

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد مکانیکی و دوام کامپوزیت سیمانی شده با الیاف فولادی و پلی‌وینیل الکل برای کاربرد در روکش‌های ترمیمی

مهدی کوهی آذر تولون

دانشجوی دکتری گروه عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

جعفر سبحانی*

دانشیار بخش فناوری بتن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

سیدمحمد میرحسینی

دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

احسان‌اله ضیغمی

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

محمد رضا بصیری

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

چکیده

در این مقاله، اثرات الیاف فولادی قلابدار و پلی‌وینیل الکل بر خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، خمشی، کششی، مدول الاستیسیته) و دوام (نفوذ تحت فشار آب، جذب آب نیم ساعت و ۲۴ ساعت، مقاومت سایشی، نفوذ تسریع شده یون کلراید، مقاومت الکتریکی، پوسته‌شدگی در اثر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن) کامپوزیت‌های سیمانی شده به منظور کاربرد به‌عنوان مصالح ترمیمی رویه‌های بتنی از طریق مطالعات آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج نشان داد مقاومت فشاری ۷ روزه، مقاومت کششی شکافتی و مدول الاستیسیته مخلوط حاوی ۳۰ کیلوگرم الیاف فولادی (۱,۵٪) بیشترین بهبود به نسبت مخلوط فاقد الیاف به ترتیب با ۴۰، ۱۳ و ۲۴ درصد افزایش داشت. مقاومت خمشی و جذب انرژی مخلوط حاوی ۱ کیلوگرم الیاف پلی‌وینیل الکل (۰,۱۲۵٪) به ترتیب ۱۲ و ۲۸ درصد به نسبت مخلوط فاقد الیاف افزایش داشته و به ۱۰۶ کیلو نیوتن و ۱۲۸ ژول افزایش یافت. میزان عمق نفوذ آب تحت فشار برای مخلوط فاقد الیاف ۴,۵ میلیمتر و در مخلوط‌های حاوی الیاف بین ۳,۵ تا ۴,۵ میلیمتر به دست آمد. بیشترین کاهش جذب آب نیم ساعته و ۲۴ ساعته به نسبت مخلوط فاقد الیاف به ترتیب با ۴۰ و ۲۳ درصد کاهش در مخلوط حاوی ۱ کیلوگرم الیاف پلی‌وینیل الکل (۰,۱۲۵٪) حاصل شد. کمترین عرض سایش در مخلوط‌های حاوی ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم الیاف فولادی (۱٪ و ۱,۵٪) به مقدار ۱۵ میلیمتر و بیشترین عرض سایش در مخلوط حاوی ۴ کیلوگرم الیاف پلی‌وینیل الکل (۰,۵٪) به مقدار ۱۹ میلیمتر تعیین شد. کمترین مقدار پوسته‌شدگی بر اثر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب‌شدن و نفوذ تسریع شده یون کلراید در مخلوط حاوی ۲ کیلوگرم الیاف پلی‌وینیل الکل (۰,۲۵٪) به ترتیب ۴,۴۴ گرم در مترمربع و ۱۶۵ کولمب ایجاد شد. با توجه به نتایج مطلوب حاصل از آزمون‌های دوام، این کامپوزیت سیمانی گزینه‌ای مناسب از نظر فنی و اقتصادی برای کاربرد در بهسازی روکش‌های بتنی موجود در محیط‌های خورنده نظیر مناطق ساحلی و صنعتی می‌باشد. یافته‌های این تحقیق راهکاری نوین برای اجرای روکش‌های نازک و بادوام در پروژه‌های بهسازی ارائه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده، پاسخ مکانیکی، جذب انرژی، روکش روسازی، الیاف فولاد-پلی‌وینیل الکل، مصالح جایگزین.

* نویسنده مسئول: sobhani@bhrc.ac.ir

۱- مقدمه

مي دهد، به طوري كه ريزتركها به صورت يكنواخت گسترش يافته و با توجه به طراحي ريزمكانيكي آن در حدود ۶۰ ميكرومتر تثبيت مي شوند [۶]. نبودسنگدانه هاي درشت در كامپوزيت سيماني مهندسي شده منجر به مصرف سيمان بالاتر، اغلب بيش از ۱۰۰۰ كيلوگرم بر مترمكعب در مخلوط هاي استاندارد مي شود [۷]. استفاده از مصالح جايگزين سيمان تأثير مثبتي بر مشخصاتمخلوط مورد استفاد جهت ترميمو بازسازي روکش بتني دارد [۸]. افزودن الياف مصنوعي با طول بلند باعث ارتقاي خواص مكانيكي بتن مي شوند [۴]، همچنين استفاده از الياف فولادي باعث بهبود عملكرد بتن به عنوان مصالح مورد استفاده به عنوان روکش بتني مي شود [۹]، در حالي كه الياف پلي اتيلن و فولادي منجر به افزايش مقاومت خمشي، فشاري و كشي در كامپوزيت هاي سيماني مهندسي شده مي گردد [۱۰]. استفاده از الياف با اندازه هاي مختلف به طور مؤثري كنترل گسترش و توزيع تركها در بتن را ممكن مي سازد [۱۱-۱۳]. افزايش درصد الياف فولادي در بتن موجب بهبود مقاومت فشاري و مدول كشي مي شود [۱۴]. به همين ترتيب الياف فولادي تأثير مثبتي بر مقاومت كشي بتن هاي با عملكرد بالا دارد [۱۵]. استفاده از الياف پلي وينيل الكل و بازالت به دليل خواص چسبندگي عالي الياف، منجر به بهبود ظرفيت کرنشي مي شود [۱۶]. همچنين، الياف فولادي و پلي اتيلن ظرفيت کرنش كشي و مقاومت كامپوزيت سيماني مهندسي شده را افزايش مي دهد [۱۷]. مطالعات نشان داده اند كه استفاده از الياف پلي اتيلن و پلي وينيل الكل به طور قابل توجهي خواص مكانيكي كامپوزيت سيماني مهندسي شده را بهبود مي بخشد [۱۸]. همچنين الياف فولادي و پلي وينيل الكل مقاومت در برابر ترك خوردگي و عملكرد خمشي را افزايش داده است [۷].

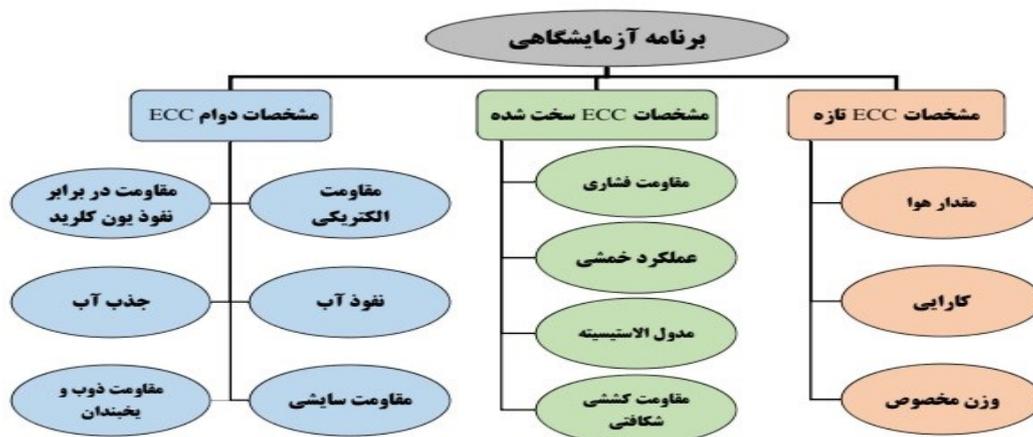
توليد جهاني بتن سالانه از ۱۰ ميلياردين فراتر مي رود، به طوري كه توليد هر تن سيمان پرتلند تقريباً معادل يك تن دي اكسيد كربن در اتمسفر منتشر مي كند [۱۹ و ۲۰]. استفاده گسترده از ماسه بستر رودخانه ها به عنوان سنگدانه ريز در بتن منجر به تخریب محیط زیست از جمله فرسایش بستر رودخانه ها و افزایش آسیب پذیری در برابر سيل و طوفان شده است [۲۱]. كامپوزيت سيماني مهندسي شده كه نیاز به سنگدانه هاي درشت را حذف مي كند، جايگزيني سازگارتر با محیط زیست را برای بتن ارائه مي دهند. با اين حال، مقدار سيمان بالاتر اين مواد نسبت به بتن

با گسترش روزافزون کاربرد مقاطع مسطح بتني به عنوان روستاسازي كف فضاهاي با کاربري متفاوت و قرارگيري در معرض شرايط متفاوت بارگذاري و محيطي نياز به ترميم و بازسازي آنها افزايش مي يابد. روکش هاي بتني نظير ساير اجزاي سازه اي داراي عمر مفيدی هستند كه با توجه به موقعيت ساختگاه، شرايط محيطي و نحوه بهره برداري مقدار آن متفاوت است. پس از طی شدن عمر مفيد روکش اجرا شده با بررسي ظاهري و سازه اي مقطع روکش، با توجه به وضعيت موجود پيشنهادهاتي نظير ترميم موضعي، تعويض قسمتي از مقطع يا تعويض كامل مقطع مطرح مي شود. تخریب مقطع موجود، بازسازي و اجزاي روکش بتني داراي هزينه هاي زياد مالي، اتلاف زمان و تاخير در اجزاي پروژه و آسیب هاي زيست محيطي مي شود. در صورتي كه مقطع موجود داراي وضعيت مناسبی باشد مي توان با استفاده از مصالح مناسب نسبت به ترميم روکش موجود اقدام كرد. مصالح مورد استفاده بايستي داراي ويژگي هاي مناسبی از نظر مشخصات مكانيكي و دوام باشند. ارتقاي مقاومت و دوام روستاسازي هاي بتني از دغدغه هاي اصلي مهندسان عمران محسوب مي شود. مقاومت در برابر تنش هاي فشاري، خمشي و كشي، همچنين ميزان جذب و نفوذ آب، مقاومت در برابر يون كلريد، سايش و نمك هاي يخزدا تحت دوره هاي يخزدگي و آب شدن از مواردی است كه مي توان براي تعيين رفتار و عملكرد بتن به عنوان روستاسازي بتني مورد بررسي قرار داد.

