

بررسی آزمایشگاهی استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم با الیاف ترکیبی در بهبود رفتار رویه‌های بتنی الیافی

احمد دالوند*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد
فریدون امیدی نسب، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد
امیرحسین صحرایی مقدم، کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد

Email: dalvand.a@lu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۳ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶

چکیده

یکی از مهمترین پیشرفت‌ها در تکنولوژی راه‌سازی، استفاده از رویه‌های بتنی می‌باشد. از این رویه‌ها در راه‌هایی که به حداکثر عملکرد و کمترین تعمیرات در زمان نگهداری نیاز دارند، استفاده می‌گردد. از طرفی، در دهه‌های اخیر، به منظور بهبود عملکرد بتن، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی و الیاف رایج شده است. در این تحقیق، به بررسی نقش الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن در بهبود رفتار رویه‌های کامپوزیتی سیمانی خودتراکم پرداخته شده است. برای این منظور، تعداد ۱۲۷ عدد نمونه مکعبی، استوانه‌ای و دیسکی در ۱۱ طرح اختلاط مختلف و نمونه‌های خمشی دولایه در ۱۷ طرح اختلاط مختلف حاوی الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و ترکیبی از آنها ساخته شده است. آزمایش‌های فشار، کشش برزیلی، ضربه‌ی وزنه افتان، جذب آب نیم ساعته و ۷۲ ساعته و خمش سه‌نقطه‌ای مطابق با ضوابط نشریه ۷۳۱، روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج، نشان‌دهنده‌ی تأثیر منفی هر دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر کارایی کامپوزیت‌های سیمانی و عدم تأثیر آنها در افزایش مقاومت فشاری می‌باشد. الیاف فولادی در آزمایش‌های مقاومت کششی، خمشی و ضربه‌ای و الیاف پلی‌پروپیلن در آزمایش جذب آب، عملکرد بهتری را از خود نشان دادند.

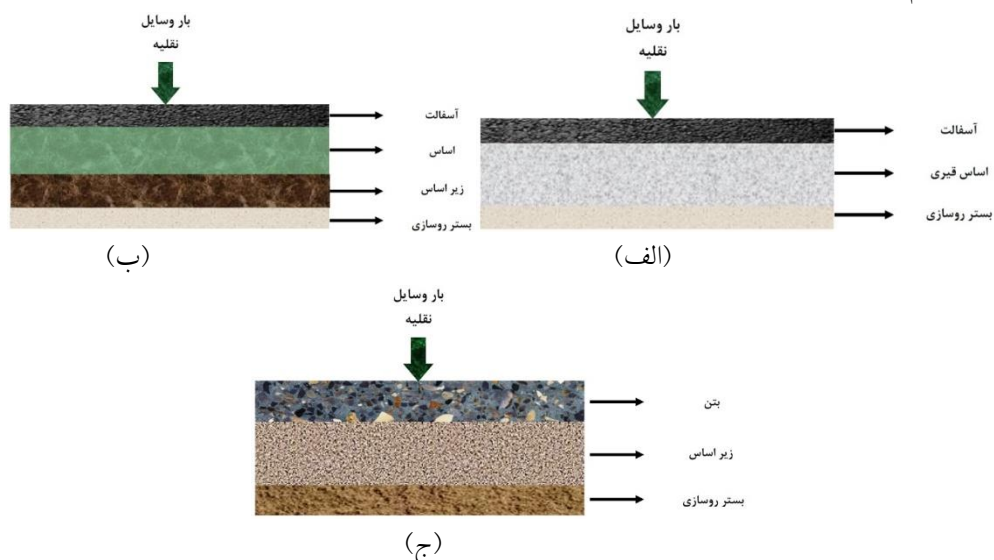
واژه‌های کلیدی: رویه‌های بتنی، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم

۱. مقدمه

فرودگاه‌ها، ترمینال‌های مسافری و باری، بندرها و راه‌ها را می‌توان به عنوان اجزای اصلی این شبکه نام برد (مریت و همکاران، ۲۰۱۲). در حال حاضر، با توجه به توسعه شبکه حمل و نقل، راه‌ها نقش مهمی در کارایی شبکه حمل و نقل ایفا می‌کنند. اجرای پروژه‌های راه‌سازی در

شبکه حمل و نقل هر کشور رگ‌های حیات آن کشور و از عظیم‌ترین سرمایه‌های ملی به حساب می‌آید. برای آنکه این شبکه کارایی لازم را داشته باشد، لازم است که تمامی اجزا در آن نقش خود را به خوبی ایفا کنند.

می‌باشد. یکی از معایب عمده این نوع از روسازی تغییر خواص آن با دما است. تابش آفتاب و دماهای زیاد در مناطق گرمسیری و بارگذاری سنگین با توجه به خاصیت انعطاف‌پذیری آسفالت، باعث به وجود آمدن موج‌های طولی و عرضی، تغییر شکل‌های دائم و خرابی‌های متعدد در روسازی آسفالتی می‌شود (طالبی و ارجمندی نژاد، ۱۳۹۴). خرابی رویه آسفالتی راه‌ها نه تنها کیفیت عبور را کاهش می‌دهد، بلکه موجب خرابی سایر قشرهای روسازی و جسم خاکریز راه شده و خسارت بیشتری را به وجود می‌آورد. یک راه‌حل مناسب، استفاده از روسازی‌های بتنی می‌باشد (جوی و همکاران، ۲۰۱۱). خواص روسازی‌های بتنی مانند روسازی‌های آسفالتی به دما بستگی ندارد. در این روسازی‌ها، تغییر شکل‌های دائمی مانند روسازی‌های آسفالتی رخ نمی‌دهد (دلوار و همکاران، ۱۹۹۷). در بخش روسازی‌های بتنی نشریه ۷۳۱ سازمان مدیریت، دو نوع روسازی بتنی مسلح و غیرمسلح بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. تفاوت روسازی‌های انعطاف‌پذیر و رویه آسفالتی با روسازی‌های صلب بتنی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. روسازی انعطاف‌پذیر در حالت الف) معمولی، ب) تمام آسفالتی و ج) روسازی صلب بتنی (نشریه ۷۳۱)

ساخته می‌شوند این نوع از کامپوزیت‌ها دارای رفتار سخت‌شوندگی تحت بارگذاری کششی می‌باشند. بتن

کشور بسیار هزینه‌بر خواهند بود. این هزینه را می‌توان به سه بخش هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و هزینه استفاده‌کنندگان تقسیم‌بندی نمود (آبراهام و همکاران، ۲۰۱۸). بخشی از هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری راه صرف لایه‌های روسازی می‌شود که عملکرد نامناسب آن‌ها، اتلاف این سرمایه را به همراه دارد. لذا، می‌توان گفت روسازی‌ها از عوامل مؤثر در قابلیت سرویس‌دهی و هزینه بهره‌برداری می‌باشند (بنتسن و همکاران، ۲۰۱۳). ایمنی و آسایش استفاده‌کنندگان و سهولت تردد نیز با عملکرد روسازی در ارتباط است. از طرف دیگر، طرح و ساخت اولیه روسازی تأثیر به‌سزایی در تعمیر و نگهداری آن در طول عمر سرویس‌دهی دارد (هانسن و کولپند، ۲۰۱۷). هر چه نوع روسازی تناسب بیشتری با بار وارده، شرایط آب و هوایی و مصالح منطقه داشته باشد، عمر سرویس‌دهی آن افزایش یافته و هزینه‌های نگهداری نیز به تبع آن کمتر خواهد بود (تامکینز و همکاران، ۲۰۰۹). در کشور ایران، اکثر روسازی‌های اجرا شده، به دلیل زیاد بودن منابع نفتی، از نوع آسفالتی می‌باشد. این نوع روسازی، علی‌رغم سهولت در اجرا، دارای معایبی نیز

بتن‌های الیافی گونه‌ی جدیدی از کامپوزیت‌های سیمانی می‌باشند که با استفاده از مصالح ریزدانه و الیاف

سرباره و الیاف در طرح اختلاط‌های متفاوت ترکیب شدند و نمونه‌های رویه‌های بتنی ساخته شده تحت آزمایش بارگذاری متمرکز آزمایش شدند. مطابق با نتایج، مقاومت خمشی و کششی رویه‌ها با افزایش درصد الیاف، افزایش و با افزایش درصد سرباره، کاهش یافت. همچنین، در مطالعات دیگر که توسط دلالت (۲۰۰۸) و عمان و گروتاس (۲۰۱۲) انجام شده است، رویکرد اصلی استفاده از مواد افزودنی و الیاف و همچنین تأثیر این عوامل بر دوام روسازی‌های بتنی بود. همچنین، روی کامپوزیت‌های سیمانی و بتن‌های الیافی به صورت جداگانه تحقیقاتی انجام شده است. از طرفی بتن به ماده‌ای گفته می‌شود که در فشار قوی و در کشش ضعیف و شکننده است (ستاری فرد و همکاران، ۲۰۱۴). ضعف کششی بتن با میلگردهای رایج بهبود می‌یابد (اوکای و همکاران، ۲۰۱۲). ولی امروزه با گسترش فناوری، می‌توان با الیاف‌های مختلف به اصلاح این ضعف پرداخت (سونگ و همکاران، ۲۰۰۵). در چند دهه اخیر از رویه‌های بتنی در راه‌سازی استفاده می‌شود (بتسن و همکاران، ۲۰۱۳)؛ ویبوتی و راداکریشنا، (۲۰۱۳). مقاومت فشاری و کششی رویه بتنی در مقایسه با رویه آسفالتی زیاد بوده و بار ترافیک را بدون تغییر شکل زیاد صفحه بتنی، در سطح گسترده‌تری نسبت به رویه آسفالتی به خاک بستر منتقل می‌سازد (نشریه شماره ۷۳۱). روسازی بتنی بارهای دینامیک را تحمل می‌کند و در اثر این بارها ترک‌های ریزی در سطح رویه بتنی ایجاد می‌شود. بروز این ترک‌های ریز موجب نفوذ عوامل مخرب به درون رویه بتنی و موجب صدمه به آن می‌شود. روسازی بتنی با کیفیت بالا نه تنها نیازمند مقاومتی مطلوب است، بلکه باید دوام بالایی نیز از خود نشان دهد. دوام روسازی بتنی شامل مقاومت در برابر ضربه، نفوذ پذیری، خمش و ... می‌باشد (نایکی و همکاران، ۱۹۹۴؛ آتیش، ۲۰۰۲). افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن می‌تواند باعث افزایش جذب انرژی و بهبود مقاومت ضربه‌ای بتن شود و همچنین از گسترش ترک‌ها جلوگیری به‌عمل آورد

