

تأثیر چرخه‌های متوالی یخبندان و ذوب بر خاک‌های رسی بهسازی شده با آهک و الیاف

مسعود برنده^۱، امیر وفائی حمید^۲

^۱ کارشناس ارشد عمران-مدیریت ساخت

^۲ کارشناسی عمران-عمران

چکیده

چرخه‌های یخبندان- ذوب یخ از مهم‌ترین مسائل مهندسی ژئوتکنیک است که تأثیرات خیلی زیادی بر خصوصیات مکانیکی خاک‌های ریزدانه دارد. در سیکل‌های یخبندان با تغییر شکل آب و یخ به دلیل شرایط ترمودینامیکی در دمای زیر صفر درجه سانتی‌گراد، خصوصیات مهندسی خاک‌ها تغییر می‌کند. تاکنون تغییرات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش تأثیر سیکل‌های یخبندان-ذوب بر مدول برشی خاک‌های رسی بهسازی شده با آهک و الیاف شیشه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا خاک منطقه مورد مطالعه مورد بررسی‌های ابتدائی جهت شناسایی خصوصیات عمومی قرار گرفت و با استفاده از دستگاه تراکم‌سنج، خاک‌هایی که دارای درصد تراکم و خصوصیات مقاومتی پایینی بودن برای بهسازی و انجام آزمایش انتخاب شدند. در مرحله بعد برای بررسی اثر مقادیر آهک و الیاف بر مشخصات مکانیکی خاک رسی، نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف آهک (۰، ۲، ۴ و ۸٪) و الیاف شیشه با درصد‌های (۰، ۲۵ و ۵۰٪) تهیه گردید. تأثیر هر یک ابتدا به‌تنهایی و در مرحله بعد جهت بررسی تأثیر توأم آن‌ها با درصد‌های مختلف طی دوره‌های ۰، ۱، ۴ و ۷ و ۱۰ و ۱۲ سیکل ذوب و یخبندان و آزمون سه محوره سیکی تحت تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال در بارگذاری چندمرحله‌ای قرار گرفتند. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های حاوی فقط الیاف شیشه و آهک به ترتیب نمونه‌های حاوی یک درصد الیاف و ۸٪ آهک بیشترین مقدار مدول برشی را نشان می‌دهند و این مقدار را می‌توان به‌عنوان مقداری بهینه برای درصد الیاف در نظر گرفت. و در مورد نمونه‌های حاوی آهک و الیاف شیشه، ۴٪ آهک و ۵۰٪ الیاف ترکیبی نسبتاً مقاوم در مقابل سیکل‌های یخبندان و ذوب را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: چرخه ذوب و یخبندان، کائولینیت، آهک، الیاف شیشه

۱-مقدمه

زمانی که دمای خاک به زیر صفر درجه سانتی‌گراد افت می‌کند ذرات آب سرد شده و پس از تشکیل یخ ذرات یخ به درون حفرات نفوذ می‌کنند. در طول این تغییر فاز آب چیزی حدود ۹ درصد از ساختار کریستالی شش ضلعی خود منبسط می‌شود. این ذرات کریستالی تا زمانی که ذرات کریستالی دیگر مانع شوند یا به ذرات خود خاک نزدیک شوند رشد می‌کنند. (تیلور و لوتین^۱، ۱۹۷۸)

زمانی که دمای سطحی خاک زیر صفر درجه سانتی‌گراد است جبهه یخ زده در خاک پیشروی می‌کند (پنر^۲، ۱۹۵۷). یخ زدگی آب باعث افزایش در فشار یخ و کاهش در فشار آب حفرهای می‌شود (ویلیام و همکاران^۳، ۱۹۷۸). به دلیل کاهش فشار آب حفره ای در جبهه یخ زده آب از لایه های زیرین به طرف مرزهای یخ زده و درون خاکهای یخ زده حرکت می‌کند. حتی اگر خاک هیچ راه دسترسی به آب های خارجی نداشته باشد (دنیل و تراوتوین^۴، ۱۹۹۴). فشار آب حفره ای منفی بزرگ و حرکت آب باعث می‌شود ترکهای انقباضی قائم در خاک زیر جبهه یخ زده شکل بگیرند (اوتمن و بنسون^۵، ۱۹۹۳)

با پیشروی جبهه یخ زده این ترکها با یخ پر شده سپس وقتی یخ ها ذوب می‌شوند ترکها مجرای برای جریان آب شده و نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. 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 - دانه ها 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 محیط های 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 سرد سیر، برخی از مشخصات مکانیکی خاک تحت اثر انجماد و ذوب های 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. یکی از روشهای متداول بهسازی خاکهای رسی، تثبیت آنها توسط آهک است. تثبیت با آهک به صورت وسیعی در پژوهش های مهندسی عمران از قبیل پی سازی، بستر سازی راهها، خاکریزها و شمع ها 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 (۱۹۹۱) راجاسکاران و ناراسیمها (۱۹۹۱) 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. بنابراین، در حالی که استفاده از آهک خواص مقاومتی خاک را بهبود می‌بخشد، بر خصوصیات شکل پذیری اثر نامطلوبی می‌گذارد. در سالهای اخیر، افزودن الیاف و مخلوط نمودن آن با

¹ Taylor, G.S., and Luthin, J.N.

² Penner, E.

³ Williams, P.J. 1966, Taylor, G.S., and Luthin, J.N.

⁴ Daniel, D.E. and Trautwein, S.J.

⁵ Othman, M.A. and Benson, C.H.

خاک، رفتار مقاومتی خاک را بهبود بخشیده است. لی و همکاران (۱۹۹۵) و پراباکار و اسریدههار (۲۰۰۲) نشان دادند که افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی، سختی و پلاستیسیته یک خاک چسبنده پس از تقویت با الیاف گسسته پلی پروپیلن ایجاد می شود.

