

مقایسه تاثیر الیاف مصنوعی میکرو و ماکرو بر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار با در نظر گرفتن مقاومت خمشی پسماند

علمی - پژوهشی

ابوالفضل حسینی*، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
سید جواد وزیری کنگ علیائی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمد رضا حاجی زاده، دانش آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hassani@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

صفحه ۳۲۴-۳۰۷

چکیده

افزودن الیاف با خصوصیات فیزیکی و مقاومتی متفاوت، تأثیرات متفاوتی بر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار در هنگام گسیختگی و همچنین بر مقاومت پس از ترک خوردگی روسازی دارد. این تحقیق، به بررسی اثر مجزا و مقایسه ای الیاف میکرو و ماکروی مصنوعی بر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار، با در نظر گرفتن مقاومت خمشی پسماند روسازی می‌پردازد. بدین منظور، اثر افزودن دو نوع الیاف ماکرو و یک نوع الیاف میکرو در مقادیر مصرف ۲، ۱ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن، مقاومت خمشی و عملکرد خمشی پس از ترک خوردگی روسازی بتنی بررسی گردید. نتایج نشان داد که الیاف میکرو در تمامی مقادیر مصرف، کمترین تأثیر را بر خصوصیات مقاومتی روسازی نسبت به الیاف ماکرو دارد. همچنین افزودن الیاف ماکرو، تأثیر محسوسی بر مقاومت فشاری نداشته، اما مقاومت کششی دو نیم شدن، مقاوم خمشی و مقاومت خمشی پسماند روسازی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. اثر الیاف ماکرو بر بهبود مقاومت کششی و مدول گسیختگی روسازی، در مقادیر مصرف بالاتر از ۲ کیلوگرم بر متر مکعب رخ داده، اما بیشترین افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل روسازی با مصرف الیاف در بازه ۱ تا ۲ کیلوگرم بر متر مکعب اتفاق می‌افتد و با افزودن بیشتر الیاف ماکرو، روند رشد افزایشی مقاومت خمشی پسماند، کاهش می‌یابد. دیده شد که الیاف ماکرو بیشترین تأثیر را بر مقاومت خمشی و مقاومت خمشی پسماند روسازی دارد. همچنین، عملکرد الیاف ماکروی در هم تابیده و برجسته ی پیوسته در تمامی مقادیر مصرف، نزدیک به هم است.

واژه‌های کلیدی: الیاف مصنوعی میکرو و ماکرو، مقایسه الیاف، روسازی بتنی درزدار، خصوصیات مقاومتی، مقاومت خمشی پسماند

۱- مقدمه

(Tarantino 2013). یکی از انواع متداول روسازی‌های بتنی، روسازی‌های بتنی درزدار ساده بوده که از احداث دال‌های بتنی غیر مسلح بر روی سطح خاک بستر و یا سطح اساس‌های تثبیتی یا دانه ای، ساخته می‌شود (Mapa, Gunaratne, and Riding 2020; Salameh and Tsai 2020; Vijay, Li, and GangaRao 2020). وجه تمایز اصلی این روسازی با دیگر روسازی‌های بتنی متداول مانند روسازی‌های بتنی درزدار مسلح و مسلح پیوسته، استفاده

روسازی‌های ساخته شده از بتن سیمانی نسبت به روسازی‌های آسفالتی از دوام و مقاومت بیشتری برخوردار بوده و همچنین نیاز کمتری به عملیات تعمیر و نگهداری دارند. حساسیت روسازی‌های بتنی به خرابی‌های متداول روسازی‌های آسفالتی، مانند خرابی شیار شدگی، کمتر بوده که باعث اضمحلال کندتر روسازی در طول عمر خدمت دهی خود می‌شود (Delatte 2014; Nobili, Lanzoni, and

مختلف مورد استفاده، الیاف مصنوعی بر پایه پلی اولفین / پلی پروپیلن، به دلیل طیف وسیع مشخصات الیاف (که بیشتر شامل مدول، مقاومت و سطح آن می‌شود) و قیمت پایین، مورد توجه زیادی قرار گرفته است (Bertelsen, Ottosen, and Fischer 2020). این الیاف از لحاظ خصوصیات فنی و شکل ظاهری در دو دسته شامل الیاف میکرو و الیاف ماکرو جای می‌گیرند. استفاده از الیاف میکرو بیشتر در مقادیر مصرف پایین و اغلب جهت کنترل و کاهش ترک خوردگی‌های زود هنگام در روسازی (مانند ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری)، صورت می‌گیرد (Banthia and Gupta 2006; Ma et al. 2004; Olivier et al. 2018; Pelisser et al. 2010; Sadiqu Islam and Gupta 2016). با این وجود، بهبود مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی این نوع الیاف نیز دیده شده است (Hesami, Salehi Hikouei, and Emadi 2016). در مقابل، الیاف ماکروی سازه‌ای در مقادیر مصرف بالاتر و جهت بهبود خصوصیات مقاومتی، افزایش طاقت و ظرفیت سازه‌ای روسازی، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Isla et al. 2015; Suksawang et al. 2020).

بررسی اثر الیاف مختلف بر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی، مورد توجه محققان بوده است. لاهوسیک و همکاران (LaHucik et al. 2017) اثر الیاف ماکروی مصنوعی پلی پروپیلن و فلزی را بر خصوصیات مکانیکی روسازی‌های بتنی غلتکی بررسی کرده و مشاهده کردند که افزودن این الیاف باعث افزایش مقاومت خمشی روسازی غلتکی نشده اما، مقاومت خمشی پسماند آن را به طور چشمگیری بهبود بخشید. در این تحقیق، تنها اثر الیاف ماکرو مصنوعی بررسی شده و تاثیر الیاف میکرو بر خصوصیات مکانیکی روسازی بتنی در نظر گرفته نشده بود. خان و همکاران (Khan and Ali 2018) به بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف حاصل از موی انسان و الیاف موجی پلی پروپیلن جهت استفاده در جاده، پرداختند. دیده شد که افزودن این الیاف باعث افزایش مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی دو نیم شدن شده و همچنین عملکرد روسازی به دلیل افزایش سختی ناشی از افزودن الیاف، بهبود یافت. در مقابل، روح الامینی و همکاران (Rooholamini, Hassani, and Aliha 2018) اثر افزودن یک نوع الیاف ماکرو مصنوعی پلی پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی روسازی‌های بتنی غلتکی را ارزیابی کرده و بیان کردند که

از درزهای انقباضی در فواصل مشخص به جای استفاده از میلگردهای مسلح کننده، جهت کنترل ترک های ناشی از تغییرات دما و رطوبت، در دال روسازی بوده و جهت انتقال بهتر بار بین دو دال مجاور، از میلگردهای انتقال بار (داول) استفاده می‌شود (Al-Humeidawi and Mandal 2014; Kim, Kyo, and Ho 2020; Manjunath et al. 2019; Mu, Mack, and Rodden 2018; Shi et al. 2019). در نتیجه این موضوع باعث کاهش هزینه و زمان اجرای روسازی ناشی از استفاده از میلگرد می‌گردد. بهبود خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار که بیشتر شامل مقاومت کششی، مقاومت خمشی و سختی خمشی می‌گردد، می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت باربری روسازی شده و ضخامت طراحی روسازی بتنی درزدار ساده را کاهش دهد (Ali, Qureshi, and Khan 2020; Altoubat et al. 2008). همچنین دوام روسازی‌های بتنی درزدار ساده با بهبود خصوصیات مقاومتی بتن، افزایش می‌یابد (Haghejad and Modarres 2020; Ortega-López et al. 2018; Salemi and Behfarnia 2013). از این جهت، بهبود خصوصیات مقاومتی در روسازی‌های بتنی درزدار ساده، حائز اهمیت می‌باشد. در دهه‌های اخیر، استفاده از الیاف مختلف در روسازی‌های بتنی جهت بهبود خصوصیات مقاومتی روسازی بتنی، مورد توجه زیاد محققان بوده است.

(Ali, Qureshi, and Khan 2020; Chen, Cen, and Cui 2018; Huang et al. 2013, 2020; Madhkan, Azizkhani, and Toriki Harchegani 2012; Yang, Shin, and Yoo 2017; Zhang, Xu, and Lin 2013; Zhou et al. 2020). استفاده از الیاف در روسازی‌های بتنی درزدار ساده که منجر به ساخت روسازی‌های بتنی درزدار ایافی می‌گردد، می‌تواند باعث بهبود خصوصیات مقاومتی روسازی شود (Ahmadi et al. 2017; Chan et al. 2019). افزودن الیاف می‌تواند سختی ماتریس سیمان، مقاومت کششی، دوام و مقاومت در برابر ضربه را به طور چشمگیری افزایش دهد. الیاف، با عمل پل زدن در محل‌های ترک خوردگی، باعث کنترل رشد و گسترش این ترک‌ها شده و در نتیجه مقاومت پسماند بتن را افزایش می‌دهد. مقاومت خمشی پسماند روسازی‌های بتنی جهت مقاومت در برابر رشد ترک‌های ایجاد شده در دال، بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Lanzoni, Nobili, and Tarantino 2012; Silva, Coelho, and Bordado 2013). در بین الیاف

پلی اولفین/پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف، بر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت خمشی پسماند، می‌پردازد.

