نشریه علمی – پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران ومحیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و پنج، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱ تا ۱۲
Vol. 45, No. 2, winter 2013, pp. 1-12

اثر ذوب و یخبندان‌های مکرر بر ویژگی‌های مکانیکی خاکهای رسی تثبیت شده با آهک و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن

نیما گلچین فر[۱]، نادر عباسی [۲*]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، رشته مکانیک خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
۲- استادیار، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

(دریافت۱۳۹۱/۱/۱۵، پذیرش۱۳۹۲/۲/۳)

چکیده

با توجه به اثرات مثبت افزودن آهک به خاکهای ریزدانه و همچنین تسلیح این خاکها توسط الیاف پلی‌پروپیلن، ارزیابی دوام خاکهای تثبیت و یا تسلیح شده به ویژه در مناطق سردسیر که بیشتر در معرض ذوب و یخبندان‌های مکررهستند، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش ۱۲ نوع ترکیب متفاوت با مخلوط هم‌زمان الیاف پلی‌پروپیلن و آهک با خاک رس شامل (۰، ۲ و ۴)٪ وزن خشک خاک رسی آهک و (۰، ۰/۲۵، ۰/۵و ۱)٪ وزن خشک خاک رسی الیاف پلی‌پروپیلن تهیه شد. نمونه‌های آزمایشی ساخته شده از هر یک از مخلوطها پس از ۲۸ روز عمل آوری تحت دوره‌های انجماد و ذوب متفاوت شامل ۰، ۱، ۴، ۷ و ۱۰ سیکل قرارگرفتند. پس از آن آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده بر روی هر نمونه با سه تکرار برای هر آزمایش انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که نمونه تثبیت شده با ۴٪ آهک و تسلیح شده با ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن که دوره‌های انجماد و ذوب مختلف را بدون کاهش در مقادیر مقاومت و مدول الاستیک طی نموده بود، به عنوان مناسب ترین ترکیب برای تثبیت و تسلیح خاک مورد آزمایش تعیین شد.

کلمات کلیدی

خاک رسی، تثبیت با آهک، تسلیح با الیاف پلی‌پروپیلن، دوره‌های ذوب و یخبندان.

[*] نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: nader_iaeri@yahoo.com

۱- مقدمه

خاک طبیعی موجود در محل عملیات ساختمانی، معمولا به طور کامل برای تحمل سازه مورد نظر مناسب نیست. عواملی مانند ساختار خاک، رطوبت و چگالی حجمی، توزیع دانه بندی، شکل و کانی شناسی، درجه قفل و بست خاک- دانه، چسبندگی دانه‌ها و هوازدگی شیمیایی، سازوکارهای پیوستگی ذرات، وجود پوشش گیاهی در خاکهای رسی خواص مکانیکی خاک را معین می‌نماید. خاکهای ریز دانه به تنهایی در محیطهای مرطوب قابل استفاده نیستند. ضمن این که در این محیط نیز قابل تراکم نیستند، در نتیجه امکان بارگذاری آنها در این شرایط وجود ندارد. بنابراین، چنانچه از این نوع خاکها استفاده شود، در محیط‌های مرطوب نیاز به بهسازی آنها است. این موضوع به خصوص در مناطق سردسیر اهمیت خاصی می‌یابد. بر اساس مطالعه منابع کنونی مشخص شده است که در مناطق سردسیر، برخی از مشخصات مکانیکی خاک تحت اثر انجماد و ذوب‌های متعدد تغییر می‌نماید. ونگ و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که در مناطق سرد سیر، عوامل ویژه ای بر مشخصات مکانیکی خاک اثر گذار هستند. در این مورد، خواص مکانیکی خاک چندین بار تحت اثر تشکیل یخ بین ذرات در طول انجماد و رطوبت اضافی در طول آب شدن قرار می‌گیرد. این اثرات ممکن است، منجر به کاهش قابل توجه ظرفیت باربری خاک شود [۱۶]. کی و همکاران (۲۰۰۸) نتایج تغییرات ناشی از انجماد – آب شدن بر خواص مهندسی یک خاک CL را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس این پژوهش مشخص گردید که تحت شرایط انجماد یکسان، برای برخی از مشخصات مهندسی خاک بر حسب انجماد – آب شدن یک وزن واحد خشک بحرانی یعنی γ_{cr}^{d} وجود دارد که در آن هنگامی که وزن واحد خشک اولیه معادل γ_{cr}^{d} بود، دانسیته خاک، چسبندگی و فشار پیش تحکیم پس از انجماد – آب شدن بدون تغییر باقی می‌ماند. هنگامی که وزن واحد خشک اولیه بیشتر از γ_{cr}^{d} بود، این سه پارامتر کاهش یافت و با وزن واحد خشک اولیه کمتر از γ_{cr}^{d}، این پارامتر ها افزایش یافتند [۱۳]. بنابراین، ضروری است تا در مناطق سردسیر ضمن اتخاذ روش بهسازی متناسب با امکانات محل، اثرات دوره‌های انجماد و آب شدن نیز بر خاک بهسازی شده در نظر گرفته شود.

یکی از روشهای متداول بهسازی خاکهای رسی، ثبیت آنها توسط آهک است. تثبیت با آهک به صورت وسیعی در پژوهش‌های مهندسی عمران از قبیل پی سازی، بستر سازی راهها، خاکریزها و شمع‌ها به کار برده شده است. وقتی آهک به خاک اضافه می‌شود با ذرات خاک واکنش داده و بسیاری از خواص خاک را بهبود می‌بخشد. با استفاده از آهک، سمنتاسیون قوی بین ذرات خاک ایجاد می‌شود که به صورت موثری مقاومت در برابر نیروها را افزایش می‌دهد. اما بر اساس مطالعاتی که توسط محققین مختلف مانند بل (۱۹۹۶)، راجاسکاران و ناراسیمها (۱۹۹۶و۲۰۰۲) انجام شده مشخص شد که افزودن آهک باعث ترد شدگی خاک شده که این امر باعث می‌شود که خاک مقاومت خود را سریع وقتی که شکست صورت می‌گیرد از دست بدهد ۵]، [۱۴] و [۹]. بنابراین، در حالی که استفاده از آهک خواص مقاومتی خاک را بهبود می‌بخشد، بر خصوصیات شکل‌پذیری اثر نامطلوبی می‌گذارد. در سالهای اخیر، افزودن الیاف گسسته و مخلوط نمودن آن با خاک، رفتار مقاومتی خاک را بهبود بخشیده است. لی و همکاران (۱۹۹۵) و پراباکار و اسریدهار (۲۰۰۲) نشان دادند که افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی، سختی و پلاستیسیته یک خاک چسبنده پس از تقویت با الیاف گسسته پلی‌پروپیلن ایجاد می‌شود [۸] و [۱۱]. همچنین کومار و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که با اضافه نمودن الیاف پلی استر به رس بسیار قابل تراکم، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری محدود نشده بدست می‌آید. آنها دریافتند که اضافه نمودن ۰/۵ تا ۲٪ الیاف ۳ میلی‌متری باعث افزایش ۵۰ تا ۶۰٪ی مقاومت می‌شود. این افزایش مقاومت در مورد الیاف ۶ و ۱۲ میلی‌متری (صاف و پیچ خورده) به ۶۰ تا ۱۱۵ ٪ رسید [۷]. این نتایج با نتایج بدست آمده توسط تنگ و همکاران (۲۰۰۶) قابل مقایسه است، آنها خاک کائولینیت را با الیاف‌های پلی‌پروپیلن مسلح نمودند و بر اساس این پژوهش مشخص گردید که مقاومت فشاری محصور نشده افزایش یافته است [۱۵]. نتایج مطالعات قضاوی و روستایی (۲۰۰۹) نشان داد که افزایش الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت خاک رسی را در برابر دوره‌های انجماد – ذوب شدن افزایش می‌دهد و افزودن ۳٪ الیاف پلی‌پروپیلن منجر به افزایش مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس به میزان ۱۶۰٪ قبل و ۶۰٪ پس از اعمال دوره‌های انجماد- ذوب شدن و سبب کاهش ۷۰٪ی تورم ناشی از یخبندان خواهد شد [۶]. برای بررسی رفتار مقاومتی خاک اصلاح شده با آهک و الیاف، اثنی عشری و جعفری (۱۳۸۹) از خاک رس کائولینیت، آهک صنعتی و ضایعات نوعی الیاف پلیمری تولیدی کارخانه نخ تایر به طول ۲ سانتیمتر، استفاده نمودند. بر اساس یافته‌های حاصل از پژوهش مشخص شد که به طور کلی با افزودن آهک و الیاف، مقاومت حداکثر نمونه‌ها افزایش یافت و حضور الیاف سبب شکل‌پذیری و ایجاد مقاومت باقی مانده بیشتری شد [۱].

