



بررسی اثر مقایسه‌ای الیاف ماکرو و میکرو پلی‌پروپیلن بر کنترل یا کاهش ترک خوردگی‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی در شرایط دمایی بالا

سید جواد وزیری کنگ علیائی^۱، حسن فضایی^{۲*}

^۱ گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
^۲ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران-شمال، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۴

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴

کلمات کلیدی:

روسازی بتنی

ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی

خمیری

شرایط دمایی بالا

الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن

الیاف میکرو پلی‌پروپیلن

خلاصه: ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در روسازی بتنی، محلی برای ورود آب و مواد خورنده به داخل روسازی بوده و باعث کاهش دوام و در نهایت شکست دال روسازی می‌گردد. استفاده از الیاف، یکی از راه‌های کنترل و کاهش این ترک‌ها است. این پژوهش، به بررسی اثر افزودن الیاف پلیمری ماکرو در مقایسه با الیاف پلیمری میکرو بر ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری بتن، می‌پردازد. بدین منظور از یک نوع الیاف میکرو پلی‌پروپیلن و دو نوع الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن در درصد حجمی ۰٫۱٪ در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. آزمایش‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری و خمشی و آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری بر اساس ASTM C 1579 در شرایط محیطی شامل رطوبت نسبی هوا ۲۰٪، سرعت جریان باد ۳۰ کیلومتر بر ساعت و در دو دمای ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج نشان داد نمونه‌های بتن حاوی هر دو نوع الیاف ماکرو و میکرو در کنترل ترک خوردگی‌ها عملکرد مناسب تری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند. در این میان، الیاف میکرو در کنترل ترک خوردگی در هر دو دمای آزمایش شده، عملکرد بهتری داشتند. در مقابل، الیاف ماکرو در کاهش طول ترک خوردگی، به ویژه در دماهای بالاتر، اثر بهتری از خود نشان دادند. استفاده از الیاف ماکرو می‌تواند تا حد قابل توجهی منجر به کاهش ابعاد و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی گردد.

یکی از عوامل کاهنده‌ی دوام روسازی‌های بتنی، ترک خوردگی دال روسازی می‌باشد. وجود ترک در روسازی‌های بتنی، زمینه را برای ورود آب و مواد خورنده مانند اسید به داخل دال بتنی فراهم آورده و باعث خوردگی میلگرد ها، تخریب موضعی بتن و در نهایت شکست دال روسازی می‌گردد [۳]. ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری یکی از عوامل ایجاد ترک در روسازی‌های بتنی می‌باشد. این جمع‌شدگی، یکی از انواع معمول و متداول جمع‌شدگی بتن در ساعات اولیه پس از ساخت بوده که به دلیل تشکیل فشارهای مویبندی منفی در سطح بتن به وجود می‌آید [۴-۱۰]. این فشارهای منفی، پس از خشک شدن سطح بتن به دلیل بالا بودن نرخ تبخیر در سطح آن، شروع به شکل‌گیری می‌کنند. به دلیل وجود عوامل مقید

۱- مقدمه

دوام و طول عمر بیشتر روسازی‌های بتنی و نیاز کمتر این رویه‌ها به تعمیر و نگهداری نسبت به روسازی‌های آسفالتی از یک طرف، و افزایش قیمت قیر و هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری روسازی‌های آسفالتی از طرف دیگر، محققان و متولیان امور راهسازی را به استفاده از روسازی‌های بتن سیمانی، ترغیب کرده است [۱]. این روسازی‌ها جهت ساخت جاده‌ها، سطوح پروازی و کف‌های صنعتی، مورد استفاده قرار گرفته و در صورت به کار بردن مصالح مرغوب در ساخت، طراحی و اجرای صحیح، می‌تواند در طول عمر خود، بدون نیاز به تعمیر و نگهداری و یا با نگهداری به صورت جزئی، خدمت دهی کند [۲].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fazaeli@iau-tnb.ac.ir



کننده، مانند میلگردهای مسلح کننده و سطح اساس دانه‌ای و تثبیت شده، تنش‌های کششی ناشی از جمع‌شدگی مقید، در سطح بتن به وجود می‌آید، در صورت تجاوز تنش‌های کششی از مقاومت کششی بتن، ترک‌خوردگی‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری به وجود می‌آید [۱۱-۱۶].

در این بین، روسازی‌های بتنی به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد (مسطح بودن سازه)، تغییرات شرایط محیطی در زمان ساخت و پس از آن، وجود شرایط محیطی سخت در محل اجرای روسازی و حجم مصرف بالای بتن در دال، که باعث افزایش پتانسیل جمع‌شدگی در آن می‌گردد، بیشتر در معرض این نوع ترک‌خوردگی هستند [۱۷]. این ترک‌ها، که به ترک‌خوردگی انقباضی معروف است، یکی از انواع خرابی‌های روسازی‌های بتنی بوده که، تأثیر منفی بر زیبایی سازه داشته و همچنین دوام جاده در بلند مدت و سطح خدمت دهی آن را کاهش می‌دهد. اگرچه این ترک‌ها، باعث شکست دال روسازی نشده، اما با کاهش دوام بتن، می‌تواند زمینه را برای شکست آن در بلند مدت فراهم کرده و به تخریب روسازی سرعت ببخشد [۱۸].

استفاده از الیاف، یکی از رویکرد های متداول و موثر در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی خمیری در روسازی‌های بتنی می‌باشد. افزودن الیاف باعث کاهش ترک‌های با طول زیاد، مانع از گسترش ترک با پل زدن در دهانه‌ی ترک، افزایش مقاومت کششی بتن و جلوگیری جدا شدگی مصالح، به خصوص سنگدانه‌های درشت که تمایل به ماندن در سطح بتن را دارند، می‌شود. از میان الیاف مختلف مورد استفاده، الیاف پلیمری به دلیل داشتن عملکرد مناسب در کنترل ترک‌خوردگی‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری، اغلب با قیمت کم و طیف وسیع خصوصیات الیاف، که بیشتر شامل مقاومت، مدول و سطح الیاف می‌باشد، توجه بیشتر تحقیقات در زمینه‌ی کاهش ترک‌خوردگی خمیری با استفاده از الیاف را به خود جلب کرده است [۱۹]. الیاف پلی‌پروپیلن، نوعی الیاف پلیمری مصنوعی بوده که به دلیل خصوصیات مقاومتی بالا و دوام عالی در برابر فعالیت‌های شیمیایی مانند واکنش آکالی-سیلیسی در محیط بتن، استفاده فراوان در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی‌های زود هنگام، به خصوص ترک‌های خمیری، دارد.

این الیاف، از نظر خصوصیات ابعادی، مکانیکی و ظاهری در دو گروه میکرو و ماکرو ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰]. الیاف

میکرو پلی‌پروپیلن اغلب در مقادیر مصرف پایین، جهت کنترل و کاهش ترک‌خوردگی‌های زود هنگام در روسازی‌های بتنی استفاده می‌شود [۲۱]. الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن سازه‌ای، اغلب در مقادیر حجمی بالاتر (۵٪)، در بتن‌های مسلح الیافی در ساخت روسازی‌های بتنی استفاده شده و جهت بهبود خصوصیات مکانیکی، جذب انرژی، شکل‌پذیری و کنترل ترک‌های دراز مدت، در روسازی استفاده می‌شود [۲۲-۲۵]. پژوهش‌های بسیاری بر روی اثر الیاف میکرو پلی‌پروپیلن در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی خمیری صورت گرفته است. اسلام و گاپتا^۱ مقدار بهینه‌ی مصرف الیاف میکرو پلی‌پروپیلن در بتن را با در نظر گرفتن کمترین میزان کاهش مقاومت فشاری، بیشترین میزان افزایش مقاومت کششی و بهترین عملکرد در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی خمیری، به میزان ۰٫۱٪ حجمی گزارش کردند [۲۶]. این مقدار مصرف بهینه، توسط سروشیان و همکاران^۲ [۲۷]، و بیاسی و مکلن تاینر^۳ [۲۸] نیز عنوان شده است. گاپتا و بانثیا^۴ [۲۹]، مقدار ۰٫۱٪ حجمی را، مقدار بهینه مصرف الیاف جهت کنترل ترک‌خوردگی خمیری بیان کردند. برتلسن و همکاران^۵ برتری نسبی عملکرد الیاف میکرو نسبت به الیاف ماکرو، در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی خمیری را علت توجه بیشتر پژوهش‌های انجام شده به این الیاف، عنوان کردند. آنان همچنین سادگی در ساخت و تغییر شکل الیاف ماکرو را یک مزیت استفاده از این نوع الیاف نسبت به الیاف میکرو ذکر کردند که می‌تواند منجر به افزایش چسبندگی سیمان و الیاف گردد [۱۹]. با وجود مطالعات زیاد در زمینه‌ی اثر الیاف میکرو در کاهش ترک‌خوردگی خمیری، برخی از پژوهشگران به بررسی اثر افزودن الیاف سازه‌ای ماکرو، بر این نوع ترک‌خوردگی پرداختند.

کیم و همکاران^۶ به بررسی اثر الیاف ماکرو حاصل از پسماند بطری‌های پت (PET) در سه شکل هندسی مختلف و در درصد حجمی ۰٫۱٪-۰٫۱٪ بر کنترل مساحت کل ترک‌خوردگی خمیری پرداختند. نتایج کار آنان نشان داد که افزودن الیاف تا مقدار ۰٫۲۵٪، باعث کاهش چشمگیر ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری شده است. اما با افزودن بیشتر الیاف تا مقدار ۰٫۵٪، پیشرفت بیشتری در کاهش شدت ترک‌خوردگی مشاهده نگردیده است. همچنین،

1 Islam & Gupta
2 Soroushian et al.
3 Bayasi & McIntyre
4 Gupta & Banthia
5 Bertelsen et al.
6 Kim et al.

پایین ۰٫۱٪ (درصد بهینه ی الیاف میکرو پلی پروپیلن در کنترل ترک‌های خمیری) بر خصوصیات هندسی ترک‌خوردگی‌های خمیری بتن در شرایط دمایی مختلف، شده است. به این دلیل، تحقیق حاضر به بررسی اثر افزودن الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقایسه با الیاف میکرو پلی پروپیلن بر ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری بتن روسازی پرداخته و سعی بر مطالعه ی عمیق تر اثر این نوع الیاف در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی‌های خمیری در روسازی‌های بتنی دارد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان شرق مشهد استفاده شد. در جدول ۱، مشخصات شیمیایی و فیزیکی این سیمان ارائه شده توسط آزمایشگاه کارخانه سیمان شرق مشهد [۳۴] به همراه الزامات استاندارد آورده شده است.

