



## بررسی آزمایشگاهی شرایط تثبیت شیمیایی-مکانیکی و دوام آزمون‌های ماسه SP تحت اثر دوره‌های یخبندان-ذوب

یزدان شمس ملکی<sup>۱\*</sup>، آزاده دادفرین<sup>۲</sup>، مهدی اثنی عشری<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران،  
۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

### کلمات کلیدی:

ماسه ریزدانه  
تثبیت شیمیایی  
تسلیح با الیاف  
یخ بندان-ذوب  
مقاومت-دوام

**خلاصه:** بروز یخ بندان و متعاقب آن ذوب شدن یخ، سالیانه خسارات زیادی به بسترهای متشکل از خاک‌های ماسه ریزدانه وارد می‌کند. تغییرات حجمی خاک در حین یخ زدن-آب شدن عاملی است که باعث کاهش مقاومت و افزایش تغییرشکل‌ها می‌شود. در این مطالعه، اندازه گیری‌های متعدد آزمایشگاهی برای بررسی اثرات چرخه‌های یخبندان-ذوب بر رفتار آزمون‌های استوانه‌ای ماسه‌ای ارائه شده است. برای بررسی دقیق اثرات یخزدگی، ماسه ریزدانه انتخاب شده است. به صورت همزمان روش‌های تثبیت شیمیایی خاک توسط اختلاط با سیمان با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی خاک خشک و تسلیح مکانیکی با افزودن ۰، ۵ و ۱ درصد وزنی الیاف بازیافتی نایلونی، بکار گرفته شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که وجود الیاف در کنار سیمان، باعث تغییرات آشکار مشخصات سختی، مقاومتی و دوام نمونه‌ها تحت اثر چرخه‌های یخبندان-ذوب می‌شود. از یافته‌های این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های بدون الیاف، ترک‌های مشخص و عریض مشاهده می‌گردد. در صورتی که در نمونه‌های مسلح به الیاف ترک‌ها ریزتر هستند و در عرض گسترده‌تری توزیع شده‌اند. نتایج مربوط به رفتار نمونه‌ها در هنگام بارگذاری نشان داد که در نمونه‌های مسلح شده با الیاف، گسیختگی بر اثر بیرون‌زدگی الیاف رخ داده است. در نمونه‌های ۷ روزه خشک (بدون اعمال چرخه یخبندان-ذوب) با افزودن الیاف مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نمونه‌های ۲۸ روزه، با افزایش فقط ۰/۵٪ الیاف به طول ۰/۵ سانتی‌متر، افزایش مقاومت فشاری محدود نشده و از آن پس کاهش آن مشاهده شده است. در تمام نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه خشک، با افزایش اندازه الیاف از ۰/۵ سانتی‌متر به ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر مقاومت فشاری نمونه‌ها روندی کاهشی دارد. همچنین با افزودن درصد الیاف از ۰/۵ به ۱٪ باز هم روند کاهش مقاومت دیده می‌شود.

### ۱- مقدمه

تثبیت کننده‌هایی مانند سیمان و مسلح کننده‌هایی مانند الیاف به صورت مجزا، بیشتر از اثر توأم آنها متمرکز است. در این زمینه نتایج مطالعات برخی از محققین در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

بعضی محققین دریافته‌اند که استفاده از الیاف مجزا تا حد زیادی طاقت را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود رفتار مقاومتی خاک-سیمان می‌شود [۱]. لیو و پنگ [۲] گزارش کردند که پس از تسلیح خاک با الیاف پلی‌پروپیلنی مجزا، افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی، طاقت و شکل‌پذیری خاک‌های چسبنده به وجود می‌آید. تحقیقات گسترده‌ای در مورد شناخت و ارزیابی رفتار مکانیکی خاک مسلح به الیاف و همچنین استفاده از آن انجام گرفته که می‌توان به تحقیقات لی و آدامز [۳]، گری و اوآهشی [۴] و فریتگ [۵]

خاک‌های ماسه‌ای ریزدانه در مقابل شرایط محیطی، ضعف‌های مختلفی از خود نشان می‌دهند. یکی از نقاط ضعف مهم اینگونه خاک‌ها، بروز تغییرات حجمی زیاد ساختار داخلی آنها در دماهای زیر صفر درجه سانتی‌گراد، به دلیل یخ زدن است. چنانچه چنین خاک‌هایی به عنوان بستر احداث سازه‌ها یا جهت اجرای بدنه راه‌ها انتخاب شوند، پس از تحمل چند چرخه زمانی یخزدگی-آب‌شدگی، دچار کاهش مقاومت و سختی قابل توجهی می‌شوند. راه‌های مختلفی برای بهسازی و تقویت خاک‌ها، در مقابل اثرات ناشی از تغییر شرایط دمایی وجود دارد. دو مورد از مهم‌ترین این راه‌حل‌ها، شامل تثبیت شیمیایی و تسلیح مکانیکی خاک، توسط برخی انواع الیاف است. مروری بر تحقیقات گذشته مبین آن است که بررسی‌های صورت گرفته بر

- 1 Liu and Peng
- 2 Lee et al.
- 3 Gray and Ohashi
- 4 Freitag

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: y.shamsmaleki@kut.ac.ir



گردید.

فلیز و میشل<sup>۸</sup> [۱۵] در مطالعه‌ای در زمینه طراحی، ساخت و اجرای مانع‌های عمودی بر پایه خاک‌های ماسه‌ای سیمانی شده اظهار داشتند، که خاک سیمان به لحاظ مقاومت، مشخصات مطلوب تغییرشکل‌پذیری، دوام در مقابل آب، حرارت و تأثیرات یخبندان، رفتار مناسبی دارد. بدین لحاظ، برای پی ساختمان‌ها و پوشش کانال‌ها و روسازی جاده‌ها قابل استفاده است. تفاوت عمده خاک-سیمان، با بتن یا ملات‌های سیمانی در آن است که مصالح اخیر دارای ذرات -رس نیستند، بلکه شامل سنگدانه‌هایی هستند که سیمان آنها را احاطه می‌کند و به صورت یک واسطه در اتصال ذرات عمل می‌کند و مقاومت قابل توجهی به بتن می‌دهد. درحالی که در خاک تثبیت شده به کمک سیمان، ذرات سیمان توسط دانه‌های ریز خاک محصور می‌شوند و لذا بافت مقاومتی ایجاد شده بسیار ضعیف تر است. به عبارت دیگر مخلوط خاک-سیمان همیشه با تنوعی از ذرات خاک ریزدانه روبرو است.

لی و همکاران [۳] بعد از تسلیح خاک با الیاف پلی‌پروپیلنی مجزا، گزارشی ارائه دادند که نشان می‌داد افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی، طاقت و شکل‌پذیری خاک‌های چسبنده به وجود می‌آید. همچنین بعضی محققین دریافته‌اند که استفاده از الیاف مجزا تا حد زیادی طاقت را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود رفتار مقاومتی سیمان می‌شود [۱]. میلر و ریفای<sup>۹</sup> [۱۶] بر مبنای نتایج آزمایش‌های خود نشان دادند که وجود الیاف، ایجاد ترک و نفوذپذیری را در خاک رس متراکم افزایش می‌دهد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که اضافه کردن الیاف به خاک سبب افزایش مقاومت و کاهش سختی خاک‌ها می‌شود. خاک‌های مسلح با الیاف نسبت به خاک بدون الیاف، به طور چشمگیر طاقت و شکل‌پذیری بیشتری دارند و افت مقاومت کمتری پس از مقاومت حداکثر نشان می‌دهد. مشخصه‌های عمومی خاک‌های دانه‌ای مسلح شده با الیاف در مطالعات صورت گرفته توسط مورل و گورک<sup>۱۰</sup> [۱۷] و و هینک و همکاران<sup>۱۱</sup> [۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات آنان نشان می‌دهد که اضافه کردن الیاف، موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری در مصالح می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعات ارزنده‌ای در خصوص تسلیح مکانیکی خاک‌ها به ویژه خاک ماسه‌ای با الیاف انجام شده است [۱۹-۲۱]. همچنین تحقیقات ارزشمندی نیز در زمینه اثرات دوره‌های یخ‌زدن-آب شدن روی مشخصه‌های مقاومت و سختی خاک‌های ماسه‌ای [۲۲-۲۳]،

[۵] اشاره کرد. نتایج تحقیقات در این زمینه نشان‌دهنده اثر بهبود مقاومت فشاری، مقاومت برشی و CBR و افزایش شکل‌پذیری خاک است؛ بنابراین توزیع تصادفی الیاف درون خاک، می‌تواند به عنوان ماده مسلح کننده‌ای که سبب بهبود خصوصیات مهندسی خاک می‌شود مطرح شود. امروزه نیز مطالعات زیادی توسط پژوهشگران مختلف، پیرامون تأثیر انواع مختلف الیاف و کاربرد آن در مسلح‌سازی انواع خاک‌ها صورت گرفته است، که اغلب این تحقیقات بر روی خاک‌های ماسه‌ای بوده و الیاف مورد استفاده نیز بیشتر از نوع مصنوعی است. مانند بررسی رفتار خاک ماسه‌ای مسلح به الیاف پلی‌آمیدی توسط میچالوسکی و سرماک<sup>۱</sup> [۶] مطالعه مقاومت برشی ماسه مسلح به الیاف پلی‌پروپیلنی با کمک آزمایش برش مستقیم توسط یتیم اوقلو و سالباس<sup>۲</sup> [۷]، ارزیابی ظرفیت باربری یک خاکریز 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 اوقلو و همکاران<sup>۳</sup> [۸] انجام آزمایش‌هایی روی رفتار ماسه ریزدانه مسلح به الیاف پلی‌پروپیلنی مجعد، توسط ایبرایم و فورمنت<sup>۴</sup> [۹]، بررسی مشخصات مکانیکی ماسه‌ای لای دار مسلح به زوائد نخ تایلر، با کمک آزمایش‌های تک‌محوری و CBR و برش مستقیم توسط اسدی [۱۰] از جمله تحقیقات انجام شده است. همچنین مطالعه تجربی رفتار خاک تورم‌پذیر، زمانی که به الیاف پلیمری مسلح شده توسط ویسوندهام و همکاران<sup>۵</sup> [۱۱] ارزیابی شده است. بررسی تأثیر الیاف نخ تایلر بر رفتار تنش-کرنش و مقاومت برشی خاک ماسه‌ای مسلح توسط میرزایی [۱۲] انجام شده است. دوپاس و پکر<sup>۶</sup> [۱۳] با مطالعه خواص استاتیکی و مکانیکی ماسه-سیمان به منظور بهسازی ماسه و جلوگیری از وقوع روانگرایی نشان دادند که با افزایش مقدار چسباننده سیمانی، چسبندگی خاک افزایش می‌یابد و افزودن ۰.۵٪ سیمان پرتلند ۲۰۰-۳۰۰ کیلو پاسکال چسبندگی در خاک ماسه‌ای تولید می‌کند. کلاف و همکاران<sup>۷</sup> [۱۴] اثر سیمانی شدن مصنوعی و طبیعی را در کالیفرنیا مطالعه 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 کوچک‌تری ظاهر شد. همچنین تأثیر ماده سیمانی بعد از گسیختگی به صورت چسبندگی باقی ماند و مقاومت کششی ماده سیمانی شده در حدود ۱۰ برابر مقاومت فشاری تک‌محوری

- 1 Michalowski & Čermák
- 2 Yetimoglu & Salbas
- 3 Yetimoglu et al.
- 4 Ibraim & Fourmont
- 5 Viswanadham
- 6 Dupas and Pecker
- 7 Clough et al.

- 8 Filz and Mitchell
- 9 Miller & Rifai
- 10 Morel & Gour
- 11 Heineck et al.

می‌شود: نخست آب موجود در خاک هنگام یخ‌زدگی نسبت به حالت اولیه، ۹ درصد اضافه حجم پیدا می‌کند. دوم آنکه دلیل مهم‌تر، حرکت رطوبت از اعماق خاک یخ‌زده، به سمت جبهه در حال یخ‌زدن است. هنگامی که خاک اشباع در معرض دماهای کمتر از انجماد قرار می‌گیرد، بخشی از آب درون حفرات خاک به‌صورت یخ، منجمد می‌شود، یعنی ذرات یخ در حفرات تشکیل می‌شود. برای جایگزینی مقدار آب ازدست‌رفته در اثر یخ‌زدگی و برای تغذیه ذرات یخ به‌صورت تجمعی، آب از قسمت‌های عمیق‌تر و گرم‌تر مکیده می‌شود. همین‌که ذرات کوچک یخ رشد می‌کنند، می‌توانند با هم تماس پیدا کرده و تشکیل قطعات بزرگ‌تری به نام عدسی یخ<sup>۲</sup> در جهت عمود بر جریان آب بدهند [۳۴]. با تشکیل عدسی یخی، ناحیه‌ای از یخ که تقریباً عاری از خاک است، تشکیل می‌شود. جداسازی حاصل از این عدسی‌های یخی، عامل اصلی ایجاد تورم ناشی از یخ‌زدن در خاک‌ها است [۳۵]. تورم ناشی از یخ‌زدن تنها زمانی رخ می‌دهد که شرایط زیر فراهم باشد:

- ۱) آب کافی در دسترس باشد به‌عبارت‌دیگر سطح آب زیرزمینی بالا باشد (کمتر از حدود ۳ متر) [۳۶].
- ۲) دمای خاک به زیر صفر درجه سانتی‌گراد برسد.
- ۳) خاک به یخ‌زدن حساسیت داشته باشد. و به‌طورکلی خاک شرایط لازم برای رشد عدسی‌های یخی را داشته باشد [۳۷]. در فصل گرما و در نتیجه افزایش دما، عدسی‌های یخ آب می‌شوند که نه‌تنها تخلخل خاک را افزایش و سطوح تماس بین ذرات را کاهش می‌دهند، بلکه باعث کاهش مقاومت برشی در نتیجه افزایش رطوبت نیز می‌شوند [۳۸]. هنگام ذوب عدسی‌های یخی، درصد رطوبت خاک سطحی افزایش شدیدی دارد که این امر به کاهش ظرفیت باربری آن می‌انجامد.

