

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

آزاده دادفرین^۱، یزدان شمس ملکی^{۲*}، مهدی اثنی عشری^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه (نویسنده مسئول)^۱

۳- استادیار بازنشسته، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- Azadehdadfarin@gmail.com

۲- y.shamsmaleki@kut.ac.ir

۳- Esna-ashari@basu.ac.ir

چکیده:

در این تحقیق اثر تثبیت خاک با سیمان همزمان با تسلیح آن با الیاف، بر مقاومت خاک ماسه ای در معرض چرخه های یخ زدن - آب شدن، مطالعه شده است. مطالعات آزمایشگاهی به کمک آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی ترکیبات مختلف حاصل از اختلاط سیمان، الیاف و خاک صورت گرفته است. الیاف مورد استفاده از ضایعات محصولات کارخانه نخ تایر است. درصد های ۲، ۴ و ۶ برای سیمان و ۰، ۰/۵ و ۱ برای الیاف به طول های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی متر استفاده شده است. نمونه های استوانه ای با زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه و اعمال ۰، ۱، ۲ و ۳ چرخه یخ زدن-آب شدن مورد آزمایش قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهد که عمل تثبیت خاک با سیمان توأم با تسلیح آن با الیاف، باعث بهبود مقاومت قبل و بعد از اعمال چرخه های یخ زدن و آب شدن می شود.

واژگان کلیدی:

خاک ماسه ای، تثبیت با سیمان، تسلیح با الیاف، چرخه یخ زدن و آب شدن، مقاومت فشاری محدود نشده.

*^۲ یزدان شمس ملکی، استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.

ایمیل: Y.shamsmaleki@kut.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Evaluating the effect of adding recycled fibers on the strength of sandy soil stabilized with cement against freeze-thaw cycles

A. Dadfarin¹, Y. Shams Maleki^{2*}, M. Esna-Ashari³

¹-MSc of geotechnical engineering, civil engineering department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

²- Assistant Prof., Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Kermanshah University of Technology (KUT), Kermanshah, Iran.

³- Assistant Prof., Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Abstract:

In this research, the effect of soil stabilization with cement at the same time as its reinforcement with fibers has been studied on the shear strength of sandy soil exposed to freeze-thaw cycles. In order to achieve this goal, laboratory studies were carried out with the help of unconfined compressive strength tests (UCS tests) on different compounds obtained from mixing cement, fibers and sandy soil. More than 33 cylindrical laboratory models with dimensions including 3.7 cm in diameter and 1 cm in length have been made. Various modes have been observed during the failure of the samples, including shear, tensile, plastic yielding and composite failure modes. The fibers used in the present research are waste products of tire factories known as DTY. Percentages of 2, 4, and 6 for cement and 0.5, 1, and 2 for fibers with lengths of 0.5, 1, and 2 cm were used relative to the weight of dry sandy soil in making the samples. Uniaxial cylindrical samples were tested for unconfined compressive strength after 7 and 14 days curing time and under 0.5, 1, 2 and 3 freeze-thaw cycles. The results show that the act of stabilizing the soil with cement along with reinforcing it to a certain amount of fibers improves the uniaxial compressive strength before and after freezing and thawing cycles. This amount depends on the percentage of cement and the curing period. Also, adding cement in a certain curing time increases the unconfined compressive strength before and after applying the cycle, increases stiffness, reduces the ductility and toughness of the sample, and brittle failure when breaking occurs in the soil. Also, the addition of fibers to some extent improves the weaknesses caused by soil stabilization, such as reducing the failure axial strain, decreasing the residual strength and the toughness of the materials in the conditions before and after freezing and thawing.

Keywords: Sandy soil, Cement stabilization, Fiber reinforcement, Freezing and thawing cycle, Unconfined compressive strength.

مناطق که برای انجام ساخت و سازهای حوزه مهندسی عمران مورد استفاده قرار می‌گیرد، در طول زمان به شدت تحت تاثیر تغییرات محیطی گوناگون هستند. از مهم ترین این تغییرات، دگرگونی های دمایی است. تغییرات دمایی منجر به بروز چرخه های یخ زدگی-آب شدگی می‌شود. به هر حال، یکی از مشکلات موجود که به خصوص در مناطق سردسیر، دارای اهمیت به‌سزایی است، تورم ناشی از یخبندان و سرانجام کاهش مقاومت و ظرفیت باربری خاک‌ها به علت افزایش حجم ناشی از یخ زدگی است. یخ‌زدن و آب‌شدن یک پدیده آب و هوایی است که خواص اصلی مکانیکی و فیزیکی خاک‌ها را به شدت تغییر می‌دهد.

در کشور ما با توجه به پراکندگی جغرافیایی، مناطق زیادی وجود دارد که خاک‌ها و سنگ‌ها در معرض یخ‌زدن و آب‌شدن های متوالی قرار می‌گیرند. توجه به خسارات ناشی از این پدیده و استفاده از راهکارهای پیشگیری مناسب، در این مناطق ضروری است. در این زمینه، فرآیندهای بهسازی خاک توسط مواد تثبیت کننده و یا مصالح مسلح کننده، جز روش های اصلی مقابله با اثرات یخ‌زدگی-آب شدگی است. مروری بر تحقیقات گذشته مبین آن است که بررسی‌های صورت گرفته بر تثبیت کننده‌هایی مانند سیمان و مسلح کننده‌هایی مانند الیاف به‌صورت مجزا بیشتر از اثر توامان آن‌ها است. برای نمونه بعضی محققین دریافتند 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^[۲] گزارش کردند که پس از تسلیح خاک با الیاف پلی‌پروپیلنی مجزا، افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی، طاقت و شکل‌پذیری خاک‌های چسبنده به‌وجود می‌آید.

تحقیقات گسترده‌ای در مورد شناخت و ارزیابی رفتار مکانیکی خاک مسلح به الیاف و همچنین استفاده از آن انجام شده، که می‌توان به تحقیقات لی و آدامز^[۳] گری و اوآهشی^[۴] فرینگ^[۵] اشاره کرد. در این زمینه، نتایج نشان‌دهنده اثر بهبود مقاومت فشاری، مقاومت برشی و CBR و افزایش شکل‌پذیری خاک است.

امروزه نیز مطالعات زیادی توسط محققان مختلف، پیرامون تأثیر انواع مختلف الیاف و کاربرد آن در مسلح‌سازی انواع خاک‌ها صورت گرفته، که بیشتر 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 پلی آمیدی توسط میچالوسکی و سرماک^[۶]، بررسی مقاومت برشی ماسه مسلح به الیاف پلی‌پروپیلنی با کمک آزمایش برش مستقیم توسط یتیم اوقلو و سالباس^[۷]، بررسی ظرفیت باربری یک خاک ریز ماسه‌ای مسلح به الیاف پلیمری مجزا با توزیع تصادفی که بر روی یک‌لایه رس نرم قرار گرفته است، با استفاده از آزمایش CBR توسط یتیم اوقلو و همکاران^[۸]، بررسی رفتار ماسه ریز مسلح به الیاف پلی‌پروپیلنی توسط ابرایم و فورمنت^[۹]، 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^[۱۱] با مطالعه خواص استاتیکی و مکانیکی ماسه-سیمان به‌منظور بهسازی ماسه و اجتناب از خطر روانگرایی نشان دادند که با افزایش مقدار ماده سیمانی کننده بر چسبندگی خاک افزوده می‌شود و افزودن ۵٪ سیمان پرتلند ۲۰۰-۳۰۰ کیلو پاسکال چسبندگی در خاک ماسه‌ای به‌وجود می‌آورد. کلاف و همکاران^[۱۲] 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 کوچک‌تری ظاهر شد. مشخصه‌های عمومی خاک‌های دانه‌ای مسلح شده با الیاف در پژوهش های مورل و گور^[۱۳] و و هینک و همکاران^[۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات آنان نشان می‌دهد که

^۶Michalowski & Čermák

^۷ Yetimoglu & Salbas

^۸ Yetimoglu & Inanir

^۹ Ibraim & Fourmont

^{۱۰} Viswanadham et al.

