

مقایسه عملکرد مکانیکی ترکیبات حاوی غبار کوره آهک، سیلیکافوم و الیاف فرش با نمونه سیمانی در شرایط چرخه انجماد-ذوب

عباس شریف فر

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

امین توحیدی *

استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

حسن نگهدار

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

با توجه به مصرف بالای انرژی و انتشار کربن ناشی از تولید سیمان، یافتن ترکیبات جایگزین با عملکرد مکانیکی مناسب در شرایط چرخه انجماد-ذوب به یک ضرورت تبدیل شده است. در این پژوهش، عملکرد مکانیکی مخلوط‌های حاوی پسماندهای صنعتی شامل غبار کوره آهک، سیلیکافوم و الیاف ضایعات فرش با نمونه سیمانی تحت شرایط انجماد-ذوب مقایسه گردید. نمونه‌ها در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه مورد آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سرعت موج التراسونیک و چرخه‌های انجماد-ذوب قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مخلوط بهینه شامل ۵ درصد غبار کوره آهک، ۵۰ درصد سیلیکافوم و ۱ درصد الیاف فرش به مقاومت فشاری ۷۰۱۳ کیلوپاسکال دست یافت در حالی که نمونه ۱۰ درصد سیمان به مقاومت ۴۶۸۰ کیلوپاسکال رسید. مقاومت کششی در ترکیب بهینه به ۶۰۹ کیلوپاسکال رسید که ۳۲ درصد بیشتر از نمونه بدون الیاف بود. سرعت موج التراسونیک در ترکیب بهینه به ۲۵۲۸ متر بر ثانیه رسید در حالی که نمونه ۱۰ درصد سیمان سرعتی برابر ۲۱۶۰ متر بر ثانیه داشت. پس از ۸ چرخه انجماد-ذوب، ترکیب بهینه بیش از ۹۷ درصد مقاومت اولیه خود را حفظ کرد در حالی که نمونه ۱۰ درصد سیمان تنها ۷۸ درصد مقاومت اولیه را نگه داشت. درصد بهینه الیاف فرش برابر با ۱ درصد تعیین گردید و مقادیر بالاتر به دلیل گره خوردن الیاف، باعث کاهش مقاومت شد. کاربرد عملی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب معرفی شده می‌تواند به عنوان جایگزینی پایدار، کم‌کربن و اقتصادی برای سیمان در پروژه‌های تثبیت خاک‌های رسی مناطق سردسیر از جمله زیرسازی راه‌ها، روسازی‌ها، پی‌سازی و دیوارهای حائل مورد استفاده قرار گیرد و ضمن کاهش مصرف سیمان و انتشار گازهای گلخانه‌ای، از دفن پسماندهای صنعتی در طبیعت جلوگیری نماید. در مجموع، ترکیب بهینه معرفی شده از نظر عملکرد مکانیکی و دوام برتری قابل توجهی نسبت به نمونه سیمانی داشته و می‌تواند به عنوان جایگزینی پایدار، دوستدار محیط زیست و کارآمد در پروژه‌های ژئوتکنیکی مناطق سردسیر مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: غبار کوره آهک، سیلیکافوم، الیاف فرش، عملکرد مکانیکی، چرخه انجماد-ذوب، سیمان، واکنش پوزولانی

* نویسنده مسئول: a.tohidi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد روزافزون جمعیت و توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل و شهری، نیاز به خاک‌های باکیفیت و پایدار را به شدت افزایش داده است. متأسفانه بسیاری از زمین‌های قابل دسترس برای پروژه‌های عمرانی، از خاک‌های مسئله‌داری تشکیل شده‌اند که دارای ویژگی‌هایی مانند ظرفیت باربری کم، تغییر حجم زیاد در برابر رطوبت، تورم‌پذیری بالا و مقاومت برشی ناکافی هستند [۱-۴]. استفاده از این خاک‌ها در حالت طبیعی، به ویژه در مناطقی که دمای هوا در فصول سرد سال به زیر صفر می‌رود و چرخه‌های متناوب انجماد و ذوب رخ می‌دهد، با خطر جدی کاهش دوام و تخریب سازه همراه است. در چنین شرایطی، روش‌های بهسازی و تثبیت خاک برای افزایش مقاومت و دوام آن ضروری می‌شود. به طور سنتی، سیمان و آهک رایج‌ترین مواد تثبیت‌کننده خاک در پروژه‌های راه‌سازی، راه‌آهن، پی‌سازی و دیوارهای حائل بوده‌اند. این مواد با انجام واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی، باعث تشکیل ترکیبات چسبنده (از جمله سیلیکات‌ها و آلومینات‌های کلسیم هیدراته) درون ماتریس خاک می‌شوند که در نتیجه، مقاومت فشاری و برشی خاک به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد [۵-۸]. با این حال، تولید سیمان یکی از پراثرترین و آلاینده‌ترین فرایندهای صنعتی در جهان محسوب می‌شود. آمارها نشان می‌دهد که حدود ۵ تا ۸ درصد از کل انتشار دی‌اکسید کربن جهان ناشی از تولید سیمان است [۹-۱۲]. این موضوع، همراه با نگرانی‌های زیست‌محیطی روزافزون و محدودیت منابع طبیعی، محققان را به سمت یافتن جایگزین‌های پایدارتر و دوستدار محیط زیست سوق داده است.

یکی از راهکارهای امیدوارکننده در این زمینه، استفاده از پسماندها و محصولات جانبی صنعتی به عنوان مواد تثبیت‌کننده خاک است. این رویکرد علاوه بر کاهش هزینه‌های دفع پسماند و جلوگیری از انباشت آن‌ها در طبیعت، از مصرف بی‌رویه سیمان و آهک نیز می‌کاهد. از جمله این مواد می‌توان به غبار کوره آهک، سیلیکافوم، خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و انواع الیاف بازیافتی اشاره کرد [۱۳-۱۸].

غبار کوره آهک محصول جانبی فرایند تولید آهک زنده در کوره‌های دوار است. این ماده که به صورت گردی بسیار ریز تولید می‌شود، سرشار از اکسید کلسیم و کربنات کلسیم می‌باشد.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که غبار کوره آهک به دلیل داشتن ترکیبات قلیایی، قابلیت انجام واکنش‌های پوزولانی با سیلیس و آلومینای موجود در خاک را دارد. این واکنش‌ها منجر به تشکیل ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینوسیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود که ذرات خاک را به یکدیگر می‌چسبانند و ساختاری یکپارچه و مقاوم ایجاد می‌کنند. همچنین استفاده از این پسماند به جای دفع آن در محل‌های دفن زباله، یک مزیت اقتصادی و زیست‌محیطی مهم محسوب می‌شود [۱۹، ۱۴].

سیلیکافوم نیز یکی دیگر از پسماندهای صنعتی است که در فرایند تولید آلیاژهای فروسیلیس و سیلیسیم در کوره‌های قوس الکتریکی به دست می‌آید. این ماده از ذرات بسیار ریز (اغلب کروی) با درصد بالایی از سیلیس آمورف (بیش از ۹۰ درصد دی‌اکسید سیلیسیم) تشکیل شده است [۲۰-۲۳]. سیلیکافوم به دلیل ریزبودن ذرات و واکنش‌پذیری بالای سیلیس موجود در آن، در سال‌های اخیر به عنوان یک افزودنی مؤثر در بتن و همچنین در تثبیت خاک مورد توجه قرار گرفته است. این ماده می‌تواند با جذب کلسیم آزاد ناشی از هیدراتاسیون آهک، تشکیل ژل‌های چسبنده را تسریع کند و از سوی دیگر با پر کردن ریز حفره‌های میان ذرات خاک، ریزساختار را متراکم‌تر سازد. پژوهش‌های قبلی نشان داده‌اند که افزودن سیلیکافوم به خاک‌های رسی، باعث افزایش مقاومت فشاری و بهبود مقاومت در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب می‌شود. با این حال، یکی از معایب عمده تثبیت خاک با مواد سیمانی و پوزولانی (از جمله غبار کوره آهک و سیلیکافوم) این است که این روش‌ها اغلب رفتار خاک را به شدت شکننده می‌کنند. به عبارت دیگر، نمونه تثبیت‌شده ممکن است تحت بارگذاری، ناگهان و بدون تغییر شکل قابل توجه دچار گسیختگی شود. این مسئله در کاربردهایی که نیاز به جذب انرژی و تحمل تغییر شکل پیش از شکست وجود دارد، یک نقطه ضعف جدی به شمار می‌رود. برای رفع این مشکل، محققان پیشنهاد کرده‌اند که از الیاف مختلف در کنار مواد چسبنده استفاده شود. الیاف با ایجاد پل‌های اتصال میان سطوح ترک‌های ریز، می‌توانند از گسترش ناگهانی ترک جلوگیری کنند و باعث افزایش چقرمگی، شکل‌پذیری و مقاومت کششی نمونه شوند.

در این میان، الیاف ضایعات فرش به دلیل در دسترس بودن بالا، هزینه کم، ماهیت بازیافتی و همچنین ویژگی‌های مکانیکی مناسب

از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شناسایی شدند. سپس طرح اختلاط‌های مختلف با درصد‌های گوناگون از این مواد (غبار کوره آهک در سه سطح صفر، ۵ و ۱۰ درصد، سیلیکافوم به عنوان جایگزین وزنی غبار کوره آهک در پنج سطح صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و الیاف فرش در چهار سطح ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد) تهیه گردید. همچنین برای مقایسه، نمونه‌های حاوی سیمان تا ۱۰ درصد ساخته شد. نمونه‌ها در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، تحت آزمون‌های تراکم، مقاومت فشاری محصورنشده، مقاومت کششی غیرمستقیم و چرخه‌های انجماد-ذوب قرار گرفتند.

۲- مشخصات مصالح و معرفی آزمایش‌های انجام شده

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

در این پژوهش، از چهار ماده اصلی شامل خاک رس، غبار کوره آهک، سیلیکافوم و الیاف ضایعات فرش استفاده شده است. مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی هر یک از این مصالح در زیر ارائه می‌گردد.

۲-۱-۱- خاک رس

خاک مصرفی در این تحقیق از نوع خاک رس کائولینیت بوده که از یکی از معادن فعال در منطقه اصفهان تهیه شده است. ترکیب کانی‌شناسی خاک رس بر اساس آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که کانی غالب در این خاک، کائولینیت می‌باشد. این خاک بر اساس آزمایش‌های طبقه‌بندی انجام شده مطابق با استانداردهای معتبر بین‌المللی، در گروه خاک‌های رسی با پلاستیسته کم طبقه‌بندی می‌گردد. دانه‌بندی این خاک نشان می‌دهد که بخش عمده ذرات آن در محدوده رس و سیلت قرار دارند (شکل ۱). حدود خمیری خاک مورد نظر ۱۸/۹ درصد و حد روانی آن ۳۷/۲ درصد اندازه‌گیری شده است که در نتیجه، شاخص خمیری برابر با ۱۸/۳ درصد به دست می‌آید. این مقادیر حاکی از آن است که خاک مورد استفاده از نظر رفتار خمیری، در گروه خاک‌های با خمیرندگی کم قرار می‌گیرد. وزن مخصوص ذرات جامد این خاک برابر با ۲/۶۵ تعیین شده است. نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان می‌دهد که خاک مذکور دارای رطوبت بهینه ۲۵/۱ درصد و حداکثر وزن مخصوص خشک ۱/۵۸ گرم بر

(مانند مقاومت کششی خوب و مدول الاستیسیته نسبتاً بالا) گزینه‌ای ایده‌آل محسوب می‌شوند [۲۴-۲۷]. سالانه مقادیر بسیار زیادی فرش‌های فرسوده در سراسر جهان دور ریخته می‌شوند که بخش عمده آن‌ها در محل‌های دفن زباله انباشته می‌گردد. استفاده مجدد از این الیاف در پروژه‌های عمرانی و ژئوتکنیکی، علاوه بر کاهش بار زیست‌محیطی، می‌تواند ارزش افزوده قابل توجهی ایجاد کند. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که افزودن الیاف فرش به خاک، باعث بهبود مقاومت فشاری، افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم، کاهش ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی و افزایش دوام در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب می‌شود. همچنین الیاف فرش با ایجاد پیوستگی در ترک‌ها، از رشد ترک‌های کششی جلوگیری کرده و رفتار خاک را از حالت شکننده به نیمه‌شکل‌پذیر تغییر می‌دهند.

با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه کاربرد هر یک از مواد فوق به تنهایی (غبار کوره آهک، سیلیکافوم و الیاف فرش)، مطالعاتی که به بررسی اثر هم‌زمان و هم‌افزایی این سه ماده در تثبیت خاک رسی بپردازد و عملکرد آن را به طور مستقیم با نمونه‌های حاوی سیمان تحت شرایط انجماد-ذوب مقایسه کند، به ندرت انجام شده است.

از سوی دیگر، بسیاری از پژوهش‌های پیشین در شرایط آب و هوایی معتدل و بدون اعمال چرخه‌های متناوب یخبندان صورت گرفته‌اند، در حالی که در مناطق سردسیر، چرخه انجماد-ذوب یکی از عوامل اصلی تخریب سازه‌های ژئوتکنیکی و روسازی‌ها به شمار می‌رود.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی عملکرد مکانیکی و دوام مخلوط‌های حاوی غبار کوره آهک، سیلیکافوم و الیاف ضایعات فرش در خاک رسی و مقایسه آن با نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان، تحت شرایط اعمال چرخه‌های متناوب انجماد-ذوب است. هدف کاربردی این تحقیق، دستیابی به یک ترکیب بهینه و پایدار است که ضمن داشتن مقاومت فشاری و کششی رقابتی با سیمان، از دوام بالاتری در برابر چرخه‌های یخبندان برخوردار بوده و بتواند به عنوان یک جایگزین کم‌کربن و دوستدار محیط زیست در پروژه‌های عمرانی مناطق سردسیر معرفی شود.