## ۲-۲- خاک‌های حساس در برابر یخ‌زدن

خاک‌های حساس در برابر یخ‌زدن عبارت‌اند از: ماسه خیلی ریزدانه، لای و خاک رس با نشانه خمیری کمتر از ۱۲. حفرات این نوع خاک‌ها از طرفی به‌اندازه کافی کوچک هستند تا خاصیت مویینه در آن‌ها برقرار شود، از طرف دیگر اندازه این خاک‌ها آن‌قدر ریزدانه نیستند که به علت کوچک بودن حفرات آن‌ها، غیرقابل نفوذ باشند. در جدول ۱ میزان حساسیت خاک‌ها در برابر یخ‌زدن نشان داده شده است [۳۶]. به‌طوری‌که در این مرجع [۳۶] مشاهده می‌شود، شن و ماسه‌های تمیز در برابر یخ‌زدن غیر حساس هستند. این نوع خاک‌ها معمولاً قسمت اعظم مقاومت خود را در موقع آب شدن

لای رودخانه ای [۲۴]، رس لای دار [۲۵]، رس [۲۶] و نیز بتن آسفالتی [۲۷] ارائه شده است. به هر حال مطابق بررسی‌های جامع صورت گرفته به میزان کمتری به اثر همزمان تثبیت شیمیایی خاک ماسه ای با سیمان و تسلیح آن با الیاف تحت اثر همزمان دوره‌های عمل‌آوری و یخبندان-ذوب آب پرداخته شده است. بر همین اساس، در مطالعه حاضر در قالب انجام آزمون‌های آزمایشگاهی متعدد و با صرف چندین ماه زمان، اثرات همزمان افزودن سیمان و الیاف به خاک ماسه ای ریزدانه بدانه بندی شده و دوره‌های یخبندان-ذوب به کمک انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری نامحصول<sup>۱</sup> UCS مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در خصوص ضرورت انجام این تحقیق بایستی خاطر نشان کرد که با توجه به وضعیت اقلیمی کشور ایران و بروز سالیانه یخبندان در اغلب مناطق آن [۲۸-۲۹]، رفتار خاک‌های ماسه ای در مقابل بارگذاری‌های ناشی از تغییرات دمایی و دوره‌های یخبندان و ذوب، بارها مطالعه شده است [۳۰-۳۳]. این خاک‌های ماسه ای در سواحل کشور، برخی مواقع در دیواره‌های گودبرداری‌ها و زیر پی‌ها و در مواقعی در بستر راه‌ها قرار گرفته‌اند. در واقع در کمتر مطالعه‌ای از تحقیقات قبلی، اثر توامان چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن همزمان با افزودن الیاف بازیافتی و سیمان به خاک ماسه ای بدانه بندی شده بررسی شده است. بحث مطالعه افزودن الیاف به خاک در تحقیقات قبلی وجود دارد، ولی اغلب موضوع اصلی آنها بررسی اثر چرخه‌های یخبندان-ذوب نیست، یا نوع خاک یا نوع الیاف یا روش شناسی مطالعات قبلی، به کلی متفاوت با موضوع این تحقیق است.

## ۲- روش شناسی مطالعه حاضر

در مطالعه حاضر آزمون‌های آزمایشگاهی متعددی برای بررسی اثرات چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن بر مقاومت و سختی خاک‌های ماسه ای تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با الیاف بازیافتی نایلونی ساخته شده است. افزودن الیاف به خاک به آسانی صورت می‌گیرد و به دلیل توزیع تصادفی الیاف، در همه جای نمونه خاک وجود خواهند داشت. همچنین به دلیل بازیافتی بودن، الیاف مصرفی هزینه کمی خواهند داشت و کاملاً اقتصادی است. از طرفی الیاف نسبت به دیگر روش‌های بهسازی خاک‌ها، سازگاری بهتری با محیط زیست دارند.

## ۲-۱- تورم در اثر یخ‌زدگی

در اثر یخ‌زدگی خاک‌ها متورم می‌شوند و این تورم از دو پدیده ناشی

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک‌ها از نظر حساسیت در برابر یخ زدن [۳۶].

Table 1. Classification of soils in terms of sensitivity to freezing [36].

گروه	مشخصات خاک	توصیف حساسیت خاک
F1	خاک‌های شنی حاوی ۳ تا ۲۰٪ مواد ریزتر از ۰/۰۲ میلی‌متر	حساسیت کم (غیرحساس)
F2	خاک‌های ماسه‌ای حاوی ۳ تا ۱۵٪ مواد ریزتر از ۰/۰۲ میلی‌متر	حساسیت متوسط
F3	خاک‌های شنی حاوی بیش از ۲۰٪ مواد ریزتر از ۰/۰۲ میلی‌متر خاک‌های ماسه‌ای حاوی بیش از ۱۵٪ مواد ریزتر از ۰/۰۲ میلی‌متر خاک‌های رسی با دامنه خمیری بیش از ۱۲٪	حساسیت زیاد
F4	لای‌ها و لای‌های ماسه‌دار، ماسه ریزدانه لای‌دار حاوی بیش از ۱۵٪ مواد ریزتر از ۰/۰۲ میلی‌متر خاک‌های رسی با نشانه خمیری کمتر از ۱۲٪	حساسیت خیلی زیاد

جدول ۲. خصوصیات خاک‌های حساس در برابر یخبندان [۳۶].

Table 2. Characteristics of sensitive soils against freezing [36].

ضریب یکنواختی $C_u$	درصد وزنی بحرانی ذرات کوچک‌تر از ۲۰ میکرون
۵	۱۰
۱۵	۳

می‌شود، برحسب درصد وزنی بحرانی ذرات کوچک‌تر از ۲۰ میکرون و به تناسب ضریب یکنواختی آن‌ها، در جدول ۲ نشان داده شده است. این ضریب از این رابطه به دست می‌آید:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

که در آن  $D_{60}$  و  $D_{10}$  ابعاد (قطر) دانه‌هایی هستند که به ترتیب ۶۰ و ۱۰ درصد وزنی، مواد رد شده در آزمایش دانه‌بندی داشته باشند.

چنانچه ضریب یکنواختی خاک  $C_u$  بین ۵ و ۱۵ باشد، درصد بحرانی ذرات کوچک‌تر از ۲۰ میکرون با درون‌یابی خطی محاسبه می‌شود. تعویض مصالح حساس در برابر یخبندان، در عملیات خاکریزی بستر روسازی و یا در

یخ‌ها حفظ می‌کنند. از طرف دیگر لای خطرناک‌ترین مصالح از نقطه نظر تورم در اثر یخ زدن هستند. این نوع خاک‌ها در موقع آب شدن یخ‌ها، به میزان قابل توجهی مقاومت خود را از دست می‌دهند. بر اساس مطالعات زیادی که توسط کاساگرانده انجام شد، چنین نتیجه گردید که تمام خاک‌های غیرآلی که دارای بیش از ۳٪ دانه‌های به قطر کوچک‌تر از ۰/۰۲ mm هستند، کم‌وبیش در مقابل یخ زدن حساس هستند. بر اساس این مطالعات، خاک‌های حساس در برابر یخ زدن به ۴ گروه تقسیم می‌شوند که به ترتیب به F1، F2، F3 و F4 موسوم هستند. در این طبقه‌بندی خاک F1 کمترین و خاک F4 بیشترین حساسیت را دارد. مشخصات این خاک‌ها در جدول ۱ آورده شده است [۳۶].

همچنین خصوصیات خاک‌های حساس در مقابل یخبندان، که مصرف آن‌ها در خاکریزی و بستر روسازی موجب تورم و گسیختگی سیستم روسازی

مخلوط همگن، مخلوط ها به مدت ۲۴ ساعت در کیسه های پلاستیکی نگهداری شدند. وزن هر نمونه مطابق با حجم نمونه داده شده و بیشینه چگالی خشک، که از آزمایش تراکم به دست آمده است، تعیین شده است. این وزن به چهار بخش (لایه) تقسیم شده و هر بخش در لایه های به ضخامت ۲۰ میلی متر در یک قالب PVC مسلح شده متراکم شده است. فصل مشترک لایه های داخل قالب، به خوبی خراشیده شد تا قفل و بست موثری بین لایه ها ایجاد شود و از تشکیل صفحات ضعیف اولیه ناخواسته در نمونه ها جلوگیری شود. نمونه ها برای جلوگیری از تبخیر، در مکانی با دمای حدود ۲۱ درجه سانتیگراد به مدت ۷ و ۲۸ روز زیر آب عمل آوری شدند. برخی از نمونه ها قبل از آزمایش حداکثر در سه دوره انجماد و ذوب قرار گرفتند. آزمایش انجماد - ذوب بر اساس استاندارد ASTM D 560 انجام شده است.

پدهای نمدی (موکتی) اشباع شده از آب در کف یک جعبه پلاستیکی قرار داده شده و نمونه های قالب گیری شده روی آن گذاشته شد. سپس مجموعه در فریزری قرار داده شد که دمای آن حدود ۱۶- درجه سانتیگراد و به مدت ۲۴ ساعت ثابت بود. سپس مجموعه از فریزر خارج شد و روی یک ظرف ماسه اشباع شده از آب قرار گرفت، تا آب برای نمونه ها در طول دوره ذوب ۲۳ ساعتی تامین شود. فرآیند ذوب در اتاق مرطوب با دمای ثابت در حدود ۲۱ درجه سانتیگراد انجام شد. تمام این مراحل به عنوان یک چرخه کامل در نظر گرفته می شود. در کل فرآیند انجماد و ذوب، یک دیسک فلزی ۶ نیوتنی روی بالای نمونه ها قرار داده شد. قالبی که نمونه را در حین انجماد و ذوب می پوشاند، تنش محصور کننده لایه خاک نیمه فضا را ایجاد می کند و دیسک فلزی سربار، مانند وزن روسازی بر روی بستر خاکی عمل می کند. عدسی یخ همراه با مهاجرت آب ناشی از حرارت باعث یخ زدگی می شود. علاوه بر دمای یخبندان و خاک مستعد یخبندان، آب نیز باید برای تشکیل یخبندان در دسترس باشد [۳۷-۳۹]. در طول فرآیند انجماد و ذوب، آب برای شبیه سازی مهاجرت آب از منطقه یخ زده عمیق به جبهه انجماد در دسترس نگه داشته شد. برای به حداقل رساندن ترک ها و ضعف ها در نمونه ها، همچنین جهت به حداقل رساندن صدمات وارده به نمونه حین بیرون آوردن توسط جک، سطح داخلی قالب ها قبل از آماده سازی نمونه ها با یک لایه نازک روغن (وازلین) روانکاری آغشته شد. پس از چرخه های مختلف انجماد و ذوب، از یک اکسترودر (خارج کننده نمونه) هیدرولیک برای درآوردن نمونه ها از قالب ها با سرعت ثابت به صورت عمودی از پایین به بالا استفاده شد، تا از خم شدن و ایجاد ترک های کششی جلوگیری شود. سپس

کف ترانسه ها و جایگزینی آن با مصالح غیرحساس، باید با توجه به شرایط محیطی پروژه، انجام شود. به عنوان مثال، چنانچه یکی از دو عامل دمای زیر صفر و یا حضور آب در عمق نفوذ یخبندان در منطقه طرح وجود نداشته باشد، مصرف خاک حساس در عملیات خاکی بلا مانع است؛ زیرا پدیده تورم و انبساط ناشی از یخبندان در روسازی، با حذف یکی از سه عامل یعنی خاک حساس، دمای زیر صفر، وجود آب در عمق یخبندان، ایجاد نمی شود.

### ۲-۳- انواع سیستم های اعمال چرخه یخ زدن-آب شدن

شرایط اعمال چرخه ها بر اساس استاندارد شماره ASTM D 6035-02 اندازه گیری تأثیر یخبندان و ذوب در هدایت هیدرولیکی نمونه های خاک متراکم شده و یا دست نخورده به کمک دیوار نفوذسنج است. بر اساس این استاندارد آزمایش های یخبندان و ذوب در دو سیستم انجام می شوند: الف) سیستم باز، که در آن انجماد در شرایطی رخ می دهد، که امکان به دست آوردن و یا از دست دادن رطوبت به علت وجود منبع آب خارجی و جابه جایی رطوبت و شکل گیری لیزهای یخی وجود دارد. ب) سیستم بسته، که در آن انجماد در شرایطی رخ می دهد، که از هرگونه به دست آوردن و یا از دست دادن رطوبت جلوگیری می شود. در سیستم بسته در هیچ زمانی در حین آزمایش به نمونه اجازه ی زهکشی داده نمی شود و تغییر رطوبتی در خاک رخ نمی دهد. در واقع در اثر اعمال چرخه یخ زدن-آب شدن، باز توزیع رطوبت در جبهه یخبندان صورت گرفته و در اثر این باز توزیع، افزایش درصد رطوبت و کاهش چگالی خشک خاک در سطح بالایی نمونه رخ می دهد. خاک های ریزدانه با نفوذپذیری کم، عموماً جریان آب ایجاد شده به علت انجماد را محدود می کنند، بنابراین سیستم انجماد در این گونه خاک ها مانند سیستم بسته فرض می شود [۳۴-۳۵].

### ۳- معرفی مراحل انجام آزمایش ها

#### ۳-۱- ساخت نمونه ها

برای هر ترکیب، وزن هر ماده دقیقاً بر اساس میزان رطوبت بهینه و بیشینه چگالی خشک که از آزمون تراکم پروکتور استاندارد به دست می آید، تعیین شده است. در ابتدا خاک ماسه ریزدانه و سیمان در شرایط خشک به خوبی مخلوط شدند. سپس آب را به تدریج اضافه کرده و مخلوط را فشرده داده تا از الک شماره ۱۰ برای پودر کردن خرده ها خارج شود. پس از آن، الیاف به صورت یکنواخت و تصادفی با خاک و سیمان مخلوط شد، تا یک مخلوط یکنواخت تشکیل شود. یکنواختی توزیع اجزای اختلاط یافته با مشاهده چشمی بررسی شده است. برای تبادل رطوبت بین ذرات و تشکیل



شکل ۱. قالب گیری آزمون های استوانه ای شکل جهت انجام فرآیند یخبندان-ذوب و آزمایش مقاومت فشاری.