^{۱۱} Dupas & Pecker

^{۱۲} Clough et al.

^{۱۳} Morel & Gourc

^{۱۴} Heineck et al.

^۲Liu et al.

^۳Lee & Adams

^۴Gray & Ohashi

^۵Freitag

افزافه کردن الیاف، موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری مصالح می‌شود.

پارک^{۱۵} اثر چگونگی توزیع الیاف بر مقاومت ماسه تثبیت‌شده با سیمان را با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده بررسی کرد. الیاف پلی وینیل الکل (PVA) به خاک تثبیت‌شده با سیمان در ۵ لایه از پیش تعیین‌شده به‌طور تصادفی، در قالب‌های استوانه‌ای اضافه شد. چنانچه مقدار الیاف یکسانی در کل نمونه توزیع شود، نمونه دارای ۵ لایه الیاف، ۱/۵ برابر نمونه‌ی دارای یک لایه الیاف در وسط، از خود مقاومت نشان می‌دهد.

کنسولی و همکاران^{۱۶} تأثیر الیاف پلی‌پروپیلنی کشسان بر مقاومت ماسه سیمانی شده به‌طور مصنوعی را با استفاده از یک مجموعه آزمایش‌های سه‌محوری استاندارد زه‌کشی شده بررسی کردند. اضافه کردن سیمان و الیاف به‌صورت توأم، در ماسه تغییرات زاویه اصطکاک داخلی بیشینه از ۴۴ تا ۵۱/۵ درجه را ایجاد می‌کند، که در حدود افزایش مقادیر به‌دست آمده برای ترکیب الیاف به‌تنهایی است. علاوه بر آن اضافه کردن الیاف در نمونه‌های سیمانی نشده تغییری در سختی اولیه نشان نداد، که رفتاری مشابه با رفتار مشاهده‌شده توسط هینک و همکاران^{۱۷}، داشته است.

تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و نظری مختلفی در زمینه پدیده یخ‌زدگی در خاک از دیدگاه رفتار مکانیکی توسط محققین مختلف صورت گرفته است. اولین محققینی که پدیده تورم یخ زدن خاک را بررسی کردند، تاپر و بسکو^{۱۸} (۱۹۱۸) بودند. آنان اساس مطالعات پدیده تورم ناشی از یخ زدن را، به‌طور جامع پایه‌گذاری کردند.

پنر^{۱۹} تحقیقاتی را در مورد تورم ناشی از یخ زدن در خاک انجام داد و چنین نتیجه گرفت که تنها وجود یخ زدن و آب شدن برای ایجاد تورم ناشی از یخ زدن - آب شدن کافی نیست، بلکه شرایطی همچون دسترسی کافی به آب، دمای زیر صفر و خاک

حساس به یخ زدن که می‌تواند شرایط رشد عدسی‌های یخی را فراهم کند، نیز موردنیاز است.

پارامسون^{۲۰} تأثیر تنش متناوب بر مشخصه‌های خزشی خاک‌های رسی و ماسه‌ای یخ‌زده را بررسی کرد. بر اساس نتایج وی، تغییر متناوب تنش، سبب خزش بیشتری نسبت به تنش استاتیکی با شدت یکسان می‌شود. سیمونسن و ایزاکسون^{۲۱} به بررسی ضعف ایجاد شده در اثر پدیده یخ زدن در ساختار روسازی‌ها در مناطق سرد پرداختند. کی^{۲۲} و همکاران^{۲۱} به بررسی تأثیر یخ زدن - آب شدن بر مشخصه‌های مهندسی خاک لای‌دار پرداختند و تغییرات در وزن مخصوص خشک و پارامترهای مقاومتی فشار پیش‌تحکیمی را مورد مطالعه قرار دادند.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های این 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^{۲۳} و همکاران^{۲۲} اثر فرایند یخ زدن - آب شدن را بر روی خاک لای‌دار طبیعی که با خاکستر بادی و سیمان تثبیت شده بود، با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری نامحصور^{۲۴} UCS تحقیق کردند. در پایان در این تحقیق گزارش شده که با افزایش تعداد چرخه‌ها، انتشار ترک‌ها و شیارها بیشتر توسعه می‌یابد.

کریست و پارک^{۲۵} در زمینه مشخصه‌های مقاومتی خاک یخ‌زده ماسه لای‌دار و قطعات لاستیک، آزمایش‌های مختلفی از قبیل تراکم، مقاومت فشاری محدود نشده، مقاومت کششی مستقیم و مقاومت برشی مستقیم انجام دادند. براساس نتایج آنها، وزن مخصوص خشک با افزایش قطعات لاستیک کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری و کششی با کاهش دما افزایش می‌یابد؛ ولیکن با افزایش میزان لاستیک کاهش می‌یابد. اما با افزایش مقدار لاستیک مقاومت کششی کاهش می‌یابد.

^{۲۰} Parameswaran

^{۲۱} Simson & Isacson

^{۲۲} Qi et al.

^{۲۳} Altun et al.

^{۲۴} Unconfined compressive strength (UCS)

^{۲۵} Christ & Park

^{۱۵} Park

^{۱۶} Consoli et al.

^{۱۷} Heineck et al.

^{۱۸} Taber & Beskow

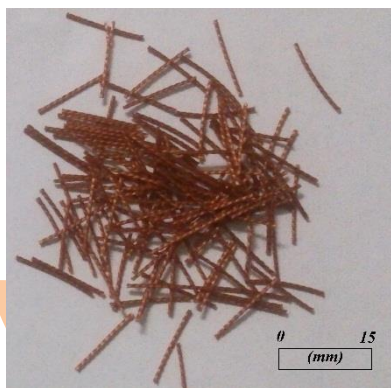
^{۱۹} Penner

۲-۱-۱- الیاف تسلیح کننده نمونه ها

در این پژوهش از نوعی الیاف حاصل از ضایعات کارخانه نخ تایر صبا، به عنوان مسلح کننده ماسه، استفاده شد. ویژگی های اصلی این الیاف شامل استحکام زیاد، مقاومت حرارتی و خستگی، مقاوم در برابر ضربه و ثبات کیفیت است. این الیاف دارای کاربرد در صنایع لاستیک وسایل نقلیه، تسمه نقاله، کمربند ایمنی خودروها، تور و قلاب ماهیگیری، شیلنگ های تقویت شده و ... هستند. الیاف مورد استفاده در این تحقیق از نوع تابیده شده^{۳۰} است که پس از بریده شدن به طول های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی متر و به درصد های ۰/۵ و ۱ درصد، نسبت به وزن خشک خاک مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۱ نمونه این الیاف که در طول های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی متری بریده شده اند، قابل مشاهده است. همچنین در جدول ۱ برخی خصوصیات مهم این الیاف آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات الیاف نخ تایر تابیده شده.