از سنگدانه‌های شکسته آهکی با حداکثر اندازه‌ی ۱۹ میلی‌متر استفاده شد. سنگدانه‌های ریز (ماسه) در اندازه‌ی ۵-۰ میلی‌متر و سنگدانه‌های درشت (شن) در دو گروه ابعادی شامل ۱۲-۵ و ۱۹-۱۲ میلی‌متر است. آزمایش تعیین چگالی نسبی و درصد جذب آب مصالح سنگی ریز دانه مطابق با استاندارد ASTM C128 و آزمایش تعیین مدول نرمی مصالح سنگی ریز دانه مطابق با استاندارد ASTM C33 انجام گرفته و مقادیر چگالی نسبی، مدول نرمی و درصد جذب آب مصالح سنگی ریزدانه به ترتیب به مقدار ۲/۸۸، ۲/۵۴ و ۳/۲۰ به دست آمد. درصد جذب آب و چگالی نسبی سنگدانه‌های درشت دانه براساس آزمایش انجام شده مطابق با استاندارد ASTM C127، به ترتیب به میزان ۱/۲۸ و ۲/۶۸ تعیین گردید. دانه‌بندی ترکیبی مصالح سنگی، با توجه ضابطه‌ی ۷۳۱ (دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها) و روش طرح ملی مخلوط و برای مصالح سنگی با حداکثر اندازه‌ی ۱۹ میلی‌متر، تعیین شده و در شکل ۱ دیده می‌شود. الیاف مورد استفاده در این پژوهش، شامل یک نوع الیاف مصنوعی میکرو پلی پروپیلن به شکل تک رشته ای با نام اختصاری MIP و دو نوع الیاف مصنوعی ماکرو پلی پروپیلن در اشکال تک رشته ای در هم تابیده با نام اختصاری MAP1 و برجسته پیوسته با نام اختصاری MAP2، مطابق با استاندارد ASTM D 7508 و ASTM C ۱۱۱۶ است. شکل ۲، شکل و ساختار الیاف مورد استفاده در این

هندسه ی الیاف در مقادیر حجمی پایین تا ۰٫۲۵٪، تأثیر بیشتری بر کنترل ترک‌خوردگی دارد [۳۰]. بورگ و همکاران^۱ اثر افزودن الیاف ماکرو بازیافتی پت به صورت ساده و تغییر شکل یافته، در طول ها و درصدهای مصرف ۱٫۵٪-۰٫۵٪ بر متوسط عرض ترک‌خوردگی خمیری بتن را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که حتی در مقادیر حجمی کم مصرف، الیاف ماکرو پت قادر به کنترل گسترش عرض ترک‌خوردگی بودند. همچنین عملکرد الیاف تغییر شکل یافته، به دلیل اتصال بهتر به ماتریس سیمان، از عملکرد الیاف ساده در کنترل گسترش ترک‌خوردگی بهتر عنوان شد [۳۱]. لی و وان^۲ اثر یک نوع الیاف نانو مصنوعی ماکرو و الیاف فلزی با انتهای قلاب دار در درصد مصرف ۰٫۲۶٪، بر مساحت ترک‌خوردگی خمیری در ملات سیمانی را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج کار آنان نشان داد که، با وجود عملکرد بهتر الیاف مصنوعی نسبت به الیاف فلزی در این درصد مصرف، هیچ کدام قادر به کاهش چشمگیر مساحت ترک‌خوردگی نبودند [۳۲]. مازولی و همکاران^۳ به مطالعه‌ی اثر افزودن انواع الیاف مختلف ماکرو در اشکال و مصالح مختلف، مانند پلی پروپیلن، پلی اتیلن، PVA و فولادی، و در درصد حجمی ۰٫۳٪ بر ترک‌خوردگی خمیری پرداختند. نتایج کار آنان نشان داد که الیاف ماکرو پلی پروپیلن و پلی اتیلن، بهترین عملکرد را در تاخیر ترک‌خوردگی و کاهش عرض ترک‌ها دارد. [۳۳]. با وجود برتری نسبی الیاف میکرو در مقایسه با الیاف ماکرو که در قسمت قبل بیان شد، دیده می‌شود الیاف ماکرو از عملکرد مناسبی در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی‌های خمیری نسبت به بتن‌های معمولی برخوردار هستند.

با توجه به پیشینه‌ی تحقیق، دیده شد که با وجود اینکه استفاده از الیاف میکرو پلی پروپیلن عملکرد نسبی بهتری نسبت به الیاف ماکرو داشته، اما الیاف سازه‌ای ماکرو به دلیل سادگی در ساخت (با تغییر شکل مصالح پلی پروپیلن) می‌تواند باعث بهبود چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمان شده و همچنین اثر مثبتی بر خصوصیات مکانیکی، جذب انرژی و شکل‌پذیری روسازی‌های بتنی دارد. بنابراین نیاز است تا عملکرد این نوع الیاف در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی خمیری، عمیق تر بررسی گردد. از طرفی توجه کمتری به بررسی اثر الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقایسه با الیاف میکرو پلی پروپیلن، در درصد حجمی

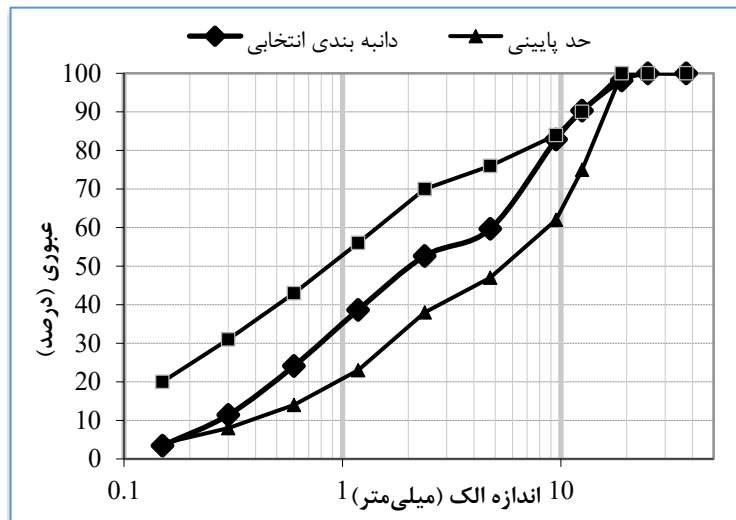
1 Borg et al.

2 Lee&Won

3 Mazzoli et al.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵
Table 1. Chemical and physical specifications of CEM I-425

۲- مشخصات شیمیایی				۱- مشخصات فیزیکی			
۱۰- ترکیب شیمیایی	۹- مقدار	۸- الزامات استاندارد	۷- روش استاندارد	۶- مشخصه فیزیکی	۵- مقدار	۴- الزامات استاندارد	۳- روش استاندارد
SiO ₂ -۲۱	۲۰.۹±۰.۵-۲۰	--۱۹	۱۵-	۱۴- نفوذ هوای بلین	۲۲۵.۰±۱.۰۰-۱۳	>۲۸.۰۰-۱۲	۳۹۰-۱۱
Al ₂ O ₃ -۲۹	۴.۵±۰.۱۵-۲۸	--۲۷	۱۶-	۲۶- زمان	۲۲.۰±۲.۰-۲۴	>۴۵-۲۳	۳۹۲-۲۲
Fe ₂ O ₃ -۳۵	۳.۸±۰.۱۵-۳۴	--۳۳	۱۷-۱۶۹۲	۲۵- اولیه	۲۸.۰±۲.۰-۳۱	<۳۶.۰-۳۰	
CaO-۴۴	۶۳.۵±۰.۵-۴۳	--۴۲	۱۸-	۳۲- نهایی	۱۹۵±۲.۰-۳۹	>۱.۰۰-۳۸	۳۶-
MgO-۵۰	۲.۷±۰.۲-۴۹	<۵-۴۸		۳۴- مقاومت	۳۲.۰±۲.۰-۴۶	-۴۵	۳۷-۳۹۳
SO ₃ -۵۶	۲.۰±۰.۲-۵۵	<۲-۵۴		۳۵- فشاری	۴۹۵±۲.۰-۵۲	>۴۲۵&<۶۲۵-۵۱	
Na ₂ O-۶۵	۰.۵±۰.۰۵-۶۴	--۶۳	۶۲-۱۶۹۵	۳۶- (k _a /cm ²)	-۶۰	<۰.۸-۵۸	۵۷-۳۹۱
K ₂ O-۷۳	۰.۴۵±۰.۰۵-۷۲	--۷۱		۶۱- انبساط	-۶۹	-۶۷	۶۶-
L.O.I-۸۲	۱.۳±۰.۳-۸۱	<۳-۸۰	۷۹-۱۶۹۲	۷۰- وزن	۳.۱۵-۶۸	-۷۵	۷۴-
I.R.-۹۰	۰.۳±۰.۱-۸۹	<۰.۷۵-۸۸		۷۸-	-۸۷	-۸۴	۸۳-
Cl-۹۹	--۹۸	--۹۷	۹۶-	۸۷-	-۹۴	-۹۲	۹۱-
Fr.Cao-۱۱۳	--۱۱۲	--۱۱۱	۱۱۰-	۹۵-	-۱۰۸	-۱۰۶	۱۰۵-
C ₃ S-۱۲۳	۵۵±۴-۱۲۲	--۱۲۱	۱۱۹-	۱۰۹-	-۱۱۷	-۱۱۵	۱۱۴-
C ₂ S-۱۳۱	۲۲±۴-۱۳۰	--۱۲۹	۱۲۰-	۱۱۸-	-۱۲۷	-۱۲۵	۱۲۴-
C ₃ A-۱۳۹	۵.۷±۰.۵-۱۳۸	--۱۳۷		۱۲۸-	-۱۳۵	-۱۳۳	۱۳۲-
C ₄ AF-۱۴۸	۱۱±۱-۱۴۷	--۱۴۶	۱۴۵-	۱۳۶-	-۱۴۳	-۱۴۱	۱۴۰-



شکل ۱. دانه بندی ترکیبی سنگدانه های مورد استفاده طرح اختلاط
Fig. 1. Blended gradation of aggregates used in the mixture

باشد. آب مورد استفاده جهت ساخت نمونه ها در این پژوهش، آب آشامیدنی از سیستم لوله کشی آبرسانی شهری می باشد.