Fig. 1. Molding of cylindrical test pieces to perform freeze-thaw process and compressive strength test.

بر روی کامپیوتر متصل به دستگاه نصب شده بود، استفاده گردید. بارگذاری تا جایی ادامه یافت، که نمو نیرو با افزایش کرنش افت پیدا کند.

### ۳-۲-۲- آزمایش یخ زدن- ذوب و نحوه ساخت نمونه‌ها

برای اعمال چرخه‌های یخ زدن-ذوب الزامات استاندارد بین المللی ASTM D 560-03 بکار گرفته شده است. قابل ذکر است که این استاندارد به منظور بررسی دوام آزمون‌های خاک-سیمان بر مبنای افت وزن حاصل از چرخه های یخ بندان- ذوب بیان شده است.

مطابق شکل ۱ برای تهیه نمونه و قالب گیری آن، از لوله PVC استفاده شد. قطر داخلی نمونه ها  $3/6$  cm و ارتفاع نمونه ها  $8$  cm است (شکل ۲). جهت ساخت نمونه‌ها، ابتدا وزن مخلوط لازم (متشکل از ماسه مطابق منحنی دانه بندی مندرج در شکل ۳) برای هر قالب، با معلوم بودن وزن مخصوص بیشینه و مشخص بودن حجم نمونه محاسبه شد. برای حفظ دانه بندی خاک و جلوگیری از جداشدگی دانه‌های آن، همچنین افزایش دقت نمونه سازی، خاک‌های الک شده، در اندازه‌های مختلف به صورت مجزا در داخل زیپ کیف نگه داری شده‌اند و خاک موردنیاز برای هر نمونه، از ترکیب کردن دوباره این خاک‌ها با یکدیگر مطابق دانه بندی، ساخته شده است. سپس میزان سیمان برای هر آزمون به خاک خشک که داخل زیپ کیف با توجه به دانه بندی، اضافه شد و این مواد تا رسیدن به همگنی کامل باهم خوب مخلوط شدند. پس از آن، مقدار رطوبت بهینه به تدریج به مخلوط به طور یکنواخت اضافه و مجدداً باهم خوب مخلوط شده است. مقدار رطوبت بهینه مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها، از مجموع  $10\%$  رطوبت بهینه برای تراکم

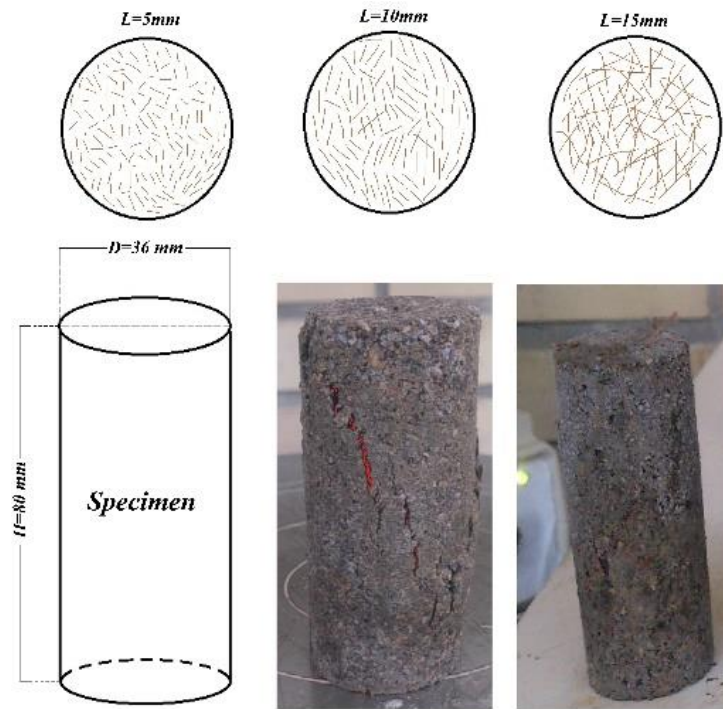
نمونه‌ها بلافاصله تحت شرایط کرنش کنترل شده با سرعت بارگذاری ثابت  $1/0$  mm/min، مطابق با الزامات استاندارد ASTM D 2166 مورد آزمایش قرار گرفته اند. برای هر ترکیب، سه نمونه برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، مورد آزمایش قرار گرفته است. برای مخفف کردن، ویژگی‌های نمونه‌ها با برخی از نمادها و اعداد نشان داده می‌شوند (به عنوان مثال، C نماد سیمان، F نماد الیاف و L نماد طول الیاف بر حسب سانتی متر است). بیش از  $350$  نمونه مختلف و بیش از  $12$  ماه زمان صرف انجام آزمایش‌ها و کسب نتایج تحقیق حاضر شده است.

### ۳-۲-۳- آزمایش‌های اصلی

#### ۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (تک محوری)

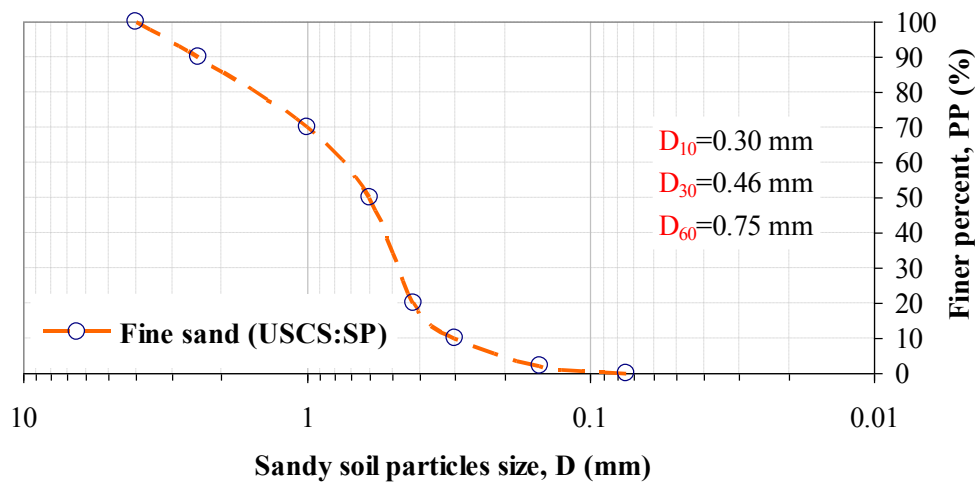
آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده یکی از آزمایش‌هایی است که به طور گسترده در روسازی و تثبیت خاک استفاده می‌شود. مقاومت فشاری محدود نشده معمولاً برای بیان کمی بهبود خاک‌ها در نتیجه بهسازی به کار می‌رود. از مزیت های این آزمایش نسبت به آزمایش برش مستقیم، اعمال یکنواخت تنش و کرنش و همچنین وقوع سطح شکست در ضعیف ترین قسمت نمونه است. این آزمایش منطبق بر استاندارد شماره ASTM D 2166-00 انجام شد و نتایج مربوط به آن ارائه و تفسیر شده است. دستگاه آزمایش تک محوری موجود در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه، دارای قابلیت اعمال بار تا  $50$  kN با سرعت‌های مختلف بارگذاری است. جهت قرائت جابجایی و نیروی اعمال شده به نمونه‌ها، از نرم افزار متصل به داده خوان<sup>۱</sup> که

1 Data logger



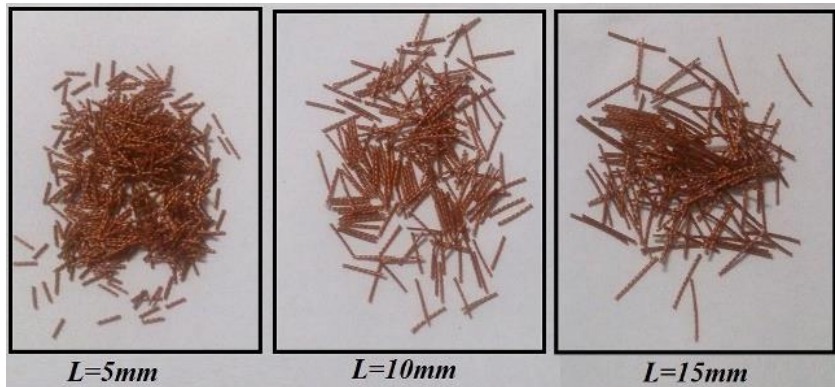
شکل ۲. نمونه معرفی ابعاد آزمون‌های استوانه‌ای، شکست نمونه‌ها و پراکندگی الیاف با طول‌های سه‌گانه.

Fig. 2. An example of the introduction of the dimensions of the cylindrical specimens, the failure of the specimens and the dispersion of the fibers with three lengths.



شکل ۳. منحنی دانه بندی خاک ماسه ریزدانه بددانه بندی شده جهت ساخت نمونه‌ها.

Fig. 3. Granulation curve of poor-graded fine sand soil for making samples.



شکل ۴. الیاف به کار برده شده جهت تسلیح خاک ماسه ای.

Fig. 4. Fibers used to reinforce sandy soil.

۲ چگونگی توزیع الیاف مورد استفاده در ساخت نمونه ها و معرفی شماتیک هندسی آنها دیده می شود. جدول ۳ مشخصات مکانیکی و فیزیکی اندازه گیری شده برای الیاف بازیافتی، خاک ماسه ای و نیز مشخصات اصلی مقاومتی سیمان تیپ ۲ بکار گرفته شده در این مطالعه را ارائه می کند. افزون بر آن، زاویه اصطکاک داخلی اندازه گیری شده از آزمایش برش مستقیم برای خاک ماسه ای این مطالعه ۳۳ درجه و میزان تنش چسبندگی آن صفر است. اعمال دوره های یخ زدن و آب شدن موجب کاهش مقاومت و سختی نمونه ها می شود. بنابراین به منظور بررسی میزان این افت، فقط سه دوره از دوره های یخزدگی-ذوب شدن که خاک در طول عمر خود می تواند تجربه کند، بررسی شده است. یکی از مهمترین نتایج این مطالعه این بود که بیشترین افت مقاومت در اثر چرخه اول اتفاق می افتد و پس از آن از افت مقاومت در چرخه های بعدی کاسته خواهد شد. بنابراین لزوم و نیازی به افزایش تعداد چرخه ها برای بررسی رفتار مقاومتی خاک نمی باشد. در واقع مقاومت نمونه خاک-سیمان-الیاف، طی چرخه های سه گانه کامل اعمال شده در حدی نیست که بتوان چرخه های بیشتری بر آن اعمال کرد و اختلاف معناداری در نتایج بدست آورد.

#### ۴- بررسی نتایج آزمایشگاهی آزمون ها

##### ۴-۱- بررسی پاسخ منحنی های تنش- کرنش آزمون ها

در این قسمت روند تغییرات و مشخصه های منحنی های تنش- کرنش، که از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده به دست آمده، مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

خاک و مقدار آب لازم برای نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ به دست آمد. سپس الیاف اضافه شده (شکل ۴) و برای بار سوم تا رسیدن به همگنی و یکنواختی مطلوب، خوب مخلوط گردید تا الیاف در جهات تصادفی توزیع شوند. هر لایه به کمک چکش و میله تفلونی که در ارتفاعات ۲۰ میلی متری علامت گذاری شده است، کوبیده می شد.

قالب حاوی نمونه توسط سلفون دورپیچی شده است و داخل زیپ کیف قرار داده می شود. بدین ترتیب از هدر رفتن رطوبت نمونه ها جلوگیری می شود. سپس زیپ کیف مذکور، در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. پس از گذشت مدت زمان مذکور، نمونه ها از درون قالب توسط جک بیرون آورده شد. سپس نمونه ها درون ظرف آب برای مدت های عمل آوری ۷ و ۲۸ روز غوطه ور شدند. پس از آن نمونه ها بر روی لایه ای از موکت اشباع که در کف سبدهی قرار داده شده، چیده شدند. بعد از آن نمونه ها همراه سبدهی درون فریزر مخصوص در دمای کمتر از ۱۶- درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت جهت اعمال یخ زدن قرار داده شدند. پس از این مدت، نمونه ها به همراه سبدهی از فریزر بیرون آورده شدند. تنش حاوی آب و نمونه ها، جهت جلوگیری از تبخیر آب، درون کیسه و روکش نایلونی به مدت ۲۲ ساعت در محیط آزمایشگاه برای اعمال شرایط آب شدن قرار داده شدند و در ادامه جهت مکیدن آب به مدت ۲ ساعت در آب قرار داده شدند. فرآیند یخ زدن و آب شدن و آب مکیدن مجموعاً یک دوره (چرخه) یخ زدن و آب شدن را تشکیل می دهند. پس از اعمال هر دوره، شماری از نمونه ها مورد آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفته است. در این پژوهش، نمونه ها در دوره های یخبندان-ذوب ۰، ۱، ۲ و ۳ مورد بررسی قرار گرفته اند. در شکل



جدول ۳. مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف بازیافتی و خاک ماسه ای و ویژگی های مقاومتی سیمان تیپ ۲ بکار گرفته شده در این مطالعه.

Table 3. Mechanical and physical characteristics of recycled fibers and sandy soil and strength characteristics of type 2 cement used in this study.

