

ارزیابی اثر مقایسه ای الیاف ماکرو پلی پروپیلن و میلگرد های مسلح کننده در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی

محمد رضا حاجی زاده^۱، ابوالفضل حسنی^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

۲- گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* hassani@modares.ac.ir

چکیده

کاهش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی با استفاده از مواد و مصالح نوین و مقایسه با روش های سنتی با استفاده از روش های تحلیل نوین، می تواند باعث افزایش دوام و بهبود عملکرد روسازی بتنی گردد. تحقیق حاضر به بررسی اثر مقایسه ای الیاف ماکرو پلی پروپیلن و میلگرد های مسلح کننده در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی می پردازد. شدت ترک خوردگی در مخلوط بتنی شاهد، حاوی شبکه فولادی در فواصل ۱۰۰*۱۰۰ میلیمتر و حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقدار $1/8 \text{ Kg/m}^3$ مطابق با روش استاندارد ASTM C1579 ارزیابی گردید. نتایج حاکی از آن بود که هر دو عناصر مسلح کننده باعث کاهش چشمگیر مساحت ترک خوردگی ترک خوردگی تا میزان ۴۰٪ در بتن حاوی شبکه و ۶۸٪ در بتن الیافی می گردد. طول ترک خوردگی بیشتر از متوسط عرض ترک خوردگی تغییر پیدا می کند. رفتار ترک خوردگی بتن حاوی شبکه فولادی با رفتار ترک خوردگی بتن الیافی مشابه بوده، در نتیجه الیاف ماکرو پلی پروپیلن جایگزین مناسب شبکه فولادی می تواند تلقی گردد. همچنین دیده شد که اثر الیاف در کاهش ترک خوردگی بیشتر از اثر شبکه فولادی است.

کلمات کلیدی: روسازی بتنی، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، شبکه فولادی، الیاف ماکرو پلی پروپیلن، اثر مقایسه ای.

دوام و عمر خدمت دهی بیشتر روسازی های بتنی نسبت به روسازی های آسفالتی، موضوعی بوده که همواره به عنوان یکی از مزیت های مثبت این نوع روسازی نسبت به روسازی آسفالتی مطرح گردیده و منجر به ترغیب متولیان و مجریان صنعت روسازی کشور به استفاده از این نوع روسازی می گردید. با این حال این مورد همیشه مورد بحث بوده است که تداوم خدمت دهی روسازی بتنی زمانی یک امتیاز مثبت محسوب شده که روسازی بتنی دچار خرابی کمتری گردد. یکی از عواملی که همواره دوام روسازی های بتنی را تهدید کرده، ترک خوردگی در دال بتنی می باشد [۱]. ترک خوردگی در بتن محلی برای ورود آب، روغن و دیگر مواد خورنده به داخل روسازی بوده، که علاوه بر تخریب بتن، باعث خوردگی میلگرد های مسلح کننده می گردد. در نتیجه دوام و سطح خدمت دهی روسازی بتنی کاهش می یابد [۲، ۳]. ترک خوردگی در روسازی بتنی، همچنین زمینه ی رشد و گسترش ترک خوردگی های بیشتر در بتن را فراهم کرده و باعث تخریب موضعی و یا کلی در روسازی گردد. از این نظر، اهمیت در نظر گرفتن عوامل ترک خوردگی های مختلف در روسازی به منظور افزایش دوام و میزان خدمت دهی آن نمایان می گردد [۴، ۵].

یکی از عوامل ایجاد ترک خوردگی در روسازی های بتنی، جمع شدگی خمیری در دال بتنی است. پس از اجرای دال بتنی، مصالح تشکیل دهنده ی بتن متاثر از تفاوت جرم موجود و نیروی جاذبه، نشست می کنند. این عمل باعث حرکت آب داخل مخلوط بتنی و انتقال آن از طریق منافذ داخلی به سطح بتن می گردد. این فرآیند آب انداختگی^۱ مخلوط بتنی نامیده می شود [۶-۱۴]. نرخ آب انداختگی در بتن به عوامل مختلفی شامل نسبت آب به مواد سیمانی، نوع و میزان سیمان مصرفی و میزان سنگدانه های ریز در مخلوط بتنی بستگی دارد. در طرف مقابل، شرایط محیطی محل اجرای روسازی، باعث ایجاد فرآیند تبخیر سطحی در دال بتنی می شود. میزان نرخ تبخیر به عوامل مختلف شامل دمای محیطی، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد دارد. پس از برابری نرخ تبخیر با نرخ آب انداختگی در سطح دال بتنی، لایه ی آب تزریقی از داخل بتن حذف شده و فشار های آب حفره ای منفی (مویینگی) در سطح بتن شکل می گیرد. این فشار های منفی باعث ایجاد جمع شدگی در بتن شده که در صورت مقید بودن سازه ی بتنی، تنش های کششی در سطح بتن شروع به شکل گیری می کند [۱۵-۲۳]. عوامل مقید کننده در روسازی بتنی می تواند شامل سنگدانه های درشت، سطح اساس دانه ای یا تثبیتی و میلگرد های موجود در دال بتنی بوده که از حرکت روسازی ناشی از جمع شدگی جلوگیری می کند. با توجه به پایین بودن مقاومت کششی بتن در ساعات اولیه پس از ساخت، میزان تنش های کششی از مقاومت کششی بتن تجاوز کرده و ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در بتن را به وجود می آورد [۲۴-۲۸]. جمع شدگی خمیری بیشتر در سازه های بتنی مسطح، رخ می دهد. این موضوع باعث اهمیت بیشتر این نوع ترک خوردگی در روسازی های بتنی نسبت به دیگر سازه های بتنی می گردد.