برای نیل به این اهداف، ابتدا مواد مورد استفاده (خاک رس کائولینیت، غبار کوره آهک، سیلیکافوم و الیاف ضایعات فرش)

عمل آید تا از تشکیل گلوله‌های ریز و توزیع نامناسب آن جلوگیری شود.

۲-۱-۳- سیلیکافوم

سیلیکافوم که با نام میکروسیلیس نیز شناخته می‌شود، یک پسماند صنعتی حاصل از فرایند تولید سیلیسیم و آلیاژهای فروسیلیس در کوره‌های قوس الکتریکی است. سیلیکافوم مصرفی در این تحقیق از یک تأمین‌کننده در شهر رشت تهیه شده است. این ماده به صورت پودری بسیار ریز با رنگ خاکستری تیره تا سیاه می‌باشد. بر اساس آنالیز فلورسانس پرتو ایکس، ترکیب اصلی سیلیکافوم، دی‌اکسید سیلیسیم با خلوص بسیار بالا است به طوری که میزان سیلیس موجود در آن به ۹۲/۲۱ درصد می‌رسد. این مقدار بالای سیلیس آمورف (غیر بلوری) باعث می‌شود که سیلیکافوم واکنش‌پذیری بسیار بالایی با کلسیم آزاد داشته باشد و به سرعت وارد واکنش‌های پوزولانی شود. از دیگر ترکیبات جزئی موجود در سیلیکافوم می‌توان به اکسید آلومینیم (۰/۵۷ درصد)، اکسید کلسیم (۱/۲۴ درصد)، اکسید سدیم (۰/۹۳ درصد)، اکسید منیزیم (۰/۶۰ درصد) و اکسید پتاسیم (۰/۶۵ درصد) اشاره کرد. میزان اتلاف حرارتی سیلیکافوم حدود ۳/۱۵ درصد است. ذرات سیلیکافوم بسیار ریز هستند و قطر متوسط آنها در حدود یکصد میکرومتر می‌باشد. وزن مخصوص سیلیکافوم برابر با ۲/۲۰ اندازه‌گیری شده است. به دلیل ریز بودن بیش از حد و آب دوستی بالای سیلیکافوم، اختلاط کامل و یکنواخت آن با خاک نیازمند زمان کافی (حداقل ۳۰ دقیقه اختلاط مداوم) می‌باشد تا از تجمع ذرات و تشکیل توده‌های ریز جلوگیری شود.

۲-۱-۴- الیاف ضایعات فرش

الیاف ضایعات فرش مورد استفاده در این پژوهش، از منابع محلی در شهر رشت (استان گیلان) جمع‌آوری شده است. این الیاف از نوع الیاف پلی‌استر بوده که از فرش‌های فرسوده و دور ریخته شده بازیافت شده‌اند. پیش از استفاده، الیاف شستشو داده شده و به طول یکسان ۲۰ میلی‌متر بریده شده‌اند. قطر متوسط الیاف حدود ۰/۱ میلی‌متر است. انتخاب طول ۲۰ میلی‌متر برای الیاف بر اساس مطالعات پیشین صورت گرفته است که نشان داده‌اند الیاف با این طول، بهترین عملکرد را از نظر بهبود مقاومت کششی و کنترل

سانتی متر مکعب می‌باشد. همچنین میزان اسیدیته خاک در حالت طبیعی برابر با ۷/۲۲ است که نشان‌دهنده خنثی بودن آن می‌باشد. رنگ این خاک به صورت زرد روشن مشاهده شده است. آنالیز شیمیایی انجام شده به روش فلورسانس پرتو ایکس بر روی نمونه خاک نشان می‌دهد که ترکیب اصلی آن به ترتیب شامل سیلیس (با حدود ۶۱ درصد)، آلومین (با حدود ۲۲ درصد) و مقادیر کمتری از اکسیدهای آهن، کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم است. همچنین میزان اتلاف حرارتی نمونه خاک حدود ۹/۵ درصد تعیین شده که عمدتاً مربوط به رطوبت هیدروسکوپی و مواد آلی موجود در خاک می‌باشد. شکل ۲ نمایی از خاک به همراه افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش را نمایش می‌دهد. مقدار pH خاک در حالت طبیعی ۷/۲۲ اندازه‌گیری شد که بیانگر خنثی بودن آن است.

۲-۱-۲- غبار کوره آهک

غبار کوره آهک مورد استفاده در این تحقیق، از پسماندهای کارخانه آهک کرمان در جنوب ایران جمع‌آوری شده است. این ماده در واقع محصول جانبی فرایند تولید آهک زنده است که طی کلسیناسیون سنگ آهک در کوره‌های دوار تولید می‌شود. غبار کوره آهک به صورت پودری بسیار ریز و با رنگ سفید متمایل به خاکستری است. نتایج آنالیز فلورسانس پرتو ایکس نشان می‌دهد که این ماده عمدتاً از اکسید کلسیم تشکیل شده است به طوری که میزان آن به حدود ۷۹/۳۳ درصد می‌رسد. اکسید کلسیم بالا، نشان‌دهنده پتانسیل خوب این ماده برای انجام واکنش‌های پوزولانی در حضور سیلیس و آلومین است. از دیگر ترکیبات موجود در غبار کوره آهک می‌توان به اکسید منیزیم (۰/۸۲ درصد)، کربنات کلسیم (مشخص شده در مقدار اتلاف حرارتی) و مقادیر بسیار جزئی از سیلیس، آلومین و اکسید آهن اشاره کرد. میزان اتلاف حرارتی این ماده حدود ۱۶ درصد اندازه‌گیری شده است که عمدتاً مربوط به تجزیه کربنات‌ها و رطوبت جذب شده می‌باشد.

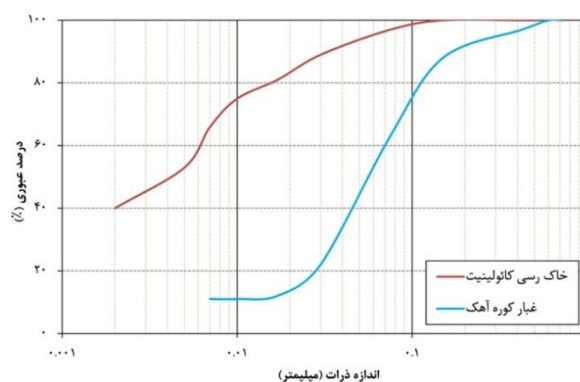
از نظر فیزیکی، دانه‌بندی غبار کوره آهک نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از ذرات آن در محدوده سیلت ریز تا رس قرار می‌گیرد. وزن مخصوص این ماده ۲/۲۵ تعیین شده است. نکته قابل توجه این است که به دلیل ماهیت قلیایی و رطوبت‌پذیری بالای غبار کوره آهک، در هنگام اختلاط با خاک باید دقت کافی به

خاک می گردد. از این رو، حداکثر درصد الیاف مصرفی در این پژوهش ۲ درصد در نظر گرفته شده است

۲-۲- طرح اختلاط

در این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد مکانیکی و دوام خاک رس تثبیت شده با غبار کوره آهک، سیلیکافوم و الیاف ضایعات فرش، تعداد ۲۱ طرح اختلاط مختلف تهیه گردید. همچنین برای مقایسه عملکرد این ترکیبات با روش سنتی تثبیت، نمونه‌های حاوی سیمان نیز ساخته شدند. درصدهای مصرفی هر یک از مواد بر اساس وزن خشک خاک محاسبه شده و محدوده انتخابی برای هر ماده بر اساس مطالعات پیشین و آزمایش‌های مقدماتی تعیین گردید. غبار کوره آهک در سه سطح صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک خشک به مخلوط اضافه شد. نتایج آزمایش‌های مقدماتی نشان داد که افزودن بیش از ۱۰ درصد غبار کوره آهک به دلیل ایجاد کلوخه‌های ریز و کاهش کارایی اختلاط، نه تنها باعث افزایش مقاومت نمی‌شود بلکه توزیع یکنواخت مواد را با مشکل مواجه می‌سازد. در مرحله بعد، مقدار غبار کوره آهک ثابت (۵ درصد) در نظر گرفته شد و سیلیکافوم در پنج سطح صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد به عنوان جایگزین وزنی غبار کوره آهک به مخلوط افزوده گردید. بر اساس نتایج اولیه، ترکیب حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک و ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم (یعنی مجموعاً ۵ درصد مواد افزودنی شامل ۲/۵ درصد غبار کوره آهک و ۲/۵ درصد سیلیکافوم) به عنوان ترکیب بهینه شیمیایی انتخاب گردید. به منظور بهبود رفتار کششی و افزایش چقرمگی، الیاف ضایعات فرش در چهار سطح ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی خاک خشک به مخلوط بهینه اضافه شدند. آزمایش‌های مقدماتی نشان داد که در درصدهای الیاف بیشتر از ۲ درصد، پدیده گره خوردگی و تجمع الیاف رخ می‌دهد. پس از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی، میزان ۱ درصد به عنوان درصد بهینه الیاف انتخاب گردید. برای مقایسه با روش مرسوم، نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند معمولی در سطوح صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک خشک تهیه شدند. نمونه‌های حاوی سیمان نیز تحت شرایط مشابه با نمونه‌های تثبیت شده با پسماندها (دوره عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه و اعمال چرخه‌های انجماد-ذوب) مورد آزمایش قرار گرفتند تا امکان مقایسه مستقیم عملکرد دو روش تثبیت فراهم گردد.

ترک در ماتریس خاک دارند. الیاف کوتاه‌تر از این مقدار، نتوانسته اند پل ارتباطی مؤثری میان ترک‌ها ایجاد کنند و الیاف بلندتر نیز منجر به گره خوردن و توزیع نامناسب درون خاک می‌شوند.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک رس و غبار کوره



شکل ۲- نمایی از افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش

از نظر ویژگی‌های مکانیکی، الیاف ضایعات فرش دارای مقاومت کششی در محدوده ۴۰۰ تا ۵۰۰ مگاپاسکال می‌باشند. مدول الاستیسیته این الیاف حدود ۲۵/۵ گیگاپاسکال محاسبه شده است. وزن مخصوص الیاف ۱/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شده که نسبت به خاک و سایر مواد تثبیت‌کننده سبک‌تر است. این سبکی مزیتی محسوب می‌شود زیرا در هنگام اختلاط و ساخت نمونه، بار مرده قابل توجهی به نمونه اضافه نمی‌کند. یکی از نکات مهم در استفاده از الیاف ضایعات فرش، توزیع یکنواخت آنها درون توده خاک است. در این تحقیق، برای جلوگیری از گره خوردن و کلوخه شدن الیاف، ابتدا خاک در چند لایه تقسیم شده و الیاف به تدریج به هر لایه اضافه شده است. مشاهدات نشان داده که در درصدهای الیاف بیشتر از ۲ درصد، پدیده تجمع الیاف و تشکیل گره‌های رخ می‌دهد که خود باعث ایجاد نواحی ضعیف درون

۲-۳- آمادہ سازی، نحوه ساخت و عمل آوری آزمونه‌ها

در این بخش، مراحل آمادہ سازی مواد اولیه، فرایند اختلاط، روش ساخت نمونه‌ها و شرایط عمل آوری آنها به طور کامل تشریح می گردد. رعایت دقیق این مراحل برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد و تکرارپذیر ضروری بوده است.

۲-۳-۱- آمادہ سازی مواد اولیه

پیش از آغاز فرایند اختلاط، خاک رس مورد نظر ابتدا در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. هدف از این کار، حذف رطوبت موجود در خاک و ایجاد شرایط یکنواخت برای کلیه نمونه‌ها بود. پس از خشک شدن، خاک از الک شماره ۴۰ عبور داده شد تا دانه‌های درشت و ناخالصی‌های احتمالی از آن جدا گردد. این کار باعث افزایش سطح ویژه ذرات و بهبود اختلاط مواد افزودنی با خاک می شود. الیاف ضایعات فرش نیز پیش از استفاده، ابتدا شست و شو داده شدند تا هرگونه گرد و غبار و آلودگی سطحی از روی آنها زدوده شود. سپس الیاف در دمای محیط به مدت ۴۸ ساعت خشک شده و پس از آن با استفاده از یک دستگاه برش مخصوص، به طول یکسان ۲۰ میلی متر بریده شدند. غبار کوره آهک و سیلیکافوم نیز به دلیل رطوبت پذیری بالا، در بسته‌های دربسته و در محیط خشک نگهداری شدند تا جذب رطوبت محیطی تأثیری بر عملکرد آنها نداشته باشد.