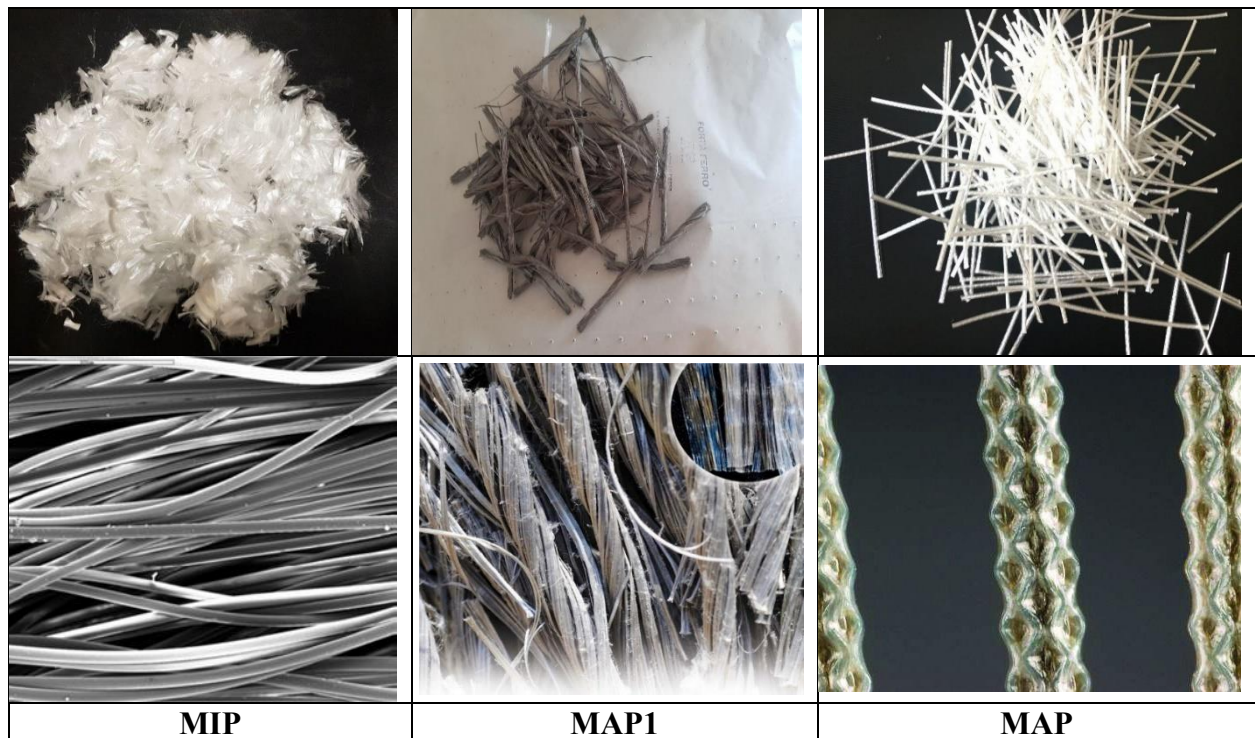
۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس ضابطه ی ۷۳۱، دستور العمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راهها،

تحقیق را در تصاویر میکروسکوپی دیجیتالی با بزرگنمایی ۱۵۰٪ و ۸۰۰٪ نشان می دهد. مشخصات فنی و مکانیکی این الیاف ارائه شده توسط تامین کننده^۱، در جدول ۲ دیده می شود.

آب مورد استفاده در مخلوط بتنی به طور کلی باید صاف و عاری از مقادیر زیاد مواد روغنی، اسیدی، قلیایی، املاح و دیگر مواد مضر

1 <https://drimco.com/fa>



شکل ۲. الیاف مورد استفاده

Fig. 2. Used fibers

جدول ۲. مشخصات فنی و مکانیکی الیاف مورد استفاده

Table 2. Technical and mechanical specification of used fibers

وزن مخصوص (gr/cm^3)	جذب آب	مدول الاستیسیته (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	حلالیت قلیایی (درصد)	قطر (mm)	طول (mm)	علامت اختصاری	شکل ظاهری	جنس الیاف	نوع الیاف
۰/۹۱	ندارد	۳/۵	۳۴۵	۰/۳	۰/۰۳	۱۲	MIP	تک رشته ای	پلی پروپیلن خالص	میکرو مصنوعی
۰/۹۱	ندارد	۶/۴	۶۹۳	۰/۳	۰/۵	۵۴	MAP1	در هم تابیده	پلی پروپیلن خالص	ماکرو مصنوعی
۰/۹۱	ندارد	۱۲	۶۴۰	۰/۳	۰/۷	۴۸	MAP2	برجسته ی پیوسته	پلی پروپیلن خالص	ماکرو مصنوعی

کاهش ترک خوردگی خمیری بود، طرح مخلوط بتن به طوری طرح گردید که علاوه بر رعایت الزامات دانه بندی، عیار سیمان و نسبت آب به سیمان طرح مخلوط بتن روسازی، قابلیت بالای ترک خوردگی خمیری در طرح مخلوط وجود داشته و اثر الیاف مختلف در کنترل

بوده است. جدول ۳، معیارهای در نظر گرفته شده، جهت تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی مطابق با الزامات ذکر شده در ضابطه ی ۷۳۱، را نشان می دهد. با توجه به هدف اصلی پژوهش، که بررسی اثر الیاف در کنترل و

جدول ۳. معیار های مربوط به طرح مخلوط بتن روسازی بتنی

Table 3. Criteria for mixture design of concrete pavement

مقدار	معیار
حداقل ۳۰ مگاپاسکال	مقاومت فشاری (نمونه استوانه‌ای)
حداقل ۴ مگاپاسکال	مقاومت خمشی (به روش تیر ساده با بارگذاری در یک سوم دهانه)
حداقل ۳۳۵ کیلوگرم در متر مکعب	عیار سیمان
حداکثر ۰/۵۳	نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)

جدول ۴. مشخصات و مقادیر وزنی طرح های اختلاط

Table 4. Specifications and weight amounts of mixtures

طرح اختلاط	شناسه طرح اختلاط	سیمان (kg/m ³)	سنگدانه ۵-۰ میلی‌متر (kg/m ³)	سنگدانه ۱۲-۵ میلی‌متر (kg/m ³)	سنگدانه ۱۲-۱۹ میلی‌متر (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	الیاف MIP (kg/m ³)	الیاف MAPI (kg/m ³)	الیاف MAP2 (kg/m ³)
شاهد	R	۴۶۰	۹۲۸	۴۰۳	۲۳۰	۲۳۰	-	-	-
الیافی	RMIP	۴۶۰	۹۲۸	۴۰۳	۲۳۰	۲۳۰	۰/۹۱	-	-
الیافی	RMAP1	۴۶۰	۹۲۸	۴۰۳	۲۳۰	۲۳۰	-	۰/۹۱	-
الیافی	RMAP2	۴۶۰	۹۲۸	۴۰۳	۲۳۰	۲۳۰	-	-	۰/۹۱

آورده شده است. نسبت های وزنی اختلاط مندرج در این جدول، بر اساس حالت اشباع با سطح خشک مصالح می‌باشد.

۳-۲- آزمایش‌ها

۳-۲-۱- آزمایش‌های تعیین مقاومت بتن

آزمایش‌های تعیین مقاومت بتن شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی، بر روی طرح های اختلاط شاهد و الیافی صورت گرفت. آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ملی ایران، شماره ۳۲۰۶ و بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلی‌متر انجام گردید. با استفاده از ضرایب ارائه شده در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد ۱۵۰*۳۰ تبدیل گردید. نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه، مورد آزمایش قرار گرفتند. تعداد سه نمونه‌ی مکعبی در هر سن مورد نظر، ساخته و آزمایش شد.

آزمایش تعیین مقاومت خمشی به روش تیر ساده با بارگذاری

و کاهش این ترک‌ها و مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر، ملموس‌تر گردد. بدین منظور نسبت آب به سیمان ۰/۵ انتخاب گردید. این نسبت آب به سیمان، علاوه بر افزایش قابلیت ترک‌خوردگی خمیری، باعث می‌شود تا اثر جمع‌شدگی خودزا^۱، که در مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان پایین رخ می‌دهد، کم شده و بر ترک‌خوردگی‌های به وجود آمده اثری نگذارد. همچنین، نسبت آب به سیمان انتخاب شده از حداکثر نسبت آب به سیمان مجاز مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱ که در جدول ۳ آورده شده است، کمتر می‌باشد. مقدار عیار سیمان، جهت افزایش جمع‌شدگی بتن، به مقدار ۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب گردید. این موضوع، توسط محققان دیگر نیز انجام شده است [۳۵، ۳۶]. مقدار حجمی مصرف الیاف، ۰/۱٪ حجمی بتن بوده و به طرح اختلاط بتن شاهد، افزوده گردید. بدین ترتیب، یک طرح اختلاط بتن شاهد و سه طرح اختلاط بتن الیافی ساخته و مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات و مقادیر وزنی طرح های اختلاط مورد بررسی، در جدول ۴

1 Autogenous shrinkage



شکل ۳. نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه
Fig. 3. Specimens fabricated in the laboratory

ترک‌خوردگی، به دلیل افزایش نرخ تبخیر سطحی ناشی از عوامل محیطی، برخوردار باشد. بنابراین، از مقدار حداقل رطوبت نسبی هوا و حداکثر سرعت جریان باد قابل ایجاد و کنترل در محفظه، استفاده شد. همچنین با توجه به حداقل دمای شرایط هوای گرم بر اساس مبحث نهم مقررات ملی (۳۰ درجه سانتی‌گراد) و حداکثر دمای قابل ایجاد و کنترل در محفظه، دمای ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، جهت بررسی اثر دمای محیطی بالا، بر عملکرد بتن الیافی در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی انتخاب شد. شرایط محیطی مورد نظر، توسط محفظه‌ی شبیه ساز عوامل جوی ایجاد شده و نمونه‌ها پس از ساخت داخل این محفظه قرار گرفتند. در هر بار آزمایش، یک نمونه‌ی شاهد و یک نمونه‌ی الیافی، در محفظه قرار داده شد. هر طرح اختلاط بتن شاهد و الیافی، دو مرتبه آزمایش شده و میانگین نتایج، لحاظ گردید. شکل ۴، مشخصات محفظه‌ی شبیه سازی عوامل جوی، قالب استاندارد دال بتنی و ابزار فولادی داخل آن و نمونه‌های در حال آزمایش را نشان می‌دهد.

