

تاثیر استفاده از الیاف‌های پلیمری میکرو و ماکرو بر خواص مکانیکی و دوام روسازی بتن غلتکی

علی‌اکبر رمضانیان پور^۱، جعفر سبحانی^{۲*}، علیرضا پورخورشیدی^۲، محمدمهدی لطفی^۱

^۱ دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

^۲ بخش فناوری بتن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۶-۰۶

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۲۲

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

کلمات کلیدی:

بتن غلتکی

الیاف پلیمری

مشخصات مکانیکی

طاقات

دوام بتن.

خلاصه: تفاوت اساسی بتن غلتکی و بتن معمولی دانه‌بندی متراکم بتن غلتکی می‌باشد که باعث می‌گردد که حجم خمیر سیمان در این بتن نسبت به بتن معمولی کمتر باشد. افزودن الیاف میکرو و ماکرو به رویه‌های بتنی نشان داده‌است که ظرفیت خمشی، مقاومت خستگی و توزیع ترک‌خوردگی را بهبود می‌دهند و به انتقال بار از میان ریز ترک‌های داخلی بتن کمک شایانی می‌نمایند. در این مطالعه آزمایشگاهی، مزایای استفاده از الیاف میکرو و ماکرو پلیمری برای روسازی‌های بتن غلتکی با تعیین مشخصات مکانیکی و دوام مورد بررسی قرار گرفته‌است. بدین منظور ۳ طرح مخلوط بتن غلتکی با استفاده از الیاف‌های ماکرو (پلی‌الفین) و میکرو (پلی‌پروپیلن) در مقدار مصرف یک و دو کیلوگرم در مترمکعب ساخته و آزمایش‌های مکانیکی مقاومت فشاری و مقاومت خمشی (مدول گسیختگی و طاقت) و دوام پوسته‌شدن سطح در حضور نمک‌های یخ‌زدا و نفوذپذیری تحت فشار آب انجام گردید. نتایج آزمایش خمش نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که در مخلوط‌های بتن الیافی ماکرو (پلی‌الفین) و مخلوط بتن الیافی میکرو (پلی‌پروپیلن)، الیاف ماکرو (پلی‌الفین) نقش مؤثرتری را در افزایش مدول گسیختگی نسبت به الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) ایفا نموده‌است. هم‌چنین نتایج نشان داد که استفاده از الیاف (پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن) می‌تواند نفوذپذیری را تا حدود ۲۰ درصد کاهش دهد. به‌علاوه، مشخص شد که با استفاده از الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) می‌توان مقاومت سطح در برابر پوسته‌شدن در حضور نمک‌های یخ‌زدا را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید اما برخلاف الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن)، الیاف ماکرو (پلی‌الفین) باعث کاهش مقاومت پوسته‌شدگی شده‌است.

۱- مقدمه

روسازی‌ها می‌توانند در بسیاری از راه‌های اصلی و فرعی کشور مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از دغدغه‌های اصلی محققین در خصوص رویه‌های بتنی، مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن و نیز مقاومت در برابر نمک‌های یخ‌زدا بوده‌است. نتایج رویه‌های ساخته‌شده نشان می‌دهد که ساخت رویه‌های بتنی مقاوم در برابر یخبندان نیز امکان‌پذیر است. برای پیشگیری از خرابی رویه در مقابل چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن و نیز نمک‌های یخ‌زدا، تحقیقات متعددی انجام پذیرفته و یا در حال انجام است [۱].

یکی از انواع روسازی‌های بتنی، رویه‌های بتن غلتکی (RCCP)

استفاده از رویه‌های بتنی در کشورهای دیگر بسیار متداول است، اما در کشور ما علی‌رغم وجود مصالح کافی، به دلیل ارزان بودن قیر طی سال‌های پیش، معرفی نشدن گزینه‌های مناسب جایگزین و در مواردی نبود دانش فنی - اجرایی و تجهیزات مورد نیاز، اجرا و ساخت این نوع روسازی‌ها متداول نشده‌است. روسازی‌های بتنی، در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته به‌طور موفقیت‌آمیزی اجرا گردیده‌است و در حال حاضر نیز تحقیقات وسیعی در این رابطه در حال انجام است. با توجه به وضعیت تولید سیمان در کشور و شرایط اقلیمی، این نوع

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sobhani@bhrc.ac.ir



است که از انواع بتن‌های بدون اسلامپ می‌باشد که برای کاربردهایی هم‌چون سدسازی و یا راه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۳]. در این رابطه، استفاده از انواع الیاف جهت بهبود خواص مکانیکی و دوام این نوع روسازی‌ها مورد توجه می‌باشد. الیاف‌هایی نظیر الیاف پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن (الیاف سینتتیک) می‌توانند تاثیر مثبتی در رفتار مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و به‌ویژه جذب انرژی داشته‌باشند [۴ و ۵].

علاوه بر این استفاده از الیاف در کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی بتن تاثیرگذار است. استفاده از الیاف در بتن‌های معمولی در برنامه‌های تحقیقاتی مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و اغلب تاثیر این نوع الیاف بر بتن معمولی مشخص شده‌است، لیکن اثر الیاف بر خواص بتن غلتکی به‌صورت جامع مورد تحلیل قرار نگرفته و تجربه‌ی زیادی در این زمینه وجود ندارد. در ادامه به نتایج برخی از تحقیقات صورت گرفته اشاره می‌شود.

شایان ذکر است، این نوع الیاف به روش اکستروژن که عبارت است از خروج با فشار یک محلول غلیظ از سوراخ‌های کوچکی به نام رشته ساز تولید می‌گردند که رشته‌های یکسره نیمه جامد پلیمری را ایجاد می‌کنند. در مراحل اولیه پلیمر تشکیل‌دهنده الیاف به صورت جامد است که برای اکستروژن باید مایع گردد. این کار معمولاً اگر پلیمر ترموپلاستیک سنتتیک (که نرم بوده و با حرارت ذوب می‌شوند) باشد با ذوب کردن انجام می‌پذیرد.