قطر mm	وزن مخصوص gr/cm ^۳	مدول الاستیسیته N/mm ^۲	نیروی متناظر با مقاومت نهایی ^۳ N	کرنش مقاومت نهایی ^۳ %	درصد جذب آب ^۳ %
۰/۵۴	۰/۹۱	۱۰۴/۹۹	۲۸۴	۲۷/۹۹	۱۳/۹۷



شکل ۱: الیاف نخ تایر تابیده شده مورد استفاده جهت تسلیح نمونه ها.

لیو و پنگ^{۲۶} [۲۴] مقاومت فشاری نامحصور خاک در حال آب شدن را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج آنان، مهم ترین عوامل مؤثر بر منحنی های تنش-کرنش و رفتار مقاومتی خاک در حال آب شدن، درصد رطوبت اولیه و دمای یخ زدن و آب شدن در بالای نمونه است. اثرات افزودن الیاف به خاک ها توسط محققین مختلفی ارزیابی شده است، که از آن جمله می توان به مطالعات لی و همکاران^{۲۷} (۲۰۲۲) [۲۵]، تائو و همکاران^{۲۸} (۲۰۲۲) [۲۶] ژیاو و همکاران^{۲۹} (۲۰۲۲) [۲۷] اشاره کرد. به هر حال، مطابق مطالعات جامع صورت گرفته توسط نویسندگان این مقاله، با توجه به اینکه در زمینه اثرات پدیده یخ زدن و آب شدن بر رفتار خاک های تثبیت شده با سیمان و به صورت توام مسلح به الیاف، بررسی های کمتری انجام شده، لذا انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه ضرورت دارد.

از سویی این تحقیق هدف مهم جنبی دیگری را علاوه بر موضوع اصلی پژوهش دنبال می کند، که کمک به حفظ محیط زیست و استفاده از مواد بازیافتی حاصل از حجم انبوه لاستیک های 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 می تواند جهت پروژه های تقویت و بهسازی خاک مورد استفاده قرار گیرد که تمرکز عمده این مطالعه بر ماده ضایعاتی نخ تایر است.

۲- مواد و روش های آزمایش

۲-۱- مواد و مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از: ۱) خاک ماسه ای، ۲) سیمان، ۳) الیاف پلیمری حاصل از ضایعات کارخانه نخ تایر. خاک مورد استفاده، از نوع ماسه بددانه 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.

^{۲۶} Liu and Peng

^{۲۷} Li et al. (۲۰۲۲)

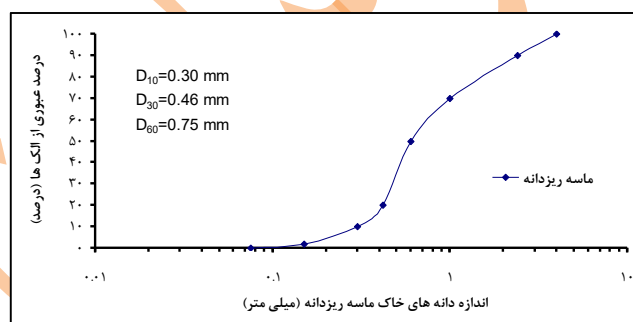
^{۲۸} Tao et al. (۲۰۲۲)

^{۲۹} Xiao et al. (۲۰۲۲)

^{۳۰}DTY=Dipped Tire Yarn

۲-۲- آزمایش‌ها

آزمایش دانه‌بندی با الک به روش خشک، طبق استاندارد شماره ASTM D ۴۲۲-۰۲ 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 ASTM D ۲۴۸۷-۰۰ نوع خاک SP است. شکل ۲ منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها.

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

جدول ۲- مشخصات خاک ماسه ای مورد آزمایش.

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

بعد از انجام آزمایش تعیین چگالی ویژه G_s براساس استاندارد ASTM D ۸۵۴-۰۲ مقدار چگالی ویژه خاک مورد نظر برابر ۲/۶۶ به دست آمد. برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک غیر چسبنده از آزمایش برش مستقیم طبق استاندارد شماره ASTM D ۳۰۸۰-۰۴ و

به روش کرنش کنترل استفاده شد. برای ماسه مورد آزمایش زاویه اصطکاک داخلی ϕ معادل ۳۳ درجه به دست آمد.

۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده^{۳۱} UCS یکی از آزمایش‌هایی است که به‌طور 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 ASTM D ۲۱۶۶-۰۰ انجام شده است. دستگاه قابلیت اعمال بار تا ۵۰ kN را با سرعت‌های مختلف بارگذاری داراست. نحوه انجام آزمایش با آن به‌صورت کرنش کنترل است. با توجه به ابعاد نمونه تک‌محوری و الزامات آزمایش تک‌محوری، سرعت اعمال کرنش در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده ۱ mm/min انتخاب شده است. جهت قرائت جابجایی 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.



شکل ۳: دستگاه انجام آزمایش تک‌محوری محصور نشده UCS.

۲-۴- آزمایش یخ زدن- آب شدن

برای اعمال چرخه‌های یخ زدن-آب شدن تا حد امکان سعی شده الزامات استاندارد شماره ASTM D ۵۶۰۰-۰۳ برآورده شود. زیرا این

^{۳۱} Unconfined compressive strength (UCS)

تبدیل فاصله بین لایه‌ها به صفحات ضعیف، عمل خراش دادن سطح هر لایه نیز انجام شد. همچنین جهت به حداقل رساندن صدمات وارده به نمونه حین 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. بدین ترتیب از هدررفتن رطوبت نمونه‌ها جلوگیری می‌شود. سپس زیپ کیف مذکور در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. پس از گذشت این مدت زمان، نمونه‌ها 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.



شکل ۴: (ب) دستگاه جک بیرون آورنده نمونه تک‌محوری از قالب. (ا) قالب نمونه، چکش و میله تفلونی جهت

کوبش. (ب) دستگاه بیرون آورنده نمونه تک‌محوری از قالب.

سپس نمونه‌ها درون ظرف آب برای مدت‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه مطابق شکل ۵-آ غوطه‌ور شدند. سپس نمونه‌ها بر روی موکت اشباع که در کف سبدهی قرار داده شده اند (شکل ۵-ب). پس از آن نمونه‌ها 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-ج). پس از این مدت، نمونه‌ها به‌همراه سبد از فریزر بیرون آورده می‌شد (شکل ۵-د). تشت حاوی آب و نمونه‌ها جهت جلوگیری از تبخیر آب درون کیسه نایلونی به مدت ۲۲ ساعت در محیط آزمایشگاه برای اعمال شرایط آب شدن مطابق شکل ۵-د قرار داده شدند و در ادامه به مدت ۲ ساعت در آب قرار داده شدند. فرآیند یخ زدن و آب شدن و آب مکیدن (جذب آب) مجموعاً یک چرخه یخ زدن و آب شدن را تشکیل می‌دهند.