كامپوزيت هاي سيماني سخت شونده با کرنش كه با عنوان كامپوزيت سيماني مهندسي شده نيز شناخته مي شوند، برای غلبه بر اين چالش ها توسعه يافته اند. كامپوزيت سيماني مهندسي شده از يك راهبرد مديريت شكست منحصر به فرد بهره مي برند كه مقاومت در برابر ترك خوردگي و چقرمگي را ارتقا مي دهد [۱]. اين مواد كه در دهه ۱۹۹۰ توسط لي و همكارانش معرفي شدند، دسته اي تخصصي از بتن هاي اليافي با عملكرد فوق العاده مبتني بر تئوري ريزمكانيك هستند [۲-۵]. برخلاف بتن معمولي، كامپوزيت سيماني مهندسي شده پس از ترك خوردگي اوليه رفتاري مشابه فلزات چكش خوار از خود نشان داده و ظرفيت کرنشي ۳۰۰ تا ۵۰۰ برابر بيشتر از بتن معمولي دارد. علاوه بر اين، كامپوزيت سيماني مهندسي شده كنترل بيشترى بر عرض ترك تحت بارگذاري نشان

و دوام کامپوزیت سیمانی مهندسی شده به منظور معرفی مصالح با قابلیت‌های منحصر بفرد مکانیکی و دوام برای به کارگیری در ترمیم و بهسازی روسازی‌های بتنی می‌باشد. در این مطالعه، ویژگی‌های اسلامپ، چگالی مخلوط تازه، درصد هوای محبوس، مقاومت فشاری، عملکرد خمشی، مقاومت کششی دو نیم‌شدگی، ظرفیت جذب انرژی گسیختگی، مدول الاستیسیته، مقاومت در برابر نفوذ آب، جذب آب، مقاومت در برابر سایش، مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن نمک یخ‌زدا، مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید و مقاومت الکتریکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آزمایش‌های انجام شده برای تعیین مشخصات تازه، مکانیکی و دوام کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در شکل ۱ ارائه شده است.

معمولی، هزینه‌ها و انتشار کربن را افزایش می‌دهد [۲۲]. برای کاهش این اثرات، می‌توان از مواد جایگزین سیمانی مانند پودر سرباره کوره بلند آهن‌گدازی دانه‌بندی شده [۲۵-۲۳] و دوده سیلیس [۲۶-۲۸] به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده کرد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده ترکیبی از پودر سرباره کوره بلند آهن‌گدازی دانه‌بندی شده و دوده سیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌شود [۲۸]. این پژوهش، کامپوزیت سیمانی مهندسی شده حاوی پودر سرباره کوره بلند آهن‌گدازی دانه‌بندی شده و دوده سیلیس به‌عنوان مصالح جایگزین سیمان، برای کاهش مصرف سیمان و در نتیجه کاهش نگرانی‌های زیست محیطی مرتبط با انتشار دی‌اکسید کربن را معرفی کرده است. هدف این مطالعه بررسی مشخصات مکانیکی



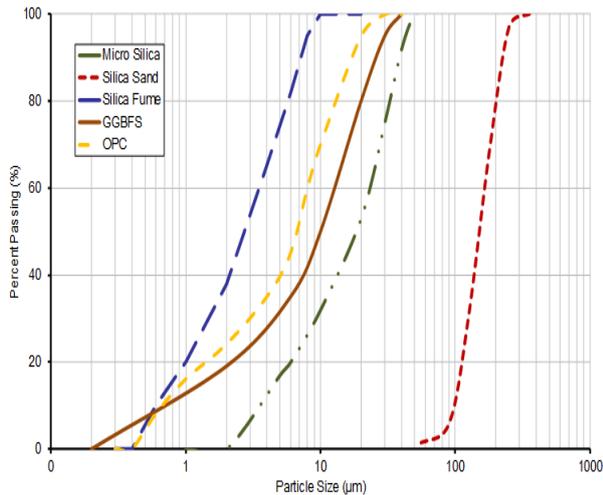
شکل ۱- آزمون‌های مورد نظر برای تعیین مشخصات کامپوزیت سیمانی مهندسی شده

۲- مصالح

در این مطالعه آزمایشگاهی، از محصولات جانبی صنعتی شامل دوده سیلیس و پودر سرباره کوره بلند آهن‌گدازی دانه‌بندی شده در کنار سیمان پرتلند معمولی، ماسه سیلیسی و میکروسیلیس برای ساخت کامپوزیت سیمانی مهندسی شده استفاده شد. تصویر مصالح مورد استفاده در شکل ۲ ارائه شده است. خواص مکانیکی سیمان در جدول ۱ خلاصه شده و ترکیبات شیمیایی مصالح در جدول ۲ شرح داده شده است. با توجه به آنکه نسبت مواد سیمانی به میزان آب مصرفی برابر ۰/۲ است به منظور تأمین یکنواختی و روانی مناسب مخلوط تازه از فوق روان‌کننده بر پایه پلی کربوکسیلات استفاده گردید. مشخصات فوق روان‌کننده مصرفی که در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- مصالح مورد استفاده (الف) پودر سرباره کوره آهن‌گدازی (ب) ماسه سیلیسی (پ) سیمان (ت) دوده سیلیس (ث) میکروسیلیس.



شكل ٣- نمودار دانه بندی مصالح مصرفی.



شكل ٤- تصوير الياف مصرفی الف) الياف فولادی ب) الياف پلی وينیل الکل.

جدول ٤- مشخصات الياف.

نوع الياف	الياف فولادی	الياف پلی وينیل الکل
طول (mm)	60	12
قطر (mm)	0.9	0.04
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	1600	1400
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	200	32
چگالی (gr/cm ³)	7.85	1.3

همچنین شکل ٣ نتایج تحلیل دانه بندی سیمان پرتلند معمولی، ماسه سیلیسی، میکروسیلیس، دوده سیلیس و پودر سرباره کوره بلند آهن گذاری دانه بندی شده را نشان می دهد. در این مطالعه از الياف فولادی و پلی وينیل الکل مورد استفاده قرار گرفتند که تصاویر الياف مصرفی در شکل ٤ و خواص آنها در جدول ٤ ارائه شده است. جدول ٥ مخلوط های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده طراحی شده برای فرایندهای آزمایشگاهی را نشان می دهد. انتخاب مقادیر الياف مورد استفاده بر اساس مطالعات پیشین تعیین شده اند.

جدول ١- مشخصات سیمان مصرفی.

مقدار	ویژگی
٣٠٠	نرمی
٤٠	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
٧	زمان گیرش نهایی (ساعت)
١٠	مقاومت فشاری روزه
١٦	مقاومت فشاری ٧ روزه
٣٢	مقاومت فشاری ٢٨ روزه

جدول ٢- ترکیبات شیمیایی مصالح مصرفی.

ماده	دوده سیلیس (درصد)	پودر سرباره (درصد)	سیمان (درصد)	میکروسیلیس (درصد)
SiO ₂	90.36	37.82	22.33	98
CaO	0.83	37.8	61.45	0.3
Al ₂ O ₃	0.43	12.58	4.8	1.05
Fe ₂ O ₃	0.58	1.35	3.5	0.4
MgO	0.89	4.89	2.7	0.18
K ₂ O	1.46	0.41	0.62	0.9
Na ₂ O	0.66	0.33	0.37	0.5
SO ₃	-	0.62	2.4	0.02

جدول ٣- مشخصات روان کننده.

مشخصات	مقدار
ظاهر	مایع سفید
یون کلرید	کمتر از ٠٫١ درصد
pH	٦٫٥-٧٫٥
دمای انجماد	٢ درجه سانتی گراد

شامل وزن مخصوص، درصد هوای محبوس ناخواسته و جریان مینی اسلالمپ مورد بررسی قرار گرفتند. این آزمایش ها که به منظور ارزیابی کارایی و ویژگی های چگالی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تازه انجام شدند، شامل اندازه گیری مینی اسلالمپ (با گزارش میانگین دو قطر عمود بر هم به عنوان مقدار نهایی)، تعیین درصد هوای محبوس مطابق استاندارد ASTM C231 [۳۱] و اندازه گیری وزن مخصوص طبق استاندارد ASTM C138 [۳۲] می باشند.



شکل ۵- تصویر مخلوط (الف) تازه، (ب) سخت شده.

