

ارزیابی اثر الیاف بازیافتی بر مقاومت ماسه تثبیت شده با سیمان در برابر چرخه های یخ زدن - آب شدن

آزاده دادفرین (کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

یزدان شمس ملکی* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه

مهدی انی‌عشری (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۳)
دوری ۴۰، شماره ۱، صص. ۵۳-۶۳، (پژوهشی)

این تحقیق به بررسی اثر هم‌زمان تثبیت خاک ماسه‌ای با سیمان و تسلیح آن با الیاف بر مقاومت خاک در برابر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن می‌پردازد. مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی ترکیبات مختلف حاصل از اختلاط سیمان، الیاف و خاک ماسه‌ای انجام شده است. الیاف مورد استفاده از ضایعات محصولات کارخانه نخ تابر است. درصد‌های ۲، ۴ و ۶ برای سیمان و ۵/۰ و ۱۰/۰ برای الیاف به طول‌های ۵/۱ و ۵/۱ سانتی‌متر استفاده شده است. نمونه‌های استوانه‌ای با زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه و اعمال ۱، ۲ و ۳ چرخه یخ زدن - آب شدن مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تثبیت خاک با سیمان و تسلیح آن با الیاف، به طور هم‌زمان، موجب بهبود مقاومت خاک قبل و بعد از اعمال چرخه‌های یخ زدن و آب شدن می‌شود.

واژگان کلیدی: تثبیت با سیمان، تسلیح با الیاف، چرخه یخ زدن و آب شدن، خاک ماسه‌ای، مقاومت فشاری محدود نشده.

۱. مقدمه

مناطق مورد استفاده در مهندسی عمران در طول زمان تحت تأثیر تغییرات محیطی مختلف، به‌خصوص دگرگونی‌های دمایی قرار می‌گیرند. این تغییرات منجر به چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن می‌شود که در مناطق سردسیر، تورم و کاهش مقاومت خاک را به دنبال دارد. یخ‌زدگی و آب شدن، پدیده‌ای است که خواص مکانیکی و فیزیکی خاک را به شدت تغییر می‌دهد. با توجه به پراکندگی جغرافیایی ایران، مناطق زیادی وجود دارد که خاک‌ها و سنگ‌ها در معرض یخ‌زدگی و آب شدن‌های متوالی قرار می‌گیرند. توجه به خسارات ناشی از این پدیده و استفاده از راهکارهای پیشگیری مناسب در این مناطق ضروری است. بهسازی خاک توسط مواد تثبیت‌کننده و با مصالح مسلح‌کننده، از روش‌های اصلی مقابله با اثرات یخ‌زدگی - آب‌شدگی است. تحقیقات نشان می‌دهد که بررسی‌های صورت گرفته بر تثبیت‌کننده‌هایی مانند

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۱۱، اصلاحیه ۱۴۰۲/۲/۹، پذیرش ۱۴۰۲/۲/۳۰.

استناد به این مقاله:

دادفرین، آزاده، شمس‌ملکی، یزدان، و انی‌عشری، مهدی، ۱۴۰۳. ارزیابی اثر الیاف بازیافتی بر مقاومت ماسه تثبیت شده با سیمان در برابر چرخه‌های یخ زدن - آب شدن. مهندسی عمران شریف، ۴۰ (۱)، صص. ۵۳-۶۳. DOI:10.24200/J30.2023.61722.3192

azadehdadfarin@gmail.com
y.shamsmaleki@kut.ac.ir
esna-ashari@basu.ac.ir

سیمان و مسلح‌کننده‌هایی مانند الیاف به‌صورت مجزا بیشتر از اثر توأمان آن‌ها است. نتایج برخی تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از الیاف مجزا تا حد زیادی طاقت نمونه را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود رفتار مقاومتی سیمان می‌شود.^[۱] لیو و همکاران گزارش کردند که پس از تسلیح خاک با الیاف پلی‌پروپیلنی مجزا، افزایش قابل‌توجهی در مقاومت برشی، طاقت و شکل‌پذیری خاک‌های چسبیده به‌وجود می‌آید.^[۲] تحقیقات گسترده‌ای در مورد شناخت و ارزیابی رفتار مکانیکی خاک مسلح به الیاف و همچنین استفاده از آن انجام شده است که می‌توان به تحقیقات لی و آدامزگری و اوآهشی فریتگ اشاره کرد.^[۳-۵] نتایج نشان‌دهنده اثر بهبود مقاومت فشاری، مقاومت برشی، CBR و افزایش شکل‌پذیری خاک است. امروزه مطالعات زیادی توسط محققان مختلف پیرامون تأثیر انواع مختلف الیاف و کاربرد آن در مسلح‌سازی انواع خاک‌ها صورت گرفته است. بیشتر این تحقیقات بر روی خاک‌های ماسه‌ای بوده و الیاف مورد استفاده نیز بیشتر از نوع مصنوعی

است. برخی از این مطالعات عبارتند از بررسی رفتار خاک ماسه‌ای مسلح به الیاف پلی آمیدی توسط میچالوسکی و سیرماک^[۶]، بررسی مقاومت برشی ماسه مسلح به الیاف پلی پروپیلنی با کمک آزمایش برش مستقیم توسط یتیم اوکلو و سالیاس^[۷]، بررسی ظرفیت باربری یک خاک ریز ماسه‌ای مسلح به الیاف پلیمری مجزا با توزیع تصادفی که بر روی یک لایه رس نرم قرار گرفته است، با استفاده از آزمایش CBR توسط یتیم اوکلو و همکاران^[۸]، بررسی رفتار ماسه ریز مسلح به الیاف پلی پروپیلنی توسط ایبرایم و فورمنت^[۹] و مطالعه تجربی رفتار خاک تورم پذیر هنگامی که به الیاف پلیمری مسلح شده است توسط ویسوندهام و همکاران^[۱۰] از جمله این مطالعات ارزنده است.

دوپاس و پکر با مطالعه خواص استاتیکی و مکانیکی ماسه - سیمان به منظور بهسازی ماسه و اجتناب از خطر روانگرایی نشان دادند که با افزایش مقدار ماده سیمانی کننده بر چسبندگی خاک افزوده می شود و افزودن ۵ درصد سیمان پرتلند ۲۰۰ - ۳۰۰ کیلو پاسکال چسبندگی در خاک ماسه‌ای به وجود می آورد.^[۱۱] کلاف و همکاران اثر سیمانی شدن مصنوعی و طبیعی را در کالیفرنیا بررسی کردند. در این تحقیق مقاومت نهایی نمونه‌ها با سیمانی شدن افزایش یافت و با افزایش درجه سیمانی شدن، افزایش حجم در هنگام برش در محدوده کرنش‌های کوچک تری ظاهر شد.^[۱۲]

مشخصه‌های عمومی خاک‌های دانه‌ای مسلح شده با الیاف در پژوهش‌های مورل و گور^[۱۳] و هینک و همکاران^[۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که اضافه کردن الیاف موجب افزایش مقاومت و شکل پذیری مصالح می‌شود. پارک اثر چگونگی توزیع الیاف بر مقاومت ماسه تثبیت شده با سیمان را با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده بررسی کرد.^[۱۵] او الیاف پلی وینیل الکل (PVA) را به طور تصادفی در پنج لایه از پیش تعیین شده در قالب‌های استوانه‌ای اضافه کرد. نتایج نشان داد چنانچه مقدار الیاف یکسانی در کل نمونه توزیع شود، نمونه دارای پنج لایه الیاف نسبت به نمونه‌ی دارای یک لایه الیاف در وسط، مقاومتی ۱/۵ برابری از خود نشان می‌دهد. کنسولی و همکاران تأثیر الیاف پلی پروپیلنی کشسان بر مقاومت ماسه سیمانی شده به طور مصنوعی را با استفاده از یک مجموعه آزمایش‌های سه محوری استاندارد زهکشی شده بررسی کردند.^[۱۶] نتایج نشان داد که اضافه کردن سیمان و الیاف به صورت توأم، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی بیشینه ۴۴ الی ۵۱/۵ درجه را در ماسه ایجاد می‌کند. این افزایش تقریباً مشابه مقادیر به دست آمده برای ترکیب الیاف به تهایی است. علاوه بر آن، اضافه کردن الیاف در نمونه‌های سیمانی نشده، تغییری در سختی اولیه نشان نداد که رفتاری مشابه با رفتار مشاهده شده توسط هینک و همکاران^[۱۴] داشته است.

تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و نظری مختلفی در زمینه پدیده یخ زدگی در خاک از دیدگاه رفتار مکانیکی توسط محققین مختلف صورت گرفته است. تابر و بسکو در سال ۱۹۱۸ اولین محققینی بودند که پدیده تورم یخ زدن خاک را بررسی کردند و اساس مطالعات پدیده تورم ناشی از یخ زدن را به طور جامع پایه گذاری کردند.^[۱۷] پتر تحقیقاتی را در مورد تورم ناشی از یخ زدن در خاک انجام داد و به این نتیجه رسید که تنها وجود یخ زدن و آب شدن برای ایجاد تورم ناشی از یخ زدن - آب شدن کافی نیست. شرایطی همچون دسترسی کافی به آب، دمای زیر صفر و خاک حساس به یخ زدن که می تواند شرایط رشد عدسی‌های یخی را فراهم کند نیز مورد نیاز است.^[۱۸]

پارامسون تأثیر تنش متناوب بر مشخصه‌های خزشی خاک‌های رسی و ماسه‌ای یخ زده را بررسی کرد. بر اساس نتایج وی، تغییر متناوب تنش سبب بیشتری نسبت به تنش استاتیکی با شدت یکسان می‌شود.^[۱۹] سیمونسن و ایزاکسون به

بررسی ضعف ایجاد شده در اثر پدیده یخ زدن در ساختار روسازی‌های در مناطق سرد پرداختند.^[۲۰] کی و همکاران به بررسی تأثیر یخ زدن - آب شدن بر مشخصه‌های مهندسی خاک لای دار پرداختند و تغییرات در وزن مخصوص خشک و پارامترهای مقاومتی فشار پیش تحکیمی را مورد مطالعه قرار دادند.^[۲۱]

بر اساس نتایج حاصل شده از آزمایش‌های محققان، با اعمال چرخه‌های یخ زدن، چسبندگی کاهش می‌یابد و با کاهش دما، روند کاهش چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک ادامه پیدا می‌کند. آلتون و همکاران اثر فرایند یخ زدن - آب شدن را بر روی خاک لای دار طبیعی که با خاکستر بادی و سیمان تثبیت شده بود، با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری نامحسو (UCS)^۱ تحقیق کردند.^[۲۲] در پایان در این تحقیق گزارش شده است که با افزایش تعداد چرخه‌ها، انتشار ترک‌ها و شیارها بیشتر توسعه می‌یابد.

کریست و پارک در زمینه مشخصه‌های مقاومتی خاک یخ زده ماسه لای دار و قطعات لاستیک، آزمایش‌های مختلفی از قبیل تراکم، مقاومت فشاری محدود نشده، مقاومت کششی مستقیم و مقاومت برشی مستقیم انجام دادند.^[۲۳] بر اساس نتایج آن‌ها، وزن مخصوص خشک با افزایش قطعات لاستیک کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری و کششی با کاهش دما افزایش می‌یابد، اما با افزایش میزان لاستیک کاهش می‌یابد و با افزایش مقدار لاستیک، مقاومت کششی کاهش می‌یابد. لیو و پنگ مقاومت فشاری نامحصور خاک در حال آب شدن را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، مهم ترین عوامل مؤثر بر منحنی‌های تنش - کرنش و رفتار مقاومتی خاک در حال آب شدن، درصد رطوبت اولیه و دمای یخ زدن و آب شدن در بالای نمونه است.^[۲۴] اثرات افزودن الیاف به خاک‌ها توسط محققین مختلفی ارزیابی شده است که می‌توان به مطالعات لی و همکاران^[۲۵]، تائو و همکاران^[۲۶] و ژیاو و همکاران^[۲۷] اشاره کرد. مطابق مطالعات جامع صورت گرفته توسط نویسندگان پژوهش حاضر، با توجه به اینکه در زمینه اثرات پدیده یخ زدن و آب شدن بر رفتار خاک‌های تثبیت شده با سیمان و به صورت توأم مسلح به الیاف، بررسی‌های کمتری صورت گرفته است و بنابراین انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه ضرورت دارد. از سویی این تحقیق هدف مهم جنبی دیگری را علاوه بر موضوع اصلی پژوهش دنبال می‌کند، که کمک به حفظ محیط زیست و استفاده از مواد بازیافتی حاصل از حجم انبوه لاستیک‌های فرسوده است. استفاده از اجزای مختلف لاستیک فرسوده به عنوان یک آلاینده زیست محیطی تجزیه ناپذیر در دستورکار مطالعات قبلی قرار گرفته است. قطعات خرده لاستیک، سیم و الیاف داخل لاستیک فرسوده، هر کدام می‌تواند جهت پروژه‌های تقویت و بهسازی خاک مورد استفاده قرار گیرد که تمرکز عمده این مطالعه بر ماده ضایعاتی نخ تابر است.

۲. مواد و روش‌های آزمایش

۱.۲. مواد و مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از خاک ماسه‌ای، سیمان و الیاف پلیمری حاصل از ضایعات کارخانه نخ تابر. خاک مورد استفاده از نوع ماسه بد دانه بندی شده است. این خاک از معدنی در حومه شهر همدان تهیه شده است. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان هگمتانه همدان است.

۱.۱.۲. الیاف تسلیح کننده نمونه‌ها

در این پژوهش، از نوعی الیاف حاصل از ضایعات کارخانه نخ تابر صبا، به عنوان مسلح کننده ماسه استفاده شده است. از ویژگی‌های اصلی این الیاف می‌توان به

جدول ۱. مشخصات الیاف نخ تاثیر تابیده شده.

درصد جذب	کرنش مقاومت نهایی (%)	نیروی متناظر با مقاومت نهایی (N)	مدول الاستیسیته (N/mm^2)	وزن مخصوص (gr/cm^3)	قطر (mm)
۱۳/۹۷	۲۷/۹۹	۲۸۴	۱۰۴/۹۹	۰/۹۱	۰/۵۴

جدول ۲. مشخصات خاک ماسه‌ای مورد آزمایش.

نام‌گذاری	C_u	C_c	G_s	$\gamma_d (gr/cm^3)$	$\omega_{opt} (%)$
SP	۲/۵	۰/۹۴	۲/۶۶	۱/۷	۱۰

جدول ۲ مشخصات کلی خاک راکه منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۲ ارائه شده است، نشان می‌دهد. مطابق انجام آزمایش استاندارد تعیین چگالی ماسه توسط میز لرزنده ASTM D ۴۲۵۳-۰۶۱، چگالی کمینه خشک خاک $1/45 gr/cm^3$ (مقدار γ_{dmin}) و چگالی بیشینه خشک γ_{dmax} خاک $1/75 gr/cm^3$ اندازه‌گیری شده است که به علت وجود تفاوت در ماهیت این آزمون، اندکی با مقدار حاصل از آزمایش پروکتور استاندارد اختلاف دارد.

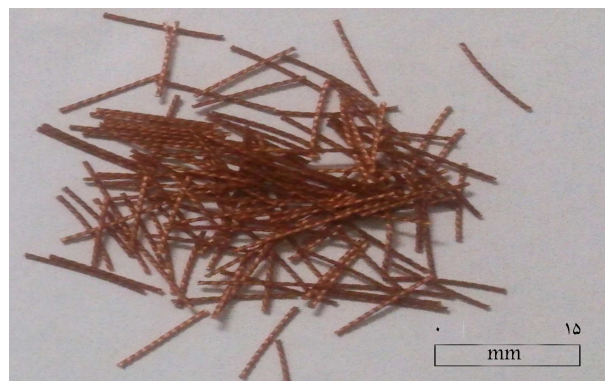
پس از انجام آزمایش تعیین چگالی ویژه G_s بر اساس استاندارد ۰۲-ASTMD ۸۵۴، مقدار چگالی ویژه خاک مورد نظر برابر ۲/۶۶ به دست آمد. برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک غیرچسبیده، طبق استاندارد شماره ۰۴-ASTMD ۳۰۸۰ و به روش کرنش کنترل، از آزمایش برش مستقیم استفاده شد. برای ماسه مورد آزمایش، زاویه اصطکاک داخلی ϕ معادل ۳۳ درجه به دست آمد.