۲- روش و مصالح

هدف این تحقیق، بررسی اثر الیاف میکرو و ماکرو مصنوعی بر پایه‌ی پلی اولفین/ پلی پروپیلن بر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی با در نظر گرفتن مقاومت پسماند است. بدین منظور پس از تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی درزدار مطابق با ضوابط و الزامات ذکر شده در ضابطه‌ی ۷۳۱ (Manual 731 n.d.)، یک نوع الیاف میکرو تک رشته‌ای، دو نوع الیاف ماکرو شامل الیاف ماکرو در هم تابیده و الیاف ماکرو برجسته‌ی پیوسته، در مقادیر مصرف ۲،۱ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، به بتن افزوده گردید. پس از بررسی اسلامپ طرح‌های اختلاط مورد بررسی و مطابقت با مقدار اسلامپ مجاز روسازی‌های بتنی، آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن، مقاومت خمشی بر روی مخلوط‌های بتن شاهد و الیافی انجام شد. اثر الیاف بر مقاومت خمشی پسماند بتن، بر اساس آزمایش تعیین عملکرد خمشی بتن الیافی و با استفاده از نسبت مقاومت خمشی معادل هر طرح اختلاط، بررسی می‌گردد.

۲-۱- مصالح

الیاف مورد استفاده در این تحقیق، الیاف مصنوعی بر پایه‌ی پلی اولفین/ پلی پروپیلن شامل الیاف میکرو رشته‌ای، ماکرو در هم تابیده تولید شرکت FORTA و ماکرو برجسته‌ی پیوسته تولید شرکت BARCHIP مطابق با استاندارد ASTM C1116 و ASTM D7508 است. شکل ظاهری الیاف مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ دیده می‌شود. مشخصات مکانیکی و فنی این الیاف در جدول ۱ آورده شده است. سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان تهران، با وزن مخصوص ۳۱۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. مشخصات شیمیایی این سیمان، ارایه شده توسط کارخانه سیمان تهران، در جدول ۲ دیده می‌شود.

افزودن این الیاف تاثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری ندارد. همچنین دیده شد که تاثیر این الیاف بر انرژی شکست روسازی بیشتر از تاثیر آن بر مقاومت خمشی بود. علی و همکاران (Ali, Qureshi, and Kurda 2020)، مزایای اقتصادی و زیست محیطی مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف فولادی، شیشه و میکرو پلی پروپیلن جهت استفاده در روسازی‌های بتنی درزدار را با در نظر گرفتن اثر مقاومت خمشی پسماند مخلوط‌های بتنی، بررسی کردند. نتایج کار آنان حاکی از آن بود که با وجود اثر چشمگیر بهتر الیاف فلزی نسبت به الیاف شیشه و میکرو پلی پروپیلن بر مشخصات مکانیکی، این الیاف نیز اثرات خوبی در بهبود مشخصات مکانیکی بتن نسبت به بتن شاهد و به دنبال در کاهش هزینه‌ها و میزان انتشار کربن ساخت روسازی‌های بتنی درزدار از خود نشان دادند. میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن استفاده شده در این تحقیق (۵ و ۹ کیلوگرم بر متر مکعب) می‌تواند نیاز به اصلاحاتی در طرح اختلاط بتن روسازی بتنی در شرایط واقعی، ناشی از اثرات این مقدار الیاف بر مشخصات بتن تازه (مانند کارایی) را به همراه داشته باشد.

با بررسی پیشینه‌ی پژوهش، دیده می‌شود که الیاف مصنوعی پلی پروپیلن، تاثیرات مثبتی بر خصوصیات مکانیکی روسازی‌های بتنی از خود نشان داده است. با این وجود مشاهده می‌شود که از یک طرف، اثر هر یک از الیاف پلی پروپیلن در ابعاد میکرو و ماکرو و مقادیر مصرف مختلف، بر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار، به طور کامل و واضح بررسی نشده، و از طرف دیگر، اختلاف‌هایی بین اثر این الیاف بر برخی از خصوصیات مقاومتی روسازی (مانند مقاومت فشاری) در نتایج تحقیقات بررسی شده، دیده می‌شود. اثر مقایسه‌ای الیاف پلی پروپیلن در ابعاد میکرو و ماکرو و در مقادیر مصرف مختلف در شرایط یکسان دیگر متغیرهای طرح اختلاط، بر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار نیز ارزیابی نگردیده است. بررسی و در نظر گرفتن مجموع این موارد می‌تواند منجر به قضاوت بهتر و مناسب‌تر، جهت استفاده از الیاف مصنوعی پلی پروپیلن و همچنین انتخاب الیاف و مقدار مصرف مناسب، جهت بهبود هر چه بیشتر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار گردد. بدین منظور تحقیق حاضر به بررسی اثر مجزا و مقایسه‌ای یک نوع الیاف میکرو و دو نوع الیاف ماکرو مصنوعی بر پایه‌ی



شکل ۱. شکل ظاهری الیاف مصنوعی پلی پروپیلن مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب از چپ به راست: الیاف میکرو تک رشته‌ای،

الیاف ماکرووی در هم تابیده (فورتا) و الیاف ماکرووی برجسته ی پیوسته (بارچپ)

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و فنی الیاف مورد استفاده

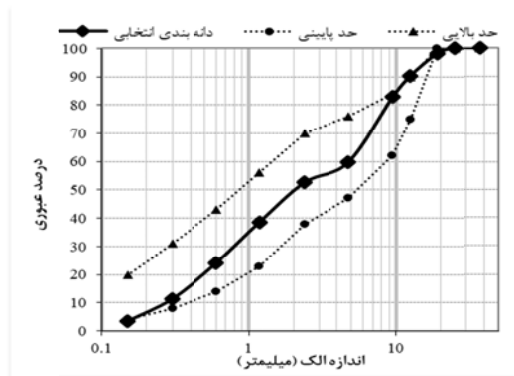
نوع الیاف	پ.پ-میکرو	فورتا-ماکرو	بارچپ-ماکرو
جنس الیاف	پلی پروپیلن خالص	پلی پروپیلن خالص	پلی پروپیلن خالص
شکل ظاهری	تک رشته‌ای	در هم تابیده	برجسته ی پیوسته
طول (میلی متر)	۱۲	۵۴	۴۸
قطر (میلی متر)	۰,۰۳	۰,۴	۰,۷
مقاومت در محیط اسید/قلیا	عالی	عالی	عالی
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۳۴۵	۶۹۳	۶۴۰
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	۳,۵	۶,۴	۱۲
جذب آب (درصد)	ندارد	ندارد	ندارد
وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	۰,۹۱	۰,۹۱	۰,۹۱

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق

اکسید	مقدار (درصد)	الزامات استاندارد ایران (۳۸۹)
SiO ₂	۲۱,۸۴	>۲۰
Al ₂ O ₃	۴,۵۶	۶>
Fe ₂ O ₃	۳,۵۲	۶>
CaO	۶۳,۰۱	-
MgO	۳,۶۰	۵>
SO ₃	۱,۷۵	۳>
Na ₂ O	۰,۱۸	-
K ₂ O	۰,۵۳	-

۱۲-۵ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۲,۵ و ۲,۵٪ و برای مصالح سنگی درشت دانه ۱۹-۱۲ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۲,۶ و ۲,۰٪ مطابق با استاندارد ASTM C127 است. شکل ۲ به ترتیب حدود دانه‌بندی مجاز و دانه‌بندی انتخابی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق، مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱ را نشان می‌دهد.

مصالح سنگی مورد استفاده از مصالح رودخانه‌ای بوده که شامل مصالح سنگی ریز دانه با اندازه‌ی ۵-۰ میلی‌متر، مصالح سنگی درشت دانه با اندازه‌ی ۱۲-۵ میلی‌متر و ۱۹-۱۲ میلی‌متر است. مصالحی سنگی ریز دارای چگالی نسبی، جذب آب و مدول نرمی به ترتیب به میزان ۲,۶، ۲,۹٪ و ۳,۵٪ مطابق با استانداردهای ASTM C128 و ASTM C136 می‌باشد. چگالی نسبی و جذب آب برای مصالح سنگی درشت دانه



شکل ۲. حدود دانه بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی

۲-۲- طرح اختلاط بتن روسازی بتنی در زردار

نسبت‌های اختلاط بتن روسازی در زردار مطابق با الزامات نشریه شماره ۷۳۱ (دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها) و به جهت برآورده کردن الزامات و معیارهای ذکر شده در آن، تعیین گردید. در جدول ۳، معیارهای در نظر گرفته در این تحقیق جهت تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی، دیده می‌شود.