۲-۳-۲- فرایند اختلاط

به دلیل ماهیت چسبنده و رطوبت پذیر بودن غبار کوره آهک، فرایند اختلاط از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش از روش اختلاط خشک استفاده شد. خاک خشک شده ابتدا به سه بخش تقسیم گردید و مقدار مشخصی غبار کوره آهک به هر بخش اضافه شد. پس از ۱۰ دقیقه اختلاط دستی، هر سه بخش در میکسر استوانه‌ای افقی ریخته شده و به مدت ۳۰ دقیقه به صورت مکانیکی مخلوط شدند. مجموع زمان اختلاط برای ترکیبات حاوی غبار کوره آهک حداقل ۴۵ دقیقه در نظر گرفته شد که بررسی‌های چشمی توزیع یکنواخت را تأیید کرد. در مرحله بعد، سیلیکافوم به دلیل ریز بودن فوق العاده ذرات و تمایل به چسبندگی، به تدریج و در چند مرحله به مخلوط اضافه گردید و میکسر به مدت ۳۰ دقیقه دیگر به

کار خود ادامه داد. برای نمونه‌های حاوی الیاف ضایعات فرش، به منظور جلوگیری از گره خوردن و تجمع الیاف، خاک به چند لایه تقسیم شد و الیاف به تدریج و لایه لایه افزوده گردید. سپس میکسر به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت پایین تر چرخانده شد تا الیاف بدون آسیب دیدن، به طور یکنواخت پخش شوند. در پایان، بر اساس رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم، آب مورد نیاز به مخلوط افزوده شده و اختلاط مرطوب به مدت ۱۰ دقیقه ادامه یافت تا رطوبت به طور یکنواخت در تمام ذرات نفوذ کند.

۲-۳-۳- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، از قالب‌های استوانه‌ای فولادی با قطر داخلی ۳۸ میلی متر و ارتفاع ۷۶ میلی متر استفاده گردید. نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌ها برابر با ۲ در نظر گرفته شد که مطابق با استانداردهای رایج می باشد. برای نمونه‌های مقاومت کششی غیرمستقیم نیز از قالب‌هایی با ابعاد مشابه استفاده شد.

فرایند ساخت نمونه به صورت زیر انجام گرفت:

ابتدا قالب‌ها از داخل با یک لایه نازک روغن قالب پوشانده شدند تا پس از تراکم، خروج نمونه از قالب با سهولت انجام گیرد. سپس مخلوط خاک و مواد افزودنی (با رطوبت بهینه) در پنج لایه مساوی به درون قالب ریخته شد. هر لایه به اندازه یک پنجم ارتفاع قالب در نظر گرفته شد. پس از ریختن هر لایه، عمل تراکم با استفاده از یک جک هیدرولیک انجام گردید. فشار تراکم به گونه‌ای اعمال شد که پس از متراکم شدن پنج لایه، ارتفاع نهایی نمونه به ۷۶ میلی متر برسد. این روش تراکم استاتیکی، به جای روش ضربه‌ای، به دلیل حساسیت نمونه‌های حاوی الیاف به ضربه و همچنین نیاز به دستیابی به تراکم یکنواخت در سراسر نمونه انتخاب گردید.

پس از اتمام تراکم، نمونه‌ها به آرامی و با استفاده از همان جک هیدرولیک از قالب خارج شدند. بلافاصله پس از خروج، هر نمونه در دو لایه کیسه پلاستیکی ضخیم و کاملاً ضد نفوذ قرار داده شد. هدف از این کار، جلوگیری از هدررفت رطوبت نمونه در طول دوره عمل آوری بود. همچنین روی هر کیسه، برچسبی شامل اطلاعات طرح اختلاط، تاریخ ساخت و شماره نمونه الصاق گردید.

برای هر طرح اختلاط، حداقل سه نمونه برای هر آزمون و هر دوره عمل آوری ساخته شد تا امکان محاسبه میانگین و انحراف معیار

عمل آوری شده تحت چرخه‌های متناوب انجماد و ذوب قرار گرفتند. هر چرخه کامل انجماد-ذوب به مدت ۲۴ ساعت طراحی شد. در این چرخه، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۲۳- درجه سانتی گراد قرار گرفتند (فاز انجماد) و سپس بلافاصله به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۲۰+ درجه سانتی گراد نگهداری شدند (فاز ذوب). این محدوده دمایی بر اساس میانگین دمای زمستانی و تابستانی در مناطق سردسیر ایران و همچنین مطالعات پیشین انتخاب گردید. انتقال بین فاز انجماد و ذوب به سرعت (حداکثر ظرف ۵ دقیقه) انجام می‌شد تا از ذوب ناخواسته نمونه در حین جابجایی جلوگیری شود. نمونه‌ها در ۴ سطح صفر، ۱، ۴ و ۸ چرخه مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از اتمام تعداد چرخه مورد نظر، نمونه‌ها بلافاصله به دستگاه آزمایش مقاومت فشاری منتقل شده و آزمون بر روی آنها انجام گردید. لازم به ذکر است که در این پژوهش از سیستم بسته برای چرخه‌های انجماد-ذوب استفاده گردید. در این روش، نمونه درون کیسه پلاستیکی سربسته قرار دارد و هیچگونه تبادل رطوبتی با محیط خارج ندارد. دلایل انتخاب سیستم بسته به شرح زیر می‌باشد: (۱) خاک رس مورد استفاده در این پژوهش دارای نفوذپذیری بسیار پایین است و در چنین خاک‌هایی، حتی در شرایط طبیعی نیز حرکت آب به سمت جبهه یخبندان ناچیز بوده و سیستم بسته شبیه‌سازی واقعی‌تری از شرایط مزرعه ارائه می‌دهد. (۲) در بسیاری از مناطق سردسیر که سطح آب زیرزمینی عمیق بوده و نوسانات فصلی رطوبت در حداقل است، شرایط سیستم بسته به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد و منبع اصلی رطوبت برای تشکیل عدسی‌های یخ، خود رطوبت اولیه موجود درون خاک است. (۳) استفاده از سیستم بسته امکان ارزیابی دقیق‌تر تأثیر صرف چرخه‌های حرارتی بر خواص مکانیکی خاک را فراهم می‌آورد و از تداخل اثر تبادل رطوبت با اثر چرخه حرارتی جلوگیری می‌کند.

۴-۲- روش انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش، به منظور ارزیابی عملکرد مکانیکی و دوام نمونه‌های تثبیت‌شده، مجموعه‌ای از آزمایش‌های استاندارد بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. این آزمایش‌ها شامل تعیین مشخصات تراکمی، اندازه‌گیری مقاومت فشاری محصورنشده، اندازه‌گیری مقاومت کششی غیرمستقیم، اعمال چرخه‌های انجماد-ذوب و همچنین بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ

نتایج فراهم گردد. در مجموع، بیش از ۳۰۰ نمونه برای این پژوهش تهیه و آزمایش شد.

۴-۳-۲- عمل آوری نمونه‌ها

نمونه‌های ساخته شده به منظور کسب مقاومت و انجام واکنش‌های پوزولانی، در شرایط کنترل شده عمل آوری شدند. دمای محیط عمل آوری 20 ± 2 درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی محیط نیز حدود ۶۰ درصد بود. نمونه‌ها در سه دوره زمانی ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه عمل آوری شدند. انتخاب این دوره‌ها بر اساس مطالعات پیشین صورت گرفت که نشان داده‌اند واکنش‌های پوزولانی در خاک‌های تثبیت‌شده با غبار کوره آهک و سیلیکافوم، در ۲۸ روز اول به طور قابل توجهی پیشرفت کرده و تا ۵۶ روز نیز ادامه می‌یابد.

در طول دوره عمل آوری، هر هفته یک بار کیسه‌های پلاستیکی از نظر نشت رطوبت بازبینی می‌شدند. در صورت مشاهده هرگونه نشت یا کاهش وزن نمونه، آن نمونه از مجموعه حذف و نمونه جایگزین ساخته می‌شد. این دقت بالا برای حفظ رطوبت نمونه‌ها ضروری بود، زیرا کاهش رطوبت می‌تواند فرایند هیدراتاسیون و واکنش‌های پوزولانی را مختل کند. برای نمونه‌هایی که قرار بود تحت چرخه‌های انجماد-ذوب قرار گیرند، پس از اتمام دوره عمل آوری (۷، ۲۸ یا ۵۶ روز)، کیسه‌های پلاستیکی همچنان به صورت دو لایه و کاملاً سربسته باقی ماندند. این کار برای جلوگیری از تبادل رطوبت نمونه با محیط خارج در طی چرخه‌های انجماد-ذوب ضروری بود (سیستم بسته). نمونه‌ها سپس به دستگاه سیکل حرارتی منتقل شده و چرخه‌های انجماد-ذوب بر اساس برنامه تعیین شده بر روی آنها اعمال گردید. لازم به ذکر است که تمامی نتایج ارائه شده در این بخش، میانگین حداقل سه نمونه آزمایش شده برای هر طرح اختلاط و هر دوره عمل آوری می‌باشند. میانگین انحراف معیار برای نتایج مقاومت فشاری حدود ۵ تا ۸ درصد مقدار میانگین، برای نتایج مقاومت کششی حدود ۶ تا ۱۰ درصد و برای نتایج سرعت موج التراسونیک حدود ۳ تا ۵ درصد محاسبه شده است که در محدوده قابل قبول برای مطالعات ژئوتکنیکی می‌باشد.

۵-۳-۲- نحوه اعمال چرخه‌های انجماد-ذوب

برای شبیه‌سازی شرایط محیطی مناطق سردسیر، نمونه‌های

الکترونی روبشی و پراش پرتو ایکس می‌باشد. در ادامه، هر یک از این روش‌ها به تفصیل شرح داده می‌شود.

۲-۴-۱- آزمایش تراکم

آزمایش تراکم اصلاح شده بر اساس استانداردهای معتبر به منظور تعیین رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک انجام شد. دلیل استفاده از روش اصلاح شده، وجود مواد افزودنی در مخلوط خاک بود که رفتار تراکمی را تغییر می‌دهند. آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D1557 (روش اصلاح شده) با انرژی تراکم ۲۷۰۰ کیلو نیوتن-متر بر متر مکعب انجام گردید. قالب استوانه‌ای با قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۶/۴ میلی‌متر در پنج لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه شاقول استاندارد (وزن ۴/۴ کیلوگرم، ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر) متراکم گردید. برای هر طرح اختلاط، حداقل پنج نمونه با رطوبت‌های مختلف ساخته شد و پس از رسم منحنی تراکم، رطوبت متناظر با حداکثر وزن مخصوص خشک به عنوان رطوبت بهینه تعیین گردید.

۲-۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

این آزمایش بر اساس استانداردهای معتبر به منظور تعیین حداکثر تنش فشاری نمونه‌های استوانه‌ای (قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر) انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده بر اساس استاندارد ASTM D2166 و با نرخ بارگذاری ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در دوره‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، در دستگاه بارگذاری دیجیتال با ظرفیت ۵۰۰۰ کیلو پاسکال قرار گرفتند. بارگذاری با نرخ کرنش ثابت ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه تا لحظه گسیختگی ادامه یافت و تغییر شکل محوری به طور پیوسته ثبت گردید. مقاومت فشاری از تقسیم حداکثر بار بر سطح مقطع اولیه محاسبه شد. برای هر طرح اختلاط، حداقل سه نمونه آزمایش شد و میانگین نتایج به همراه منحنی تنش-کرنش گزارش گردید.

۲-۴-۳- آزمایش سرعت موج التراسونیک

آزمایش سرعت موج التراسونیک به عنوان یک روش غیرمخرب برای ارزیابی یکپارچگی و کیفیت نمونه‌های تثبیت شده استفاده شد. در این آزمایش، یک فرستنده و یک گیرنده موج التراسونیک

با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز در دو انتهای نمونه استوانه‌ای (قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر) قرار می‌گیرند. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس استاندارد ASTM C597 انجام گردید. برای اطمینان از انتقال مناسب امواج، از ژل تماس‌دهنده بر روی سطوح نمونه استفاده می‌گردد. دستگاه زمان عبور پالس التراسونیک از درون نمونه را اندازه‌گیری کرده و سرعت موج از تقسیم طول نمونه بر زمان عبور محاسبه می‌شود. برای هر طرح اختلاط، سه نمونه در هر دوره عمل‌آوری و هر سطح از چرخه‌های انجماد-ذوب آزمایش شدند. افزایش سرعت موج نشان‌دهنده تراکم بیشتر و بهبود پیوند بین ذرات بوده و کاهش آن بیانگر ایجاد ترک یا آسیب در اثر چرخه‌های انجماد-ذوب می‌باشد.

۲-۴-۴- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم مقاومت کششی خاک به دلیل ماهیت شکننده و ترک‌خوردگی زود هنگام نمونه‌ها با دشواری همراه است، در این پژوهش از روش غیرمستقیم یا همان روش برزلی استفاده گردید. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D6931 انجام شد. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش، دقیقاً با همان ابعاد و روش ساخت نمونه‌های مقاومت فشاری (قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر) تهیه شدند. نمونه در حالت خوابیده بر روی دو تکیه‌گاه فلزی قرار می‌گیرد و یک نوار فلزی (برای توزیع یکنواخت تنش) بین صفحه بارگذاری و نمونه تعبیه می‌شود. سپس بارگذاری با نرخ ثابت ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه ادامه می‌یابد تا نمونه در امتداد قطر، به دو نیمه تقسیم شود.