بنابراین با توجه به ضرورت استفاده از روشهای بهسازی خاک در خاکهای رسی و با تاکید بر دوام این روشها در مناطق سردسیر لازم است تحقیقات بیشتری در زمینه اثر دوره‌های یخبندان و

ذوب بر انواع روشهای بهسازی خاک انجام شود. در این پژوهش سعی بر آن است که ضمن بررسی اثر توام تثبیت خاکهای ریزدانه با آهک و تسلیح آن با الیاف پلی‌پروپیلن با هدف کاهش اثرات منفی تثبیت خاک رس با آهک و اثر درصدهای مختلف آهک و الیاف بر خصوصیات مقاومتی و شکل‌پذیری خاک رس، اثر این نوع بهسازی در مناطق سردسیر ارزیابی شود.

۲- مواد و روشها

۲-۱ مواد و مصالح مصرفی

نمونه خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش، خاک رسی تهیه شده از منطقه کمالشهر کرج بوده است. قبل از تهیه نمونه‌های آزمایشی، ابتدا مشخصات فیزیکی و شناسائی خاک گفته شده طبق استانداردهای مندرج در ASTM تعیین گردید. نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است:

جدول (۱): مشخصات نمونه خاک مورد بررسی

ویژگیها	مقدار
حد روانی(٪)	۴۸
حد خمیری(٪)	۲۴
دامنه خمیری(٪)	۲۴
حد انقباض(٪)	۱۴
رطوبت طبیعی(٪)	۴/۳۶
رطوبت بهینه(٪)	۲۱
وزن واحد حجم خشک حداکثر(گرم بر سانتیمتر مکعب)	۱/۵۹
طبقه بندی (یونیفاید)	CL

همچنین به منظور شناسایی کانیهای تشکیل‌دهنده این خاک، آزمایش XRD توسط آزمایشگاه سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد که بر اساس نتایج این آزمایش کانی‌های تشکیل دهنده خاک مورد بررسی به شرح زیر تعیین گردید:

کوارتز+ کلسیت+ فلدسپار+ کانی های رسی

آهک

آهک مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه آهک سپیدان قم تهیه گردید. مواد تشکیل دهنده این آهک بر اساس نتایج آزمایش XRF انجام شده مطابق جدول (۲) تعیین گردید:

جدول (۲): مشخصات آهک مصرفی

ویژگیها	مقدار
Ca(OH)2	٪۹۵/۵
CaCo3	٪۲
Cao	٪۱
ناخالصی‌های دیگر	٪۱/۵

الیاف پلی‌پروپیلن

الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی در این پژوهش از شرکت تولید الیاف پلی‌پروپیلن (سهام عام) تهیه گردیده که مشخصات آن در جدول (۳) آمده است:

جدول (۳): خواص فنی الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده

بافت	۱۰۰٪ پلی‌پروپی‌لن خالص
نوع	تک رشته‌ای
ناخالصی	صفر
رنگ ظاهر	به طور طبی‌عی سفی‌د
مقطع عرضی	دای‌ره
طول الی‌اف	۶ می‌لی‌متر
قطر	۲۲ می‌کرون

تاکنون از الیاف پلی‌پروپیلن به عنوان افزودنی، برای مسلح نمودن انواع بتن و مخلوط‌های سیمانی و گچی استفاده گردیده است. الیاف پلی پروپیلن با قابلیت نگهداری طولانی آب، دچار زنگ زدگی و خوردگی نمی شود. همچنین در برابر بسیاری از موارد خورنده مانند اسیدها و بازها مقاوم بوده و تخریب نمی‌شود.

۲-۲ روش انجام پژوهش

۲-۲-۱ معرفی تیمارهای آزمایش

براساس نتایج تحقیقات قبل، نظیر اثنی عشری و جعفری (۱۳۸۹) و کبیر و همکاران (۱۳۸۹) مشخص گردیده است که حداکثر میزان استفاده از آهک در مطالعات آزمایشگاهی ۸٪ و مقادیر بهینه حدود ۴ الی ۵٪ بوده است [۱] و [۳]. تجربیات قضاوی و روستایی (۲۰۰۹) نشان داده است که حداکثر کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن در خاک رسی۳٪ می‌باشد[۶]. اما در حین آزمایش‌های مقدماتی و قبل از شروع مراحل اصلی این پژوهش مشخص گردید استفاده بیش از ۱٪ الیاف، سبب می‌شود تا اختلاط آن با خاک با دشواری‌های زیادی مواجه شود و عملا موجب پخش غیر یکنواخت الیاف در نمونه‌ها شود. علاوه بر آن استفاده هم‌زمان آهک و الیاف پلی‌پروپیلن از نظر شرط اقتصادی اقتضا می‌کند که درصد پایین الیاف انتخاب شود. در خصوص تعداد دوره‌های انجماد و آب شدن با مراجعه به مطالعات انجام شده توسط ونگ و همکاران (۲۰۰۷) و قضاوی و روستایی (۲۰۰۹) و موارد مشابه دیگر مشخص گردید که بیشتر تغییرات

در بافت خاک تا دوره ۷ام به وقوع می‌پیوندد [۱۶] و [۶].

بنابراین در این پژوهش برای بررسی اثر مقادیر آهک و الیاف پلی‌پروپیلن بر مشخصات مکانیکی خاک رسی، ۱۲ تیمار مرکب از سه سطح آهک (۰، ۲ و ۴٪ وزن خشک خاک) و ۴ سطح الیاف پلی‌پروپیلن (۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱٪ وزن خشک خاک) تهیه گردید. برای تعیین اثر دوره‌های انجماد – آب شدن بر روی ترکیبات مورد نظر از هر تیمار ۵ نمونه تهیه شد که به ترتیب دوره‌های ۰، ۱، ۴، ۷ و ۱۰ام انجماد – آب شدن را تحمل نمودند. برای دقت بیشتر و انجام مطالعات آماری، هر نمونه با ۳ تکرار تهیه گردید. به منظور اطمینان از گیرش کامل مخلوط خاک – آهک – الیاف کلیه نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در کیسه نایلون در دمای مناسب عمل آوری شدند.