جدول ۳. معیارهای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱

معیار	مقدار	روش انجام آزمایش
مقاومت فشاری (نمونه استوانه‌ای)	حداقل ۳۰	ASTM C39
مقاومت خمشی (به روش تیر ساده با بارگذاری در یک سوم دهانه) (مگا پاسکال)	حداقل ۴	ASTM C78
اسلامپ (میلی‌متر)	۷۰-۱۰	ASTM C143
عیار سیمان (کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب)	حداقل ۳۳۵	-
نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)	حداکثر ۰,۵۳	-

دلایل ذکر شده، این انتخاب صورت گرفته است. همچنین این مقدار، از حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی بتن روسازی بتنی (مندرج در جدول ۳) کمتر می‌باشد. میزان اسلامپ هدف مخلوط‌های بتنی شاهد و الیافی، به میزان 20 ± 60 میلیمتر انتخاب گردید. این موضوع باعث می‌شود تا تاثیر تغییرات میزان اسلامپ بتن بر تغییرات میزان هوای غیر عمدی و به دنبال آن، تغییرات خصوصیات مقاومتی مخلوط‌های بتنی، کاهش یابد. با توجه به میزان اسلامپ هدف و حداقل عیار سیمان بتن روسازی (مندرج در جدول ۳)، مقدار عیار سیمان به میزان ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تعیین گردید. تعیین مقدار

از آب آشامیدنی سیستم لوله کشی آزمایشگاه، جهت ساخت مخلوط‌های بتنی، استفاده گردید. ماده‌ی افزودنی مورد استفاده در این تحقیق، ماده‌ی افزودنی فوق روان کننده بر پایه‌ی پلی کربوکسیلات اثر است.

با توجه به حداقل مقاومت فشاری مجاز بتنی روسازی بتنی ذکر شده در جدول ۳، نسبت آب به سیمان ۰,۵ انتخاب گردید. این مقدار باعث اختلاط بهتر الیاف در مخلوط بتنی و ساخت راحت‌تر نمونه‌ها می‌گردد. از طرفی، به دلیل کاهش خصوصیات مقاومتی مخلوط بتنی در سنین اولیه، نسبت به مخلوط‌های با مقادیر نسبت آب به سیمان کمتر، ارزیابی اثر الیاف در کنترل و کاهش ترک خوردگی را بهتر می‌شود. با این وجود ممکن است که مقدار نسبت آب به سیمان در نظر گرفته شده با مقادیر نسبت آب به سیمان بتن روسازی در شرایط اجرایی فاصله داشته باشد، اما با توجه به

اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM C143، صورت گرفت. شکل ۳، ساخت و ارزیابی میزان اسلامپ مخلوط‌های بتنی جهت تعیین مقدار مصرف ماده‌ی فوق روان کننده، را نشان می‌دهد.

مصرف ماده ی فوق روان کننده جهت رسیدن به میزان اسلامپ هدف در طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی، با ساخت مخلوط‌های بتنی و افزودن ماده‌ی فوق روان کننده به مخلوط‌های بتنی به صورت آزمون و خطا، و ارزیابی مقدار



شکل ۳. ساخت و ارزیابی اسلامپ مخلوط‌های بتنی جهت تعیین میزان مصرف ماده افزودنی فوق روان کننده
جدول ۴. نسبت‌های وزنی طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق جهت ساخت یک متر مکعب بتن روسازی بتنی

نام طرح اختلاط	معرف طرح اختلاط	الیاف مورد استفاده	آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	سنگدانه ریز ۰-۵ (کیلوگرم بر متر مکعب)	سنگدانه درشت ۵-۱۲ (کیلوگرم بر متر مکعب)	سنگدانه درشت ۱۲-۱۹ (کیلوگرم بر متر مکعب)	فوق روان کننده (کیلوگرم بر متر مکعب)	الیاف (کیلوگرم بر متر مکعب)
شاهد	RC	-	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰,۵۰	۰
الیافی	FFC1	ماکرو - فورتا	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰,۷۲	۱
الیافی	FFC2	ماکرو - فورتا	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰,۹۵	۲
الیافی	FFC3	ماکرو - فورتا	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۱,۲۰	۳
الیافی	BFC1	ماکرو - بارچیپ	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰,۶۸	۱
الیافی	BFC2	ماکرو - بارچیپ	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰,۸۷	۲
الیافی	BFC3	ماکرو - بارچیپ	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۱,۰۰	۳
الیافی	PFC1	میکرو - پ.پ	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰,۵۲	۱
الیافی	PFC2	میکرو - پ.پ	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰,۵۸	۲
الیافی	PFC3	میکرو - پ.پ	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰,۷	۳

دقیقه و به مدت دو دقیقه ادامه یافت. سپس نیم دیگر آب اختلاط به همراه فوق روان کننده اضافه شده و اختلاط با سرعت یکسان و به مدت ۴ دقیقه ادامه یافت. در آخرین مرحله، الیاف به مخلوط بتنی اضافه شده و به جهت اختلاط بهتر و رسیدن به یک مخلوط همگن، عملیات اختلاط به مدت دو دقیقه با سرعت ۷۰ دور در دقیقه صورت گرفت. تا هنگام اتمام ساخت نمونه های مورد نظر در آزمایش، عملیات اختلاط با سرعت ۳۰ دور در دقیقه انجام گرفت.

بدین ترتیب، یک طرح اختلاط بتن شاهد و نه طرح اختلاط بتن الیافی، مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۴، نسبت های وزنی جهت ساخت یک متر مکعب بتن شاهد و الیافی در حالت اشباع با سطح خشک مصالح را نشان می‌دهد. جهت ساخت مخلوط‌های بتنی، ابتدا مصالح سنگی و سیمان به صورت خشک در یک مخلوط کن با سرعت ۳۰ دور در دقیقه و به مدت دو دقیقه اختلاط گردید. سپس نیمی از آب اختلاط، اضافه شده و عملیات اختلاط با سرعت ۵۰ دور در

۳-۲- آزمایش‌های تعیین خصوصیات مقاومتی روسازی

بتنی درزدار

در این تحقیق، خصوصیات مقاومتی روسازی بتنی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن، مقاومت خمشی و عملکرد خمشی برای هر طرح اختلاط بتن شاهد و الیافی با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی، تعیین گردید.

۳-۲-۱- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39 و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد 300×150 میلی‌متری انجام گرفت. نمونه‌های بتنی، پس از ساخت تا سن ۲۸ روزه، در حوضچه‌های مخصوص و مطابق با شرایط استاندارد، نگهداری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. از هر طرح اختلاط مورد نظر، تعداد سه نمونه‌ی استوانه‌ای ساخته و آزمایش شده و میانگین نتایج در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴، ساخت نمونه‌های استوانه‌ای جهت تعیین مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل ۴. ساخت نمونه‌های استوانه‌ای جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن مطابق با استاندارد ASTM C39

۳-۲-۲- آزمایش تعیین مقاومت کششی

سه نمونه از هر طرح اختلاط بتن، مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین نتایج مد نظر قرار گرفت. در شکل ۵، نمونه‌های استوانه‌ای ارزیابی مقاومت کششی دو نیم شدن بتن پس از شکست دیده می‌شود.

جهت تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های بتنی از آزمایش تعیین مقاومت کششی دو نیم شدن مطابق با استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 300×150 میلی‌متری، استفاده گردید. نمونه‌های بتنی سن ۲۸ روزه در شرایط استاندارد نگهداری شده و سپس آزمایش شدند. تعداد



شکل ۵. نمونه‌های استوانه‌ای ارزیابی مقاومت کششی دو نیم شدن مطابق با استاندارد ASTM C496 پس از شکست

۳-۳-۲- آزمایش تعیین مقاومت خمشی

آزمایش به ابعاد $150 \times 150 \times 500$ میلیمتر و با دهانه‌ی موثر (L) میلیمتر ۴۵۰ بوده و تا سن ۲۸ روزه، در شرایط استاندارد نگهداری شدند. مدول گسیختگی تیر بتنی مطابق با رابطه‌ی (۱) تعیین می‌گردد.