۳.۲. آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

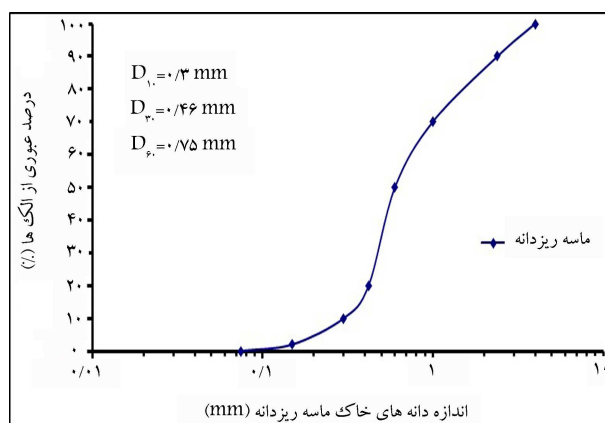
آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) یکی از آزمایش‌هایی است که به طور گسترده در روسازی و تثبیت خاک استفاده می‌شود. از برتری‌های این آزمایش نسبت به آزمایش برش مستقیم، اعمال یکنواخت تنش و کرنش و همچنین سطح شکست غیراجباری در ضعیف‌ترین قسمت نمونه است. این آزمایش منطبق بر استاندارد ۰۰-ASTMD ۲۱۶۶ انجام شده است. دستگاه مورد نظر قابلیت اعمال بار تا ۵۰ کیلو نیوتن را با سرعت‌های مختلف بارگذاری دارا است. نحوه انجام آزمایش با استفاده از این دستگاه به صورت کرنش کنترل است. با توجه به ابعاد نمونه تک‌محوری و الزامات آزمایش تک‌محوری، سرعت اعمال کرنش در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده ۱ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده است. جهت قرائت جابه‌جایی و نیروی اعمال شده بر نمونه از نرم‌افزار Data Logger که بر روی کامپیوتر متصل به دستگاه تک‌محوری نصب شده بود، استفاده گردید. بارگذاری تا جایی ادامه یافت که نیرو با افزایش کرنش افت پیدا کند. دستگاه در حال انجام آزمایش UCS در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴.۲. آزمایش یخ زدن - آب شدن

برای اعمال چرخه‌های یخ زدن - آب شدن تا حد امکان سعی شده است تا الزامات استاندارد شماره ۰۳-ASTM D ۵۶۰ برآورده شود، زیرا این استاندارد وجود الیاف در نمونه را شامل نمی‌شود. شایان ذکر است که عبارت (تا حد امکان) استفاده شده به مفهوم امکان وجود خطای آزمایشگاهی در فرایند و روال تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش یخ‌زدن - ذوب شدن است. به عنوان مثال، طبق این استاندارد، ایجاد خراش‌هایی به



شکل ۱. الیاف نخ تاثیر تابیده شده مورد استفاده جهت تسلیح نمونه‌ها.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها.

استحکام زیاد، مقاومت حرارتی و خستگی، مقاوم در برابر ضربه و ثبات کیفیت اشاره کرد. این الیاف در صنایع لاستیک وسایل نقلیه، تسمه نقاله، کمر بند ایمنی خودروها، تور و قلاب ماهی‌گیری، شیلنگ‌های تقویت شده و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. الیاف مورد استفاده در این تحقیق از نوع تابیده شده^۲ است که پس از بریده شدن به طول‌های ۱، ۵/۵ و ۱۰ سانتی‌متر و به درصدهای ۰، ۵/۵ و ۱ درصد، نسبت به وزن خشک خاک مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۱ نمونه این الیاف که در طول‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متری بریده شده‌اند، قابل مشاهده است. همچنین، در جدول ۱ برخی خصوصیات مهم این الیاف آورده شده است.

۲.۲. آزمایش‌ها

آزمایش دانه‌بندی با الک به روش خشک، طبق استاندارد شماره ۰۲-ASTM ۴۲۲۲-D انجام شد. با توجه به منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده، ضریب یکنواختی $C_u = 2/5$ و ضریب دانه‌بندی $C_c = 0/94$ بوده و بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکنواخت USCS استاندارد شده ۰۰-ASTM D ۲۴۸۷، نوع خاک SP است. شکل ۲ منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



الف) قالب نمونه، چکش و میله
تفلونی جهت کوبش؛
ب) دستگاه بیرون آورنده نمونه تک محوری
از قالب.

شکل ۴. مراحل اولیه ساخت نمونه.



الف) قرارگیری نمونه ها در آب؛
ب) نمونه های درون سبد؛



ج) فریزر مورد استفاده؛
د) پوشش نمونه های در حال آب شدن جهت
حفظ رطوبت.

شکل ۵. مراحل مختلف آماده سازی نمونه ها.

سپس، زیپ کیف مذکور در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. پس از گذشت این مدت زمان، نمونه ها از درون قالب توسط جک بیرون آورده شد. در شکل ۴ چکش و میله تراکم تفلونی و دستگاه جک بیرون آورنده نمونه از درون قالب نشان داده شده است.

سپس، نمونه ها درون ظرف آب برای مدت های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه مطابق شکل ۵ قسمت الف غوطه ور شدند. پس از آن، نمونه ها بر روی موکت اشباع که در کف سبیدی قرار داده شده اند (شکل ۵ قسمت ب)، در ادامه، نمونه ها همراه سبد درون فریزر مخصوص صنعتی در دمای کمتر از ۱۶ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت جهت اعمال یخ زدن قرار داده شدند (شکل ۵ قسمت ج). پس از این مدت، نمونه ها به همراه سبد از فریزر بیرون آورده می شود (شکل ۵ قسمت د). تشت حاوی آب و نمونه ها جهت جلوگیری از تبخیر آب درون کیسه نایلونی به مدت ۲۲ ساعت در محیط آزمایشگاه برای اعمال شرایط آب شدن مطابق شکل ۵ قسمت د قرار داده شدند و در ادامه به مدت ۲ ساعت در آب قرار داده شدند. فرایند یخ زدن و آب شدن و آب مکیدن (جذب آب) مجموعاً یک چرخه یخ زدن و آب شدن را تشکیل می دهند.

پس از اعمال هر چرخه، تعدادی از نمونه ها تحت آزمایش UCS قرار می گرفت. در این پژوهش، نمونه ها در چرخه های ۱، ۲ و ۳ مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۶ حالتی از شکست برشی نمونه استوانه ای در زیر دستگاه سنجش UCS دیده می شود.



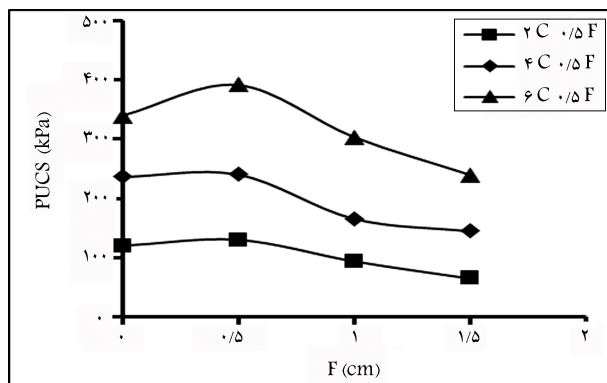
شکل ۳. دستگاه انجام آزمایش تک محوری محصور نشده UCS.

عرض و عمق ۳ میلی متر و با فاصله های ۶ میلی متر از یکدیگر قید شده است که در عمل ممکن است این ابعاد به طور دقیق ایجاد نشود. همچنین، فریزر مورد استفاده امکان ایجاد شرایط سرمایی به طور ثابت کمتر از ۲۳- درجه سانتیگراد را نداشت، درحالی که طبق استاندارد، حداکثر دما برای فریزر ۲۳- درجه قید شده است. علاوه بر این، دمای اتاق آزمایش با رطوبت ۱۰۰ درصد تاکید شده است، درحالی که محیط آزمایشگاه ممکن است در ساعتی از روز به طور ثابت این میزان از رطوبت وجود نداشته باشد. شایان ذکر است که این استاندارد جهت بررسی دوام نمونه های خاک-سیمان بر اساس افت وزن ناشی از چرخه های یخ زدن - آب شدن بیان شده است.