یکی از نیرو های مقاوم در برابر نیروی های محرک (تنش های کششی) ناشی از عوامل مختلف مانند جمع شدگی خمیری، عناصر مسلح کننده شامل میلگرد های فولادی است. این میلگرد ها می توانند مقاومت کششی بتن ساده را افزایش داده و از گسترش و رشد ترک خوردگی های مختلف در سازه ی بتنی جلوگیری کند. با این حال وجود مواردی باعث می شده تا این عناصر مسلح کننده توانایی انجام کنترل ترک خوردگی در بتن را به طور کامل نداشته باشد. در سازه های بتنی، به منظور جلوگیری از خوردگی و زنگ زدگی میلگرد های فولادی، از پوشش بتنی استفاده می شود. این پوشش بتنی، خود غیر مسلح بوده در نتیجه همواره در معرض ترک خوردگی قرار دارد. پس از ایجاد ترک در پوشش بتنی، زمینه ی ورود آب و دیگر موارد خورنده به داخل بتن فراهم شده و منجر به خوردگی میلگرد ها می شود. در نتیجه از سطح مقطع میلگرد ها کاسته شده و باعث کاهش عملکرد میلگرد در کنترل و کاهش ترک خوردگی در بتن می گردد [۲۹]. این موضوع در روسازی های بتنی که از میلگرد های مسلح کننده استفاده می شود، اهمیت می یابد.

با توجه به موضوع مطرح شده، محققان و متخصصان صنعت بتن، مطالعات متعددی در زمینه ی استفاده از دیگر رویکردها و روش های کنترل و کاهش ترک خوردگی در بتن انجام دادند. یکی از این رویکردها، استفاده از الیاف مختلف در بتن است.

^۱ Bleeding

الیاف در مخلوط های بتنی باعث مسلح سازی آن در نقاط و جهات مختلف شده، در نتیجه مقاومت کششی بتن را افزایش می دهد. همچنین، الیاف باعث افزایش مقاومت خمشی، مقاومت در برابر ضربه و بهبود خصوصیات جذب انرژی در بتن می شود [۳۰-۳۴]. در بین الیاف های مختلف، الیاف های مصنوعی بر پایه ی پلی پروپیلن به دلیل خصوصیات مقاومتی و دوامی مناسب و سادگی بیشتر در تولید و تهیه در مقیاس انبوه، بیشتر از دیگر الیاف های موجود در صنعت، مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. از نظر خصوصیات مقاومتی و هندسی، این الیاف در دو گروه شامل الیاف های میکرو و ماکرو پلی پروپیلن تولید و استفاده می شود. الیاف های ماکرو پلی پروپیلن به دلیل خصوصیات مقاومتی بالاتر، عملکرد مناسب تر و سادگی بیشتر در تولید آن نسبت به الیاف میکرو پلی پروپیلن، مورد توجه بیشتری واقع شده است [۲۲].