مقاومت خمشی طرح‌های اختلاط بتن مورد بررسی در این تحقیق، با استفاده از آزمایش تعیین مقاومت خمشی بتن با استفاده از بارگذاری تیر ساده در یک سوم دهانه، مطابق با استاندارد ASTM C78 تعیین گردید. تیرهای بتنی مورد

d متوسط عمق مقطع در صفحه‌ی شکست بر حسب میلیمتر می‌باشد. میانگین نتایج سه تیر بتنی از هر اختلاط در نظر گرفته شد. در شکل ۶، ساخت و آزمایش تیر بتنی جهت تعیین مقاومت خمشی بتن، مشاهده می‌شود.

$$MR = \frac{P.L}{b.d^2} \quad (1)$$

که در آن، P حداکثر مقدار بار وارد شده توسط دستگاه آزمایش بر حسب نیوتون، L طول دهانه‌ی نمونه، b متوسط عرض مقطع در صفحه‌ی شکست بر حسب میلیمتر و



شکل ۶. ساخت و آزمایش تیر های بتنی جهت تعیین مقاومت خمشی بتن مطابق با استاندارد ASTM C78

۲-۳-۴- آزمایش تعیین عملکرد خمشی پس از گسیختگی

گرفته و تغییر مکان متناظر با بار وارد شده، توسط سیستم بارگذاری ثبت می‌گردد. در شکل ۷ آزمایش تعیین عملکرد خمشی تیرهای بتنی دیده می‌شود. پس از رسیدن بار وارد شده به میزان حداکثر اولیه و ایجاد ترک در تیر بتنی، بارگذاری تا رسیدن به تغییر مکان خالص تیر بتنی به میزان ۱/۱۵۰ دهانه (۳ میلیمتر) ادامه یافته و میزان بار وارد شده در تغییر مکان‌های خالص ۰،۵، ۰،۷۵، ۱، ۱،۲۵ و ۳ میلیمتر ثبت می‌شود.

جهت بررسی عملکرد خمشی طرح‌های اختلاط بتن الیافی و تاثیر الیاف بر مقاومت خمشی پسماند مخلوط‌های بتن الیافی، از آزمایش تعیین عملکرد خمشی مطابق با استاندارد ASTM C1609 استفاده گردید. تیرهای بتنی جهت آزمایش، به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۵۰۰ میلیمتر و با دهانه‌ی موثر L میلیمتر ۴۵۰ و تا سن ۲۸ روزه، حوضچه‌های مخصوص، نگهداری گردید. در این آزمایش، تیرهای بتنی مورد بارگذاری خمشی قرار



شکل ۷. تیرهای بتنی در حال و پس از اتمام آزمایش تعیین عملکرد خمشی مطابق با استاندارد ASTM C1609

اول بر حسب مگاپاسکال، b متوسط عرض نمونه در صفحه‌ی شکست بر حسب میلیمتر و d متوسط عمق نمونه در صفحه‌ی شکست بر حسب میلیمتر می‌باشد. تعداد سه تیر بتنی از هر طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین نتایج، لحاظ گردید.

نسبت مقاومت خمشی معادل $(R_{e,3})$ هر تیر بتنی، مطابق با رابطه‌ی (۲)، تعیین می‌گردد، که در آن $R_{e,3}$ نسبت مقاومت خمشی معادل بر حسب درصد، T_{150}^d مساحت زیر نمودار بار- تغییر مکان خالص از مقدار ۰ تا مقدار ۱/۱۵۰ دهانه $(L/150)$ بر حسب نیوتن در میلیمتر، f_1 مقاومت نقطه‌ی اوج

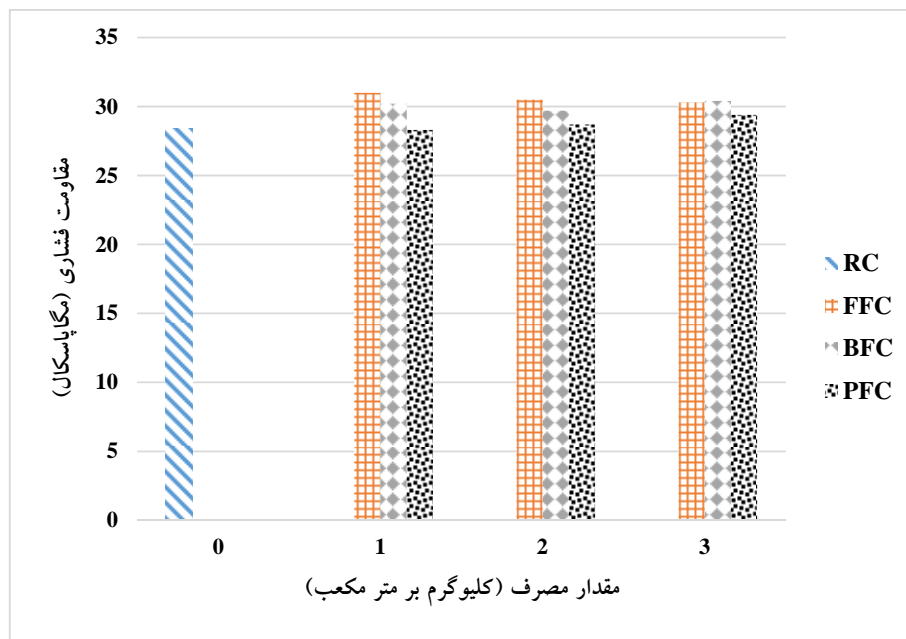
$$R_{e,3} = \frac{150T_{150}^d}{f_1.b.d^2} \quad (2)$$

۳- نتایج و بحث

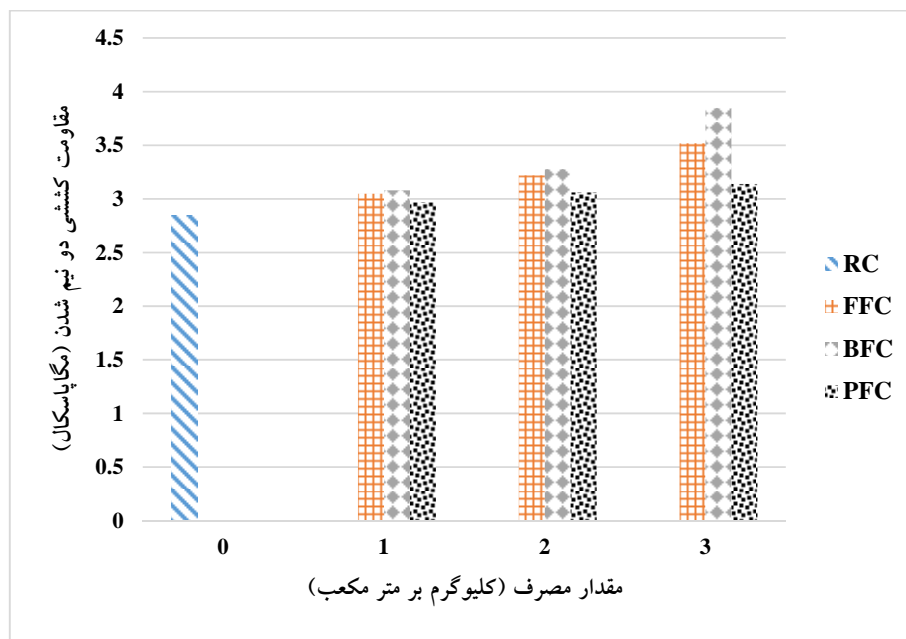
فشاری مجاز بتن روسازی بتنی که در جدول ۳ ذکر شده است (۲۵ مگاپاسکال)، بیشتر بوده و در نتیجه، طرح‌های اختلاط مورد بررسی، این معیار بتن روسازی بتنی را رعایت کرده‌اند. شکل ۹، نمودار مقاومت کششی دو نیم شدن روسازی‌های بتنی ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی، در مقادیر مصرف مختلف الیاف را نشان می‌دهد.

با توجه به این نمودار، دیده می‌شود که با افزودن الیاف، مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط بتن شاهد افزایش یافته است. الیاف در مخلوط بتنی، با افزایش جذب انرژی و انجام عمل پل زدن در محل‌های مستعد ترک خوردگی، باعث تحمل بیشتر مخلوط بتنی در برابر بارهای کششی غیر مستقیم شده و در نتیجه، حداکثر نیروی قابل تحمل قبل از گسیختگی کششی مخلوط بتنی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۹، دیده می‌شود که اثر الیاف ماکرو در افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن بتن از اثر الیاف میکرو بیشتر است. با افزودن الیاف میکرو به مقدار ۳ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت کششی مخلوط بتنی به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌یابد در حالی که افزودن الیاف ماکروی در هم تابیده و برجسته‌ی پیوسته به میزان ۲ کیلوگرم بر متر مکعب، باعث افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن بتن به میزان ۱۳ و ۱۵ درصد می‌گردد. این مورد می‌تواند به دلیل مقاومت کششی و مدول الاستیسته‌ی بیشتر الیاف ماکرو نسبت به الیاف میکرو باشد که باعث افزایش ظرفیت کششی مخلوط بتنی قبل از گسیختگی می‌گردد. این الیاف هنگامی که در محل گسیختگی کششی غیر مستقیم قرار گرفته، به دلیل خصوصیات مقاومتی بالاتر، باعث سختی بیشتری در ماتریس سیمان در گسیختگی شده و منجر به افزایش مقاومت کششی مخلوط بتنی می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو الیاف ماکروی بررسی شده، اثر چشمگیر تر این الیاف بر افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط بتنی شاهد، در مقادیر مصرف بالاتر (۲ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب) اتفاق می‌افتد که به دلیل تعداد بیشتر الیاف در افزایش ظرفیت کششی و جذب انرژی مقطع می‌گردد. همچنین دیده می‌شود اثرات الیاف ماکروی برجسته‌ی پیوسته بر مقاومت کششی دو نیم شدن از اثر الیاف ماکروی در هم تابیده، در مقدار مصرف ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، بیشتر بوده و اما اختلاف بین این دو چشمگیر نیست. این دو الیاف تاثیرات یکسانی نیز بر تغییرات مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط بتنی در مقادیر مصرف پایین‌تر دارند.