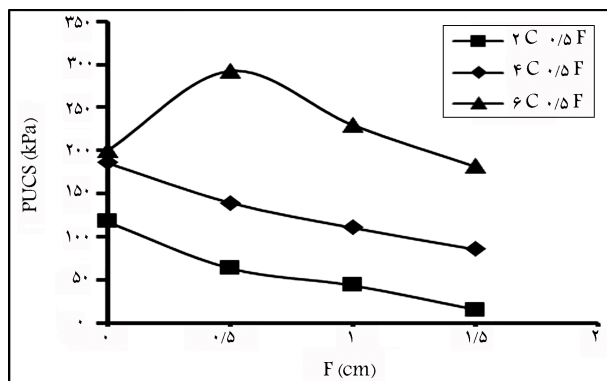
۳. نحوه ساخت نمونه ها

برای تهیه نمونه از لوله PVC استفاده شد. قطر داخلی نمونه ها ۳/۶ سانتی متر و ارتفاع نمونه ها ۸ سانتی متر است. جهت ساخت نمونه ها، ابتدا وزن مخلوط لازم برای هر قالب با مشخص بودن وزن مخصوص بیشینه و مشخص بودن حجم نمونه محاسبه شد. سپس، میزان سیمان مورد نظر برای هر نمونه به خاک خشک داخل زیپ کیف با توجه به دانه بندی اضافه شد و این مواد تا رسیدن به همگنی کامل با یکدیگر خوب مخلوط شدند. پس از آن، مقدار رطوبت بهینه به تدریج به مخلوط به طور یکنواخت اضافه و دوباره با یکدیگر به خوبی مخلوط می شوند. مقدار رطوبت بهینه مورد نیاز برای ساخت نمونه ها از مجموع ۱۰ درصد رطوبت بهینه برای تراکم خاک و مقدار آب لازم برای نسبت آب به سیمان ۵۰ درصد به دست آمد. سپس، الیاف اضافه شده و برای بار سوم تا رسیدن به همگنی و یکنواختی مطلوب، به خوبی مخلوط گردیده تا الیاف در جهاتی تصادفی توزیع گردند. مخلوط مورد نظر در قالب استوانه ای در چهار لایه مساوی به ارتفاع ۲۰ میلی متر در هر لایه ریخته شد. هر قسمت به کمک چکش و میله تفلونی که در ارتفاعات ۲۰ میلی متر علامت گذاری شده است، کوبیده شد. برای اتصال و درگیری بیشتر بین لایه ها و جلوگیری از تبدیل فاصله میان لایه ها به صفحات ضعیف، عمل خراش دادن سطح هر لایه نیز انجام شد. همچنین، جهت به حداقل رساندن صدمات وارده به نمونه در هنگام بیرون آوردن توسط جک، داخل قالب های PVC با پوشش وازلین روغن کاری شده است.

قالب حاوی نمونه توسط سلفون دورپیچی شده است و داخل زیپ کیف قرار داده شده است. به این ترتیب، از هدر رفتن رطوبت نمونه ها جلوگیری می شود.



شکل ۷. بیشینه مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان و ۵/۰ درصد الیاف تحت زمان عمل‌آوری ۷ روزه پس از یک چرخه یخ‌زدن - آب شدن.



شکل ۸. بیشینه مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۴، ۶ و ۸ درصد سیمان و ۵/۰ درصد الیاف تحت زمان عمل‌آوری ۷ روزه پس از سه چرخه یخ‌زدن - آب شدن.

کاهش می‌یابد. این افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی ۵/۰ درصد الیاف ۵/۰، شدت افزایش مقاومت با اضافه کردن الیاف در این حالت، در نمونه‌های حاوی ۶ درصد سیمان بیشتر است. به طوری که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۶ درصد سیمان مسلح به ۵/۰ درصد الیاف ۵/۰ سانتی‌متر، با مقدار ۳۹۱ کیلوپاسکال ۱/۱۵ برابر نمونه مشابه بدون الیاف و ۱/۲۹ برابر نمونه مشابه با الیاف ۱ سانتی‌متر و ۱/۶۳ برابر نمونه مشابه با الیاف به طول ۱/۵ سانتی‌متر است. این افزایش مقاومت نمونه‌ها برحسب میزان مشخصی از الیاف، به طور مشخص در ارتباط با بسیج شدن نیروهای کششی الیاف در ناحیه برشی است. از طرف دیگر، زمانی که درصد وزنی الیاف ثابت است، با افزایش طول الیاف، تعداد رشته‌های الیاف موجود در واحد حجم کاهش می‌یابد. می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که با افزایش میزان سیمان، بسیج نیروهای اصطکاکی افزایش می‌یابد و علت کاهش مقاومت پس از میزان مشخصی از الیاف، نبود سیمان کافی برای ایجاد درگیری الیاف با خاک می‌تواند باشد. بنابراین، ابعاد نمونه آزمایش و نوع آزمایش می‌تواند در تعیین طول بهینه الیاف تأثیرگذار باشد و نتایج نشان می‌دهد حداکثر طول الیاف باید کمتر از ابعاد نمونه آزمایش انتخاب شود. در نمونه‌های مشابه مسلح به ۱ درصد الیاف، افزایش مقاومت تنها در نمونه‌های حاوی ۶ درصد سیمان دیده می‌شود و در نمونه‌های تثبیت شده با ۲ و ۴ درصد سیمان، با اضافه کردن ۱ درصد الیاف در هر اندازه‌ای، مقاومت کاهش یافته است.

در شکل ۸ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و ۵/۰ درصد الیاف در اندازه‌های ۵/۰، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر تحت



شکل ۶. شکست برشی نمونه در دستگاه تک‌محوری.

۱.۳. ترکیب نمونه‌های مورد آزمایش

در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، نمونه‌های مختلفی از درصدهای مختلف مخلوط خاک با سیمان و الیاف ساخته و پس از سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه و اعمال ۱، ۲ و ۳ چرخه یخ‌زدن و آب شدن مورد آزمایش قرار گرفتند. درصدهای مخلوط سیمان مورد استفاده در این تحقیق ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی خاک خشک است. همچنین، از الیاف با درصدهای ۵/۰ و ۱ درصد در اندازه‌های با طول ۵/۰، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. ضمناً با توجه به سعی و خطاهای صورت گرفته در تعیین روش اعمال چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن، حساسیت نمونه‌هایی که تحت چرخه‌ها قرار گرفته بودند و پراکندگی داده‌ها در برخی از حالت‌ها تکرارهایی صورت گرفت. به این ترتیب که از هر حالت حداقل دو الی سه نمونه ساخته شد (جمعاً بالغ بر ۳۳۶ نمونه) و مورد آزمایش قرار گرفت. به هر حال، فرایند ساخت و آزمون این نمونه‌ها، جهت تعیین صحت یافته‌ها، کنترل اعتمادپذیری و تکرارپذیری (روایی و پایایی) نتایج و نگارش پژوهش حاضر، حدود ۱۶ ماه به طول انجامیده است.

۴. ارائه نتایج پارامتری آزمایش‌های المانی

جهت اجرا و ارائه نتایج آزمایش‌های UCS، تعداد حداقل ۲۸۸ حالات پارامتری مختلف در نظر گرفته شده است. این حالات حاصل ضرب، ۲ حالت تغییر طول (۳ حالت) و تغییر درصد الیاف (۴ حالت)، ۳ درصد مختلف سیمان، در ۲ زمان عمل‌آوری مختلف ۷ و ۲۸ روزه و ۴ حالت اعمال چرخه یخ‌زدگی - آب‌شدگی است. مجموع این‌ها برابر حداقل ۲۸۸ حالت پارامتری می‌شود.

۱.۴. بررسی اثر تغییرات طول الیاف در درصد الیاف ثابت (نمونه‌های ۷ روزه)

در شکل ۷ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و ۵/۰ درصد الیاف در اندازه‌های ۵/۰، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ روز پس از یک چرخه یخ‌زدن - آب شدن ارائه شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش الیاف در نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف سیمان بعد از گذشت یک چرخه مقاومت فشاری ابتدا افزایش و سپس

زمان‌های عمل‌آوری ۷ روز بعد از اعمال سه چرخه یخ زدن - آب شدن ارائه شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که در نمونه‌های تثبیت شده با ۶ درصد سیمان پس از گذشت سه چرخه با افزایش الیاف مقاومت فشاری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی ۵/۵ درصد الیاف ۵/۵ سانتی‌متر دیده می‌شود. به‌طوری که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۶ درصد سیمان مسلح به ۵/۵ درصد الیاف ۵/۵ سانتی‌متر با مقدار ۲۹۲ کیلواسکال ۱/۴۶ برابر نمونه مشابه بدون الیاف و ۱/۲۷ برابر نمونه مشابه با الیاف ۱ سانتی‌متر و ۱/۶ برابر نمونه مشابه با الیاف ۱/۵ سانتی‌متر است. این در حالی است که در نمونه‌های تثبیت شده با ۲ و ۴ درصد سیمان، افزودن الیاف در هر اندازه و درصدی، سبب کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌گردد. همین روند در نمونه‌های تثبیت شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به ۱ درصد الیاف نیز به چشم می‌خورد.