رمضانیان‌پور و رشید داداش [۶]، تاثیر افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن در بتن الیافی هیبریدی معمولی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ۳ مقدار مصرف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن با ۱ درصد حجمی الیاف فولاد صنعتی جایگزین شده‌است. نهایتاً خواص مکانیکی نمونه‌های بتن الیافی هیبریدی فولاد صنعتی و پلی‌پروپیلن شامل طاقت و مقاومت خمشی با یکدیگر و بتن شاهد مقایسه شده‌است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده آن است که هر چه الیاف فولاد صنعتی با درصد بیشتری از الیاف پلی‌پروپیلن جایگزین شود، میزان مقاومت خمشی و جذب انرژی کاهش می‌یابد.

متوسلیان [۷]، تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن را در کاهش ترک‌های بتن خود تراکم مورد ارزیابی قرار داده‌است. بتن خود تراکم به دلیل طرح اختلاط خاص آن باعث ایجاد ترک در مراحل اولیه بتن‌ریزی

می‌گردد که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌طور قابل توجهی از ایجاد و گسترش ترک جلوگیری به عمل آورد. در این تحقیق مقادیرهای مختلف الیاف شامل ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی در بتن استفاده و سپس نمونه‌های ساخته‌شده در معرض سه نوع شرایط محیطی قرار گرفته‌اند. در نهایت بررسی‌ها نشان داده که بتن الیافی با میزان ۰/۳ درصد الیاف، بهترین تاثیر را در کاهش ترک‌های سطحی داشته‌است.

قدوسی و همکاران [۸]، به بررسی جمع‌شدگی خمیری و خشک‌شدگی انواع ملات های تعمیری جهت استفاده در ترمیم رویه‌های بتنی فرودگاهی پرداختند. آن‌ها برای ساخت ۶ ملات در آزمایشگاه، انواع افزودنی‌ها شامل میکروسیلیس، متاکائولن، الیاف پلی‌پروپیلن، افزودنی ضد جمع‌شدگی و افزودنی شیمیایی اصلاح‌کننده لزجت استفاده کردند. در آزمایش جمع‌شدگی خمیری مشاهده کردند زودترین زمان پیدایش اولین ترک مربوط به ملات‌های حاوی میکروسیلیس بوده و در هر سه نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلنی هیچ ترکی مشاهده نشد. در پایان به این نکته اشاره شد که الیاف پلی‌پروپیلنی نقش عمده‌ای در کاهش استعداد ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری داشته‌است. به‌طوریکه در مخلوط‌های حاوی الیاف و لاتکس استاین‌بوتادین در شرایط هوای گرم هیچ‌گونه ترکی مشاهده نشده‌است.

فروغی و همکاران [۹]، به بررسی اثر الیاف میکروپلی‌پروپیلن با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر و مقادیرهای مصرف ۰/۳۵، ۰/۷ و ۱/۴ کیلوگرم در مترمکعب بر روی مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن غلتکی پرداختند. آن‌ها اعلام کردند که با افزودن ۱/۴ کیلوگرم الیاف ۶ میلی‌متری بیشترین مقدار مقاومت فشاری حاصل می‌شود و علت آن را پخش بهتر این الیاف‌ها در مقایسه با الیاف‌های ۱۲ میلی‌متری اعلام کرد، در مورد تاثیر طول الیاف در مقاومت کششی بتن غلتکی، به دلیل ضخامت بزرگ‌تر ملات بین سنگ‌دانه و ناحیه انتقال، الیاف با طول بلندتر بهتر نیروها را بین سنگ‌دانه منتقل می‌کند و با کاهش ریزترک در ناحیه انتقال، مقاومت بهتری می‌دهند و مقدار بهینه الیاف برای طول الیاف ۶ میلی‌متری ۰/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب و برای طول ۱۲ میلی‌متری مقدار ۰/۷ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست‌آمده است، و در هر حالت تقریباً ۲۰ درصد مقاومت کششی را افزایش می‌دهند.

ماکرو به میزان ۳، ۶ و ۹ کیلوگرم در مترمکعب و الیاف میکرو به میزان ۰/۶ کیلوگرم در مترمکعب استفاده شده است. نتایج آزمایش نشان دهنده این موضوع است که مقاومت کششی، فشاری و خمشی بتن الیافی هیبریدی در همه ترکیبها در مقایسه با بتن بدون الیاف بهتر بوده است.

در این تحقیق، تاثیر استفاده از دو نوع الیاف پلیمری شامل الیافهای ماکرو (پلی الفین) و میکرو (پلی پروپیلن) بر مشخصات مکانیکی بتنهای غلتکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی (مدول گسیختگی و جذب انرژی) و همچنین دوام این نوع بتنها شامل دوام در برابر پوسته شدن سطح در حضور نمکهای یخزدا و نفوذپذیری تحت فشار آب مورد بررسی قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۸، Smirnova و همکاران، اثر الیاف پلی الفین را بر روی خواص مقاومتی و شکل پذیری رویه های بتنی بررسی نمودند. در این مطالعه، تغییرات نسبت آب به سیمان ۰/۳۱ تا ۰/۵۵ بر روی خواص بتن غلتکی الیافی مورد مطالعه قرار گرفته و همچنین نشان داده شد که الیاف نقش موثری بر بهبود عملکرد این رویه ها ایفا می نماید [۱۳].

۲- مواد و مصالح و طرح مخلوط

سنگدانه های مصرفی در این تحقیق، در دو بخش ریزدانه و درشت دانه شامل: ۷۵ میکرومتر تا ۴/۷۵ میلی متر و ۴/۷۵ تا ۱۹ میلی متر می باشند. مشخصات این سنگدانه ها در جدول شماره ۱ ذکر شده است. نمودار دانه بندی بهینه براساس توصیه PCA و منحنی فولر- تامپسون با توان ۰/۴۵ در شکل ۱ ارائه شده است [۱۴]. سیمان پرتلند مصرفی در این پروژه از نوع ۱ و محصول کارخانه سیمان دلیجان بوده که مشخصات مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۲ ارائه شده است. آب مصرفی در ساخت نمونه ها از آب شرب شهری تهیه شده است. در این مطالعه دو نوع الیاف شامل الیاف میکرو