استاندارد از یک سو وجود الباف در نمونه را شامل نمی‌شود. همچنین از سوی دیگر عبارت تا حد امکان استفاده شده به مفهوم امکان وجود خطای آزمایشگاهی در فرآیند و روال تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش یخ زدن-ذوب شدن است. به طور مثال طبق این استاندارد ایجاد خراش‌هایی به عرض و عمق ۳ میلی‌متر و با فاصله‌های ۶ میلی‌متر از هم قید شده که در عمل ممکن است این ابعاد دقیقاً ایجاد نشود. یا فریزر مورد استفاده امکان ایجاد شرایط سرمایی به طور ثابت کمتر از ۲۳- درجه سانتی‌گراد نداشت، در حالی که طبق استاندارد حداکثر دما برای فریزر ۲۳- درجه قید شده است. یا دمای اتاق آزمایش با رطوبت ۱۰۰ درصد تاکید شده در حالی که محیط آزمایشگاه ممکن است در ساعتی از روز به طور ثابت این میزان از رطوبت وجود نداشته باشد. شایان‌ذکر است که این استاندارد جهت بررسی دوام نمونه‌های خاک-سیمان بر اساس افت وزن ناشی از چرخه‌های یخ زدن-آب شدن بیان شده است.

۳- نحوه ساخت نمونه‌ها

برای تهیه نمونه از لوله PVC استفاده شد. قطر داخلی نمونه‌ها ۳/۶ سانتی‌متر و ارتفاع نمونه‌ها ۸ سانتی‌متر است. جهت ساخت نمونه‌ها، ابتدا وزن مخلوط لازم برای هر قالب با معلوم بودن وزن مخصوص بهینه و مشخص بودن حجم نمونه محاسبه شد. سپس میزان سیمان موردنظر برای هر نمونه به خاک خشک داخل زیپ کیف با توجه به دانه‌بندی، اضافه شد و این مواد تا رسیدن به همگنی کامل باهم خوب مخلوط شدند. پس از آن، مقدار رطوبت بهینه به تدریج به مخلوط به‌طور یکنواخت اضافه و دوباره باهم به خوبی مخلوط می‌شوند. مقدار رطوبت بهینه مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها، از مجموع ۱۰ درصد رطوبت بهینه برای تراکم خاک و مقدار آب لازم برای نسبت آب به سیمان ۵۰٪ به‌دست 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 استوانه‌ای در ۴ لایه مساوی به ارتفاع ۲۰mm در هر لایه ریخته شد. هر قسمت به کمک چکش و میله تفلونی که در ارتفاعات ۲۰mm علامت‌گذاری شده است، کوبیده می‌شد. برای اتصال و درگیری بیشتر بین لایه‌ها و جلوگیری از

در تعیین روش اعمال چرخه های یخ زدن و آب شدن، حساسیت نمونه‌هایی که تحت چرخه ها قرار گرفته بودند و پراکندگی داده‌ها در بعضی حالت‌ها، تکرارهایی صورت گرفت، بدین ترتیب که از هر حالت حداقل دو تا سه نمونه ساخته شد (جمعاً بالغ بر ۳۳۶ نمونه) و مورد آزمایش قرار گرفت. به هر حال، فرآیند ساخت و آزمون این نمونه ها، جهت تعیین صحت یافته ها، کنترل اعتمادپذیری و تکرارپذیری (روایی و پایایی) نتایج و نگارش مقاله حاضر، حدود ۱۶ ماه به طول انجامیده است.



(ب) نمونه‌های درون سبد.



(آ) قرارگیری نمونه‌ها در آب.



(د) پوشش نمونه‌های در حال آب



(ج) فریزر مورد استفاده.

شدن جهت حفظ رطوبت

شکل ۵: مراحل مختلف آماده سازی نمونه ها.

۴- ارائه نتایج پارامتری آزمایش های المانی

جهت اجرا و نیز ارائه نتایج آزمایش های 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 عمل آوری مختلف ۷ و ۲۸ روزه و ۴ حالت اعمال چرخه یخزدگی-آب شدگی است. مجموع اینها برابر حداقل ۲۸۸ حالت پارامتری می شود.

پس از اعمال هر چرخه، تعدادی از نمونه‌ها تحت آزمایش UCS قرار می‌گرفت. در این پژوهش نمونه‌ها در چرخه‌های ۰، ۱، ۲ و ۳ مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۶ حالتی از شکست برشی نمونه استوانه ای در زیر دستگاه سنجش UCS دیده می‌شود.

۴-۱- بررسی اثر تغییرات طول الیاف در درصد الیاف ثابت (نمونه های ۷ روزه)

در شکل (۷) تغییرات حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۴،۲ و ۶ درصد سیمان و ۰/۵۰٪ الیاف در اندازه‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ روز پس از یک چرخه یخ زدن-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 کاهش می‌یابد. این افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی ۰/۵۰٪ الیاف ۰/۵cm دیده می‌شود. شدت افزایش مقاومت با اضافه کردن الیاف در این حالت، در نمونه‌های حاوی ۰/۶٪ سیمان بیشتر است. به طوری که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۰/۶٪ سیمان مسلح به ۰/۵٪ الیاف ۰/۵cm، با مقدار ۳۹۱kPa ۱/۱۵ برابر نمونه مشابه بدون الیاف و ۱/۲۹ برابر نمونه مشابه با الیاف ۱cm و ۱/۶۳ برابر نمونه مشابه با الیاف به طول ۱/۵cm است. این افزایش مقاومت نمونه‌ها بر حسب میزان مشخصی از الیاف، به طور مشخص در ارتباط با بسیج شدن نیروهای کششی الیاف در ناحیه برشی است.

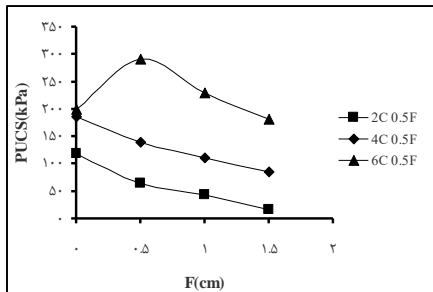


شکل ۶: نمونه شکست برشی نمونه در دستگاه تک‌محوری.

۳-۱- ترکیب نمونه‌های مورد آزمایش

در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، نمونه های مختلفی از درصد‌های مختلف مخلوط خاک با سیمان و الیاف ساخته و پس از سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه و اعمال ۰، ۱، ۲ و ۳ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن 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 ۰ و ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. ضمناً با توجه به سعی و خطاهای صورت گرفته

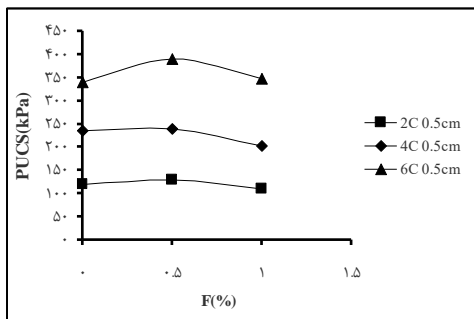
این در حالی است که در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲ و ۴ درصد سیمان، افزودن الیاف در هر اندازه و درصدی، سبب کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌گردد. همین روند در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۶٪ سیمان و مسلح به ۰.۱٪ الیاف نیز به چشم می‌خورد.