همچنین کومار و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که با اضافه نمودن الیاف به رس بسیار قابل تراکم، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری محدود نشده بدست می آید. نتایج مطالعات قضاوی و روستایی (۲۰۰۹) نشان داد که افزایش الیاف مقاومت خاک رسی را در برابر دوره‌های انجماد ذوب شدن افزایش می دهد و افزودن ۳٪ الیاف منجر به افزایش مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس به میزان ۱۶۰٪ قبل و ۶۰٪ پس از اعمال دوره ه ای انجماد ذوب شدن و سبب کاهش ۷۲٪ ی تورم ناشی از یخبندان خواهد شد. کوشو و همکاران (۱۹۹۳) با انجام آزمایش های سه محوری سیکلی و برش پیچشی بر روی خاک‌های رسی و ماسه‌های برای نخستین بار متوجه اثر خمیری بر شکل منحنی نسبت مدول گردیدند. بدین معنا که آهنگ تغییرات کاهش مدول خاک‌های با خمیری زیاد نسبت به خاک‌های با خمیری کم بسیار ملایم است (قضایی و روستایی، ۲۰۰۹). 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 دوره ه ای یخبندان و ذوب بر انواع روشهای بهسازی خاک انجام شود. در این پژوهش سعی بر آن است که ضمن بررسی اثر توأم تثبیت خاکهای ریزدانه با آهک و تسلیح آن با الیاف شیشه با هدف کاهش اثرات منفی تثبیت خاک رس با آهک و اثر درصدهای مختلف آهک و الیاف بر خصوصیات مقاومتی و شکل پذیری خاک رس، اثر این نوع بهسازی در مناطق سردسیر ارزیابی شود.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- مشخصات خاک مورد مطالعه

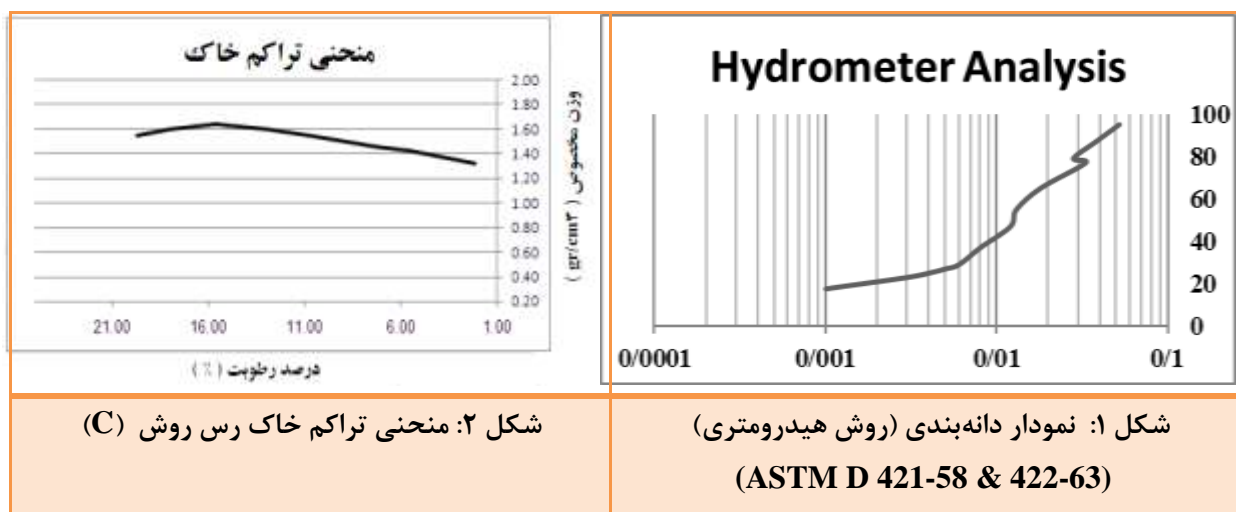
در این تحقیق از عمق ۰-۲۰ سانتی متری خاک رس از منطقه همدان استفاده شد. بعد از تهیه خاک مورد نظر خاک از الک 2 میلیمتری عبور داده شد و سپس به صورت یک لایه نازک در سطحی که با پلاستیک پوشیده شده بود پهن شد. دانه بندی کلی خاک توسط الک های استاندارد مصالح ریزدانه و به مقدار ۱۰۰۰ گرم و دانه بندی هیدرومتری انجام شد و در نتیجه آن مشخص شد که به مقدار بیش از ۹۵٪ آن ها از الک نمره ۲۰۰ عبور کردند که لازم بود تا برای تعیین نوع خاک از نمودار PI-LL استفاده شود و نوع خاک CL (رس با پلاستیسیته کم) بدست آمد. مشخصات عمومی خاک که در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت در جدول ۱ و نمودار ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۱: مشخصات عمومی خاک مورد مطالعه

ویژگیها	مقدار
ضریب پواسون	۰/۳
مدول الاستیسیته (Kg/cm ²)	۱۵۰
φ	۱۶/۷۴

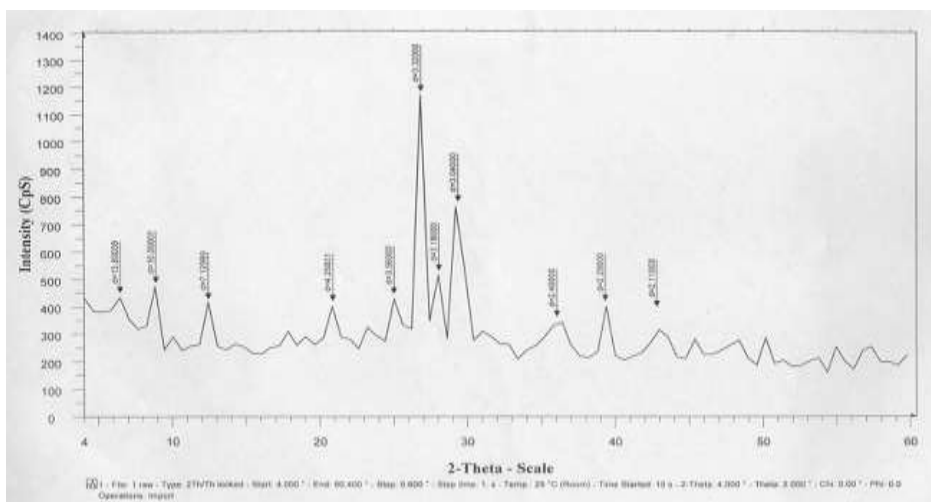
⁶ Ghazavi, M., and Roustaie

۰/۱۷۳	C
۲/۶۵	Gs(ASTM D 854-87)
۱/۶۴	حداکثر وزن مخصوص خشک (g/cm ²)
۱۵/۶۳	درصد رطوبت بهینه(%)
۲۹	حد روانی(%)
۱۹	حد خمیری(%)