۳-ارایه و تفسیر نتایج

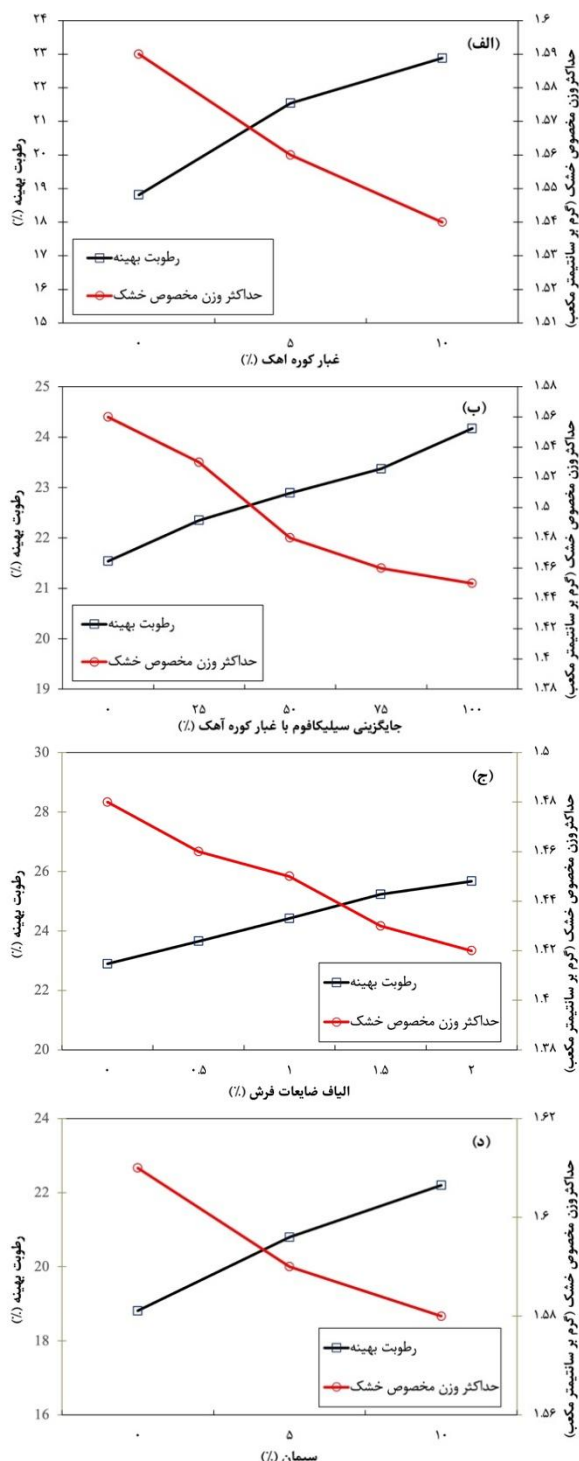
۳-۱-۱- نتایج آزمایش تراکم

آزمایش تراکم به منظور تعیین رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه‌های مختلف انجام گرفت. نتایج این آزمایش برای نمونه‌های حاوی غبار کوره آهک، سیلیکافوم، الیاف ضایعات فرش و همچنین نمونه‌های حاوی سیمان در ادامه ارائه و تحلیل می‌گردد.

۳-۱-۱-۱- اثر غبار کوره آهک بر رفتار تراکمی

شکل ۳-الف نتایج تراکم نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف غبار

درصد غبار کوره آهک همراه با ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم) و مقادیر مختلف الیاف ضایعات فرش (۱/۵، ۱، ۰/۵، ۰/۲ درصد) را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تأثیر غبار کوره آهک، سیلیکافوم، الیاف ضایعات فرش و سیمان بر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک رس: (الف) غبار کوره آهک، (ب) جایگزینی سیلیکافوم با غبار کوره آهک، (ج) الیاف ضایعات فرش، (د) اثر سیمان.

کوره آهک (صفر، ۵ و ۱۰ درصد) را نشان می‌دهد. افزودن غبار کوره آهک باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک می‌گردد. خاک طبیعی رطوبت بهینه ۱۸/۸۱ درصد و وزن مخصوص خشک ۱/۵۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارد. با افزودن ۵ درصد غبار کوره آهک، رطوبت بهینه به ۲۱/۵۴ درصد افزایش و وزن مخصوص خشک به ۱/۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش می‌یابد. با افزایش به ۱۰ درصد، رطوبت بهینه به ۲۲/۸۸ درصد (افزایش ۲۱/۶ درصدی) و وزن مخصوص خشک به ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب (کاهش ۳/۱ درصدی) می‌رسد. دلیل این رفتار، ریزش ذرات غبار کوره آهک و سطح ویژه بالای آن (نیاز به آب بیشتر) و وزن مخصوص کمتر آن (۲/۲۵ در برابر ۲/۶۵ خاک) می‌باشد.

۳-۱-۲- اثر جایگزینی سیلیکافوم بر رفتار تراکمی

شکل ۳-ب نتایج تراکم نمونه‌های حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک و مقادیر مختلف جایگزینی سیلیکافوم (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) را نشان می‌دهد. با افزایش جایگزینی سیلیکافوم، رطوبت بهینه به طور پیوسته افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد. برای نمونه بدون سیلیکافوم، رطوبت بهینه ۲۱/۵۴ درصد و وزن مخصوص خشک ۱/۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. با افزایش جایگزینی به ۵۰ درصد، رطوبت بهینه به ۲۲/۸۹ درصد (افزایش ۶/۳ درصدی) و وزن مخصوص خشک به ۱/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب (کاهش ۵/۱ درصدی) می‌رسد. در حالت ۱۰۰ درصد جایگزینی (تنها سیلیکافوم)، رطوبت بهینه به ۲۴/۱۷ درصد (افزایش ۱۲/۲ درصدی) و وزن مخصوص خشک به ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب (کاهش ۷/۱ درصدی) می‌رسد. دلیل این رفتار، ریزش ذرات سیلیکافوم (فقط حدود یک‌صدم میکرومتر) و افزایش سطح ویژه مخلوط، وزن مخصوص پایین تر سیلیکافوم (۲/۲۰ در برابر ۲/۲۵) و تمایل آن به جذب آب و تشکیل ساختارهای ژل‌مانند است. روند افزایش رطوبت بهینه تقریباً خطی است اما کاهش وزن مخصوص خشک در مقادیر بالای جایگزینی (۷۵ و ۱۰۰ درصد) شدت بیشتری پیدا می‌کند.

۳-۱-۳- اثر الیاف ضایعات فرش بر رفتار تراکمی

شکل ۳-ج نتایج تراکم نمونه‌های حاوی ترکیب بهینه شیمیایی (۵

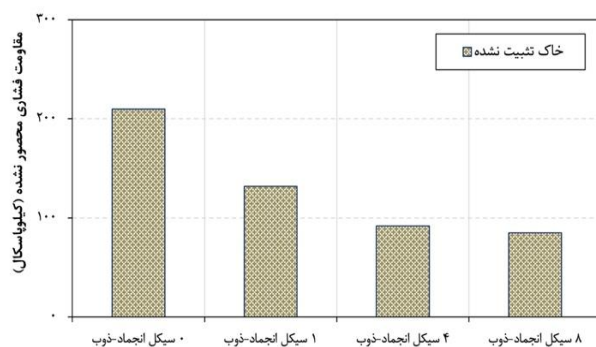
است، اما این موضوع تأثیر منفی قابل توجهی بر مقاومت مکانیکی نمونه‌ها نداشته است.

۲-۲-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده

نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده برای نمونه‌های مختلف شامل خاک تثبیت‌نشده، نمونه‌های حاوی غبار کوره آهک، نمونه‌های حاوی ترکیب غبار کوره آهک و سیلیکافوم، نمونه‌های حاوی الیاف ضایعات فرش و همچنین نمونه‌های حاوی سیمان در این بخش ارائه و تحلیل می‌گردد. تأثیر سه عامل اصلی شامل درصد مواد افزودنی، مدت زمان عمل‌آوری و تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری بررسی شده است.

۳-۲-۱- مقاومت فشاری خاک تثبیت‌نشده

شکل ۴ تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری خاک رس تثبیت‌نشده را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که خاک رس طبیعی بدون هیچ گونه افزودنی، مقاومت فشاری بسیار پایینی دارد.



شکل ۴- تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری خاک رس تثبیت‌نشده

این خاک در حالت بدون اعمال چرخه انجماد-ذوب، مقاومتی معادل ۲۱۰ کیلوپاسکال از خود نشان می‌دهد. با اعمال تنها یک چرخه انجماد-ذوب، مقاومت به ۱۳۲ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد که معادل افت ۳۷/۲ درصدی است. این روند کاهشی با افزایش تعداد چرخه‌ها ادامه می‌یابد به طوری که پس از ۴ چرخه، مقاومت به ۹۲ کیلوپاسکال (کاهش ۵۶/۲ درصدی نسبت به حالت اولیه) و پس از ۸ چرخه به ۸۵ کیلوپاسکال (کاهش ۵۹/۵ درصدی) می‌رسد. این افت شدید مقاومت نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای خاک رس طبیعی در برابر چرخه‌های متناوب انجماد و ذوب است.

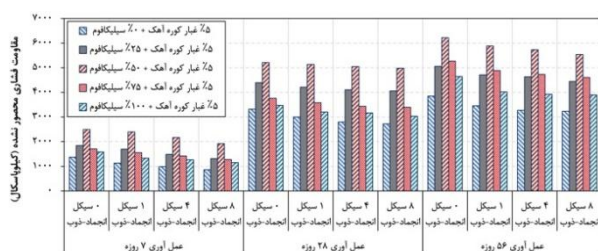
افزودن الیاف باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک می‌گردد. نمونه بدون الیاف، رطوبت بهینه ۲۲/۸۹ درصد و وزن مخصوص خشک ۱/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارد. با افزودن ۰/۵ درصد الیاف، رطوبت بهینه به ۲۳/۶۵ درصد (افزایش ۳/۳ درصدی) و وزن مخصوص خشک به ۱/۴۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب (کاهش ۱/۴ درصدی) می‌رسد. با افزایش الیاف به ۱ درصد، رطوبت بهینه به ۲۴/۴۲ درصد و وزن مخصوص خشک به ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌رسد. در حداکثر الیاف مصرفی (۲ درصد)، رطوبت بهینه به ۲۵/۶۷ درصد (افزایش ۱۲/۱ درصدی) و وزن مخصوص خشک به ۱/۴۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب (کاهش ۴/۱ درصدی) می‌رسد. دلیل این رفتار، آب‌دوستی الیاف و جذب آب در سطح آنها، ایجاد موانع فیزیکی در برابر حرکت ذرات خاک و همچنین وزن مخصوص پایین الیاف (۱/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) است. نکته قابل توجه اینکه شیب افزایش رطوبت بهینه در مقادیر بالای الیاف (از ۱/۵ به ۲ درصد) کمتر می‌شود که احتمالاً به دلیل تشکیل گره‌های الیاف و کاهش سطح مؤثر آنها برای جذب آب است.

۳-۱-۴- مقایسه با نمونه‌های حاوی سیمان

شکل ۳-د نتایج تراکم نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد سیمان را نشان می‌دهد. با افزودن ۵ درصد سیمان، رطوبت بهینه از ۱۸/۸۱ به ۲۰/۸۰ درصد (افزایش ۱۰/۶ درصدی) و وزن مخصوص خشک از ۱/۶۱ به ۱/۵۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب (کاهش ۱/۲ درصدی) می‌رسد. با افزایش سیمان به ۱۰ درصد، رطوبت بهینه به ۲۲/۲۰ درصد (افزایش ۱۸ درصدی) و وزن مخصوص خشک به ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب (کاهش ۱/۹ درصدی) می‌رسد. مقایسه نشان می‌دهد که در هر دو سطح ۵ و ۱۰ درصد، رطوبت بهینه نمونه‌های سیمانی کمتر از نمونه‌های حاوی غبار کوره آهک است که ناشی از سطح ویژه بالاتر غبار کوره آهک می‌باشد. همچنین وزن مخصوص خشک نمونه‌های سیمانی بیشتر از نمونه‌های حاوی غبار کوره آهک است. هنگامی که ترکیب غبار کوره آهک و سیلیکافوم (۵ درصد غبار کوره آهک با ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم) در نظر گرفته می‌شود، رطوبت بهینه (۲۲/۸۹ درصد) به طور قابل توجهی از نمونه سیمانی بیشتر می‌رود. اگرچه افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص در نمونه‌های پسماند بیشتر

۳-۲-۳- اثر جایگزینی سیلیکافوم بر مقاومت فشاری

شکل ۶ تأثیر جایگزینی سیلیکافوم در سطوح صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، زمان عمل‌آوری و چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک را نمایش می‌دهد. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که جایگزینی بخشی از غبار کوره آهک با سیلیکافوم باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری می‌گردد. بهترین عملکرد در سطح جایگزینی ۵۰ درصد مشاهده می‌شود. برای نمونه با ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم و ۷ روز عمل‌آوری بدون چرخه انجماد-ذوب، مقاومت فشاری به ۲۴۹۸ کیلوپاسکال می‌رسد که نسبت به نمونه بدون سیلیکافوم (۱۳۷۲ کیلوپاسکال) حدود ۸۲ درصد افزایش یافته است. با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز، مقاومت این نمونه به ۵۲۱۰ کیلوپاسکال می‌رسد که حدود ۵۷ درصد بیشتر از نمونه بدون سیلیکافوم (۳۳۲۰ کیلوپاسکال) می‌باشد. پس از ۵۶ روز عمل‌آوری، مقاومت نمونه بهینه به ۶۲۱۹ کیلوپاسکال می‌رسد که در مقایسه با نمونه بدون سیلیکافوم (۳۸۴۳ کیلوپاسکال) افزایشی حدود ۶۲ درصدی را نشان می‌دهد.