معمولی دارای رفتار بسیار تردی است که در این کامپوزیت‌ها، به‌علت استفاده از الیاف، این نقص برطرف شده است (اوستون و همکاران، ۱۹۷۱). امروزه در دنیا انواع بسیار متنوعی از الیاف برای کاربردهای گوناگون در بتن وجود دارد که از پرکاربردترین آن‌ها، الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن می‌باشد (کیم و همکاران، ۲۰۱۱). الیاف فولادی دارای مدول الاستیسیته و کرنش شکست بالایی بوده که با توجه به قابلیت شکل‌پذیری مناسب و مقاومت کششی بالا از مناسب‌ترین نوع الیاف به حساب می‌آید (مستعلی و دالوند، ۲۰۱۶). الیاف پلی‌پروپیلن نیز با توجه به ارزان‌تر بودن نسبت به سایر انواع الیاف، از پرمصرف‌ترین الیاف مصنوعی مورد استفاده در بتن محسوب می‌شوند و عمدتاً جهت کنترل ترک‌ها به کار می‌رود (بنکاردینو و همکاران، ۲۰۱۰). کاهش ترک‌ها، جلوگیری از گسترش آن‌ها، وزن کم، مقاومت در مقابل مواد خورنده و کاهش نفوذپذیری در بتن از جمله مزایای الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشند (کیم و همکاران، ۲۰۱۱). در خصوص استفاده از بتن در روسازی راه‌ها تحقیقات زیادی توسط محققین صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۰ تحقیقاتی توسط فاو و پاراماسیوم (۱۹۹۰) روی رویه‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی نازک انجام گردید. در دهه‌های اخیر، تحقیقاتی روی عملکرد رویه‌های بتنی تحت بارهای وسایل نقلیه صورت گرفته است. نوبیلی و همکاران (۲۰۱۳) تحقیقاتی را در زمینه استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن انجام دادند. در این تحقیق، بتن معمولی به الیاف مسلح گردید و مشاهده شد که خصوصیات رویه بتنی بهبود می‌یابد. کرایوشکینا و همکاران (۲۰۱۷) تحقیقی روی استفاده از الیاف در بتن‌های مورد استفاده در پل‌ها و روسازی جاده‌ها انجام دادند. مطابق نتایج این تحقیق، الیاف می‌تواند به میزان قابل توجهی موجب بهبود رفتار خمشی و کششی این نوع بتن شود. توسط فوئنته-آلونسو و همکاران (۲۰۱۷) تحقیقی روی بتن الیافی ساخته شده با سرباره صورت گرفت. در این تحقیق که به صورت آزمایشگاهی انجام شد، درصد‌های مختلف

منظور بررسی عملکرد این نوع از کامپوزیت‌ها به عنوان روسازی‌های بتنی غیرمسلح، نمونه‌های مورد نیاز ساخته و آزمایش‌های خواص مکانیکی و ضربه‌ای انجام شد. نوآوری این تحقیق نسبت به موارد مشابه پیشین استفاده ترکیبی از الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن در ساخت نمونه‌ها، ساختار دولایه نمونه‌های خمشی (لایه فوقانی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و لایه تحتانی حاوی الیاف فولادی) و بررسی همزمان خصوصیات رئولوژی، مکانیکی و ضربه‌ای نمونه‌ها می‌باشد.

(هوانگ و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین، الیاف‌های کوتاه و مجزا می‌تواند باعث به تأخیر انداختن توزیع ترک‌های ناشی از برخورد ضربه شود. این امر بدین علت است که الیاف همانند پلی روی ترک‌ها عمل کرده و از گسترش آن‌ها جلوگیری می‌کند (عبدالله نژاد و همکاران، ۲۰۱۷؛ اصلانی همکاران، ۲۰۱۳). اطلاعات به دست آمده نشان می‌دهد که با افزودن الیاف به میزان ۰/۹ تا ۲ درصد حجمی بتن، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری به ترتیب تا ۳۰٪ و ۱۰ برابر بتن غیر مسلح افزایش می‌یابد (اصلانی و نژادی، ۲۰۱۳).

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. مصالح مورد استفاده

سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های کامپوزیت سیمانی خودتراکم این تحقیق، از نوع ریزدانه طبیعی عبوری از الک نمره ۸ (قطر روزه ۲/۳۶ میلی‌متر) بوده است. مقدار ۷۰٪ از سنگدانه‌های مورد استفاده دارای قطر ۱/۱۹-۲/۳۶ میلی‌متر و ۳۰٪ دارای قطر ۱۹/۲۹۷-۱/۰ میلی‌متر می‌باشند. سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع سیمان تپ ۲ تولید کارخانه سیمان شهر درود و آب مصرفی نیز آب قابل شرب، مطابق ضوابط AASHTO T26 می‌باشد. برای ایجاد خاصیت خودتراکمی و کارایی لازم در کامپوزیت سیمانی مورد استفاده، از یک نوع فوق‌روان‌کننده کربوکسیلاتی با نام تجاری Dezobuild 10 استفاده گردید. همچنین، در ساخت نمونه‌ها از دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن استفاده شد. الیاف فولادی از نوع دوسر قلاب به طول ۵ سانتی‌متر و الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۰/۶ سانتی‌متر بودند. تصویر و مشخصات این الیاف‌ها به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۲ آمده است.

۲. ضرورت انجام تحقیق

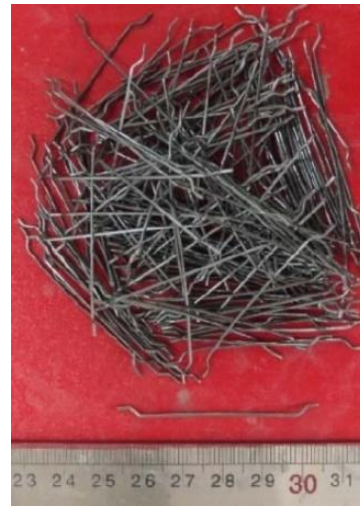
استفاده از منابع قیر به دست آمده از نفت خام در کشور ما به منظور استفاده در روسازی‌های آسفالتی بسیار متداول می‌باشد. در مناطق جنوبی کشور که دمای سطح جاده به دلیل تابش مستقیم آفتاب به بالای ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد، روسازی‌های آسفالتی تحت بارهای وسایل نقلیه دچار تغییر شکل‌های زیادی می‌گردند. یکی از عوامل این تغییر شکل، عدم کیفیت مناسب قیر مصرفی می‌باشد. از طرفی، استفاده از روسازی‌های بتنی در این نواحی به دلیل مقاومت زیاد بتن در برابر حرارت، موجب کاهش صدمات وارده به روسازی می‌گردد. ضمناً، ضوابط و مقررات آیین‌نامه‌ای نظیر آیین‌نامه اشتو و نشریه ۷۳۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، استفاده از بتن را در روسازی جاده مجاز می‌دانند. از طرفی، یکی از ضعف‌های اصلی بتن، مقاومت کششی کم آن می‌باشد. استفاده از کامپوزیت‌های خودتراکم الیافی که دارای مقاومت کششی، فشاری و خمشی مناسبی هستند، موجب بهبود خواص روسازی می‌گردد. لذا، در این تحقیق، به

جدول ۱. مشخصات الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن مورد استفاده

نوع الیاف	چگالی (kg/m ³)	طول (cm)	قطر (mm)	L/D	مدول یانگ (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
فولادی	۷۸۵۰	۵	۰/۸	۶۲/۵	۲۰۰	۱۱۰۰
پلی‌پروپیلن	۹۱۰	۰/۶	ناچیز	-	۳/۵ - ۳/۹	۴۰۰



(ب)



(الف)

شکل ۲. الف): الیاف فولادی و ب): الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده

۲-۳. طرح‌های اختلاط و ساخت نمونه‌ها

کامپوزیت سیمانی مورد استفاده در این تحقیق از نوع کامپوزیت سیمانی خودتراکم الیافی می‌باشد. نحوه ساخت این کامپوزیت در شکل ۳ نشان داده شده است. برای ساخت هر کدام از نمونه‌های فشاری، کششی و دیسک ضربه‌ای از ۱۱ طرح اختلاط (صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد الیاف فولادی، پلی پروپیلن و ترکیبی از آن‌ها) استفاده شد. از هر طرح اختلاط، سه نمونه مکعبی فشاری با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ ، استوانه‌ای کششی با ابعاد

10×20 و دیسک ضربه‌ای با ابعاد $15 \times 6/5$ سانتی‌متر ساخته شد. مشخصات طرح‌های اختلاط در جدول ۲ ارائه شده است. روند ساخت نمونه‌ها به گونه‌ای بود که ابتدا ماسه و سیمان مصرفی را به صورت خشک در میکسر ترکیب کرده و سپس ۹۰٪ از آب مصرفی به مخلوط اضافه شد. فوق‌روان‌کننده مورد استفاده با ۱۰٪ از آب باقیمانده ترکیب و سپس به میکسر اضافه شد. برای جلوگیری از ایجاد مشکل گلوله شدن، الیاف‌ها در آخرین مرحله به مخلوط کامپوزیت سیمانی اضافه شدند.