آزمایش (X-Ray) - XRD) آنالیز اشعه ایکس نمونه خاک رس

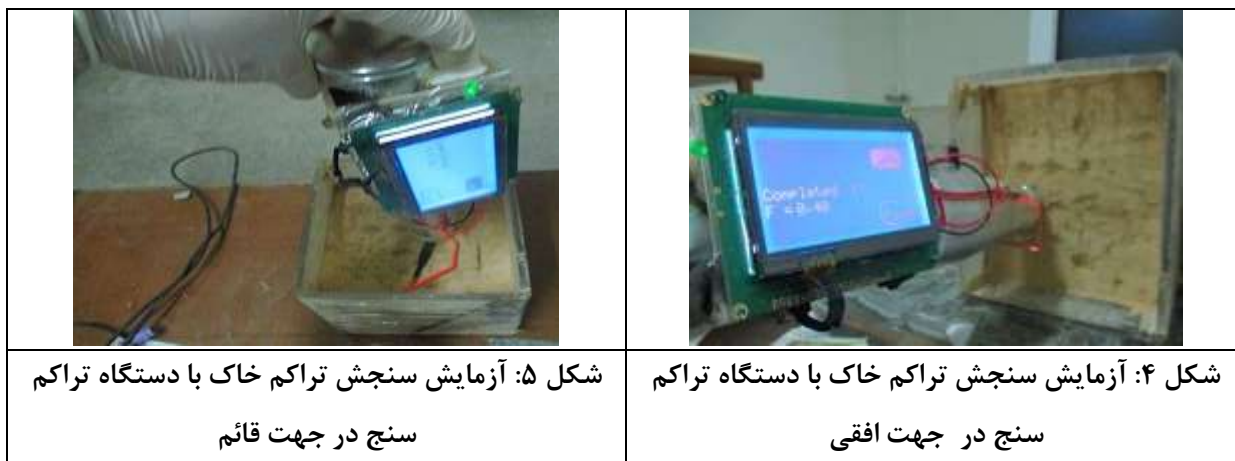
آزمایش تهیه طیف اشعه ایکس نمونه خاک، در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا و با استفاده از دستگاه اشعه ایکس مدل Siemens-Diffractometer D8 Advance انجام شده است. بر اساس آنالیز طیف اشعه ایکس بدست آمده، کانیهای موجود در نمونه خاک به ترتیب از کانی با حداکثر مقدار تا کانی با حداقل مقدار به شرح نمودار ۳ می باشد.

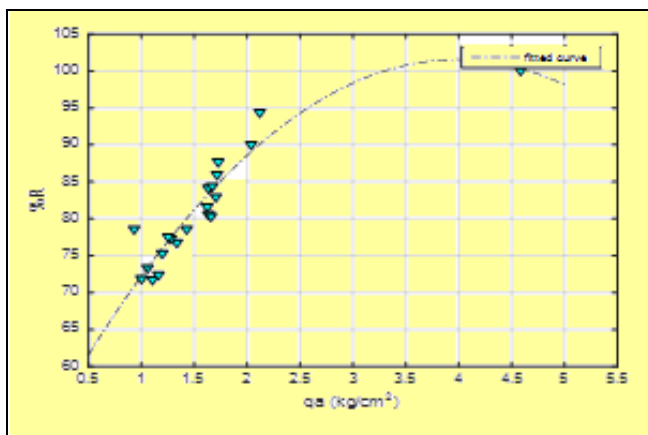


شکل ۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از خاک مورد مطالعه

- آزمون تراکم

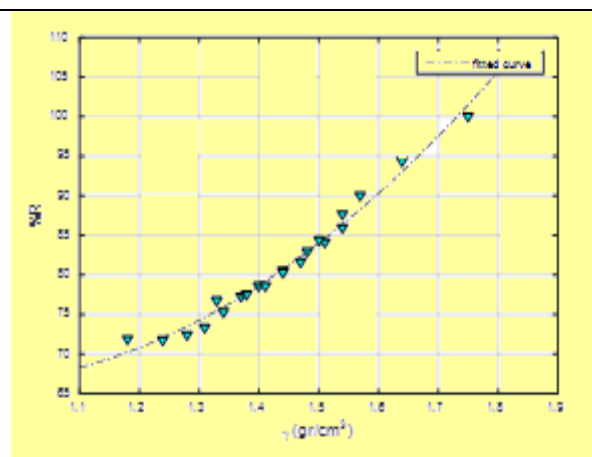
در این پژوهش پارامترهای رفتاری موثر در خاک رس مورد آزمایش (پارامترهای اصلی ۱۰ گانه) طی ترسیم نمودارهای کاربردی، روند معمولاً افزایشی مقادیر عددی و بر اساس وزن مخصوص و تراکم توسط دستگاه تراکم سنج معادلسازی شده و از طریق دستگاه های برش مستقیم و تراکم خاک کالیبره گردیده اند. پس از انجام آزمایش تراکم و تعیین وزن مخصوص حداکثر، انواع مدل های پارامتری نمونه های خاک در محدوده رطوبت طبیعی آن (بیش از ۰ تا حداکثر ۱۵٪) در جعبه نمونه گیری به ابعاد $10 \times 15 \times 15$ سانتی متر ساخته شده و نسبت به وزن مخصوص حداکثر بدست آمده از وزن مخصوص حداقل $1/18$ گرم بر سانتی متر مکعب (وزن مخصوص خاک در سست ترین حالت در اثر ثقل خود) در قالب ۲۱ نمونه مختلف مدل های آزمایشگاهی قالب گیری شده و تحت آزمایش تراکم در جهات افقی و قائم قرار می گیرند و اعداد قرائت شده پس از ثبت همزمان نمونه خاک مورد نظر با شرایط آزمایش تراکم (شکل ۵ و ۴) تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته شد. شکل ۶ و ۷ رابطه وزن مخصوص و ظرفیت باربری خاک با درصد تراکم و شکل ۸ نمودار رابطه سختی سطح خاک با انرژی ذخیره شده در خاک در پروسه آزمایش برش مستقیم را نشان می دهد.