۳-۲-۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

نمونه های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی متر برای آزمایش مقاومت فشاری آماده شدند. برای هر مخلوط، سه نمونه در سنین عمل آوری ۷، ۲۸، و ۹۰ روز مطابق با استاندارد BS EN 12390-3 [۳۳] مورد آزمون قرار گرفتند. مقاومت فشاری با اعمال نرخ بارگذاری ثابت 0.2 ± 0.6 نیوتن بر میلی متر مربع بر ثانیه تعیین گردید. یک بار اولیه (حدود ۳۰ درصد بار گسیختگی پیش بینی شده) برای استقرار صحیح نمونه و اطمینان از اندازه گیری های دقیق اعمال شد. سپس بار به صورت پیوسته و یکنواخت با نرخ مشخص

جدول ۵- مشخصات مخلوط ها (واحد: Kg/m^3).

مخلوط	الیاف فولادی (درصد)	الیاف پلی وینیل الکل (درصد)
S0P0	0 (0)	0 (0)
S10P0	10 (0.5)	0 (0)
S20P0	20 (1)	0 (0)
S30P0	30 (1.5)	0 (0)
S0P1	0 (0)	1 (0.05)
S0P2	0 (0)	2 (0.1)
S0P4	0 (0)	4 (0.2)

سیمان: ۷۰۰، دوده سیلیس: ۵۰، پودر سرباره: ۳۵۰،
ماسه سیلیس: ۵۰۰، میکروسیلیس: ۲۰۰، آب: ۲۲۰.

۳- برنامہ آزمایشگاهی

۳-۱- ساخت و عمل آوری

فرایند اختلاط با مخلوط کردن مواد سیمانی و ماسه سیلیسی در همزن بتن به مدت ۳ دقیقه آغاز شد. سپس آب و فوق روان کننده به تدریج اضافه شدند تا مخلوط یکنواختی حاصل شود. در نهایت، الیاف به آرامی به همزن اضافه شدند تا از تجمع و گلوله شدن الیاف جلوگیری شود. پس از افزودن کامل الیاف، فرایند مخلوط کردن به مدت ۳ دقیقه دیگر ادامه یافت تا توزیع یکنواخت الیاف تضمین شود. نمونه های مکعبی و استوانه ای مطابق با استانداردهای ASTM C31 [۲۹] و ASTM C511 [۳۰] قالب گیری شدند. پس از قالب گیری، نمونه ها با پوشش های کنفی پوشانده شده و به مدت ۲۴ ساعت در محیط با دمای کنترل شده (2 ± 25 درجه سانتی گراد) نگهداری شدند. پس از این دوره اولیه عمل آوری، نمونه ها از قالب خارج شده و به درون مخزن آب منتقل شدند و تا زمان آزمایش تحت عمل آوری مرطوب قرار گرفتند. شکل ۵ - الف مخلوط تازه کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را نشان می دهد و شکل ۵ - ب بازرسی های بصری سطحی را نمایش می دهد که بر یکنواختی نمونه های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تولید شده تأکید دارد.

۳-۲- روش آزمایش

۳-۲-۱- مشخصات کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تازه

در این مطالعه، ویژگی های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تازه

۳-۲-۵- مدول الاستيسيته

مدول الاستيسيته مخلوطها با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C469 [۳۶] تعیین شد. نمونه‌ها تحت بارگذاری محوری قرار گرفتند و تنش و کرنش در محدوده الاستیک اندازه‌گیری گردید. مدول الاستيسيته به‌عنوان شیب بخش خطی منحنی تنش-کرنش محاسبه شد.

۳-۲-۶- مقاومت در برابر نفوذ آب

مقاومت کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در برابر نفوذ آب مطابق استاندارد EN 12390-8 [۳۷] با استفاده از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر ارزیابی شد نمونه‌ها تحت فشار آب قرار گرفتند و عمق نفوذ آب اندازه‌گیری گردید تا توانایی ماده در مقاومت در برابر نفوذ آب سنجیده شود. عمق نفوذ کمتر نشان‌دهنده دوام بالاتر، به‌ویژه در محیط‌های مرطوب می‌باشد.

۳-۲-۷- جذب آب

میزان جذب آب مخلوط‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده مطابق استاندارد DIN EN 1338 [۳۸] با استفاده از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر تعیین شد. ابتدا نمونه‌ها با استفاده از تنور برقی به طور کامل خشک شده، سپس در آب غوطه‌ور شدند و بعد گذشت نیم ساعت و ۲۴ ساعت از قرارگیری نمونه درون آب، آنها به طور منظم در هر مرحله توزین گردیدند تا درصد جذب آب تعیین شود. مقادیر کمتر جذب آب نشان‌دهنده تخلخل کمتر و دوام بالاتر، به ویژه در محیط‌های مستعد رطوبت می‌باشد.

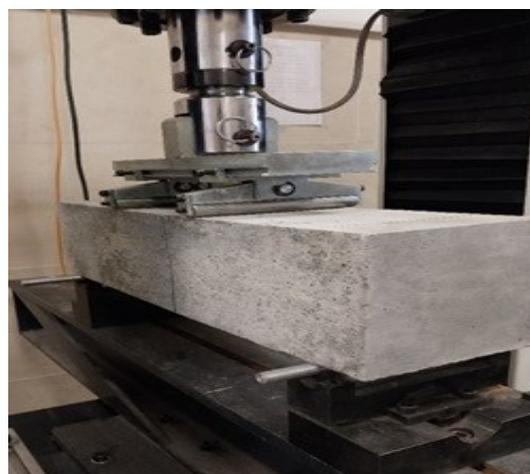
۳-۲-۸- آزمایش مقاومت سایشی (روش چرخ گردان)

مقاومت در برابر سایش کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با استفاده از روش چرخ گردان مطابق استاندارد ASTM C944 [۳۹] با استفاده از نمونه‌های به ابعاد $۷۵ \times ۳۰۰ \times ۳۰۰$ میلی‌متر ارزیابی شد. نمونه‌ها در معرض سایش توسط چرخ گردان قرار گرفتند و طول مقطع ساییده شده پس از تعداد مشخصی چرخش اندازه‌گیری شد. طول سایش کمتر نشان‌دهنده مقاومت سایشی بالاتر بوده و مناسب بودن مخلوط برای استفاده در سطوح پرتردد و کاربردهای صنعتی در معرض سایش را نشان می‌دهد.

افزایش یافت تا از هرگونه ضربه یا بار ناگهانی جلوگیری شود تا زمانی که نمونه به حداکثر ظرفیت باربری خود رسید. این روش ارزیابی دقیق و قابل اطمینانی از مقاومت فشاری کامپوزیت سیمانی مهندسی شده ارائه داد.

۳-۲-۳- آزمایش تعیین عملکرد خمشی

عملکرد خمشی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با استفاده از نمونه‌های تیر منشوری با ابعاد $۱۵۰ \times ۱۵۰ \times ۵۵۰$ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C1609M-19a [۳۴] (شکل ۶) ارزیابی شد. آزمایش‌ها در سن ۲۸ روز تحت شرایط بارگذاری یک‌سوم نقطه‌ای برای شبیه‌سازی توزیع واقعی تنش‌ها انجام شد. نرخ بارگذاری کنترل شده $۰٫۱$ میلی‌متر بر دقیقه برای اطمینان از افزایش تدریجی و یکنواخت بار اعمال گردید تا هرگونه ضربه یا شوک احتمالی به حداقل برسد. نمونه‌ها تا لحظه گسیختگی تحت بار قرار گرفتند و حداکثر بار اعمالی بر حسب کیلونیوتن ثبت شد. برای هر مخلوط سه نمونه آزمایش شد و میانگین مقاومت خمشی به‌عنوان مقدار نماینده گزارش گردید.



شکل ۶- نمونه تحت آزمون تعیین عملکرد خمشی.

۳-۲-۴- آزمایش مقاومت کششی (دو نیم‌شدگی)

مقاومت کششی دو نیم‌شدگی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C496 [۳۵] ارزیابی شد. آزمایش‌ها در سن ۲۸ روز برای بررسی رفتار کششی مخلوط انجام شد. برای هر مخلوط سه نمونه آزمایش گردید و میانگین مقاومت کششی دو نیم‌شدگی به‌عنوان مقدار نهایی گزارش شد.



شکل ۸- آزمون تعیین مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید.

۳-۲-۱۱- آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی

مقاومت الکتریکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با استفاده از روش چهار نقطه‌ای مطابق استاندارد [۴۱] AASHTO T358 با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد 300×150 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. این آزمایش توانایی مقاومت مصالح مورد بررسی در برابر عبور جریان الکتریکی را که مستقیماً با نفوذپذیری و دوام آن مرتبط است، ارزیابی می‌کند. مقادیر بالاتر مقاومت سطحی نشان‌دهنده نفوذپذیری کمتر و دوام بالاتر بوده و به‌ویژه در محیط‌هایی که مقاومت مصالح استفاده شده در برابر خوردگی حائز اهمیت است، کاربرد دارد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- ویژگی‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تازه و چگالی، درصد هوای محبوس و جریان اسلامپ، به منظور ارزیابی کارایی و یکنواختی مخلوط‌ها مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری چگالی برای اطمینان از تراکم مناسب، و تعیین درصد هوای محبوس برای ارزیابی ساختار حفره‌های موجود در مخلوط انجام شد. آزمایش جریان اسلامپ نیز به منظور سنجش قابلیت جریان‌پذیری و خودترازی کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده که برای جایگذاری و پرداخت صحیح آن حیاتی هستند، اجرا گردید. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۶ خلاصه شده‌اند که نمای جامعی از ویژگی‌های حالت تازه کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده توسعه یافته را ارائه می‌دهد.