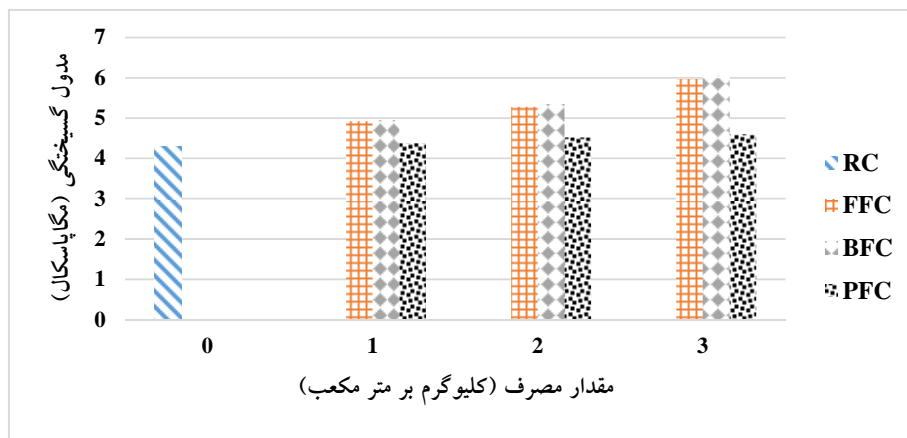
در این قسمت، اثر الیاف مصنوعی میکرو و ماکرو بر خصوصیات مقاومتی روسازی بتنی، با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن، مقاومت خمشی و آزمایش عملکرد خمشی بتن، تحلیل و بررسی می‌گردد. شکل ۸، نمودار میزان مقاومت فشاری روسازی بتنی ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی، در مقادیر مصرف مختلف الیاف را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، دیده می‌شود که افزودن الیاف میکرو و ماکرو در مقادیر مصرف مختلف، باعث تغییر چشمگیر مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی الیافی نسبت به مخلوط بتنی شاهد نمی‌شود به طوری که بیشترین تغییر به میزان ۹ درصد و در طرح اختلاط FFC با مقدار مصرف ۱ کیلوگرم بر متر مکعب رخ داده است. با افزودن الیاف به بتن، از یک طرف به دلیل تشکیل نواحی انتقال بین سطحی بیشتر در ماتریس سیمان، خصوصیات مقاومتی بتن تحت تاثیر قرار گرفته و می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی الیافی گردد. از طرف دیگر، قابلیت جذب انرژی مخلوط بتنی با افزودن الیاف بیشتر شده و باعث تغییر شکست فشاری بتن از حالت ترد به حالت شکل پذیر گردد. این موضوع می‌تواند نوع شکست و حداکثر میزان بار قابل تحمل قبل از گسیختگی ناشی از اعمال بار فشاری را افزایش دهد. بدیهی است که در نتیجه، اثر الیاف بر مقاومت فشاری مخلوط بتنی، تحت تاثیر اندرکنش این پدیده در ماتریس سیمان می‌باشد. دیده می‌شود که الیاف ماکروی در هم تابیده و برجسته‌ی پیوسته، در تمامی درصدهای مصرف مختلف، به میزان جزئی اثر بهتری بر مقاومت فشاری بتن شاهد، نسبت به اثر افزودن الیاف میکرو تک رشته ای دارد. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که به دلیل تعداد بیشتر الیاف میکرو نسبت به الیاف ماکرو در یک حجم مشخص از مخلوط بتنی، میزان تاثیر منفی تشکیل نواحی انتقال بین سطحی ناشی از افزودن الیاف ماکرو کمتر از الیاف میکرو بوده، و در نتیجه اثر نسبی بهتری در مقاومت فشاری ایجاد می‌کند. با این وجود، اختلاف بین اثر الیاف ماکرو و میکرو بر مقاومت فشاری بتن شاهد، کم بوده و امکان نتیجه گیری مناسب، وجود نداشته و می‌توان این طور عنوان کرد که اثر هر دو الیاف ماکرو و میکرو بر تغییرات مقاومت فشاری مخلوط بتنی، چشمگیر نیست. لازم به ذکر است که با توجه به شکل ۸، میزان مقاومت فشاری تمامی مخلوط‌های بتنی مورد بررسی، از حداقل مقاومت



شکل ۸. مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی در مقادیر مصرف مختلف الیاف



شکل ۹. مقاومت کششی دو نیم شدن (مگاپاسکال) در مقادیر مصرف مختلف الیاف



شکل ۱۰. مدول گسیختگی طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی در مقادیر مصرف مختلف الیاف

نتیجه این موضوع باعث افزایش ظرفیت خمشی بتن در هنگام گسیختگی خمشی می‌شود (شکل ۱۱). با توجه به شکل ۱۰، دیده می‌شود که با افزودن الیاف ماکرو در هم تابیده و برجسته‌ی پیوسته در مقادیر مصرف مختلف میزان مدول گسیختگی خمشی بتن افزایش یافته و با وجود اثر بهتر این الیاف با افزایش میزان مصرف الیاف از ۲ تا ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت به میزان مصرف از ۱ تا ۲ کیلوگرم بر متر مکعب، تفاوت‌های چشمگیری بین اثرات آنان در این دو بازه‌ی افزایش میزان مصرف مشاهده نمی‌شود. همچنین، اثرات الیاف ماکرو در هم تابیده و برجسته‌ی پیوسته در مقادیر مصرف مختلف بر تغییرات مدول گسیختگی مخلوط بتنی، بسیار نزدیک به هم بوده و امکان تعیین برتری نسبی هر یک از این الیاف در بهبود ظرفیت خمشی بتن در هنگام گسیختگی وجود ندارد. با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت، می‌توان بیان کرد اثر این دو نوع الیاف ماکرو مصنوعی بر افزایش مدول گسیختگی خمشی بتن، تقریباً مشابه است. این موضوع بیانگر عدم تاثیر پذیری زیاد مدول گسیختگی بتن از شکل ظاهری دو الیاف ماکرو بررسی شده است. البته جهت تعیین دقیق‌تر اثر شکل ظاهری الیاف ماکرو، نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه است. در انتها لازم به ذکر است که مدول گسیختگی تمامی طرح‌های اختلاط بررسی شده، از حداقل مدول گسیختگی بتن روسازی بتنی مندرج در جدول ۳ (۳٫۸ مگاپاسکال) بیشتر بوده و بنابراین طرح اختلاط‌های بررسی شده، این معیار بتن روسازی بتنی را رعایت کرده‌اند.

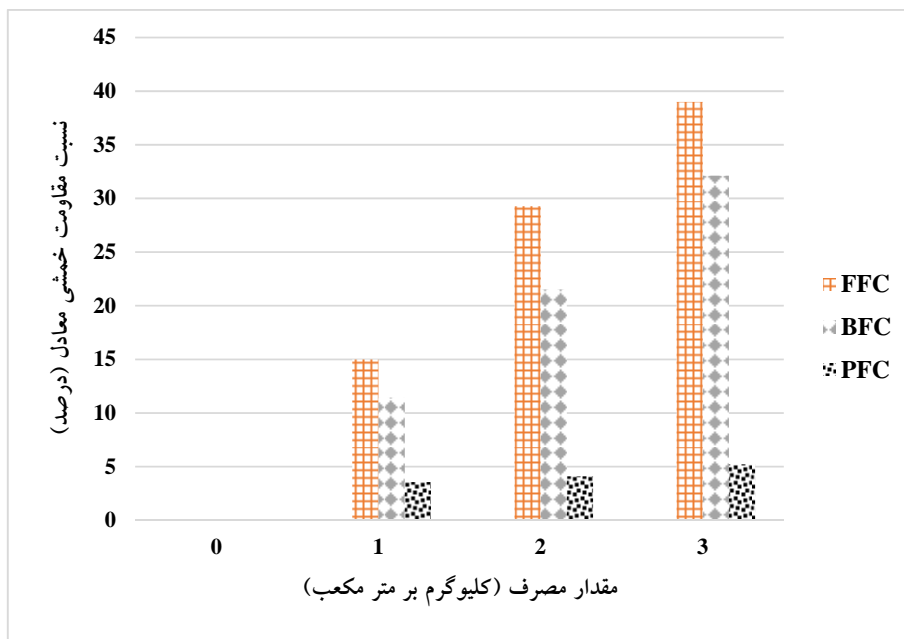
شکل ۱۰، نمودار میزان مدول گسیختگی روسازی بتنی ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی، در مقادیر مصرف مختلف الیاف را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که افزودن الیاف ماکرو و میکرو، تاثیرات متفاوتی بر تغییرات مدول گسیختگی مخلوط بتنی شاهد گذاشته است. افزودن الیاف میکرو در مقادیر مصرف مختلف، تاثیر چشمگیری بر بهبود مدول گسیختگی نداشته به طوری که با افزودن این الیاف به مقدار ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، مقدار مدول گسیختگی بتن به میزان ۷ درصد افزایش می‌یابد. در طرف مقابل، الیاف ماکرو، تاثیر زیادی بر افزایش مدول گسیختگی خمشی بتن دارد. با افزودن الیاف ماکرو در هم تابیده و برجسته‌ی پیوسته به مقدار ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول گسیختگی مخلوط بتنی شاهد به ترتیب به میزان ۳۸ و ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. علت این تفاوت در عملکرد الیاف میکرو و ماکرو، تاثیر سه مشخصه‌ی الیاف، شامل مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و طول الیاف بر عملکرد مخلوط بتنی در هنگام بارگذاری خمشی است. بیشتر بودن مقاومت کششی و مدول الاستیسیته‌ی الیاف ماکرو نسبت به میکرو، باعث می‌شود تا تنش‌های بیشتری جهت جاری شدن و گسیختگی الیاف در ماتریس سیمان، مورد نیاز باشد که این مورد منجر به افزایش سختی و جذب انرژی بیشتر مخلوط بتنی تحت بارگذاری خمشی گردد. همچنین طول بیشتر الیاف ماکرو نسبت به الیاف میکرو در بتن، باعث می‌شود تا طول بیشتری از الیاف در ماتریس سیمان، در تحمل بار وارد شده به مقطع بتنی شرکت کرده و باعث افزایش بیشتر سختی بتن گردد که در