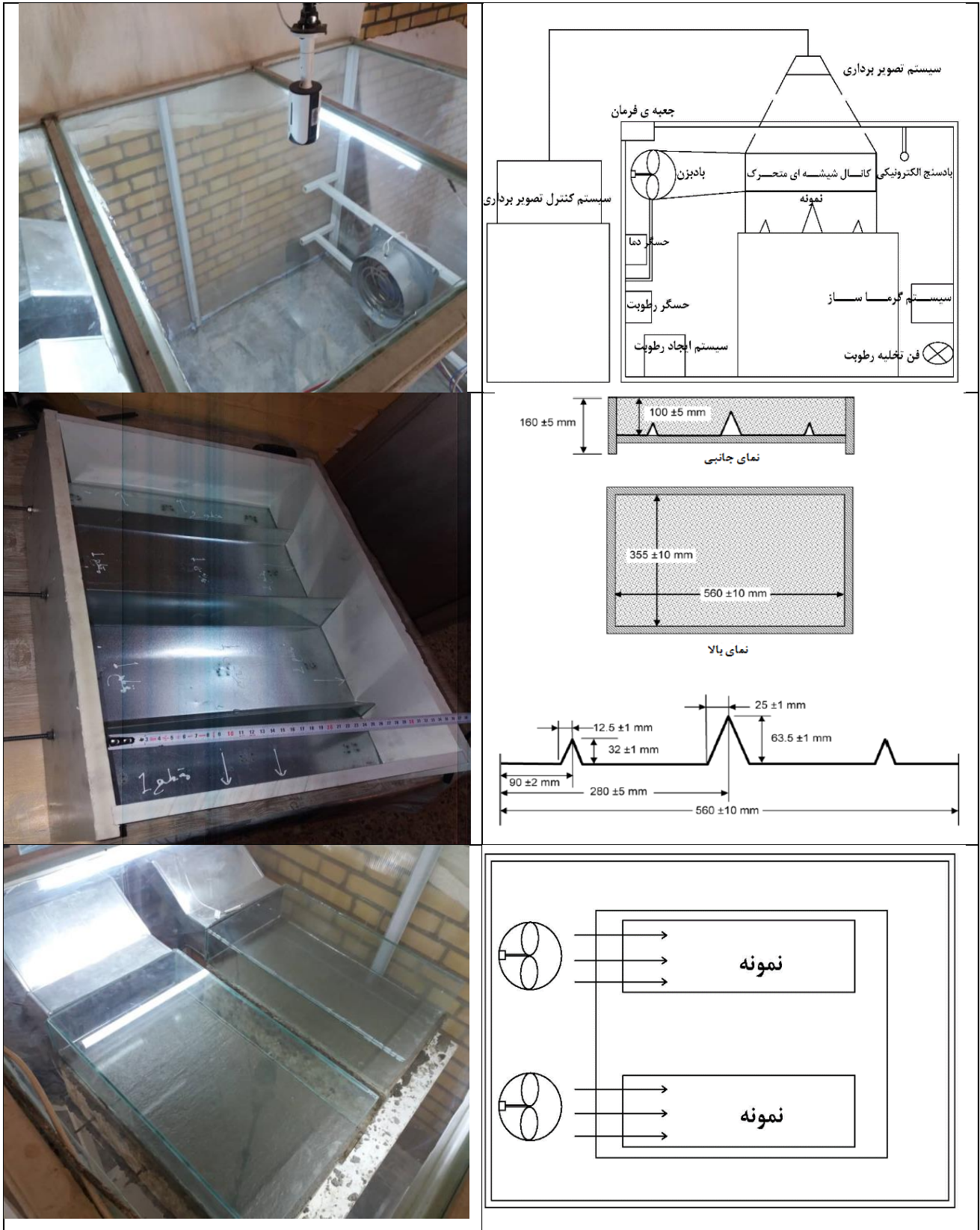
جهت ساخت نمونه‌های ارزیابی ترک‌خوردگی خمیری، ابتدا مصالح سنگی به همراه سیمان، به صورت خشک به مدت ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط می‌گردند. سپس آب اختلاط، به مخلوط بتنی افزوده شده و به مدت ۵ دقیقه عملیات اختلاط ادامه می‌یابد. در مورد نمونه‌های الیافی، الیاف در آخرین مرحله، به مخلوط افزوده شده و جهت پخش بهتر الیاف مخلوط، اختلاط به مدت ۲ دقیقه‌ی دیگر، انجام شد. قالب با استفاده از یک گریس روغنی درزگیری شده تا از فرار آب مخلوط در هنگام نمونه‌گیری و آزمایش جلوگیری گردد. همچنین، به منظور عدم چسبندگی بتن به قالب، از یک لایه روغن

در یک سوم دهانه طبق استاندارد ASTM C78 و بر روی تیرهای بتنی به ابعاد $100 \times 100 \times 400$ میلی‌متر (با طول مؤثر ۳۰۰ میلی‌متر جهت بارگذاری در دستگاه آزمایش) در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه انجام شد. تعداد سه تیر بتنی در هر سن، مورد آزمایش قرار گرفت. پس از ساخت نمونه‌ها بر طبق استانداردهای مربوطه، نمونه‌ها تا زمان رسیدن سن آزمایش مورد نظر، در محلول آب آهک اشباع نگهداری شدند. شکل ۳، نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه، جهت انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت بتن را نشان می‌دهد.

۲-۳-۲- آزمایش ارزیابی ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری بتن

ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی، بر اساس روش ارائه شده در استاندارد ASTM C 1579 ارزیابی گردید. در این روش، از یک قالب به ابعاد داخلی $100 \times 355 \times 560$ میلی‌متر استفاده می‌شود. جهت ایجاد قابلیت ترک‌خوردگی در نمونه از یک ابزار فولادی با دو قید در دو طرف و یک افزاینده‌ی تنش در مرکز به شکل مثلثی استفاده می‌شود. دال بتنی ساخته شده بر اساس این روش، در شرایط محیطی مورد نظر قرار گرفته و ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری بررسی و ارزیابی می‌گردد.

در این پژوهش، ترک‌خوردگی در هر طرح اختلاط، شامل یک طرح اختلاط شاهد و سه طرح اختلاط بتن الیافی، در شرایط محیطی با رطوبت نسبی هوای ۲۰٪، سرعت جریان باد ۳۰ کیلومتر بر ساعت و در دو دمای مختلف ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی شد. شرایط محیطی به گونه‌ای انتخاب گردید تا نمونه‌ها از حداکثر قابلیت



شکل ۴. مشخصات محفظه‌ی شبیه ساز عوامل جوی، قالب و ابزار فولادی استاندارد، نمونه‌های در حال آزمایش

Fig. 4. Properties of environmental simulator chamber, standard mold and steel form, specimens under testing

شده با نقاط، تشکیل می‌گردد. مساحت این محدوده ی بسته، که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌گردد، مساحت ترک‌خوردگی است. هر دو نقطه در دهانه‌ی ترک با استفاده از ابزار میان‌ه^۶ به یکدیگر متصل می‌شود. طول این خط، عرض ترک‌خوردگی بین دو نقطه بوده، و متوسط طول بین تمام نقاط در دو طرف محدوده‌ی ترک، متوسط عرض ترک‌خوردگی می‌باشد. وسط خط متصل شده بین نقاط در دو طرف محدوده‌ی ترک، با ابزار مسیر^۷ به یکدیگر متصل شده و طول این خط مسیر، طول ترک‌خوردگی است که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود. این فرآیند، برای هر قسمت ترک‌خوردگی در یک نمونه انجام می‌شود. متوسط عرض ترک‌خوردگی در یک نمونه، میانگین متوسط عرض ترک‌خوردگی تمام عکس‌های تحلیل شده از آن نمونه می‌باشد. همچنین مساحت و طول ترک‌خوردگی یک نمونه، مجموع مساحت و طول ترک‌خوردگی عکس‌های تحلیل شده از آن نمونه می‌باشد. این فرآیند، برای تمام نمونه‌های آزمایش شده، انجام شد. در شکل ۵، مراحل تحلیل یک عکس دیجیتال در نرم‌افزار، مشاهده می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد و الیافی در سنین ۷ و ۲۸ روزه، در شکل ۶ دیده می‌شود. با توجه به این نتایج، مشاهده می‌شود که افزودن الیاف به میزان ۰/۱ درصد حجمی به مخلوط بتنی، باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه در هر دو سن مورد بررسی شده است. افزودن الیاف به بتن، باعث تشکیل نواحی انتقال بین سطحی بیشتر در بتن شده که می‌تواند مقاومت فشاری آن را تحت تأثیر قرار دهد. اسلام و گاپتا^۸ [۲۶] در تحقیق خود بر روی اثر الیاف میکرو پلی‌پروپیلن، به نتایج مشابهی رسیدند. در تحقیق انجام شده توسط التوبات و همکاران^۹ [۲۵] بر روی اثر الیاف ماکروی مصنوعی نیز نتیجه‌ی مشابهی در کاهش مقاومت فشاری با افزودن الیاف ماکرو رسیدند. در حالی که مهرج و همکاران^{۱۰} [۳۸] با افزودن ۰,۲٪ الیاف ماکرو مصنوعی، شاهد افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ها بودند. این موضوع به دلیل شکل‌پذیری بیشتر نمونه‌ها در آزمایش شکست