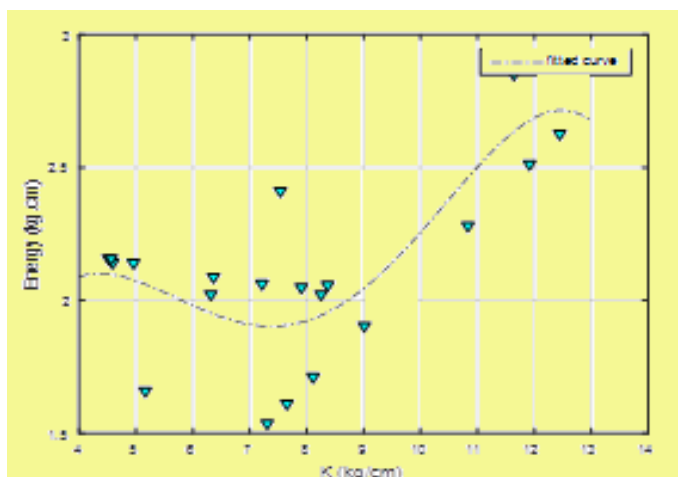
شکل ۷: نمودار نمایش رابطه درصد تراکم با ظرفیت باربری

خاک



شکل ۶: نمودار نمایش رابطه وزن مخصوص با درصد

تراکم خاک



شکل ۸: نمودار نمایش رابطه سختی سطح خاک با انرژی ذخیره شده در خاک در پروسه آزمایش برش مستقیم

۲-۱-۲- آهک

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

جدول ۲: مشخصات آهک مورد استفاده در این پژوهش

مواد دیگر	CAO	CACO3	Ca(OH2)	ترکیب شیمیایی
1/53	1/44	2/90	94/13	مقدار %

۲-۱-۳- الیاف شیشه

الیاف شیشه ای از شرکت میسون خریداری شده است. مشخصات الیاف شیشه مطابق با کاتالوگ شرکت در جدول شماره ۳ آمده است.

جدول ۳: مشخصات الیاف شیشه

مشخصات	مقدار	واحد
قطر الیاف	۱۷-۱۹	micron
طول الیاف	3-50	mm
مدول الاستیسیته	۳۵	GpA
مدول کشسانی	۱/۵	GpA
Loss Of Ignition	<۰/۵	%
درصد رطوبت	<۰/۳	%



شکل ۹: الیاف شیشه مورد استفاده در تحقیق

۲-۲- روش انجام پژوهش

در این پژوهش ابتدا خاک منطقه مورد مطالعه مورد بررسی‌های ابتدائی جهت شناسایی خصوصیات عمومی قرار گرفت و با استفاده از دستگاه تراکم‌سنج، خاک‌هایی که دارای درصد تراکم و خصوصیات مقاومتی پایینی بودن برای بهسازی و انجام آزمایش انتخاب شدند. در مرحله بعد برای بررسی اثر مقادیر آهک و الیاف بر مشخصات مکانیکی خاک رسی، ۱۲ نمونه با درصدهای مختلف سیمان (۰، ۲، ۴٪) و الیاف شیشه با درصدهای (۰، ۱، ۴، ۷ و ۱۰ و ۱۲٪) تهیه گردید. به منظور تعیین اثر چرخه‌های انجماد و ذوب، نمونه‌های مورد نظر طی دوره‌های ۰، ۱، ۴، ۷ و ۱۰ و ۱۲ ذوب و یخبندان قرار گرفتند. برای دقت بیشتر و انجام مطالعات آماری، هر نمونه با ۴ بار تکرار تهیه گردید. به منظور اطمینان از گیرش کامل مخلوط خاک - آهک- الیاف شیشه کلیه نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در کیسه نایلون در دمای مناسب عمل آوری شدند. برای مرحله ذوب و

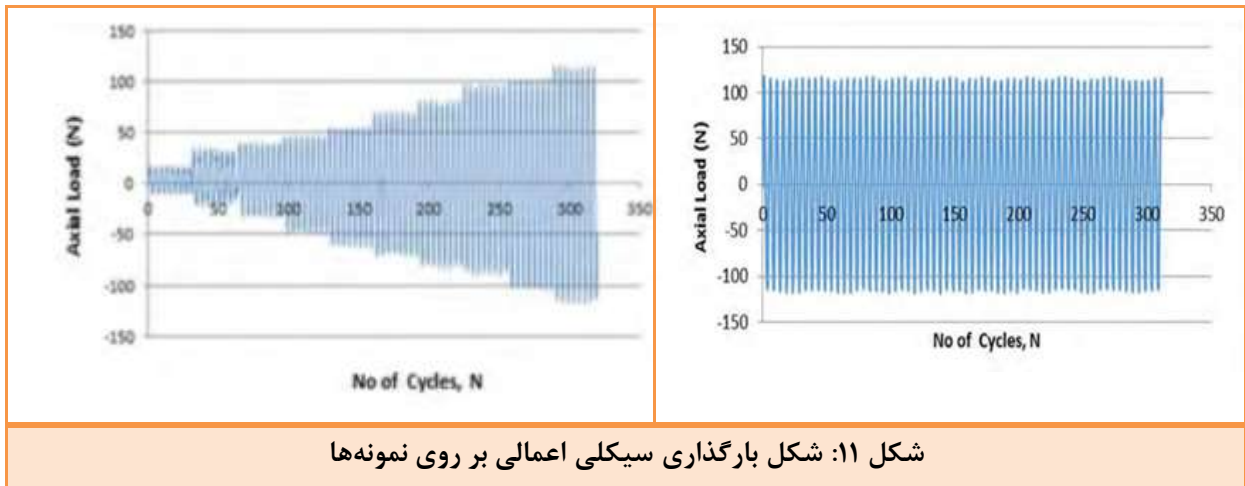
یخبندان، طبق تحقیقات کی و همکاران (۲۰۰۴) نمونه‌ها پس از ۲۸ روز در یک یخچال در دمای ۲۲ درجه سلسیوس برای ۶ ساعت قرار داده شدند و آنگاه برای آب شدن در دمای ۲۵ + درجه سلسیوس برای ۶ ساعت قرار داده شدند. سپس هر کدام از این نمونه‌ها مراحل آماده سازی، عمل آوری و سپس دوره‌های یخبندان ذوب انجماد را تحمل نمودند، آماده انجام آزمایش فشاری محصور نشده و سه محوره دینامیکی شدند.

برای شناسایی هر کدام از نمونه‌ها از یک کد معین به صورت $S(\%pp, \%L, C, R)$ استفاده شد که در آن R و C ، L ، pp به ترتیب درصد الیاف شیشه، درصد آهک، شمار دوره‌های تحمل شده یخبندان ذوب انجماد و شمار تکرار است. برای ساخت نمونه، مصالح در ۵ لایه (طول نمونه ۷۲ mm و به قطر ۳۳ mm) و هر لایه با ۱۶ ضربه با استفاده از چکش مخصوص قالب تراکم هاروارد با حداکثر وزن مخصوص خشک بدست آمده از آزمایش تراکم هاروارد، متراکم گردید. برای ساخت نمونه‌های حاوی ترکیب آهک و خاک ابتدا به صورت خشک کاملاً "با خاک مخلوط و سپس آب به تدریج اضافه شد تا میزان رطوبت ترکیب نهایی به رطوبت بهینه برسد و برای ساخت نمونه‌های حاوی سیمان و پلیمر و خاک ابتدا سیمان به صورت کاملاً 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 پاور 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 مجدداً مقداری از آب اضافه شد و باز مقداری الیاف شیشه 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.