شکل ۱۱. مشارکت الیاف ماکرو در تحمل تنش‌های خمشی وارده به مقطع بتنی قبل و در هنگام گسیختگی خمشی

جهت، افزودن این الیاف در مقادیر مصرف مختلف بررسی شده، باعث افزایش محسوس مقاومت خمشی پسماند بتن نشده است. با این وجود، علی و همکاران (Ali, Qureshi, and Kurda 2020) با مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر ۵ و ۹ کیلوگرم بر متر مکعب، افزایش نسبتاً چشمگیر مقاومت خمشی پسماندت روستازی‌های بتنی درزدار حاوی این الیاف را گزارش کرده‌اند. علت تفاوت نتایج به دست آمده از کار آنان و نتایج این تحقیق، در میزان استفاده از الیاف میکرو پلی پروپیلن است. با افزایش میزان مصرف الیاف، نقش تعداد الیاف در بهبود عملکرد خمشی پس از ترک خوردگی روستازی پر رنگ‌تر شده و عملکرد ضعیف این الیاف در انجام عمل پل زدن در دهانه‌ی ترک‌های با عرض بالاتر نسبت به ریز ترک‌ها را، تا حدودی جبران می‌کند. لازم به ذکر است که مصرف این مقدار الیاف میکرو پلی پروپیلن، با مشکلات اجرایی در زمینه‌ی حفظ کارایی بتن و جلوگیری از پدیده‌ی گلوله شدن مخلوط بتن و الیاف وجود داشته که نیاز به انجام اصلاحات در طرح مخلوط بتن روستازی بتنی در شرایط واقعی را به دنبال دارد.

شکل ۱۲، نمودار میزان نسبت مقاومت خمشی معادل روستازی بتنی ساخته شده با طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی، در مقادیر مصرف مختلف الیاف را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود که مقدار نسبت مقاومت خمشی معادل طرح اختلاط بتن شاهد، صفر است. این موضوع بیان می‌کند که پس از گسیختگی خمشی و ایجاد اولین ترک در بتن، مخلوط بتنی شاهد قابلیت تحمل بیشتر تنش‌های خمشی را ندارد. به بیان دیگر، مقاومت خمشی پس از ترک خوردگی یا پسماند آن، بسیار ناچیز بوده و صفر است. دیده می‌شود که افزودن الیاف میکرو در مقادیر مصرف مختلف، باعث افزایش چشمگیر نسبت مقاومت خمشی معادل بتن شاهد نگردیده است. با افزودن این الیاف به میزان ۳ کیلوگرم بر متر مکعب به مخلوط بتن شاهد، نسبت مقاومت خمشی معادل آن به میزان ۷ درصد افزایش می‌یابد. الیاف میکرو به دلیل خصوصیات مقاومتی و طول کمتر، مشارکت کمتری در افزایش جذب انرژی و سختی خمشی بتن دارد. عامل طول الیاف، نقش پر رنگ تری را در این مورد بازی می‌کند چرا که پس از گسیختگی بتن و گسترش دهانه‌ی ترک خوردگی، این الیاف قادر به پل زدن مناسب در دو طرف دهانه‌ی الیاف و جلوگیری از رشد ترک ناشی از افزایش بار را ندارند. بدین



شکل ۱۲. نسبت مقاومت خمشی معادل طرح‌های اختلاط بتن شاهد و الیافی در مقادیر مصرف مختلف الیاف

دهانه‌ی ترک پس از گسیختگی خمشی و جلوگیری از گسترش عرض ترک با ادامه‌ی بارگذاری، باعث افزایش چشمگیر مقاومت خمشی پس از ترک خوردگی بتن می‌گردند. طول بیشتر این الیاف، باعث می‌شود تا طول بیشتری از سطح بین الیاف و ماتریس سیمان وجود داشته و با افزایش بار وارد به مقطع بتنی، از گسترش ترک خوردگی جلوگیری کند (شکل ۱۳).

در مقابل، افزودن الیاف ماکرو در مقادیر مصرف مختلف، منجر به افزایش چشمگیر مقاومت خمشی پس از ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد شده به طوری که افزودن الیاف ماکرو ی در هم تابیده و برجسته‌ی پیوسته در مقادیر مصرف ۳ کیلوگرم بر متر مکعب باعث افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل بتنی شاهد به ترتیب به میزان ۳۹ و ۳۲ درصد شده است. الیاف ماکروی بررسی شده، به دلیل خصوصیات مقاومتی و طول بیشتر نسبت به الیاف میکرو، در انجام عمل پل زدن در



شکل ۱۳. پل زدن الیاف ماکرو در محل ترک خوردگی بتن پس از گسیختگی خمشی بتن و ادامه‌ی بارگذاری

مقاومت کششی دو نیم شدن، مقاومت خمشی و عملکرد خمشی پس از ترک خوردگی، بررسی گردید. مهم ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق، در زیر دیده می شود:

- افزودن الیاف میکرو و ماکرو مصنوعی تاثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری روسازی بتنی درزدار نداشت. بیشترین میزان تغییر مقاومت فشاری، به مقدار ۹ درصد در روسازی بتنی حاوی الیاف ماکرو در هم تابیده و در مقدار مصرف ۱ کیلوگرم بر متر مکعب، رخ داد (شکل ۹).

- افزودن الیاف میکرو و ماکرو مصنوعی باعث افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن روسازی بتنی شد. اثر الیاف میکرو در مقادیر مصرف مختلف بر افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن روسازی، چشمگیر نبود به طوری که در مقدار مصرف ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، باعث افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن روسازی به میزان ۱۰ درصد گردید. در مقابل، الیاف ماکرو در مقادیر مصرف بیشتر از ۲ کیلوگرم بر متر مکعب، اثر چشمگیری در بهبود مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط بتن روسازی داشته و مقاومت کششی دو نیم شدن روسازی را تا میزان ۳۵ درصد، بهبود بخشید (شکل ۹).

- اثر الیاف ماکرو برجسته پیوسته در افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن روسازی بتنی درزدار در مقدار مصرف ۳ کیلوگرم بر متر مکعب (۳۵ درصد) از اثر الیاف ماکرو در هم تابیده در مقدار مصرف یکسان (۲۳ درصد)، بیشتر بوده اما این دو الیاف در دیگر مقادیر مصرف، اثر تقریباً مشابهی داشتند (شکل ۹).

- افزودن الیاف میکرو در مقادیر مصرف مختلف، باعث بهبود چشمگیر مدول گسیختگی روسازی بتنی درزدار نگردید به طوری که با افزودن ۳ کیلوگرم بر متر مکعب از این الیاف به روسازی بتنی، مدول گسیختگی آن به میزان ۷ درصد افزایش یافت. در مقابل، با افزودن الیاف ماکرو در مقادیر مصرف مختلف، مدول گسیختگی مخلوط بتن روسازی به طور محسوسی بهبود یافته و مدول گسیختگی روسازی تا میزان ۴۰ درصد افزایش یافت. همچنین افزودن الیاف ماکرو در بازه ی مصرف از ۲ به ۳ کیلوگرم بر متر مکعب تاثیر بیشتری در افزایش مدول گسیختگی روسازی، نسبت به بازه ی مصرف از ۱ به ۲ کیلوگرم بر متر مکعب داشت. با این وجود اختلاف بین این دو بازه ی مصرف، زیاد نبود (شکل ۱۰).