۳-۲-۹- مقاومت در برابر یخ‌زدگی و آب شدن با نمک‌های یخ‌زدا

مقاومت در برابر پوسته‌شدگی ناشی از نمک در مخلوط‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده مطابق استاندارد [۳۸] EN 1338 با استفاده از نمونه‌های مکعبی به ابعاد $150 \times 150 \times 75$ میلی‌متر و با استفاده از محلول آب حاوی ۳ درصد کلرید سدیم بررسی شد. پس از تکمیل چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن، مواد پوسته شده از سطح نمونه جمع‌آوری و توزین شدند تا میزان کاهش جرم به‌عنوان معیار مقاومت در برابر پوسته‌شدگی محاسبه شود (شکل ۷).



شکل ۷- آزمون‌ها در معرض چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن.

۳-۲-۱۰- مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید

مقاومت کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در برابر نفوذ یون کلرید مطابق استاندارد [۴۰] ASTM C1202 استوانه با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر بررسی شد (شکل ۸). نمونه‌ها تحت اختلاف پتانسیل الکتریکی قرار گرفتند و میزان بار الکتریکی عبوری اندازه‌گیری شد. مقادیر کمتر بار عبوری نشان‌دهنده نفوذپذیری کمتر نسبت به یون کلرید بوده و دوام بالای ماده در محیط‌های دریایی یا مناطق در معرض نمک‌های یخ‌زدا را نشان می‌دهد.

جدول ۶- نتايج تعيين مشخصات تازه كامپوزيت سيماني مهندسي فولادي از ۱۰ به ۳۰ كيلوگرم در مترمكعب منجر به ۳۴ درصد بهبود مقاومت فشاري در سن ۷ روزه شد. اين يافته‌ها با نتايج گزارش شده توسط ساير محققان [۱۸،۳۶] همخواني دارد.

جدول ۷- نتايج آزمون مقاومت فشاري.

مخلوط	۷ روزه (MPa)	۲۸ روزه (MPa)	۹۰ روزه (MPa)
SOP0	64.2	91.2	104
S10P0	67.2	94.4	97.8
S20P0	79.2	93.1	109.8
S30P0	89.9	92.9	122.6
SOP1	79.3	86.4	105.3
SOP2	79.2	100.4	107
SOP4	79.5	92.8	127.8

مخلوط	اسلامپ (cm)	مقدار هوا (درصد)	وزن مخصوص (Kg/m ³)
SOP0	24	2.7	2256
S10P0	24	4.1	2260
S20P0	23	3.5	2271
S30P0	20	3.1	2275
SOP1	21	4.1	2260
SOP2	20	3.7	2266
SOP4	19	3.3	2268

۴-۲- مقاومت فشاري

مقاومت فشاري كامپوزيت‌هاي سيماني مهندسي شده تقويت شده با الياف منفرد در سنين مختلف مورد بررسي قرار گرفت و نتايج بدست آمده در جدول ۷ ارائه شد.

نمونه شاهد فاقد الياف (SOP0) مقادير مقاومت فشاري ۶۴،۲، ۹۱،۲ و ۱۰۴ مگاپاسكال را به ترتيب در سنين ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داد. نتايج نشان داد نمونه‌هاي حاوي الياف فولادي رفتار مكانيكي متفاوتي دارند. نمونه S30P0 با بيشترين مقدار الياف فولادي (۳۰ كيلوگرم در مترمكعب) به بالاترين مقاومت ۷ روزه (۸۹،۹ مگاپاسكال) دست يافت كه ۴۰ درصد افزايش نسبت به نمونه شاهد نشان مي‌دهد. اين نمونه در سن ۹۰ روزه به مقاومت ۱۲۲،۶ مگاپاسكال رسيد كه ۱۸ درصد بهبود نسبت به شاهد بود. نمونه S20P0 نيز با ۲۰ كيلوگرم بر مترمكعب الياف فولادي، مقاومت ۹۰ روزه ۱۰۹،۸ مگاپاسكال را ثبت كرد.

در مورد نمونه‌هاي حاوي الياف پلي وينيل الكل، نمونه SOP4 با ۴ كيلوگرم بر مترمكعب الياف پلي وينيل الكل به حداكثر مقاومت ۹۰ روزه (۱۲۷،۸ مگاپاسكال) دست يافت كه ۲۳ درصد افزايش مقاومت را به نسبت نمونه فاقد الياف نشان مي‌دهد. اين نمونه در سن ۷ روزه نيز ۲۴ درصد بهبود مقاومت (۷۹،۵ مگاپاسكال) نسبت به نمونه شاهد داشت. نمونه SOP2 با مقاومت ۲۸ روزه ۱۰۰،۴ مگاپاسكال عملکرد مناسبی نشان داد.

تحليل نتايج حاكي از آن است كه الياف فولادي، به ويژه در مقادير زياد (۳۰ كيلوگرم بر مترمكعب)، بيشترين تأثير را در بهبود مقاومت فشاري در سنين اوليه را دارند. افزايش مقدار الياف

۴-۳- عملکرد خمشي

عملکرد خمشي نمونه‌هاي مختلف در سن ۲۸ روز مورد ارزيابي قرار گرفت و نتايج در جدول ۸ ارائه شده است. نتايج نشان داد كه نمونه شاهد فاقد الياف (SOP0) مقاومت خمشي ۹۵ كيلونيوتن را دارا مي‌باشد. در ميان نمونه‌هاي حاوي الياف فولادي، با افزايش مقدار الياف از ۱۰ به ۳۰ كيلوگرم بر مترمكعب، مقاومت خمشي به طور پيوسته از ۹۰ به ۷۱ كيلونيوتن کاهش يافت كه نشان‌دهنده اثر منفي افزايش حجم الياف فولادي بر مقاومت خمشي است. همچنين اين روند در نمونه‌هاي حاوي الياف پلي وينيل الكل مشاهده شدند.

نمونه SOP1 با ۱ كيلوگرم بر مترمكعب الياف پلي وينيل الكل به بيشترين مقاومت خمشي (۱۰۶ كيلونيوتن) دست يافت كه افزايش ۱۱،۶ درصدی نسبت به نمونه شاهد را نشان مي‌دهد. اين بهبود عملکرد مي‌تواند ناشی از توزيع يکنواخت الياف و افزايش چسبندگی بين الياف و ماتريس باشد. همچنين نمونه‌هاي حاوي ۲ و ۴ كيلوگرم در مترمكعب الياف پلي وينيل الكل به ترتيب مقاومت خمشي ۹۱ و ۹۴ كيلونيوتن را داشتند. نتايج بيانگر کاهش مقاومت خمشي كامپوزيت سيماني مهندسي شده با افزايش حجم الياف است. اين يافته‌ها اهميت انتخاب نوع و مقدار مناسب الياف را براي دستيابي به خواص مطلوب در كامپوزيت‌هاي سيماني برجسته مي‌سازد.

جدول ۸- نتایج آزمون عملکرد خمشی.

مخلوط (کیلو نیوتن)	مقاومت خمشی (کیلو نیوتن)	f ₆₀₀	f ₁₅₀	T ₁₅₀
		(کیلو نیوتن)	(کیلو نیوتن)	(ژول)
SOP0	95	19.1	0	100
S10P0	90	15.7	5.3	84
S20P0	82	31.3	4.1	83
S30P0	71	29.8	1.7	79
SOP1	106	11.0	103.4	128
SOP2	91	11.7	0	86
SOP4	94	11.7	0	87

در افزایش مقاومت خمشی است. با این وجود، با افزایش حجم الیاف فولادی از ۱۰ به ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب، روند کاهشی در چقرمگی خمشی (از ۸۴ به ۷۹ ژول) و بار پسماند (از ۵,۳ به ۱,۷ کیلو نیوتن) مشاهده شد. این نتایج حاکی از آن است که اگرچه افزایش حجم الیاف فولادی در افزایش مقاومت اولیه مؤثر هستند، اما تأثیر محدودی در بهبود رفتار پس از ترک خوردگی دارند و بهترین عملکرد خمشی در بین نمونه‌های حاوی الیاف فولادی مربوط به مخلوط دارای ۱۰ کیلوگرم الیاف در هر مترمکعب می‌باشد.

مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که الیاف پلی وینیل الکل و فولادی هر کدام تأثیرات متفاوتی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده دارند. الیاف پلی وینیل الکل عمدتاً باعث بهبود چقرمگی و رفتار پس از ترک خوردگی می‌شوند، در حالی که الیاف فولادی بیشتر بر افزایش مقاومت اولیه تأثیر گذار هستند.

۴-۴- مقاومت کششی شکافتی

نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی شکافتی نمونه‌های مختلف کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در جدول ۹ ارائه شده است. نمونه فاقد الیاف (SOP0) به عنوان مرجع، مقاومتی معادل ۷,۳۲ مگاپاسکال نشان داد. در میان نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، نمونه S30P0 با ۳۰ کیلوگرم الیاف فولادی در مترمکعب بیشترین مقاومت کششی شکافتی (۸,۲۶ مگاپاسکال) را به دست آورد که ۱۳ درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع دارد. نمونه‌های S20P0 و S10P0 به ترتیب مقاومت‌های ۷,۰۶ و ۶,۳۲ مگاپاسکال را نشان دادند که کاهشی معادل ۳,۵ درصد و ۱۳,۷ درصد نسبت به نمونه مرجع دارند.