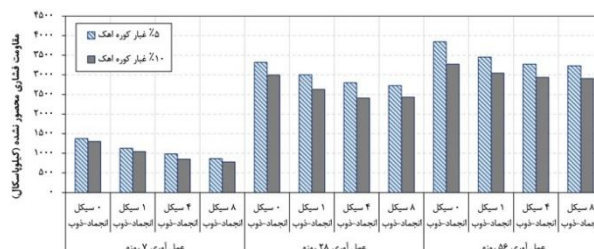
شکل ۶- تأثیر جایگزینی سیلیکافوم در سطوح صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد، زمان عمل‌آوری و چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک

علت این افزایش چشمگیر را می‌توان در دو مکانیسم اصلی جستجو کرد. نخست اینکه سیلیکافوم با داشتن بیش از ۹۲ درصد سیلیس آمورف، منبع بسیار غنی از سیلیس واکنش‌پذیر برای واکنش با کلسیم موجود در غبار کوره آهک فراهم می‌کند و می‌تواند باعث تشکیل مقادیر بیشتری از ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدراته می‌گردد. دوم اینکه ذرات بسیار ریز سیلیکافوم (در حد میکرون و نانومتر) می‌توانند فضاهای خالی ریز میان ذرات خاک را پر کرده و ساختاری متراکم‌تر و یکپارچه‌تر ایجاد نمایند [۱۱، ۲۸، ۲۹].

مکانیسم اصلی این کاهش مقاومت، تشکیل عدسی‌های یخ درون خلل و فرج خاک و همچنین بازآرایی ذرات در طی فرایند ذوب می‌باشد که باعث گسیختگی پیوندهای طبیعی میان ذرات خاک می‌گردد.

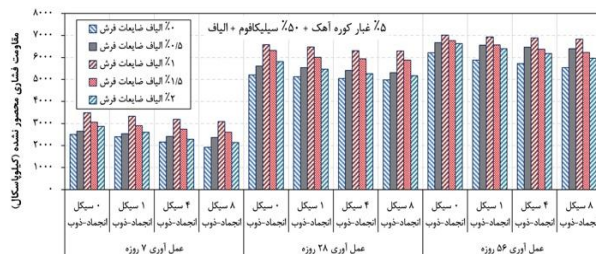
۳-۲-۲- اثر غبار کوره آهک بر مقاومت فشاری

شکل ۵ تأثیر غبار کوره آهک در سطوح ۵ و ۱۰ درصد، زمان عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز و چرخه‌های انجماد-ذوب را بر مقاومت فشاری خاک رس نشان می‌دهد. افزودن غبار کوره آهک باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری می‌گردد. نمونه حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک با ۷ روز عمل‌آوری، مقاومتی برابر ۱۳۷۲ کیلوپاسکال دارد که حدود ۶/۵ برابر خاک طبیعی است. افزایش غبار کوره آهک به ۱۰ درصد، مقاومت را به ۱۳۰۲ کیلوپاسکال کاهش می‌دهد که نشان می‌دهد افزایش بیش از حد این ماده نه تنها مزیتی ندارد بلکه به دلیل ایجاد کلوخه‌های ریز، باعث کاهش مقاومت می‌شود. با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز، مقاومت نمونه ۵ درصد به ۳۳۲۰ کیلوپاسکال می‌رسد (افزایش ۱۴۲ درصدی نسبت به ۷ روز) و پس از ۵۶ روز به ۳۸۴۳ کیلوپاسکال می‌رسد که حدود ۱۸/۳ برابر خاک طبیعی است. چرخه‌های انجماد-ذوب تأثیر منفی بر مقاومت دارند اما این تأثیر در نمونه‌های با عمل‌آوری طولانی‌تر کمتر است. برای نمونه ۵ درصد با ۷ روز عمل‌آوری، ۸ چرخه باعث افت ۳۷ درصدی مقاومت می‌شود در حالی که با ۵۶ روز عمل‌آوری، افت تنها ۱۶ درصد است. در تمام شرایط، نمونه ۵ درصد عملکرد بهتری نسبت به نمونه ۱۰ درصد دارد که تأیید می‌کند مقدار بهینه غبار کوره آهک حدود ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۵- تأثیر غبار کوره آهک (۵ و ۱۰ درصد)، زمان عمل‌آوری (۷، ۲۸ و ۵۶ روز) و چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری خاک رس

روز، مقاومت این نمونه به ۶۵۸۴ کیلوپاسکال می‌رسد که حدود ۲۶ درصد بیشتر از نمونه بدون الیاف (۵۲۱۰ کیلوپاسکال) می‌باشد. پس از ۵۶ روز عمل‌آوری، مقاومت نمونه بهینه به ۷۰۱۳ کیلوپاسکال می‌رسد که در مقایسه با نمونه بدون الیاف (۶۲۱۹ کیلوپاسکال) افزایشی حدود ۱۳ درصدی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- تأثیر الیاف ضایعات فرش در سطوح صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد، زمان عمل‌آوری و چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک و ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم

نکته بسیار مهم در مورد نمونه‌های حاوی الیاف، عملکرد فوق‌العاده آنها در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب است. نمونه با ۱ درصد الیاف پس از ۵۶ روز عمل‌آوری و ۸ چرخه انجماد-ذوب، مقاومتی معادل ۶۸۳۷ کیلوپاسکال از خود نشان می‌دهد که حدود ۹۷/۵ درصد مقاومت اولیه (بدون چرخه) می‌باشد. این مقدار در مقایسه با نمونه بدون الیاف که حدود ۸۹ درصد مقاومت اولیه خود را حفظ می‌کند، بهبود چشمگیری محسوب می‌شود. علت این دوام بالا، نقش الیاف در پل زدن بین ترک‌های ریز ایجاد شده در اثر چرخه‌های انجماد-ذوب است. الیاف با ایجاد پیوستگی مکانیکی در سطح ترک‌ها، از گسترش آنها جلوگیری کرده و یکپارچگی نمونه را حفظ می‌نمایند [۳۰-۳۳].

در سطوح بالاتر الیاف (۱/۵ و ۲ درصد)، مقاومت فشاری نسبت به نمونه ۱ درصد کاهش می‌یابد. برای نمونه با ۲ درصد الیاف و ۵۶ روز عمل‌آوری بدون چرخه انجماد-ذوب، مقاومت به ۶۶۲۹ کیلوپاسکال می‌رسد که حدود ۵ درصد کمتر از نمونه ۱ درصد است. این کاهش را می‌توان به تجمع و گره خوردن الیاف در درصدهای بالا نسبت داد که باعث ایجاد نواحی ضعیف و توزیع نامناسب الیاف درون ماتریس خاک می‌گردد. همچنین افزایش بیش از حد الیاف می‌تواند باعث افزایش تخلخل و کاهش تراکم نمونه شود.

در سطوح جایگزینی بالاتر از ۵۰ درصد (یعنی ۷۵ و ۱۰۰ درصد)، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. برای نمونه با ۱۰۰ درصد جایگزینی (یعنی تنها سیلیکافوم بدون غبار کوره آهک) و ۵۶ روز عمل‌آوری بدون چرخه انجماد-ذوب، مقاومت به ۴۶۴۷ کیلوپاسکال می‌رسد که اگرچه همچنان از نمونه بدون سیلیکافوم (۳۸۴۳ کیلوپاسکال) بیشتر است، اما نسبت به نمونه با ۵۰ درصد جایگزینی (۶۲۱۹ کیلوپاسکال) حدود ۲۵ درصد کاهش نشان می‌دهد. این کاهش را می‌توان به عدم تعادل استوکیومتری میان کلسیم موجود (از غبار کوره آهک) و سیلیس واکنش‌پذیر (از سیلیکافوم) نسبت داد. به عبارت دیگر در سطوح بالای جایگزینی، کلسیم کافی برای واکنش با سیلیس اضافی وجود ندارد و بخشی از سیلیکافوم بدون استفاده باقی می‌ماند.

از نظر مقاومت در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب، نمونه با ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم بهترین عملکرد را دارد. این نمونه پس از ۵۶ روز عمل‌آوری و ۸ چرخه انجماد-ذوب، مقاومتی معادل ۵۵۴۰ کیلوپاسکال از خود نشان می‌دهد که حدود ۸۹ درصد مقاومت اولیه (بدون چرخه) می‌باشد. در حالی که این مقدار برای نمونه بدون سیلیکافوم حدود ۸۴ درصد و برای نمونه با ۱۰۰ درصد جایگزینی حدود ۸۴ درصد است. این برتری ناشی از ریزساختار متراکم‌تر و کاهش تخلخل در نمونه حاوی سیلیکافوم است که باعث می‌شود نفوذ رطوبت و تشکیل عدسی‌های یخ به حداقل برسد.

۳-۲-۴- اثر الیاف ضایعات فرش بر مقاومت فشاری

تأثیر الیاف ضایعات فرش در سطوح صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد، زمان عمل‌آوری و چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک و ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم در شکل ۷ نشان داده شده است. افزودن الیاف ضایعات فرش به ترکیب بهینه شیمیایی (۵ درصد غبار کوره آهک همراه با ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم) باعث افزایش بیشتر مقاومت فشاری می‌گردد. بهترین عملکرد در سطح ۱ درصد الیاف مشاهده می‌شود. برای نمونه حاوی ۱ درصد الیاف با ۷ روز عمل‌آوری بدون چرخه انجماد-ذوب، مقاومت فشاری به ۳۴۹۳ کیلوپاسکال می‌رسد که نسبت به نمونه بدون الیاف (۲۴۹۸ کیلوپاسکال) حدود ۴۰ درصد افزایش یافته است. با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸

۳-۲-۵- مقایسه با نمونه‌های حاوی سیمان

سیمان عمل کند. اما هنگامی که سیلیکافوم و الیاف فرش نیز به ترکیب اضافه می‌شوند، عملکرد به طور قابل توجهی از سیمان پیشی می‌گیرد.

با جمع‌بندی نتایج می‌توان گفت که ترکیب بهینه معرفی شده شامل ۵ درصد غبار کوره آهک، ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم (یعنی مجموعاً ۲/۵ درصد غبار کوره آهک و ۲/۵ درصد سیلیکافوم) و ۱ درصد الیاف ضایعات فرش، با دستیابی به مقاومت فشاری ۷۰۱۳ کیلوپاسکال پس از ۵۶ روز عمل‌آوری، عملکردی حدود ۳۳ برابر بهتر از خاک طبیعی (۲۱۰ کیلوپاسکال) و حدود ۵۰ درصد بهتر از نمونه حاوی ۱۰ درصد سیمان (۴۶۸۰ کیلوپاسکال) از خود نشان می‌دهد. همچنین این ترکیب با حفظ بیش از ۹۷ درصد مقاومت اولیه پس از ۸ چرخه انجماد-ذوب، دوام فوق‌العاده‌ای در برابر شرایط محیطی سرد دارد که آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای ژئوتکنیکی در مناطق سردسیر تبدیل می‌کند. لازم به ذکر است که کلیه نمونه‌های سیمانی تحت شرایط کاملاً یکسان با نمونه‌های حاوی پسماندهای صنعتی آزمایش شده‌اند. این یکسان‌سازی شرایط، امکان مقایسه معتبر و منصفانه بین عملکرد دو روش تثبیت را فراهم ساخته است.

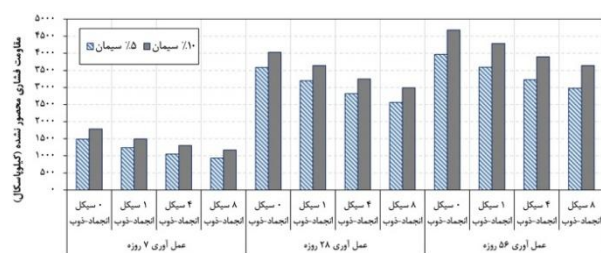
۳-۳-۳- نتایج آزمایش سرعت موج التراسونیک

سرعت موج التراسونیک به عنوان یک شاخص غیرمخرب، تصویری از ساختار درونی نمونه‌ها ارائه می‌دهد. هر چه این سرعت بیشتر باشد، نشان از تراکم بهتر، پیوند محکم‌تر بین ذرات و ریزساختاری یکپارچه دارد. در مقابل، کاهش سرعت موج حکایت از ایجاد ریزترک‌ها، افزایش تخلخل و گسستگی درون نمونه دارد [۳۴-۳۷]. در این بخش، نتایج اندازه‌گیری سرعت موج برای نمونه‌های مختلف ارائه و تحلیل می‌گردد.

۳-۳-۱- سرعت موج در خاک تثبیت‌نشده

شکل ۹ تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر سرعت موج التراسونیک خاک رس تثبیت‌نشده را نمایش می‌دهد. خاک رس طبیعی بدون هیچ افزودنی، سرعت موج بسیار پایینی معادل ۳۲۰ متر بر ثانیه از خود نشان می‌دهد. این مقدار پایین حاکی از ساختاری سست و متخلخل با پیوندهای ضعیف میان ذرات است. با اعمال یک چرخه انجماد-ذوب، سرعت موج به ۲۵۳ متر بر ثانیه سقوط می‌کند. این

شکل ۸ اثر سیمان (۵ و ۱۰ درصد)، زمان عمل‌آوری و چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری خاک رس را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی سیمان به عنوان روش متداول تثبیت خاک، عملکرد نسبتاً خوبی از خود نشان می‌دهند. نمونه حاوی ۱۰ درصد سیمان با ۵۶ روز عمل‌آوری بدون چرخه انجماد-ذوب، مقاومتی معادل ۴۶۸۰ کیلوپاسکال دارد. این مقدار اگرچه از نمونه تثبیت شده با ۵ درصد غبار کوره آهک (۳۸۴۳ کیلوپاسکال) بیشتر است، اما در مقایسه با نمونه حاوی ترکیب بهینه پسماندها (۷۰۱۳ کیلوپاسکال) حدود ۳۳ درصد کمتر می‌باشد. همچنین نمونه حاوی ۵ درصد سیمان در شرایط مشابه، مقاومتی برابر با ۳۹۶۸ کیلوپاسکال دارد که حدود ۴۳ درصد کمتر از ترکیب بهینه پسماندها است. از نظر مقاومت در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب نیز نمونه‌های سیمانی عملکرد ضعیف‌تری دارند. نمونه با ۱۰ درصد سیمان پس از ۵۶ روز عمل‌آوری و ۸ چرخه انجماد-ذوب، مقاومتی معادل ۳۶۴۰ کیلوپاسکال از خود نشان می‌دهد که حدود ۷۸ درصد مقاومت اولیه آن می‌باشد. این در حالی است که ترکیب بهینه پسماندها (۵ درصد غبار کوره آهک، ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم و ۱ درصد الیاف فرش) در شرایط مشابه، حدود ۹۷/۵ درصد مقاومت اولیه خود را حفظ می‌کند. این تفاوت چشمگیر نشان‌دهنده برتری قابل توجه ترکیبات پسماند نسبت به سیمان در شرایط محیطی سرد و متناوب انجماد-ذوب است.