برای مرحله انجماد و آب شدن، نمونه‌ها پس از ۲۸ روز در یک یخچال در دمای ۲۰- درجه سلسیوس برای ۶ ساعت قرار داده شدند و آنگاه برای آب شدن در دمای ۲۵+ درجه سلسیوس برای ۶ ساعت قرار داده شدند. این دماها یکی از دماهایی هستند که در تحقیقات قبلی که توسط کی و همکاران(2004) انجام شد مشخص گردید. ۶ ساعت دوره زمانی مناسبی است که پس از آن، تغییرات ارتفاع نمونه ثابت می‌شود[۱۲]. پس از آن که هر کدام از این ۱۲ تیمار مراحل آماده سازی، عمل آوری و سپس دوره‌های یخبندان – ذوب انجماد را تحمل نمودند، آماده انجام آزمایش فشاری محصور نشده شدند. برای شناسایی هر کدام از نمونه‌ها از یک کد معین به صورت S(%pp,%L, C, R) استفاده شد که در آن pp، L، C و R به ترتیب درصد الیاف، درصد آهک، شمار دوره‌های تحمل شده یخبندان – ذوب انجماد و شمار تکرار است.

۲-۱-۲ روش ساخت نمونه‌ها

برای نمونه سازی، مصالح در ۵ لایه (طول نمونه ۷۰mm و به قطر ۳۳/۳mm) و هر لایه با ۱۶ ضربه با استفاده از چکش مخصوص قالب تراکم‌هاروارد با حداکثر وزن مخصوص خشک بدست آمده از آزمایش تراکم‌هاروارد، متراکم گردید. برای ساخت نمونه‌های حاوی ترکیب آهک و خاک ابتدا آهک به صورت خشک کاملا" با خاک مخلوط و سپس آب به تدریج اضافه شد تا میزان رطوبت ترکیب نهایی به رطوبت بهینه برسد و برای ساخت نمونه‌های حاوی آهک و الیاف پلی‌پروپیلن و خاک ابتدا آهک به صورت کاملا خشک با خاک مخلوط شد و سپس در یک لگن پلاستیکی ابتدا مقداری از مخلوط حاصله ریخته شد و سپس با افشانه آب پاش مقداری سطح آن خیس گردید و بعد مقداری از الیاف به سطح خاک اضافه شد به طوری که کامل در سطح آن پخش شده و سپس به آرامی با کاردک مواد موجود مخلوط گردیدند تا مخلوط حاصل یکنواخت گردد، به همین صورت دوباره لایه بعدی خاک روی این مخلوط ریخته شد و مجددا مقداری از آب اضافه شد و باز مقداری الیاف اضافه گردید و سپس مخلوط با کاردک به هم زده شد، این روند تا پایان اختلاط همه مواد و رسیدن رطوبت ترکیب حاصله به مقدار بهینه ادامه یافت. علت اضافه نمودن تدریجی آب و اختلاط لایه به لایه مواد آن‌است که در صورتی که الیاف بدون حضور آب اضافه شود و اختلاط صورت گیرد الیاف‌ها به جای چسبیدن به خاک و آهک به یکدیگر می‌چسبند و سبب غیر یکنواختی مخلوط حاصله می‌شوند. در شکل (۱) قالب تراکم هاروارد و نمونه ساخته شده توسط آن نشان داده شده است:

شکل (۱): قالب تراکم هاروارد و نمونه استوانه ای ساخته شده توسط این وسیله

۲-۲-۳ آزمایش‌های آزمایشگاهی

آزمایش تراکم هاروارد

برای تعیین مشخصات تراکمی مخلوطهای مختلف، ابتدا آزمایش تراکم هاروارد بر روی ترکیب‌های مختلف انجام شد تا نمونه‌های مورد نظر با درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر بدست آمده از این آزمایش ساخته شوند. روال انجام این آزمایش تقریبا مشابه آزمایش تراکم استاندارد است، با این تفاوت که این آزمایش در قالب تراکم هاروارد و در ۵ لایه با ۱۶ ضربه توسط چکش مخصوص آن انجام شد.

آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

پس از طی مراحل ساخت و عمل آوری نمونه‌ها آزمایشات مقاومت فشاری محصور نشده به شیوه کرنش کنترل شده با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. این آزمایش بر طبق استاندارد ASTM D2166 انجام شد. درحین انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، مقادیر گیج نیرو به ازای مقادیر معین گیج تغییر شکل ثبت و پس از اعمال ضرایب عقربه‌های گفته شده تغییرات مقدار نیرو و در نتیجه تنش نسبت به کرنش‌های مربوطه تعیین و رسم شد. شکل (۲) دستگاه مقاومت فشاری مورد استفاده را نشان می‌دهد.

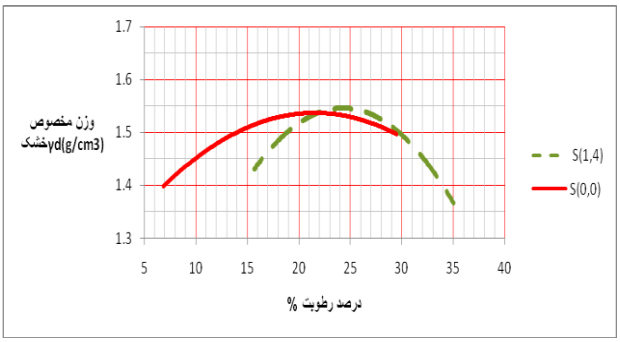
شکل (۲): دستگاه آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده مورداستفاده

۳- نتایج

در این پژوهش با توجه مجهز نبودن دستگاه مورد استفاده به سیستم الکترونیکی، نتایج آزمایش‌ها بصورت دستی در گزارش‌ها و جداول مخصوص در محل آزمایشگاه ثبت شد. سپس برای انجام محاسبات و رسم نمودارها از نرم افزار اکسل استفاده شد.

۳-۱ اثر آهک و الیاف پلی‌پروپیلن بر مشخصات تراکمی خاک رس

در شکل (۳) نتایج حاصل از آزمایش تراکم هاروارد برای دو تیمار خاک رس و خاک رس تثبیت شده با ۴٪ آهک و تسلیح شده با ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن که مقادیر حداکثر افزودنی مورد استفاده در این پژوهش است در قالب منحنی تراکم هاروارد نشان داده شده است.(نکته: $S(x_1,x_2)$ x_1:درصد الیاف پلی‌پروپیلن وx_2 : درصد آهک است).

