تشکیل اترینگایت و بنابر این، تضعیف سیستم خاک تثبیت شده و تسلیح شده به مرور زمان می‌شود. آنیون‌های سولفات با کلسیم و آلومینای موجود ترکیب و باعث تشکیل اترینگایت غیر قابل حل در سیستم مخلوط خاک - آهک در حضور سولفات سدیم می‌شود.

تشکیل اترینگایت باعث افزایش پوکی و در عین حال کاهش رطوبت آزاد در زمان شروع و سپس رشد ترکیب مذکور می‌شود. [۱۰، ۹، ۶] اترینگایت یا هگزا کلسیم آلومینات تری سولفات هیدرات در محیط‌های با pH و فعالیت زیاد سولفات رسوب گذاری می‌شود و اغلب زمانی که یک ماده‌ی شیمیایی با پایه‌ی کلسیم به عنوان تثبیت کننده به خاک‌های رسی حاوی سولفات افزوده می‌شود، تشکیل می‌شود. [۳، ۳۰] وجود Na₂SO₄ باعث بهبود تجزیه‌ی اولیه‌ی آهک می‌شود (روابط ۵ الی ۸):



ترکیب NaOH باعث افزایش pH سیستم به بیش از pH قابل حصول از حل شدن آهک در آب و بنابر این تشدید حل شدن سیلیکا از درون ذرات رس می‌شود. حل شدن بیشتر سیلیکا باعث تشکیل بیشتر C-S-H و بنابر این بهبود قابلیت واکنش پذیری خاک‌ها در حضور سولفات می‌شود. اترینگایت به صورت المان‌های بلورین نسبتاً کوچک تشکیل و ساختار خاک تثبیت شده در نتیجه‌ی تورم در زمان رسوب گذاری را دچار خرابی و تضعیف می‌کند. ترکیب‌های سیمانی و اترینگایت تولید شده‌ی ناشی از واکنش‌های شیمیایی بین ذرات رس، آهک، و سولفات‌ها به دلیل داشتن ساختار کریستالی با استفاده از روش انکسار اشعه‌ی ایکس (X-ray diffraction) و میکروسکوپ الکترونی قابل شناسایی و مشاهده است. [۱۷، ۲۴]

۹. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر آب و سولفات سدیم در رفتار تورمی نمونه‌های کاتولینیت تثبیت شده با آهک و نمونه‌های تثبیت شده و مخلوط شده با درصد‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن با استفاده از نتایج آزمایش ادمتر مطالعه، بررسی و مقایسه شده و این نتایج به دست آمده است.

پانویس‌ها

منابع (References)

1. Thumassite
2. Gypsum
3. calcium-silicate-hydrate
4. calcium-aluminate-hydrate
5. calcium-aluminate-sulphate-hydrate
6. mono-sulpho-aluminate
1. Nelson, J. D. and Miller, D. J., *Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, John Wiley and Sons Inc., New York (1992).
2. Attom, M. F. and Al-Sharif, M. M. "Soil stabilization with burned olive waste", *Applied Clay Science*, **13**(3), pp. 219-230 (1998).