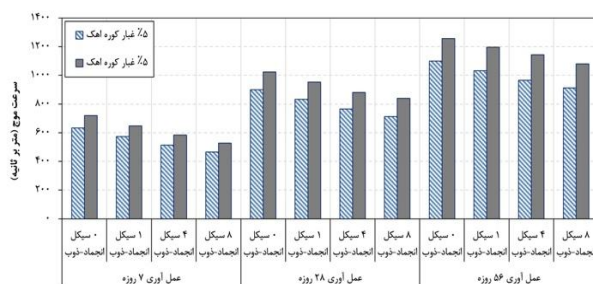


شکل ۸- تأثیر سیمان (۵ و ۱۰ درصد)، زمان عمل‌آوری و

چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت فشاری خاک رس

نکته جالب توجه دیگر آنکه نمونه حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک به تنهایی (بدون سیلیکافوم و الیاف) با ۵۶ روز عمل‌آوری، مقاومتی معادل ۳۸۴۳ کیلوپاسکال دارد که تقریباً برابر با نمونه ۵ درصد سیمان (۳۹۶۸ کیلوپاسکال) است. این نشان می‌دهد که حتی خود غبار کوره آهک نیز می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای

برای نمونه ۱۰ درصد، سرعت به ۱۲۵۶ متر بر ثانیه می‌رسد که همچنان از نمونه ۵ درصد بیشتر است. چرخه‌های انجماد-ذوب تأثیر قابل توجهی بر سرعت موج دارند اما این تأثیر در نمونه‌های با عمل‌آوری طولانی‌تر کمتر است. برای نمونه ۵ درصد با عمل‌آوری ۵۶ روز، اعمال ۸ چرخه انجماد-ذوب باعث کاهش سرعت از ۱۱۰۰ به ۹۱۳ متر بر ثانیه می‌شود (کاهش حدود ۱۷ درصد). در همین شرایط، نمونه ۱۰ درصد سرعت خود را از ۱۲۵۶ به ۱۰۸۰ متر بر ثانیه می‌رساند (کاهش حدود ۱۴ درصد). این افت‌ها نشان می‌دهد که اگرچه غبار کوره آهک ساختار را در برابر یخبندان مقاوم می‌کند، اما هنوز ریزترک‌هایی در اثر چرخه‌های حرارتی ایجاد می‌شود که یکپارچگی نمونه را کاهش می‌دهد.



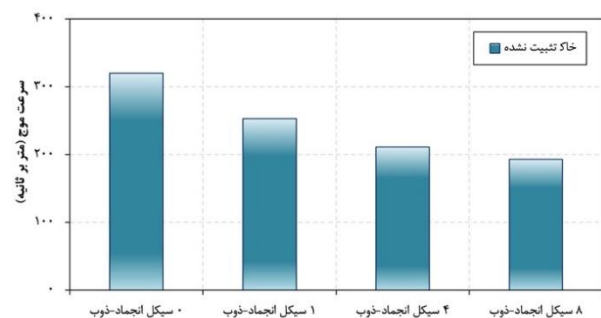
شکل ۱۰- تأثیر غبار کوره آهک (۵ و ۱۰ درصد)، زمان عمل‌آوری و چرخه‌های انجماد-ذوب بر سرعت موج التراسونیک

۳-۳-۳- تأثیر جایگزینی سیلیکافوم بر سرعت موج

شکل ۱۱ تأثیر جایگزینی سیلیکافوم در سطوح صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بر سرعت موج التراسونیک را به خوبی نشان می‌دهد. سیلیکافوم تحولی شگرف در سرعت موج ایجاد می‌کند. نمونه با ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم پس از ۷ روز عمل‌آوری، سرعتی برابر ۱۵۵۰ متر بر ثانیه دارد که نسبت به نمونه بدون سیلیکافوم با سرعت ۶۳۳ متر بر ثانیه، افزایشی ۱۴۵ درصدی را نشان می‌دهد. این جهش عظیم ناشی از دو عامل است. نخست اینکه ذرات نانومتری سیلیکافوم مانند سیمانی عمل می‌کنند و فضاهای خالی ریز را پر می‌کنند و دوم اینکه سیلیکافوم با تأمین سیلیس واکنش‌پذیر، می‌تواند تولید ژل‌های سیلیکات کلسیم هیدراته را افزایش می‌دهد.

پس از ۵۶ روز عمل‌آوری، سرعت موج در نمونه بهینه به ۲۳۵۰ متر بر ثانیه می‌رسد. این مقدار حدود ۷ برابر خاک طبیعی و بیش از دو

کاهش ۲۱ درصدی ناشی از گسستگی پیوندهای طبیعی خاک در اثر تشکیل عدسی‌های یخ و سپس ذوب آنهاست. پس از ۴ و ۸ چرخه، سرعت موج به ترتیب به ۲۱۱ و ۱۹۳ متر بر ثانیه می‌رسد. تصویر کلی آن است که خاک تثبیت‌نشده در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب بسیار آسیب‌پذیر است و ساختار درونی آن به سرعت رو به زوال می‌رود.



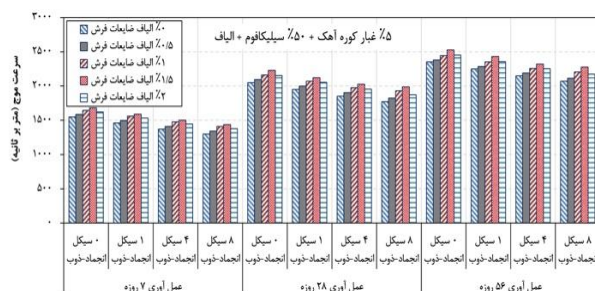
شکل ۹- تأثیر چرخه‌های انجماد-ذوب بر سرعت موج التراسونیک خاک رس تثبیت‌نشده

۳-۳-۲- تأثیر غبار کوره آهک بر سرعت موج

اثر غبار کوره آهک (۵ و ۱۰ درصد)، زمان عمل‌آوری و چرخه‌های انجماد-ذوب بر سرعت موج التراسونیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است. افزودن غبار کوره آهک وضعیت را به کلی دگرگون می‌کند. نمونه حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک پس از ۷ روز عمل‌آوری، سرعت موجی برابر ۶۳۳ متر بر ثانیه دارد که نزدیک به دو برابر خاک طبیعی است. این افزایش چشمگیر نشان‌دهنده شکل‌گیری پیوندهای پوزولانی اولیه و پر شدن بخشی از فضاهای خالی میان ذرات است. جالب آنکه نمونه ۱۰ درصد غبار کوره آهک در همین شرایط سرعت ۷۲۰ متر بر ثانیه را ثبت می‌کند که از نمونه ۵ درصد نیز پیشی گرفته است. این در حالی است که در نتایج مقاومت فشاری، نمونه ۵ درصد عملکرد بهتری داشت. این تفاوت نشان می‌دهد که سرعت موج به تراکم فیزیکی و پیوستگی محیط حساس است در حالی که مقاومت فشاری به کیفیت پیوندهای شیمیایی وابستگی بیشتری دارد.

با افزایش زمان عمل‌آوری به ۵۶ روز، سرعت موج در نمونه ۵ درصد غبار کوره آهک به ۱۱۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد. این افزایش ۷۴ درصدی نسبت به نمونه ۷ روزه، گویای پیشرفت تدریجی واکنش‌های پوزولانی و تکامل ریزساختار در طول زمان است.

میان ذرات، یکپارچگی نمونه را بهبود می بخشد و از سوی دیگر به عنوان مانعی در مسیر انتشار موج عمل می کنند. نتایج نشان می دهد که به طور کلی افزودن الیاف باعث افزایش سرعت موج می شود. بهترین عملکرد در سطح ۱/۵ درصد الیاف مشاهده می شود. نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف با ۵۶ روز عمل آوری، سرعتی معادل ۲۵۲۸ متر بر ثانیه دارد که نسبت به نمونه بدون الیاف (۲۳۵۰ متر بر ثانیه) حدود ۷/۵ درصد افزایش یافته است. نمونه با ۱ درصد الیاف سرعت ۲۴۴۴ متر بر ثانیه را ثبت می کند. در سطح ۲ درصد الیاف به دلیل گره خوردن و تجمع الیاف، سرعت به ۲۴۵۰ متر بر ثانیه کاهش می یابد. تأثیر مثبت الیاف بر سرعت موج در نمونه های با عمل آوری طولانی تر و تحت چرخه انجماد-ذوب بارزتر است. پس از ۸ چرخه انجماد-ذوب، نمونه بدون الیاف سرعتی برابر ۲۰۷۰ متر بر ثانیه دارد در حالی که نمونه با ۱/۵ درصد الیاف سرعت ۲۲۷۵ متر بر ثانیه را نشان می دهد. این اختلاف ۱۰ درصدی نشان دهنده نقش مؤثر الیاف در حفظ یکپارچگی نمونه در شرایط مخرب و جلوگیری از گسسته شدن ساختار است.

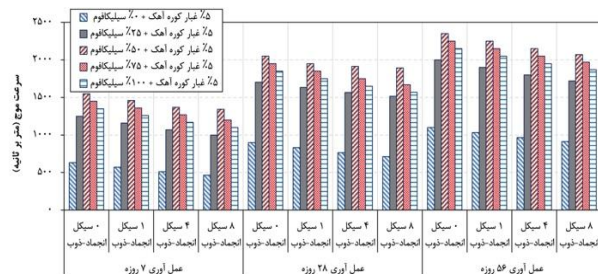


شکل ۱۲- تأثیر الیاف ضایعات فرش در سطوح صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد بر سرعت موج التراسونیک نمونه های حاوی ۵۰ درصد غبار کوره آهک و ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم

۳-۵- مقایسه با نمونه های حاوی سیمان

در شکل ۱۳ ۱۳ اثر سیمان (۵ و ۱۰ درصد)، زمان عمل آوری و چرخه های انجماد-ذوب بر سرعت موج التراسونیک نشان داده شده است. نمونه های سیمانی عملکرد قابل قبولی از نظر سرعت موج دارند. نمونه با ۱۰ درصد سیمان پس از ۵۶ روز عمل آوری، سرعتی برابر ۲۱۶۰ متر بر ثانیه ثبت می کند که از نمونه حاوی ۱۰ درصد غبار کوره آهک (۱۲۵۶ متر بر ثانیه) بسیار بیشتر است. این برتری سیمان ناشی از واکنش های هیدراتاسیون سریع و قوی آن است که در مدت کوتاه تری ساختاری متراکم و یکپارچه ایجاد

برابر نمونه حاوی تنها غبار کوره آهک است. چنین سرعت بالایی نشان از ساختاری فوق العاده متراکم و یکپارچه دارد که در آن ذرات خاک به خوبی توسط محصولات پوزولانی به هم چسبیده اند.



شکل ۱۱- تأثیر جایگزینی سیلیکافوم در سطوح صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بر سرعت موج التراسونیک نمونه های حاوی ۵۰ درصد غبار کوره آهک

نکته جالب توجه آنکه نمونه با ۱۰۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم (یعنی بدون غبار کوره آهک) نیز سرعت بالایی معادل ۲۱۵۰ متر بر ثانیه پس از ۵۶ روز عمل آوری دارد، اما همچنان از نمونه ۵۰ درصد (۲۳۵۰ متر بر ثانیه) عقب تر است. این نشان می دهد که وجود هر دو ماده در کنار یکدیگر و در نسبت بهینه، بهترین نتیجه را به همراه دارد. سیلیکافوم به تنهایی نیز می تواند با پر کردن فضاهای خالی و ایجاد پیوندهای ضعیف، تراکم را افزایش دهد اما برای تشکیل ژل های چسبنده قوی، نیاز به منبع کلسیم (که توسط غبار کوره آهک تأمین می شود) دارد. از نظر مقاومت در برابر چرخه های انجماد-ذوب، نمونه با ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم عملکرد برجسته ای دارد. پس از ۵۶ روز عمل آوری و ۸ چرخه، سرعت موج از ۲۳۵۰ به ۲۰۷۰ متر بر ثانیه کاهش می یابد که افت تنها ۱۲ درصدی را نشان می دهد. این کاهش در مقایسه با نمونه بدون سیلیکافوم که حدود ۱۷ درصد افت داشت، بسیار کمتر است و حاکی از دوام بالاتر ساختار در برابر آسیب های یخبندان می باشد. ریزساختار متراکم ایجاد شده توسط سیلیکافوم، راه نفوذ آب را بسته و از تشکیل عدسی های یخ بزرگ جلوگیری می کند.