شکل ۸: بیشینه مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و ۰.۵٪ الیاف تحت زمان عمل‌آوری ۷ روزه پس از سه چرخه یخ زدن-آب شدن.

۴-۲- بررسی اثر تغییرات درصد الیاف در طول الیاف ثابت (۷ روزه)

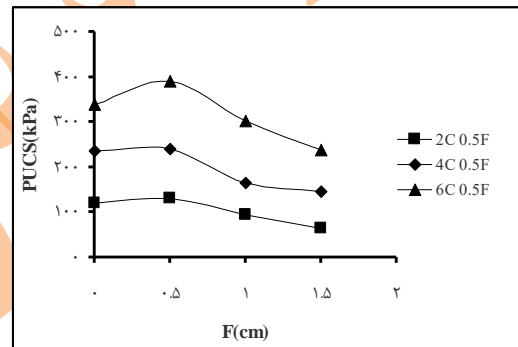
در شکل ۹ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و درصد‌های مختلف الیاف در اندازه‌های ۰.۵cm تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ روزه ارائه شده است.



شکل ۹: بیشینه مقاومت نمونه‌های با ۲ و ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۰.۵cm در زمان عمل‌آوری ۷ روزه پس از یک چرخه یخ زدن-آب شدن.

در شکل ۱۰ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و درصد‌های مختلف الیاف در اندازه‌های ۰.۵cm تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ روزه ارائه شده است. نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش درصد الیاف نخ تا ۰.۵ درصد در اندازه ۰.۵cm در نمونه‌های حاوی ۰.۶٪ سیمان، مقاومت افزایش یافته است؛ و با بیشتر شدن درصد الیاف تا ۰.۱٪ مقاومت کاهش می‌یابد.

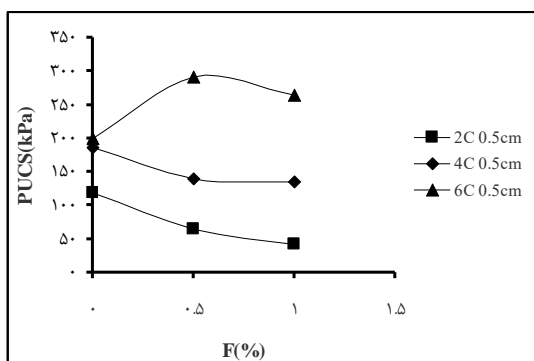
از طرفی وقتی درصد وزنی الیاف ثابت است، با افزایش طول الیاف، تعداد رشته‌های الیاف موجود در واحد حجم کاهش می‌یابد. لذا می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که با افزایش میزان سیمان، بسیج نیروهای اصطکاکی افزایش می‌یابد؛ و علت کاهش مقاومت پس از میزان مشخصی از الیاف، نبود سیمان کافی برای ایجاد درگیری الیاف با خاک 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 ۰.۱٪ الیاف، افزایش مقاومت فقط در نمونه‌های حاوی ۰.۶٪ سیمان دیده می‌شود و در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲ و ۴ درصد سیمان، با اضافه کردن ۰.۱٪ الیاف در هر اندازه‌ای، مقاومت کاهش یافته است.



شکل ۱۰: بیشینه مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲ و ۴ و ۶ درصد سیمان و ۰.۵٪ الیاف تحت زمان عمل‌آوری ۷ روزه پس از یک چرخه یخ زدن-آب شدن.

در شکل ۸ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و ۰.۵ درصد الیاف در اندازه‌های ۰.۵، ۱ و ۱.۵ سانتی‌متر تحت 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 تثبیت‌شده با ۰.۶٪ سیمان بعد از گذشت سه چرخه با افزایش الیاف مقاومت فشاری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی ۰.۵٪ الیاف ۰.۵cm دیده می‌شود. به طوری که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۰.۶٪ سیمان مسلح به ۰.۵٪ الیاف ۰.۵ سانتی‌متر با مقدار ۲۹۲ کیلو پاسکال برابر نمونه مشابه بدون الیاف و ۱/۲۷ برابر نمونه مشابه با الیاف ۱cm و ۱/۶ برابر نمونه مشابه با الیاف ۱.۵cm است.

در نمونه‌هایی که با الیاف ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری تسلیح شده‌اند، با اضافه کردن الیاف حتی تا ۰/۵٪ 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، استفاده از ۰/۶٪ سیمان برای تثبیت نمونه‌ها و ۰/۵٪ الیاف به طول ۰/۵cm است.



شکل ۱۱: بیشینه مقاومت نمونه‌های با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۰/۵cm با زمان عمل‌آوری ۷ روزه و سه چرخه یخ‌زدن-آب شدن.

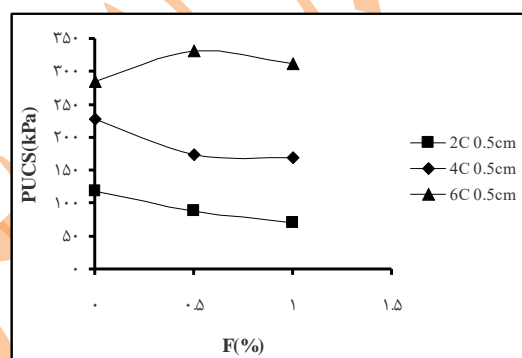
۴-۴- بررسی اثر تغییرات طول الیاف در درصد الیاف ثابت (نمونه‌های ۲۸ روزه)

در شکل ۱۲ تغییرات مقادیر بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و ۰/۵ درصد الیاف در اندازه‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر تحت زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه ارائه شده است. نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش درصد الیاف نخ تاثیر تا ۰/۵ درصد در اندازه ۰/۵cm و در درصدهای مختلف سیمان، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد.

افزودن الیاف بیش از ۰/۵٪ نه تنها افزایش مقاومت نمونه‌ها را به دنبال ندارد، بلکه باعث کاهش بیشینه مقاومت نیز می‌گردد؛ به طوری که مقاومت نمونه دارای ۰/۶٪ سیمان حاوی ۰/۵٪ الیاف، ۱/۱۳ برابر نمونه مشابه با ۰/۱٪ الیاف است؛ بدین ترتیب اثر منفی افزودن نخ تاثیر 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 باعث کاهش مقاومت در نمونه‌ها شده است؛ بنابراین می‌توان گفت مقدار بهینه الیاف در نمونه‌های با سن ۷ روز

نمونه دارای ۰/۶٪ سیمان حاوی ۰/۵ درصد الیاف ۱/۱ برابر نمونه مشابه با ۰/۱٪ 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.