به منظور مطالعه رفتار دینامیکی نمونه‌های مورد آزمایش از دستگاه سه محوری سیکلی استفاده شده است. این آزمایش‌ها طبق استاندارد ASTM D ۳۹۹۹ روی نمونه‌هایی حاوی صفر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد الیاف شیشه و مقدار ۰، ۲، ۴ و ۸ درصد آهک و در فشارهای همه جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال برای بارگذاری تک مرحله‌ای و تعداد ۱۰ آزمایش چندمرحله‌ای روی نمونه‌های فوق در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال برای بارگذاری چندمرحله‌ای انجام گرفته شد. تمامی آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های اشباع شده با عبور گاز دی اکسید کربن و اعمال پس فشار لازم برای رسیدن به درجه اشباع بالای ۱۵ درصد انجام گرفته است. نمونه‌های آزمایش بعد از طی مراحل اشباع و اعمال تنشهای تحکیمی اولیه مورد نظر تحت بارگذاری دینامیکی (سینوسی متقارن) کنترل تنش با فرکانس ۰/۲ هرتز و به دو صورت تک مرحله‌ای با تعداد سیکل مشخص و چندمرحله‌ای قرار گردیدند. در روش اول به صورت تنش بار سینوسی متقارن با نسبت تنش $B=0/3$ اعمال و تا ۳۰۰ سیکل ادامه پیدا یافت. در روش دوم، تنش در هر مرحله آزمایش به صورت بار سینوسی متقارن به صورت ثابت اعمال گردید و در مراحل بعدی دامنه تنش (مقادیر بارگذاری) به تدریج افزایش یافت. شکل‌های بارگذاری در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این تحقیق مقادیر مذکور در سیکل دهم به‌عنوان معیار انتخاب مدول برشی و نسبت میرایی قرار گرفته است. به علاوه در جهت بررسی تأثیر تعداد سیکل -های بارگذاری، مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی طی سیکلهای مختلف نیز تعیین گردیده است. به طور کلی در تحقیقات انجام گرفته توسط سایر محققین نشان داده شده است که افزایش تنش همه جانبه باعث افزایش مقاومت برشی در خاک می‌گردد.



شکل ۱۰: دستگاه سه محوره سیکلی مورد استفاده در آزمایش

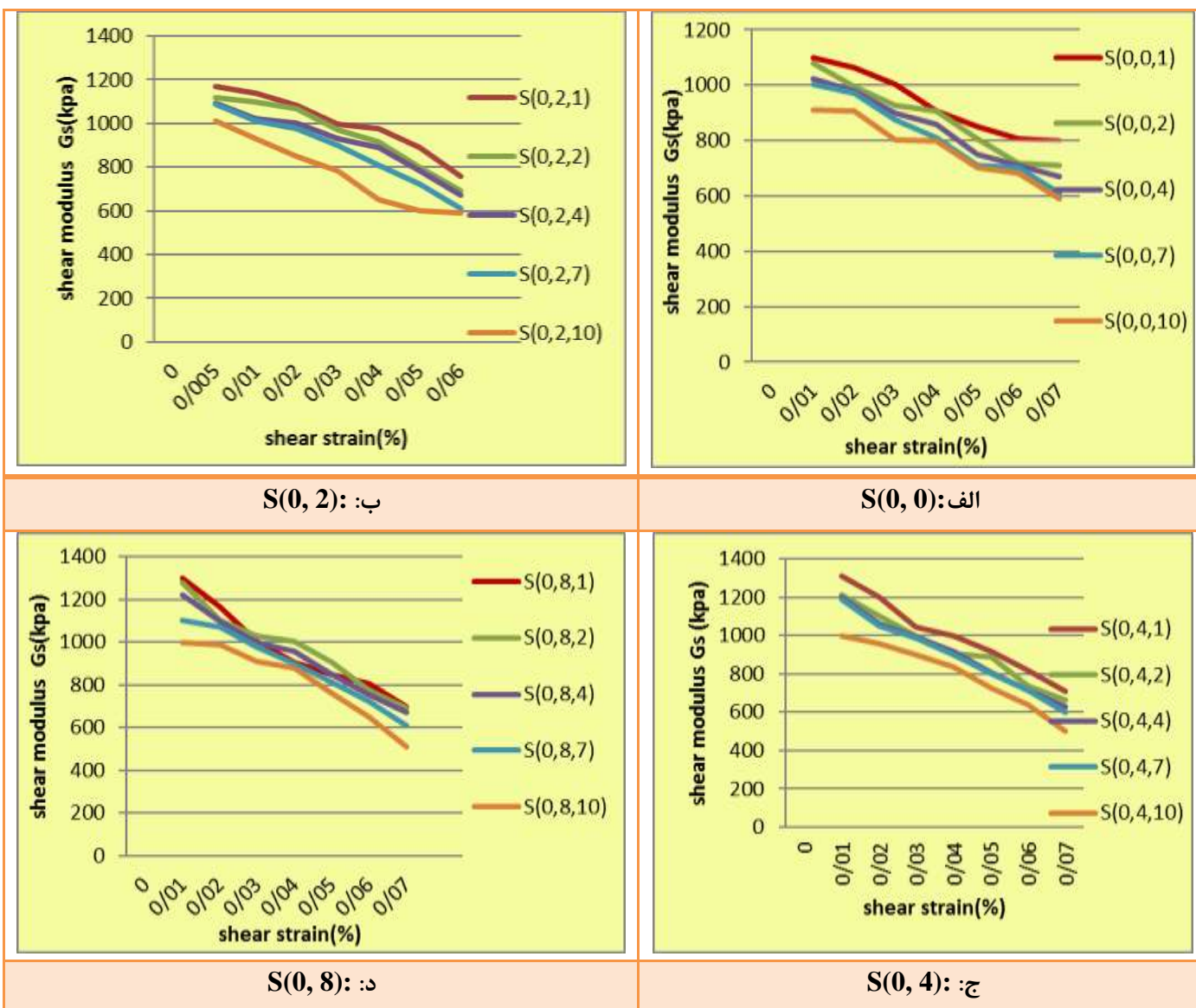


شکل ۱۱: شکل بارگذاری سیکلی اعمالی بر روی نمونه‌ها

۳-نتایج

۳-۱- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر مدول برشی خاک حاوی آهک

شکل ۹ تأثیر آهک را بر روی مقادیر مدول برشی نمونه‌ها با درصد های ۰، ۲، ۴، ۸ و ۱۰۰ کیلوپاسکال در بارگذاری چندمرحله‌ای طی چرخه‌های ذوب و یخبندان را نشان می‌دهند.