۳-۴- تأثیر الیاف ضایعات فرش بر سرعت موج

شکل ۱۲ تأثیر الیاف ضایعات فرش در سطوح صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد را بر سرعت موج التراسونیک نشان می دهد. الیاف تأثیر دوگانه ای بر سرعت موج دارند. از یک سو با ایجاد پل های ارتباطی

می کند.

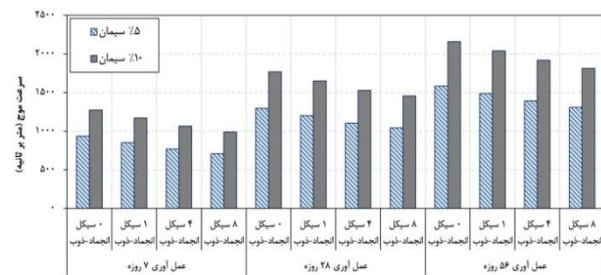
بهینه انتخاب گردیده است و افزایش جزئی سرعت موج در ۱/۵ درصد الیاف، نمی تواند مبنای انتخاب درصد بهینه قرار گیرد.

نتایج سرعت موج التراسونیک به خوبی تصویر ریزساختاری نمونه ها را تکمیل می کند. خاک طبیعی ساختاری سست و متخلخل دارد که با اولین چرخه یخبندان به شدت آسیب می بیند. غبار کوره آهک به تنهایی می تواند ساختاری نسبتاً متراکم ایجاد کند اما برای رسیدن به تراکم ایده آل کافی نیست. افزودن سیلیکافوم تحولی بنیادین ایجاد می کند و سرعت موج را تا ۷ برابر افزایش می دهد. در نهایت، الیاف فرش با حفظ یکپارچگی در شرایط یخبندان، نقش یک محافظ را ایفا می کنند و از کاهش شدید سرعت موج جلوگیری می نمایند. ترکیب بهینه پسماندها نه تنها از سیمان بهتر عمل می کند، بلکه ساختاری ایجاد می کند که در برابر چرخه های مخرب انجماد-ذوب، دوام فوق العاده ای از خود نشان می دهد.

هرچند نتایج این پژوهش نشان دهنده برتری قابل توجه ترکیب بهینه پسماندهای صنعتی نسبت به نمونه سیمانی در شرایط آزمایشگاهی می باشد، اما تعمیم این نتایج به کلیه خاک ها و شرایط محیطی باید با احتیاط صورت پذیرد. محدودیت های اصلی این مطالعه شامل انجام آزمایش ها در مقیاس آزمایشگاهی، محدود بودن به یک نوع خاک خاص (خاک رس کائولینیت)، استفاده از سیستم بسته برای چرخه های انجماد-ذوب (که ممکن است با شرایط واقعی برخی مناطق که در آن تبادل رطوبت با محیط خارج وجود دارد، تفاوت داشته باشد) و عدم بررسی رفتار بلندمدت نمونه ها تحت شرایط محیطی متغیر می باشد. بنابراین، پیش از کاربرد گسترده این ترکیب در پروژه های عمرانی، انجام مطالعات تکمیلی در مقیاس بزرگ تر و در شرایط مختلف خاک و محیطی توصیه می گردد.

۴-۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

مقاومت کششی یکی از مهم ترین ویژگی های مکانیکی در خاک های تثبیت شده است زیرا خاک های رسی به طور طبیعی در برابر کشش بسیار ضعیف هستند. در این پژوهش، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم تنها بر روی نمونه های حاوی الیاف ضایعات فرش انجام شد، زیرا نقش اصلی الیاف بهبود رفتار کششی و جلوگیری از گسترش ترک ها می باشد. نتایج نشان می دهد که افزودن الیاف تأثیر شگرفی بر مقاومت کششی دارد. نمونه بدون



شکل ۱۳- تأثیر سیمان (۵ و ۱۰ درصد)، زمان عمل آوری و

چرخه های انجماد-ذوب بر سرعت موج التراسونیک

با این حال، هنگامی که ترکیب بهینه پسماندها (۵ درصد غبار کوره آهک همراه با ۵۰ درصد سیلیکافوم و ۱/۵ درصد الیاف) با سیمان مقایسه می شود، تصویر متفاوت می شود. سرعت موج در ترکیب بهینه پسماندها به ۲۵۲۸ متر بر ثانیه می رسد که حدود ۱۷ درصد بیشتر از بهترین نمونه سیمانی (۲۱۶۰ متر بر ثانیه) است. این برتری نشان می دهد که ترکیب هوشمندانه پسماندهای صنعتی می تواند ساختاری حتی متراکم تر و یکپارچه تر از سیمان ایجاد کند. از نظر دوام در برابر چرخه های انجماد-ذوب نیز ترکیبات پسماند عملکرد بهتری دارند. نمونه سیمانی ۱۰ درصد پس از ۵۶ روز عمل آوری و ۸ چرخه انجماد-ذوب، سرعت خود را از ۲۱۶۰ به ۱۸۱۵ متر بر ثانیه می رساند (کاهش حدود ۱۶ درصد). در مقابل، ترکیب بهینه پسماندها با ۱/۵ درصد الیاف، سرعت خود را از ۲۵۲۸ به ۲۲۷۵ متر بر ثانیه می رساند (کاهش حدود ۱۰ درصد). این برتری باز هم ناشی از نقش الیاف در کنترل ترک ها و همچنین ریزساختار متراکم تر ناشی از حضور سیلیکافوم است. نکته قابل توجه در خصوص نتایج سرعت موج آن است که اگرچه بیشترین سرعت در سطح ۱/۵ درصد الیاف مشاهده می شود، اما میزان افزایش سرعت از ۱ درصد به ۱/۵ درصد الیاف (از ۲۴۴۴ به ۲۵۲۸ متر بر ثانیه) تنها حدود ۳/۴ درصد می باشد. این افزایش اندک را می توان به اثر پرکنندگی ثانویه الیاف در فضا های خالی باقی مانده نسبت داد که به بهبود انتشار موج کمک می کند، اما تأثیر چندانی بر عملکرد باربری و مقاومتی نمونه ندارد. در مقابل، همان طور که در نتایج مقاومت فشاری (شکل ۷) مشاهده شد، افزایش الیاف از ۱ به ۱/۵ درصد، باعث کاهش مقاومت فشاری می گردد. بنابراین با توجه به اینکه مقاومت فشاری به عنوان معیار اصلی طراحی مهندسی محسوب می شود، درصد ۱ درصد الیاف به عنوان درصد

آهک در سه سطح صفر، ۵ و ۱۰ درصد، اثر جایگزینی سیلیکافوم در پنج سطح صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و اثر الیاف ضایعات فرش در چهار سطح ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد بر روی خاک رس مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه تحت آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری محصورنشده، مقاومت کششی غیرمستقیم، سرعت موج التراسونیک و چرخه‌های انجماد-ذوب قرار گرفتند. مهمترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- خاک رس طبیعی بدون هیچ افزودنی، مقاومت فشاری بسیار پایینی معادل ۲۱۰ کیلوپاسکال داشت و پس از اعمال ۸ چرخه انجماد-ذوب، بیش از ۵۹ درصد مقاومت خود را از دست داد که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری شدید این خاک در شرایط سردسیر است. - افزودن ۵ درصد غبار کوره آهک، مقاومت فشاری نمونه را پس از ۵۶ روز عمل‌آوری به ۳۸۴۳ کیلوپاسکال رساند که حدود ۱۸/۳ برابر مقاومت خاک طبیعی است. افزایش بیشتر غبار کوره آهک به ۱۰ درصد نه تنها مزیتی نداشت بلکه مقاومت را کاهش داد.

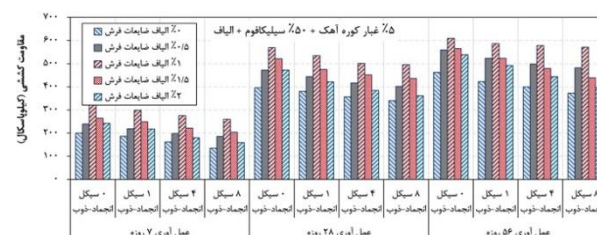
- جایگزینی ۵۰ درصد از غبار کوره آهک با سیلیکافوم، مقاومت فشاری را به ۶۲۱۹ کیلوپاسکال افزایش داد که نسبت به نمونه بدون سیلیکافوم حدود ۶۲ درصد بهبود را نشان می‌دهد. سطوح بالاتر جایگزینی (۷۵ و ۱۰۰ درصد) به دلیل عدم تعادل استوکیومتری میان کلسیم و سیلیس، منجر به کاهش مقاومت شد.

- افزودن ۱ درصد الیاف ضایعات فرش به ترکیب بهینه شیمیایی، مقاومت فشاری را به مقدار بی‌سابقه ۷۰۱۳ کیلوپاسکال رساند که حدود ۳۳ برابر مقاومت خاک طبیعی و حدود ۵۰ درصد بیشتر از نمونه حاوی ۱۰ درصد سیمان (۴۶۸۰ کیلوپاسکال) می‌باشد.

- ترکیب بهینه (۵ درصد غبار کوره آهک، ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم و ۱ درصد الیاف فرش) پس از ۸ چرخه انجماد-ذوب، بیش از ۹۷ درصد مقاومت فشاری خود را حفظ کرد. این در حالی است که نمونه حاوی ۱۰ درصد سیمان در شرایط مشابه تنها حدود ۷۸ درصد مقاومت اولیه خود را نگه داشت.

- مقاومت کششی نمونه بهینه حاوی ۱ درصد الیاف به ۶۰۹ کیلوپاسکال رسید که نسبت به نمونه بدون الیاف (۴۶۲ کیلوپاسکال) افزایشی ۳۲ درصدی را نشان می‌دهد. الیاف با ایجاد پل‌های ارتباطی میان ترک‌ها، نقش اساسی در بهبود رفتار کششی ایفا کردند.

الیاف با ۵۶ روز عمل‌آوری، مقاومت کششی ۴۶۲ کیلوپاسکال نشان داد. با افزودن ۰/۵ درصد الیاف، این مقاومت به ۵۵۹ کیلوپاسکال (افزایش ۲۱ درصدی) و با ۱ درصد الیاف به ۶۰۹ کیلوپاسکال (افزایش ۳۲ درصدی) رسید. در سطوح بالاتر الیاف (۱/۵ و ۲ درصد) به دلیل گره خوردن و تجمع الیاف، مقاومت کاهش یافت. تأثیر زمان عمل‌آوری بسیار قابل توجه بود. نمونه با ۱ درصد الیاف پس از ۷ روز مقاومت ۳۲۴ کیلوپاسکال داشت که پس از ۵۶ روز به ۶۰۹ کیلوپاسکال رسید (افزایش ۸۸ درصدی). چرخه‌های انجماد-ذوب در نمونه بدون الیاف باعث افت ۱۹/۵ درصدی مقاومت شد، در حالی که نمونه با ۱ درصد الیاف تنها افت ۶/۲ درصدی را تجربه کرد. همچنین مقاومت کششی نمونه با ۱ درصد الیاف پس از ۸ چرخه (۵۷۱ کیلوپاسکال) همچنان از مقاومت نمونه بدون الیاف در حالت بدون چرخه (۴۶۲ کیلوپاسکال) بیشتر بود. در جمع‌بندی، الیاف ضایعات فرش با غلظت ۱ درصد، مقاومت کششی را ۳۲ درصد افزایش داده و پس از ۸ چرخه انجماد-ذوب بیش از ۹۴ درصد مقاومت اولیه را حفظ می‌کند.



شکل ۱۴- تأثیر الیاف ضایعات فرش در سطوح صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد، زمان عمل‌آوری (۷، ۲۸ و ۵۶ روز) و چرخه‌های انجماد-ذوب بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی ۵ درصد غبار کوره آهک و ۵۰ درصد جایگزینی سیلیکافوم

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان استفاده از سه نوع پسماند صنعتی شامل غبار کوره آهک، سیلیکافوم و الیاف ضایعات فرش برای تثبیت خاک رس و بهبود عملکرد مکانیکی و دوام آن در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی دستیابی به ترکیبی پایدار و دوستدار محیط زیست بود که بتواند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی تثبیت (نظیر سیمان) در پروژه‌های ژئوتکنیکی مناطق سردسیر باشد. برای این منظور، اثر غبار کوره

خشک بر دوام نمونه‌ها، و همچنین مطالعه اقتصادی استفاده از این پسماندها در مقیاس صنعتی اشاره نمود.