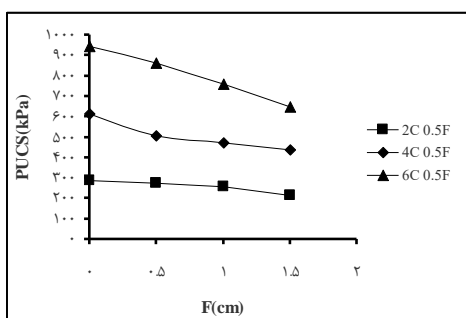
در نمونه‌هایی که با الیاف ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری تسلیح شده‌اند، با اضافه کردن الیاف حتی تا ۰/۵٪ وزنی مقاومت نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های بدون الیاف بعد از اعمال دو چرخه کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار بهینه الیاف در نمونه‌های با سن ۷ روزه که دو چرخه بر آنها اعمال شده است، استفاده از ۰/۶٪ سیمان برای تثبیت نمونه‌ها و ۰/۵٪ الیاف ۰/۵cm است.



شکل ۱۰: بیشینه مقاومت نمونه‌های با ۲ و ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۰/۵cm با زمان عمل‌آوری ۷ روز پس از دو چرخه یخ‌زدن-آب شدن.

۴-۳- بررسی اثرات تغییرات درصد الیاف در طول الیاف ثابت (نمونه‌های ۷ روزه)

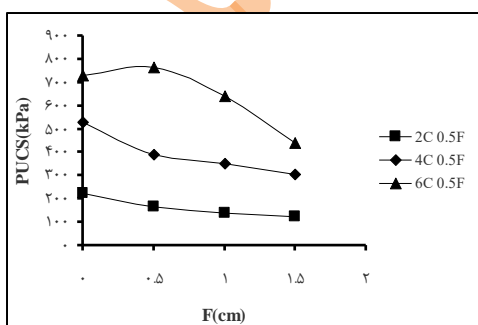
در شکل ۱۱ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و درصدهای مختلف الیاف در اندازه‌های ۰/۵cm تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ روزه بعد از سه چرخه یخ‌زدن-آب شدن ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش درصد الیاف نخ تاثیر تا ۰/۵٪ در اندازه ۰/۵cm در نمونه‌های حاوی ۰/۶٪ سیمان، افزایش مقاومت فشاری محدود نشده مشاهده می‌شود؛ و با بیشتر شدن درصد الیاف تا ۰/۱٪ مقاومت کاهش می‌یابد. نمونه دارای ۰/۶٪ سیمان حاوی ۰/۵٪ الیاف ۱/۱ برابر نمونه مشابه با ۰/۱٪ 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.



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

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

با افزایش الیاف در نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد سیمان، در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه و بعد از گذشتن سه چرخه، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد و این نشان‌دهنده اثر منفی افزودن الیاف در مقاومت نمونه‌ها در هنگام یخ زدن-آب شدن است. این کاهش مقاومت در نمونه‌های حاوی الیاف ۱/۵cm بیشتر از الیاف ۱ و ۰/۵ سانتی‌متری است. همچنین در نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سیمان و ۰/۱ 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.



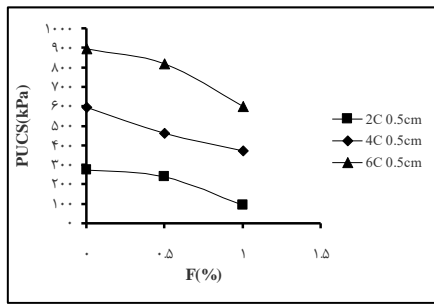
شکل ۱۳: بیشینه مقاومت نمونه‌های با ۲ و ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۰/۵٪ با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از سه چرخه یخ زدن-آب شدن.

که یک چرخه بر آن‌ها اعمال شده است، استفاده از ۰/۶٪ سیمان برای تثبیت نمونه‌ها و ۰/۵٪ الیاف به طول ۰/۵ 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 ۰/۵٪، 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 ۰/۶٪ سیمان بعد از گذشت یک چرخه همانند نمونه‌های خشک، الیاف تأثیر بیشتری بر مقاومت دارد. به عبارت دیگر در درصد سیمان مناسب‌تر، الیاف بهتر به کار گرفته می‌شود؛ بنابراین با افزایش میزان سیمان در نمونه‌هایی که چرخه یخ زدن-آب شدن بر آن‌ها اعمال شده است و بدین ترتیب الیاف نقش خود در بسیج نیروهای اصطکاکی را ایفا می‌کنند. با توجه به نمودار در بین نمونه‌های ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت بعد از یک چرخه مربوط به نمونه با ۰/۶٪ سیمان مسلح نشده با اندازه ۰/۵cm است. در بین نمونه‌های مسلح به الیاف نیز، بیشترین مقاومت مربوط به نمونه دارای ۰/۶٪ سیمان و ۰/۵ درصد الیاف است.

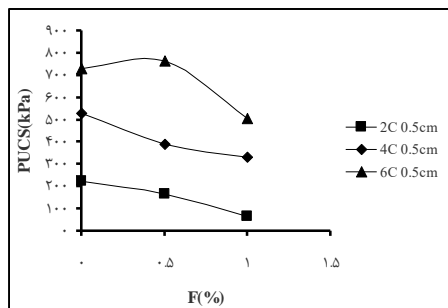
بنابراین با توجه به نمودار، با افزایش الیاف در نمونه‌های با درصد‌های مختلف سیمان در عمل‌آوری ۲۸ روزه و بعد از یک چرخه، مقاومت فشاری بهبود نمی‌یابد و این نشان‌دهنده اثر منفی افزودن الیاف در مقاومت نمونه‌ها در هنگام یخ زدن-آب شدن است. این کاهش مقاومت در نمونه‌های حاوی الیاف ۱/۵cm بیشتر از الیاف ۱ و ۰/۵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

۴-۵- بررسی اثر تغییرات درصد الیاف در طول الیاف ثابت (نمونه های ۲۸ روزه)



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

در شکل ۱۶ تغییرات بیشینه مقاومت نمونه‌های حاوی ۴،۲ و ۶ درصد سیمان و الیاف به طول ۰/۵cm در درصدهای ۱، ۰/۵ و ۱/۵ تحت زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از طی سه چرخه ارائه شده است. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف در طول ثابت ۰/۵cm با دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، مقاومت کاهش می‌یابد. در نمونه‌های مسلح شده با الیاف ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری نیز روندی مشابه دیده می‌شود.

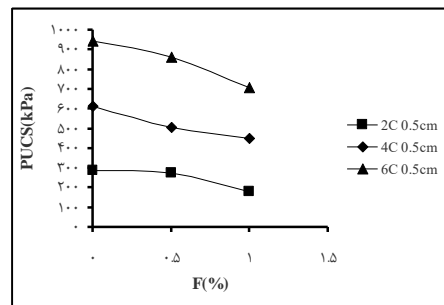


شکل ۱۶: بیشینه مقاومت نمونه‌های با ۲ و ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۰/۵cm با عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از سه چرخه یخ زدن-آب شدن.