شکل ۳. ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها در حوض آب

جدول ۲. مشخصات طرح اختلاط‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های فشاری، کششی و ضربه‌ای

شماره طرح	نام طرح	درصد حجم الیاف		سنگدانه (kg/m^3)		سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	فوق‌روان‌کننده (kg/m^3)
		فولادی	PP	۱/۱۹-۲/۳۸ (mm)	۰/۲۹۷-۱/۱۹ (mm)			
۱	M-0	۰	۰	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۲	M-S0.25	۰/۲۵	۰	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۳	M-S0.5	۰/۵	۰	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۴	M-S0.75	۰/۷۵	۰	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۵	M-S1	۱	۰	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۶	M-PP0.25	۰	۰/۲۵	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۷	M-PP0.5	۰	۰/۵	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۸	M-PP0.75	۰	۰/۷۵	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۹	M-PP1	۰	۱	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۱۰	M-S0.25-PP0.25	۰/۲۵	۰/۲۵	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶
۱۱	M-S0.5-PP0.5	۰/۵	۰/۵	۷۰۲/۸	۳۰۱/۲	۱۰۰۴	۳۹۲	۳/۶

لاستیکی و احتمال بروز صدمه در چرخ) صرف نظر شده است. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

۳-۳. کارایی کامپوزیت سیمانی خودتراکم

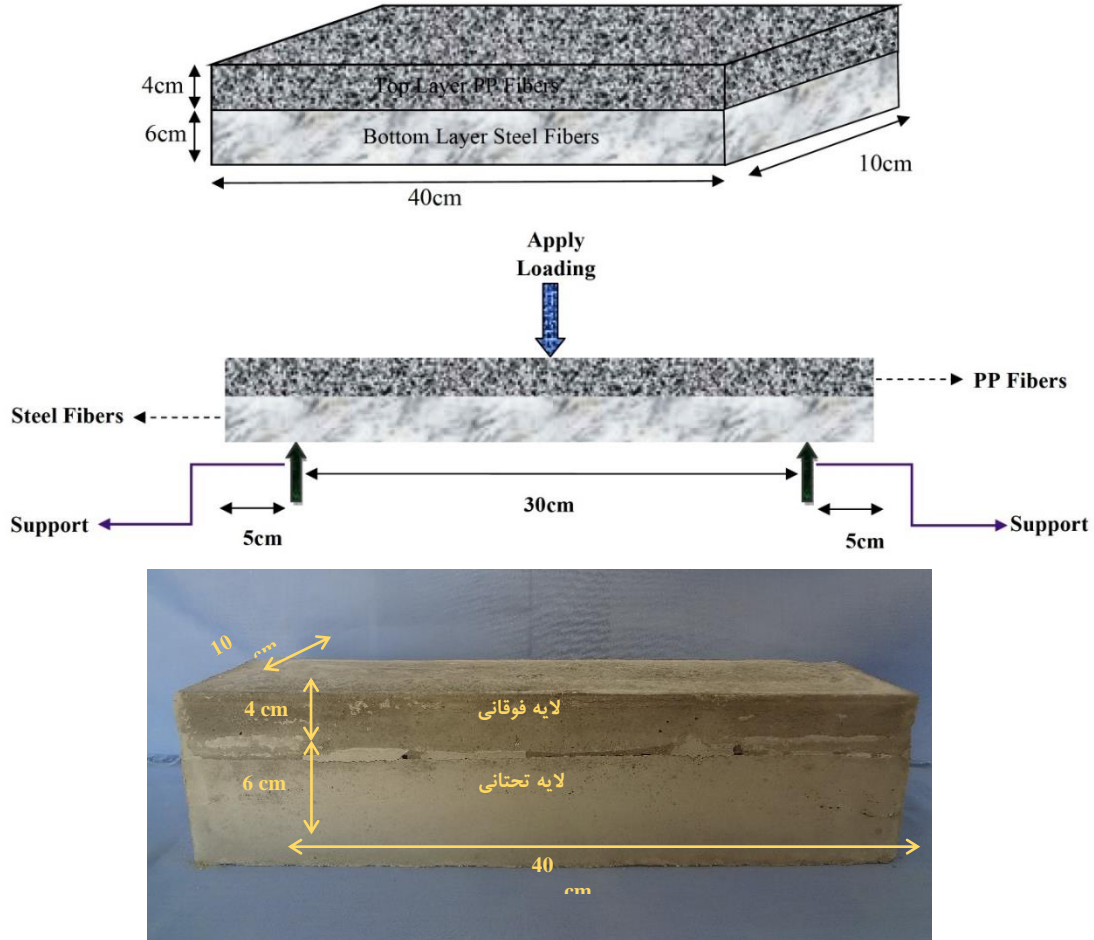
ساخته شده

برای اطمینان از خاصیت خودتراکمی کامپوزیت سیمانی مورد استفاده، آزمایش J-ring (مطابق شکل ۵) روی ۱۱ طرح اختلاط جدول ۴ انجام شد. چنانچه قطر پهن‌شدگی برای بتنی بیشتر از ۶۰۰ میلی‌متر حاصل شود، می‌توان آن را یک بتن خودتراکم به حساب آورد (مستعلی و همکاران، ۲۰۱۶). نتیجه این آزمایش برای طرح اختلاط بدون الیاف ۷۱۰ میلی‌متر به دست آمد که نشان‌دهنده خاصیت خودتراکمی و روانی کافی طرح اختلاط مورد استفاده می‌باشد. مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد الیاف فولادی به ترتیب موجب کاهش این

نمونه‌های خمشی به صورت یک‌لایه و دو‌لایه در قالب ۱۷ طرح اختلاط ساخته شدند. این نمونه‌ها به منظور انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای مطابق ضوابط (نشریه ۷۳۱) ساخته شدند. یک سری از نمونه‌ها بدون الیاف و ۸ سری دیگر حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به تنهایی می‌باشند. همچنین، ۸ طرح اختلاط هم به صورت ترکیبی از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در دو لایه (لایه تحتانی حاوی الیاف فولادی و لایه فوقانی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن) مطابق با شکل ۴ ساخته شد. در این طرح، سعی شده است تمام حالت‌های ممکن از ترکیب دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در دو لایه بررسی شود که البته با توجه به اینکه حضور الیاف فولادی در لایه فوقانی روسازی ممکن است موجب آسیب به چرخ وسایل نقلیه شود، از بررسی حالت‌هایی که الیاف فولادی در لایه فوقانی قرار می‌گیرد (به دلیل تماس الیاف با چرخ

به ۶۸، ۶۵، ۶۴ و ۶۱ سانتی متر برسد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر منفی الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر کاهش روانی کامپوزیت سیمانی است.

عدد به ۶۷، ۶۴، ۶۲ و ۶۰ سانتی متر گردیدند. کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن به ترتیب موجب گردید تا در آزمایش J-ring قطر دایره‌ها



شکل ۴. نمونه‌ای از ساختار تست خمشی کامپوزیت‌های سیمانی دو لایه

جدول ۳. مشخصات طرح اختلاط‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌های خمشی دو لایه

شماره طرح	نام طرح	درصد حجم الیاف			
		لایه فوقانی	لایه تحتانی	لایه فوقانی	لایه تحتانی
		PP	فولادی	PP	فولادی
۱	T.0 - D.0
۲	T.0 - D.0.25S	.	.	.	۰/۲۵
۳	T.0 - D.0.5S	.	.	.	۰/۵
۴	T.0 - D.0.75S	.	.	.	۰/۷۵
۵	T.0 - D.1S	.	.	.	۱
۶	T.0.25PP - D.0.25S	۰/۲۵	.	.	۰/۲۵
۷	T.0.5PP - D.0.5S	۰/۵	.	.	۰/۵

بررسی آزمایشگاهی استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم با الیاف ترکیبی در بهبود رفتار رویه‌های بتنی الیافی

۰/۷۵	۰	۰	۰/۷۵	T.0.75PP - D.0.75S	۸
۱	۰	۰	۱	T.1PP - D.1S	۹
۰/۲۵	۰	۰	۰	T.0.25PP - D.0	۱۰
۰/۵	۰	۰	۰	T.0.5PP - D.0	۱۱
۰/۷۵	۰	۰	۰	T.0.75PP - D.0	۱۲
۱	۰	۰	۰	T.1PP - D.0	۱۳
۰/۲۵	۰	۰/۲۵	۰	T.0.25PP - D.0.25PP	۱۴
۰/۵	۰	۰/۵	۰	T.0.5PP - D.0.5PP	۱۵
۰/۷۵	۰	۰/۷۵	۰	T.0.75PP - D.0.75PP	۱۶
۱	۰	۱	۰	T.1PP - D.1PP	۱۷



شکل ۵. نحوه انجام آزمایش J-ring

جدول ۴. نتایج آزمایش J-ring

S0.5-PP0.5	S0.25-PP0.25	PP1	PP0.75	PP0.5	P0.25	S1	S0.75	S0.5	S0.25	S0-PP0	آزمایش
۶۰	۶۵	۶۱	۶۴	۶۵	۶۸	۶۰	۶۲	۶۴	۶۷	۷۱	J-ring

۳-۴-۳. آزمایش جذب آب

با توجه به اینکه مطابق با جدول پ-۳-۷ نشریه ۷۳۱، انجام آزمایش جذب آب برای روسازی‌های بتنی الزامی است، لذا آزمایش جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C642 روی نمونه‌های مکعبی انجام گرفت. جذب آب نیم ساعته (جذب آب اولیه) و ۷۲ ساعته (جذب آب نهایی) روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر در سن ۲۸ روز انجام شد.