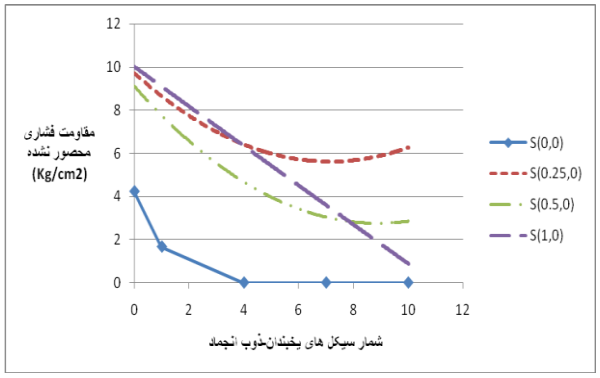


شکل (۳): اثر توام حداکثر مقدار الیاف و آهک مصرفی بر مشخصات تراکمی خاک

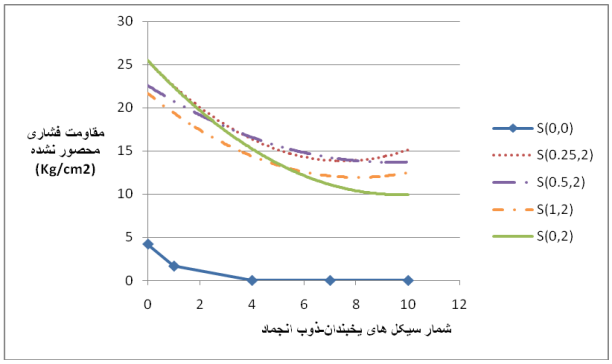
با توجه به شکل (۳) نتایج حاصل از آزمایش تراکم هاروارد حاکی از آن است که به طور کلی افزودن الیاف پلی‌پروپیلن تا ۱٪ و آهک تا ۴٪ به خاک رس سبب افزایش ۴٪ی رطوبت بهینه می‌گردد که ناشی از افزودن آهک است. اما تغییرات محسوسی در وزن واحد حجم خشک حداکثر رخ نمی‌دهد. دلیل این امر را می‌توان چنین استنباط نمود که در حین انجام آزمایش تراکم هاروارد فرصت کافی برای عمل آوری نمونه‌های دارای آهک وجود ندارد. بنابراین آنچه در نتیجه نهایی منعکس می‌گردد فقط ناشی از تغییرات اندازه دانه‌های مخلوط مورد نظر است. نظر به این که معمولا ساخت نمونه‌ها بر مبنای رطوبت بهینه دقیقا با همان رطوبت انجام نمی‌شود و با رواداری (تلورانس) احتمالی ۲٪ است و تغییرات رطوبت بهینه در مخلوطهای مختلف بین ۲۰ تا ۲۴٪ متغییر بوده و در واقع اختلاف قابل توجه نیست. بنابراین برای ساخت کلیه نمونه‌ها از رطوبت بهینه متوسط ۲۲٪ استفاده شد.

۳-۲ اثر دوره‌های انجماد و ذوب بر مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده برای هر یک از نمونه‌ها به ازای دوره‌های یخبندان و ذوب مختلف به ترتیب افزایش درصد آهک در نمونه‌ها در شکل (۴)،شکل (۵) وشکل (۶) ارائه گردیده است:

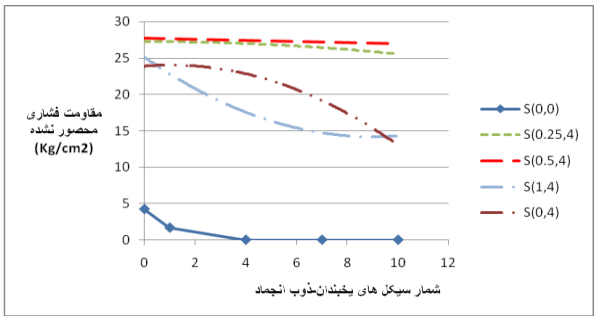


شکل (۴): نمودار تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل دوره‌های انجماد- ذوب برای نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن



شکل (۵): نمودار تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل دوره های انجماد – ذوب یخبندان برای نمونه‌های تثبیت

شده با ۲ درصد آهک



شکل (۶): نمودار تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل دوره‌های انجماد – ذوب یخبندان برای نمونه‌های تثبیت‌شده با ۴ درصد آهک

نتایج اثر تسلیح خاک با الیاف پلی‌پروپیلن در شکل (۴) نشان می‌دهد که پس از دوره اول انجماد و آب شدن، مقاومت نمونه بدون آهک و الیاف بیش از ۵۰٪ کاهش یافته و در ادامه با اعمال دوره‌های بعدی مقاومت نمونه به صفر می‌رسد. با افزایش الیاف تا ۱٪ مقاومت نمونه‌ها در حالتی که دوره‌های یخبندان و ذوب بر آنها اثر ننموده تا ۵۰٪ افزایش می‌یابند که روال این افزایش با نتایج تحقیقات قضاوی و روستایی (۲۰۰۹) که در آن مشخص شد که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن منجر به افزایش مقاومت فشاری محدود نشده خاک قبل از اعمال دوره‌های انجماد- ذوب شدن می‌شود برابری دارد [۶]. اما با افزایش دوره‌های یخبندان و ذوب به تدریج مقاومت آن‌ها کاهش می‌یابد و نکته قابل توجه آن است که در دوره ۱۰ام با افزایش میزان الیاف، نمونه‌ها مقاومت خود را بیشتر از دست می‌دهند به گونه ای که نمونه‌های دارای ۱٪ الیاف در دوره ۱۰ام هیچ مقاومتی ندارند. بنابراین تسلیح خاک رس فقط با الیاف برای مناطق سردسیر نمی‌تواند گزینه مناسبی باشد که در این خصوص نتایج گفته شده برخلاف نتایج تحقیقات قضاوی و روستایی (۲۰۰۹)می‌باشد که در آن بیان شده؛ افزایش الیاف پلی‌پروپیلن تا ۳٪ به خاک رسی سبب افزایش ۶۰٪ مقاومت نمونه‌ها پس از اعمال دوره‌های انجماد و ذوب می‌شود [۶].

در خصوص نمونه تثبیت شده با ۲٪ آهک با توجه به شکل (۵) ملاحظه می‌شود که مقاومت نمونه بدون اثر دوره‌های انجماد و ذوب ۵ برابر افزایش یافته و به تدریج با افزایش دوره‌های انجماد و ذوب مقاومت به تدریج کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که پس از تحمل ۱۰ دوره انجماد و ذوب آن، بیش از ۵۰٪ افت نموده است که دلیل این امر می‌تواند ناشی از چسبندگی ضعیف بین ذرات باشد. به بیان دیگر تثبیت خاک با ۲٪ آهک برای مناطق سردسیر جوابگو نیست. در نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن به تدریج مقاومت با افزایش شمار دوره‌های یخبندان و ذوب کاهش می‌یابد و پس از دوره ۷ام به طور تقریب به مقدارثابتی می‌رسد اما در هر حال در هر کدام از دوره‌ها نمونه‌هایی که دارای درصد بیشتری الیاف هستند مقاومت کمتری را نشان می‌دهند که نشان دهنده اثر منفی افزایش الیاف بیش از حد بر روی نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ آهک می‌باشد. بنابراین در کل، وجود الیاف در نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ آهک نتوانسته به خوبی جلوی کاهش مقاومت را در اثر تحمل دوره‌های انجماد و ذوب یخبندان بگیرد. در خصوص تثبیت خاک رس با ۴٪ آهک و تسلیح آن با الیاف پلی‌پروپیلن نتایج بسیار قابل قبولی برای مقاومت در برابر دوره‌های یخبندان و ذوب به دست آمده است در این مورد ملاحظه می‌گردد که مقاومت نمونه‌ها با افزایش الیاف پلی‌پروپیلن تا ۰/۵٪ با افزایش شمار دوره‌های یخبندان و ذوب افت نمی‌نماید، اما با افزایش الیاف تا ۱٪ افت مقاومت به میزان ۴۰٪ مشابه نمونه‌های تثبیت شده با آهک در دوره ۱۰ام است که باز هم اثر منفی وجود مقدار بالای الیاف را نشان می‌دهد. در واقع چنین استنتاج می‌گردد که با توجه به این که الیاف فقط مقاومت کششی را افزایش می‌دهد، با افزایش بیش از حد میزان الیاف پلی‌پروپیلن در مخلوط، به تدریج الیاف، جای خاک و آهک را در مخلوط اشغال می‌نماید.این مساله باعث افت مقاومت می‌شود. اثرالیاف در کنار آهک، بر روی افزایش مقاومت خاک رس به مراتب از اثر آن روی خاک رس به تنهایی بیشتر است. ایجاد ژل سیمانتاسیون توسط آهک نه تنها باعث چسبندگی بیشتر بین ذرات خاک و به دنبال آن افزایش مقاومت در خاک می‌شود، بلکه باعث افزایش چسبندگی بیشتر بین ذرات خاک رس با الیاف نیز می‌گردد که با توجه به مقاومت کششی بالای الیاف، مقاومت نمونه‌ها نیز افزایش خواهد یافت. این موضوع با نتایج تحقیقات اثنی عشری و جعفری (۱۳۸۹) نیز که در آن مشخص می‌گردد که مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس متاثر از افزودن درصدهای مختلف آهک و الیاف است و افزایش بیش از حد الیاف باعث افت مقاومت می‌شود برابری دارد [۱]. نکته قابل توجه این است که با توجه به شکل (۶) دیده می‌شود نمونه تثبیت شده با ۴٪ آهک و تسلیح شده با 0/5٪ الیاف پلی‌پروپیلن ترکیبی به نسبت مقاوم در مقابل دوره‌های یخبندان و ذوب دارد، به گونه ای که در هیچ یک از دوره‌ها افت مقاومت رخ نمی‌دهد. این ترکیب به عنوان ترکیبی مناسب برای مناطق سردسیر به نظر می‌رسد. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق حاضرضرورت مطالعه اثر دوره‌های یخبندان و ذوب در مناطق سردسیر برای طراحی پی‌ها و روسازی جاده‌ها به اثبات می‌رسد و دیده می‌شود اثر همزمان تثبیت با آهک و تسلیح، با مقدار کمی الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند چاره ساز اثرات کاهش مقاومت خاک