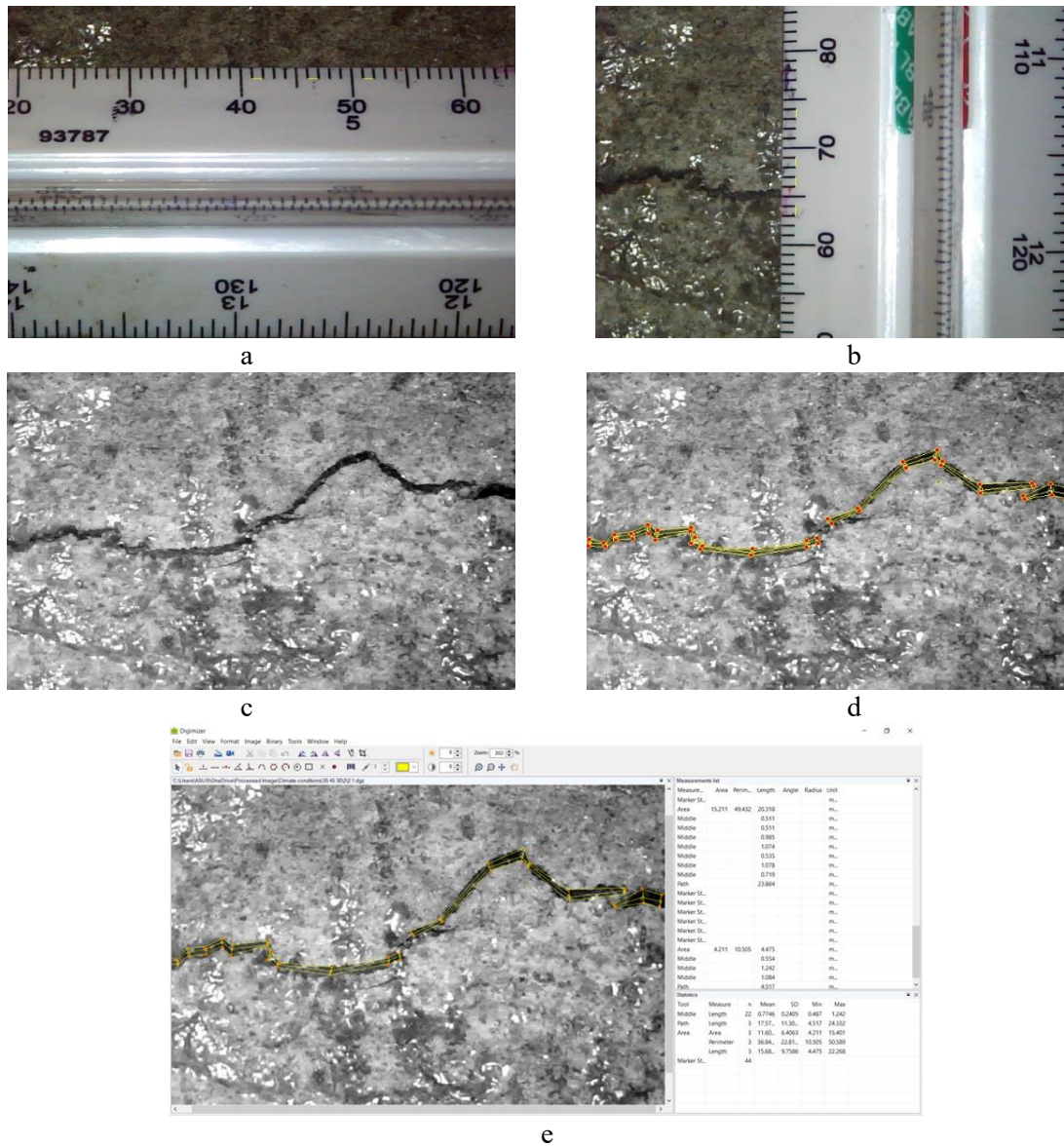
قالب استفاده شد. تعداد یک نمونه‌ی شاهد و یک نمونه‌ی الیافی، برای ارزیابی ترک‌خوردگی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. پس از تنظیم شرایط محیطی مورد نظر، نمونه‌ها داخل محفظه قرار گرفته و آزمایش شروع گردید.

مدت زمان آزمایش، جهت اطمینان از انجام کامل ترک‌خوردگی در نمونه‌ها در آزمایش، ۲۲ ساعت انتخاب شده و اندازه‌گیری مشخصات ترک‌خوردگی تمامی نمونه‌ها، پس از اتمام مدت زمان آزمایش در نظر گرفته شده، انجام گرفت. جهت اندازه‌گیری مشخصات ترک‌خوردگی، از روش تحلیل تصاویر، مطابق با استاندارد ASTM C 1579، استفاده گردید. دقت اندازه‌گیری با این روش، بر اساس استاندارد باید به میزان ۰/۰۵ میلی‌متر باشد. پس از گذشت ۲ ساعت از اتمام آزمایش، با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال متصل به رایانه، عکس‌های دیجیتالی از مسیر ترک‌خوردگی در فواصل ۴ سانتی‌متری گرفته شد. از هر قسمت ۴ سانتی‌متری، تعداد ۳ عکس دیجیتال گرفته شد. دو عکس، جهت کالیبره کردن عکس با یک مقیاس در دو جهت عمود بر هم و یک عکس به منظور ارزیابی ترک‌خوردگی استفاده گردید. این عکس‌ها جهت اندازه‌گیری متوسط عرض ترک‌خوردگی (M.C.W)^۱، طول ترک‌خوردگی (L_c)^۲ و مساحت ترک‌خوردگی (A_c)^۳، در نرم‌افزار تحلیل تصاویر [۳۷] Digimizer version 5.3.5، تحلیل شد. دو عکس دیجیتال گرفته شده از هر قسمت ترک‌خوردگی که در آن یک مقیاس با اندازه مشخص قرار داده شده، در دو جهت عمود بر هم، کالیبره گردید. نرم‌افزار، با استفاده از کالیبراسون انجام شده، محاسبات بعدی را انجام می‌دهد. جهت ارزیابی دقت اندازه‌گیری، اندازه‌ی یک فاصله‌ی مشخص از مقیاس، در نرم‌افزار محاسبه شده و با اندازه‌ی واقعی مقایسه گردید و اطمینان حاصل شد که دقت اندازه‌گیری با نرم‌افزار، حداکثر به میزان ۰/۰۵ میلی‌متر باشد. عکس سوم، جهت وضوح بهتر ترک‌خوردگی، به پیکسل‌های خاکستری و سیاه تبدیل شده و سپس تحلیل می‌گردد.

برای تحلیل ترک‌خوردگی هر تصویر، ابتدا اطراف محدوده‌ی ترک با استفاده از ابزار نشانه گذاری^۴، نقطه گذاری شده و با استفاده از ابزار تعیین محدوده ی بسته^۵، محدوده‌ی ترک‌خوردگی مشخص

6 Middle
7 Path
8 Islam & Gupta
9 Altoubat et al.
10 Mehrej et al.

1 Mean Crack Width
2 Length of Cracking
3 Area of Cracking
4 Marker
5 Area

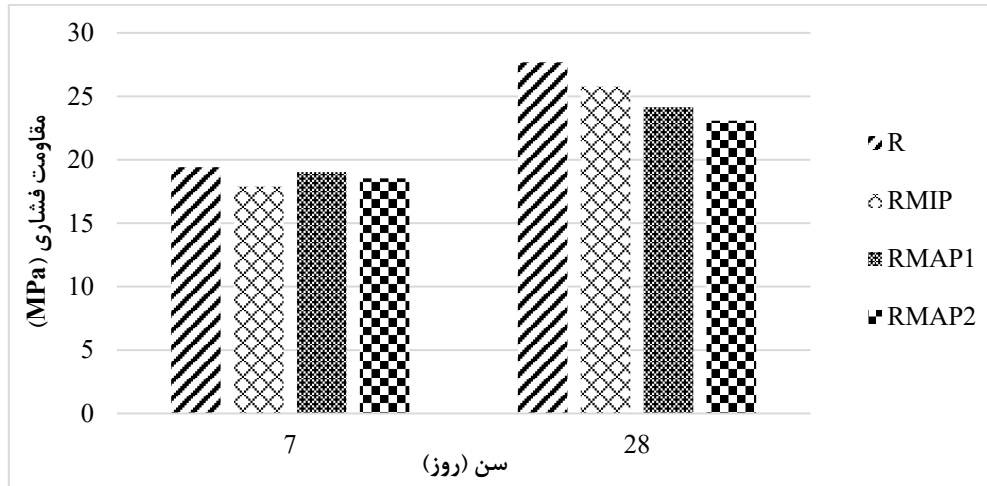


شکل ۵. فرایند اندازه‌گیری مساحت ترک خوردگی با استفاده از روش تحلیل تصویر. کالیبره کردن تصویر در دو جهت عمود بر هم (a, b)، تبدیل عکس به پیکسل‌های خاکستری و سیاه (c)، نقطه گذاری و تعیین محدود هی ترک خوردگی، (d)، محاسبه‌ی مساحت ناحیه‌ی ترک خوردگی، عرض دهانه‌ی ترک و طول مسیر ترک توسط نرم‌افزار (e)

Fig. 5. The process of measurement of cracking area using image analysis method: calibrating the image in two directions perpendicular to each other (a,b), converting the image to gray and black pixels (c), pointing and defining the cracking boundaries (d), calculation of area of cracking, cracking width and length of cracking in the software

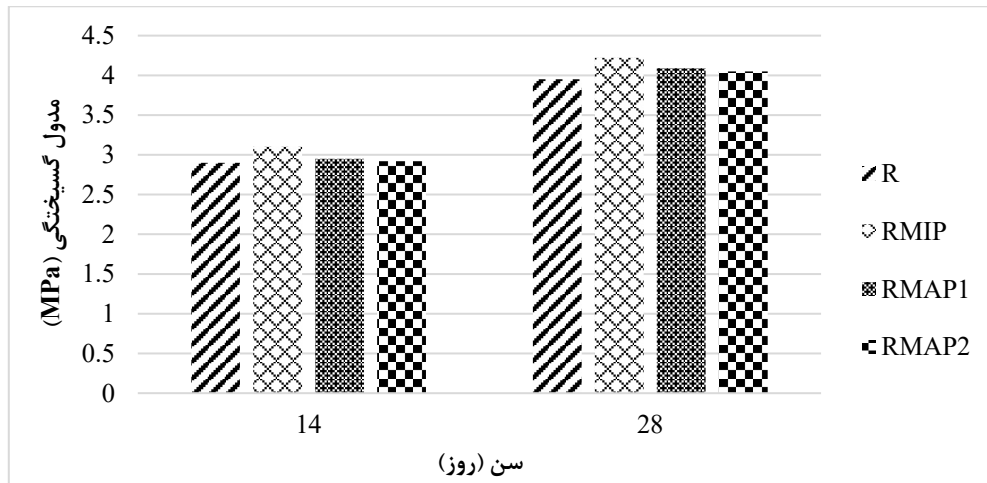
اثر منفی بر مقاومت فشاری بتن، بیشتر می‌گردد. همچنین میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های الیاف MIP، MAP1 و MAP2 نسبت به نمونه‌ی شاهد در سن ۷ روزه، به ترتیب ۸، ۲ و ۵ درصد، و نسبت به نمونه‌ی شاهد در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۷، ۱۳ و ۱۷ درصد می‌باشد. الیاف MAP1 و MAP2 میزان کاهش مقاومت

فشاری بیان شد. اما با افزایش بیشتر الیاف، مقاومت فشاری کاهش یافت. علت تفاوت نتایج آنان با نتایج تحقیق حاصل، در مقدار مصرف الیاف در بتن بوده به طوری که اثر افزایش شکل‌پذیری بتن در افزایش مقاومت فشاری بر اثر تشکیل نواحی انتقال بین سطحی در کاهش مقاومت فشاری، برتری پیدا کرده است. اما با افزایش بیشتر الیاف،



شکل ۶. مقاومت فشاری نمونه‌ی شاهد و نمونه‌های الیافی در سنین ۷ و ۲۸ روزه

Fig. 6. Compressive strength of reference and fiber-reinforced specimens at the age of 7 and 28 days



شکل ۷. مقاومت خمشی نمونه‌ی شاهد و نمونه‌های الیافی در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه

Fig. 7. Flexural strength of reference and fiber-reinforced specimens at the age of 7 and 28 days

آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف، مقاومت خمشی را به میزان چشمگیری افزایش نمی‌دهد. افزودن الیاف MIP، MAP1 و MAP2، باعث افزایش مدول گسیختگی بتن شاهد در سن ۱۴ روزه، به ترتیب به میزان ۰.۷، ۲ و ۱ درصد، و در سن ۲۸ روزه، به ترتیب به میزان ۰.۷، ۴ و ۳ درصد می‌شود. مقاومت خمشی به دست آمده از آزمایش، حداکثر نیروی وارد شده قبل از شکست نمونه می‌باشد. با توجه به این نتایج، دیده می‌شود که افزودن الیاف میکرو و ماکرو در درصد حجمی ۱، ۰٪، باعث افزایش قابل حس نیروی حداکثر قبل از گسیختگی بتن، نگردیده است. طعیف و همکاران^۱ [۳۹].