۳-۴-۴. آزمایش مقاومت خمشی

بر اساس استاندارد ۷۳۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، مقاومت خمشی رویه‌های کامپوزیتی باید توسط آزمایش سه-نقطه‌ای مطابق با استانداردهای ASHTO T177، ASTM C293 و یا استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۷۳۱ محاسبه شود. به همین منظور، مطابق با استانداردهای ذکر شده، آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های خمشی یک و دولایه انجام شد.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

مطابق با استاندارد ۷۳۱، مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر نباید کمتر از ۳۰ مگاپاسکال باشد. روش پیشنهادی در استاندارد ۷۳۱ به منظور انجام تست فشاری روی نمونه‌ها بر اساس AASHTO T22 یا ASTM C39 می‌باشد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و مقاومت معادل نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد، مطابق استاندارد ASTM C39، در جدول ۵ نشان داده شده است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد، مقاومت فشاری معادل

۳-۴. روش انجام آزمایش‌ها

۳-۴-۱. آزمایش مقاومت فشاری و کششی

آزمایش مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی با استفاده از جک فشاری ۲۰۰ تنی و بر اساس استاندارد AASHTO T22 یا ASTM C39 روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر انجام گردید. همچنین، آزمایش کشش به صورت آزمایش کشش غیرمستقیم (برزلی) بر اساس استاندارد ASTM C496 روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۲۰×۱۰ سانتی‌متر انجام شد.

۳-۴-۲. آزمایش مقاومت ضربه‌ای

با توجه به اینکه در نشریه ۷۳۱ و همچنین آیین‌نامه AASHTO روش استاندارد به منظور انجام تست ضربه ارائه نشده، لذا آزمایش ضربه‌ای روی نمونه‌ها بر اساس ضوابط آیین‌نامه ACI 544 صورت گرفت. آزمایش ضربه‌ای روی نمونه‌های دیسک بتنی با ابعاد ۱۵×۶/۵ سانتی‌متر بر اساس روش پیشنهادی در آیین‌نامه ACI 544 به صورت وزنه افتان انجام گرفت. در این آزمایش، یک چکش به وزن ۴/۴۵ کیلوگرم روی یک گوی فولادی به قطر ۱۵ و ارتفاع ۶/۵ سانتی‌متر در فاصله ۴۵/۷ سانتی-متری رها می‌گردد. در این آزمایش، سه پارامتر مقاومت اولین ترک (تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک قابل رؤیت)، مقاومت نهایی (تعداد ضربه برای ایجاد گسیختگی در نمونه) و انرژی جذب شده بر اساس رابطه ۱ بر حسب ژول محاسبه گردید. در این رابطه، W وزن چکش مورد استفاده، H ارتفاع سقوط وزنه و N تعداد ضربه برای ایجاد گسیختگی نهایی می‌باشد.

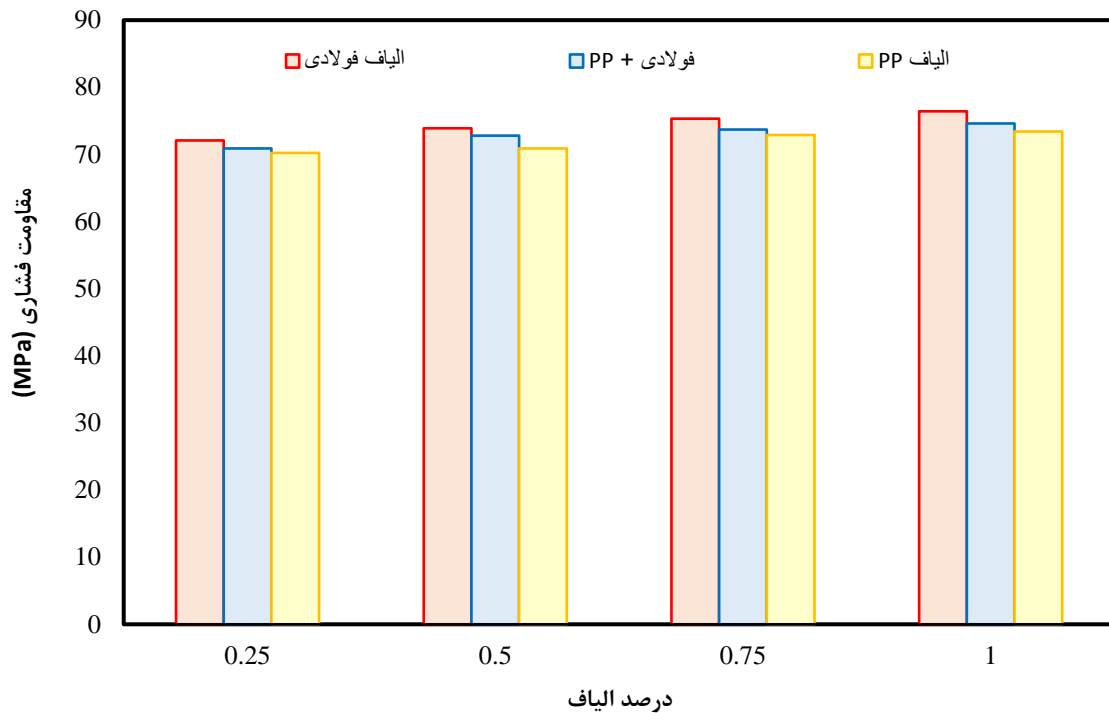
$$E_N = N \times W \times H \quad (1)$$

ترکیبی در مقایسه با نمونه‌ی شاهد (M-0) افزایش مقاومت فشاری کمتر از ۱۰٪ را تجربه کردند. در تحقیقات گذشته، هر دو نوع اثر افزایشی و کاهش‌ی روی مقاومت فشاری بتن، بر اثر افزودن الیاف، گزارش شده است (خالو و همکاران، ۲۰۱۷). اصلانی و همکاران (۲۰۱۳) افزایش مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم و خالو و همکاران (۲۰۱۷) کاهش مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم را در اثر افزودن الیاف گزارش کرده‌اند. با توجه به عدم تطابق نتایج آزمایش‌ها روی اثر حضور الیاف در مقاومت فشاری بتن، نیاز به انجام آزمایش‌های بیشتری در این زمینه احساس می‌شود. نمودار چگونگی تأثیر این الیاف‌ها روی مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی در شکل ۶ نشان داده شده است.

استوانه‌ای استاندارد برای تمامی نمونه‌ها بیشتر از ۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. میانگین مقاومت نمونه بدون الیاف در این آزمایش ۶۹ مگاپاسکال به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی توانمند بودن طرح اختلاط مورد استفاده می‌باشد. نتایج این آزمایش نشان داد که استفاده از ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد حجمی از الیاف فولادی، به ترتیب موجب افزایش ۴/۵، ۷/۱، ۹/۱ و ۱۱ درصدی در مقاومت فشاری نمونه‌ها شد. استفاده از همین مقدار الیاف پلی‌پروپیلن به ترتیب موجب افزایش ۲، ۲/۸، ۵/۶ و ۶/۴ درصدی مقاومت فشاری شد. این نتایج نشان‌دهنده‌ی تأثیر کمتر الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به الیاف فولادی، در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های کامپوزیت سیمانی می‌باشد. استفاده از ترکیبی از این الیاف‌ها نیز تأثیری روی افزایش مقاومت فشاری نداشته و نمونه‌های حاوی الیاف

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

شماره	نام طرح اختلاط	مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی (MPa)				مقاومت فشاری معادل استوانه استاندارد
		نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین	
۱	M-0	۶۹/۸	۷۰/۵	۶۶/۸	۶۹/۰۳	۵۹/۷۷
۲	M-S0.25	۶۹/۷	۷۴/۸	۷۱/۸	۷۲/۱	۶۲/۴۳
۳	M-S0.5	۷۱/۷	۷۳/۹	۷۶	۷۳/۹	۶۳/۹۹
۴	M-S0.75	۷۷	۷۵/۸	۷۳/۱	۷۵/۳	۶۵/۲
۵	M-S1	۷۸/۷	۷۶/۶	۷۳/۹	۷۶/۴	۶۶/۱۶
۶	M-PP0.25	۶۷/۸	۷۰/۸	۷۲/۱	۷۰/۲	۶۰/۷۹
۷	M-PP0.5	۷۰/۷	۷۲	۷۰/۱	۷۰/۹	۶۱/۳۹
۸	M-PP0.75	۷۴/۴	۷۱/۶	۷۲/۷	۷۲/۹	۶۳/۱۳
۹	M-PP1	۷۳	۷۲/۶	۷۴/۵	۷۳/۴	۶۳/۵۶
۱۰	M-S0.25-PP0.25	۷۲/۴	۷۱/۲	۷۴/۹	۷۲/۸	۶۳/۰۴
۱۱	M-S0.5-PP0.5	۷۵/۳	۷۶/۷	۷۱/۸	۷۴/۶	۶۴/۶



شکل ۶. تأثیر الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن روی مقاومت فشاری

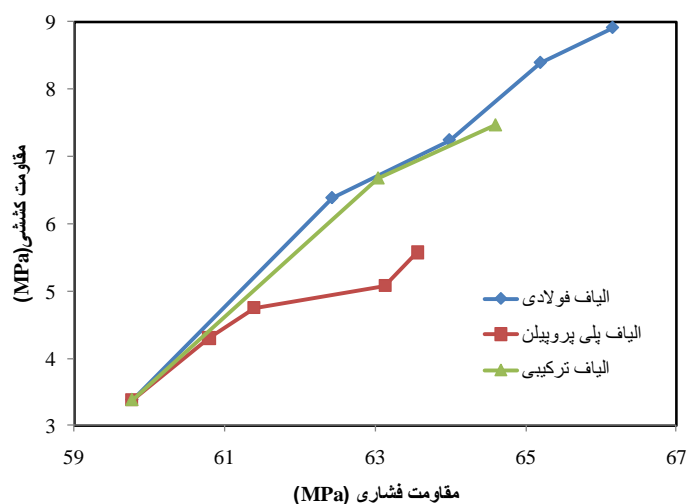
۴-۲. نتایج آزمایش مقاومت کششی

نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های کامپوزیتی مطابق با ASTM C496 در جدول ۶ نشان داده شده است. میانگین مقاومت کششی نمونه بدون الیاف ۳/۳۸ مگاپاسکال به دست آمده است. نتایج مربوط به نمونه‌های دارای الیاف فولادی نشان‌دهنده تأثیر بسیار زیاد این الیاف روی مقاومت کششی می‌باشد. افزودن ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد الیاف فولادی موجب افزایش ۸۹، ۱۱۴، ۱۴۸ و ۱۶۴ درصدی مقاومت کششی شد. مشاهدات نشان داد که الیاف فولادی با ایجاد دوختگی در ترک ایجاد شده و جلوگیری از گسترش آن، موجب مقاومت بیشتر نمونه می‌شود. نتایج نمونه‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن نشان می‌دهد که تأثیر این الیاف بر مقاومت کششی، در مقایسه با الیاف فولادی کمتر می‌باشد. حداکثر مقاومت کششی

در نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن، مربوط به گروه M-PP1 (با ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن) می‌باشد که در این نمونه‌ها، افزایش ۶۵ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه مرجع به دست آمد که نسبت به تأثیر الیاف فولادی بسیار کمتر است. مطالعات قبلی نیز افزایش مقاومت کششی بتن‌های خودتراکم را در اثر افزودن الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن گزارش کرده‌اند (دیب، ۲۰۰۹؛ اصلانی و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج این آزمایش با نتایج تحقیقات گذشته تطابق قابل قبولی دارد. منحنی تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های کامپوزیتی بر حسب مقاومت فشاری در شکل ۷ ارائه شده است. همانطوری که در این شکل ملاحظه می‌گردد، در هر گروه، رابطه‌ای مستقیم میان مقاومت فشاری و مقاومت کششی برقرار می‌باشد و با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۶. نتایج آزمایش کشش برزیلی

شماره	طرح اختلاط	مقاومت کششی (MPa)		
		نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
۱	M-0	۳/۵۲	۳/۲۱	۳/۴۰
۲	M-S0.25	۶/۵۲	۶/۱۴	۶/۴۸
۳	M-S0.5	۷/۲۵	۶/۹۶	۷/۵۲
۴	M-S0.75	۸/۵۴	۸/۲۱	۸/۴۱
۵	M-S1	۹/۰۶	۹/۱۲	۸/۵۶
۶	M-PP0.25	۴/۵۲	۴/۲۳	۴/۱۴
۷	M-PP0.5	۵/۰۱	۴/۵۱	۴/۷۲
۸	M-PP0.75	۵/۱۱	۴/۷۹	۵/۳۴
۹	M-PP1	۵/۷۱	۵/۳۲	۵/۶۷
۱۰	M-S0.25-PP0.25	۶/۹۶	۶/۵۹	۶/۴۸
۱۱	M-S0.5-PP0.5	۷/۹۱	۷/۵۲	۶/۹۹



شکل ۷. رابطه مقاومت فشاری و مقاومت کششی

۳-۴. نتایج آزمایش جذب آب

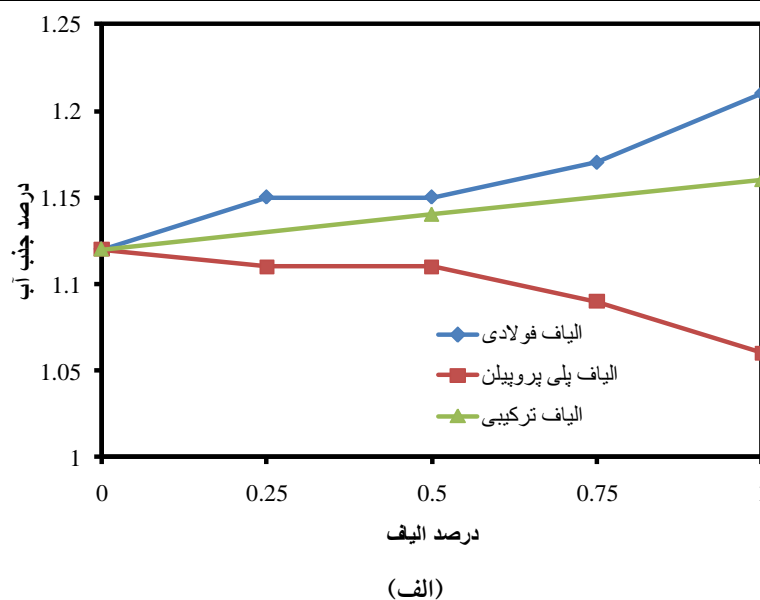
آزمایش بررسی جذب آب نمونه‌ها روی ۱۱ طرح اختلاط مختلف شامل الیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن و ترکیبی از آن‌ها به دو صورت جذب آب کوتاه‌مدت (نیم ساعته) و جذب آب کلی (۷۲ ساعته) مطابق ضوابط ASTM C642 (توصیه شده توسط نشریه ۷۳۱) انجام شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش جذب آب نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و کاهش جذب آب نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. افزودن الیاف فولادی تا حدودی موجب کاهش خاصیت

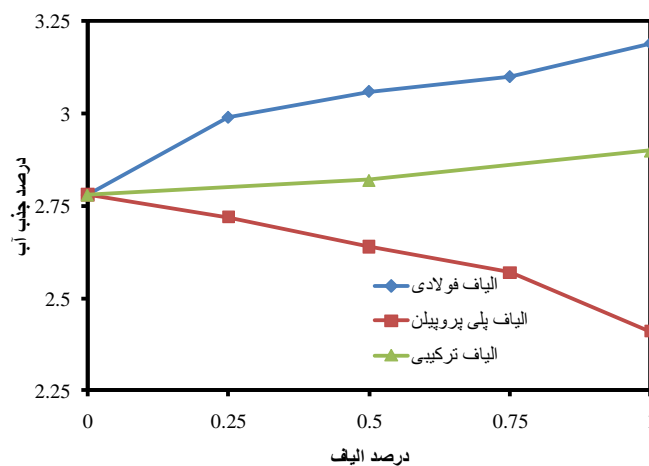
خودتراکمی و در نتیجه ایجاد تخلخل در کامپوزیت سیمانی می‌شود. لذا، افزایش جذب آب نمونه‌های حاوی الیاف فولادی طبیعی به‌نظر می‌رسد. از طرفی، الیاف پلی پروپیلن بر خلاف الیاف فولادی می‌تواند با مسدود کردن راه‌های ارتباطی حفره‌ها با یکدیگر موجب عایق شدن نمونه‌ها و کاهش جذب آب گردد. در آزمایش جذب آب، بهترین عملکرد (کمترین جذب آب) را نمونه دارای ۱٪ الیاف پلی پروپیلن به‌خود اختصاص داده است. نتایج مربوط به این آزمایش در جدول ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۸، میزان جذب آب ۲۴ و

۷۲ ساعته نمونه‌های دارای الیاف فولادی و الیاف ترکیبی با افزایش درصد الیاف، افزایش یافته است. همچنین، با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن (بر خلاف الیاف فولادی و ترکیبی) میزان جذب آب نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در تحقیقات گذشته نیز افزایش جذب آب بتن در اثر افزودن الیاف فولادی و کاهش آن در اثر افزودن الیاف پلی پروپیلن گزارش شده است. برنجیان و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقات خود افزایش ۸ درصدی جذب آب ۷۲ ساعته را در اثر افزودن ۰/۵ درصد الیاف فولادی و کاهش ۱۷ درصدی آن را در اثر افزودن ۰/۵ درصد الباف پلی پروپیلن نسبت به طرح اختلاط بدون الیاف گزارش کردند.

جدول ۷. نتایج آزمایش جذب آب نیم ساعته و ۷۲ ساعته

شماره	طرح اختلاط	درصد جذب آب		
		درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد	درصد تغییر نسبت به نمونه شاهد
۱	M-0	۱/۱۲	۲/۷۸	-
۲	M-S0.25	۱/۱۵	۲/۹۹	۸
۳	M-S0.5	۱/۱۵	۳/۰۶	۱۰
۴	M-S0.75	۱/۱۷	۳/۱۰	۱۲
۵	M-S1	۱/۲۱	۳/۱۹	۱۵
۶	M-PP0.25	۱/۱۱	۲/۷۲	-۲
۷	M-PP0.5	۱/۱۱	۲/۶۴	-۵
۸	M-PP0.75	۱/۰۹	۲/۵۷	-۸
۹	M-PP1	۱/۰۶	۲/۴۱	-۱۳
۱۰	M-S0.25-PP0.25	۱/۱۴	۲/۸۲	۲
۱۱	M-S0.5-PP0.5	۱/۱۶	۲/۹۰	۵





(ب)

شکل ۸. تأثیر الیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن بر میزان جذب آب: الف) نیم ساعته و ب) ۷۲ ساعته

پلی پروپیلن نشان می‌دهد که این الیاف‌ها می‌توانند در بهبود مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم مؤثر باشند. از طرفی، تأثیر الیاف فولادی بسیار بیشتر از تأثیر الیاف پلی پروپیلن می‌باشد. افزودن ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی به کامپوزیت توانسته است به ترتیب مقاومت اولین ترک را ۱۲۸، ۱۹۵، ۲۶۱ و ۳۳۳ و مقاومت نهایی را ۳۰۰، ۴۰۷، ۶۴۸ و ۸۴۱ درصد افزایش دهد. الیاف فولادی با ایجاد انسجام بسیار بالا در نمونه و به هم دوختن ترک‌های اولیه ایجاد شده در نمونه موجب افزایش قابل توجه مقاومت ضربه‌ای شده است. از طرفی، الیاف پلی پروپیلن نیز توانست با پل زدن بین ریز ترک‌های ایجاد شده در سطح نمونه از گسترش آن‌ها جلوگیری کرده و موجب افزایش مقاومت ضربه‌ای شود. مطابق نتایج تأثیر الیاف پلی پروپیلن به مراتب کمتر از الیاف فولادی می‌باشد. افزودن ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد از الیاف پلی پروپیلن به ترتیب می‌تواند مقاومت اولین ترک را ۳۹، ۷۸، ۹۵، ۱۲۸ درصد و مقاومت نهایی را ۱۰۴، ۱۸۵، ۲۷۸ و ۳۷۴ درصد افزایش دهد. انهدام نمونه‌های الیافی به صورت ترک‌های چندگانه و انهدام نمونه بدون الیاف به صورت ترک ساده (مطابق شکل ۹) می‌باشند. جذب انرژی ۱۱ طرح اختلاط در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۴-۴. نتایج مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت‌های سیمانی