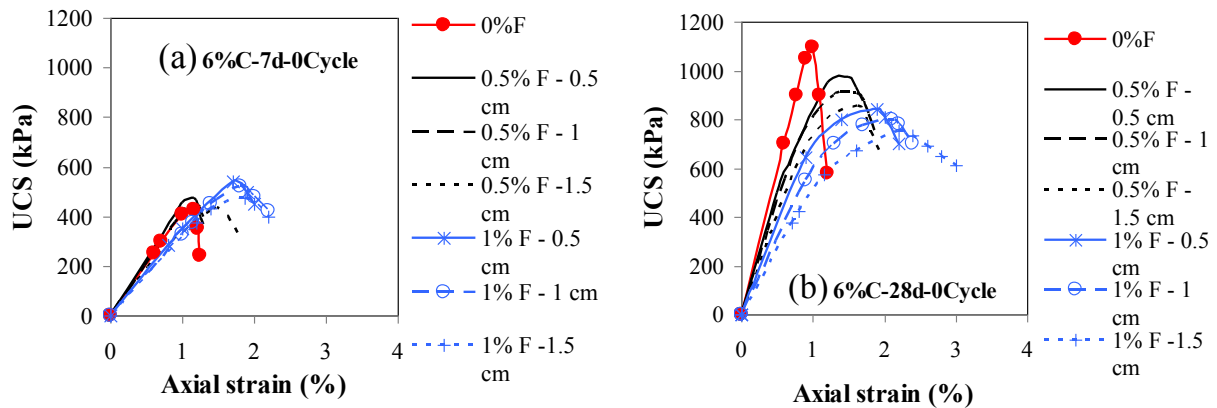
مشخصات مقاومتی الیاف بازیافتی					
درصد جذب آب %	کرنش در مقاومت نهایی %	نیروی متناظر با مقاومت نهایی N	مدول ارتجاعی N/mm <sup>2</sup>	وزن مخصوص gr/cm <sup>3</sup>	قطر الیاف mm
۱۳/۹۷	۲۷/۹۹	۲۸۴	۱۰۴/۹۹	۰/۹۱	۰/۵۴
مشخصات فیزیکی خاک ماسه ای ریزدانه SP (دانه بندی و حدود آتربرگ)					
رطوبت بهینه $\omega_{opt}$ (%)	چگالی خشک بیشینه $\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	چگالی ویژه $G_s(-)$	ضریب انحناء $C_c (-)$	ضریب یکنواختی $C_u (-)$	حدود خمیری PL و روانی LL
۱۰/۰۰	۱/۷۰	۲/۶۶	۰/۹۴	۲/۵۰	-
مشخصات فنی چسباننده سیمان پرتلند تیپ ۲					
انبساط اتوکلاو (%)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه N/mm <sup>2</sup>	مقاومت فشاری ۷ روزه N/mm <sup>2</sup>	مقاومت فشاری ۳ روزه N/mm <sup>2</sup>	مقاومت فشاری ۲ روزه N/mm <sup>2</sup>	زمان گیرش نهایی از آزمایش با سوزن ویکا (ساعت)
۰/۸	۳۱/۵۰	۱۷/۵۰	۱۰	-	۶

الیاف بیش از حد جایگزین خاک شده و رفتار نمونه را تحت کنترل خود درآورده است.

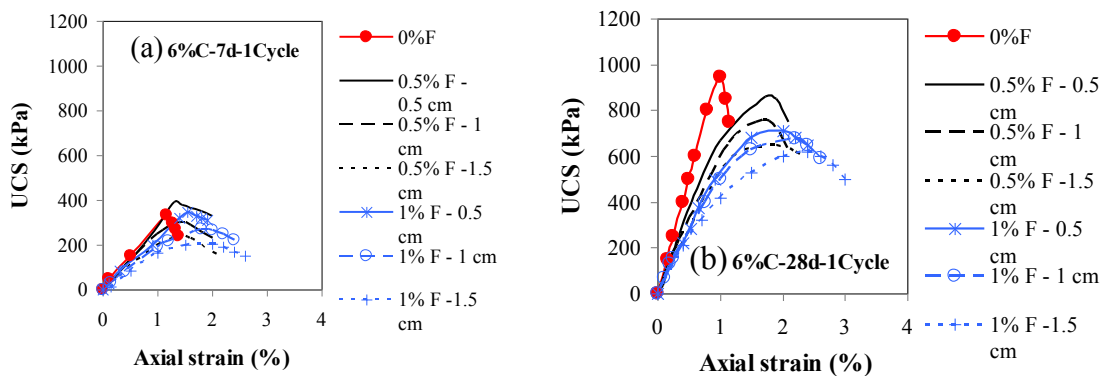
با توجه به نمودارهای ارائه شده مشاهده می شود که در یک زمان عمل آوری مشخص، با افزایش میزان سیمان به کاررفته، شیب نمودار تنش-کرنش افزایش می یابد، که بیانگر افزایش سختی و مدول ارتجاعی نمونه ها است؛ و نیز منحنی آن نقطه اوج مشخصی داشته و گسیختگی بدون وقوع کرنش و تغییر شکل زیاد رخ می دهد. افزایش کرنش متناظر مقاومت بیشینه با گذشت سن نمونه ها به چشم می خورد؛ که این رفتار بیان گر آن است که نمونه ها به انعطاف پذیری رفتار خود با سپری شدن زمان عمل آوری ادامه می دهند. نمونه ها با میزان الیاف ۰/۵٪ در تمامی سنین، در کرنش کمتری به مقاومت اوج خود می رسند و پس از رسیدن به مقاومت اوج، به سرعت مقاومت خود را از دست می دهند، این در حالی است که نمونه ها با میزان الیاف بیشتر، پس از دستیابی به مقاومت اوج، به آرامی و به تدریج مقاومت خود را از دست می دهند. این رفتار بیانگر آن است که نمونه ها با میزان الیاف کمتر، رفتار بسیار ترد دارند. با دقت در نمودارهای ارائه شده دیده می شود که مقدار مقاومت باقی مانده (پسماند) در نمونه های با مقدار الیاف بیشتر زیادتر

۴-۱-۱- منحنی های تنش-کرنش نمونه هایی که در معرض دوره های یخ زدن قرار نگرفته اند

شکل ۵ نمودار تنش-کرنش نمونه های با ۰/۶٪، ۰/۴٪ و ۰/۲٪ سیمان و مسلح به ۰/۵ و ۱ درصد الیاف، در اندازه های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی متر تحت زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روز را که در معرض دوره های یخ زدن و آب شدن قرار نگرفته اند، نشان می دهند. مطابق شکل، افزودن الیاف به خاک، در افزایش یا کاهش سختی اولیه و بعدی نمونه ها تاثیر دارد. با افزایش درصد الیاف تا ۱٪ وزنی، پیوسته کرنش گسیختگی افزایش می یابد و سطح زیر نمودار تنش-کرنش که معرف مقدار انرژی جذب شده مصالح قبل از گسیختگی یا همان طاقت نمونه است، افزایش می یابد. همچنین با افزایش میزان الیاف، نرخ افت مقاومت پس از رسیدن به مقاومت حداکثر کاهش می یابد که نشان از رفتار نرم تر در نمونه های مسلح به الیاف، نسبت به نمونه بدون الیاف دارد. در رابطه با مقاومت بیشینه، افزایش میزان الیاف در نمونه های ۷ روزه، بسته به اندازه الیاف، موجب افزایش مقاومت بیشینه می گردد؛ ولی در نمونه های ۲۸ روزه، تنها با افزایش میزان الیاف ۰/۵ CM تا ۱٪ مقاومت افزایش می یابد؛ و از آن پس مقاومت کاهش می یابد، زیرا



شکل ۵. منحنی تنش- کرنش نمونه‌های با ۶٪ سیمان و درصد‌های مختلف الیاف تحت زمان عمل‌آوری: (ا) ۷ روزه، (ب) ۲۸ روزه.  
 Fig. 5. Stress-strain curve of samples with 6% cement and different percentages of fibers under curing time: (a) 7 days, (b) 28 days.



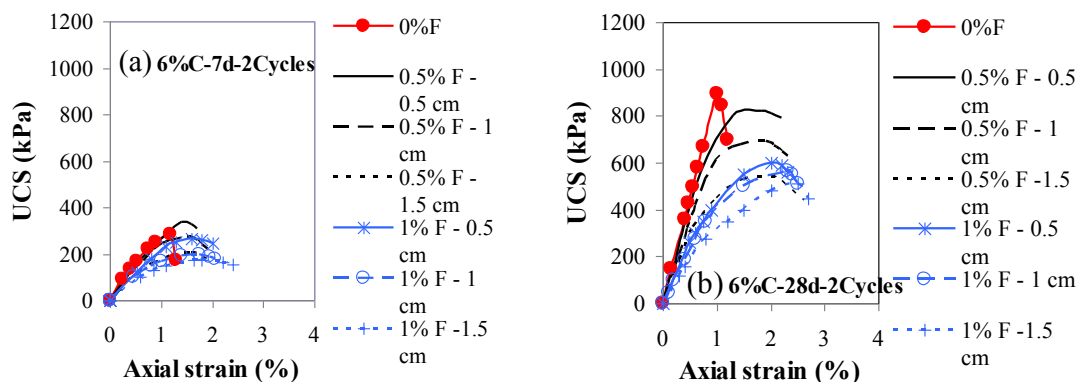
شکل ۶. منحنی تنش- کرنش نمونه‌های با ۶٪ سیمان و درصد‌های مختلف الیاف تحت زمان عمل‌آوری: (ا) ۷ روزه و (ب) ۲۸ روزه بعد از اعمال یک دوره یخ زدن و ذوب.

Fig. 6. Stress-strain curves of samples with 6% cement and different percentages of fibers under curing time: (a) 7 days and (b) 28 days after applying a period of freezing and thawing.

۴-۱-۲- منحنی‌های تنش- کرنش پس از اعمال دوره های یخ زدن- ذوب

۴-۱-۲-۱- نمونه‌های تثبیت‌شده بعد از یک دوره یخ زدن- آب شدن در شکل ۶ نمودار تنش- کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با ۶٪ سیمان و مسلح به الیاف تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، پس از اعمال یک چرخه یخ زدن و ذوب، به نمایش درآمده است. در این حالت با اعمال اولین چرخه دیده می‌شود که سختی نمونه‌ها تغییر محسوسی نیافته است و نمونه‌ها با افزایش میزان الیاف، در کرنش بزرگ‌تری به مقاومت حداکثر می‌رسند؛

است و با افزایش سن نمونه‌ها نیز مقدار مقاومت باقی‌مانده افزایش می‌یابد. نمونه‌های با ۶٪ سیمان در تمامی سنین نسبت به سایر نمونه‌ها، سختی، کرنش گسیختگی، طاقت و مقاومت باقی‌مانده بیشتری دارند. همچنین در اثر عمل‌آوری ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه، به دلیل پیشرفت فرآیند هیدراسیون سیمان در اثر زمان، سختی اولیه باگذشت زمان افزایش کمی می‌یابد و نمودار تیزتر و بسته‌تر می‌شود؛ که این تفاوت در نمونه‌های دارای ۶٪ سیمان آشکارتر است زیرا پیشرفت هیدراسیون در آن‌ها با گذشت زمان، به علت وجود مقادیر بیشتر سیمان نرخ بیشتری دارد.



شکل ۷. منحنی تنش- کرنش نمونه‌های با ۶٪ سیمان و درصد‌های مختلف الیاف تحت زمان عمل‌آوری: (ا) ۷ روزه و (ب) ۲۸ روزه بعد از اعمال دو دوره یخ زدن و ذوب.

Fig. 7. Stress-strain curves of samples with 6% cement and different percentages of fibers under curing time: (a) 7 days and (b) 28 days after applying two periods of freezing and thawing.

ادامه و در شکل ۸ نمودار تنش- کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با ۶٪ سیمان و مسلح به الیاف تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه پس از اعمال سه دوره یخ زدن و ذوب به نمایش درآمده است. مقاومت باقی‌مانده نمونه‌ها در اثر دوره سوم، نسبت به نمونه‌های در معرض دوره دوم کمتر است. دلیل اصلی رخداد این پدیده این است که، نمونه‌ها در اثر دوره سوم دچار تخلخل نسبتاً زیادی می‌شوند و دیگر استحکام اولیه خود را ندارند، از این رو مقاومت حداکثر و مقاومت باقی‌مانده (پسماند) کمتری دارند.

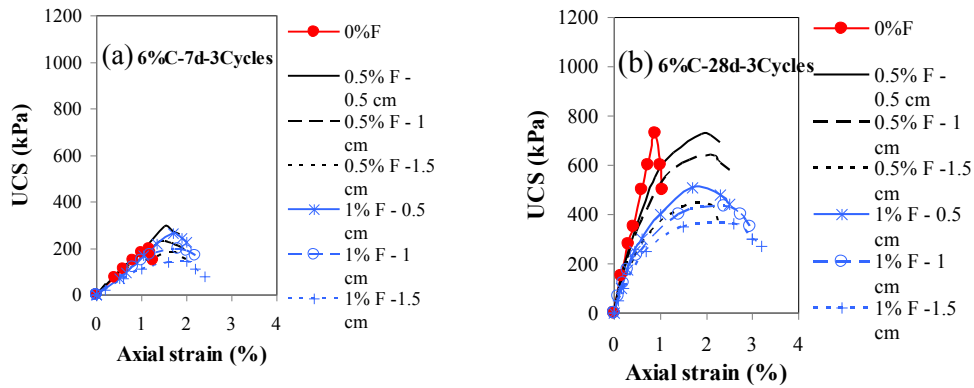
۴-۲- مقایسه مقاومت بیشینه نمونه‌های تثبیت‌شده-تسلیح شده  
 ۴-۲-۱- مقایسه مقاومت بیشینه نمونه‌ها بعد از گذشت یک دوره یخ زدن-ذوب شدن

در شکل ۹ تغییرات حداکثر مقاومت نمونه‌های خشک تثبیت‌شده با ۶٪، ۴٪ و ۲٪ سیمان و تسلیح شده با درصد‌های مختلف نخ تاپر، در اندازه‌های مختلف و تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز بعد از گذشت یک دوره یخ زدن-آب شدن ارائه شده است. با توجه به نمودارها دیده می‌شود که با گذشت زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روز مقاومت پیوسته بیشتر می‌گردد. علت این افزایش این است که با سپری شدن زمان عمل‌آوری، واکنش شیمیایی سیمان در طول زمان کامل تر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه با افزایش درصد الیاف، مقاومت کاهش می‌یابد؛ دلیل آن جایگزینی الیاف به عوض خمیر سیمان و پیوند ضعیف تر آنها با سنگدانه‌ها است. و نیز با افزایش اندازه الیاف از ۰/۵ cm به ۱/۵ cm، مقاومت روند کاهشی دارد. اختلاف بین مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح به ۰/۵

بنابراین نمونه‌ها پس از اعمال اولین چرخه، رفتار انعطاف‌پذیر خود را حفظ کرده‌اند. همچنین دیده می‌شود که نمونه‌ها مقاومت باقی‌مانده کمتری نسبت به نمونه‌های خشک دارا هستند. کمتر بودن مقاومت باقی‌مانده نمونه‌ها در برابر دوره‌های یخ زدن- آب شدن حاکی از سست شدن پیوند بین‌دانه‌ای ذرات ماسه است.