فشاری کمتری در سن ۷ روزه نسبت به الیاف MIP دارد. اما در سن ۲۸ روزه، الیاف میکرو، کاهش مقاومت فشاری کمتری نسبت به هر دو الیاف ماکرو دارد. اثر هر دو نوع الیاف ماکرو، نزدیک به هم بوده و اختلاف زیادی با یکدیگر ندارند. همچنین، میزان تفاوت کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف ماکرو، نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف میکرو، چشمگیر نبوده و عملکرد نسبتاً مشابهی از خود نشان دادند.

۳-۲- مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی بتن شاهد و الیافی در شکل ۷

1 Wtaife et al.

جدول ۵. نتایج ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در بتن شاهد و الیافی در دماهای مختلف

Table 5. Results of the evaluation of plastic shrinkage cracking in reference and fiber-reinforced specimens in different temperatures

طرح اختلاط	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	متوسط عرض ترک خوردگی (میلی‌متر)	طول ترک خوردگی (میلی‌متر)	مساحت ترک خوردگی (میلی‌متر مربع)
R	۳۵	۰.۸۹۱	۳۸۲.۶۰	۳۴۰.۶۳
	۴۰	۱.۰۸	۳۹۰.۴۰	۴۰۷.۲۶
RMIP	۳۵	۰.۳۴۵	۹۲.۱۱	۳۸.۷۶
	۴۰	۰.۴۲۶	۲۴۰.۸۵	۸۵.۶
RMAP1	۳۵	۰.۴۶۳	۱۰۰.۲۵	۴۳.۶۴
	۴۰	۰.۵۰۶	۱۴۲.۸۱	۶۴.۶۳
RMAP2	۳۵	۰.۴۰۵	۱۵۸.۱۳	۴۹.۲۴
	۴۰	۰.۴۹۲	۲۱۵.۶۴	۸۲.۲۷

دماهای مختلف در جدول ۵ آورده شده است. این نتایج شامل متوسط عرض ترک خوردگی، طول ترک خوردگی و مساحت ترک خوردگی، به دست آمده از آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در مخلوط بتنی شاهد و الیافی، پس از ۲۲ ساعت از زمان شروع آزمایش و در دو دمای مختلف، می‌باشد. با توجه به این نتایج، دیده می‌شود که افزایش دمای محیط، باعث افزایش مشخصات ترک خوردگی در نمونه‌ی بتن شاهد و نمونه‌های الیافی می‌گردد. با افزایش دما، نرخ تبخیر سطحی افزایش یافته و باعث تعادل سریع‌تر نرخ تبخیر و نرخ آب انداختگی در سطح بتن می‌گردد. در نتیجه شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که افزودن الیاف میکرو و ماکرو، باعث کاهش چشمگیر خصوصیات هندسی ترک خوردگی در دماهای بالا شده است. افزودن الیاف میکرو، مقاومت کششی بتن را افزایش داده و همچنین از گسترش ترک خوردگی جلوگیری می‌کند. الیاف ماکرو، با افزایش شکل‌پذیری و بهبود جذب انرژی در بتن، باعث بهبود عملکرد آن بعد از ترک خوردگی شده و در نتیجه، مانع از گسترش ترک می‌گردد.

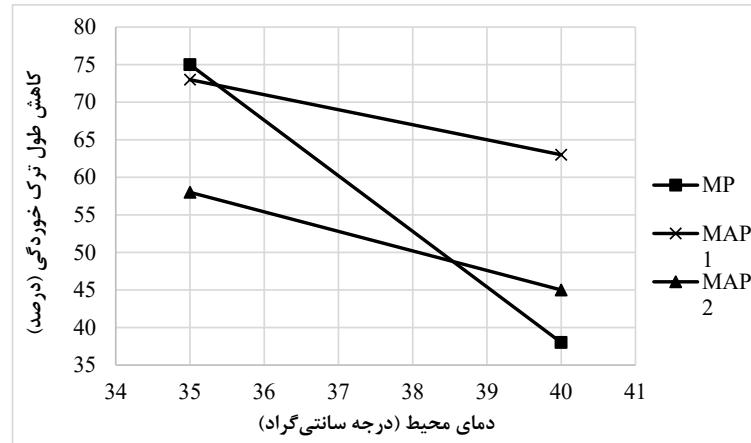
شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ میزان کاهش طول، متوسط عرض و مساحت ترک خوردگی نمونه‌های الیافی نسبت به نمونه‌های شاهد در دماهای مختلف و پس از ۲۲ ساعت از زمان شروع آزمایش، نشان می‌دهد. این نمودارها، مقدار درصد کاهش هر یک از مشخصات ترک خوردگی

افزایش مقاومت خمشی محسوسی در نمونه‌های حاوی الیاف میکرو پلی وینیل الکل در درصد مصرف کمتر از ۰.۲٪ مشاهده نکردند. رواسلر و همکاران^۱ [۴۰] نیز با افزودن ۰.۳۲٪ الیاف ماکرو مصنوعی پلی اتیلن، افزایش چشمگیری در مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی مشاهده نکردند. این نتایج با نتایج به دست آمده از این تحقیق در یک راستا بوده و تأثیر مقدار مصرف الیاف بر مقاومت خمشی را نشان می‌دهد. در تحقیق انجام شده بر روی اثر الیاف فلزی توسط سورلی و همکاران^۲ [۴۱]، افزایش چشمگیری در مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی این الیاف مشاهده شد که این موضوع می‌تواند به دلیل عملکرد مشابه الیاف فلزی و میلگرد های مسلح کننده در بتن باشد. افزودن الیاف میکرو، از گسترش ریزترک‌ها جلوگیری کرده و مقاومت خمشی را به صورت جزئی بهبود بخشیده، در مقابل الیاف ماکرو، با افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی بتن، قادر به افزایش کم نیروی حداکثری قبل از شکست می‌باشد. با توجه به نتایج این قسمت، نتیجه می‌شود که الیاف میکرو و ماکرو پلی‌پروپیلن در درصد مصرف ۰.۱٪، بر مقاومت خمشی بتن در هر دو سن مورد بررسی، اثر مثبت زیادی ندارد.

۳-۳- ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری

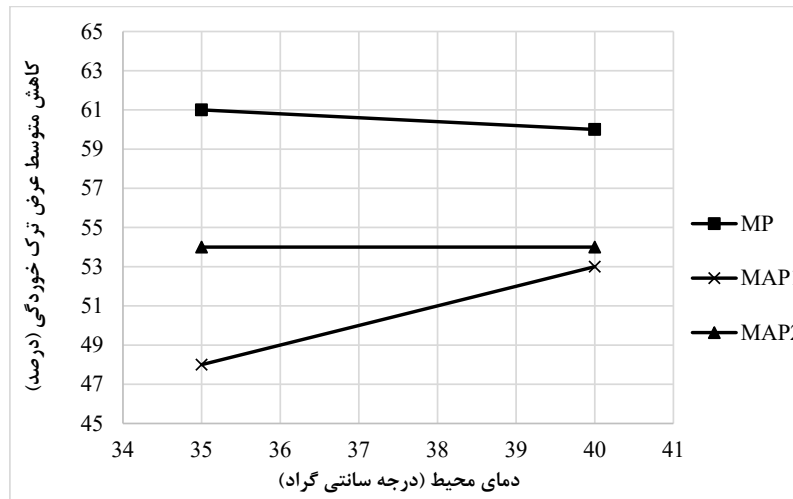
نتایج ارزیابی ترک خوردگی خمیری نمونه‌ی شاهد و الیافی در

1 Roesler et al.
2 Sorelli et al.



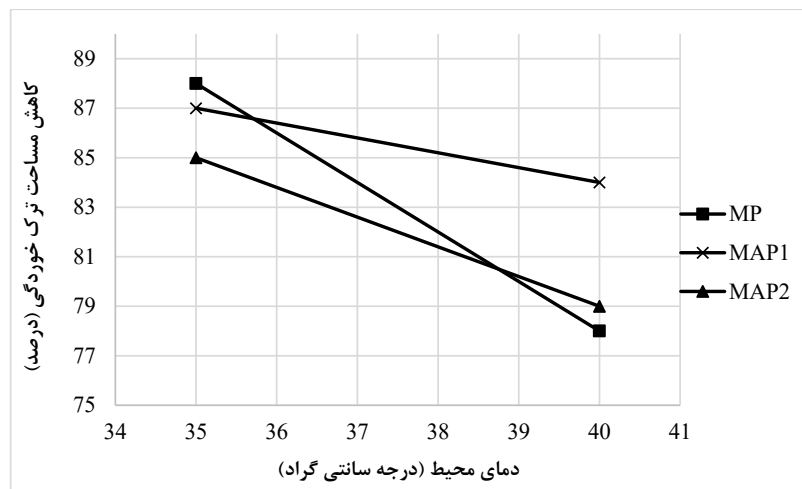
شکل ۸. کاهش طول ترک خوردگی نمونه‌های الیافی نسبت به نمونه‌ی شاهد در دمای مختلف