عمل‌آوری ۷ روزه ارائه شده است. نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش درصد الیاف نخ تا ۵/۵ درصد در اندازه ۵/۵ سانتی‌متر در نمونه‌های حاوی ۶ درصد سیمان، مقاومت افزایش یافته است و با بیشتر شدن درصد الیاف تا ۱ درصد، مقاومت کاهش می‌یابد. نمونه دارای ۶ درصد سیمان حاوی ۵/۵ درصد الیاف ۱/۱ برابر نمونه مشابه با ۱ درصد الیاف و ۱/۱۶ برابر نمونه بدون الیاف است. مطابق نمودار در نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد سیمان، با افزودن الیاف مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

در نمونه‌هایی که با الیاف ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری تسلیح شده‌اند، با اضافه کردن الیاف حتی تا ۵/۵ درصد وزنی مقاومت نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های بدون الیاف پس از اعمال دو چرخه کاهش می‌یابد. بنابراین، مقدار بهینه الیاف در نمونه‌هایی با سن ۷ روزه که دو چرخه بر آن‌ها اعمال شده است، استفاده از ۶ درصد سیمان برای تثبیت نمونه‌ها و ۵/۵ درصد الیاف ۵/۵ سانتی‌متر است.

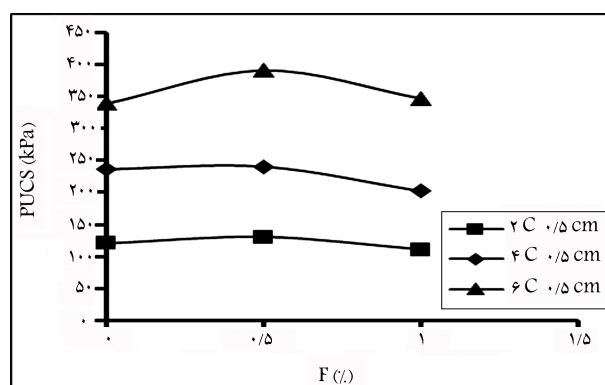
۳.۴. بررسی اثرات تغییرات درصد الیاف در طول الیاف ثابت (نمونه‌های ۷ روزه)

در شکل ۱۱ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و درصد‌های مختلف الیاف در اندازه‌های ۵/۵ سانتی‌متر تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ روزه پس از سه چرخه یخ زدن - آب شدن ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش درصد الیاف نخ تا ۵/۵ درصد در اندازه ۵/۵ سانتی‌متر در نمونه‌های حاوی ۶ درصد سیمان، افزایش مقاومت فشاری محدود نشده مشاهده می‌شود و با بیشتر شدن درصد الیاف تا ۱ درصد مقاومت کاهش می‌یابد. نمونه دارای ۶ درصد سیمان حاوی ۵/۵ درصد الیاف ۱/۱ برابر نمونه مشابه با ۱ درصد الیاف و ۱/۱۶ برابر نمونه بدون الیاف است. مطابق نمودار در نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد سیمان، با افزودن الیاف مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

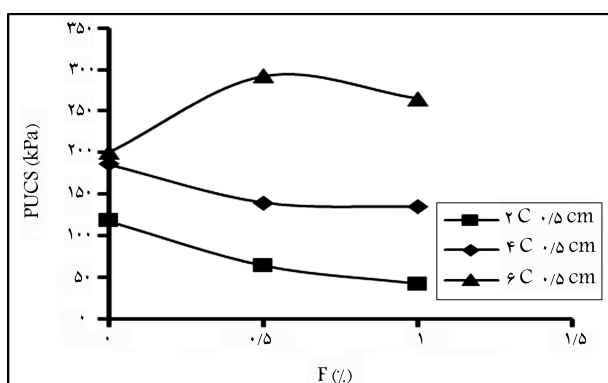
در نمونه‌هایی که با الیاف ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری تسلیح شده‌اند، با اضافه کردن الیاف حتی تا ۵/۵ درصد وزنی، مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون الیاف بعد از اعمال سه چرخه کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان گفت مقدار بهینه الیاف در نمونه‌های با سن ۷ روزه که سه چرخه بر آن‌ها اعمال شده است، استفاده از ۶ درصد سیمان برای تثبیت نمونه‌ها و ۵/۵ درصد الیاف به طول ۵/۵ سانتی‌متر است.

۲.۴. بررسی اثر تغییرات درصد الیاف در طول الیاف ثابت (۷ روزه) در شکل ۹ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و درصد‌های مختلف الیاف در اندازه‌های ۵/۵ سانتی‌متر تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ روزه ارائه شده است.

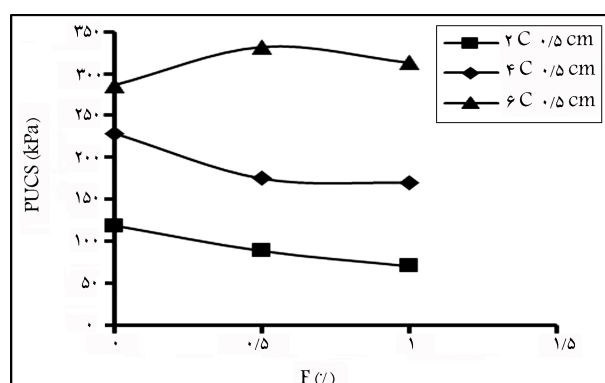
در شکل ۱۰ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و درصد‌های مختلف الیاف در اندازه‌های ۵/۵ سانتی‌متری تحت زمان‌های



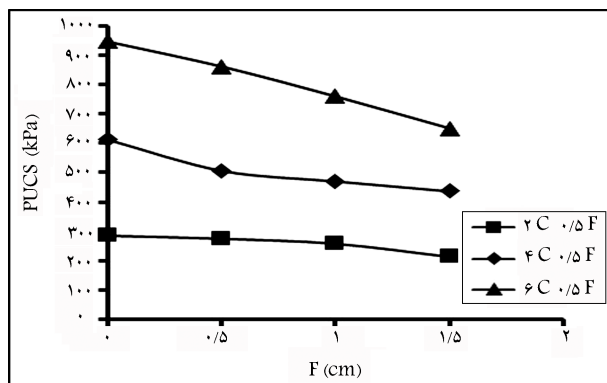
شکل ۹. بیشینه مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۵/۵ سانتی‌متر در زمان عمل‌آوری ۷ روزه پس از یک چرخه یخ زدن - آب شدن.



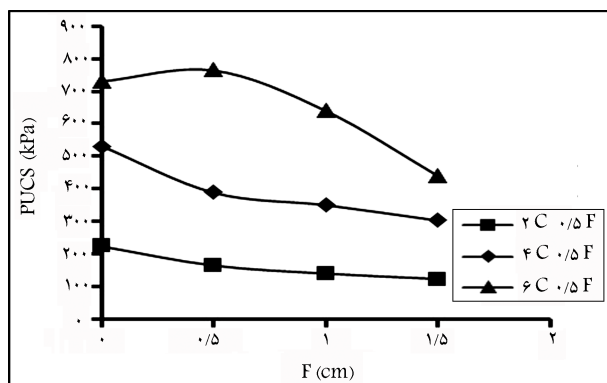
شکل ۱۱. بیشینه مقاومت نمونه‌هایی با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۵/۵ سانتی‌متر با زمان عمل‌آوری ۷ روزه و سه چرخه یخ زدن - آب شدن.



شکل ۱۰. بیشینه مقاومت نمونه‌هایی با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۵/۵ سانتی‌متر با زمان عمل‌آوری ۷ روز پس از دو چرخه یخ زدن - آب شدن.



شکل ۱۲. بیشینه مقاومت نمونه‌هایی با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۵/۰ درصد با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از یک چرخه یخ زدن - آب شدن.



شکل ۱۳. بیشینه مقاومت نمونه‌هایی با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به ۵/۰ درصد الیاف با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از سه چرخه یخ زدن - آب شدن.

است. با افزایش الیاف در نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد سیمان، در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه و پس از گذشتن سه چرخه، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد و نشان دهنده اثر منفی افزودن الیاف در مقاومت نمونه‌ها در هنگام یخ زدن - آب شدن است. این کاهش مقاومت در نمونه‌های حاوی الیاف ۱/۵ سانتی‌متر بیشتر از الیاف ۱ و ۵/۰ سانتی‌متری است. همچنین، در نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سیمان و ۱ درصد الیاف نیز در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، با افزایش الیاف بیشینه مقاومت کاهش می‌یابد، یعنی با افزایش درصد الیاف در هر اندازه‌ای، کاهش مقاومت دیده می‌شود.