Perry [۱۰] به مقایسه الیاف پلی پروپیلن با الیاف فولادی برای مسلح کردن کف های بتنی پرداخت. دلیل اصلی وی در انجام این پژوهش این بود که سایش سطح کف سازیها (پیاده روها و عبور وسایل نقلیه) موجب بیرون زدگی و در معرض دید قرار گرفتن الیاف فولادی می گردد که این امر می تواند بسیار خطرناک باشد. او در انجام این پژوهش از یک دال کوچک مخصوص کف سازی بتنی حاوی الیاف پلی پروپیلن تک رشته ای به طول ۵۰ میلی متر و به مقدار ۶/۹ کیلوگرم در مترمکعب و الیاف فولادی با انتهای قلاب دار به طول ۶۰ میلی متر و به مقدار ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب استفاده نمود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف فولادی و پلی پروپیلن به ترتیب ۵۳ و ۷۸ درصد افزایش یافته است. همچنین مقاومت خارجی در برابر سایش در صورت استفاده از الیاف فولادی، ۲۰ درصد و الیاف پلی پروپیلن، ۴۱ درصد افزایش یافته است. بنابراین وی نتیجه گرفت که الیاف پلی پروپیلن برای مسلح نمودن کف سازیها از لحاظ سایش و کنترل ترک به مراتب بهتر از الیاف فولادی عمل می کند.

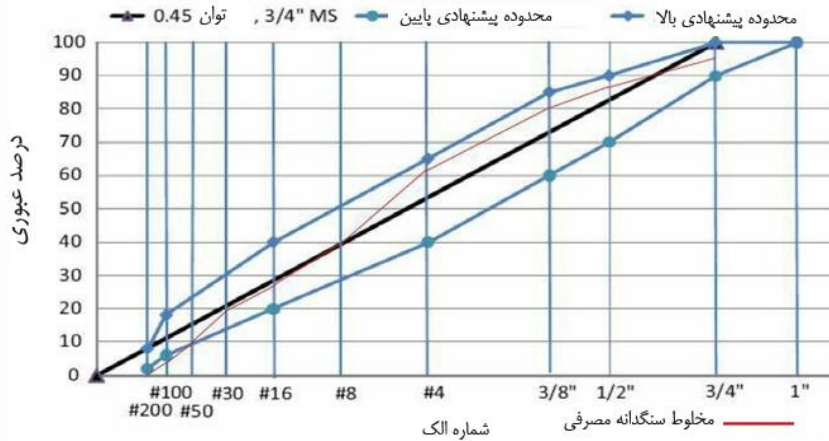
Banitha و همکاران [۴] به بررسی مدول گسیختگی و طاقت بتن های الیافی پرداختند. در این پژوهش دو سری آزمایش صورت پذیرفت. در آزمایش اول از دو نوع الیاف پلی پروپیلن یکی ریشه ای و دیگری تک رشته ای با مقاومت بالا استفاده گردید. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که الیاف تک رشته ای طاقت بتن الیافی را به مراتب بهتر از الیاف ریشه ای افزایش می دهد. در آزمایش دوم آن ها با بررسی الیاف فولادی قلاب دار و موجدار به این نتیجه رسیدند که الیاف فولادی قلاب دار طاقت بهتری نسبت به الیاف فولادی موجدار در بتن الیافی از خود نشان می دهد.

در پژوهشی Hsieh و همکاران [۱۲]، در سال ۲۰۰۸ با استفاده از ترکیب دو نوع الیاف پلی پروپیلن، ماکرو و میکرو، به بررسی خواص مکانیکی بتن هیبریدی معمولی پرداختند. در این پژوهش از الیاف

جدول ۱. مشخصات سنگدانه های مصرفی

Table 1. Specifications of aggregates

سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه (mm)	مدول نرمی	چگالی در حالت اشباع با سطح خشک (gr/cm ³)	جذب آب (%)
ماسه	۴/۷۵	۳/۲۷	۲/۵۵	۳/۱۱
شن	۱۹	-	۲/۶۲	۲/۶۵



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه مصرفی

Fig. 1. Aggregate grading curve

جدول ۲. مشخصات سیمان مصرفی
Table 2. Cement specifications

خواص	مشخصات	مقدار مجاز	نتیجه آزمون
مکانیکی (MPa)	مقاومت فشاری ۳ روزه	--	۲۴/۷
	مقاومت فشاری ۷ روزه	--	۳۶/۱
	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	حداقل، ۴۲/۵	۵۲/۱
شیمیایی (%)	SiO ₂		۲۳/۱۹
	Al ₂ O ₃		۳/۵۶
	Fe ₂ O ₃		۳/۲۹
	CaO		۶۳/۰۷
	SO ₃		۱/۶۳۸
	MgO		۱/۳۱
	Na ₂ O	--	۰/۱۹
	K ₂ O		۰/۶۶
	C ₃ S		۴۷/۲۲
	C ₂ S		۳۰/۸۶
	C ₃ A		۳/۸۷
	C ₄ AF		۱۰/۰۱
	فیزیکی	سطح مخصوص به دست آمده از آزمایش بلین cm ² /gr	حداقل ۲۸۰۰
انساط در آزمایش اتوکلاو (درصد)		حداکثر ۰/۸	۰/۸۲
زمان گیرش اولیه به دست آمده از آزمایش با سوزن ویکات (دقیقه)		حداقل ۴۵	۱۲۰
زمان گیرش نهایی به دست آمده از آزمایش با سوزن ویکات (دقیقه)		حداکثر ۳۶۰	۲۲۰

نحوه اختلاط بدین ترتیب بود که ابتدا مواد خشک، شامل سنگدانه و سیمان به همراه بخشی از آب مخلوط جهت اختلاط اولیه و جذب آب سنگدانه‌ها در داخل مخلوط کن به مدت تقریباً ۳۰ تا ۶۰ ثانیه بهم زده شد. سپس با اضافه کردن الیاف و باقیمانده آب، کل مواد به مدت حدود ۲ دقیقه مخلوط گردید. شایان ذکر است، پس از ساخت

پلی پروپیلنی و ماکرو پلی الفین استفاده شده است، که مشخصات آن‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. جهت تعیین درصد‌های الیاف مصرفی پس از بررسی ادبیات فنی موضوع و راهنماهای موجود، مانند راهنمای طراحی و ساخت روسازی بتن غلتکی [۱ و ۲]، مقرر گردید که از مقدار مصرف ۳ کیلوگرم الیاف ماکرو در مترمکعب استفاده شود.