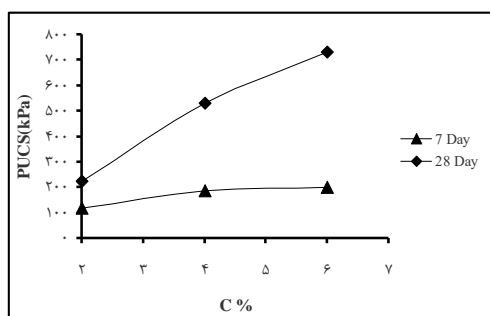
۴-۶- بررسی مقاومت نمونه‌های بدون الیاف

در شکل ۱۷ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تثبیت‌شده 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

در شکل ۱۴ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سیمان و الیاف به طول ۰/۵cm در درصدهای وزنی 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 ۰/۵cm تحت دوره عمل‌آوری، مقاومت کاهش می‌یابد. شدت کاهش مقاومت در تمامی درصدهای سیمان تقریباً ثابت است. در این حالت سیمان به‌اندازه کافی جهت ایجاد چسبندگی لازم بین الیاف و خاک و ایفای نقش الیاف وجود ندارد. در نمونه‌های مسلح شده 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.



شکل ۱۴: مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان و مسلح به الیاف ۰/۵cm در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از یک چرخه یخ زدن-آب شدن. در شکل ۱۵ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سیمان و الیاف به طول ۰/۵cm 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 ۰/۵cm تحت دوره عمل‌آوری مقاومت کاهش می‌یابد. در نمونه‌های مسلح شده با الیاف ۱ و ۱/۵ سانتی‌متری نیز روندی مشابه دیده می‌شود.



شکل ۱۸: بیشینه مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان با زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه و سه چرخه یخ‌زدن-آب شدن.

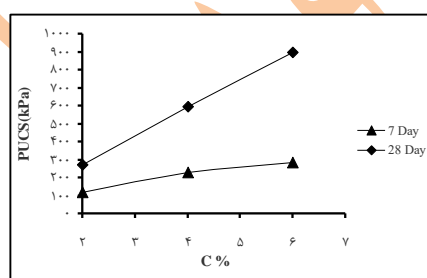
۴-۷- بررسی روند تغییرات مقاومت، کرنش گسیختگی و

مدول ارتجاعی نمونه‌ها با سن عمل‌آوری نمونه‌ها

در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نامحور 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 این شکل‌ها افزایش درصد سیمان و سن عمل‌آوری نمونه‌ها، باعث افزایش حدود ۲ تا 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 نامحور تا لحظه شکست آنهاست، کاهش می‌یابد.

به علاوه، از آنجا که شیب بخش ابتدایی منحنی‌های تنش-کرنش نمودارهای شکل‌های ۱۹ و ۲۰ معادل مدول ارتجاعی (مدول تغییرشکل یا تنش-کرنش) E نمونه‌های خاک است، مشاهده می‌شود که با افزایش طول و درصد الیاف، شیب بخش ابتدایی نمونه‌ها در سنین عمل‌آوری اولیه ۷ روزه به طور مشهودی کاهش یافته است، اما در سنین بالاتر (۲۸ روزه)، روند کاهش مدول ارتجاعی بازمهم وجود دارد، اما مقادیر آن محدودتر است. هر چند در نمونه‌های ۲۸ روزه با ۰.۶٪ سیمان (چسباننده بیشتر) روند کاهش مدول ارتجاعی و تغییرات تردی (شکنندگی) نمونه‌های دارای الیاف،

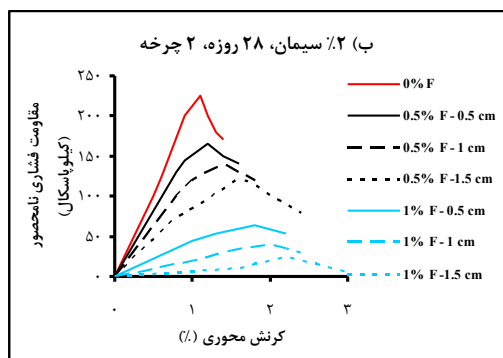
مقاومت کسب می‌کنند. با اعمال دو چرخه همچنان بیشترین مقاومت مربوط به نمونه ۰.۶٪ سیمان و سن ۲۸ روزه با مقاومت ۸۹۶ kPa است. به طوری که نمونه‌های حاوی ۰.۶٪ سیمان با زمان عمل‌آوری ۷ روزه بعد از دو چرخه مقاومت ۱/۲۵ برابر نمونه ۰.۴٪ و ۲/۴ برابر نمونه ۰.۲٪ دارا هستند. مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با ۰.۶٪ سیمان با سن عمل‌آوری ۲۸ روزه نیز ۱/۵ برابر نمونه ۰.۴٪ و ۳/۲۹ برابر نمونه ۰.۲٪ است.



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

در شکل ۱۸ تغییرات بیشینه مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲، ۴ و ۶ درصد سیمان بدون الیاف پس از اعمال سه چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن 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، بعد 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.

سریع تر و واضح تر از نمونه های با ۰.۶٪ سیمان (۷ روزه) رخ داده است.

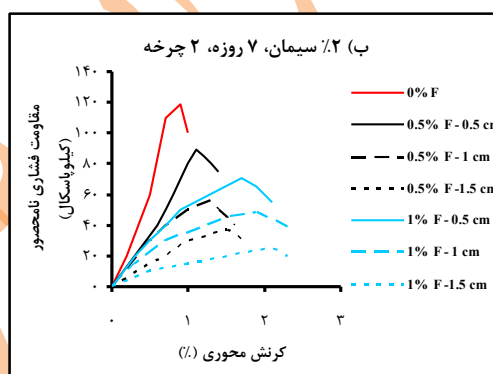
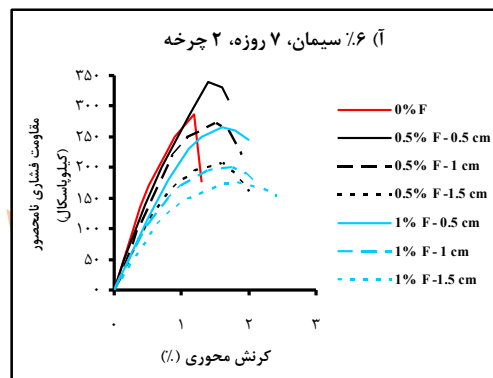


شکل ۲۰: مقایسه مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده با ۰.۲ و ۰.۶ درصد سیمان پس از ۲۸ روز عمل آوری و اعمال دو چرخه یخ زدن-آب شدن.