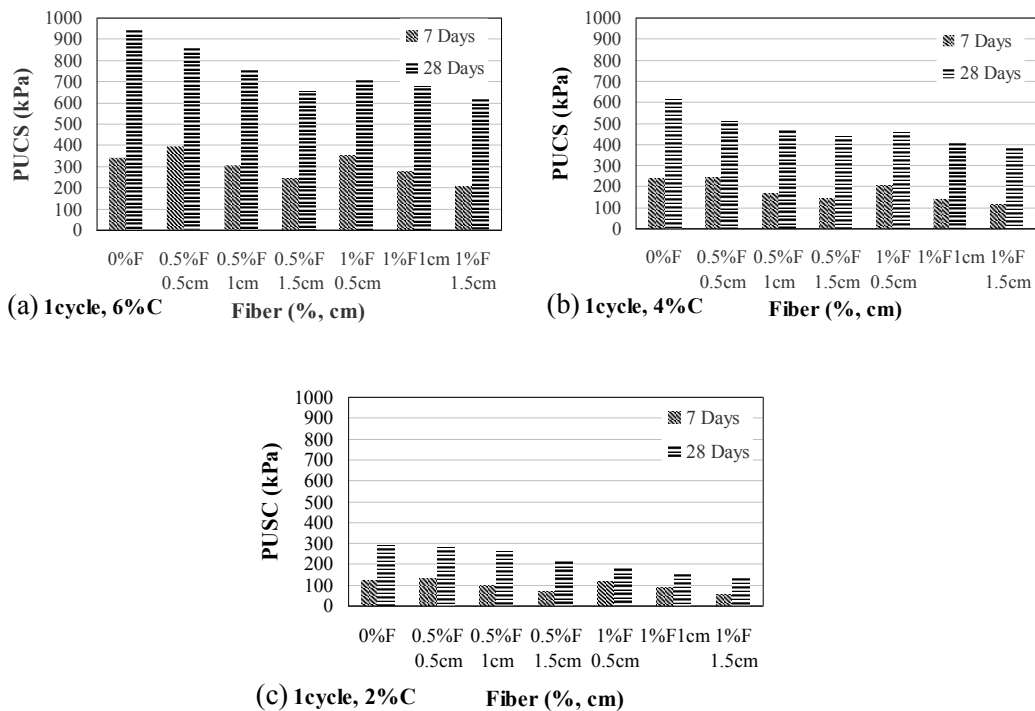
۴-۲-۱- نمونه‌های تثبیت‌شده بعد از دو دوره یخ زدن- آب شدن  
 در شکل ۷ نمونه‌ی نمودار تنش- کرنش آزمونه‌های تثبیت‌شده با ۶٪ سیمان و مسلح به الیاف تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه پس از اعمال دو چرخه یخ زدن و ذوب به نمایش درآمده است. مطابق این شکل با افزایش چرخه‌های یخ‌زدن-ذوب به دو چرخه، باز هم مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۴-۲-۳- نمونه‌های تثبیت‌شده بعد از سه دوره یخ زدن- آب شدن  
 همان‌طور که از نمودارها مشاهده می‌شود، با اعمال دو دوره یخ زدن و ذوب، سختی همچنان کاهش داشته است و نمونه‌ها همچنان که کاهش مقاومت دارند، در مقایسه با اعمال یک دوره در کرنش کمتری به اوج مقاومت خود می‌رسند، که این رفتار نشان‌دهنده ترد شدن و شکنندگی نمونه‌ها است. سطح زیر منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها در معرض دوره دوم یخ زدن نسبت به حالت ۱ دوره و خشک کمتر است، که این موضوع بیان‌گر طاقت یا همان انرژی جذب‌شده مصالح قبل از گسیختگی کامل است. در



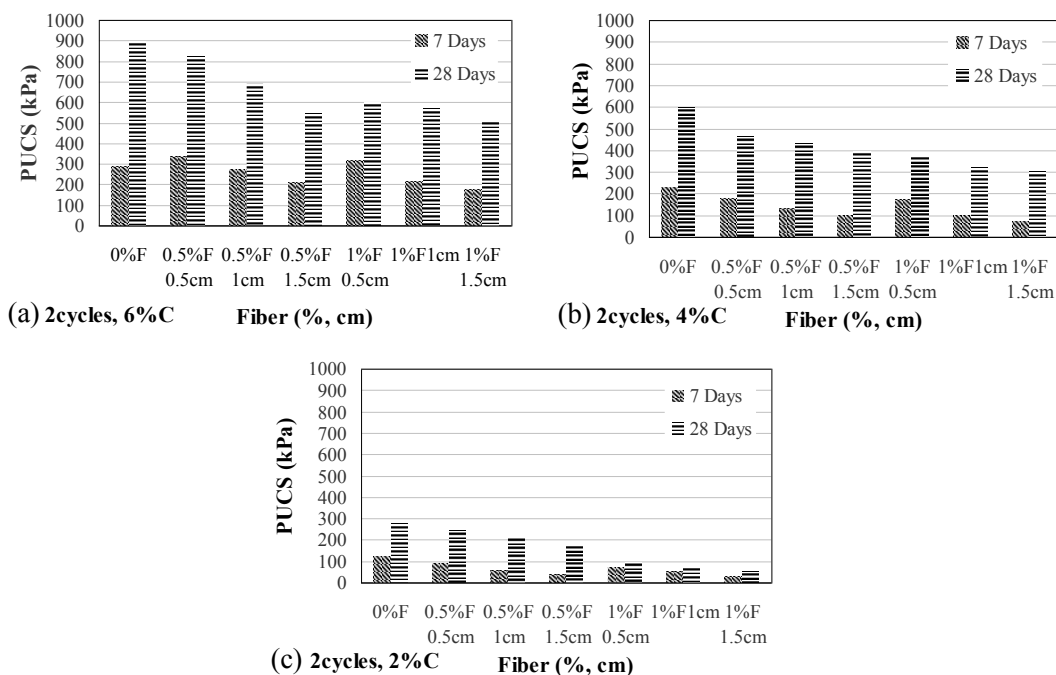
شکل ۸. منحنی تنش- کرنش نمونه‌های با ۶٪ سیمان و درصدهای مختلف الیاف تحت زمان عمل‌آوری (ا) ۷ روزه و (ب) ۲۸ روزه بعد از اعمال سه دوره یخ زدن و ذوب.

Fig. 8. Stress-strain curve of samples with 6% cement and different percentages of fibers under curing time of (a) 7 days and (b) 28 days after applying three periods of freezing and thawing.



شکل ۹. مقایسه حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی: (ا) ۶٪ سیمان، (ب) ۴٪ سیمان و (ث) ۲٪ سیمان و الیاف در اندازه‌های مختلف تحت زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه پس از اعمال یک دوره یخ زدن-ذوب.

Fig. 9. Stress-strain curves of samples with 6% cement and different percentages of fibers under curing time: (a) 7 days and (b) 28 days after applying two periods of freezing and thawing.



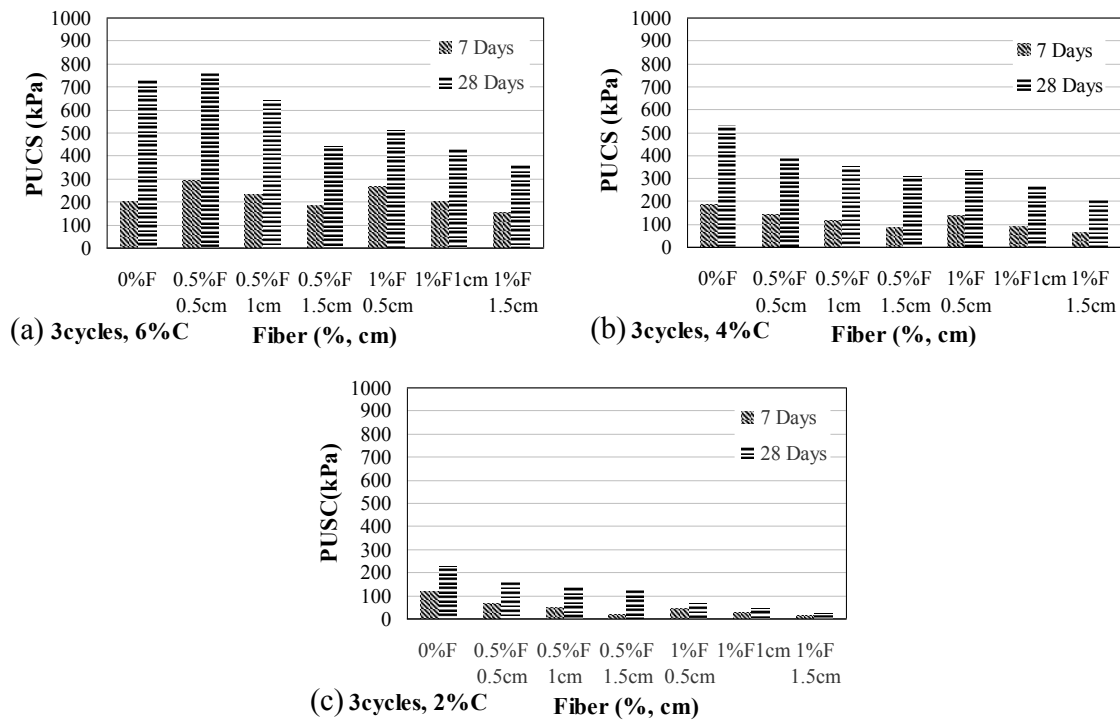
شکل ۱۰. مقایسه حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی (ا) ۰.۶٪، (ب) ۰.۴٪ و (ث) ۰.۲٪ سیمان و الیاف در اندازه‌های مختلف تحت زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه پس از اعمال دو دوره یخ‌زدن-ذوب.

Fig. 10. Comparison of the maximum unconfined compressive strength of samples containing (a) 6%, (b) 4% and (c) 2% cement and fibers in different sizes under curing time of 7 and 28 days after applying two freeze-thaw periods.

۴-۲-۲- مقایسه مقاومت پیشینه آزمون‌ها بعد از گذشت دو دوره یخ‌زدن-ذوب شدن

در شکل ۱۰ تغییرات حداکثر مقاومت نمونه‌های خشک تثبیت‌شده با ۰.۶٪، ۰.۴٪ و ۰.۲٪ سیمان و تسلیح شده با درصدهای مختلف نخ تایلر در اندازه‌های مختلف و تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز بعد از گذشت دو دوره یخ‌زدن-ذوب ارائه شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده، ملاحظه می‌گردد که با گذشت زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روز، مقاومت به صورت پیوسته بیشتر می‌شود. علت این افزایش این است که، با سپری شدن زمان عمل‌آوری، واکنش شیمیایی سیمان در طول زمان کامل می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه با افزایش درصد الیاف، مقاومت کاهش می‌یابد؛ و نیز با افزایش اندازه الیاف از ۰.۵ cm به ۱.۵ cm مقاومت آزمون‌ها کاهش می‌یابد. علت این موضوع نیز آن است که الیاف

و ۱ درصد الیاف در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، محسوس‌تر از ۷ روزه است. با توجه به افزایش مقاومت نمونه‌های ۷ روزه نسبت به نمونه خشک و عدم افزایش مقاومت نمونه‌های ۲۸ روزه، می‌توان گفت در دوره‌های کوتاه‌تر (۷ روزه)، الیاف نقش بیشتری در افزایش مقاومت دارند و در دوره بلندتر نقش آن‌ها کم‌رنگ‌تر می‌شود. علت آن، پیشرفت واکنش‌های پوزولانی سیمان در دوره‌های عمل‌آوری بلندتر است، که با تکمیل آن، افزایش مقاومت زیادی در نمونه‌ها رخ می‌دهد و سبب کاهش نقش الیاف نسبت به سیمان می‌شود. با مقایسه نمودارهای با ۰.۶٪ سیمان در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه بعد از اعمال یک دوره (چرخه) یخ‌بندان-ذوب، با نمودارهای نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲ و ۴ درصد سیمان ملاحظه می‌شود که نمونه‌های با ۰.۶٪ سیمان در هر دوره عمل‌آوری بیشترین مقاومت فشاری را دارند که ناشی از اثرات خمیر چسباننده سیمانی است.



شکل ۱۱. مقایسه حداکثر مقاومت نمونه‌های حاوی: (ا) ۶٪ سیمان، (ب) ۴٪ سیمان و (ث) ۲٪ سیمان و الیاف در اندازه‌های مختلف تحت زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه پس از اعمال سه دوره یخ‌زدن-ذوب.

Fig. 11. Comparison of the maximum strength of the samples containing: (a) 6% cement, (b) 4% cement and (c) 2% cement and fibers of different sizes under the curing time of 7 and 28 days after three freeze-thaw periods.