جدول ۳. مشخصات الیاف میکرو پلی پروپیلنی

Table 3. Specifications of micro-polypropylene fibers

مشخصه	ویژگی مواد	استاندارد ASTM D7508 [۱۷]
ساختمان شیمیایی	۱۰۰٪ پلی پروپیلنی	۱۰۰٪ پلی پروپیلنی
قطر مقطع (μm)	دایره‌ای (۲۰)	دایره‌ای (قطر ۲۰ تا ۲۰)
وزن مخصوص	۰/۹۱ گرم بر سانتی مترمکعب	۰/۹ تا ۰/۹۵ گرم بر سانتی مترمکعب
مدول الاستیسیته (GPa)	۳/۷	۳/۵ تا ۱۵
مقاومت کششی (MPa)	۲۵±۳۶۰	۲۰۰ تا ۷۶۰
طول (mm)	۱۲	۳ تا ۵۰
تعداد در کیلوگرم	>۱۰۰۰۰۰۰۰	--
نسبت طول به قطر	۶۰۰	--

جدول ۴. مشخصات الیاف ماکرو پلی الفین

Table 4. Specifications of macro-polyolefin fibers

مشخصه	ویژگی مواد	استاندارد ASTM D7508 [۱۷]
ساختمان شیمیایی	آلفین اصلاح شده	۸۵٪ پروپیلن و اتیلن
قطر مقطع (mm)	دایره‌ای (قطر ۰/۳)	دایره‌ای (بزرگتر از ۰/۳mm)
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۰/۹۱	۰/۹ تا ۰/۹۲
مدول الاستیسیته (GPa)	۷	۳/۵ تا ۱۵
مقاومت کششی (MPa)	۶۲۰	بزرگتر از ۳۴۴
طول (mm)	۵۸	۱۲ تا ۶۵
تعداد در کیلوگرم	۵۳۸۰۰	--
نسبت طول به قطر	۱۹۳	--

طرح اول و با توجه به ماهیت بتن غلتکی (بدون اسلامپ بودن) عملاً امکان تراکم با مقدار الیاف بیش از ۳ کیلوگرم در مترمکعب، بدون افزودنی‌های روان کننده میسر نبود، بنابراین تصمیم گرفته شد که از مقدار کمتر ۲ کیلوگرم در مترمکعب (معادل ۰/۲۲ درصد حجمی بتن) در این پژوهش استفاده شود (جدول ۵). در جدول ۶ درصد‌های پیشنهادی در ادبیات فنی براساس حداکثر اندازه سنگ‌دانه آورده شده است [۱۵ و ۱۶]. خاطر نشان می‌شود با توجه به استفاده از مواد اصلاح سطح در الیاف مورد استفاده، نیاز به هیچ‌گونه تمهیداتی برای

جلوگیری از تجمع و به هم پیوستن الیاف و توزیع آن‌ها در زمان اختلاط لازم نشده و مستقیماً این الیاف پس از تماس با آب مخلوط و عمل اختلاط به راحتی از هم باز می‌شوند.

۳- آزمون‌ها و روش‌ها

در این مطالعه، آزمایش‌های مکانیکی مقاومت فشاری [۱۸] و مقاومت خمشی [۱۹] و دوام در مقابل پوسته‌شدگی سطحی در حضور نمک‌های یخ‌زدا [۲۰] و نفوذپذیری تحت فشار آب [۲۱] بر روی

جدول ۵. نسبت‌های مخلوط بتن غلتکی شاهد و الیافی

Table 5. Mix proportion of reference and FRCC

شناسه	نوع الیاف	نسبت آب به سیمان	واحد وزن (kg/m^3)		
			سیمان	الیاف	آب
RF	شاهد	۰/۳۸	۳۵۰	۰	۱۳۲/۷
FC-PO2	الیاف ماکرو (پلی الفین)	۰/۳۸	۳۵۰	۲	۱۳۲/۷
FC-PP2	الیاف میکرو (پلی پروپیلن)	۰/۳۸	۳۵۰	۲	۱۳۲/۷

جدول ۶. درصدهای پیشنهادی الیاف براساس حداکثر اندازه سنگدانه [۱۵ و ۱۶]
Table 6. Proposed percentages of fibers based on maximum aggregate size [15 and 16]

حداکثر اندازه سنگدانه‌ها			پارامترهای طرح مخلوط
۳۱/۵ میلی‌متر	۲۰ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	
			مقدار الیاف (درصد حجمی)
۰/۱-۰/۳	۰/۲-۰/۶	۰/۵-۱/۰	الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن)
۰/۳-۰/۶	۰/۱-۰/۳	۰/۱-۰/۳	الیاف ماکرو (پلی‌الفین)
۳۵۰-۴۳۰	۳۸۰-۵۰۰	۴۰۰-۵۲۰	عیار مواد سیمانی، kg/m ³
۰/۳-۰/۵۰	۰/۳-۰/۴۵	۰/۳-۰/۴	نسبت آب به مواد سیمانی
۴۰-۵۰	۴۵-۶۰	۵۰-۶۸	درصد ریزدانه به کل سنگدانه
۳-۵	۴-۶	۴-۸	درصد هوا

افزایش مقاومت ترک‌خوردگی یا دوخت و دوز ترک‌های به‌وجودآمده در بتن شوند که این موضوع می‌تواند به افزایش مقاومت فشاری کمک کند. البته لازمی این موضوع استفاده از مقدارهای مصرف کافی می‌باشد (البته باید توجه شود که در مقدار مصرف‌های بالا از پدیده‌ی توپی‌شدن جلوگیری شود) [۲۲]. در رابطه با الیاف ماکرو (پلی‌الفین) می‌توان چنان اظهار داشت که این الیاف به دلیل داشتن مدول الاستیسیته بالا (در مقایسه با الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن)) و بافت سطحی زبری که دارد، باعث مقداری افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد می‌شود و زمانی که در مقدار زیاد استفاده می‌شود، عملکردی مشابه الیاف فولادی دارد بنابراین ممکن است بتوانند مقدار بیشتری از فشار را تحمل کنند و با انسجام بهتری که به ماتریس بتن غلتکی می‌بخشند باعث افزایش مقاومت فشاری شوند.