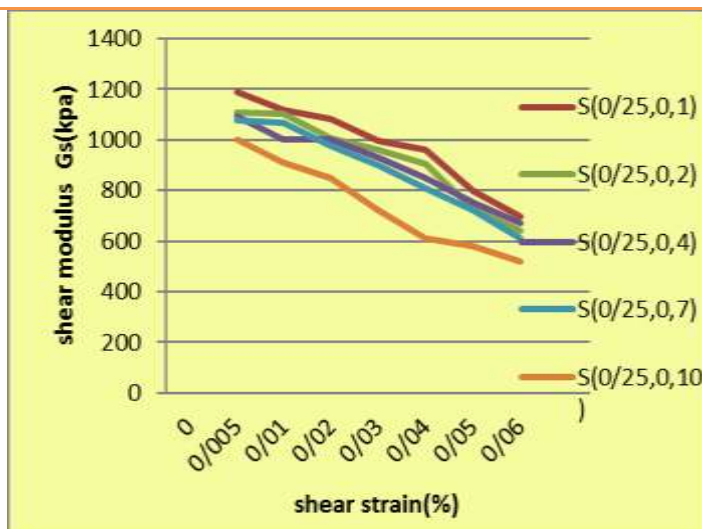


شکل ۱۲: نمودار اثر درصد وزنی (الف=۰٪، ب=۲٪، ج=۴٪، د=۸٪) آهک بر روی مدول برشی دینامیکی خاک

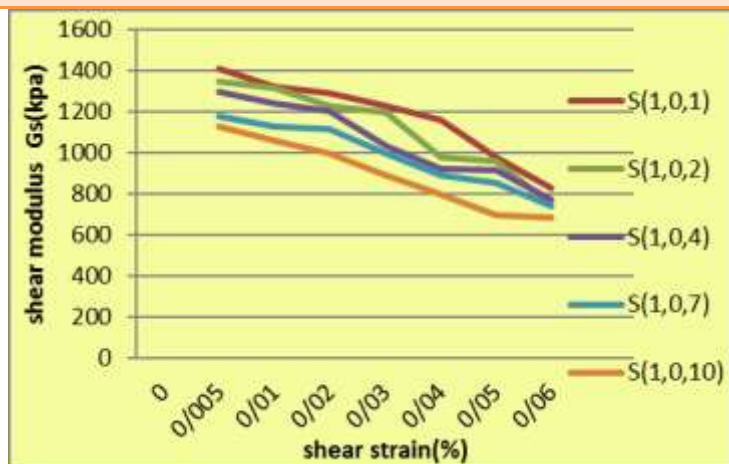
همانطور که در این شکلها مشاهده می شود، در تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال نمونه‌های تثبیت شده با آهک در مقایسه با نمونه بدون آهک مدول برشی بالاتری طی دوره‌های ذوب و یخبندان را نشان میدهند همانطوری که مشاهده می گردد دوره‌های ذوب و یخبندان باعث کاهش مدول برشی خاک در نمونه‌های بدون آهک گردیده و با افزایش میزان درصد آهک مقدار مدول برشی افزایش می یابد و بیشترین مدول برشی را نمونه‌های حاوی ۴ و ۸ درصد دنشان می دهد ولی به دلیل مباحث اقتصادی برای تثبیت خام رس، استفاده از آهک ۴ درصد توصیه می شود.

۳-۲- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر مدول برشی خاک حاوی آهک

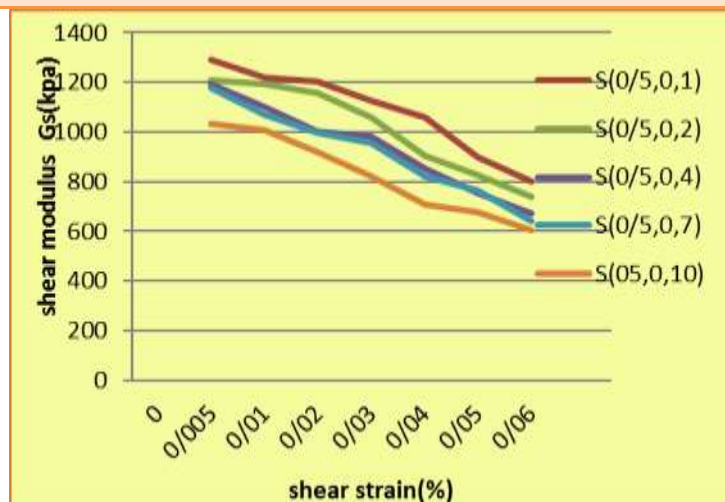
در شکلهای ۹ تأثیر الیاف شیشه بر روی مدول برشی تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال در بارگذاری چندمرحله‌ای نشان داده شده است.



الف: $S(0.25, 0)$



ج: $S(1, 0)$



ب: $S(0.5, 0)$

شکل ۱۳: نمودار اثر درصد وزنی (الف = ۰.۲۵٪، ب = ۲٪، ج = ۵.۰٪، د = ۱۰٪) الیاف شیشه بر روی مدول برشی

دینامیکی خاک

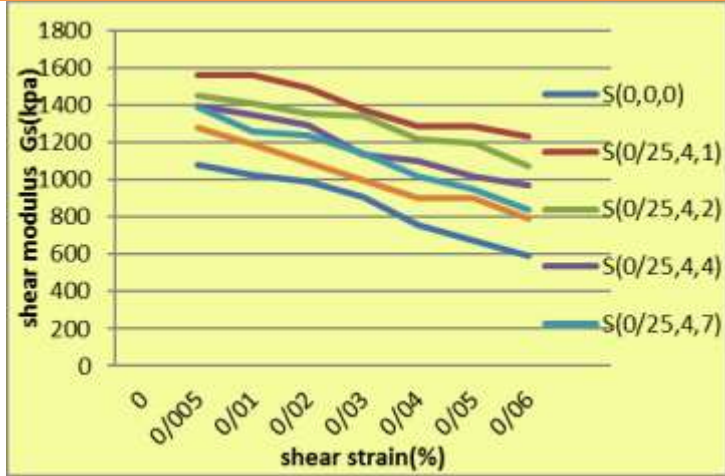
همانطور که مشاهده میشود با افزایش میزان درصد الیاف از صفر به ۱ درصد، افزایش در مدول برشی رخ میدهد که این مسئله میتواند به دلیل جایگزینی الیاف شیشه با خاک در این نمونه‌ها و افزایش تراکم باشد.