بررسی نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی نشان دهنده اثر مثبت افزایش حجم الیاف فولادی بر مقاومت کششی شکافتی است به شکلی که با افزایش حجم الیاف فولادی بهبود مقاومت کششی شکافتی ایجاد شد. حجم بیشتر الیاف فولادی منجر به افزایش پیوستگی بین ماتریس و الیاف و همچنین بهبود توزیع تنش در نمونه می‌شود که نهایتاً باعث بهبود مقاومت کششی شکافتی شده است.

نتایج حاصل از آزمایش تعیین عملکرد خمشی بر روی نمونه‌های مختلف کامپوزیت سیمانی مهندسی شده حاوی الیاف فولادی و پلی وینیل الکل، در جدول ۸ ارائه شده و اطلاعات ارزشمندی در مورد رفتار مکانیکی این مصالح ارائه می‌دهد. این تحلیل به بررسی سیستماتیک پارامترهای کلیدی شامل بار بیشینه (f₆₀₀)، بار باقیمانده در تغییر شکل (f₁₅₀) L/150 و چقرمگی خمشی (T₁₅₀) می‌پردازد.

نمونه‌های حاوی الیاف پلی وینیل الکل رفتار مکانیکی جالب توجهی از خود نشان دادند. نمونه SOP1 با ۱ کیلوگرم الیاف پلی وینیل الکل در مترمکعب، علیرغم کاهش ۴۲ درصد در بار بیشینه (۱۱ کیلو نیوتن) نسبت به نمونه فاقد الیاف (۱۹ کیلو نیوتن)، بهبود قابل ملاحظه‌ای در چقرمگی خمشی (۱۲۷ ژول در مقابل ۱۰۰ ژول) و بار باقیمانده (۱۰۳ کیلو نیوتن) نشان داد.

این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که الیاف پلی وینیل الکل با وجود کاهش مقاومت اولیه، قابلیت جذب انرژی و رفتار شکل پذیر ماده را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند. با این حال، افزایش مقدار الیاف پلی وینیل الکل به ۲ و ۴ کیلوگرم در مترمکعب (نمونه‌های SOP2 و SOP4) منجر به از بین رفتن کامل بار پسماند (f₁₅₀) شد، در حالی که چقرمگی خمشی در محدوده ۸۵ تا ۸۷ ژول حفظ گردید.

در مقابل، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی رفتار متفاوتی را نشان دادند. نمونه S20P0 با ۲۰ کیلوگرم الیاف فولادی در هر مترمکعب، بیشترین بار بیشینه خمشی (۳۱ کیلو نیوتن) را در بین تمام نمونه‌ها به ثبت رساند که نشان دهنده تأثیر مثبت این الیاف

جدول ۹- نتايج آزمون مقاومت كششي و مدول الاستيسيته.

مخلوط	مقاومت كششي شكافتي (MPa)	مدول الاستيسيته (GPa)
SOP0	7.32	44.20
S10P0	6.32	42.64
S20P0	7.06	48.10
S30P0	8.26	55.02
SOP1	5.99	48.14
SOP2	6.89	46.20
SOP4	7.40	43.10

مي تواند تأثير مثبت و قابل توجهي بر بهبود سختي و مقاومت الاستيكي كامپوزيت داشته باشد.

در مقابل، نمونه هاي حاوي الياف پلي وينيل الكل الكوي متفاوتي از خود نشان دادند. نمونه حاوي ۱ كيلوگرم در هر مترمكعب از الياف پلي وينيل الكل (SOP1) با مدول ۴۸،۱۴ گيگاپاسكال افزايش ۹ درصد را ثبت كرد كه نشان دهنده تأثير مثبت اين الياف در مقادير پايين است. با افزايش حجم الياف به ۲ كيلوگرم در مترمكعب (SOP2)، اين افزايش به ۵ درصد (۴۶،۲ گيگاپاسكال) کاهش يافت و در نمونه حاوي ۴ كيلوگرم در مترمكعب (SOP4) کاهش ۳ درصد (۴۳،۱ گيگاپاسكال) نسبت به نمونه مرجع مشاهده شد. اين روند كاهشي از نتايج افزايش حجم الياف پلي وينيل الكل است كه سختي كم تري نسبت به الياف فولادي دارند.

نتايج اين مطالعه حاكي از آن است كه الياف فولادي در مقادير زياد (۳۰ كيلوگرم در مترمكعب) بيشترين تأثير را در افزايش مدول الاستيسيته دارند، در حالي كه الياف پلي وينيل الكل تنها در مقادير كم (۱ كيلوگرم در مترمكعب) مي تواند بهبود مناسبی در سختي و مدول الاستيسيته ايجاد كنند. اين يافته ها اهميت بهينه سازي درصد و نوع الياف را در طراحي كامپوزيت هاي سيماني برجسته مي سازد.

در مورد نمونه هاي حاوي الياف پلي وينيل الكل، نمونه SOP1 با ۱ كيلوگرم الياف پلي وينيل الكل در مترمكعب كم ترين مقاومت كششي شكافتي (۵،۹۹ مگاپاسكال) را نشان داد كه ۱۸ درصد کاهش نسبت به نمونه مرجع دارد. با افزايش الياف پلي وينيل الكل به ۲ و ۴ كيلوگرم در مترمكعب در نمونه هاي SOP2 و SOP4، مقاومت كششي شكافتي به ترتيب به ۶،۸۹ و ۷،۴۰ مگاپاسكال رسيد كه نشان دهنده بهبود تدريجي با افزايش حجم الياف پلي وينيل الكل است. جالب توجه است كه نمونه SOP4 با ۴ كيلوگرم الياف پلي وينيل الكل در مترمكعب مقاومتی بيشتر از نمونه مرجع نشان داد.

۶-۴- مقاومت در برابر نفوذ آب

نتايج ارزيابي مقاومت در برابر نفوذ آب در كامپوزيت هاي سيماني مهندسي شده در جدول ۱۰ ارائه شد كه نشان دهنده تأثير معنادار نوع و حجم الياف بر اين ويژگي است. نمونه فاقد الياف (SOP0) با عمق نفوذ ۴،۵ ميلي متر به عنوان مبنا در نظر گرفته شد. بررسي نمونه هاي حاوي الياف فولادي نشان داد كه تركيبات با ۱۰ و ۲۰ كيلوگرم الياف فولادي در مترمكعب (S10P0 و S20P0) با عمق نفوذ ۴،۵ ميلي متر (كاهش ۲۲ درصد نسبت به نمونه مرجع) بهترين عملکرد را در کاهش نفوذ پذيري دارند. اين در حالي است كه افزايش حجم الياف فولادي به ۳۰ كيلوگرم در مترمكعب (S30P0) موجب افزايش نسبي عمق نفوذ به ۴ ميلي متر شد.

در مورد نمونه هاي حاوي الياف پلي وينيل الكل، نتايج حاكي از آن است كه مقدار كم اين الياف (۱ كيلوگرم در مترمكعب در نمونه SOP1) با عمق نفوذ ۳،۵ ميلي متر بيشترين تأثير مثبت را دارد، در حالي كه افزايش حجم آن به ۲ و ۴ كيلوگرم در مترمكعب به ترتيب موجب افزايش عمق نفوذ به ۴ و ۴،۵ ميلي متر مي شود. اين

۵-۴- مدول الاستيسيته

نتايج ارزيابي مدول الاستيسيته كامپوزيت هاي سيماني مهندسي شده در جدول ۹ ارائه شد كه نشان دهنده تأثير معنادار نوع و درصد الياف بر ويژگي هاي مكانيكي اين مصالح است. نمونه مرجع فاقد الياف (SOP0) مدولي معادل ۴۴،۲ گيگاپاسكال از خود نشان داد كه به عنوان پايه اي براي مقايسه ساير تركيبات در نظر گرفته شد. در بررسي نمونه هاي حاوي الياف فولادي، روند جالبي مشاهده شد. نمونه حاوي ۱۰ كيلوگرم الياف فولادي در هر مترمكعب (S10P0) با مدول ۴۲،۶۴ گيگاپاسكال نسبت به نمونه مرجع ۴ درصد کاهش نشان داد. با افزايش حجم الياف به ۲۰ كيلوگرم در هر مترمكعب، مدول الاستيسيته به ۴۸،۱ گيگاپاسكال افزايش يافت كه نشان دهنده رشد ۹ درصدی نسبت به نمونه فاقد الياف است. نمونه حاوي ۳۰ كيلوگرم الياف فولادي در هر مترمكعب (S30P0) با مدول ۵۵،۰۲ گيگاپاسكال، افزايشي معادل ۲۵ درصد را به ثبت رساند.