۲-۴ مقاومت خمشی

۱-۲-۴ مدول گسیختگی

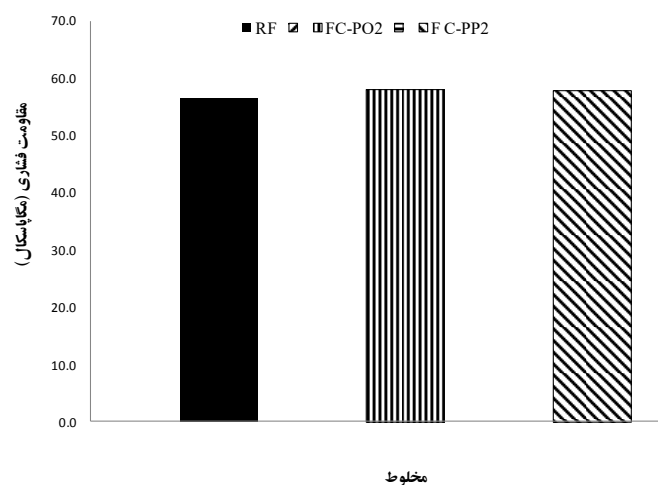
در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب تصاویری از نمونه مقاومت خمشی آماده بارگذاری و پس از بارگذاری را مشاهده می‌کنید. نتایج آزمایش خمشی جهت تعیین مدول گسیختگی در شکل ۵ ارائه شده‌است. نتایج حاکی از آن است که الیاف‌های میکرو (پلی‌پروپیلن) به دلیل طول کوتاه و مدول الاستیسیته پایین نتوانسته‌اند تغییری در مقاومت خمشی ایجاد کنند و بهبودی نسبت به نمونه‌ی شاهد حاصل نشده‌است، ضمناً مشاهده می‌شود الیاف ماکرو (پلی‌الفین) در مقایسه با الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) نقش مؤثرتری را در افزایش مدول گسیختگی داشته‌است. علت این امر

نمونه‌های تهیه‌شده به ترتیب مطابق با استانداردهای EN 12390-3، EN 12390-8 و ASTM C 672، ASTM C 1018 انجام گردید.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقاومت فشاری

نتایج میانگین آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز، برای ۳ طرح مخلوط ساخته‌شده در شکل ۲ ارائه شده‌است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که در هر دو نوع الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) و ماکرو (پلی‌الفین) در مقدارهای مصرف ۲ کیلوگرم (۰/۲۲ درصد حجمی) با افزایش ناچیز مقاومت فشاری روبرو هستیم. در رابطه با الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن) می‌توان چنین بیان کرد که این الیاف‌ها به دلیل تعداد بسیار بالا و نحوه‌ی جهت‌گیری در بتن می‌توانند تمرکز تنش در نوک ترک‌ها را کاهش دهند، بنابراین باعث کاهش ترک‌خوردگی و



شکل ۲. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی الیافی و شاهد

Fig. 2. Compressive strength of specimens



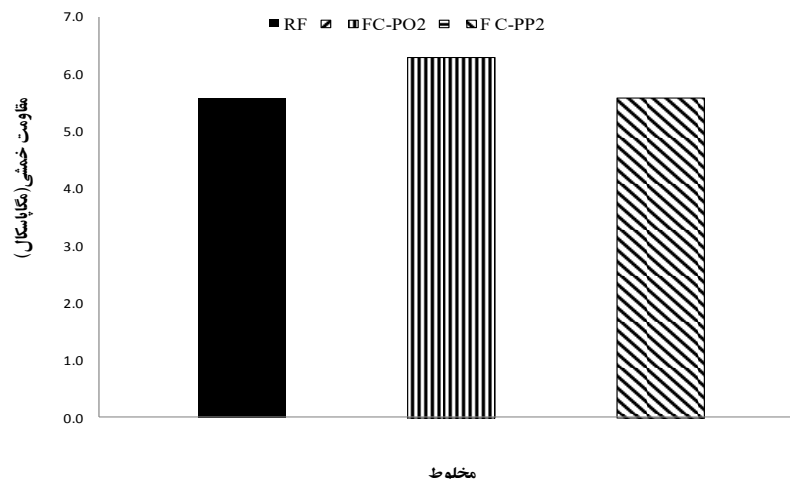
شکل ۴. آزمون تیر بتنی پس از بارگذاری جهت تعیین ظرفیت خمشی و طاقت

Fig. 4. Concrete beam test after loading to determine flexural capacity and toughness



شکل ۳. دستگاه تعیین طاقت خمشی آزمون بتن الیافی

Fig. 3. Flexural strength determination equipment



شکل ۵. مقاومت خمشی نمونه‌های بتن غلتکی الیافی و شاهد

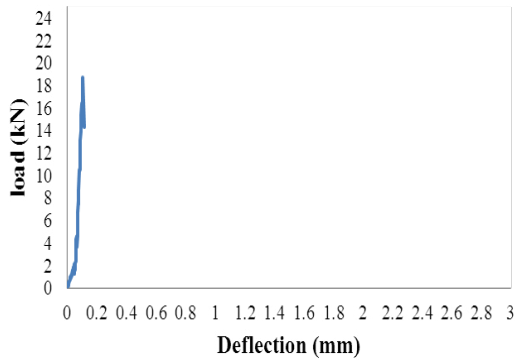
Fig. 5. Flexural strength of specimens

از نوع شکست ترد می‌باشد که علت آن عدم وجود و یا حجم کم الیاف و کاربرد الیاف پلی‌پروپیلنی میکرو می‌باشد. پس از پیدایش اولین ترک افت ناگهانی مقاومت خمشی رخ می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی آن است که پس از ایجاد اولین ترک و هنگام گسترش ترک‌ها و تبدیل ترک‌های کوچک به ترک‌های بزرگ، الیاف پلی‌پروپیلنی توانایی کنترل ترک‌ها را (به دلیل مقاومت کششی و مدول الاستیسیته کم) نداشته و باربری نمونه از بین می‌رود. همان‌طور که در نمودار شکل ۶-ج مشاهده می‌شود با استفاده از الیاف ماکرو (پلی‌الفین) در

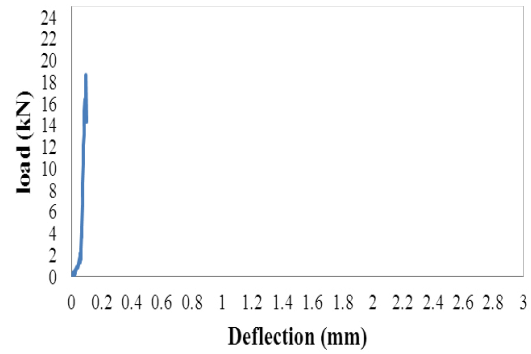
مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بیشتر الیاف ماکرو (پلی‌الفین) نسبت به الیاف میکرو (پلی‌پروپیلنی) (تقریباً ۲ برابر) می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، مقاومت کششی و مدول الیاف، علاوه بر طول الیاف عامل مؤثر بر میزان مدول گسیختگی می‌باشد.