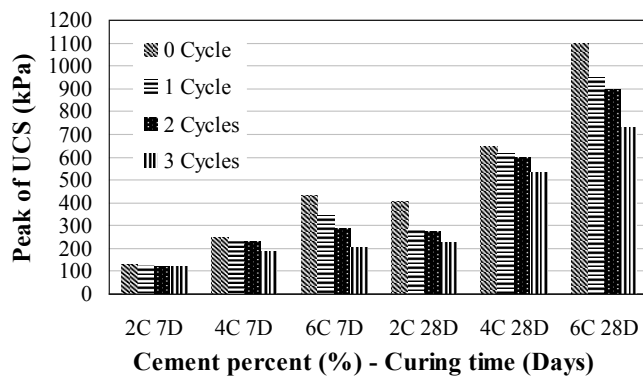
۴-۲-۴- مقایسه کلی مقاومت بیشینه نمونه‌ها پس از تحمل دوره‌های یخبندان-ذوب (بدون الیاف)

در شکل ۱۲ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با ۴، ۲ و ۶ درصد سیمان بعد از اعمال سه دوره یخ‌زدن و آب‌شدن، در مقایسه با نمونه‌هایی که صفر (نمونه خشک بدون هیچ دوره‌ی اعمالی) و یک و دو دوره یخ‌زدن-ذوب شدن بر آن‌ها اعمال شده است، تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه ارائه شده است. نمودار کاهش فراگیر مقاومت نمونه‌ها را در اولین چرخه در دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، نسبت به نمونه‌هایی که در معرض چرخه‌ها قرار نگرفته‌اند، را نشان می‌دهد. علت این پدیده، تشکیل عدسی‌های یخی و افزایش حجم نمونه‌ها است، که موجب اعمال فشار به دیواره‌های حفرات مابین ذرات خاک و در نهایت باعث گسیختگی و کاهش مقاومت می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی نسبت مقاومت نمونه‌ها در معرض دوره نخست به مقاومت نمونه‌هایی که در معرض یخ‌زدن و آب‌شدن قرار نگرفته‌اند، با افزایش سن عمل‌آوری و درصد سیمان، افزایش می‌یابد و برعکس در زمان‌های عمل‌آوری و درصد سیمان کمتر، این نسبت

به صورت نامطلوب فضای بیشتری از نمونه را اشغال می‌کنند و جایگزین اسکلت اصلی نمونه شده و از مقاومت آن می‌کاهند.

۴-۲-۳- مقایسه مقاومت بیشینه نمونه‌ها بعد از گذشت سه دوره یخ‌زدن-ذوب شدن

در شکل ۱۱ تغییرات بیشینه مقاومت نمونه‌های خشک تثبیت‌شده با ۶٪، ۴٪ و ۲٪ سیمان و تسلیح شده با درصد‌های مختلف نخ تایلر، در اندازه‌های مختلف و تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، بعد از گذشت سه دوره یخ‌زدن-آب‌شدن ارائه شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده مشاهده می‌گردد که با گذشت زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روز مقاومت نمونه‌ها همواره افزایش می‌یابد. علت این افزایش مقاومت، مشابه توجیه بخش قبلی، این است که با سپری شدن زمان عمل‌آوری، فرآیند واکنش شیمیایی سیمان، در طول زمان کامل می‌شود. اما به‌طور کلی با افزایش یک دوره یخ‌زدن، در مقایسه با شکل قبلی، مقاومت نمونه‌ها در همه درصد‌های سیمان و الیاف تقریباً کاهش یافته است.



شکل ۱۲. مقایسه حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی ۴، ۲ و ۶ درصد سیمان تحت زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه بعد از اعمال صفر، یک، دو و سه دوره یخ زدن و آب شدن.

Fig. 12. Comparison of maximum unconfined compressive strength of samples containing 4, 2 and 6% cement under 7 and 28 days curing time after applying zero, one, two and three periods of freezing and thawing.

شکل، افزایش روزهای عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز در تمامی نمونه‌ها و همه چرخه‌های یخبندان-ذوب، ازدیاد مقاومت در نمونه‌ها را ایجاد می‌کند. همچنین افزایش تعداد چرخه‌ها باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شود. از طرفی افزایش طول الیاف نیز در موارد متعددی باعث کاهش مقاومت می‌شود.

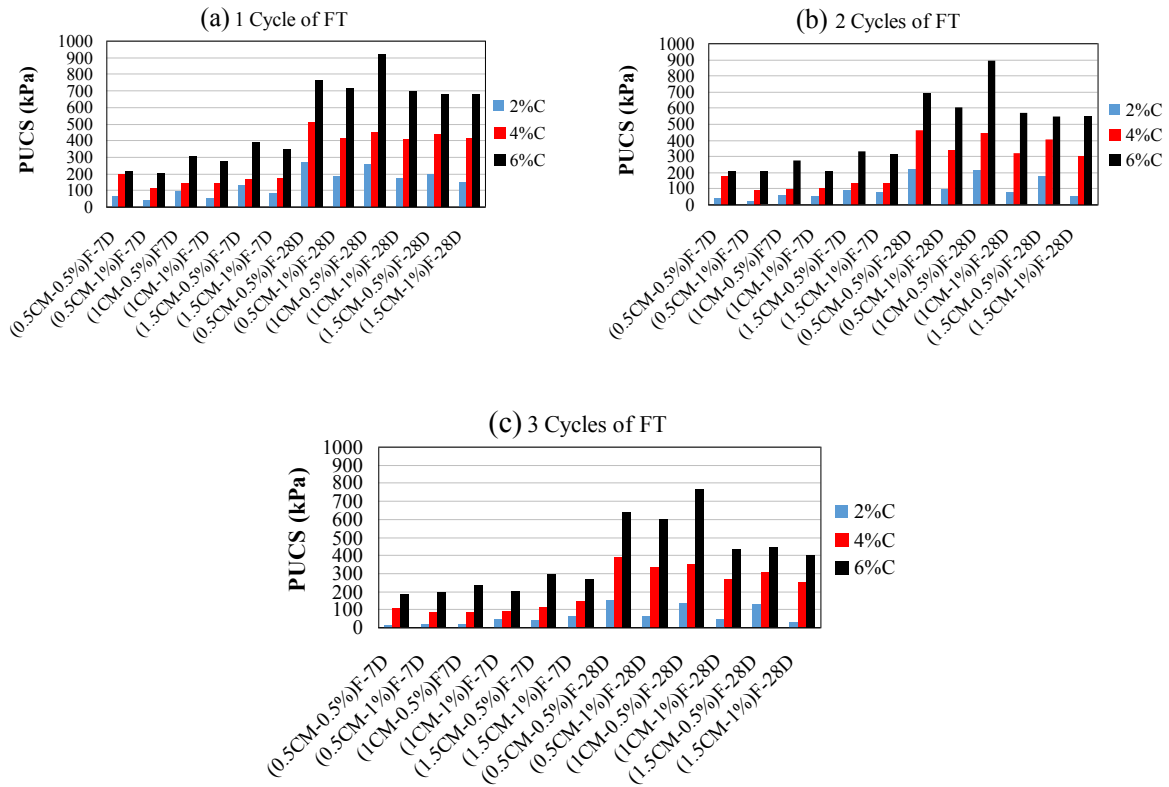
در شکل ۱۴ تغییرات حداکثر مقاومت نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با ۶٪ سیمان و مسلح به الیاف در اندازه‌های ۱/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر و درصدهای ۰، ۵/۰ و ۱۰/۰ در سنین عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، در برابر تعداد دوره‌های انجماد-ذوب، به نمایش درآمده است. با توجه به این نمودارها دیده می‌شود که با افزایش تعداد دوره‌ها، کاهش مقاومت وجود خواهد داشت. بیشترین افت مقاومت برای همه درصدهای الیاف به‌کاررفته و سنین عمل‌آوری، در اثر اعمال دوره اول رخ می‌دهد و پس از آن میزان افت مقاومت در دوره‌های بعدی کمتر می‌شود. در توضیح و تفسیر این پدیده می‌توان گفت که با اعمال اولین دوره، نمونه‌ها تحت تأثیر ناگهانی چرخه‌های مخرب یخ زدن و آب شدن قرار می‌گیرند و به شدت کاهش مقاومت می‌دهند؛ ولی در اثر دوره‌های بعدی، نمونه‌ها خود را با شرایط ایجادشده وفق می‌دهند و کاهش مقاومت کمتری دارند. نمودارهای مربوط به نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲ و ۴ درصد سیمان در ادامه ارائه شده است.

در شکل ۱۵ نمودارهای پارامتری مختلف تغییرات بیشینه پاسخ مقاومت فشاری نامحصور PUCS نمونه‌های آزمون شده در مقابل تعداد چرخه‌های یخ زدن-آب شدن، درصد سیمان، روزهای عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه و

کاهش می‌یابد. به‌طور کلی افت مقاومت در نمونه‌هایی که تحت دوره‌ها قرار گرفته‌اند، تنها ناشی از یخ‌زدگی نیست و اشباع نمونه‌ها نیز می‌تواند سبب کاهش مقاومت باشد. این نتیجه در پایان‌نامه و مقاله جعفری (و اثنی عشری) [۲۶] نیز اشاره شده است. با توجه به نمودار ملاحظه می‌گردد که اعمال دوره دوم، بازهم سبب کاهش مقاومت می‌شود. اختلاف بیشترین مقاومت کسب شده بعد از اعمال دوره دوم در مقایسه با دوره نخست، در هر دو دوره عمل‌آوری در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۶٪ سیمان، بیشتر از نمونه‌های با ۲٪ و ۴٪ سیمان است. چنانچه در کلیه شکل‌ها دیده می‌شود، روند کاهش مقاومت در نمونه‌ها، با درصدهای مختلف سیمان و در تمامی زمان‌های عمل‌آوری وجود خواهد داشت. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، همانند نمونه‌های خشک و نمونه‌هایی که تحت یک و دو دوره یخ زدن-آب شدن قرار گرفته‌اند، بعد از گذشت سه دوره، برای هر مدت‌زمان عمل‌آوری، مقدار مقاومت فشاری، وابسته به 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 روزه نیز، افزایش مقاومت دیده می‌شود.

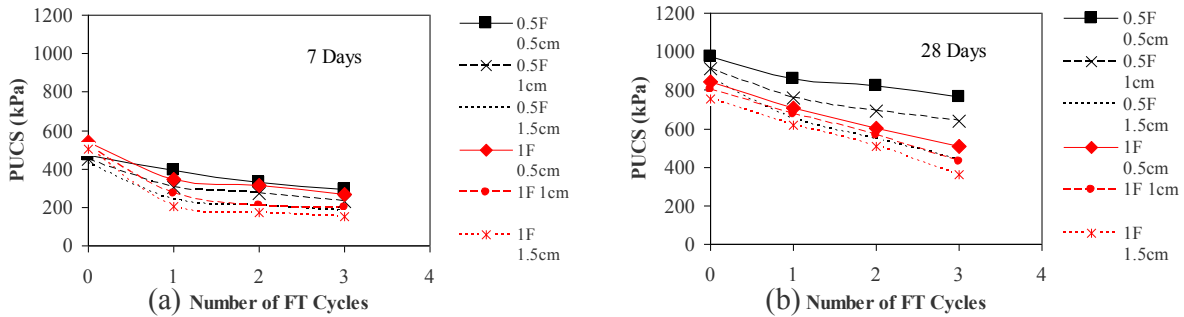
۴-۲-۵- مقایسه کلی مقاومت بیشینه نمونه‌ها پس از تحمل دوره‌های یخبندان-ذوب (با الیاف)

در شکل ۱۳ نتایج کلی اثرات دوره‌های یخبندان-ذوب بر رفتار مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای مختلف سیمان و تسلیح شده با طول و درصدهای گوناگون الیاف بازبافتی، ترسیم شده است. مطابق این



شکل ۱۳. مقایسه مقاومت فشاری تک محوری پیشینه نمونه های با درصد های اختلاط سیمان-الیاف مختلف.

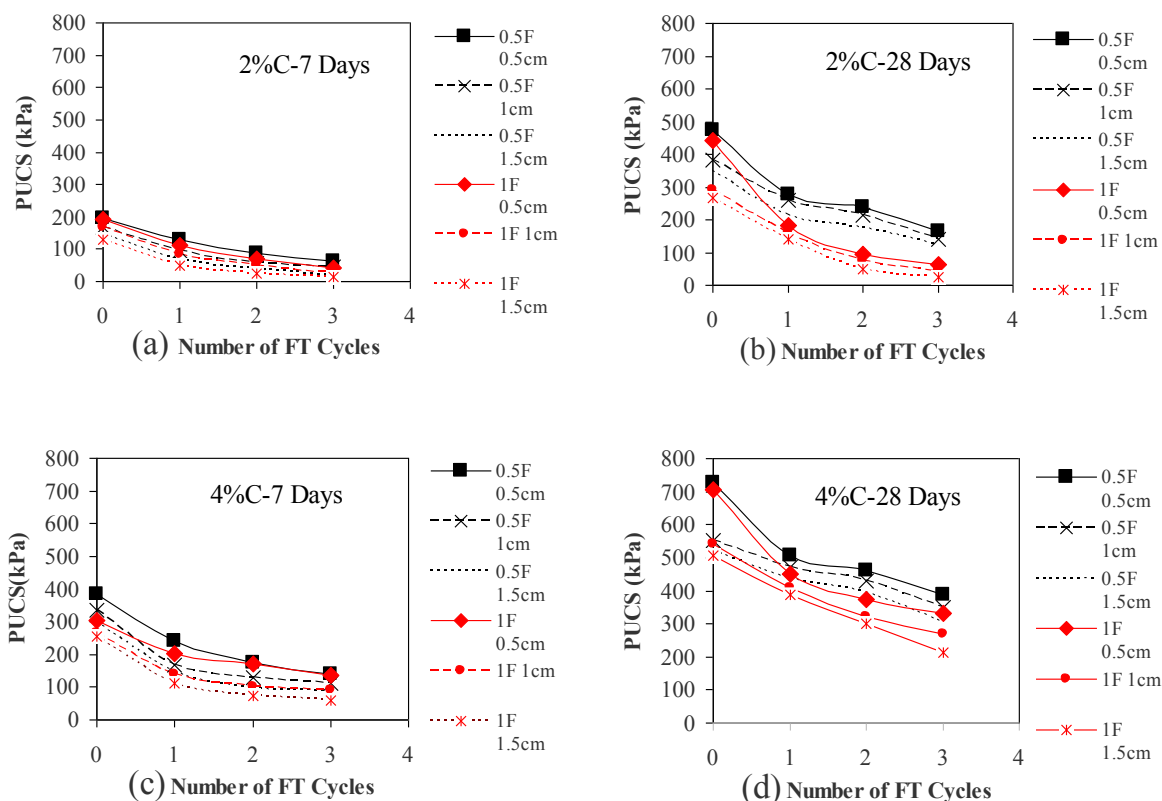
Fig. 13. Comparison of maximum uniaxial compressive strength of samples with different cement-fiber mixing percentages.