Fig. 8. Reduction of cracking length in fiber-reinforced specimen relative to the reference specimen in different temperatures



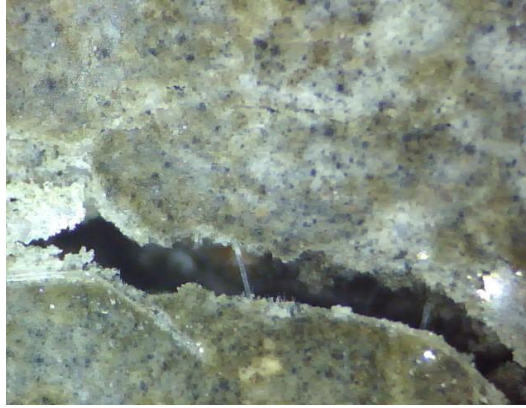
شکل ۹. کاهش متوسط عرض ترک خوردگی نمونه‌های الیافی نسبت به نمونه‌ی شاهد در دمای مختلف

Fig. 9. Reduction of mean cracks width in fiber-reinforced specimen relative to the reference specimen in different temperatures



شکل ۱۰. کاهش مساحت ترک خوردگی نمونه‌های الیافی نسبت به نمونه‌ی شاهد در دمای مختلف

Fig. 10. Reduction of area of cracking in fiber-reinforced specimen relative to the reference specimen in different temperatures



شکل ۱۱. تصویر گرفته شده با میکروسکوپ دیجیتال با بزرگنمایی ۱۶۰۰٪ از قرار گرفتن الیاف MIP در دهانه‌ی ترک خوردگی
Fig. 11. Images taken by digital microscope with 1600% zooming of placing of MIP fibers in crack opening

متغیرهای هندسی ترک خوردگی شده است. میزان کارایی الیاف در کاهش طول ترک خوردگی در اثر افزایش دما، بیشترین مقدار بوده است. همچنین، با توجه به این شکل‌ها، دیده می‌شود که افزایش دما باعث کمتر شدن اثر الیاف MAP2 در کاهش طول و متوسط عرض ترک خوردگی می‌شود.

بر اساس نتایج فوق، مشاهده می‌شود که اثر افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن به مقدار ۰٫۱٪ حجم بتن در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد، بهترین عملکرد در کاهش متغیرهای هندسی را نسبت به الیاف ماکرو دارد. اما با افزایش دما به مقدار ۴۰ درجه سانتی گراد، اثر این الیاف در کنترل طول ترک خوردگی، کاهش می‌یابد. الیاف MAP1 و MAP2 عملکرد بهتری در کاهش طول ترک خوردگی به خصوص در دماهای بالا داشته و این موضوع بر کاهش مساحت ترک خوردگی نیز تأثیر می‌گذارد. می‌توان از نتایج این طور استنباط کرد که در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد، الیاف میکرو پلی پروپیلن عملکرد خوبی در کاهش متغیرهای هندسی ترک خوردگی دارد. اما با افزایش دما به ۴۰ درجه سانتی گراد، این نوع الیاف عملکرد خوب خود در کاهش نسبی عرض ترک خوردگی را حفظ کرده، اما در کاهش نسبی طول ترک خوردگی عملکرد ضعیف تری نسبت به دمای ۳۵ درجه سانتی گراد دارد. الیاف ماکرو در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد، عملکرد ضعیف تری در کاهش متغیرهای هندسی، نسبت به الیاف میکرو پلی پروپیلن دارند. اما با افزایش دما، این نوع الیاف اثر بهتری در کاهش نسبی طول ترک خوردگی نسبت به الیاف میکرو دارد.

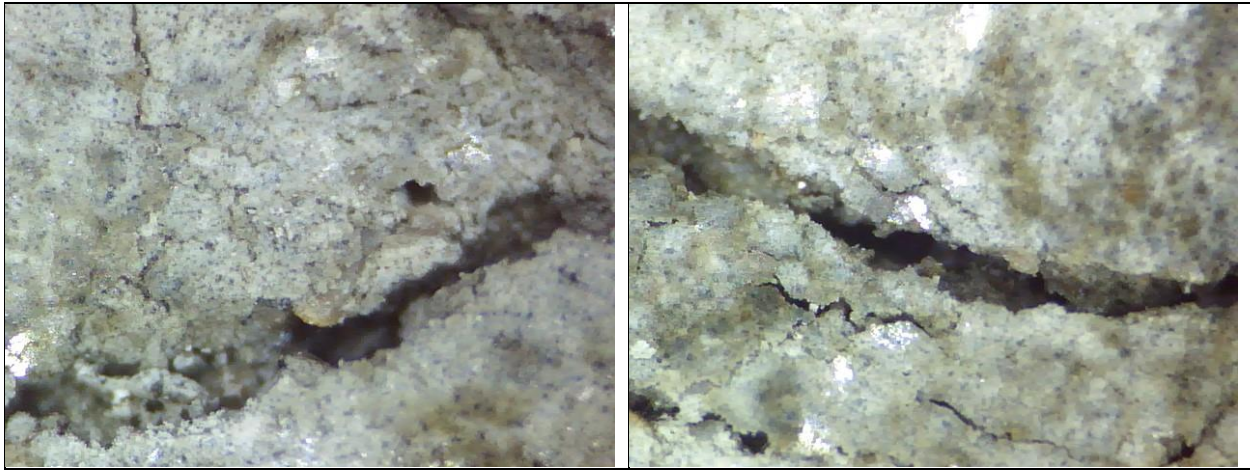
الیاف ماکرو، باعث بهبود شکل پذیری و جذب انرژی در بتن شده و مقاومت پس ماند آن را افزایش می‌دهد. این الیاف پس

نمونه‌های بتن الیافی را نسبت به نمونه‌ی بتن شاهد در دو دمای ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد نمایش می‌دهد. با توجه به نمودار ۸ و ۹، مشاهده می‌شود که طول ترک خوردگی با نرخ تندتری نسبت به متوسط عرض ترک خوردگی، کاهش می‌یابد. با توجه به این که مساحت ترک خوردگی وابسته به طول و عرض ترک خوردگی می‌باشد، این موضوع بر تغییرات کاهش مساحت ترک خوردگی (شکل ۱۰) تأثیر گذاشته و باعث تندتر شدن تغییرات کاهش این متغیر شده است.

با توجه به نمودارهای شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش دما، میزان کارایی الیاف MIP در کاهش طول ترک خوردگی، کمتر شده و باعث کمتر شدن کارایی آن در کاهش مساحت ترک خوردگی گردیده است. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش دما، تأثیر زیادی بر کارایی این نوع الیاف در کاهش متوسط عرض ترک خوردگی نداشته است.

این الیاف، با قرار گرفتن در دهانه‌ی ترک، مانع از گسترش عرض ترک خوردگی می‌گردد که به عملکرد پل زدگی الیاف معروف است (تصویر میکروسکوپی دیجیتالی با بزرگنمایی ۱۶۰۰٪ در شکل ۱۱). بدین ترتیب، تعداد ترک کمتر و با عرض کمتر (ریزترک) شکل می‌گیرند. اما با بیشتر شدن دمای محیطی و افزایش قابلیت شدت ترک خوردگی نمونه، این الیاف قادر به کنترل رشد طولی ترک خوردگی نبوده، اما عملکرد خود را در کنترل بازشدگی دهانه‌ی ترک حفظ می‌کند.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰، دیده می‌شود که افزایش دما باعث کمتر شدن کارایی الیاف MAP1 در کاهش



شکل ۱۲. تصویر گرفته شده با میکروسکوپ دیجیتالی با بزرگنمایی ۱۶۰۰٪ از دهانه‌ی ترک نمونه‌ی حاوی الیاف MAP1 (سمت راست) و الیاف MAP2 (سمت چپ)

Fig. 12. Images taken by digital microscope with 1600% zooming of crack opening in MAP1 fiber-reinforced specimen and MAP2 fiber-reinforced specimen

پلی‌پروپیلن، در شرایط دمایی مختلف، بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، نتایج زیر دیده می‌شود:

- میزان کاهش مقاومت فشاری مخلوط بتنی به دلیل افزودن الیاف میکرو و ماکرو در درصد مصرف ۱، ۰، ۱٪، با یکدیگر اختلاف زیادی نداشته و عملکرد نسبتاً مشابهی از خود نشان دادند.

- مدول گسیختگی مخلوط بتنی در اثر افزودن الیاف میکرو و ماکرو در درصد مصرف ۱، ۰، ۱٪، به میزان چشم‌گیری افزایش پیدا نکرد. - افزودن الیاف میکرو و ماکرو در هر دو شرایط دمایی، باعث کاهش مشخصات هندسی ترک‌خوردگی گردید.

- در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد الیاف میکرو، بهترین عملکرد را در کاهش مشخصات هندسی ترک‌خوردگی داشتند.

- در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، الیاف میکرو، عملکرد مناسب خود در کنترل عرض ترک‌خوردگی را حفظ کرده، اما عملکرد این الیاف در کنترل و کاهش طول ترک‌خوردگی، کاهش می‌یابد که این موضوع باعث کاهش عملکرد این الیاف در کنترل مساحت ترک‌خوردگی می‌گردد.

- عملکرد الیاف ماکرو، در کاهش طول ترک‌خوردگی در هر دو شرایط دمایی، بهتر از عملکرد آن در کنترل عرض ترک‌خوردگی می‌باشد. این موضوع باعث عملکرد مناسب این الیاف در کاهش مساحت ترک‌خوردگی گردید.

از شروع ترک‌خوردگی، از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کند. برخلاف الیاف میکرو، که به دلیل تعداد الیاف زیاد در یک حجم ثابت، احتمال قرارگیری در محل ترک‌خوردگی بیشتری دارد، الیاف ماکرو در دهانه‌ی ترک قرار نداشته و در قسمت زیرین جای می‌گیرد (تصاویر میکروسکوپی دیجیتالی با بزرگنمایی ۱۶۰۰٪ در شکل ۱۲). این موضوع باعث می‌شود تا عملکرد آنان در کنترل عرض ترک‌خوردگی کمتر از الیاف میکرو باشد. اما در صورت قرارگیری الیاف ماکرو در محل مستعد ترک‌خوردگی، ترک شکل نگرفته، در نتیجه، طول ترک‌خوردگی‌های به وجود آمده، کاهش می‌یابد. اما در صورت ایجاد ترک‌خوردگی در محل‌هایی که این نوع الیاف قرار نگرفته، ترک‌خوردگی رشد کرده و عملکرد الیاف در کاهش متوسط عرض این ترک‌خوردگی، کمتر می‌شود. در بین دو الیاف ماکرو بررسی شده، الیاف MAP1 (در هم تابیده) در کاهش طول ترک‌خوردگی اثر نسبی بهتری نسبت به الیاف MAP2 (برجسته پیوسته) دارد. با این وجود نتایج به دست آمده از این دو نوع الیاف، بسیار نزدیک به هم بوده و نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد.