۲-۲-۴ طاقت

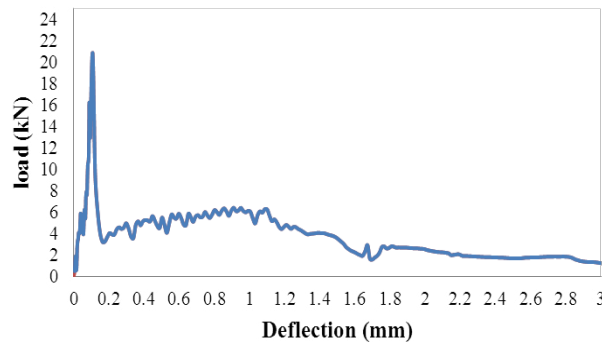
همان‌طور که در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب مشاهده می‌گردد، رفتار بتن غلتکی نمونه شاهد و الیافی مسلح به الیاف میکرو (پلی‌پروپیلن)



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۶. الف) نمودار بار-تغییر مکان، الف- نمونه شاهد (RF)، ب) بتن الیافی حاوی ۲ کیلوگرم (۰/۲۲ درصد حجمی) الیاف میکرو (پلی پروپیلن) در مترمکعب (FC-PP۲) و ج) بتن الیافی حاوی ۲ کیلوگرم (۰/۲۲ درصد حجمی) الیاف ماکرو (پلی الفین) در مترمکعب (FC-PO۲)

Fig. 6. load-displacement diagram, a- control sample (RF) , b -fiber concrete containing 2 kg (0.22% by volume) micro fibers (FC-PP2) and c- mixture containing 2 kg (0.22% by volume) macro fibers (FC-PO2)

پلی الفین بر ترک‌های بزرگ پل زده و مانع از رشد و گسترش آنها شده‌است بدین ترتیب مشاهده می‌شود رفتار بتن الیافی پلی الفین از نوع کرنش نرم شونده می‌باشد.

در جدول ۷ میزان اندیس‌های طاقت بتن الیافی مسلح به الیاف پلی پروپیلنی و پلی الفینی و شاهد به روش ASTM C 1018 آورده شده‌است.

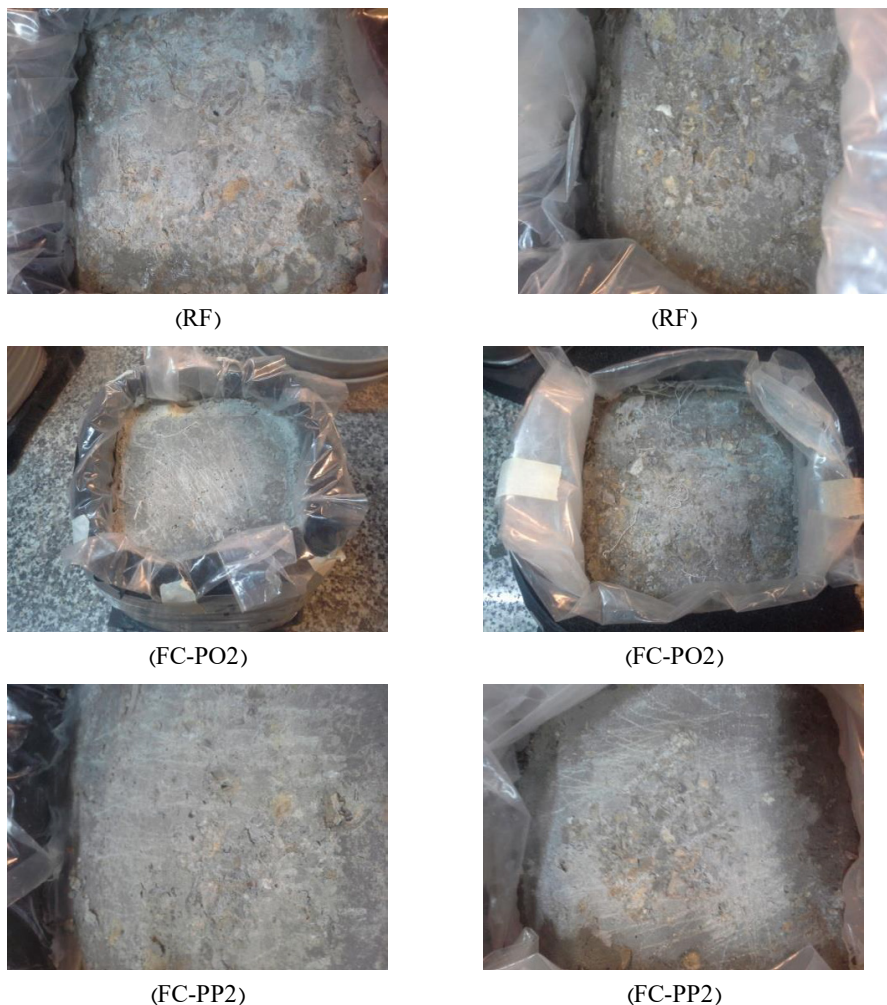
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷، ملاحظه می‌گردد استفاده از الیاف میکرو پلی پروپیلنی تأثیری بر مقاومت پسماند نمونه‌ها نداشته‌است، لیکن استفاده از الیاف ماکرو پلی الفینی در محدوده مصرفی این مطالعه باعث رشد قابل ملاحظه‌ای در شاخص‌های طاقت در اندیس‌های I۵، I۱۰ و I۲۰ شده‌است. این بدان معنی است که استفاده از این نوع الیاف امکان جذب انرژی را بعد از رفتار خطی و حتی بعد از بروز اولین ترک تا محدوده انهدام کامل، میسر می‌سازد.