اين نتايج به وضوح نشان مي دهد كه مقادير بيشتر الياف فولادي

آب ۳۰ دقیقه‌ای به ۰,۶ درصد برای همه مخلوط‌ها و جذب ۲۴ ساعته به ترتیب به ۱,۶، ۱,۷ و ۱,۶ درصد افزایش یافت. این افزایش احتمالاً ناشی از ایجاد تخلخل در اطراف الیاف فولادی است. در مقابل، نمونه‌های حاوی الیاف پلی وینیل الکل بهبود چشمگیری در مقاومت در برابر جذب آب نشان دادند. نمونه SOP1 با ۱ درصد الیاف پلی وینیل الکل بهترین عملکرد را با جذب آب ۰,۳ درصد در ۳۰ دقیقه (کاهش ۴۰ درصد نسبت به مخلوط فاقد الیاف) و ۱,۰ درصد در ۲۴ ساعت (کاهش ۲۳ درصد به نسبت مخلوط فاقد الیاف) داشت. با افزایش حجم الیاف پلی وینیل الکل به ۲ کیلوگرم در مترمکعب، اگرچه جذب آب نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت (۰,۴ درصد در ۳۰ دقیقه و ۱,۲ درصد در ۲۴ ساعت)، اما عملکرد آن نسبت به نمونه حاوی ۱ کیلوگرم الیاف پلی وینیل الکل در مترمکعب ضعیف‌تر بود. این نتایج نشان می‌دهد که الیاف پلی وینیل الکل در مقادیر کمتر، بیشترین تأثیر مثبت را در کاهش جذب آب دارند، در حالی که الیاف فولادی اثر معکوس داشته و موجب افزایش جذب آب می‌شوند.

بررسی نتایج نشان می‌دهد مخلوط‌های مورد مطالعه قابلیت کاربرد در شرایط محیطی XCS4 (خوردگی ناشی از یون‌های کلرید آب دریای شور، قابل کاربرد در نواحی در معرض پاشش آب و جزر و مد) تعریف شده در آیین نامه بتن ایران [۴۲] را دارد. این مورد بیانگر دوام مناسب این مخلوط‌ها در شرایط متفاوت محیطی است.

۴-۸- مقاومت سایشی

نتایج ارزیابی مقاومت سایشی کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده در جدول ۱۱ ارائه شده است. نمونه فاقد الیاف (SOP0) با عرض سایش ۱۵ میلی‌متر به‌عنوان مبنا، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داد. در بررسی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، مشاهده شد که نمونه با ۱۰ کیلوگرم الیاف فولادی در مترمکعب (S10P0) با عرض سایش ۱۷ میلی‌متر، کاهش مقاومت سایشی نشان می‌دهد. با این حال، جالب توجه است که با افزایش درصد الیاف فولادی به ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب (نمونه‌های S20P0 و S30P0)، مجدداً مقاومت سایشی به سطح نمونه فاقد الیاف بازگشته است. در مورد نمونه‌های حاوی الیاف پلی وینیل الکل، در حالی که نمونه‌های با ۱ و ۲ کیلوگرم الیاف پلی وینیل الکل در مترمکعب (نمونه‌های SOP2 و SOP4)، تنها کاهش جزئی در

یافته‌ها نشان می‌دهد که اگرچه هر دو نوع الیاف می‌توانند در کاهش نفوذپذیری مؤثر باشند، اما این اثر به شدت به درصد بهینه الیاف وابسته است. نتایج این تحقیق می‌تواند راهگشای طراحی کامپوزیت‌های سیمانی با نفوذپذیری کم برای کاربردهای سازه‌ای در محیط‌های مرطوب باشد.

جدول ۱۰- نتایج آزمون عمق نفوذ آب و جذب آب.

مخلوط	عمق نفوذ آب (میلیمتر)	جذب آب نیم ساعته (درصد)	جذب آب ۲۴ ساعته (درصد)
SOP0	4.5	0.5	1.3
S10P0	3.5	0.6	1.6
S20P0	3.5	0.6	1.7
S30P0	4	0.6	1.6
SOP1	3.5	0.3	1.0
SOP2	4	0.4	1.2
SOP4	4.5	0.5	1.6

طبق نتایج بدست آمده، مخلوط‌های مورد بررسی قابلیت کاربرد در شرایط محیطی XCD2 (خوردگی ناشی از یون‌های کلرید به غیر از آب دریای شور، محیط مرطوب، به ندرت خشک)، XCS2 (خوردگی ناشی از یون‌های کلرید آب دریای شور، بتن آرمه دائماً غرقاب یا درون خاک آب‌دار یا مرطوب) و XCD3 (خوردگی ناشی از یون‌های کلرید به غیر از آب دریای شور، بتن آرمه در تماس مستقیم با خاک اشیاع آلوده به یون‌های کلرید) که در آیین نامه بتن ایران [۴۲] تعریف شده‌اند را دارا هستند. این مورد نشان دهنده دوام مناسب مخلوط‌های مورد مطالعه در این پژوهش است. این یافته‌ها می‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی کامپوزیت‌های سیمانی با نفوذپذیری کم و دوام بالا باشد.

۴-۷- جذب آب

مقادیر جذب آب در کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده که در جدول ۱۰ ارائه شده نشان می‌دهد که افزودن الیاف تأثیر قابل توجهی بر رفتار جذب آب دارد. نمونه فاقد الیاف (SOP0) به‌عنوان مبنا با جذب آب ۰,۵ درصد در ۳۰ دقیقه و ۱,۳ درصد در ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. بررسی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی نشان داد که این الیاف موجب افزایش جذب آب می‌شوند، به طوری که در نمونه‌های S10P0 تا S30P0، جذب

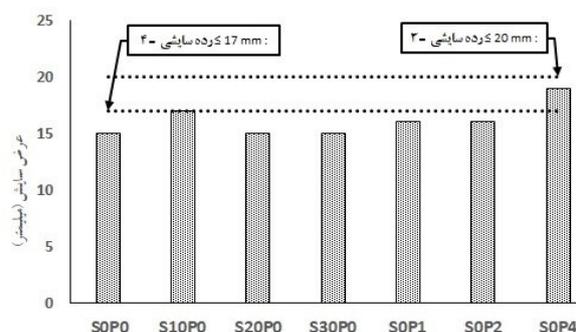
مقاومت سايشي (عرض سايش ۱۶ ميلي متر) نشان دادند، نمونه با ۴ كيلوگرم الياف پلي وينيل الكل در مترمكعب، با عرض سايش ۱۹ ميلي متر، کاهش در مقاومت سايشي از خود نشان داد. نتايج اين مطالعه به وضوح نشان مي دهد افزودن الياف پلي وينيل الكل به نسبت الياف فولادي به مقدار بيشتر باعث کاهش مقاومت سايشي مي شود. اين يافته ها براي طراحي كامپوزيت هاي سيماني مورد استفاده در كف سازي هاي صنعتي و ساير کاربردهاي در معرض سايش از اهميت بالايي برخوردار است. با مقايسه نتايج به دست آمده از آزمون تعيين مقاومت سايشي كامپوزيت سيماني مهندسي شده مورد مطالعه و مقادير حداكثر سايش قابل قبول در انواع

كف هاي بتني ارائه شده در آيين نامه بتن ايران [۴۲] مشاهده مي شود همه مخلوط هاي مورد بررسي غير از SOP4 در رده سايشي ۴ قرار مي گيرند. مقايسه نتايج مقاومت سايشي و مقادير دسته بندي رده سايشي توسط آيين نامه بتن ايران در شكل ۹ مشاهده مي شود. طبق دسته بندي رده سايشي توسط آيين نامه بتن ايران [۴۲] مخلوط هاي مورد بررسي در اين پژوهش قابليت استفاده براي كف هاي صنعتي با رفت و آمد سنگين و بارهاي ضربه اي، پار كينگ هاي روباز ماشين آلات صنعتي و سنگين، با نوع رفت و آمد ماشين آلات صنعتي با چرخ لاستيكي يا چرخ فولادي، در حد شديد را دارند.

جدول ۱۱- نتايج آزمون مقاومت سايشي، چرخه هاي يخبندان، نفوذ يون كلريد و مقاومت سطحي.

مخلوط	عرض سايش (ميلي متر)	افت وزن در واحد سطح (gr/m^2)	نفوذ يون كلريد (كولمب)	مقاومت سطحي (كيلواهم.سانتي متر)
SOP0	15	4.44	87	80
S10P0	17	8.89	176	92
S20P0	15	8.89	174	91
S30P0	15	8.89	169	89
SOP1	16	4.44	178	82
SOP2	16	4.44	165	93
SOP4	19	8.89	187	92

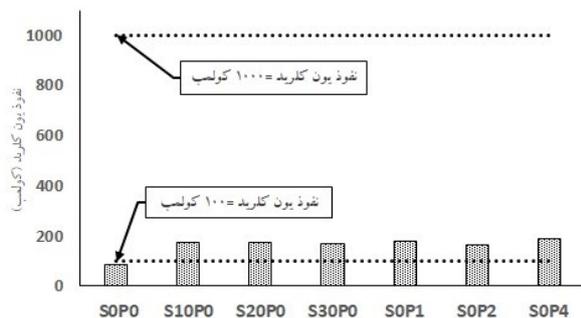
۴,۴۴ گرم بر مترمربع بهترين عملکرد را نشان داد و به عنوان مبنا در نظر گرفته شد. نتايج ارزيابي مقاومت در برابر چرخه هاي يخزدگي و آب شدن در حضور نمك هاي يخزدا نشان مي دهد كه تركيب الياف تأثير قابل توجهي بر دوام كامپوزيت هاي سيماني مهندسي شده دارد. تمام نمونه هاي حاوي الياف فولادي بدون توجه به مقدار الياف مورد استفاده، افت وزني دو برابري (۸,۸۹ گرم در هر مترمربع) به نسبت مخلوط فاقد الياف داشتند. اين نتايج بيانگر کاهش مقاومت كامپوزيت سيماني مهندسي شده با افزودن الياف فولادي در برابر چرخه هاي يخزدگي و آب شدن است. نمونه هاي حاوي ۱ و ۲ كيلوگرم الياف پلي وينيل الكل در مترمكعب (SOP1 و SOP2) عملکردي مشابه نمونه مرجع نشان دادند و مقدار افت وزني آنها ۴,۴۴ گرم در هر مترمربع بود. با اين حال، افزايش حجم الياف پلي وينيل الكل به ۴ كيلوگرم در هر مترمكعب (SOP4)، مجدداً منجر به افت وزني مشابه نمونه هاي حاوي الياف فولادي به ميزان ۸,۸۹ گرم در مترمربع شد.