3. Kamon, M. and Nontananandh, S. "Combining industrial wastes with lime for soil stabilization", *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**(1), pp. 1-17 (1991).
4. Al-Rawas, A.A., Hago, A.W. and Al-Sarmi, H. "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from oman", *Building and Environment*, **40**(5), pp. 681-687 (2005).
5. Bell, F.G. and Coulthard, J.M. "Stabilization of clay soils with lime", *Manual Engineering*, **7**(3), pp. 125-140 (1990).
6. Abdi, M.R. and Wild, S. "Sulphate expansion of lime stabilized kaolinite: I. Physical characteristics", *Clay Minerals*, **28**(4), pp. 555-567 (1993).
7. Young, R.N. and Ouhadi, V.R. "Experimental study on stability of bases on natural and lime/cement stabilized clayey soils", *Applied Clay Science*, **35**(3-4), pp. 238-249 (2007).
8. Kumar, H. and Sivapullaiah P.V. "Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil", *Engineering Geology*, **198**, pp. 53-64 (Nov., 2015).
9. Sakr, M.A., Shahin, M.A. and Metwally, Y.M. "Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content", *Geotech. Geol. Eng.*, **27**, pp. 105-113 (2009).
10. Muhmed, A. and Wantowski, D. "Effect of lime stabilisation on the strength and microstructure of clay", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, **6**(3), pp. 87-94 (2013).
11. Michalowski, R.L. and Cermak, J. "Triaxial compression of sand reinforced with fibers", *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, **129**(2), pp. 125-136 (2003).
12. Ghavami, K., Toledo Filho, R.D. and Barbosa, N.P. "Behavior of composite soil reinforced with natural fibers", *Cement and Concrete Composites*, **21**(1), pp. 39-48 (1999).
13. Michalowski, R.L. and Cermak, J. "Strength anisotropy of fiber-reinforced sand", *Computers and Geotechnics*, **29**(4), pp. 279-299 (2002).
14. Li, J. and Ding, D.W. "Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9-12), pp. 977-983 (2002).
15. Sherwood, P.T. "Effect of sulphate on cement and sulphate treated soils", *Highways Res. Board Bul*, **353**, pp. 98-107 (1962).
16. Mitchell, J.K. "Delayed failure of lime stabilized pavement bases", *Journal of Geotechnical Engineering*, **112**, pp. 274-279 (1986).
17. Hunter, D. "Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, **114**(2), pp. 150-167 (1988).
18. Odler, I. and Jawed, I. "Expansive reactions in concrete", *Materials Science of Concrete*, the American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 221-247 (1991).
19. Mehta, P. K. "Sulfate attack on concrete - a critical review", *Materials Science of Concrete*, the American Ceramic Society, Westerville, OH, pp.105-130 (1992).
20. Khemissa, M. and Mohamedi A. "Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay", *Applied Clay Science*, **95**, pp. 104-110 (2014).
21. <http://WWW.aliafpp.com>.
22. Bin Shi, C.T., Gao, W., Chen, F. and Cai, Y. "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **25**(3), pp. 194-202 (2007).
23. Malekzade, M. and Bilsel, H. "Effects of polypropylene fibers on mechanical behavior of expansive soils", *EJGE*, **17**, pp. 55-63 (2012).
24. Rajasekaran, G. "Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays", *Ocean Engineering*, **32**(8-9), pp. 1133-1159 (2005).
25. Natarajan, S. K. "An integrated approach to predict ettringite formation in sulphate soils and identifying sulphate damage along SH 130", MSc. Thesis, Texas A & M University (2004).
26. Littleton, I., *Some Observations on the presence of Sulphates in Lime Stabilized Clay Soils*, Buxton Lime Industries Ltd. (1995).
27. Pillai, A.G. "A study on mitigating the effects of sulphates in lime stabilized Cochin marine clays", PhD Thesis, School of Engineering, Civil Engineering Division, Cochin University of Science and Technology, Kochi- 682 022 (2014).
28. Solanki, P. and Zaman, M. "Microstructural and mineralogical characterization of clay stabilized using calcium based stabilizers", *Scanning Electron Microscopy*, ISBN 978-953-51-0092-8, In Tech Publishers, pp. 771-798 (2012).
29. Wild, S., Abdi, M.R. and Ward, G. "Sulphate expansion of lime stabilized kaolinite, part II: reaction products and expansion", *Clay Miner*, **28**(4), pp. 569-583 (1993).
30. Mitchell, J. K. and Dermatas, D. "Clay soil heave caused by lime-sulphate reactions", *Innovations in Uses for Lime*, ASTM STP 1135, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, PA, pp. 41-64 (1992).
31. Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A. and Ramesh, H. N. "Strength behavior of lime treated soils in the presence of sulphate", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(6), pp. 1358-1367 (2000).
32. Al-Khashab, M. N. and Al-Hayalee, M. T. "Stabilization of expansive clayey soil modified by lime with an emulsified asphalt addition", *Eng. & Technology*, **26**(10) (2008).

33. Dafalla, M., Mutaz, E. and Al-Shamrani, M. "Compressive IFCEE, strength variations of lime-treated expansive soils", International Foundations Congress and Equipment pp. 1402-1409 (2015).
34. Sivapullaiah, P.V., Sridharan, A. and Ramesh, H. N. "Effect of sulfate on the shear strength of lime treated kaolinitic soil", *Ground Improvement*, **10**(1), pp. 23-30 (2006).
35. Al-Khashab, M. N. and Al-Hayalee, M. T. "Stabilization of expansive clayey soil modified by lime with an emulsified asphalt addition", *Eng. & Technology*, **26**(10) (2008).
36. Perkins, R. B. and Palmer, C.D. "Solubility of ettringite ($\text{Ca}_6 [\text{Al}(\text{OH})_6]_2 9(\text{SO}_4) 3.26(\text{H}_2\text{O})$ at $5-75^\circ\text{C}$ ", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **63**(13/14), pp.1969-1980 (1999).