نمونه‌های بتن الیافی سطح زیر نمودار پس از ایجاد اولین ترک و افت ناگهانی مجدد افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار بار- تغییر مکان مشخص می‌شود، پس از ایجاد اولین ترک افت مقاومت خمشی رخ می‌دهد، پس از ایجاد این افت ناگهانی در نمودار، یک‌روند افزایش مقاومت دیده می‌شود که علت آن ایفای نقش الیاف ماکروی پلی الفین می‌باشد. در واقع هنگام تبدیل ریزترک‌ها به ترک‌های بزرگ، الیاف

جدول ۷. اندیس طاقت خمشی نمونه‌های بتن الیافی میکرو پلی پروپیلنی، ماکرو پلی الفینی و شاهد

Table 7. Flexural strength index of micro- polypropylene and macro-polyolefin fibers fiber concrete samples

ASTM C 1018			استاندارد
I20	I10	I5	نام مخلوط
۱	۱	۱	RF
۱	۱	۱	FC-PP2
۷/۳۳	۳/۹۸	۲/۳۵	FC-PO2



شکل ۷. وضعیت سطحی نمونه‌ها بعد از آزمون پوسته‌شدن سطحی در حضور نمک NaCl

Fig. 7. Surface scaling in the presence of NaCl salt

در شکل ۷ عکس‌های مربوط به هرکدام از ۳ طرح ساخته‌شده به‌طور جداگانه آورده شده‌است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۸ و تصاویر آسیب‌های نمونه‌ها در چرخه‌های یخ زدن و آب شدن در حضور نمک یخ‌زدا،

۳-۴- آزمایش پوسته‌شدن سطح در حضور نمک‌های یخ‌زدا
نتایج آزمایش پوسته‌شدن سطح در حضور نمک‌های یخ‌زدا پس از ۵۰ سیکل ذوب و یخ، برای ۳ طرح مخلوط ساخته‌شده در جدول ۸ آورده شده‌است.

جدول ۸. نتایج آزمایش پوسته‌شدن سطح برای ۳ طرح مخلوط
Table 8. Amount of surface scaling results for 3 mixtures

پوسته‌شدن سطح در حضور نمک‌های یخ‌زدا			
درجه‌بندی براساس استاندارد ASTM C 672	سطح‌شدگی (درصد)	عمق پوسته‌شدگی (میلی‌متر)	طرح اختلاط
۴	۵۰	۵	RF
۵	۹۰	۵/۸	
۵	۹۵	۷/۷	FC-PO2
-	-	-	
۱	۱۰	۱/۴	FC-PP2
۱	۱۰	۳/۴	

استفاده از الیاف کاهش می‌یابد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که الیاف میکرو (پلی پروپیلن) و ماکرو (پلی الفین) در مقدار مصرف ۲ کیلوگرم (۰/۲۲ درصد حجمی) در مترمکعب می‌تواند نفوذپذیری بتن غلتکی را به میزان قابل توجهی (تا حدود ۲۰ درصد) کاهش دهد. علت بروز این کاهش، برقراری پل بین ریزترک‌ها و خلل و فرج موجود در خمیر سیمان و بهبود عملکرد بتن می‌باشد. با توجه به این عملکردها، الیاف می‌تواند نفوذپذیری بتن را تا حد مطلوبی بهبود بخشد و بدین ترتیب دوام آن را افزایش دهد.

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات صورت گرفته و با در نظر گرفتن این مطلب که این نتایج منحصرًا مربوط به مواد و روش‌های به کار رفته در این پروژه آزمایشگاهی بوده و در بسیاری موارد جهت اظهار نظر قطعی نیاز به برنامه آزمایشگاهی گسترده‌تری وجود دارد، موارد زیر قابل استنتاج و نتیجه‌گیری است:

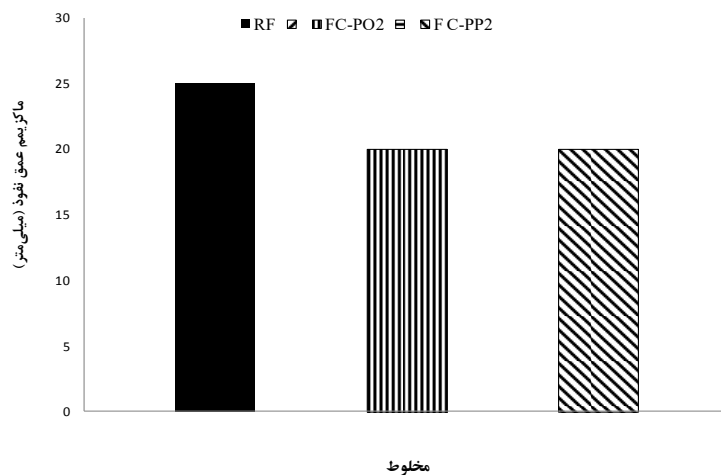
استفاده از الیاف برای افزایش مقاومت فشاری گزینه‌ی مناسبی نیست.

نتایج آزمایش خمش نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که در مخلوط‌های بتن الیافی ماکرو (پلی الفین) و میکرو (پلی پروپیلن)، الیاف ماکرو (پلی الفین) نقش مؤثرتری را در افزایش مدول گسیختگی نسبت به الیاف میکرو (پلی پروپیلن) ایفا نموده‌است. در واقع دو فاکتور مؤثر بر میزان مدول گسیختگی، تنش کششی و طول الیاف تواما می‌باشد.