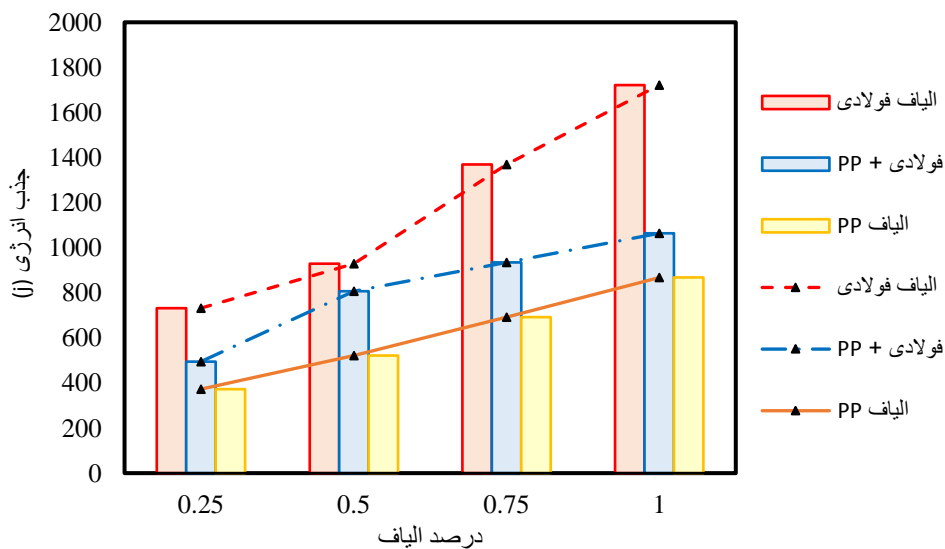
در نشریه ۷۳۱ و همچنین آیین‌نامه AASHTO روش استاندارد به منظور انجام تست ضربه روی نمونه‌های بتنی و کامپوزیتی ارائه نشده است. در آیین‌نامه ACI-544 در خصوص بتن‌های الیافی می‌باشد، یک روش استاندارد به منظور انجام تست ضربه‌ای روی نمونه‌های بتن الیافی بیان شده است. با توجه به اینکه نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق از کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم می‌باشند، لذا به منظور بررسی خصوصیات ضربه‌ای آن‌ها، از روش ارائه شده در آیین‌نامه ACI-544 استفاده شد. در این آزمایش، سه پارامتر مقاومت اولین ترک، مقاومت نهایی و جذب انرژی اندازه‌گیری می‌شود. نتایج مربوط به مقاومت ضربه‌ای در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج و مشاهدات در حین انجام آزمایش نشان داد که کامپوزیت‌های فاقد الیاف رفتار تردی را از خود نشان داده و مقاومت بسیار کمی در مقابل ضربه دارند و تنها بعد از تحمل چند ضربه به سرعت به چند تکه تقسیم می‌شوند. به طوری که میانگین مقاومت اولین ترک و مقاومت نهایی این نمونه‌ها ۶ و ۹ ضربه می‌باشد. نتایج آزمایش روی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و

جدول ۸. نتایج آزمایش ضربه وزنه افتان

شماره	نام نمونه	مقاومت اولین ترک	مقاومت نهایی	جذب انرژی (KJ)	درصد افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه بدون الیاف
۱	M-0	۶	۹	۱۸۳	-
۲	M-S0.25	۱۴	۳۶	۷۳۲	۳۰۰
۳	M-S0.5	۱۸	۴۶	۹۲۹	۴۰۷
۴	M-S0.75	۲۲	۶۷	۱۳۶۹	۶۴۸
۵	M-S1	۲۶	۸۵	۱۷۲۲	۸۴۱
۶	M-PP0.25	۸	۱۸	۳۷۳	۱۰۴
۷	M-PP0.5	۱۱	۲۶	۵۲۲	۱۸۵
۸	M-PP0.75	۱۲	۳۴	۶۹۱	۲۷۸
۹	M-PP1	۱۴	۴۳	۸۶۸	۳۷۴
۱۰	M-S0.25-PP0.25	۱۴	۴۰	۸۰۷	۳۴۱
۱۱	M-S0.5-PP0.5	۲۰	۵۲	۱۰۶۴	۴۸۲



شکل ۹. نمونه‌ای از نتایج آزمایش ضربه وزنه افتان



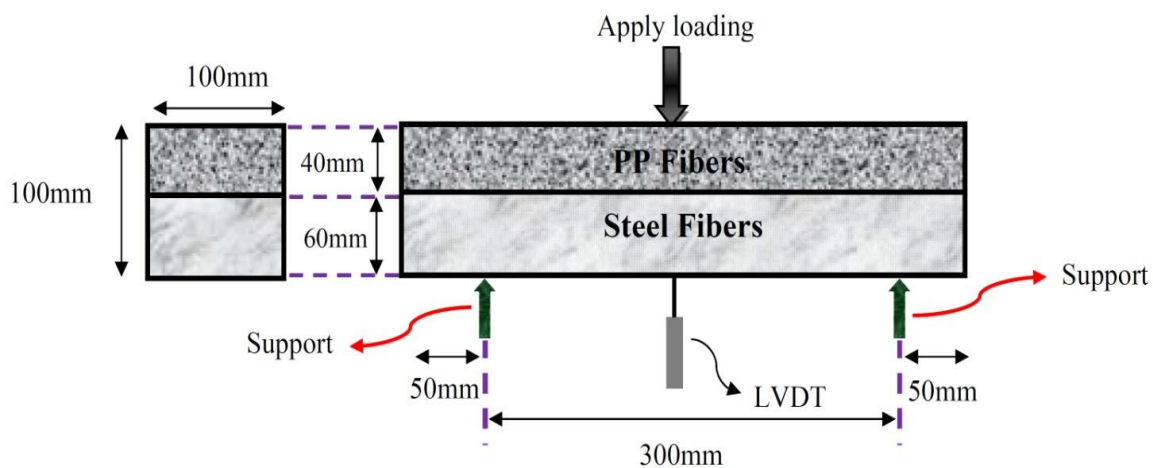
شکل ۱۰. تأثیر الیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن بر جذب انرژی

بررسی آزمایشگاهی استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم با الیاف ترکیبی در بهبود رفتار رویه‌های بتنی الیافی

استانداردهای ASTM C293، ASHTO T177 و یا استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۷۳۱ را پیشنهاد می‌کند. در این پژوهش، مقاومت خمشی نمونه‌های کامپوزیتی دولایه بر اساس استاندارد ASTM C293 محاسبه گردید. آزمایش مقاومت خمش روی تیرهای دولایه ساخته شده با ۱۷ طرح اختلاط مختلف حاوی الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و ترکیبی از آن‌ها انجام شد. تصویری از نحوه انجام این آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین، مقادیر مقاومت خمشی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی در جدول ۹ نشان داده شده است.

۵-۴. نتایج آزمایش مقاومت خمشی و طاق خمشی

مقاومت خمشی کامپوزیت‌های سیمانی مورد استفاده در این تحقیق بایستی معیارهای حداقل مقاومت خمشی مورد استفاده در روسازی‌های بتنی را داشته باشد. مطابق با ضوابط نشریه ۷۳۱، مقاومت خمشی رویه بتنی نباید از ۴ مگاپاسکال کمتر باشد. استاندارد ۷۳۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی برای تعیین مقاومت خمشی رویه‌های کامپوزیتی، آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای مطابق با



شکل ۱۱. چگونگی انجام آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

جدول ۹. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

شماره	نام طرح	مقاومت خمشی (MPa)	درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع	جذب انرژی (kJ)	درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع
۱	T. 0 - D. 0	۳/۴۲	-	۷/۳۲	-
۲	T. 0 - D. 0.25S	۵/۱۴	۵۰	۱۳/۹۳	۱۵۶
۳	T. 0 - D. 0.5S	۶/۲۹	۸۴	۱۶/۱۸	۲۳۸
۴	T. 0 - D. 0.75S	۷/۵۷	۱۲۱	۱۷/۷۴	۲۸۱
۵	T. 0 - D. 1S	۸/۲۲	۱۴۰	۱۹/۶۸	۳۶۳
۶	T. 0.25PP - D. 0.25S	۵/۲۱	۵۲	۱۵/۶۸	۲۰۶
۷	T. 0.5PP - D. 0.5S	۶/۳۸	۸۷	۱۷/۹۸	۲۷۵
۸	T. 0.75PP - D. 0.75S	۷/۴۹	۱۱۹	۱۹/۲۳	۳۵۶
۹	T. 1PP - D. 1S	۸/۴۰	۱۴۶	۲۳/۰۸	۴۰۶
۱۰	T. 0.25PP - D. 0	۳/۴۷	۴	۸/۰۲	۳۱
۱۱	T. 0.5PP - D. 0	۳/۵۵	۲	۸/۱۷	۳۱
۱۲	T. 0.75PP - D. 0	۳/۶۰	۷	۸/۳۹	۵۰
۱۳	T. 1PP - D. 0	۳/۶۶	۵	۸/۷۰	۶۳
۱۴	T. 0.25PP - D. 0.25PP	۳/۷۸	۱۱	۹/۴۱	۶۹
۱۵	T. 0.5PP - D. 0.5PP	۳/۹۹	۱۷	۹/۸۷	۸۸
۱۶	T. 0.75PP - D. 0.75PP	۴/۳۵	۲۷	۱۰/۷۱	۱۱۳
۱۷	T. 1PP - D. 1PP	۴/۶۰	۳۵	۱۱/۰۶	۱۳۱

۴-۵-۱. تأثیر افزودن الیاف فولادی به تنهایی

همان طوری که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با اضافه نمودن الیاف فولادی به نمونه بدون الیاف، مقاومت خمشی (ضریب گسیختگی) به طور چشمگیری افزایش یافته است. در نشریه ۷۳۱ سازمان مدیریت، رابطه‌ای به منظور محاسبه مقاومت خمشی به صورت رابطه ۲ پیشنهاد می‌گردد. در واقع، در نشریه ۷۳۱، یک بازه به منظور در نظر گرفتن مقاومت خمشی لحاظ شده است.