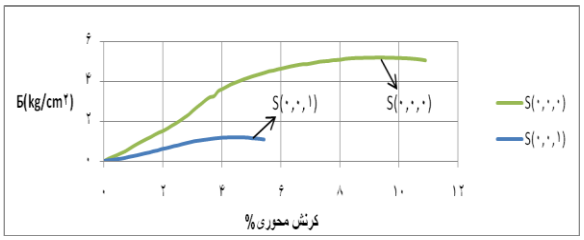
در مناطق سردسیر باشد.

۳-۳ اثر دوره‌های انجماد و ذوب بر مدول الاستیک (E) و خصوصیات شکست مخلوط‌های مختلف

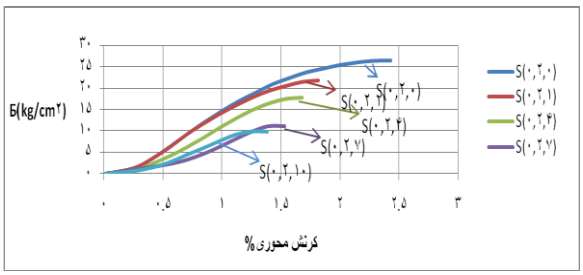
مدول الاستیک بنا به تعریف عبارتست از شیب قسمت خطی منحنی تنش-کرنش. بنابراین برای بررسی تغییرات مدول الاستیک (E) در مقابل دوره‌های انجماد و ذوب برای مخلوطهای مختلف خاک رس و آهک و الیاف پلی‌پروپیلن ابتدا باید منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های مختلف رسم شود. بدین ترتیب با رسم منحنی‌های تنش- کرنش می‌توان به بررسی تغییرات در خصوصیات شکست و رفتار مقاومتی تیمارهای مختلف پرداخت. در این بخش در سه قسمت به بررسی خصوصیات شکست و رفتار مقاومتی تیمارهای مختلف پرداخته می‌شود(نکته: $S(x_1,x_2,x_3)$ x_1:درصد الیاف پلی‌پروپیلن و x_2 : درصد آهک و x_3 : تعداد دوره‌های انجماد و ذوب).

۳-۳-۱ نمونه‌های تثبیت شده با آهک

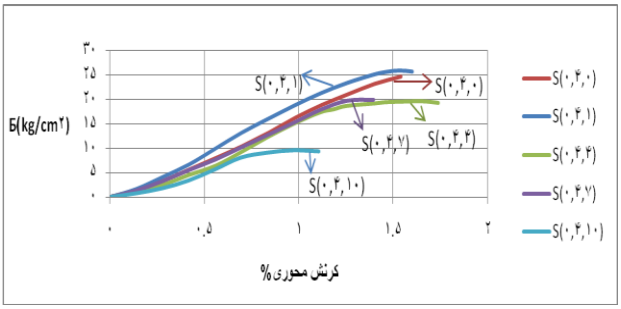
در شکل‌های(۷) تا (۱۰) نمودارهای منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های خاک رس و آهک به همراه تعداد دوره‌های انجماد و ذوب مربوط به هر کدام نشان داده شده است.



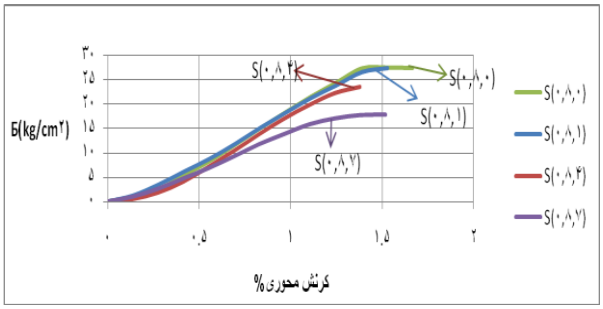
شکل (۷): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0,0)



شکل (۸): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0,2)



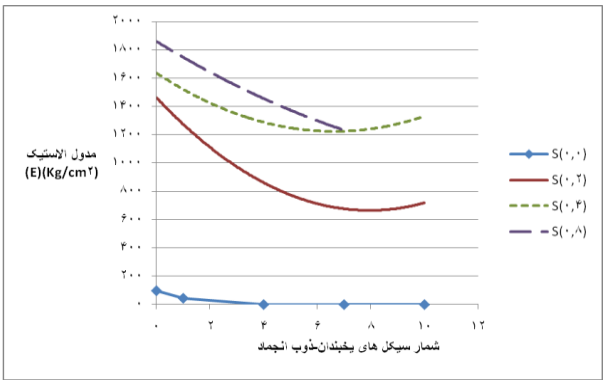
شکل (۹): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0,4)



شکل (۱۰): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0,8)

با توجه به شکل (۷) مربوط به نمودار خاک رسی ملاحظه می‌گردد که شکست به صورت شکل پذیر است، حداکثر تنش محوری متناظر با کرنش ۹٪ و برابر با ۵/۲ kg/cm2 برای حالتی است که نمونه تحت دوره‌های انجماد و ذوب واقع نشده است. با اعمال دوره‌های انجماد و ذوب تا دوره ۵ام، مقاومت به میزان ۷۸٪ کاهش می‌یابد و وقوع گسیختگی در کرنشی پایین تر به وقوع می‌پیوندد که به معنی ترد شدن رفتار خاک است که با نتایج تحقیقات قضاوی و روستایی (۲۰۰۹) و یونس فرد و همکاران (۱۳۸۹) نیز برابری دارد [۶] و[۴]. از طرفی با توجه به شکل (۷) تا شکل (۱۰) رفتار مقاومتی خاک رسی تثبیت شده با آهک به طور کامل متفاوت است و تغییرات زیادی در منحنی تنش-کرنش به وجود می‌آید، همان طوری که ملاحظه می‌گردد مدول ارتجاعی (شیب منحنی) به شدت افزایش یافته و در ضمن شکست بصورت کاملا ترد بوده است و منحنی‌ها دارای نقطه حداکثر تنش محوری مشخصی هستند. اما در هر حال با افزایش تعداد دوره‌های انجماد و ذوب مقاومت کاهش یافته و وقوع گسیختگی با شکستی ترد تر صورت می‌گیرد که این روال کاهش مقاومت در اثر افزایش شمار دوره‌های تنش-کرنش با افزایش درصد آهک کمتر می‌شود و در واقع نشان دهنده آن است که نمونه‌ها پایداری و مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. این مورد نیز با نتایج تحقیقات یونس فرد و همکاران (۱۳۸۹) که در آن افزایش بیش از ۲٪ آهک منجر به افزایش مقاومت قابل ملاحظه خاک رسی در برابر دوره‌های انجماد و ذوب می‌شود هماهنگی