به نظر می‌رسد الیاف‌های میکرو (پلی پروپیلن) دارای ناحیه انتقال مناسب‌تری بین الیاف و خمیر سیمان نسبت به نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف ماکرو هستند و به خوبی در مخلوط بتن غلتکی پخش شده‌اند و همگنی مخلوط را از بین نبرده‌اند. با وجود خلل و فرج ایجاد شده، این خلل و فرج به حدی زیاد و بزرگ نبوده‌اند که با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و بتوانند تاثیر منفی جدی بر روی نفوذپذیری سطح بگذارند. از آنجا که عملکرد الیاف میکرو در کاهش نفوذپذیری غالب به اثر تخلخل ایجاد شده به دلیل حضور الیاف و کاهش اندک کارایی بود شاهد عملکرد بهتر این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط شاهد هستیم. الیاف‌های ماکرو (پلی الفین) به دلیل اندازه بزرگ‌تر (نسبت به الیاف‌های میکرو) هم ناحیه انتقال ضعیف‌تری به وجود می‌آوردند و هم همگنی و کارایی مخلوط را کاهش می‌دهند و به دلیل همین کاهش کارایی پرداخت سطح به خوبی نمی‌تواند انجام شود که این موضوع به نوبه‌ی خود می‌تواند بر ریزساختار لایه سطحی که کنترل‌کننده‌ی پوسته شدن سطح است، تاثیرگذار باشد و در هنگام تراکم تخلخل ایجاد شده در نمونه هم بیشتر خواهد بود. از طرفی الیاف‌هایی که مماس با سطح بوده‌اند و یا از سطح بیرون زده‌اند نواحی مستعدی برای نفوذ محلول یخ‌زدا به داخل مخلوط ایجاد می‌کنند.

۴-۴- آزمایش نفوذپذیری تحت فشار آب

نتایج آزمایش نفوذپذیری تحت فشار آب در سن ۲۸ روز، برای ۳ طرح مخلوط ساخته شده در شکل ۸ ارائه شده‌است. با مشاهده نتایج آزمایش درمی‌یابیم که به طور کلی نفوذپذیری آزمون‌های بتنی با



شکل ۸. نفوذپذیری نمونه‌های بتن غلتکی

Fig. 8. Permeability of roller concrete specimens

- Materials, 159(20) (2018) 517-529.
- [6] P. Rashid Dadash, Effect of natural pozzolans on Properties of fibrous concrete and its application in shotcrete, M.Sc. Thesis, Amirkabir University of Technology, IRAN, Tehran 2011. [in Persian]
- [7] M. Motusalian, The effect of propylene fibers on cracks caused by shrinkage in self-compacting concrete, the first International Conference on Drinking Water Storage Tanks, IRAN, Rasht, 2011. [in Persian]
- [8] P. Ghoddosii, A.A. Shirzadi Javid, Shrinkage of mortars containing repair additives for the repair of concrete structures, First national conference of concrete pavements, Tarbiat Modares University, IRAN, Tehran, 2015. [in Persian]
- [9] A. Foroughi Asl, W. Naderi Zar Naghi, Improved properties mechanical roller compacted concrete using polymer fibers, 6th conference annual national concrete, Iran, Tehran, 2014. [in Persian]
- [10] B. Perry, Reinforcing external pavements with both large and small synthetic fibers, concrete, 37(8) (2003) 46-47.
- [11] J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler, A.N. Amirkhanian, Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers, Construction and Building Materials, 135(15) (2017) 440-446.
- [12] M. Hsie, C.H. Tua, P.S. Songb, Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete, Materials Science and Engineering, 494(1) (2008) 153-157.
- [13] O. Smirnova, A. Kharitonov, Y. Belentsov, Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 6(4) (2019) 407-417.
- [14] Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements, Portland Cement Association. Publication IS009. Skokie, IL: PCA (2004).
- [15] Guidelines for design and construction of

با استفاده از الیاف میکرو (پلی پروپیلن) می‌توان مقاومت سطح در برابر پوسته‌شدن در حضور نمک‌های یخ‌زدا را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید اما برخلاف الیاف میکرو (پلی پروپیلن)، الیاف ماکرو (پلی‌الفین) باعث ضعف سطح شده که از دلایل آن می‌توان به افت کارایی (عدم پرداخت خوب سطح) و افزایش تخلخل در هنگام تراکم اشاره کرد.

استفاده از الیاف (پلی‌الفین و پلی پروپیلن) می‌تواند نفوذپذیری را تا حدود ۲۰ درصد کاهش دهد.

نتایج آزمون‌های مکانیکی و دوام نشان می‌دهد که بهبود خواص مکانیکی نمی‌تواند متضمن دوام این نوع روسازی‌ها تلقی گردد. با توجه به نتایج برای دستیابی به عملکرد بهینه، استفاده از ترکیب دو نوع الیاف (میکرو و ماکرو) با مطالعات گسترده‌تر توصیه می‌گردد.

۶- تشکر و قدردانی

مقاله ارائه‌شده با حمایت مادی و معنوی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی صورت گرفته‌است.

مراجع

- [1] ACI 325.10R. State of the-art report on roller compacted concrete pavement. American Concrete Institute (ACI); 1995.
- [2] Guide to the design and implementation of roller concrete pavements, Ministry of Roads and Urban Development, Transportation Research Institute, , Journal No. 354, 2009. [in Persian]
- [3] Instructions of quality control of rolled compacted concrete pavements, Road, housing and urban development research center, , Second edition, 2015. [in Persian]
- [4] N. Banthia, R. Gupta, Hybrid fiber reinforced concrete: fiber synergy in high strength matrices, RILEM, Materials and Structures, 37 (274) (2004) 707-716.
- [5] H. Rooholamini, A.M. Hassani, M.R. Aliha, Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology, Construction and Building

- [19] ASTM C 1018, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), (1997), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [20] ASTM C 672/C 672M, Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, (2003), ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [21] EN 12390-8, Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure, (2009) British Standards.
- [22] P. Berkowskia, M. Kazberukb, Effect of Fiber on the Concrete Resistance to Surface Scaling Due to Cyclic Freezing and Thawing, *Procedia Engineering*, 11 (2015) 121-127.
- fiber reinforced concrete pavements, *Roads Congress*, First Revision, Kama Koti Marg Sector-6, R. K. Puram, New Dehli, 110(22), 20-30, Aug, (2013).
- [16] Polypropylene Fibers In Portland Cement Concrete Pavements, US Department of the Army Waterways Experiment Station Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, 92(9) (1993) 18-36.
- [17] ASTM D7508/D7508M, Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete, (2010) ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [18] EN 12390-3, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, (2009) British Standards.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.A. Ramezaniapour, J. Sobhani, A.R. Pourkhorshidi, M. Lotfi, *Comparison of the effects of micro and macro polymer fiber on the mechanical and durability of roller-compacted concrete pavements*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(4) (2020) 797-808.

DOI: [10.22060/ceej.2019.14895.5774](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.14895.5774)