در نمونه‌های با درصد وزنی ۰/۲۵ درصد با افزایش تعداد سیکلهای ذوب و یخبندان کاهش مدول برشی اتفاق می افتد، البته این مقدار زیاد قابل توجه نیست. نتایج حاصل برای نمونه‌های ۰/۵ و ۱ درصد به هم نزدیک است و اینگونه بنظر میرسد که در درصد وزنی ۰/۲۵، الیاف شیشه نقش زیادی ایفا نمی کند. به خصوص در تنشهای همه جانبه بالا که اثر دانسیته نسبی کم میشود و اثر مقدار الیاف شیشه بیشتر می شود. به طور کلی می توان نتیجه گرفت که افزایش سیکلهای ذوب و یخبندان

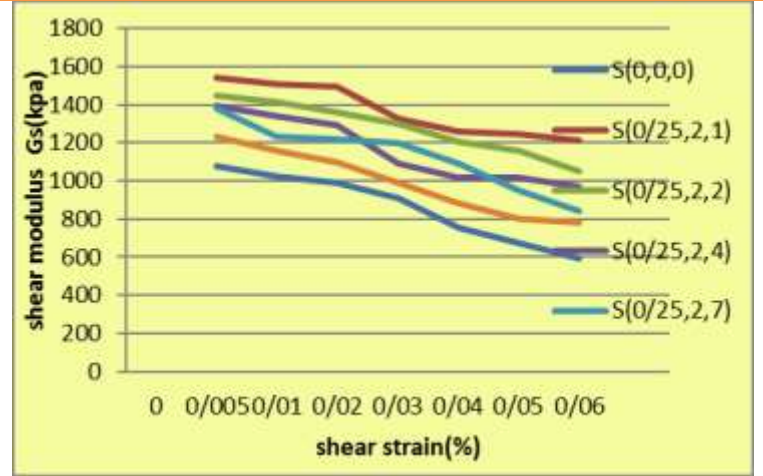
باعث کاهش دانسیته نسبی نمونه‌ها می‌شود و با افزایش الیاف شیشه این میزان نسبت به حالت بدون الیاف شیشه کمتر می‌شود.

۳-۳- نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و تسلیح شده با الیاف شیشه

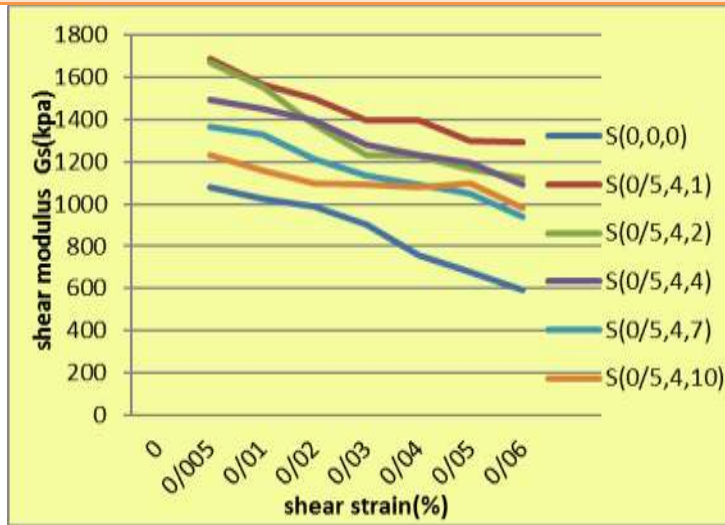
در شکل‌های ۹ تأثیر توم آهک و الیاف شیشه بر روی مدول برشی تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال در بارگذاری چندمرحله‌ای طی چرخه‌های ذوب و یخبندان نشان داده شده است.