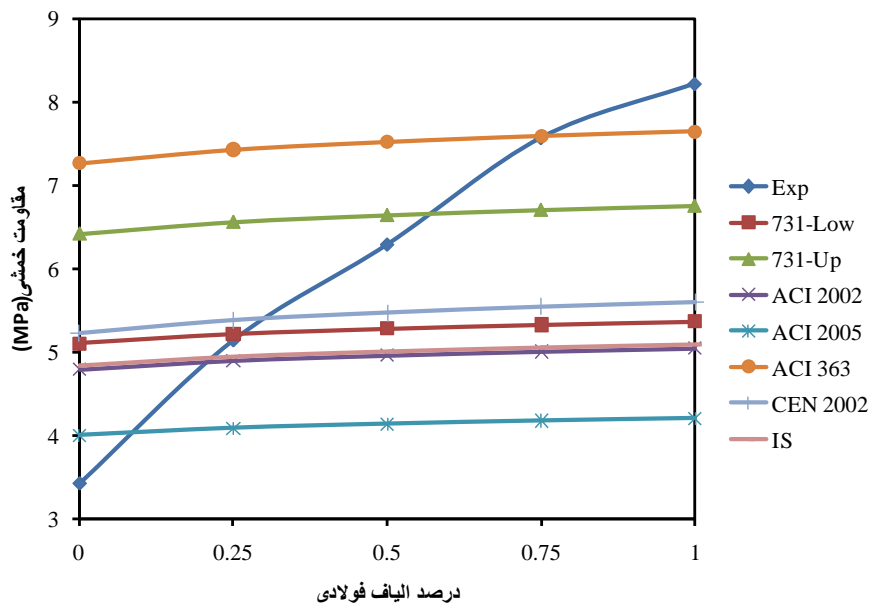
(۲)

$$(f_r) - Low = 0.66\sqrt{f'_c} \quad (f_r) - Up = 0.83\sqrt{f'_c}$$

که f'_c مقاومت فشاری مشخصه بتن بر حسب مگاپاسکال و f_r مدول گسیختگی بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. در جدول ۱۰، مقایسه‌ای بین روابط موجود برای مقاومت خمشی انجام گرفته است. همچنین، در شکل ۱۲، نتایج جدول ۹ در قالب نمودار ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، اکثر روابط آیین‌نامه‌ای اختلاف زیادی با روابط نشریه ۷۳۱ دارند. همچنین، مقادیر مقاومت خمشی به دست آمده از آزمایش تجربی، تفاوت زیادی در درصد الیاف فولادی ۱ و ۰/۷۵ با روابط آیین‌نامه‌ای دارند. در بهترین حالت، افزودن میزان ۱٪ الیاف فولادی در لایه تحتانی موجب افزایش ۱۴۰ درصدی مقاومت خمشی، ۱۶۹ درصدی جذب انرژی و ۳۶۳ درصدی ضریب مقاومت خمشی شده است.

جدول ۱۰. مقایسه بین مقاومت خمشی به دست آمده از آزمایش و روابط آیین نامه‌ای برای الیاف فولادی

اندیس	درصد الیاف فولادی	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱
$(f_r)_{exp}$	مقاومت خمشی آزمایشگاهی (MPa)	۳/۴۲	۵/۱۴	۶/۲۹	۷/۵۷	۸/۲۲
f'_c	مقاومت فشاری (MPa)	۵۹/۷۷	۶۲/۴۳	۶۳/۹۹	۶۵/۲	۶۶/۱۶
$(f_r)_{731}$	مقاومت خمشی محاسبه شده مطابق نشریه ۷۳۱ (MPa)	۶/۴۱	۶/۵۵	۶/۶۴	۶/۷	۶/۷۵
$(f_r)_{ACI-2002} = 0.62\sqrt{f'_c}$	ACI Committee 318, 2002	۴/۷۹	۴/۹	۴/۹۶	۵	۵/۰۴
$(f_r)_{ACI-2005} = 0.517\sqrt{f'_c}$	ACI Committee 318, 2005	۳/۹۹	۴/۰۸	۴/۱۳	۴/۱۷	۴/۲۰
$(f_r)_{ACI-363} = 0.94\sqrt{f'_c}$	ACI Committee 363	۷/۲۷	۷/۴۲	۷/۵۲	۷/۵۹	۷/۶۴
$(f_r)_{CEN} = 0.342(f'_c)^{2/3}$	European code (CEN, 2002)	۵/۲۲	۵/۳۸	۵/۴۷	۵/۵۴	۵/۵۹
$(f_r)_{IS} = 0.626\sqrt{f'_c}$	Indian code (IS, 2000)	۴/۸۳	۴/۹۵	۵	۵/۰۵	۵/۰۹



شکل ۱۲. مقایسه مقاومت خمشی ناشی از نتایج آزمایشگاهی و روابط آیین نامه‌ای برای نمونه‌های دارای الیاف فولادی

۲-۵-۴. تأثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت

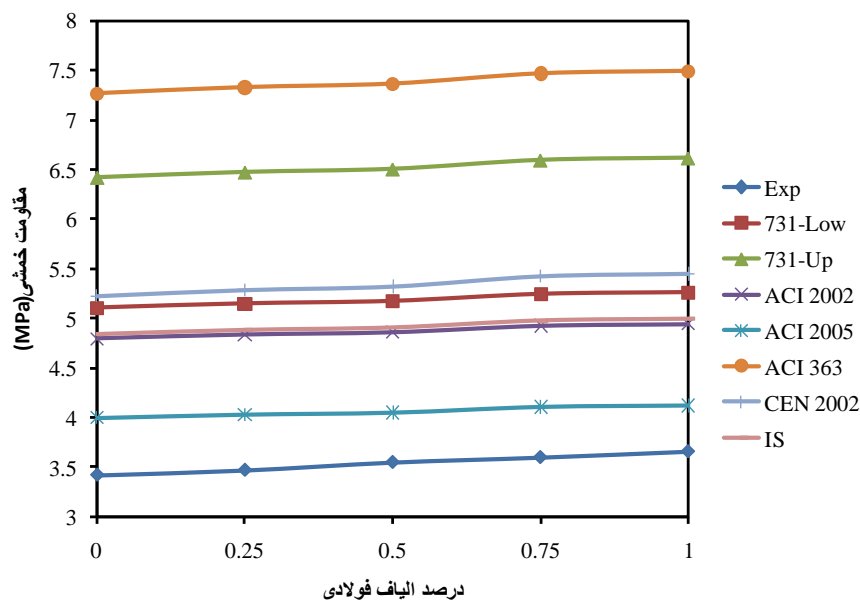
خمش

نتایج حاصل از اضافه نمودن الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های خمشی کامپوزیتی در جدول ۱۱ ارائه شده است. همانطور که در این جدول ملاحظه می‌شود، تأثیر اضافه نمودن الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به الیاف فولادی به مراتب کمتر می‌باشد. همچنین، ملاحظه می‌گردد که مقادیر مقاومت خمشی به دست آمده برای نمونه‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن دارای انطباق بیشتری با روابط

آیین‌نامه‌ای می‌باشد. همچنین، در شکل ۱۳، نتایج جدول ۱۱ در قالب نمودار ارائه شده است. مطابق با نمودار شکل ۱۳، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی موجب می‌گردد تا مقادیر مقاومت خمشی به دست آمده از آزمایش، از تمامی مقادیر محاسبه شده توسط روابط آیین‌نامه‌ای کمتر باشد. بیشترین و کمترین انطباق نتایج آزمایشگاهی و آیین‌نامه‌ای به ترتیب مربوط به مقادیر محاسبه شده توسط آیین‌نامه CEN 2000 و ACI 363 می‌باشد.

جدول ۱۱. مقایسه بین مقاومت خمشی به دست آمده از آزمایش و روابط آیین‌نامه‌ای برای الیاف پلی‌پروپیلن

۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	۰	درصد الیاف	اندیس
۳/۶۶	۳/۶۰	۳/۵۵	۳/۴۷	۳/۴۲	مقاومت خمشی آزمایشگاهی (MPa)	$(f_r)_{exp}$
۶۳/۵۶	۶۳/۱۳	۶۱/۶۹	۶۰/۷۹	۵۹/۷۷	مقاومت فشاری (MPa)	f'_c
۵/۲۶	۵/۲۴	۵/۱۷	۵/۱۵	۵/۱۰	مقاومت خمشی محاسبه شده مطابق نشریه (MPa) ۷۳۱	$(f_r)_{731}$
۴/۹۴	۴/۹۳	۸۶۴	۴/۸۳	۴/۷۹	ACI Committee 318, 2002	$(f_r)_{ACI-2002} = 0.62\sqrt{f'_c}$
۴/۱۲	۴/۱۱	۴/۰۵	۴/۰۳	۴/۰۰	ACI Committee 318, 2005	$(f_r)_{ACI-2005} = 0.517\sqrt{f'_c}$
۷/۴۹	۷/۴۷	۷/۳۷	۷/۳۳	۷/۲۷	ACI Committee 363	$(f_r)_{ACI-363} = 0.94\sqrt{f'_c}$
۵/۴۵	۵/۴۲	۵/۳۲	۵/۲۹	۵/۲۳	European code (CEN, 2002)	$(f_r)_{CEN} = 0.342(f'_c)^{\frac{2}{3}}$
۴/۹۹	۴/۹۷	۴/۹۰	۴/۸۸	۴/۸۴	Indian code (IS, 2000)	$(f_r)_{IS} = 0.626\sqrt{f'_c}$



شکل ۱۳. مقایسه مقاومت خمشی ناشی از نتایج آزمایشگاهی و روابط آیین‌نامه‌ای برای نمونه‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن

۵. نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته، و با در نظر گرفتن این موضوع که این نتایج منحصراً مربوط به مواد و روش‌های به‌کار گرفته شده در این پژوهش می‌باشد و برای اظهار نظر قطعی نیاز به آزمایش‌های بیشتری در این زمینه وجود دارد، موارد زیر به‌عنوان نتایج این تحقیق ذکر می‌شود:

✓ الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن در افزایش مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم مورد استفاده تأثیر چندانی ندارند و این تأثیر برای درصدهای مختلفی از این الیاف‌ها و همچنین ترکیب آن‌ها در حدود ۱۰٪ به‌دست آمده است.