دارد [۴]. این نکته نیز قابل توجه است که در هر حال حتی با افزودن ۸٪ آهک به خاک رسی پس از ۷امین دوره ذوب و انجماد مقاومت به میزان ۳۷٪ افت می‌نماید و در واقع ترکیبی پایدار در برابر دوره‌های ذوب و انجماد از تثبیت خاک رس و آهک حاصل نمی‌شود. برای بررسی درصد کاهش مقدار مدول الاستیک خاک رسی تثبیت شده با آهک در شکل (۱۱ نمودار تغییرات مدول الاستیک در برابر دوره‌های انجماد و ذوب برای تیمارهای مختلف خاک رس و آهک نشان داده شده است:



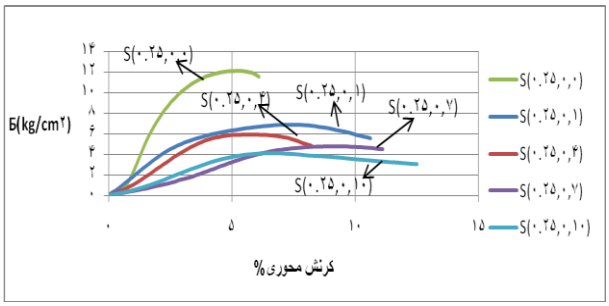
شکل (۱۱): نمودار تغییرات مدول الاستیک در مقابل دوره‌های انجماد – ذوب برای تیمارهای تثبیت شده با آهک

با توجه به شکل (۱۱) مدول الاستیک خاک رس حتی زمانی که دوره‌های انجماد و ذوب بر آن اثر نکرده مقدار قابل توجهی ندارد و پس از اعمال اولین دوره انجماد و ذوب به تدریج با از دست رفتن مقاومت نمونه مدول الاستیک نیز کاهش یافته و مقدار آن با افزایش شمار دوره‌های انجماد و ذوب صفر می‌گردد. این موضوع با نتایج تحقیقات ونگ و همکاران(۲۰۰۷) که در آن بیشترین کاهش در مدول الاستیک نمونه‌ها پس از دوره اول رخ می‌دهد نیز انطباق دارد [۱۶]. این نکته نشان می‌دهد که یک به هم ریختگی قابل توجه در طول اولین فرایند دوره انجماد – آب شدن به وقوع می‌پیوندد که با مطالعاتی که توسط اوتمن و بنسون(۱۹۹۳) انجام شده نیز برابری دارد [۱۰].

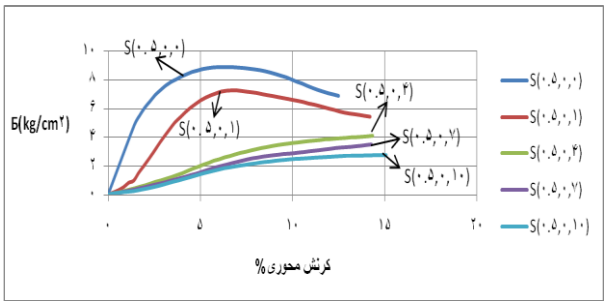
افزایش ۲٪ آهک به خاک رس منجر به افزایش ۱۴ برابری مدول الاستیک در دوره صفر انجماد و ذوب می‌شود، ولی با افزایش شمار دوره‌های انجماد و ذوب تا دوره ۷ام مدول الاستیک ۲/۳ برابر کاهش می‌یابد و پس از آن تا دوره دهم تقریبا ثابت می‌ماند. این موضوع با نتایج تحقیقات ونگ و همکاران (۲۰۰۷) مبنی بر ثابت ماندن تغییرات ارتفاع، مدول الاستیک و مقاومت نمونه‌های خاک رسی پس از عبور از دوره ۷ام و رسیدن به حالتی پایدار هماهنگی خوبی دارد[۱۶]. روندی تقریبا مشابه برای نمونه‌های خاک رس تثبیت شده با ۴ و ۸٪ آهک اما با مقادیر بیشتر مدول الاستیک برای آن مشاهده می‌گردد. به طوری که حتی با تثبیت خاک رس با ۸٪ آهک در دوره ۷ام مدول الاستیک به میزان ۳۳٪ افت می‌نماید. دلیل این امر می‌تواند ناشی از افت میزان چسبندگی در اثر دوره‌های انجماد و ذوب باشد و نشان دهنده افت مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با آهک در اثر اعمال دوره‌های انجماد و ذوب است.

۳-۳-۲ نمونه‌های تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن

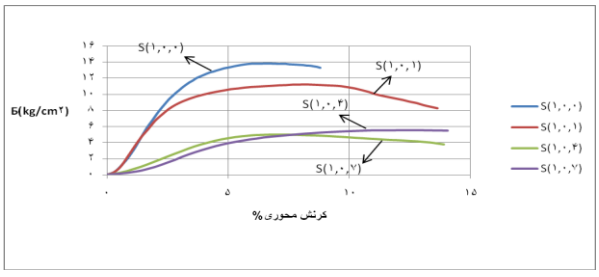
در شکل (۱۲) تا شکل (۱۴) نمودارهای منحنی‌های تنش- کرنش مخلوطهای خاک رس و الیاف پلی‌پروپیلن به همراه تعداد دوره‌های انجماد و ذوب مربوط به هر یک نشان داده شده است:



شکل (۱۲): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0/25,0)



شکل (۱۳): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0/5,0)

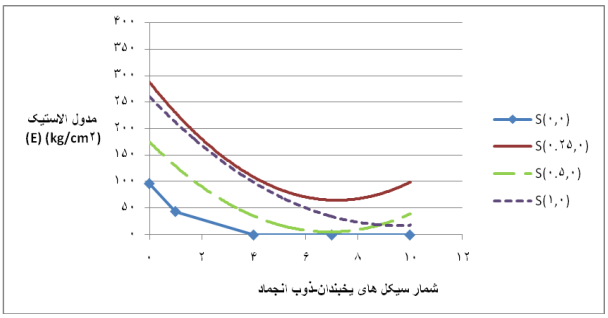


شکل (۱۴): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(1,0)

با توجه به شکل (۱۲) تا شکل (۱۴) ملاحظه می‌گردد خصوصیات شکست در منحنی مربوط به نمونه خاک رسی تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن به صورت نرم است، به عبارت دیگر وقوع گسیختگی در کرنشهای بالا رخ می‌دهد. این موضوع با نتایج حاصل از منحنی‌های تنش- کرنش بدست آمده از تحقیقات قضاوی و روستایی (۲۰۰۹) نیز برابری خوبی دارد [۶].

در اثر افزودن الیاف به میزان حداکثر ۱/۸ برابر، مقاومت افزایش می‌یابد که بیانگر اندرکنش نسبتا کم بین ذرات خاک رس و الیاف است. این امر ناشی از چسبندگی و اصطکاک کم در سطح تماس ذرات با الیاف است. اما در هر حال با افزایش شمار دوره‌های یخبندان و ذوب، نمونه‌ها با افت مقاومت مواجه می‌شوند و نکته قابل توجه آن است که با افزایش تعداد دوره‌های انجماد و ذوب، رفتار گسیختگی نمونه‌ها به صورت نرم تر در می‌آید یعنی قله خاصی در منحنی‌های شکست ملاحظه نمی‌شود.