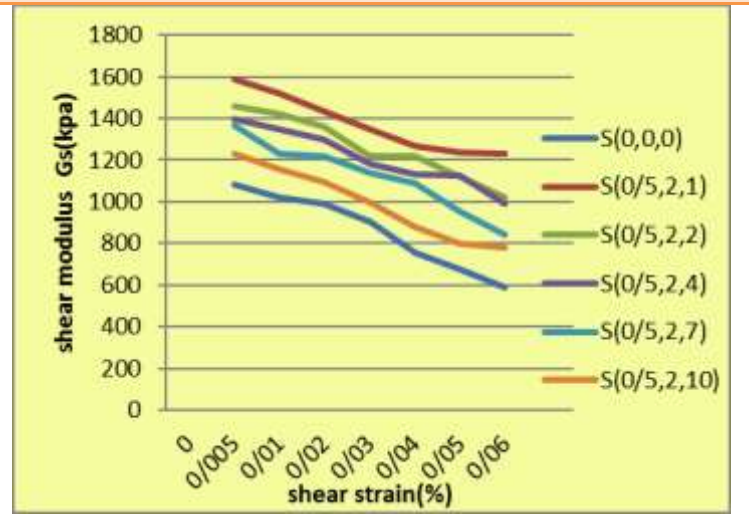
ب: $s(0/25,4)$



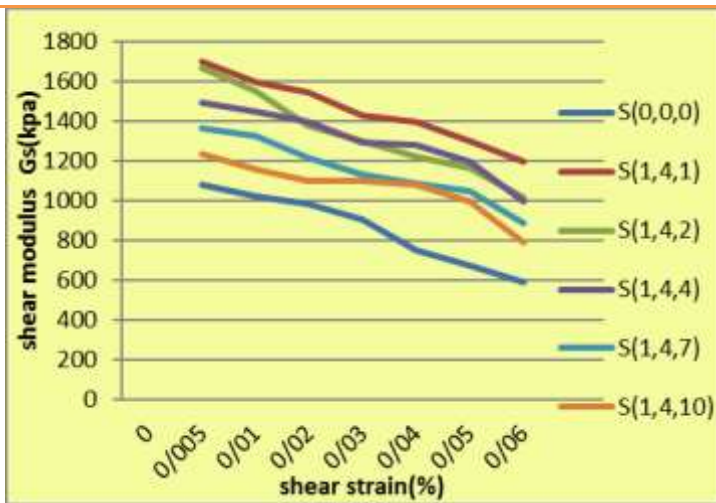
الف: $s(0/25,2)$



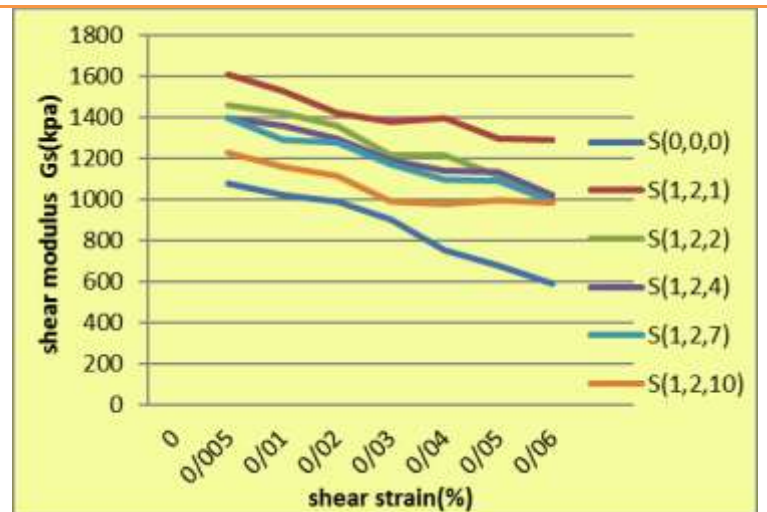
د: $s(0/5,4)$



ج: $s(0/5,2)$



خ: s(1,4)



ح: s(1,2)

شکل ۱۳: نمودار اثر درصد وزنی (الف=0.25٪، ب=۲٪ و ج=0.5٪، د=1٪) الیاف شیشه بر روی مدول برشی

دینامیکی خاک

با توجه به شکل (۱۳) در نمونه‌های حاوی آهک و الیاف می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که با یک درصد ثابت از آهک، با افزایش درصد الیاف، مدول برشی نمونه با رفتاری کاهش می‌یابد. علت این رفتار را می‌توان ناشی از مقاومت بالای الیاف در سطح شکست دانست. همچنین با یک درصد الیاف ثابت، با افزایش درصد آهک مقاومت برشی زودتر کاهش می‌یابد. بنابراین باید درصد معینی از آهک در پیوند با الیاف وجود داشته باشد، که در آن مقاومت برشی زودتر کاهش می‌یابد. به عبارتی در آن حالت باید نمونه پایداری ویژه‌ای داشته باشد به گونه‌ای 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 شیشه باشد.

با توجه به شکل ۲۲ در نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ آهک و الیاف به تدریج مدول برشی با افزایش تعداد دوره‌های یخبندان و ذوب کاهش می‌یابد و پس از دوره ۷ ام تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. در خصوص تیمار ه ای تثبیت شده با ۱٪ آهک و تسلیح شده با پلیمر ملاحظه می‌گردد که مدول برشی نمونه‌ها با افزایش الیاف تا ۰/۵٪، با افزایش شمار دوره‌های یخبندان و ذوب انجماد افت نمی‌نماید. اما با افزایش الیاف تا ۱٪ روال افت مدول برشی 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 برشی ۲ برابر نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ سیمان هستند که به نظر می‌رسد این موضوع ناشی از افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با درصد بیشتر سیمان می‌باشد. بنابراین در کل می‌توان نتیجه گرفت که نمونه دارای S(0/5,4) پایدارترین ترکیب حاصله است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایش سه محوره سیکلی طی چرخه‌های ذوب و یخبندان و بررسی‌های به عمل آمده برای نمونه‌های مختلف که با مخلوط هم زمان هک و الیاف شیشه با خاک رس تهیه و عمل آوری شدند، نتیجه گیری‌های زیر قابل ارائه می‌باشند:

- نتایج حاصل از آزمایش تراکم که با دستگاه تراکم‌سنج سنجیده شد برای مخلوط‌های مختلف خاک رس و آهک و الیاف شیشه نشان داد که افزودن الیاف شیشه تا ۱٪ و آهک تا ۴٪ به خاک رس سبب افزایش ۴٫۵٪ رطوبت بهینه می‌گردد.
- در مناطق دارای دوره‌های ذوب و یخبندان برای حفظ مقاومت، تنها تثبیت خاک‌های-ریزدانه رسی با آهک زیاد جوابگو نیست و در اثر اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان حتی با افزودن ۸٪ آهک در سیکل ۱۷م ۱۷٪ از مقاومت کاهش می‌یابد و در هر حال ترکیبی کاملاً مقاوم در برابر کلیه سیکل‌های ذوب و یخبندان از تثبیت خاک رس با آهک حاصل نمی‌شود.
- در خاک‌های ریزدانه رسی تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با الیاف شیشه با یک درصد ثابت از آهک، با افزایش درصد الیاف شیشه مدول برشی افزایش می‌یابد.
- در خاک رسی با الیاف شیشه با توجه به این که الیاف تنها مقاومت کششی را افزایش می‌دهد، با افزایش بیش از حد میزان الیاف شیشه در مخلوط به تدریج الیاف شیشه جای خاک و آهک را در مخلوط اشغال می‌کند و این مساله باعث افت مقاومت برشی می‌گردد.
- درصد معینی از آهک در پیوند با الیاف شیشه وجود دارد که در آن مدول برشی خاک افزایش می‌یابد. به عبارتی در آن حالت نمونه پایداری ویژه ای دارد که افزایش شمار سیکل‌های یخبندان و ذوب نیز موجب تغییر رفتار گسیختگی و کاهش مدول برشی نمونه به صورت حالت بدون افزودنی نمی‌شود.
- بنابراین در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های حاوی فقط الیاف شیشه نمونه‌های حاوی یک درصد الیاف بیشترین مقدار مدول برشی را نشان می‌دهند و این مقدار را می‌توان به‌عنوان مقداری بهینه برای درصد الیاف در نظر گرفت. و در مورد نمونه‌های خاک رسی حاوی آهک و الیاف شیشه، ۴٪ آهک و ۰٫۵٪ الیاف ترکیبی نسبتاً مقاوم در مقابل سیکل‌های یخبندان و ذوب را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد.

منابع

1. Daniel, D.E. and Trautwein, S.J. (1994). "Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil," pp. 227-254 and 461-481.
2. Ghazavi, M., and Roustaei, 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.
3. Kumar, A., Walia, B., Mohan, J "Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay", Construction And building Materials 20, 1063-1068, 2006.
4. 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.

5. Othman, M.A. and Benson, C.H. (1993). "Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity of three compacted clays from Wisconsin," Transportation Research Record, No. 1369, pp. 118-125.
6. 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.
7. Penner, E. (1957). "Soil moisture tension and ice segregation," Highway Research Board, Bulletin Vol. 168, pp. 50- 64.
8. Taylor, G.S., and Luthin, J.N. (1978). "A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, pp. 548 - 555.
9. Williams, P.J. (1966). "Pore pressure at a penetrating frost line and their prediction," Geotechnique, Vol. 16, pp. 187- 208.