- عملکرد الیاف ماکرو در هم تابیده فورتا و الیاف ماکرو برجسته ی پیوسته بارچیب در مقادیر مصرف مختلف، بر بهبود مدول گسیختگی خمشی روسازی، بسیار نزدیک به هم بوده و

با توجه به شکل ۱۲، دیده می شود که تاثیر الیاف ماکرو در هم تابیده و برجسته ی پیوسته در افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل مخلوط بتنی، در بازه ی مصرف از ۱ به ۲ کیلوگرم بر متر مکعب بیشتر از اثر این الیاف در بازه ی مصرف از ۲ به ۳ کیلوگرم بر متر مکعب است. این موضوع با توجه به نتایج بدست آمده بین سه مقدار مصرف الیاف بررسی شده در این تحقیق می تواند بیانگر این مطلب باشد که نقش تعداد رشته های الیاف بر افزایش مقاومت خمشی پسماند بتن دارای حد مشخصی است و پس از آن با افزودن بیشتر الیاف، میزان عملکرد الیاف در افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل بتن، رشد کندتری دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، انتظار می رود به مقدار مصرفی از الیاف رسید که در آن افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل مخلوط بتنی با افزودن بیشتر الیاف، رشد محسوسی نداشته باشد. جهت تعیین این مقدار مصرف مشخص، نیاز به تحقیقات آتی در این زمینه است و این مقدار برای هر نوع الیاف ماکرو قطعاً متفاوت است.

همچنین دیده می شود با وجود نزدیک بودن نتایج دو الیاف ماکرو بررسی شده، الیاف ماکرو در هم تابیده در تمامی مقادیر مصرف، اثر مثبت بیشتری بر نسبت مقاومت خمشی معادل بتن نسبت به الیاف ماکرو برجسته پیوسته دارد. این موضوع می تواند به دلیل اثر بهتر شکل ظاهری الیاف ماکرو در هم تابیده در انجام عمل پل زدن بین دهانه ی ترک و وجود تعداد رشته تارهای بیشتر این الیاف به دلیل قطر کمتر آن نسبت به الیاف ماکرو برجسته باشد.

بررسی نتایج فوق، نشان می دهد که افزودن الیاف میکرو، کمترین تاثیر را بر خصوصیات مقاومتی روسازی های بتنی درزدار نسبت به افزودن الیاف ماکرو دارد. همچنین اثرات افزودن الیاف ماکرو در هم تابیده و ماکرو برجسته ی پیوسته، نزدیک به هم بوده و برتری مطلق بین این دو الیاف در افزایش خصوصیات مقاومتی روسازی دیده نمی شود. افزودن الیاف ماکرو بیشترین تاثیر را بر مدول گسیختگی و نسبت مقاومت خمشی معادل روسازی بتنی درزدار دارد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر مجزا و مقایسه ای یک نوع الیاف میکرو تک رشته ای و دو نوع الیاف ماکرو مصنوعی شامل الیاف در هم تابیده فورتا و الیاف برجسته ی پیوسته بارچیب بر پایه ی پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف بر خصوصیات مقاومتی روسازی های بتنی درزدار شامل مقاومت فشاری،

به کاهش ضخامت طراحی روسازی گردد. این موضوع با مزایای اقتصادی و همچنین اثرات مثبت زیست محیطی، ناشی از مصرف کمتر مصالح، همراه است. با وجود اینکه فاصله‌ی ایجاد درزهای انقباضی در روسازی‌های بتنی درزدار تابعی از ملاحظات آیین نامه‌ای و قضاوت مهندسی است، اما واضح است که با افزودن الیاف ماکروی مصنوعی و افزایش مقاومت پس از ترک خوردگی روسازی، می‌توان فاصله‌ی ایجاد این درزها را افزایش داد که این موضوع در نهایت منجر به کاهش زمان اجرای روسازی، کاهش هزینه‌های ناشی از مصرف میلگردهای انتقال بار و هزینه‌های مربوط به عملیات ایجاد درز گردد.

۵- مراجع

- Ahmadi, M., Farzin, S., Hassani, A., & Motamedi, M., (2017), "Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates", *Construction and Building Materials*, 144, pp.392–398.
- Al-Humeidawi, B. H., & Mandal, P., (2014), "Evaluation of performance and design of GFRP dowels in jointed plain concrete pavement - Part 2: Numerical simulation and design considerations", *International Journal of Pavement Engineering*, 15(8), pp.752–765. Doi.org/10.1080/10298436.2014.893314
- Ali, B., Qureshi, L. A., & Khan, S. U., (2020), "Flexural behavior of glass fiber-reinforced recycled aggregate concrete and its impact on the cost and carbon footprint of concrete pavement", *Construction and Building Materials*, 262, pp.1–58. Doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120820.
- Ali, B., Qureshi, L. A., & Kurda, R., (2020), "Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement", *Composites communications*, 100437.
- Altoubat, S. A., Roesler, J. R., Lange, D. A., & Rieder, K. A., (2008), "Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers", *Construction and Building Materials*, 22(3), pp.384–393. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.008.
- Banthia, N., & Gupta, R., (2006), "Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete", *Cement and Concrete Research*, 36(7), pp.1263–1267. Doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.010.
- Bertelsen, I. M. G., Ottosen, L. M., & Fischer,

تقریباً عملکرد یکسانی داشتند به طوری که با افزودن الیاف ماکروی در هم تابیده و ماکروی برجسته ی پیوسته در مقدار مصرف ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول گسیختگی روسازی به ترتیب به میزان ۳۸ و ۴۰ درصد افزایش یافت (شکل ۱۰).

-افزودن الیاف میکرو باعث افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل روسازی بتنی درزدار تا میزان ۵ درصد شده و چشمگیر نبود. در طرف مقابل، با افزودن الیاف ماکروی مصنوعی در مقادیر مصرف مختلف، نسبت مقاومت خمشی معادل روسازی، تا میزان ۳۹ درصد افزایش یافت (شکل ۱۲)

-افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل روسازی بتنی درزدار با افزودن الیاف ماکرو در بازه ی مصرف ۱ تا ۲ کیلوگرم بر متر مکعب بیشتر از بازه‌ی مصرف ۲ تا ۳ کیلوگرم بر متر مکعب بود (شکل ۱۲). این موضوع می‌تواند بیانگر وجود یک حد مشخصی از مقدار الیاف باشد که با افزودن بیشتر الیاف از آن حد، میزان عملکرد الیاف در افزایش مقاومت پسماند بتن، روند افزایشی کندتری دارد.

-الیاف میکرو نسبت به الیاف ماکرو، کمترین تاثیر را بر خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی درزدار داشتند. همچنین اثرات افزودن الیاف ماکروی در هم تابیده فوراً و ماکروی برجسته‌ی پیوسته بارچسب در بهبود خصوصیات مقاومتی روسازی، نزدیک به هم بود.

-افزودن الیاف ماکرو، بیشترین تاثیر را در افزایش مدول گسیختگی (تا میزان ۴۰ درصد) و نسبت مقاومت خمشی (تا میزان ۳۹ درصد) روسازی بتنی درزدار داشتند.

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، دیده شد که افزودن الیاف ماکروی مصنوعی در دو شکل ظاهری متفاوت، بیشترین تاثیر را در بهبود خصوصیات مقاومتی روسازی بتنی درزدار نسبت به الیاف میکرو دارد. این موضوع، اهمیت توجه بیشتر به استفاده از این الیاف جهت افزایش خصوصیات مقاومتی و همچنین دوامی روسازی است. الیاف میکرو که اغلب در کنترل ریز ترک‌ها، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند، در کنترل رشد ترک‌های با عرض بالا، ناشی از بارگذاری یا عوامل جوی، عملکرد ضعیفی داشته و قادر به کاهش گسترش این ترک‌ها نیستند. همچنین، همانطور که در این تحقیق بیان شد، در بهبود ظرفیت باربری روسازی بتنی درزدار نیز اثر چشمگیری ندارند. بدین جهت، استفاده از الیاف ماکرو، به دلیل اثرات مثبت آن در افزایش ظرفیت خمشی روسازی، که منجر به افزایش ظرفیت سازه‌ای آن می‌گردد، می‌تواند علاوه بر افزایش خصوصیات مقاومتی روسازی، منجر

- Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.050.
- Khan, M., & Ali, M., (2018), "Effectiveness of hair and wave polypropylene fibers for concrete roads", *Construction and Building Materials*, 166, pp.581–591.
Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.167.
- Kim, S., Kyo, Y., & Ho, J., (2020), "Advanced reinforced concrete pavement: Concept and design", *Construction and Building Materials*, 231, 117130.
Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117130.
- LaHucik, J., Dahal, S., Roesler, J., & Amirkhanian, A. N. (2017). Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 135, pp.440–446.
Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.212.
- Lanzoni, L., Nobili, A., & Tarantino, A. M., (2012), "Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures", *Construction and Building Materials*, 28(1), pp.798–806.
Doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.017.
- Ma, Y., Zhu, B., Tan, M., & Wu., K., (2004), "Effect of Y type polypropylene fiber on plastic shrinkage cracking of cement mortar", *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 37(266), pp.92–95.
Doi.org/10.1617/13920.
- Madhkan, M., Azizkhani, R., & Torki Harchegani, M. E., (2012), "Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements", *Construction and Building Materials*, 26(1), pp.102–112.
Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.009.
- Manjunath, R., Narasimhan, M. C., Umesh, K. M., Shivam Kumar, & Bala Bharathi, U. K., (2019), "Studies on development of high performance, self-compacting alkali activated slag concrete mixes using industrial wastes", *Construction and Building Materials*, 198, pp.133–147.
Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.242.
- Manual731., n.d., (2017), "Design, Construction and Maintenance Manual for Highways Concrete Pavements No.731 in, The Ministry of Road & Urban Development", Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs.
- Mapa, D. G., Gunaratne, M., & Riding, K. (2020), "Evaluating Early-Age Stresses in Jointed Plain Concrete Pavement Repair Slabs", *ACI Materials Journal*, 117.
Doi.org/10.14359/51725780.
- Mu, F., Mack, J. W., & Rodden, R. A., G., (2020), "Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review", *Construction and Building Materials*, 230, 116769.
Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116769.
- Chan, R., Santana, M. A., Oda, A. M., Paniguel, R. C., Vieira, L. B., Figueiredo, A. D., & Galobardes, I., (2019), "Analysis of potential use of fibre reinforced recycled aggregate concrete for sustainable pavements", *Journal of Cleaner Production*, 218, pp.183–191.
- Chen, Y., Cen, G., & Cui, Y., (2018), "Comparative study on the effect of synthetic fiber on the preparation and durability of airport pavement concrete", *Construction and Building Materials*, 184, pp.34–44.
Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.223.
- Delatte, N. J., (2014), "Concrete pavement design, construction, and performance, Crc Press.
- Haghejad, M., & Modarres, A., (2020), "Effect of freeze-thaw cycles on the response of roller compacted concrete pavement reinforced by recycled polypropylene fibre under monotonic and cyclic loadings", *Road Materials and Pavement Design*, 0(0), pp.1–17.
Doi.org/10.1080/14680629.2020.1794942.
- Hesami, S., Salehi Hikouei, I., & Emadi, S. A. A., (2016), "Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber", *Journal of Cleaner Production*, 133, pp.228–234.
Doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.079.
- Huang, H., Pang, H., Huang, J., Zhao, H., & Liao, B., (2020), "Synthesis and characterization of ground glass fiber reinforced polyurethane-based polymer concrete as a cementitious runway repair material", *Construction and Building Materials*, 242, 117221.
Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117221.
- Huang, K., Deng, M., Mo, L., & Wang, Y. (2013), "Early age stability of concrete pavement by using hybrid fiber together with MgO expansion agent in high altitude locality. *Construction and Building Materials*", 48, pp.685–690.
Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.089.
- Isla, F., Luccioni, B., Ruano, G., Torrijos, M. C., Morea, F., Giaccio, G., & Zerbino, R., (2015), "Mechanical response of fiber reinforced concrete overlays over asphalt concrete substrate: Experimental results and numerical simulation, *Construction and Building Materials*, 93, pp.1022–1033.

- Doi.org/10.1177/0361198120925068.
- Salemi, N., & Behfarnia, K., (2013), "Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement", *Construction and Building Materials*, 48, pp.934–941. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.037.
- Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., & Huang, K., (2019), "Performance evaluation of jointed plain concrete pavement made with portland cement concrete containing reclaimed asphalt pavement", *Road Materials and Pavement Design*, 0(0), pp.1–23. Doi.org/10.1080/14680629.2019.1616604.
- Silva, E. R., Coelho, J. F. J., & Bordado, J. C., (2013), "Strength improvement of mortar composites reinforced with newly hybrid-blended fibres: Influence of fibres geometry and morphology", *Construction and Building Materials*, 40, pp.473–480. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.017>.
- Suksawang, N., Alsabbagh, A., Shaban, A., & Wtaife, S., (2020), "Using post-cracking strength to determine flexural capacity of ultra-thin whitetopping (UTW) pavements", *Construction and Building Materials*, 240, 117831. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117831.
- Vijay, P. V., Li, H., & GangaRao, V. H., (2020), "Laboratory testing, field construction, and decade long performance evaluation of jointed plain concrete pavement with FRP dowels", *International Journal of Pavement Engineering*, 21(6), pp.713–724. Doi.org/10.1080/10298436.2018.1508841
- Yang, J. M., Shin, H. O., & Yoo, D. Y., (2017), "Benefits of using amorphous metallic fibers in concrete pavement for long-term performance", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(4), pp.750–760. Doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.010.
- Zhang, T., Xu, Y., & Lin, Z., (2013), "The application of fiber reinforced concrete in cement concrete pavement", *Advanced Materials Research*, 634–638(1), pp.2094–2097. Doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.634-638.2094.
- Zhou, C., Pei, X., Li, W., & Liu, Y., (2020), "Mechanical and Damping Properties of Recycled Aggregate Concrete Modified with Air-Entraining Agent and Polypropylene Fiber", *Materials*, 13(8), 2004.
- (2018), "Review of national and state-level calibrations of AASHTOWare Pavement ME design for new jointed plain concrete pavement", *International Journal of Pavement Engineering*, 19(9), pp.825–831. Doi.org/10.1080/10298436.2016.1210804.
- Nobili, A., Lanzoni, L., & Tarantino, A. M. (2013), "Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement", *Construction and Building Materials*, 47, pp.888–895. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.077
- Olivier, G., Combrinck, R., Kayondo, M., & Boshoff, W. P., (2018), "Combined effect of nano-silica, super absorbent polymers, and synthetic fibres on plastic shrinkage cracking in concrete. *Construction and Building Materials*, 192, pp.85–98. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.102.
- Ortega-López, V., Fuente-Alonso, J. A., Santamaría, A., San-José, J. T., & Aragón, Á., (2018), "Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements", *Construction and Building Materials*, 163, pp.471–481. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.121.
- Pelisser, F., Neto, A. B. D. S. S., Rovere, H. L. La, & Pinto, R. C. D. A., (2010), "Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking", *Construction and Building Materials*, 24(11), pp.2171–2176. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.041.
- Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. R. M., (2018), "Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology", *Construction and Building Materials*, 159, pp.517–529. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002.
- Sadiqul Islam, G. M., & Gupta, S. Das., (2016), "Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete", *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), pp.345–354. Doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.05.007.
- Salameh, R., & Tsai, Y., (James), (2020), "Enhancing Decision-Making on Maintenance, Rehabilitation, and Reconstruction of Jointed Plain Concrete Pavements using Slab-Based Cracking Data and Life-Cycle Cost Analysis.", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674(8), pp.511–522.

Comparison of the Effect of Micro and Macro Synthetic Fibers on the Strength Properties of Jointed Concrete Pavements Considering the Residual Flexural Strength

Abolfazl Hassani, Professor, Department of Roads and Transportation, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Seyed Javad Vaziri Kang Oleyaei, M.Sc., Grad., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Mohammad Reza Hajizadeh, M.Sc., Grad., Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

E-mail: hassani@modares.ac.ir

Received: February 2023- Accepted: April 2023

ABSTRACT

Addition of fibers with different physical and strength properties has different effects on the strength properties of jointed concrete pavements at rupture and also on the post-cracking strength of the pavement. This study investigates the separate and comparative effect of micro and macro synthetic fibers on the strength properties of jointed concrete pavements, considering the residual flexural strength of the pavement. For this purpose, the effect of adding two types of macro fibers and one type of micro fiber in the content of 1, 2 and 3 kg/m³ on compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength and flexural performance after cracking of concrete pavement were investigated. The results showed that micro fibers in all consumption contents have the least effect on the strength properties of pavement compared to macro fibers. Also, the addition of macro fibers did not have a significant effect on the compressive strength, but the splitting tensile strength, flexural strength and residual flexural strength of pavement were significantly increased. The effect of macro fibers on improving the splitting tensile strength and modulus of rupture of pavement occurred at dosage rates higher than 2 kg/m³. However, the most significant increase in the equivalent flexural strength ratio of fiber reinforced concrete pavement occurred in the range of 1 to 2 kg/m³ and by adding higher contents of macro fibers, the increasing growth trend of residual flexural strength decreased. It was founded that macro fibers have the most excellent effect on flexural strength and residual flexural strength of the pavement. Also, the performance of twisted and continuously embossed macro fibers in all dosage rates was approximately the same.

Keywords: Micro And Macro Synthetic Fibers, Fibers Comparison, Jointed Concrete Pavement, Strength Properties, Residual Flexural Strength