در شکل (۱۵) نمودار تغییرات مدول الاستیک در مقابل دوره‌های انجماد و ذوب برای نمونه‌های مختلف خاک رس و الیاف پلی‌پروپیلن نشان داده شده است:

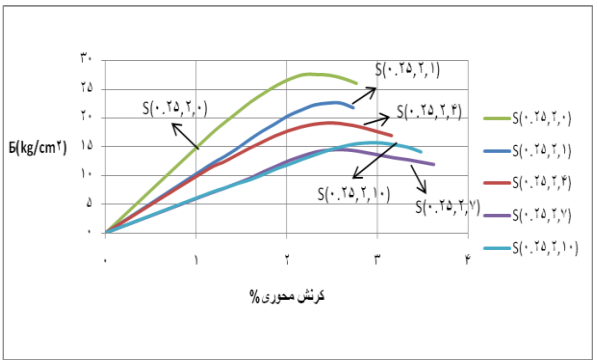


شکل (۱۵): نمودار تغییرات مدول الاستیک در مقابل دوره‌های انجماد – ذوب یخبندان برای تیمارهای تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن

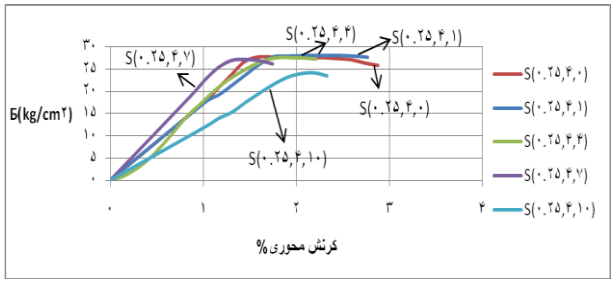
در شکل (۱۵)ملاحظه می‌گردد با افزایش شمار دوره‌های انجماد و ذوب، مدولالاستیک همه نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در خصوص نمونه تسلیح شده با ۰/۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن در دوره ۱۰ام با از دست رفتن مقاومت، این مقدار به میزان ۱۲/۵ برابر افت می‌نماید که در این حالت نیز اثر منفی حضور مقدار زیاد الیاف در کاهش مدول الاستیک و افزایش ناپایداری نمونه به دلیل اشغال محیط مخلوط توسط الیاف و کاهش ذرات خاک قابل استنتاج است.

۳-۳-۳ نمونه‌های تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن

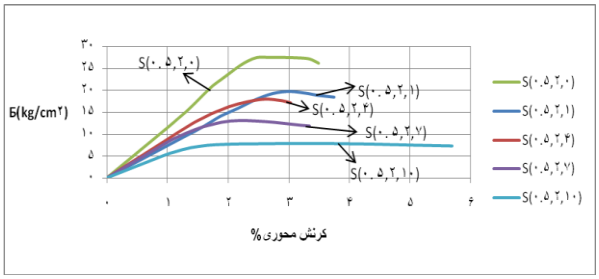
در شکل (۱۶) تا شکل (۲۱) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن به همراه تعداد دوره‌های انجماد و ذوب مربوط به هر یک نشان داده شده است:



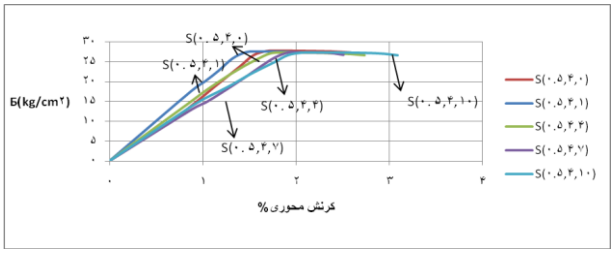
شکل (۱۶): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0/25,2)



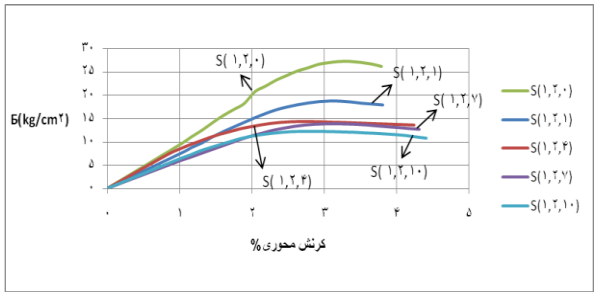
شکل (۱۷): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0/25,4)



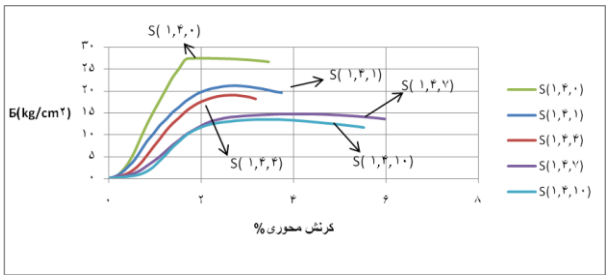
شکل (۱۸): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0/5,2)



شکل (۱۹): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0/5,4)



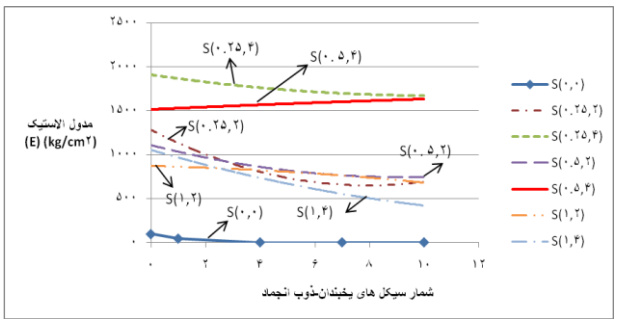
شکل (۲۰): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(1,2)



شکل (۲۱): نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(1,4)

با توجه به شکل (۱۶) تا شکل (۲۱) در نمونه‌های تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن می‌توان چنین نتیجه گیری نمود که با یک درصد ثابت از آهک، با افزایش درصد الیاف، وقوع گسیختگی با رفتاری نرم تر صورت می‌گیرد. به بیان دیگر وقوع گسیختگی در کرنش‌های بالاتر رخ می‌دهد و همچنین در نقطه گسیختگی بعد از شکست، نمونه به طور کامل گسیخته نمی‌شود و می‌تواند تا حدی مقاومت خود را حفظ نماید. این موضوع با نتایج تحقیقات عبدی و همکاران (۱۳۸۹) که در آن به بررسی اثر الیاف بر خصوصیات مقاومتی کائولینیت تثبیت شده با سیمان پرداخته اند و نیز نتایج حاصل از اثنی عشری و جعفری (۱۳۸۹)، هماهنگی مناسبی دارد [۲] و [۱]. علت این رفتار را می‌توان ناشی از مقاومت بالای کششی الیاف پلی‌پروپیلن در سطح شکست دانست. همچنین با یک درصد الیاف ثابت، با افزایش درصد آهک رفتار گسیختگی نمونه تردتر می‌شود. بنابراین باید درصد معینی از آهک در پیوند با الیاف پلی‌پروپیلن وجود داشته باشد، که در آن رفتار گسیختگی نمونه نه ترد است و نه نرم و به عبارتی در آن حالت باید نمونه پایداری ویژه ای داشته باشد به گونه ای که افزایش شمار دوره‌های یخبندان و ذوب نیز نتواند موجب تغییر رفتار گسیختگی نمونه شود. دلیل این امر می‌تواند ناشی از تامین چسبندگی و اصطکاک کافی در سطح تماس ذرات با الیاف باشد. این موضوع در شکل (۱۹) نمودار منحنی‌های تنش-کرنش تیمار S(0/5,4) قابل مشاهده است که پایدار ترین ترکیب حاصله است.