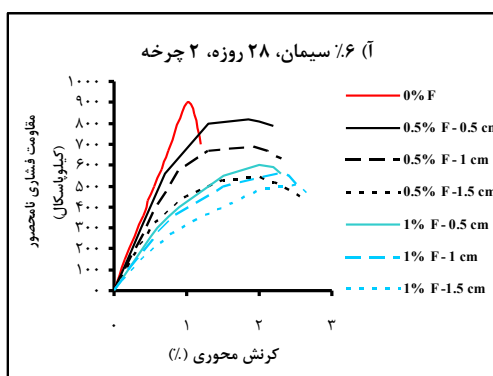
۵- نتیجه گیری

در این مطالعه تاثیر چرخه های مختلف یخ زدن-آب شدن بر مقاومت فشاری نمونه های خاک ماسه ای تثبیت شده با سیمان و مسلح به الیاف تاثیر تابیده شده باز یافتی در قالب مدلسازی آزمایشگاهی ارزیابی شد. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه ها با ساخت نمونه های استوانه ای شکل اندازه گیری شده است. تاثیر تعداد صفر، یک، دو و سه چرخه یخ زدن-آب شدن بر کاهش مقاومت نمونه های استوانه ای آزموده شده است. نمونه ها با سه میزان ۰.۲، ۰.۴ و ۰.۶ درصد سیمان تثبیت شده اند. علاوه بر این تاثیر ۷ و ۲۸ روز عمل آوری در زیر آب، بر مقاومت نهایی نمونه ها بررسی شده است. نمونه هایی که با سیمان تثبیت شده اند، توسط الیاف باز یافتی نخ تاثیر نیز مسلح شده اند. تاثیر همزمان سه عامل چرخه های یخ زدن-آب شدن، تثبیت با سیمان و تسلیح با الیاف، در قالب مدل های آزموده ای مطالعه شده است. عمده ترین 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 نمونه های ماسه ای تثبیت شده با سیمان در مقابل چرخه های یخ زدن-آب شدن و افت مقاومت فشاری در چارچوب مدل های آزمایشگاهی ارزیابی شده است.
- ۲- با افزودن الیاف تا میزانی مشخص چه در حالت خشک و چه پس از اعمال چرخه های یخبندان-ذوب، مقاومت فشاری محدود نشده (بیشینه) افزایش و پس از آن کاهش می یابد.
- ۳- میزان اثربخشی الیاف در افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان، کاملاً وابسته به میزان درصد وزنی سیمان است و در حالت



شکل ۱۹: مقایسه مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده با ۰.۲ و ۰.۶ درصد سیمان پس از ۷ روز عمل آوری و اعمال دو چرخه یخ زدن-آب شدن.



[۷] Yetimoglu, T., & Salbas, O. ۲۰۰۳. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes*, ۲۱(۲), ۱۰۳-۱۱۰.

[۸] Yetimoglu, T., Inanir, M., & Inanir, O. E. ۲۰۰۵. A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, ۲۳(۲), ۱۷۴-۱۸۳.

[۹] Ibraim, E., & Fourmont, S. ۲۰۰۷. Behaviour of sand reinforced with fibers. In *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis* (pp. ۸۰۷-۸۱۸). Springer Netherlands.

[۱۰] Viswanadham, B. V. S., Phanikumar, B. R., & Mukherjee, R. V. ۲۰۰۹. Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes*, ۲۷(۱), ۷۳-۷۶.

[۱۱] Dupas, J.; Pecker, A. ۱۹۷۹. Static and dynamic properties of sand-cement. *Journal of Geotechnical Engineering*, ۱۰۵(۳), ۴۱۹-۴۳۶.

[۱۲] Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C. and Rad, N. S. ۱۹۸۱. Cemented sands under static loading, [۱۳] Morel, J. C., & Gourc, J. P. ۱۹۹۷. Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements. *Geosynthetics International*, ۴(۵), ۴۸۱-۵۰۸.

[۱۴] Heineck, K. S., Coop, M. R., & Consoli, N. C. ۲۰۰۵. Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ۱۳۱(۸), ۱۰۲۴-۱۰۳۳.

[۱۵] Park, S. S. ۲۰۰۹. Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes*, ۲۷(۲), ۱۶۲-۱۶۶.

[۱۶] Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Fonini, A., & Dalla Rosa, F. ۲۰۰۹. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes*, ۲۷(۳), ۱۹۶-۲۰۳.

[۱۷] Taber S. Surface heaving caused by segregation of water forming ice crystals. *Engine News-Recor*. ۱۹۱۸b;۸۱:۶۸۳-۶۸۴.

[۱۸] Penner, E. ۱۹۶۰. Alternate freezing and thawing not a requirement for frost heaving in soils. *Canadaian Journal of Soil Science*, Vol. ۴۱: ۱۶۰-۱۶۳.

[۱۹] Parameswaran, V. R. ۱۹۸۵. Effect of alternating stress on the creep of frozen soils., *Mechanics of Materials*, North-Holland, Vol. ۴:۱۰۹-۱۱۹.

[۲۰] Simonsen, E., and Isacsson, U. ۱۹۹۹. Thaw weakening of pavement structures in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. ۲۹: ۱۳۵-۱۵۱.

[۲۱] Qi, J., Ma, W., and Song, C. ۲۰۰۸. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. ۵۳: ۳۹۷-۴۰۴.

[۲۲] Altun, S., Sezer, A., and Erol, A. ۲۰۰۹. The Effects of additives and curing conditions on the mechanical behavior

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 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 نام‌برده را بهبود بخشد.

۷-افزایش زمان عمل‌آوری منجر به افزایش مقاومت می‌گردد. این افزایش مقاومت قبل و بعد از اعمال چرخه های متوالی ادامه دارد.

۸- در تمامی سنین 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.

۶- مراجع

[۱] Kaufmann, J., Winnefeld, F., & Hesselbarth, D. ۲۰۰۴. 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*, ۲۶(۵), ۵۴۱-۵۴۹.

[۲] Liu, J. K., and Peng, L. Y. ۲۰۰۹. Experimental study on the unconfined compression of a thawing soil. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. ۵۸: ۹۲-۹۶.

[۳] Lee, K. L., Adams, B. D., & Vagneron, J. M. J. ۱۹۷۳. Reinforced earth retaining walls. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ۹۹(۱۰), ۷۴۵-۷۶۴.

[۴] Gray, D. H., & Ohashi, H. ۱۹۸۳. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ۱۰۹(۳), ۳۳۵-۳۵۳.

[۵] Freitag, D. R. ۱۹۸۶. Soil randomly reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, ۱۱۲(۸), ۸۲۳-۸۲۶.

[۶] Michalowski, R. L., & Čermák, J. ۲۰۰۲. Strength anisotropy of fiber-reinforced sand. *Computers and Geotechnics*, ۲۹(۴), ۲۷۹-۲۹۹.

freeze-thaw cycles, Journal of Non-Crystalline Solids ۵۸۴ (۲۰۲۲) ۱۲۱۵-۱۷.

[۲۶] Tao Z, Zhang Y, Chen X, Gu X, Effects of freeze-thaw cycles on the mechanical properties of cement-fiber composite treated silty clay, Construction and Building Materials ۳۱۶ (۲۰۲۲) ۱۲۵۸۶۷.

[۲۷] Xiao X, Li J, Cai D, Lou L, Shi Y, Xiao F, Evolution evaluation of high-speed railway asphalt concrete waterproofing layer during laboratory freeze-thaw cycles, Construction and Building Materials ۳۲۴ (۲۰۲۲) ۱۲۶۲۵۸.

of a silty soil, Cold Regions Science and Technology., Vol. ۵۶: ۱۳۵-۱۴۰.

[۲۳] Christ, M., Park, J. B. ۲۰۱۰. Laboratory determination of strength properties of frozen rubber-sand mixtures, Cold Regions Science and Technology., Vol. ۶۰: ۱۶۹-۱۷۵.

[۲۴] Liu, J. K., and Peng, L. Y. ۲۰۰۹. Experimental study on the unconfined compression of a thawing soil. Cold Regions Science and Technology., Vol. ۵۸: ۹۲-۹۶.

[۲۵] Li F, Chen D, Lu Y, Zhang H, Li S, Influence of mixed fibers on fly ash based geopolymers resistance against

فصلنامه علمی پژوهشی