✓ الیاف فولادی در افزایش مقاومت کششی کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم بسیار مؤثر می‌باشد و تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به آن به مراتب کمتر است، که علت آن می‌تواند سختی و مقاومت کششی بسیار بیشتر الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن باشد.

✓ الیاف پلی‌پروپیلن در بهبود پارامتر جذب آب کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم نسبت به الیاف فولادی بهتر عمل کرده و نمونه‌های حاوی این الیاف

درصد جذب آب کمتری دارند. علت این امر می‌تواند قابلیت پُرکنندگی بیشتر الیاف پلی‌پروپیلن و مسدود کردن راه ارتباطی حفره‌ها با یکدیگر توسط این الیاف باشد. این ویژگی الیاف پلی‌پروپیلن باعث شده است که جذب آب نمونه‌های حاوی الیاف ترکیبی نیز نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی کاهش یابد. ✓ الیاف فولادی در بهبود رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های سیمانی عملکرد بسیار مطلوب و بهتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن دارد. به‌صورتی که ۱٪ الیاف فولادی موجب افزایش ۸۴٪ و ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن موجب افزایش ۳۷٪ جذب انرژی نمونه‌ها شده است.

✓ افزودن الیاف فولادی در لایه تحتانی نمونه‌های خمشی دولایه موجب بهبود قابل ملاحظه رفتار خمشی کامپوزیت‌های سیمانی شد. در صورتی که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر چندانی در بهبود رفتار خمشی کامپوزیت‌های سیمانی نداشت. بهترین عملکرد خمشی را نمونه حاوی ۱٪ الیاف فولادی در لایه تحتانی و ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن در لایه فوقانی از خود نشان داد. مقایسه نتایج آزمایش خمش با روابط

آیین‌نامه‌ای نشان داد که نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی درصد‌های بیشتر الیاف فولادی اختلاف زیادی با نتایج آیین‌نامه‌ای داشت. در صورتی که نتایج سایر نمونه‌ها دارای انطباق بیشتری با روابط آیین‌نامه‌ای می‌باشد.

۶. مراجع

استاندارد ملی ایران. ۱۳۹۲. "مقاومت خمشی بتن با استفاده از تیر ساده با بارگذاری نقطه‌ای در مرکز-روش آزمون". شماره ۱۷۷۳۱، چاپ اول.

برنجیان ج.، فروهر، ن. و قاسمی، ن. ۱۳۹۳. "بررسی تأثیر الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر خواص سخت شده‌ی بتن حاوی میکروسیلیس". اولین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه‌های عمرانی، گرگان.

دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها. ۱۳۹۶. نشریه شماره ۷۳۱.

طالبی، ع. و ارجمندی نژاد، م. ۱۳۹۴. "بررسی توجیه فنی و اقتصادی و شرایط اقلیمی در کاربرد رویه‌های بتنی در کشور". اولین کنفرانس ملی رویه‌های بتنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

AASHTO. 2003. "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO T177. 1997. "Standard method of test for flexural strength of concrete using simple beam with center-point loading". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO T22. 2003. "Guide for compressive strength of cylindrical concrete specimens". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO T26. 2003. "Guide for quality of water to be used in concrete". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

Abdollahnejad, Z., Mastali, M. and Dalvand, A. 2017 "A comparative study on the effects of recycled glass fiber on drying shrinkage rate and mechanical properties of the self-compacting mortar and fly ash/slag geopolymer mortar". J. Mater. Civ. Eng. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943.5533.0001918](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943.5533.0001918).

Abraham, S. M. and Ransinchung, G. 2018. "Strength and permeation characteristics of cement mortar with reclaimed asphalt pavement aggregates". Constr. Build. Mater., 167: 700-706.

ACI Committee 318. 2000. "Building code requirements for structural concrete". American Concrete Institute Committee 318, Farmington Hills, MI.

ACI Committee 544.1R-96. 2002. "State-of-the-art report on fiber reinforced concrete". ACI Committee, C 544.

ACI Committee 363. 2010. "Report on high-strength concrete". American Concrete Institute Committee 363, Farmington Hills, MI.

Aslani, F. and Nejadi, S. 2013. "Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression". J. Compos., Part B: Eng., 53: 121-133.

ASTM C642. 2013. "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete". ASTM International, West Conshohocken.

ASTM C293/C293M-16. 2016. "Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with center-point loading)". ASTM International, West Conshohocken.

ASTM C496/C496M-17. 2017. "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens". ASTM International, West Conshohocken.

ASTM C39/C39M-18. 2018. "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens". ASTM International, West Conshohocken.

Atis, C. D. 2002. "High volume fly ash abrasion resistant concrete". J. Mater. Civil Eng., 14(3): 274-277.

Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G. and Swamy, R. N. 2010. "Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties". Compos., Part B: Eng., 41: 17-24.

Bentsen, R. A., Vavrik, W. A., Roesler, J. R. and Gillen, S. L. 2013. "Ternary blend concrete with reclaimed asphalt pavement as an aggregate in two-lift concrete pavement". Proc. of the 2013 International Concrete Sustainability Conference, pp. 6-8.

- Choi, S. Y., Park, J. S. and Jung, W. T. 2011. "A study on the shrinkage control of fiber reinforced concrete pavement". *Proc. Eng.*, 14: 2815-2822.
- Delatte, N. 2008. "Concrete Pavement Design, Construction and Performance". Taylor and Francis.
- Delwar, M., Fahmy, M. and Taha, R. 1997. "Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete". *ACI Mater. J.*, 94(3): 27-40.
- El-Dieb, A. 2009. "Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultrahigh- strength self-compacting concrete incorporating steel fibers". *J. Mater. Des.*, 30: 4286-4292.
- Faw, T. F. and Paramasivam, P. 1990. "Thin steel fibre cement mortar overlay for concrete pavement". *Cement Concrete Compos.*, 12(3): 175-184.
- Fuente-Alonso, J. A., Ortega-López, V., Skaf, M., Aragon, A. and San-Jose, J. T. 2017. "Performance of fiber-reinforced EAF slag concrete for use in pavements". *Constr. Build. Mater.*, 149(9): 629-638.
- Hansen, K. R. and Copeland, A. 2017. "Annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage". Report IS-138, National Asphalt Pavement Association, Lanham, MD.
- Huang, Y. J., Shen, Y. and Qin, X. C. 2010. "The idea of green highway quantitative research". *J. Highway Transport. Res. Dev.*, 10: 296-299.
- Khaloo, A., Molaei Raisi, E., Hosseini, P. and Tahsiri, H. 2017. "Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers". *J. Constr. Build. Mater.*, 51: 179-186.
- Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S. and Koh, K. T. 2011a. "Comparative flexural behaviour of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers". *Constr. Build. Mater.*, 25(4): 4144-4155.
- Kim, J. S., Cho, C. H., Cho, C. G., Yoo, M. H., Cho, Y. H. and Lee, S. J. 2011b. "A study on the fire resistance performance of high strength fiber reinforcement concrete". The 9th International Symposium on High Performance Concrete- Design, Verification and Utilization, Rotorua, New Zealand.
- Krayushkina, K., Khymerik, T., Skrypchenko, O., Moshkovskiy, I. and Pershakov, V. 2017. "Investigation of fiber concrete for road and bridge building". *Proc. Eng.*, 187: 620-627.
- Mastali, M. and Dalvand, A. 2016. "Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete". *Constr. Build. Mater.*, 125: 196-209.
- Mastali, M., Dalvand, A. and Sattarifard, A. R. 2016. "The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers". *J. Clean. Prod.*, 124: 312-324.
- Merritt, D. K., Frank, B. M., Burns, N. H. and Schindler, A. K. 2012. "The feasibility of using precast concrete panels to expedite highway pavement construction". Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin.
- Naiki, T. R., Singh, S. S. and Hossain, M. M. 1994. "Abrasion resistance of concrete as influenced by inclusion of fly ash". *Cement Concrete Res.*, 24(2): 303-312.
- Nobili, A., Lanzoni, L. and Tarantino, A. M. 2013. "Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement". *Constr. Build. Mater.*, 47: 888-895.
- Okay, F. and Engin, S. 2012. "Torsional behaviour of steel fiber reinforced concrete beams". *Constr. Build. Mater.*, 28(1): 269-275.
- Oman, M. S. and Grothaus, A. J. 2012. "Use of street pave for design of concrete pavements for cities and counties in Minnesota". Minnesota Department of Transportation, pp. 1-56.
- Sattarifard, A. R., Sharbatdar, M. K. and Dalvand, A. 2014. "RC connections strengthened with FRP sheets using grooves on the surface". *Int. J. Civ. Eng.*, 13(4): 55-71.
- Song, P. S., Hwang, S. and Sheu, B. C. 2005. "Strength properties of nylon-and-polypropylene-fiber reinforced concretes". *Cement Concrete Res.*, 35: 1546-1550.
- Tompkins, D., Khazanovich, L., Darter, M. I. and Fleischer, W. 2009. "Design and construction of sustainable pavements: Austrian and German two-layer concrete pavements". *Transport. Res. Rec.*, 2098: 75-85.
- Vibhuti, R. B. and Radhakrishna, A. N. 2013. "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete for pavements". *Int. J. Res. Eng. Tech.*, Nov., pp. 244-247.