۵- مراجع

- [1] A. Zerrouk, B. Lamri, C. Vipulanandan, S. Kenai, Performance evaluation of human hair fiber reinforcement on lime or cement stabilized clayey-sand, in: Key Eng. Mater., Trans Tech Publ, 2016: pp. 207–217.
- [2] A. Ghorbani, M. Salimzadehshooiili, Evaluation of Strength behaviour of Cement-RHA Stabilized and Polypropylene Fiber Reinforced Clay-Sand Mixtures, Civil Engineering Journal 4 (2018) 2628–2641.
- [3] H.C. Scheuermann Filho, R. Beck Saldanha, C. Gravina da Rocha, N. Cesar Consoli, Sustainable Binders Stabilizing Dispersive Clay, Journal of Materials in Civil Engineering 33 (2021) 06020026. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003595](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003595).
- [4] N. Latifi, A.S.A. Rashid, S. Siddiqua, S. Horpibulsuk, Micro-structural analysis of strength development in low-and high swelling clays stabilized with magnesium chloride solution—A green soil stabilizer, Appl. Clay Sci. 118 (2015) 195–206.
- [5] R.N. Yong, V.R. Ouhadi, Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils, Appl. Clay Sci. 35 (2007) 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.08.009>.
- [6] R. Mahmoudi, R. Rezvani, I. Hosseinpour, M. Payan, A. Ghanbari Astaneh, Effects of Hydrated Lime and Zeolite on the Mechanical Behavior of Calcareous Sand Subjected to Wet–Dry Cycles, Journal of Materials in Civil Engineering 37 (2025) 04024478. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17997>.
- [7] D.-L. Wang, C.-S. Tang, X.-H. Pan, Z.-H. Dong, R. Wang, J.-Z. Zhang, X.-L. Ji, H.-C. Hu, B. Shi, Construction and Demolition Waste Stabilization through Biocarbonation of Reactive Magnesia Cement: Effect of Urea Concentration, Journal of Materials in Civil Engineering 37 (2025) 04024450. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17257>.
- [8] M. Ramezani, S. Soleimani Kutanaei, A. Seyedkazemi, A. Esfandiari Fard, Sustainable stabilization of fiber-reinforced clayey sand using zeolite as partial cement replacement, Case Studies in Construction Materials 22 (2025) e04868. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04868>.
- [9] A. Khajeh, M. Salimi, H. MolaAbasi, M.E. Seif, M. Payan, S. Keawsawasvong, Zeolite-based soil

– سرعت موج الٹراسونیک در ترکیب بهینه به ۲۵۲۸ متر بر ثانیه رسید که حدود ۸ برابر خاک طبیعی (۳۲۰ متر بر ثانیه) و حدود ۱۷ درصد بیشتر از نمونه حاوی ۱۰ درصد سیمان (۲۱۶۰ متر بر ثانیه) است. این مقدار نشان‌دهنده ریزساختاری فوق‌العاده متراکم و یکپارچه در نمونه بهینه می‌باشد.

– غبار کوره آهک به تنهایی رطوبت بهینه را افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک را کاهش داد. افزودن سیلیکافوم این روند را تشدید کرد زیرا ذرات بسیار ریز آن سطح ویژه را افزایش داده و آب بیشتری جذب می‌کنند. الیاف فرش نیز به دلیل آب‌دوستی و وزن مخصوص پایین، رطوبت بهینه را بیشتر افزایش دادند.

– سیمان اگرچه عملکرد بهتری نسبت به غبار کوره آهک به تنهایی داشت، اما در مقایسه با ترکیب هم‌زمان غبار کوره آهک، سیلیکافوم و الیاف فرش، در تمام شاخص‌های مکانیکی و دوام، به طور قابل توجهی ضعیف‌تر عمل کرد.

– درصد بهینه الیاف فرش برابر با ۱ درصد تعیین گردید. در درصد‌های بالاتر (۱/۵ و ۲ درصد)، پدیده گره خوردن و تجمع الیاف باعث کاهش مقاومت فشاری و کششی شد.

– زمان عمل‌آوری تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر عملکرد نمونه‌ها داشت. نمونه‌های با ۵۶ روز عمل‌آوری در مقایسه با نمونه‌های ۷ روزه، افزایش مقاومت تا ۱۰۰ درصد و دوام بسیار بالاتری در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب از خود نشان دادند.

با وجود نتایج امیدوارکننده به دست آمده، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است که ذکر آنها برای ارائه تصویری کامل از کار ضروری می‌باشد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به انجام آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی، محدود بودن به یک نوع خاک خاص (خاک رس کائولینیت)، استفاده از سیستم بسته برای چرخه‌های انجماد-ذوب و عدم بررسی رفتار بلندمدت نمونه‌ها در شرایط محیطی متغیر اشاره کرد. بنابراین، پیش از کاربرد گسترده این ترکیب در پروژه‌های عمرانی، انجام مطالعات تکمیلی ضروری به نظر می‌رسد. از جمله پیشنهادها برای ادامه مسیر تحقیقاتی می‌توان به بررسی عملکرد ترکیب بهینه بر روی انواع دیگر خاک‌های مسئله‌دار (از جمله خاک‌های متورم‌شونده و خاک‌های با پلاستیسیته بالا)، انجام آزمایش‌های صحرایی در مقیاس واقعی، مطالعه رفتار بلندمدت نمونه‌ها تحت شرایط مختلف محیطی و بارگذاری، بررسی اثر هم‌زمان چرخه‌های انجماد-ذوب و تر-

porous concrete containing waste-originated activated carbon in the removal of surface runoff pollutants, *Concrete Research* 16 (2024) 49–63.

[19] S.A.M. Moayed, M. Arabani, H. Ahmadi, Influence of hemp fiber on the mechanical characteristics and freeze-thaw durability of LKD-nano silica-stabilized kaolin soil, *Results in Engineering* 26 (2025) 105318. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105318>.

[20] M. Hematibahar, N. Vatin, J. Petru, M.N. Bashir, A. Hasanzadeh, T. Gebre, A.A. Milani, A. Bakhtiyari, Experimental evaluation of mechanical strength of silica fume-cemented sand reinforced with 3D-printed fibers, *Journal of Materials Research and Technology* 38 (2025) 2058–2075. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.041>.

[21] M. Waleed, F. Alshawmar, Enhancing mechanical properties of low plasticity soil through coal and silica fume stabilization, *Sci. Rep.* 15 (2025) 1–22. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94149-0>.

[22] A. Hasanzadeh, I. Shooshpasha, Influence of PET fibres on the tensile characteristics of cemented sand treated with silica fume, *Road Materials and Pavement Design* 26 (2025) 1041–1064. <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2399251>.

[23] J.F. Zhu, Q.Q. Zheng, Y.L. Tao, L.Y. Ju, H. Yang, X.N. Gong, B.J. Pan, Z.Q. Wang, The curing mechanism and empirical model for the marine organic soft clay stabilized with calcium carbide residue and silica fume under the optimal ratio, *Acta Geotech.* 20 (2025) 683–706. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02413-w>.

[24] H. Ghiassian, R. Jamshidi, A.R. Tabarsa, Dynamic performance of Toyoura sand reinforced with randomly distributed carpet waste strips, in: *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, 2008: pp. 1–13.

[25] M. Miraftab, A. Lickfold, Utilization of Carpet Waste in Reinforcement of Substandard Soils, *Journal of Industrial Textiles* 38 (2008) 167–174. <https://doi.org/10.1177/1528083708091064>.

[26] M. Mirzababaei, M. Miraftab, M. Mohamed, P. McMahon, Unconfined Compression Strength of Reinforced Clays with Carpet Waste Fibers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139 (2013) 483–493. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000792).

[27] M. Shahbazi, M. Rowshanzamir, S.M. Abtahi, S.M. Hejazi, Optimization of carpet waste fibers and steel slag particles to reinforce expansive soil using response surface methodology, *Appl. Clay Sci.* 142 (2017) 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.11.027>.

stabilization: A review, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.06.039>.

[10] M. Dokaneh, M. Salimi, R. Rezvani, M. Payan, I. Hosseinpour, Valorization of industrial wastes for stabilizing highly expansive clays: Mechanical, microstructural and durability improvements, *Constr. Build. Mater.* 481 (2025) 141497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141497>.

[11] M. Salimi, M. Payan, I. Hosseinpour, M. Arabani, P. Zanganeh Ranjbar, Geopolymer stabilization of construction and demolition waste using water treatment sludge and silica fume for pavement applications, *Journal of Materials Research and Technology* 37 (2025) 1834–1849. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.096>.

[12] A. Mohammadi Darestani, M. Arabani, P. Zanganeh Ranjbar, M. Payan, M. Salimi, Strength enhancement of calcium carbide residue-stabilized clay with perlite powder and water treatment sludge, *Sci. Rep.* 15 (2025) 43701. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27584-8>.

[13] A. Jamaldar, P. Asadi, M. Salimi, M. Payan, P.Z. Ranjbar, M. Arabani, H. Ahmadi, Application of natural and synthetic fibers in bio-based earthen composites: A state-of-the-art review, *Results in Engineering* 25 (2025) 103732. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103732>.

[14] M.H. Hatefi, M. Arabani, M. Payan, P. Zanganeh Ranjbar, The influence of volcanic ash (VA) on the mechanical properties and freeze-thaw durability of lime kiln dust (LKD)-stabilized kaolin clayey soil, *Results in Engineering* 24 (2024) 103077. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103077>.

[15] M. Salimi, M. Payan, I. Hosseinpour, M. Arabani, P.Z. Ranjbar, Impact of clay nano-material and glass fiber on the efficacy of traditional soil stabilization technique, *Mater. Lett.* 360 (2024) 136046. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136046>.

[16] P. Zanganeh Ranjbar, H. Talebi Mamoudan, R. Mousazadeh Moghadampour, M. Ghorbani, Investigating the synergistic effect of using cement, polymer slurry, and recycled tire fibers in improving the mechanical and geotechnical properties of dune sand, *Concrete Research* 15 (2022) 31–43.

[17] M.H. Hosseinjani Miyandehi, P. Zanganeh Ranjbar, M.A. Lashteh Neshaei, M.M. Ranjbar Taklymie, H. Nassiraei, Investigation of Alkaline Reaction of Dredged Caspian Sea Marine Sand to Make Concrete in Marine Environment and Ports, *Concrete Research* 15 (2022) 5–22.

[18] P. Zanganeh Ranjbar, M. Sohrabi Guilani, A. Salehi, M. Ghasemi Laskoukalayeh, Evaluation of

- [28] A.R. Goodarzi, H.R. Akbari, M. Salimi, Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume, *Appl. Clay Sci.* 132–133 (2016) 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023>.
- [29] B. Uzal, L. Turanl, H.N. Yücel, M.C. Göncüoğlu, A. Çulfaz, Pozzolanic activity of clinoptilolite: a comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 398–404.
- [30] M. Panigrahi, P. Biswal, N. Patel, R.I. Ganguly, R.R. Dash, Pond Ash (PA)–Jute Fiber-Based Geopolymer Cementitious Materials, in: *Development of Geopolymer from Pond Ash–Thermal Power Plant Waste*, Wiley, 2023: pp. 169–194. <https://doi.org/10.1002/9781394167975.ch6>.
- [31] E. Kalkan, Preparation of scrap tire rubber fiber-silica fume mixtures for modification of clayey soils, *Appl. Clay Sci.* 80–81 (2013) 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.06.014>.
- [32] O. Plé, T.N.H. Lê, Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay, *Geotextiles and Geomembranes* 32 (2012) 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.11.004>.
- [33] J. Ganiev, S. Yamada, M. Nakano, T. Sakai, Effect of fiber-reinforcement on the mechanical behavior of sand approaching the critical state, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 14 (2022) 1241–1252. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.003>.
- [34] N.C. Consoli, L. Festugato, H.C.S. Filho, G.D. Miguel, A.T. Neto, D. Andreghetto, Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test, *Journal of Materials in Civil Engineering* 32 (2020) 4020223.
- [35] S.A. Abo-Qudais, Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves, *Constr. Build. Mater.* 19 (2005) 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.022>.
- [36] A. Janalizadeh Choobbasti, F. Farrokhzad, A. Nadimi, S. Soleimani Kutanaei, Effects of copper sludge on cemented clay using ultrasonic pulse velocity, *J. Adhes. Sci. Technol.* 33 (2019) 433–444. <https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1471842>.
- [37] A. Hasanzadeh, I. Shooshpasha, Influences of silica fume particles and polyethylene terephthalate fibers on the mechanical characteristics of cement-treated sandy soil using ultrasonic pulse velocity, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 81 (2022) 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02494-x>.

Comparison of Mechanical Performance of Mixtures Containing Lime Kiln Dust, Silica Fume, and Carpet Fibers with Cement Sample under Freeze-Thaw Cycles

Abbas Shariffar

Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Amin Tohidi*

Department of Mining Engineering, Amirkabir University of technology, Tehran, Iran.

Hassan Negahdar

Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Due to high energy consumption and carbon emissions associated with cement production, finding alternative mixtures with appropriate mechanical performance under freeze-thaw cycle conditions has become a necessity. In this study, the mechanical performance of mixtures containing industrial wastes including lime kiln dust, silica fume, and waste carpet fibers was compared with cement samples under freeze-thaw conditions. The specimens were cured for periods of 7, 28, and 56 days and subjected to compaction, compressive strength, tensile strength, ultrasonic pulse velocity tests, and freeze-thaw cycles. The results showed that the optimal mixture consisting of 5% lime kiln dust, 50% silica fume, and 1% carpet fibers achieved a compressive strength of 7013 kPa, while the 10% cement sample reached a strength of 4680 kPa. The tensile strength of the optimal mixture reached 609 kPa, which was 32% higher than the sample without fibers. The ultrasonic pulse velocity in the optimal mixture reached 2528 m/s, while the 10% cement sample had a velocity of 2160 m/s. After 8 freeze-thaw cycles, the optimal mixture retained more than 97% of its initial strength, whereas the 10% cement sample retained only 78% of its initial strength. The optimal percentage of carpet fibers was determined to be 1%, and higher percentages led to reduced strength due to fiber entanglement. The practical application of the results of this study indicates that the introduced mixture can be used as a sustainable, low-carbon, and economical alternative to cement in clay soil stabilization projects in cold regions, including road subgrade construction, pavements, foundations, and retaining walls, while reducing cement consumption and greenhouse gas emissions and preventing the landfilling of industrial wastes. Overall, the optimal mixture exhibited significant superiority in mechanical performance and durability compared to the cement sample and can be considered as a sustainable, environmentally friendly, and efficient alternative for geotechnical projects in cold regions.

Keywords: Lime kiln dust, Silica fume, Carpet fibers, Mechanical performance, Freeze-thaw cycle, Cement, Pozzolanic reaction.

* Corresponding Author: a.tohidi@aut.ac.ir