۲- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن در کنترل و کاهش ترک‌خوردگی در بتن روسازی در مقایسه با اثر الیاف میکرو

- Infrastructure and Production Affairs 2017.
- [2] N.J. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance, Crc Press, 2014.
- [3] F. Faisal, B. Nitin, Effects of steel fibers and Silica fume on Compressive and flexural Strength of pavement Concrete, Lovely Professional University, 2017.
- [4] P.-m. Zhan, Z.-h. He, Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review, Constr. Build. Mater., 201 (2019) 676-690.
- [5] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, M. Plamondon, P. Lura, On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials, Cem. Concr. Res., 115 (2019) 251-263.
- [6] P. Ghoddousi, A.A.S. Javid, M.A. Etebari, Investigation of the effect of capillary pore pressure on paste shrinkage of concrete mixtures containing microsilica and metakaolin and its relationship with tensile strength of early ages., New Approaches in Civil Engineering, 3(2) (2019).
- [7] R. Combrinck, M. Kayondo, B. le Roux, W. de Villiers, W. Boshoff, Effect of various liquid admixtures on cracking of plastic concrete, Constr. Build. Mater., 202 (2019) 139-153.
- [8] R. Combrinck, W.P. Boshoff, Tensile properties of plastic concrete and the influence of temperature and cyclic loading, Cem. Concr. Compos., 97 (2019) 300-311.
- [9] P. Zhao, A.M. Zsaki, M.R. Nokken, Using digital image correlation to evaluate plastic shrinkage cracking in cement-based materials, Constr. Build. Mater., 182 (2018) 108-117.
- [10] A.A.S. Javid, Mechanisms and strategies to increase the durability of concrete against plastic settlement, plastic shrinkage and drying cracking, in: First National Conference on Concrete Durability, Tehran, Iran, 2018.
- [11] G. Moelich, R. Combrinck, A weather data analysis method to mitigate and prevent plastic shrinkage cracking, Constr. Build. Mater., 253 (2020) 119066.
- [12] D. Meyer, W.P. Boshoff, R. Combrinck, Utilising super absorbent polymers as alternative method to test plastic shrinkage cracks in concrete, Constr. Build. Mater., 248 (2020) 118666.

- در شرایط دمایی بالاتر (دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد)، عملکرد الیاف ماکرو در کنترل طول ترک خوردگی، از عملکرد الیاف میکرو، بهتر بود.

- با وجود عملکرد نسبی بهتر الیاف ماکرو در هم تابیده نسبت به الیاف ماکرو برجسته پیوسته در کنترل ترک خوردگی، اختلاف زیادی بین این دو الیاف دیده نشده و این موضوع نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، نتیجه می‌گردد، با وجود عملکرد بالای الیاف میکرو پلی‌پروپیلن در کنترل و کاهش ترک خوردگی خمیری در روسازی‌های بتنی، الیاف ماکرو نیز می‌تواند عملکرد مناسبی در کنترل این ترک‌ها در درصد مصرف پایین و یکسان با الیاف میکرو، داشته باشند. بنابراین می‌توان به جای استفاده از الیاف میکرو پلی‌پروپیلن، از الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن جهت کنترل و کاهش ترک خوردگی‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی، استفاده کرد. این موضوع با توجه به این که افزودن الیاف ماکرو، باعث بهبود شکل‌پذیری و جذب انرژی روسازی در سنین بالاتر می‌گردد، اهمیت استفاده از این الیاف را بیشتر می‌کند. جهت جبران ضعف عملکرد این الیاف در کنترل عرض ترک خوردگی‌های خمیری، می‌توان از ترکیب روش‌های عمل‌آوری مناسب مانند، پاشش مه آب^۱ در سطح روسازی، پاشش ماده عمل‌آوری، کاهش دمای سطح بتن با نصب سایه بان بر سطح روسازی در ساعات اوج گرما، استفاده کرد. همچنین در روسازی‌های بتنی الیافی که از الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن جهت بهبود خصوصیات مکانیکی، جذب انرژی شکست و شکل‌پذیری روسازی استفاده می‌گردد، به جای استفاده از الیاف میکرو پلی‌پروپیلن در کنار الیاف ماکرو، جهت کنترل ترک خوردگی‌های خمیری، می‌توان از اثر توأم الیاف ماکرو و روش‌های عمل‌آوری ذکر شده، جهت کنترل این ترک خوردگی‌ها در روسازی استفاده کرد که این موضوع می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها گردد.

مراجع

- [1] Design, Construction and Maintenance Manual for Highways Concrete Pavements No.731in, The Ministry of Road & Urban Development. Deputy of Technical,

1 Water fog spary

- under Freeze-Thaw cycling, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2019).
- [24] J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler, A.N. Amirkhanian, Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers, *Construction and Building Materials*, 135 (2017) 440-446.
- [25] S.A. Altoubat, J.R. Roesler, D.A. Lange, K.-A. Rieder, Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers, *Construction and Building Materials*, 22(3) (2008) 384-393.
- [26] G.S. Islam, S.D. Gupta, Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete, *Int. J. Sustainable Built Environ.*, 5(2) (2016) 345-354.
- [27] P. Soroushian, F. Mirza, A. Alhozajiny, Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete, *Materials Journal*, 92(5) (1993) 553-560.
- [28] Z. Bayasi, M. McIntyre, Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete, *Materials Journal*, 99(4) (2002) 337-344.
- [29] R. Gupta, N. Banthia, Correlating plastic shrinkage cracking potential of fiber reinforced cement composites with its early-age constitutive response in tension, *Materials and structures*, 49(4) (2016) 1499-1509.
- [30] J.-H.J. Kim, C.-G. Park, S.-W. Lee, S.-W. Lee, J.-P. Won, Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites, *Composites Part B: Engineering*, 39(3) (2008) 442-450.
- [31] R.P. Borg, O. Baldacchino, L. Ferrara, Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 108 (2016) 29-47.
- [32] S.-J. Lee, J.-P. Won, Shrinkage characteristics of structural nano-synthetic fibre-reinforced cementitious composites, *Composite Structures*, 157 (2016) 236-243.
- [33] A. Mazzoli, S. Monosi, E.S. Plescia, Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods, *Construction and Building Materials*, 101 (2015) 596-601.
- [13] E. Booya, K. Gorospe, H. Ghaednia, S. Das, Free and restrained plastic shrinkage of cementitious materials made of engineered kraft pulp fibres, *Constr. Build. Mater.*, 212 (2019) 236-246.
- [14] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, L. Baquerizo, P. Lura, Susceptibility of Portland cement and blended cement concretes to plastic shrinkage cracking, *Cem. Concr. Compos.*, 85 (2018) 44-55.
- [15] A.Z. Bendimerad, E. Rozière, A. Loukili, Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete, *Constr. Build. Mater.*, 121 (2016) 733-745.
- [16] M. Wyrzykowski, P. Trtik, B. Münch, J. Weiss, P. Vontobel, P. Lura, Plastic shrinkage of mortars with shrinkage reducing admixture and lightweight aggregates studied by neutron tomography, *Cement and Concrete Research*, 73 (2015) 238-245.
- [17] H.-G. Kwak, S. Ha, W.J. Weiss, Experimental and numerical quantification of plastic settlement in fresh cementitious systems, *Journal of materials in Civil Engineering*, 22(10) (2010) 951-966.
- [18] R. Combrinck, *Cracking of Plastic Concrete in Slab-Like Elements*, Stellenbosch: Stellenbosch University, 2016.
- [19] I. Bertelsen, L. Ottosen, G. Fischer, Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review, *Constr. Build. Mater.*, 230 (2020) 116769.
- [20] ASTM D7508 / D7508M-20, Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, in.
- [21] M. Kayondo, R. Combrinck, W. Boshoff, State-of-the-art review on plastic cracking of concrete, *Constr. Build. Mater.*, 225 (2019) 886-899.
- [22] H. Rooholamini, A. Hassani, M. Aliha, 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 (2018) 517-529.
- [23] A. Shafiepour, S. Shabani, F. Faezi, Effects of Dimensions and Amount of Polymer Fibers on the Strength and Durability of Roller-Compacted Concrete

- fiber reinforced concrete for rigid airfield pavement, in: Advanced Materials Research, Trans Tech Publ, 2011, pp. 627-633.
- [39] S. Wtaife, A. Alsabbagh, T. Eissa, E. Alshammari, A. Shaban, N. Suksawang, Analysis of Flexural Capacity of Fiber Reinforced Concrete Pavements, International Journal of Technology and Engineering Studies, 4(6) (2018) 203-210.
- [40] J.R. Roesler, S.A. Altoubat, D.A. Lange, K.-A. Rieder, G.R. Ulreich, Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs-on-ground, ACI materials journal, 103(1) (2006) 3.
- [41] L.G. Sorelli, A. Meda, G.A. Plizzari, Steel fiber concrete slabs on ground: a structural matter, ACI Structural Journal, 103(4) (2006) 551.
- [34] Chemical and Physical properties of Cement Type 1-425, in, Shargh Cement Co. https://www.sharghcement.ir/index.php?pgrec=produce_type1_425.
- [35] G. Olivier, R. Combrinck, M. Kayondo, W.P. Boshoff, Combined effect of nano-silica, super absorbent polymers, and synthetic fibres on plastic shrinkage cracking in concrete, Construction and Building Materials, 192 (2018) 85-98.
- [36] J. Branston, S. Das, S.Y. Kenno, C. Taylor, Influence of basalt fibres on free and restrained plastic shrinkage, Cement and Concrete Composites, 74 (2016) 182-190.
- [37] Image Analysing Software, Digimizer, in, MedCalc Software's VAT registration number is BE 0809 344 640. <https://www.digimizer.com/index.php>.
- [38] T. Merhej, L.L. Cheng, D.C. Feng, Polypropylene

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. J. Vaziri Kang Olyaei, H. Fazaeli, Investigation of Comparative Effect of Macro and Micro Polypropylene Fibers on Controlling or Mitigation of Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Pavements in High-Temperature Conditions, Amirkabir J. Civil Eng., 53(1) (2021) 3-20.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18767.6957](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18767.6957)