۵.۴. بررسی اثر تغییرات درصد الیاف در طول الیاف ثابت (نمونه‌های ۲۸ روزه)

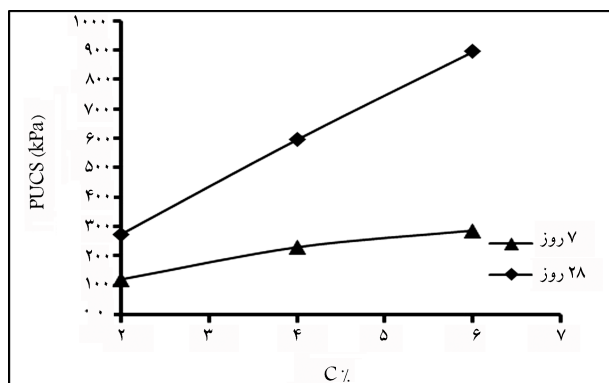
در شکل ۱۴ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سیمان و الیاف به طول ۵/۰ سانتی‌متر در درصد‌های وزنی ۱/۵ و ۱، ۰/۵ تحت زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه ارائه شده است. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف در طول ثابت ۵/۰ سانتی‌متر تحت دوره عمل‌آوری، مقاومت کاهش می‌یابد. شدت کاهش مقاومت در تمامی درصد‌های سیمان تقریباً ثابت است. در این حالت، سیمان به اندازه کافی جهت ایجاد چسبندگی لازم میان الیاف و خاک و ایفای نقش الیاف وجود ندارد. در نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف به طول ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری نیز روندی مشابه دیده می‌شود. بنابراین، با توجه به نمودارها با افزایش مقادیر وزنی و یا افزایش طول الیاف، به دلیل افزایش بیش از اندازه نسبت به طول و ابعاد نمونه، مقاومت کاهش یافته است.

۴.۴. بررسی اثر تغییرات طول الیاف در درصد الیاف ثابت (نمونه‌های ۲۸ روزه)

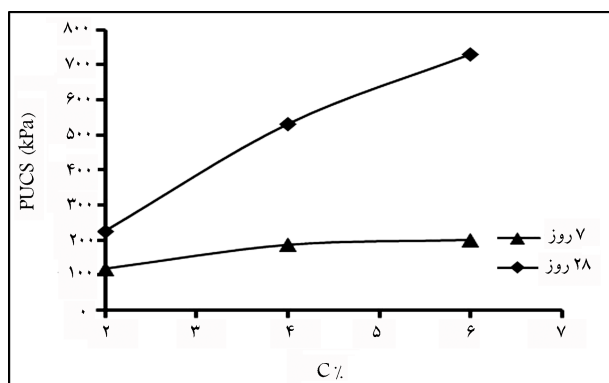
در شکل ۱۲ تغییرات مقادیر بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و ۵/۰ درصد الیاف در اندازه‌های ۱، ۰/۵ و ۱/۵ سانتی‌متر تحت زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه ارائه شده است. نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش درصد الیاف پنج تا ۵/۰ درصد در اندازه ۵/۰ سانتی‌متر و در درصد‌های مختلف سیمان، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد. افزودن الیاف بیش از ۵/۰ درصد نه تنها افزایش مقاومت نمونه‌ها را به دنبال ندارد، بلکه باعث کاهش بیشینه مقاومت نیز می‌گردد، به‌طوری که مقاومت نمونه دارای ۶ درصد سیمان حاوی ۵/۰ درصد الیاف، ۱/۱۳ برابر نمونه مشابه با ۱ درصد الیاف است. به این ترتیب، اثر منفی افزودن پنج تا ۵/۰ درصد الیاف در مقاومت نمونه‌ها دیده می‌شود. علت این امر آن است که به علت سختی زیاد الیاف و درگیری کم این الیاف با خاک، المان‌های موجود در آن بعد از آماده کردن نمونه از خاک بیرون زده می‌شود و موجب کاهش مقاومت در نمونه‌ها شده است. بنابراین، می‌توان گفت مقدار بهینه الیاف در نمونه‌هایی با سن ۷ روز که یک چرخه بر آن‌ها اعمال شده است، استفاده از ۶ درصد سیمان برای تثبیت نمونه‌ها و ۵/۰ درصد الیاف به طول ۵/۰ سانتی‌متر است. این در حالی است که در نمونه‌هایی که با الیاف ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری تسلیح شده‌اند، با اضافه کردن الیاف حتی تا ۵/۰ درصد، مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون الیاف بعد از اعمال یک چرخه کاهش می‌یابد. این رفتار در خاک مسلح نشان‌دهنده آن است که در درصد‌های بالای الیاف، با جایگزینی الیاف به جای ذرات خاک، مقاومت نمونه مسلح تحت تأثیر الیاف‌های موجود در خاک قرار گرفته است و این الیاف‌ها کنترل‌کننده رفتار نمونه خاک هستند. با توجه به نمودارها، در ۶ درصد سیمان پس از گذشت یک چرخه همانند نمونه‌های خشک، الیاف تأثیر بیشتری بر مقاومت دارد. به عبارت دیگر، در درصد سیمان مناسب‌تر، الیاف بهتر به‌کار گرفته می‌شود. بنابراین، با افزایش میزان سیمان در نمونه‌هایی که چرخه یخ زدن - آب شدن بر آن‌ها اعمال شده است و به این ترتیب الیاف نقش خود در بسیج نیروهای اصطکاکی را ایفا می‌کنند. با توجه به نمودار در بین نمونه‌های ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت پس از یک چرخه مربوط به نمونه با ۶ درصد سیمان مسلح‌شده با اندازه ۹۴۶ کیلوپاسکال است. در میان نمونه‌های مسلح به الیاف نیز بیشترین مقاومت مربوط به نمونه دارای ۶ درصد سیمان و ۵/۰ درصد الیاف ۵/۰ سانتی‌متر به اندازه ۸۲۱ کیلوپاسکال است.

بنابراین، با توجه به نمودار، با افزایش الیاف در نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف سیمان در عمل‌آوری ۲۸ روزه و پس از یک چرخه، مقاومت فشاری بهبود نمی‌یابد و نشان‌دهنده اثر منفی افزودن الیاف در مقاومت نمونه‌ها در هنگام یخ زدن - آب شدن است. این کاهش مقاومت در نمونه‌های حاوی الیاف ۱/۵ سانتی‌متر بیشتر از الیاف ۱ و ۵/۰ سانتی‌متر است. همچنین، در نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف سیمان و ۱ درصد الیاف نیز در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، با افزایش الیاف، بیشینه مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۳ تغییرات مقادیر بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و ۵/۰ درصد الیاف در اندازه‌های ۱، ۰/۵ و ۱/۵ سانتی‌متر تحت زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از اعمال سه چرخه یخ زدن - آب شدن ارائه شده است. در میان نمونه‌های ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت پس از سه چرخه مربوط به نمونه با ۶ درصد سیمان و ۵/۰ درصد الیاف ۵/۰ سانتی‌متر با اندازه ۷۶۵ کیلوپاسکال



شکل ۱۷. بیشینه مقاومت نمونه‌هایی با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان تحت زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه پس از دو چرخه یخ زدن - آب شدن.



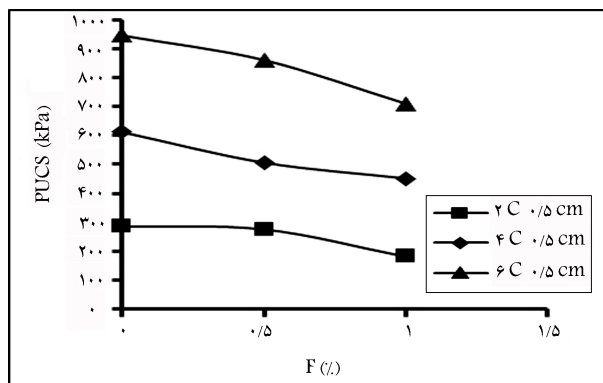
شکل ۱۸. بیشینه مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان با زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه و سه چرخه یخ زدن - آب شدن.

عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از طی سه چرخه ارائه شده است. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف در طول ثابت ۰/۵ سانتی‌متر با دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، مقاومت کاهش می‌یابد. در نمونه‌های مسلح شده با الیاف ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری نیز روندی مشابه دیده می‌شود.