شکل ۱۴. حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده نمونه های حاوی ۶٪ سیمان و الیاف در اندازه های مختلف تحت زمان عمل آوری: (ا) ۷ روزه، (ب) ۲۸ روزه در برابر تعداد چرخه های یخ زدن-آب شدن.

Fig. 14. Maximum unconfined compressive strength of samples containing 6% cement and fibers of different sizes under curing time: (a) 7 days, (b) 28 days versus the number of freeze-thaw cycles.





شکل ۱۵. پیشینه مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی ۲٪ و ۴٪ درصد سیمان و الیاف در اندازه‌های مختلف، تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در برابر تعداد چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن.

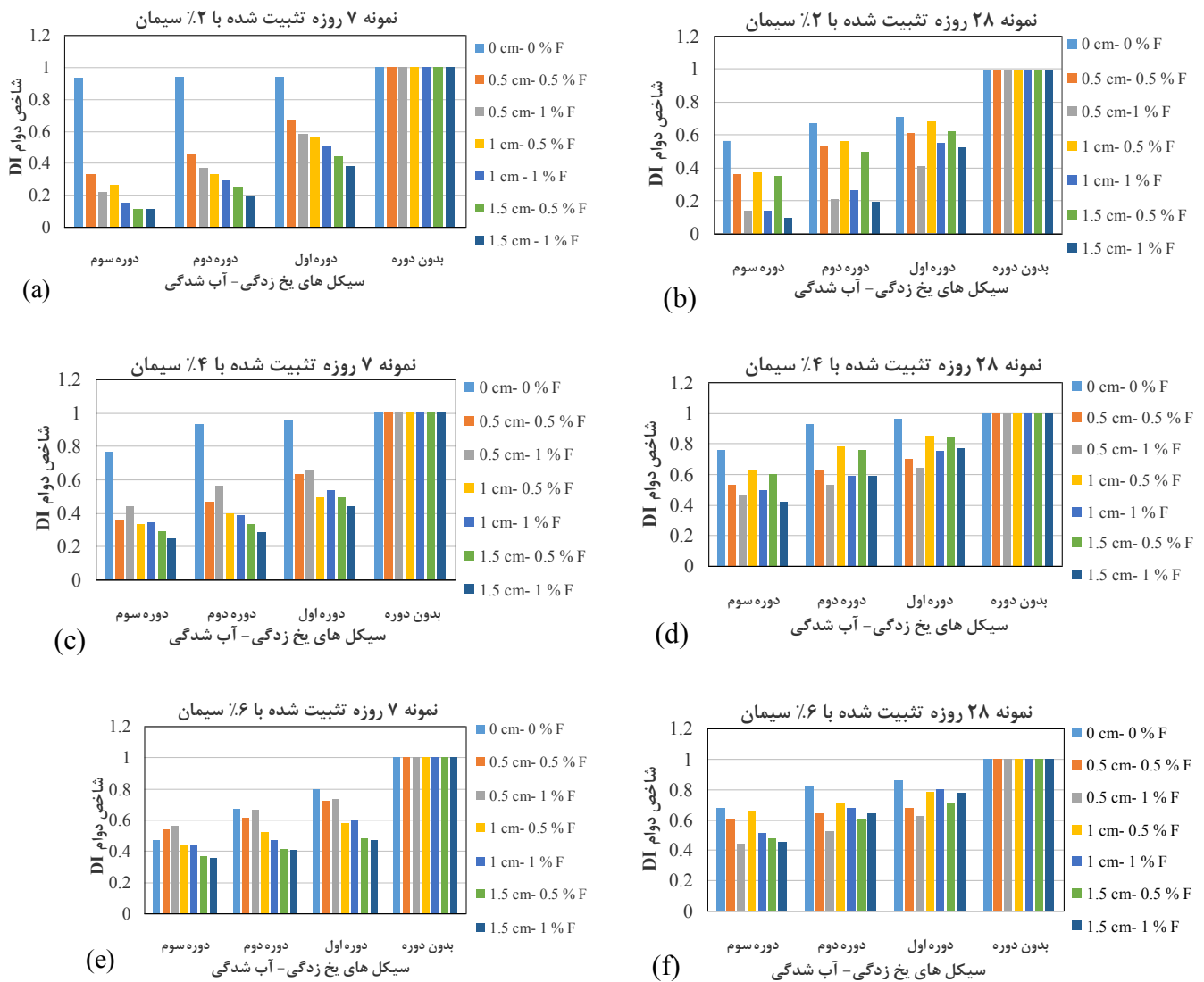
Fig. 15. Maximum unconfined compressive strength of samples containing 2% and 4% of cement and fibers in different sizes, under curing times of 7 and 28 days against the number of freeze-thaw cycles.

۳-۴- بررسی نشانه دوام (DI) آزمون‌ها

نشانه یا شاخص دوام DI نسبت مقاومت فشاری محدود نشده پس از اعمال دوره‌های یخ‌زدن و آب‌شدن به مقاومت نمونه قبل از اعمال این دوره‌ها است. مقدار شاخص دوام کمیته عددی است که مابین ۰ تا ۱ متغیر است. عدد صفر نشان‌دهنده عدم دوام نمونه است و عدد ۱ بیانگر بهترین دوام و نبود افت مقاومت در نمونه تحت اثر دوره‌های یخبندان-ذوب آزمون‌ها است [۲۶ و ۴۰]. در رابطه زیر، عبارت ریاضی معادل نشانه دوام DI داده شده است:

$$DI = \frac{UCS_{after}(F/T)}{UCS_{before}(F/T)} \quad (2)$$

درصد و طول الیاف مسلح کننده ارائه شده است. مطابق این شکل، تمامی نمونه‌ها بدون استثناء با افزایش تعداد چرخه‌ها و نیز محتوای الیاف دچار کاهش مقاومت شده‌اند. همچنین نمونه‌های با ۲٪ الیاف در هر دوی سنین عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، مقاومت نهایی کمتری، نسبت به نمونه‌های با ۴٪ سیمان از خود نشان می‌دهند. از سویی آستانه بیشترین مقاومت در تمامی آزمون‌ها نیز مختص نمونه‌های با ۰/۵۰٪ الیاف به طول ۵۰cm است. به علاوه، کمترین مقاومت متناسب با بیشترین مقدار الیاف (۱٪ الیاف به طول ۵۰cm است). علت این موضوع آن است که با افزایش میزان الیاف، به راحتی جایگزین خمیر سیمان و اسکلت تشکیل دهنده ماتریس می‌شوند و چون مقاومت پیوستگی کمتری با خمیر سیمان و سنگدانه‌ها دارند، باعث ضعف کلی مقاومت فشاری آزمون‌ها می‌شوند.



شکل ۱۶. تغییرات شاخص دوام نمونه‌ها تحت تاثیر چرخه‌های مختلف یخ زدگی-آب شدگی در سنین عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه.

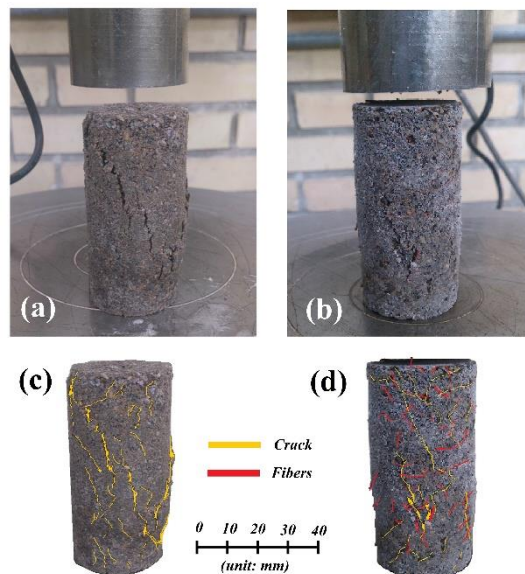
**Fig. 16. Changes in the durability index of the samples under the influence of different freeze-thaw cycles at the curing ages of 7 and 28 days.**

با میزان سیمان و زمان عمل‌آوری بیشتر، دارای نشانه DI بزرگ‌تری هستند. در واقع نمونه‌ها با میزان سیمان و زمان عمل‌آوری بیشتر، در طی آزمایش‌های یخ زدن و آب شدن دچار افت مقاومت کمتری شده‌اند.

شکل ۱۷ شامل مقایسه نحوه گسیختگی و بروز ترک در نمونه‌های ۲۸ روزه ۴٪ سیمان در حالات نمونه بدون الیاف و نمونه با ۰/۵٪ الیاف،

مقادیر نشانه دوام محاسبه شده به کمک رابطه فوق، در شکل بعدی (شکل ۱۶) برای درصدهای وزنی مختلف سیمان و الیاف، برای آزمون‌های تحت دوره‌های مختلف یخبندان-ذوب و سنین عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه ارائه و مقایسه شده است.

با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که اعمال دوره‌های متوالی یخبندان-ذوب، موجب کاهش نشانه دوام DI آزمون‌ها می‌شود. نمونه‌ها



شکل ۱۷. نمونه مقایسه گسیختگی و بروز ترک در آزمون‌های ۲۸ روزه ۴٪ سیمان: (ا و ب) بدون الیاف، (ب ود) ۰/۵٪ الیاف، ۱ cm.

Fig. 17. A sample comparison of failure and crack incidence in 28-day samples of 4% cement: (a and b) without fibers, (b) 0.5% fibers, 1cm.

در سن عمل‌آوری ۷ روزه بیش‌تر از سن ۲۸ روزه بوده است. در نمونه‌های تثبیت‌شده و مسلح به الیاف که در معرض چرخه‌های یخ‌زدن-آب شدن قرارگرفته‌اند نیز همچون نمونه‌های خشک با افزایش ۰/۵ درصد الیاف ۰/۵ سانتی‌متر در نمونه‌های ۷ روزه مقاومت فشاری محدود نشده افزایش و از آن پس کاهش می‌یابد؛ ولی در نمونه‌های ۲۸ روزه با افزایش الیاف مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. نمونه‌های دارای ۰/۶٪ سیمان نسبت به ۰/۲ و ۰/۴ درصد سیمان مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. اختلاف بین آن‌ها پس از تحمل چرخه‌ها افزایش یافته است. همچنین الیاف در نمونه‌های دارای ۰/۶٪ سیمان بهتر عمل می‌کنند. نمونه دارای ۰/۶٪ سیمان و ۰/۵٪ الیاف ۰/۵ سانتیمتر بیشترین مقاومت را در بین نمونه‌های ۷ روزه پس از اعمال دوره‌ها داراست؛ نسبت مقاومت نمونه ۷ روزه در ازای ۰/۶٪ سیمان و ۰/۵ درصد الیاف ۰/۵ سانتی‌متر به مقاومت نمونه مشابه بدون الیاف ۱/۱۵ است. لازم به ذکر است که این مقدار قبل از اعمال دوره‌های یخ‌زدن-آب شدن ۱/۵۳ است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه نمونه‌های آزمایشگاهی استوانه‌ای شکل خاک-سیمان، که با درصدهای ۰/۲٪، ۰/۴٪ و ۰/۶٪ سیمان تثبیت شده بودند، با افزودن الیاف

۱ cm را ارائه می‌کند. به طور کلی رفتار گسیختگی نمونه‌ها، با و بدون الیاف بسیار پیچیده است و به راحتی نمی‌توان آن را تفسیر کرد. اما مطابق این شکل و نظایر آن، الیاف در مسیر ترک‌ها و گسیختگی نمونه قرار می‌گیرند و یک مقاومت کششی و پیوستگی (بین فصل مشترک خمیر سیمان-سنگدانه-الیاف) افزوده به نمونه می‌دهند، که موجب کاهش تردشکنی نمونه و افزایش طاقت و کاهش سختی اولیه آن می‌شود. الیاف با پل زدن در ناحیه ترک‌خورده، مانع از توسعه سریع ترک‌ها شده و باعث شکست نرم‌تری می‌شود. ولی پس از اعمال دوره‌های یخبندان-ذوب، برخلاف آنچه در حالت خشک مشاهده شده است (یعنی بدون اثر چرخه‌ها) الیاف در سختی اولیه تأثیر داشته و با افزایش درصد الیاف، سختی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

به طور کلی سطح گسیختگی ایجادشده در نمونه‌های مسلح شده با الیاف به صورت نامشخص و زاویه آن‌ها با راستای افق بیشتر و نمونه‌ها به شکل خمیرای تبدیل شده‌اند. علت این موضوع را می‌توان این‌طور توجیه نمود که با افزایش درصد وزنی الیاف، تعداد رشته‌ها در واحد حجم بیشتر شده، در نتیجه درجه همگنی و ایزوتروپی محیط افزایش می‌یابد، به عبارتی رفتار مقاومتی محیط به یک ماده همگن و الاستیک تبدیل می‌گردد. مطابق نتایج حاصل از این مطالعه آزمایشگاهی، میزان اثربخشی الیاف درافزایش مقاومت

۴) در نمونه‌های تثبیت‌شده و مسلح به الیاف که در معرض چرخه های یخ‌زدن-آب شدن قرار گرفته‌اند نیز همچون نمونه‌های خشک با افزایش ۰/۵ درصد الیاف ۰/۵ سانتی‌متر در نمونه‌های ۷ روزه مقاومت فشاری محدود نشده افزایش و از آن پس کاهش می‌یابد؛ ولی در نمونه‌های ۲۸ روزه با افزایش الیاف مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. نمونه‌های دارای ۰/۶٪ سیمان نسبت به ۲ و ۴ درصد سیمان مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. اختلاف بین آن‌ها پس از تحمل چرخه‌ها افزایش یافته است. همچنین الیاف در نمونه‌های دارای ۰/۶٪ سیمان بهتر عمل می‌کنند. نمونه دارای ۰/۶٪ سیمان و ۰/۵٪ الیاف ۰/۵ سانتی‌متر بیشترین مقاومت را در بین نمونه‌های ۷ روزه پس از اعمال دوره‌ها داراست؛ و در بین نمونه‌های ۲۸ روزه نمونه تثبیت‌شده با ۰/۶٪ سیمان غیرمسلح دارای مقاومت بیشتری است. نسبت مقاومت نمونه ۷ روزه در ازای ۰/۶٪ سیمان و ۰/۵ درصد الیاف ۰/۵ سانتی‌متر به مقاومت نمونه مشابه بدون الیاف ۱/۱۵ است. لازم به ذکر است که این مقدار قبل از اعمال دوره‌های یخ زدن-آب شدن ۱/۵۳ است.