شكل ۹- مقايسه نتايج مقاومت سايشي

۹-۴- مقاومت در برابر چرخه هاي يخزدگي و آب شدن با نمك هاي يخزدا

نتايج تعيين مقاومت كامپوزيت سيماني مهندسي شده در برابر چرخه هاي يخزدگي و آب شدن با نمك هاي يخزدا در جدول ۱۱ ارائه شده و نشان دهنده تأثير نوع و مقدار الياف بر رفتار اين كامپوزيت هاست. نمونه فاقد الياف (SOP0) با افت وزني معادل



شکل ۱۰- مقایسه نتایج نفوذپذیری یون کلرید

۴-۱۱- مقاومت ویژه الکتریکی چهارنقه‌ای ونر

نتایج آزمون تعیین مقاومت سطحی در جدول ۱۱ ارائه شده است. نمونه مرجع فاقد الیاف (SOP0) با مقاومت سطحی ۸۰ کیلو اهم. سانتی متر به عنوان مبنا در نظر گرفته شد. بررسی نتایج حاکی از آن است که افزودن الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت سطحی شده است، به طوری که نمونه حاوی ۱۰ کیلو گرم الیاف فولادی در مترمکعب (S10P0) به ۹۲ کیلو اهم. سانتی متر و نمونه ۲۰ کیلو گرم الیاف فولادی در مترمکعب (S20P0) به ۹۱ کیلو اهم. سانتی متر رسید. با این حال، افزایش حجم الیاف فولادی به ۳۰ کیلو گرم در مترمکعب (S30P0) منجر به کاهش جزئی مقاومت سطحی به ۸۹ کیلو اهم. سانتی متر شد. در مورد نمونه‌های حاوی الیاف پلی وینیل الکل، نتایج جالب توجهی مشاهده شد. نمونه SOP2 با ۲ کیلو گرم الیاف پلی وینیل الکل در مترمکعب بیشترین مقاومت سطحی (۹۳ کیلو اهم. سانتی متر) را در بین تمام نمونه‌ها نشان داد. نمونه‌های حاوی ۱ کیلو گرم و ۴ کیلو گرم الیاف به ترتیب مقاومت سطحی ۸۲ و ۹۲ کیلو اهم. سانتی متر را ثبت کردند.

مقایسه نتایج تحقیقات سولگارد و همکاران [۴۳] نشان داد که طرح مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی در محدوده مصرف ۰/۵ تا ۱ درصد، مقاومت الکتریکی چهار نقطه‌ای در محدوده ۲۰ تا ۳۰ کیلو اهم- سانتی متر است. در حالی که در این مطالعه، این مقادیر در محدوده ۹۰ تا ۹۲ کیلو اهم- سانتی متر اندازه‌گیری شد. قابل ذکر است که نتایج سولگارد و همکاران [۴۳] در درجه اشباع ۷۵ درصد به دست آمده، در حالی که در تحقیق حاضر، آزمایش‌ها در درجه اشباع ۱۰۰ درصد انجام شده است. این تفاوت در شرایط آزمایش می‌تواند دلیل اختلاف نتایج باشد. علاوه بر این، تفاوت در نوع

۴-۱۰- مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید به روش

الکتریکی

نتایج آزمایش نفوذپذیری یون کلرید (RCPT) در جدول ۱۱ ارائه شد و نشان داد که نمونه فاقد الیاف (SOP0) با مقدار بار عبوری ۸۷ کولمب، کمترین نفوذپذیری را در بین تمام نمونه‌ها دارد و طبق آیین نامه ASTM C1202 [۵۲] در رده ناچیز (کمتر از ۱۰۰ کولمب) از نظر میزان عبور یون کلرید طبقه‌بندی می‌شود. در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، با افزایش حجم الیاف از ۱۰ به ۲۰ و ۳۰ کیلو گرم در هر مترمکعب، مقدار بار عبوری از ۱۷۶ به ترتیب به ۱۷۴ و ۱۶۹ کولمب کاهش یافت که نشان‌دهنده بهبود نسبی مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید با افزایش حجم الیاف فولادی است. در مورد نمونه‌های حاوی الیاف پلی وینیل الکل، مقدار بار عبوری مخلوط دارای ۱ کیلو گرم الیاف پلی وینیل الکل در مترمکعب (SOP1)، به ۱۷۸ کولمب رسید، نمونه با ۲ کیلو گرم الیاف پلی وینیل الکل در مترمکعب (SOP2) با مقدار بار عبوری ۱۶۵ کولمب بهترین عملکرد را نشان داد، در حالی که افزایش حجم الیاف به ۴ کیلو گرم در مترمکعب (SOP4) منجر به افزایش بار عبوری به ۱۸۷ کولمب شد. این نتایج حاکی از آن است که اگرچه الیاف به طور کلی نفوذپذیری را نسبت به نمونه فاقد الیاف افزایش می‌دهند، اما همچنان مقدار یون عبوری مقدار بسیار کمی می‌باشد. نمونه فاقد الیاف (SOP0) با کمترین مقدار بار عبوری (۸۷ کولمب) نشان‌دهنده این است که ماتریس سیمانی بدون الیاف دارای ساختار فشرده‌تری است که مسیرهای نفوذ کمتری برای یون‌های کلرید ایجاد می‌کند.

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش نفوذپذیری یون کلرید مشاهده می‌شود همه مخلوط‌های حاوی الیاف مورد بررسی این پژوهش طبق آیین نامه ASTM C1202 [۴۲] در رده بسیار کم (بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کولمب) از نظر میزان عبور یون کلرید طبقه‌بندی می‌شوند که این مقایسه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. در رده‌بندی شرایط محیطی از دیدگاه دوام بتن که در آیین نامه بتن ایران [۴۲] صورت پذیرفته، مخلوط‌های مورد بررسی در رده XCS4 (خوردگی ناشی از یون‌های کلرید آب دریای شور، قابل کاربرد در نواحی در معرض پاشش آب و جزر و مد) قرار می‌گیرند که بیانگر دوام عالی مخلوط‌های مورد بررسی در شرایط محیطی سخت است.

مواد و مصالح مصرفي نيز ممكن است بر نتايج تأثير گذاشته باشد. نتايج اين مطالعه نشان دهنده نفوذ كم، دوام مناسب و خطر پايين خوردگي فولاد در شرايط محيطي مختلف است. اين يافته ها مي تواند مبناي مناسبی برای طراحی كامپوزيت های سيمانی با دوام بالا برای کاربرد به عنوان روکش ترميمي در محيط های خورنده مانند سازه های دريایی، پل ها و سازه های مجاور آب های شور باشد. بهبود مقاومت سطحی زياد می تواند منجر به افزايش عمر مفيد سازه ها و کاهش هزینه های نگهداری در بلندمدت گردد.

۵- نتیجه گیری

- نتايج نشان داد نمونه های حاوی ۳۰ كيلوگرم الياف فولادی (S30P0) بيشترين بهبود مقاومت فشاری در سنين اوليه (۴۰ درصد افزايش در ۷ روز) را داشتند، درحالی که نمونه با ۴ كيلوگرم الياف پلی وينيل الكل (SOP4) بالاترين مقاومت ۹۰ روزه (۱۲۷,۸ مگا پاسکال، ۲۳ درصد افزايش) را نشان داد.

- نمونه حاوی ۱ كيلوگرم الياف پلی وينيل الكل (SOP1) با افزايش ۱۲ درصد در مقاومت خمشی (۱۰۶ كيلونيوتن) و بهبود ۲۷ درصد در چقرمگی (۱۲۷ ژول) بهترين عملکرد ترکیبی را داشت. در مقابل، الياف فولادی در مقدار ۲۰ كيلوگرم (S20P0) بيشترين مقاومت خمشی اوليه (۳۱ كيلونيوتن) را ايجاد کرد، اما با افزايش مقدار الياف، چقرمگی کاهش يافت. اين يافته ها نشان می دهد الياف PVA در مقادير كم برای بهبود رفتار پس از ترك خوردگی مؤثرترند، درحالی که الياف فولادی مقاومت خمشی اوليه را افزايش می دهند.

- مخلوط حاوی ۳۰ كيلوگرم الياف فولادی (S30P0) با مقاومت ۸,۲۶ مگا پاسکال (افزايش ۱۳ درصد) بيشترين بهبود در مقاومت كششی شكافتي را داشت. در مقابل، نمونه های حاوی الياف پلی وينيل الكل تنها در مقدار ۴ كيلوگرم (SOP4) با ۷,۴ مگا پاسکال عملکرد بهتری نسبت به نمونه مرجع نشان دادند.