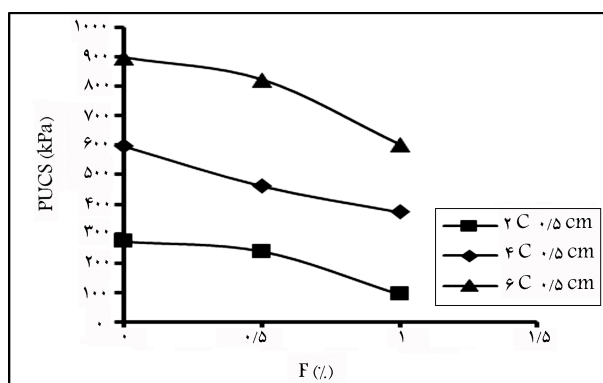
۶.۴. بررسی مقاومت نمونه‌های بدون الیاف

در شکل ۱۷ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تثبیت شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان بدون الیاف پس از اعمال دو چرخه یخ زدن و آب شدن به نمایش درآمده است. با توجه به نمودار دیده می‌شود که به‌طور کلی افزایش میزان درصد سیمان در یک زمان عمل‌آوری خاص و با اعمال چرخه‌ها موجب افزایش مقاومت می‌شود. همچنین، در یک درصد معلوم سیمان، با سپری شدن زمان عمل‌آوری و با اعمال چرخه‌های متوالی، نمونه‌ها مقاومت کسب می‌کنند. با اعمال دو چرخه همچنان بیشترین مقاومت مربوط به نمونه ۶ درصد سیمان و سن ۲۸ روزه با مقاومت ۸۹۶ کیلوپاسکال است. به‌طوری که نمونه‌های حاوی ۶ درصد سیمان با زمان عمل‌آوری ۷ روزه پس از دو چرخه مقاومت ۱/۲۵ برابر نمونه ۴ درصد و ۲/۴ برابر نمونه ۲ درصد را دارا هستند. مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۶ درصد سیمان با سن عمل‌آوری ۲۸ روزه نیز ۱/۵ برابر نمونه ۴ درصد و ۳/۲۹ برابر نمونه ۲ درصد است.

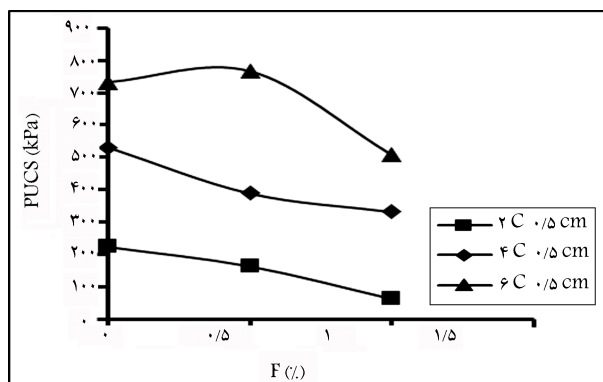
در شکل ۱۸ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان بدون الیاف پس از اعمال سه چرخه یخ زدن و آب



شکل ۱۴. مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۰/۵ سانتی‌متر در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از یک چرخه یخ زدن - آب شدن.



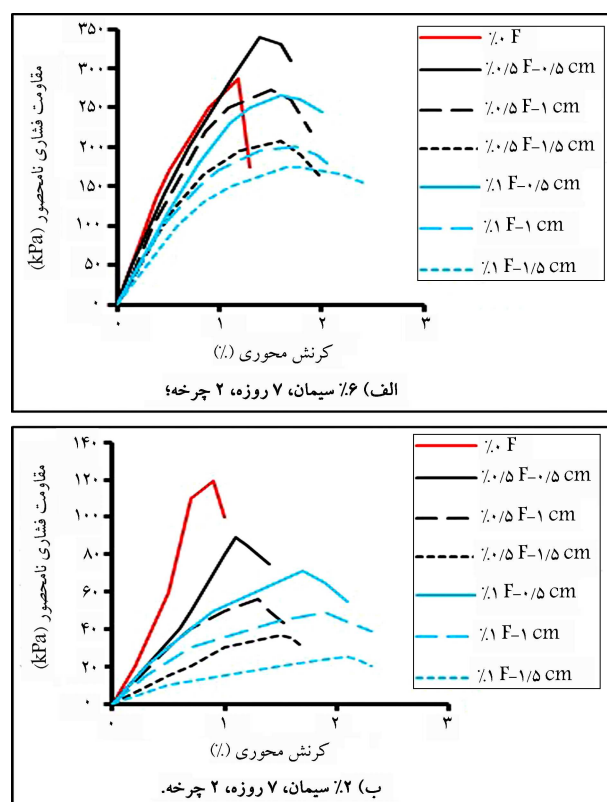
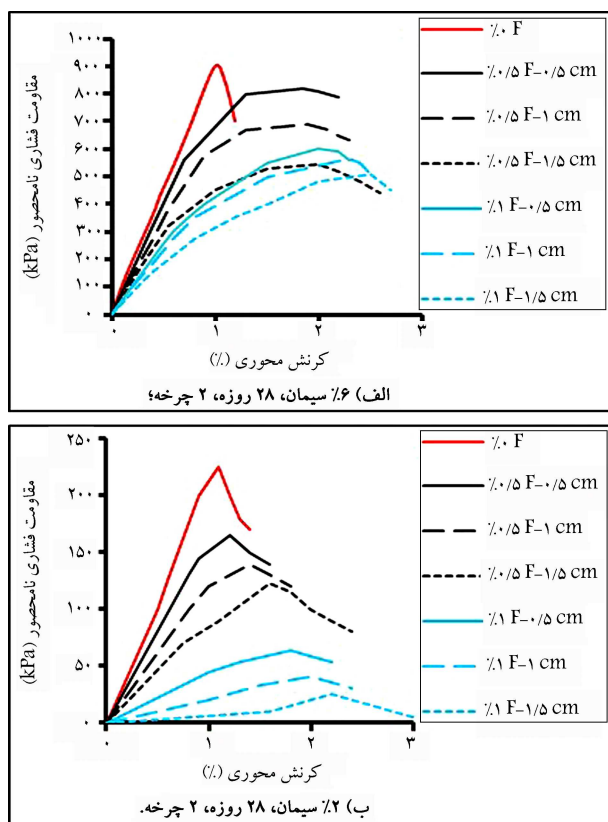
شکل ۱۵. بیشینه مقاومت نمونه‌هایی با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۰/۵ سانتی‌متر با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه و دو چرخه یخ زدن - آب شدن.



شکل ۱۶. بیشینه مقاومت نمونه‌هایی با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۰/۵ سانتی‌متر با عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از سه چرخه یخ زدن - آب شدن.

در شکل ۱۵ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سیمان و الیاف به طول ۰/۵ سانتی‌متر در درصد‌های ۱، ۰/۵ و ۱/۵ تحت زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه ارائه شده است. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف در طول ثابت ۰/۵ سانتی‌متر تحت دوره عمل‌آوری مقاومت کاهش می‌یابد. در نمونه‌های مسلح شده با الیاف ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری نیز روندی مشابه دیده می‌شود.

در شکل ۱۶ تغییرات بیشینه مقاومت نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و الیاف به طول ۰/۵ سانتی‌متر در درصد‌های ۱، ۰/۵ و ۱/۵ تحت زمان‌های



شکل ۱۹. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با ۲ و ۶ درصد سیمان پس از ۷ روز عمل‌آوری و اعمال دو چرخه یخ زدن - آب شدن.

شدن به نمایش درآمده است. چنانچه در کلیه شکل‌ها مشاهده می‌شود، روند کاهش مقاومت در نمونه‌ها با درصد‌های مختلف سیمان و در تمامی زمان‌های عمل‌آوری وجود دارد. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، همانند نمونه‌های خشک و نمونه‌هایی که تحت یک و دو چرخه قرار گرفتند، پس از گذشت سه چرخه برای مدت‌زمان عمل‌آوری خاص، مقدار مقاومت متأثر از درصد سیمان است و با افزایش میزان سیمان از ۲ تا ۶ درصد، مقاومت افزایش می‌یابد. همچنین، با گذشت زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روز، افزایش مقاومت دیده می‌شود.

شکل ۲۰. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با ۲ و ۶ درصد سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری و اعمال دو چرخه یخ زدن - آب شدن.