۵) نقش الیاف در افزایش مقاومت در نمونه‌های ۷ روزه بارزتر است. به‌طوری‌که نسبت مقاومت نمونه ۷ روزه با ۶ درصد سیمان و ۰/۵ درصد الیاف ۰/۵ سانتی‌متر نسبت به نمونه مشابه بدون الیاف پس از اعمال چرخه سوم ۱/۴۶ است. درحالی‌که این نسبت در نمونه‌های خشک ۱/۱۴ است. پس از اعمال دوره‌های یخ‌زدن-ذوب، برخلاف آنچه در حالت خشک مشاهده شده است، الیاف در سختی اولیه تأثیر داشته و با افزایش درصد الیاف، سختی افزایش می‌یابد. اعمال دوره‌های یخ زدن و آب شدن، موجب کاهش مقاومت و سختی نمونه‌ها می‌شود. بیشترین افت مقاومت در اثر اعمال دوره اول اتفاق می‌افتد و پس‌از آن از افت مقاومت آزمون‌ها در دوره‌های بعدی کاسته خواهد شد.

### منابع

- [1] J. Kaufmann, F. Winnefeld, & D. Hesselbarth, 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), 541-549 (2004).
- [2] J.K. Liu, and L.Y. Peng, Experimental study on the unconfined compression of a thawing soil. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 58, 92-9 (2009).
- [3] K.L. Lee, B.D. Adams, & J.M.J. Vagneron, Reinforced earth retaining walls. *Journal of the Soil Mechanics and*

۰/۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۱٪ وزنی تسلیح شده و تحت اثر مخرب دوره های یخ‌زدن-ذوب قرار گرفتند. خاک از نوع ماسه ای ریز بددانه بندی شده و دوره های یخ‌زدن ذوب شامل صفر دوره (نمونه های خشک)، ۱، ۲ و ۳ دوره بودند. طول الیاف نخ نایلونی بازیافتی، جهت تسلیح نمونه ها در سه اندازه ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی متری تنظیم شده است. آزمایش های متعدد مقاومت فشاری تک محوری نامحصور روی آزمون‌ها انجام شده و نتایج متنوعی به شرح موارد زیر بدست آمده است:

۱) در نمونه‌های بدون الیاف، ترک‌های مشخص و عریض مشاهده می‌گردد. در صورتی‌که در نمونه‌های مسلح به الیاف ترک‌ها ریزتر هستند و در عرض گسترده‌تری توزیع شده‌اند. نتایج مشاهدات مربوط به رفتار نمونه‌ها در هنگام بارگذاری نشان داد که در نمونه‌های مسلح شده با الیاف گسیختگی بر اثر بیرون‌زدگی الیاف رخ داده است. سطح گسیختگی ایجادشده در نمونه‌های مسلح شده با الیاف به‌صورت نامشخص و زاویه آن‌ها با افق بیشتر و نمونه‌ها به شکل خم‌های تبدیل شده‌اند. علت این موضوع را می‌توان این‌طور توجیه نمود که با افزایش درصد وزنی الیاف تعداد رشته‌ها در واحد حجم بیشتر شده، در نتیجه درجه همگنی و ایزوتروپی محیط افزایش می‌یابد، به عبارتی محیط به یک ماده همگن و الاستیک تبدیل می‌گردد.

۲) در نمونه‌های ۷ روزه خشک (بدون اعمال چرخه یخ زدن-ذوب) با افزودن الیاف مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نمونه‌های ۲۸ روزه با افزایش فقط ۰/۵ درصد الیاف به طول ۰/۵ سانتی‌متر، افزایش مقاومت فشاری محدود نشده و از آن پس کاهش آن مشاهده شده است. در تمام نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه خشک با افزایش اندازه الیاف از ۰/۵ سانتی‌متر به ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر مقاومت فشاری نمونه‌ها روند کاهشی دارد. همچنین با افزودن درصد الیاف از ۰/۵ به ۱٪ باز هم روند کاهش مقاومت دیده می‌شود. ۳) نمونه‌های با ۰/۶٪ سیمان نسبت به ۲ و ۴ درصد سیمان مقاومت بیشتری نشان می‌دهند، خصوصاً در سن ۲۸ روز که اختلاف زیادی مشاهده می‌شود. بیشترین مقاومت مشاهده شده مربوط به نمونه‌های ۲۸ روزه، با ۰/۶٪ سیمان و ۰/۵ درصد الیاف به طول ۰/۵ سانتی‌متر است. افزودن الیاف به خاک بر سختی اولیه آزمون‌ها تأثیر مشخصی دارد. اما سیمان سبب افزایش سختی اولیه و کاهش کرنش گسیختگی می‌شود. علاوه بر آن طاق‌مصلح کاهش یافته است. با افزودن الیاف به خاک تثبیت‌شده با سیمان و با افزایش میزان آن، کرنش گسیختگی، طاق‌مصلح و مقاومت باقیمانده افزایش می‌یابد. الیاف با پل زدن در ناحیه ترک‌خورده، مانع از توسعه سریع ترک‌ها شده و باعث شکست نرم‌تری می‌شود.

- 817 (1981).
- [15] G.M. Filz, and J.K. Mitchell, Design, Construction, and Performance of Soil- and Cement-Based Vertical Barriers, International Containment Technology Conference, Ralph R. Rumer and James K. Mitchell, Eds., US DoE, US EPA, and Dupont Company, Baltimore, MD, pp 63 (1995).
- [16] C.J. Miller, & S. Rifai, Fiber reinforcement for waste containment soil liners, *Journal of Environmental Engineering*, 130(8), 891-895 (2004).
- [17] J.C. Morel, & J.P. Gourc, Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements, *Geosynthetics International*, 4(5), 481-508 (1997).
- [18] K.S. Heineck, M.R. Coop, & N.C. Consoli, Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(8), 1024-1033 (2005).
- [19] J. Liu, Y. Bai, Z. Song, D.P. Kanungo, Y. Wang, F. Bu, Z. Chen, X. Shi, Stabilization of sand using different types of short fibers and organic Polymer, *Construction and Building Materials*, 253 (2020) 119164.
- [20] P. Chindapasirt, P. Jamsawang, P. Sukontasukkul, P. Jongpradist, S. Likitlersuang, Comparative mechanical performances of cement-treated sand reinforced with fiber for road and pavement applications, *Transportation Geotechnics*, 30 (2021) 100626.
- [21] Z. Gao, M. Huang, Effect of sample preparation method on mechanical behaviour of fibre-reinforced sand, *Computers and Geotechnics*, 133 (2021) 104007.
- [22] U.S. Rima, N. Beier, Effects of multiple freeze-Thaw cycles on oil sand tailings behaviour, *Cold Regions Science and Technology*, 192 (2021) 103404
- [23] M. Sharma, N. Satyam, K.R. Reddy, Effect of freeze-thaw cycles on engineering properties of biocemented sand under different treatment conditions, *Engineering Geology*, 284 (2021) 106022.
- [24] G. Cui, C. Zhu, C. Xi, S. Ma, Z. Liu, D. Zhang, Experimental study of the dynamic characteristics of Songhua River silt with fine grains under freeze-thaw Foundations Division, 99(10), 745-764 (1973).
- [4] D.H. Gray, & H. Ohashi, Mechanics of fiber reinforcement in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), 335-353 (1983).
- [5] D.R. Freitag, Soil randomly reinforced with fibers, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(8), 823-826 (1986).
- [6] R.L. Michalowski, & J. Čermák, Strength anisotropy of fiber-reinforced sand, *Computers and Geotechnics*, 29(4), 279-299 (2002).
- [7] T. Yetimoglu, & O. Salbas, A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers, *Geotextiles and Geomembranes*, 21(2), 103-110 (2003).
- [8] T. Yetimoglu, M. Inanir, & O.E. Inanir, A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay, *Geotextiles and Geomembranes*, 23(2), 174-183 (2005).
- [9] E. Ibrahim, & S. Fourmont, S., Behaviour of sand reinforced with fibres. In *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis*, Springer Netherlands, 807-818 (2007).
- [10] M. Asadi, Investigating the mechanical characteristics of soil reinforced with tire cords waste, Master's thesis, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan (2007) (in Persian).
- [11] B.V.S. Viswanadham, B.R. Phanikumar, & R.V. Mukherjee, R. V., Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(1), 73-76 (2009).
- [12] F. Mirzaei, Investigating the effect of tire cord fibers on the stress-strain behavior and shear strength of reinforced sandy soil, Master's thesis, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan (2009) (in Persian).
- [13] J. Dupas, A. Pecker, Static and dynamic properties of sand-cement, *Journal of Geotechnical Engineering*, 105(3), 419-436 (1979).
- [14] G.W. Clough, N. Sitar, R.C. Bachus, and N.S. Rad, Cemented sands under static loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 799-

- [32] A. Negahdar, S. Yadegari, S. Houshmandi, Investigation of the creep behavior of sandy clay soil under 1D consolidation test, *Journal of Civil and Environmental Engineering of Tabriz University*, 45.3(80), 65-74 (2015) (in Persian).
- [33] A. Negahdar, A. Ahmadi Barough, Mirmahdi Seyedrahimi-Niaraq, Investigation of Frozen Soil Behavior under Unconfined Compression Test, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(8), 2022, 3083-3096 (in Persian).
- [34] J.M. Konrad, M. Samson, Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 857-869 (2000).
- [35] D.Y. Wang, W. Ma, Y.H. Niu, X.X. Chang, and Z. Wen, Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay, *Cold Regions Science and Technology*, 48, 34-43 (2007).
- [36] A.M. Tabatabai, Road paving. 13th edition, academic book publication, 2007 (in Persian).
- [37] L. Bronfenbrener, The modelling of the freezing process in fine-grained porous media: Application to the frost heave estimation, *Cold Regions Science and Technology*, 56(2), 120-134 (2009).
- [38] E. Penner, Alternate freezing and thawing not a requirement for frost heaving in soils, *Canadaian Journal of Soil Science*, 41, 160-163 (1960).
- [39] D. Sheng, K. Axelsson, and S. Knutsson, Frost heave due to ice lens formation in freezing soils. 1.Theory and verification, *Nordic Hydrolgy*, Vol.26: 125-146 (1995).
- [40] C.A. Anagnostopoulos, & T.T. Papaliangas, Experimental investigation of Epoxy Resin and sand mixes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138, 841-849 (2012).
- cycles using asymmetric hysteresis, *Cold Regions Science and Technology*, 196 (2022) 103511.
- [25] Z. Tao, Y. Zhang, X. Chen, X. Gu, Effects of freeze-thaw cycles on the mechanical properties of cement-fiber composite treated silty clay, *Construction and Building Materials*, 316 (2022) 125867.
- [26] M. Jafari, M. Esna-ashari, Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition, *Cold Regions Science and Technology*, 82 (2012) 21-29
- [27] X. Xiao, J. Li, D. Cai, L. Lou, Y. Shi, F. Xiao, Evolution evaluation of high-speed railway asphalt concrete waterproofing layer during laboratory freeze-thaw cycles, *Construction and Building Materials*, 324 (2022) 126258.
- [28] G. Kamali, M. Habibi Nokhandan, investigation of the spatial and temporal distribution of ice in Iran and its role in road transportation, *Transportation Research Journal*, second year, number 2, summer (2005) (in Persian).
- [29] R. Ismaili, M. Habibi Nokhandan, G. Abbas, Evaluation of changes in the length of the growth period and ice caps caused by climatic fluctuations, a case study: Khorasan Razavi, *Natural Geography Research*, No. 73, 2010, 69-82 (in Persian).
- [30] M. Malek Dost Pishkenari, M. Azadi, M. Ghayoumi, Investigating the effects of thawing and freezing cycles on the deformation parameters of biologically stabilized sand, *Journal of Civil and Environmental Engineering, Tabriz University*, (2022) (in Persian).
- [31] F. Rezaei Moghadam, B. Jafari Nader, T. Rezaei Moghadam, Laboratory investigation of the effect of “NicoFloK” polymer additive on the compressive and tensile strength of desert and coastal wind sand in pavement layers, *Amirkabir Civil Engineering Journal*, Volume 53, Number 2, 733-774 (2020) (in Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*Y. Shams Maleki, A. Dadfarin, M. Esna-Ashari, Laboratory investigation of chemical-mechanical stabilization conditions and durability of SP sand samples under the effect of freeze-thaw periods, Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 1601-1624.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2023.22411.7964](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22411.7964)