- نتايج تعيين مدول الاستيسيته نشان داد نمونه حاوی ۳۰ كيلوگرم الياف فولادی (S30P0) با مدول ۵۵ گيگاپاسکال (افزايش ۲۵ درصد) بيشترين بهبود را داشت. الياف پلی وينيل الكل در مقدار ۱ كيلوگرم (SOP1) با ۴۸,۱ گيگاپاسکال (افزايش ۹ درصد) مؤثر بود، اما افزايش مقدار آن منجر به کاهش عملکرد شد.

- نتايج نشان داد نمونه حاوی ۱ كيلوگرم الياف پلی وينيل الكل

۶- مراجع
[1] Soe, K. T., Zhang, Y. X., & Zhang, L. C. (2013).

- composites. *Construction and Building Materials*, 23(1), 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.009>
- [11] Yao, W., Li, J., & Wu, K. (2003). Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 27-30. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00913-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00913-4)
- [12] Chen, B., & Liu, J. (2005). Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 913-917. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.035>
- [13] Cheng, Y., & Huang, X. (2022). Application of municipal solid waste incineration bottom ash into engineered cementitious composites. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 1106-1117. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00075-5>
- [14] Kang, S. T., Choi, J. I., Koh, K. T., Lee, K. S., & Lee, B. Y. (2016). Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. *Composite Structures*, 145, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.075>
- [15] Meng, W., & Khayat, K. H. (2018). Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), 04018030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002212](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002212)
- [16] Wang, Q., Yi, Y., Ma, G., & Luo, H. (2019). Hybrid effects of steel fibers, basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high-volume fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 97, 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.009>
- [17] Feng, Z., Zhou, Y., Sui, L., & Zhu, Z. (2022). Optimal design of a low-cost high-performance hybrid fiber engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 345, 128372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128372>
- [18] Shi, F., Pham, T. M., Hao, H., & Hao, Y. (2020). Post-cracking behavior of basalt and macro polypropylene hybrid fibre reinforced concrete with different compressive strengths. *Construction and Building Materials*, 262, 120108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120108>
- [19] Malhotra, V. M. (2000). Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions. *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*, 5, 6.
- [20] Torres, A., Brandt, J., Lear, K., & Liu, J. (2017). A looming tragedy of the sand commons. *Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels. Composite Structures*, 104, 320-330. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.029>
- [2] Kafodya, I., & Okonta, F. (2020). Compressive and tensile strength properties of pre-compressed and soaked natural fiber reinforced lime—fly ash stabilised soil. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13, 497-509. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0074-4>
- [3] Kanda, T., & Li, V. C. (1998). Interface property and apparent strength of high-strength hydrophilic fiber in cement matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(1), 5-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:1\(5\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:1(5))
- [4] Zarei, A., Rooholamini, H., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Evaluating the properties of concrete pavements containing crumb rubber and recycled steel fibers using response surface methodology. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 470-484. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00049-7>
- [5] Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., & Saito, T. (2002). Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, 99(5), 463-472.
- [6] Gillani, S. A. A., Toumi, A., & Turatsinze, A. (2020). Effect of surface preparation of substrate on bond tensile strength of thin bonded cement-based overlays. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13, 197-204. <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0101-5>
- [7] Asghar, M. F., & Khattak, M. J. (2024). Evaluation of mixture design and tensile characteristics of polyvinyl alcohol (PVA)-fiber reinforced HMA mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 17, 258-279. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00233-3>
- [8] Choucha, S., Benyahia, A., Ghrici, M., & Mansour, M. S. (2018). Effect of natural pozzolan content on the properties of engineered cementitious composites as repair material. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(3), 261-269. <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0394-x>
- [9] Sobhani, J., & Pourkhorshidi, A. R. (2021). The effects of cold-drawn crimped-end steel fibers on the mechanical and durability of concrete overlay. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 54(2), 319-330. <https://doi.org/10.22059/cej.2020.297941.1657>
- [10] Ahmed, S. F. U., & Maalej, M. (2009). Tensile strain hardening behavior of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious

- Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [31] ASTM C231-22. (2022). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [32] ASTM C138-22. (2022). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [33] BS EN 12390-3. (2019). Standard Test Method for Compressive Strength of Cement Mortar. ASTM C1116 / C1116M-10a. (2015). Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [34] ASTM C1609/C1609M-19a. (2019). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [35] ASTM C496/C496M. (2017). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [36] ASTM C469. (2002). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International.
- [37] EN 12390-8. (2009). Testing hardened concrete - Part 8: Depth of penetration of water under pressure. European Committee for Standardization.
- [38] DIN EN 1338. (2003). Concrete paving blocks - Requirements and test methods. Deutsches Institut für Normung.
- [39] ASTM C944. (2005). Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method. ASTM International.
- [40] ASTM C1202. (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM International.
- [41] AASHTO T358. (2015). Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [42] Iranian Concrete Code Volume II Materials and Construction, No.120-2. (2021). Last Edition, 22/11/2021.
- [43] Solgaard, A. O. S., Geiker, M., Edvardsen, C., & Küter, A. (2014). Observations on the electrical resistivity of steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 47(1), 335-350.
- Science*, 357(6355), 970-971. <https://doi.org/10.1126/science.aa0503>
- [21] Zhang, L., Liu, W., Wang, L., & Ling, Z. (2020). On-axis and off-axis compressive behavior of pultruded GFRP composites at elevated temperatures. *Composite Structures*, 236, 111891. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111891>
- [22] Kim, J. K., Kim, J. S., Ha, G. J., & Kim, Y. Y. (2007). Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1096-1105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.006>
- [23] Chen, Z., Yang, Y., & Yao, Y. (2013). Quasi-static and dynamic compressive mechanical properties of engineered cementitious composite incorporating ground granulated blast furnace slag. *Materials & Design*, 44, 500-508. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.037>
- [24] Qiu, J., Tan, H. S., & Yang, E. H. (2016). Coupled effects of crack width, slag content, and conditioning alkalinity on autogenous healing of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 73, 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.013>
- [25] Zhu, Y., Zhang, Z., Yang, Y., & Yao, Y. (2014). Measurement and correlation of ductility and compressive strength for engineered cementitious composites (ECC) produced by binary and ternary systems of binder materials: Fly ash, slag, silica fume and cement. *Construction and Building Materials*, 68, 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.080>
- [26] Zhang, J., Wang, Q., & Wang, Z. (2016). Optimizing design of high strength cement matrix with supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 120, 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.100>
- [27] Liu, Y., Zhou, X., Lv, C., Yang, Y., & Liu, T. (2018). Use of silica fume and GGBS to improve frost resistance of ECC with high-volume fly ash. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1), 7987589. <https://doi.org/10.1155/2018/7987589>
- [28] Wang, Q., Lai, M. H., Zhang, J., Wang, Z., & Ho, J. C. M. (2020). Greener engineered cementitious composite (ECC)—The use of pozzolanic fillers and uncoiled PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 247, 118211. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118211>
- [29] ASTM C31-22. (2022). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [30] ASTM C511-22. (2022). Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets,

Experimental Evaluation of Mechanical and Durability Performance of Steel/PVA Fiber-Reinforced Engineered Cementitious Composites for Pavement Overlay

Mahdi KouhiAzar Tulun

Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

Jafar Sobhani *

Department of Concrete Technology, Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran.

Seyyed Mohammad Mirhosseini

Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

Ehsanollah Zeighami

Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

Mohammad Reza Basiri

Department of Textile Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

Abstract

This paper investigates the effects of hooked steel and polyvinyl alcohol fibers on mechanical properties (compressive strength, flexural strength, tensile strength, elastic modulus) and durability (water penetration under pressure, 30-minute and 24-hour water absorption, abrasion resistance, accelerated chloride ion penetration, electrical resistance, and scaling due to freeze-thaw cycles) of engineered cementitious composites for use as repair materials in concrete overlays through experimental studies. Results showed the 7-day compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus of the mixture containing 30 kg steel fibers had the greatest improvement compared to the fiber-free mixture with 40%, 13% and 24% increase respectively. The flexural strength and energy absorption of the mixture containing 1 kg polyvinyl alcohol fibers increased by 12% and 28% respectively compared to the fiber-free mixture, reaching 106 kN and 128 J. Water penetration depth under pressure was 4.5 mm for the fiber-free mixture and ranged between 3.5-4.5 mm for fiber-containing mixtures. The maximum reduction in 30-minute and 24-hour water absorption compared to the fiber-free mixture was 40% and 23% respectively, achieved by the mixture containing 1 kg polyvinyl alcohol fibers. The smallest abrasion width was 15 mm in mixtures containing 20 and 30 kg steel fibers, while the largest was 19 mm in the mixture containing 4 kg polyvinyl alcohol fibers. The lowest scaling due to freeze-thaw cycles and accelerated chloride ion penetration were 4.44 g/m² and 165 Coulombs respectively in the mixture containing 2 kg polyvinyl alcohol fibers. Considering the favorable results from durability tests, this cementitious composite is a technically and economically suitable option for application in rehabilitation of existing concrete overlays in corrosive environments such as coastal and industrial areas. The findings of this research provide a novel solution for implementing thin and durable overlays in rehabilitation projects.

Keywords: Engineered Cementitious Composites (ECC), Mechanical Response, Energy Absorption, Pavement Overlay, Hybrid steel-synthetic-PVA fibers, Supplementary Cementitious Material (SCM).

* Corresponding Author: sobhani@bhrc.ac.ir