۷.۴. بررسی روند تغییرات مقاومت، کرنش گسیختگی و مدول ارتجاعی نمونه‌ها با سن عمل‌آوری نمونه‌ها

در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نامحصور نمونه‌ها در مقابل کرنش‌های محوری برای شرایط درصد سیمان و الیاف و نیز طول الیاف مختلف برای نتایج ۲ چرخه یخ‌زدگی - آب‌شدگی ارائه شده است. مطابق نتایج ارائه شده در شکل‌ها، مشاهده می‌شود افزایش درصد سیمان و سن عمل‌آوری نمونه‌ها موجب افزایش حدود ۲ الی ۳ برابری مقاومت فشاری نمونه‌ها و کاهش چشمگیر کرنش شکست (کرنش نقطه اوج) نمونه‌ها (افزایش تردی) می‌شود. افزایش طول و درصد الیاف مسلح‌کننده، سبب کاهش شکنندگی نمونه‌ها و افزایش کمی مقادیر کرنش محوری در لحظه شکست آن‌ها می‌شود. همچنین، با افزایش درصد و طول الیاف، مساحت ناحیه زیر نمودارها که بیانگر انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها (یا طاقت نمونه‌ها) از شروع بارگذاری فشاری نامحصور تا لحظه شکست آنهاست،

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر چرخه‌های مختلف یخ زدن - آب شدن بر مقاومت فشاری نمونه‌های خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان و مسلح شده به الیاف تابر تابیده شده بازافتی در قالب مدل‌سازی آزمایشگاهی ارزیابی شد. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها با ساخت نمونه‌های استوانه‌ای شکل اندازه‌گیری شده است. تأثیر تعداد صفر، یک، دو و سه چرخه یخ زدن - آب شدن بر کاهش مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای آزموده شده است. نمونه‌ها با سه میزان ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان تثبیت شده‌اند. علاوه بر این، تأثیر ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در زیر آب، بر مقاومت نهایی نمونه‌ها بررسی شده است. نمونه‌هایی که با سیمان تثبیت شده‌اند، توسط الیاف بازافتی نخ تابر نیز مسلح شده‌اند. تأثیر همزمان سه عامل چرخه‌های

یخ زدن - آب شدن، تثبیت با سیمان و تسلیح با الیاف، در قالب مدل‌های آزمونه‌ای مطالعه شده است. عمده‌ترین نتایج حاصل از این مطالعه به شرح موارد زیر است:

۱. در این مطالعه، میزان بهینه الیاف از نظر درصد وزنی و ابعاد طولی آن برای بهبود مشخصات نمونه‌های ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان در مقابل چرخه‌های یخ زدن - آب شدن و افت مقاومت فشاری در چارچوب مدل‌های آزمایشگاهی ارزیابی شده است.
۲. با افزودن الیاف تا میزانی مشخص چه در حالت خشک و چه پس از اعمال چرخه‌های یخبندان - ذوب، مقاومت فشاری محدود نشده (بیشینه) افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد.
۳. میزان اثربخشی الیاف در افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان به طور وابسته به میزان درصد وزنی سیمان است و در حالت استفاده از مقدار الیاف بهینه می‌تواند مقاومت را تا حدی افزایش دهد.
۴. تأثیر الیاف در افزایش مقاومت در درصد‌های بالاتر الیاف، کمتر از درصد‌های پایین الیاف است. به عبارتی دیگر، برای هر نمونه خاک و الیاف، مقدار بهینه‌ای از درصد الیاف وجود دارد.
۵. کاربرد الیاف در خاکی که با درصد سیمان مناسب‌تر تثبیت شده، مؤثرتر است.
۶. افزودن سیمان موجب افزایش چشمگیر سختی اولیه، کاهش کرنش گسیختگی، مقاومت باقی‌مانده و طاقت مصالح می‌شود و به بیان دیگر سبب تردتر شدن نمونه‌ها شده که افزودن الیاف می‌تواند تا حدودی ضعف‌های نام برده را بهبود بخشد.
۷. افزایش زمان عمل‌آوری منجر به افزایش مقاومت می‌گردد. این افزایش مقاومت قبل و بعد از اعمال چرخه‌های متوالی ادامه دارد.
۸. در تمامی سنن عمل‌آوری به ازای یک سن و درصد الیاف مشخص، چه در حالت خشک و چه پس از اعمال چرخه‌های یخ زدن - آب شدن، افزایش درصد سیمان موجب افزایش مقاومت و کاهش کرنش گسیختگی و افزایش سختی اولیه می‌گردد.
۹. میزان اثربخشی الیاف در افزایش مقاومت در سن عمل‌آوری ۷ روزه بیش‌تر از سن ۲۸ روزه بوده است.

پانوشته‌ها

1. Unconfined Compressive Strength (UCS)
2. Dipped Tire Yarn (DTY)

منابع (References)

1. Kaufmann, J., Winnefeld, F. and Hesselbarth, D., 2004. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), pp.541-549. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00070-2).
2. Liu, J.K., and Peng, L.Y., 2009. Experimental study on the unconfined compression of a thawing soil. *Cold Regions Science and Technology*, 58(1-2), pp.92-96. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.03.008>.
3. Lee, K.L., Adams, B.D. and Vagneron, J.M.J., 1973. Reinforced earth retaining walls. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(10), pp.745-764. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001931>.
4. Gray, D.H. and Ohashi, H., 1983. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), pp.335-353. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-410\(1983\)109:3\(335\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-410(1983)109:3(335)).
5. Freitag, D.R., 1986. Soil randomly reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(8), pp.823-826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-410\(1986\)112:8\(823\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-410(1986)112:8(823)).

6. Michalowski, R.L. and Cermak, J., 2002. Strength anisotropy of fiber-reinforced sand. *Computers and Geotechnics*, 29(4), pp.279-299. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(01\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(01)00032-5).
7. Yetimoglu, T. and Salbas, O., 2003. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(2), pp.103-110. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00003-7).
8. Yetimoglu, T., Inanir, M. and Inanir, O.E., 2005. A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 23(2), pp.174-183. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2004.09.004>.
9. Ibraim, E., Fourmont, S., 2007. Behaviour of sand reinforced with fibres, In: Ling, H.I., Callisto, L., Leshchinsky, D., Koseki, J. (eds) *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis. Solid Mechanics and Its Applications*, 146, pp.807-818. Springer, Dordrecht, Netherland. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6146-2-60>.
10. Viswanadham, B.V.S., Phanikumar, B.R. and Mukherjee, R.V., 2009. Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1), pp.73-76. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.06.002>.
11. Dupas, J.M., Pecker, A., 1979. Static and dynamic properties of sand-cement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 105(3), pp.419-436. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000778>.
12. Clough, G.W., Sitar, N., Bachus, R.C. and Rad, N.S., 1981. *Cemented sands under static loading*, *Journal of*

- the Geotechnical Engineering Division, 107(6)*, pp.799-817. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001152>.
13. Morel, J.C. and Gourc, J.P., 1997. Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements. *Geosynthetics International, 4(5)*, pp.481-508. <https://doi.org/10.1680/gein.4.0103>.
14. Heineck, K.S., Coop, M.R. and Consoli, N.C., 2005. Effect of microrereinforcement of soils from very small to large shear strains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(8)*, pp.1024-1033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:8\(1024\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:8(1024)).
15. Park, S.S., 2009. Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes, 27(2)*, pp.162-166. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.09.001>.
16. Consoli, N.C., Vendruscolo, M.A., Fonini, A. and Dalla Rosa, F., 2009. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes, 27(3)*, pp.196-203. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.11.005>.
17. Taber, S., 1929. Frost Heaving. *The Journal of Geology, 37(5)*, pp. 428-461. <https://doi.org/10.1086/623637>.
18. Penner, E., 1961. Alternate freezing and thawing not a requirement for frost heaving in soils. *Canadaian Journal of Soil Science, 41(2)*, pp.160-163. <https://doi.org/10.4141/cjss61-021>.
19. Parameswaran, V.R., 1985. Effect of alternating stress on the creep of frozen soils. *Mechanics of Materials, North-Holland, 4(2)*, pp.109-119. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(85\)90010-9](https://doi.org/10.1016/0167-6636(85)90010-9).
20. Simonsen, E., and Isacsson, U. 1999. Thaw weakening of pavement structures in cold regions. *Cold Regions Science and Technology, 29(2)*, pp.135-151. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(99\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(99)00020-8).
21. Qi, J., Ma, W., and Song, C., 2008. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil. *Cold Regions Science and Technology, 53(3)*, pp.397-404. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.05.010>.
22. Altun, S., Sezer, A., and Erol, A., 2009. The Effects of additives and curing conditions on the mechanical behavior of a silty soil. *Cold Regions Science and Technology, 56(2-3)*, pp.135-140. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.11.007>.
23. Christ, M., Park, J.B., 2010. Laboratory determination of strength properties of frozen rubber-sand mixtures. *Cold Regions Science and Technology, 60(2)*, pp.169-175. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.08.013>.
24. Liu, J. K., and Peng, L.Y., 2009. Experimental study on the unconfined compression of a thawing soil. *Cold Regions Science and Technology, 58(1-2)*, pp.92-96. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.03.008>.
25. Li, F., Chen, D., Lu, Y., Zhang, H. and Li, S., 2022. Influence of mixed fibers on fly ash based geopolymer resistance against freeze-thaw cycles. *Journal of Non-Crystalline Solids, 584*. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121517>.
26. Tao, Z., Zhang, Y., Chen, X., Gu, X., 2022. Effects of freeze-thaw cycles on the mechanical properties of cement-fiber composite treated silty clay. *Construction and Building Materials, 316*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125867>.
27. Xiao, X., Li, J., Cai, D., Lou, L., Shi Y. and Xiao, F., 2022. Evolution evaluation of high-speed railway asphalt concrete waterproofing layer during laboratory freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials, 324*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126258>.