اثر تثبیت خاک رس با آهک و تسلیح آن با الیاف پلی‌پروپیلن بر تغییرات مدول الاستیک در شکل (۲۲) نشان داده شده است:



شکل (۲۲): نمودار تغییرات مدول الاستیک در مقابل دوره‌های انجماد – ذوب یخبندان برای تیمارهای تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن

با توجه به شکل (۲۲) در نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن به تدریج مدول الاستیک با افزایش تعداد دوره‌های یخبندان و ذوب کاهش می‌یابد و پس از دوره ۷ام تقریبا به مقدارثابتی می‌رسد. در خصوص تیمارهای تثبیت شده با ۴٪ آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن ملاحظه می‌گردد که مدول الاستیک نمونه‌ها با افزایش الیاف پلی‌پروپیلن تا 0/5٪، با افزایش شمار دوره‌های یخبندان و ذوب انجماد افت نمی‌نماید. اما با افزایش الیاف تا ۱٪ روال افت مدول الاستیک مشابه نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ آهک می‌شود که باز هم اثر منفی وجود مقدار بالای الیاف را نشان می‌دهد. در کل نمونه‌های تثبیت شده با ۴٪آهک دارای مدول الاستیکی ۲ برابر نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ آهک هستند که به نظر می‌رسد این موضوع ناشی از افزایش تردی نمونه‌های تثبیت شده با درصد بیشتر آهک می‌باشد. نکته قابل توجه آن است که در این شکل ملاحظه می‌گردد نمونه تثبیت شده با ۴٪ آهک و تسلیح شده با 0/5٪ الیاف پلی‌پروپیلن ترکیبی با مدول الاستیک نسبتا پایدار در مقابل دوره‌های یخبندان و ذوب دارد، به گونه ای که در هیچکدام از دوره‌ها مدول الاستیک افت نمی‌کند و این ترکیب به عنوان ترکیبی مناسب برای مناطق سردسیر بدست می‌آید.

۴- نتیجه گیری و جمع بندی

با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده و بررسی های به عمل آمده برای ۱۲ نوع ترکیب متفاوت که با مخلوط همزمان الیاف پلی‌پروپیلن و آهک با خاک رس تهیه و عمل آوری شدند و سپس تحت دوره‌های انجماد و ذوب متفاوت قرارگرفتند، نتیجه گیری‌های زیر قابل ارائه می‌باشند:

۱- نتایج حاصل از آزمایش تراکم هاروارد برای مخلوطهای مختلف خاک رس و آهک و الیاف پلی‌پروپیلن نشان داد که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن تا ۱٪ و آهک تا ۴٪ به خاک رس سبب افزایش ۴٪ی رطوبت بهینه می‌گردد.

۲- در مناطق سردسیر برای حفظ مقاومت، تنها تثبیت خاکهای رسی با آهک جوابگو نیست و در اثر اعمال دوره‌های انجماد و ذوب حتی با افزودن ۸٪ آهک در دوره ۷ام ۳۷٪ از مقاومت کاهش می‌یابد و در هر حال ترکیبی کاملا مقاوم در برابر کلیه دوره‌های انجماد و ذوب از تثبیت خاک رس با آهک حاصل نمی‌شود.

۳- درخاکهای رسی تثبیت شده با آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن با یک درصد ثابت از آهک، با افزایش درصد الیاف وقوع گسیختگی در کرنش‌های بالاتر و با رفتاری نرم تر صورت می‌گیرد. همچنین در نقطه گسیختگی بعد از شکست، نمونه به طور کامل گسیخته نمی‌شود و می‌تواند تا حدی مقاومت خود را حفظ کند، علت این رفتار را می‌توان ناشی از مقاومت بالای کششی الیاف پلی‌پروپیلن در سطح شکست دانست.

۴- در خاک رسی تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن با توجه به این که الیاف تنها مقاومت کششی را افزایش می‌دهد، با افزایش بیش از حد میزان الیاف پلی‌پروپیلن در مخلوط به تدریج الیاف جای خاک و آهک را در مخلوط اشغال می‌کند و این مساله باعث افت مقاومت می‌گردد.

۵- درصد معینی از آهک در پیوند با الیاف پلی‌پروپیلن وجود دارد که در آن رفتار گسیختگی نمونه نه ترد است و نه نرم، به عبارتی در آن حالت نمونه پایداری ویژه ای دارد که افزایش شمار دوره‌های یخبندان و ذوب نیز موجب تغییر رفتار گسیختگی و کاهش مقاومت نمونه نمی‌شود.

۶- خاک رسی تثبیت شده با ۴٪ آهک و تسلیح شده با ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن ترکیبی نسبتا مقاوم در مقابل دوره‌های یخبندان و ذوب دارد، به گونه ای که در هیچکدام از دوره‌ها افت مقاومت و مدول الاستیک رخ نمی‌دهد.

۵- تشکر و قدردانی

این پژوهش در آزمایشگاه مکانیک خاک و مصالح ساختمانی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی انجام گردیده است. بدینوسیله مولفین مراتب تشکر و قدردانی خود را از مدیریت و اعضای هیئت علمی موسسه مذکور به خاطر مساعدتهای بعمل آمده اعلام می‌دارند.

۶- مراجع

[۱] اثنی عشری، م.، جعفری، م.'' مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس تثبیت شده با آهک و مسلح به الیاف پلیمری''، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران ، ۱۳۸۹.

[۲] عبدی، م.ر.، خاکبازان، ع.، ابوذر،'' بررسی تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر خصوصیات مقاومتی کائولینیت تثبیت شده با سیمان''، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران ، ۱۳۸۹.

[۳] کبیر، ا.، داودی، م. هـ، خرقانی، س. ''بررسی تاثیر درصد آهک بر روی مقاومت فشاری تک محوری خاک CL-ML حاوی کلرید سدیم.''، دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ص ۱۲۵-۱۳۶ ، ۱۳۸۹.

[۴] یونس فرد، م.، روشن ضمیر، م.ع.، زمردیان، م.ع. ''بررسی تاثیر آهک بر مقاومت خاک مارن در برابر سیکلهای یخبندان-ذوب یخ''، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران ، ۱۳۸۹.

[۵] Bell, F., "Lime stabilization of clay mineral and soils", Engineering Geology 42(4), 223-237, 1996.

[۶] Ghazavi, M., and Roustaie, M., "The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay", Cold Regions Science and Technology 61, 125-131, 2009.

[۷] Kumar, A., Walia, B., Mohan, J "Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay", Construction And building Materials 20, 1063-1068, 2006.

[۸] Li, G.X., Chen, L., Zheng, J.Q., Jie, Y.X., "Experimental study on fiber-reinforced cohesive soil", Shuili Xuebao/ Hydraulic Engineering 6, 31-36, (in Chinese), 1995.

[۹] Narasimha Rao, S., Rajasekaran, G. , "Reaction products formed in lime-stabilized marine clays", Geotechnical Engineering, ASCE 122, 329-336., 1996.

[۱۰] Othman, M.A., Benson, CH., "Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay", Canadian Geotechnical Journal 30, 236-246 , 1993.

[۱۱] Prabakar, J., Sridhar, R.S., Effect of , "random inclusion of sisal fiber on strength behavior of soil", Construction And Building Materials 16, 123-131., 2002.

[۱۲] Qi, J.L., Zhang, J.M., Zhu, Y.L. , "Influence of freezing-thawing on soil structure and its soils mechanics significance", Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (Supp. 2), 2690-2694, 2004.

[۱۳] Qi, J., Ma, W., Song, C., "Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil", Cold Regions Science And Technology 53, 397-404 , 2008.

[۱۴] Rajasekaran, G., Narasimha Rao, S., "Compressibility behavior of lime-treated marine clay", Ocean Engineering 29, 545-55, 2002.

[۱۵] Tang, C., Shi, B., Gao, W. Chen., "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil", Geotextiles and Geomembranes 24, 1-9, 2006.

[۱۶] Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X., Wen, Z., "Effect of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay", Cold Regions Science And Technology 48, 34-43, 2007.

۷-زیرنویس ها

[۱] Durability
[۲] Quartz
[۳] Calcite
[۴] Feldspar
[۵] Claymineral