استفاده از الیاف مصنوعی بر پایه ی پلی پروپیلن در کنترل و کاهش ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری در بتن، توجه برخی از محققان را به خود جلب کرده است [۳۴، ۳۵]. به عنوان مثال، مورا و همکاران [۳۶]، به بررسی اثر الیاف های مختلف بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی پرداختند. الیاف مورد استفاده در این تحقیق شامل سه نوع الیاف مصنوعی و دو الیاف فلزی بوده که به مخلوط بتنی شاهد افزوده گردید. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد مناسب الیاف فولادی دو سر قلاب در کنترل و کاهش ترک خوردگی در مخلوط های بتنی بود. در تحقیق انجام شده توسط ما و همکاران [۳۷]، تاثیر الیاف مصنوعی بر پایه ی پلی پروپیلن با خصوصیات هندسی مختلف بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در ملات های سیمانی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که در بین الیاف های مصنوعی با هندسه ی متفاوت، الیاف مصنوعی با سطح مقطع دایره ای، تاثیر بیشتری در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری داشت. کی و همکاران [۳۸] اثر یک نوع الیاف میکرو پلی پروپیلن و یک نوع الیاف ماکرو پلی پروپیلن در کنترل و کاهش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی را با استفاده از روش تحلیل تصاویر مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق عملکرد الیاف میکرو پلی پروپیلن در کنترل و کاهش ترک خوردگی مناسب تر از عملکرد الیاف ماکرو پلی پروپیلن مشاهده شد. همچنین دیده شده که الیاف میکرو پلی پروپیلن باعث کاهش بیشتر نشست بتن و الیاف ماکرو پلی پروپیلن باعث افزایش نرخ آب انداختگی در مخلوط های بتنی گردید. بانثیا و همکاران [۳۹] به ارزیابی تاثیر طول، قطر و هندسه ی الیاف پلی پروپیلن در تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی پرداختند. در این تحقیق ۴ نوع الیاف مصنوعی بر پایه ی پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف مورد نظر قرار گرفت. مشاهده شد که الیاف ریز تر و با طول بیشتر، عملکرد مناسب تری در کنترل ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در بتن دارند. برتلسن و همکاران [۱۴] به بررسی تاثیر الیاف مصنوعی بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های سیمانی پرداختند. در این تحقیق از دو نوع الیاف شامل الیاف مصنوعی میکرو پلی پروپیلن و الیاف پلی اتیلن بازیافتی پرداختند. نتایج نشان داد که با وجود تاثیر مناسب الیاف بازیافتی، افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف پایین (۰/۱ درصد حجمی) عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. در این تحقیق، اثر شبکه ی فولادی بر تغییرات ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری مورد مطالعه قرار نگرفت. همچنین، مخلوط های بتنی شاهد و الیافی با یکدیگر مقایسه شده اما با مخلوط های بتنی حاوی شبکه ی فولادی مقایسه صورت نگرفت. الیویر و همکاران [۴۰] در تحقیق خود بیان کردند که الیاف میکرو پلی پروپیلن در کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی موثر هستند. در این تحقیق نیز اثر شبکه ی ساخته شده از فولاد بر تغییر رفتار ترک خوردگی مورد ارزیابی قرار نگرفت و تنها اثر الیاف میکرو پلی پروپیلن در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری ارزیابی شد. برخی از محققان،

^۲ Mora et al.

^۳ Ma et al.

^۴ Qi et al.

^۵ Banthia et al.

^۶ Bertelsen et al.

^۷ Olivier et al.

تاثیر الیاف ماکرو پلی پروپیلن بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی را مورد بررسی قرار دادند. به عنوان مثال، مازولی و همکاران^۴ [۴۱] الیاف ماکرو پلی پروپیلن و ماکرو پلی اتیلن در کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری عملکرد مناسبی از خود نشان داده به طوری که باعث تاخیر در شروع ترک خوردگی و کاهش عرض ترک خوردگی گردید. در این تحقیق که یکی از مطالعات جامع در زمینه ی بررسی اثر الیاف ماکرو مختلف، از جمله ماکرو پلی پروپیلن در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بوده، اثر میلگرد و شبکه های فولادی در کاهش این ترک خوردگی ها، مورد بررسی قرار نگرفت. همچنین، مقایسه نگردید که در مقایسه با میلگرد های فولادی، الیاف ماکرو مورد نظر در تحقیق تا چه میزان توانایی کنترل و کاهش ترک خوردگی در مخلوط های بتنی را دارند. نکته ی دیگر که در اکثر تحقیقات انجام شده مورد بررسی قرار نگرفته، ارزیابی ترک خوردگی مخلوط های بتنی بوده که در ساخت روسازی های بتنی استفاده شده و از ضوابط و معیار های این سازه های بتنی پیروی کند.

بررسی پیشینه ی پژوهش نشان می دهد که ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری یکی از عوامل شایع ترک خوردگی در روسازی های بتنی که می تواند باعث کاهش دوام و سطح خدمت دهی در این سازه ها گردد. دیده شد که استفاده از مواد نوین می تواند در کنترل و کاهش شدت این ترک خوردگی ها موثر واقع شود. الیاف مورد استفاده در مخلوط بتنی یکی از رویکردهای نوین در این زمینه است. در بین الیاف های مختلف، در این بین، الیاف ماکرو پلی پروپیلن به دلیل مشخصه های مقاومتی بالا و آسان تر بودن تولید آن، می تواند الیاف های مناسب تری به منظور استفاده در روسازی های بتنی باشد. با وجود انجام برخی از تحقیقات در زمینه ی استفاده ی الیاف ماکرو پلی پروپیلن جهت کنترل و کاهش ترک خوردگی در بتن، تحقیق کمتری به ارزیابی اثر این الیاف در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی پرداخته است. همچنین، تحقیق کمتری به ارزیابی اثر میلگرد های مسلح کننده بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی بتنی کرده است. مقایسه ی این الیاف در شرایط یکسان، با میلگرد های مسلح کننده از دیگر موارد با اهمیت بوده که نیازمند بررسی بیشتر است. بررسی این موارد از چند جهت، حائز اهمیت است. در ابتدا، استفاده از شبکه ی فولادی با وجود مزایایی، با ملاحظات اقتصادی به همراه بوده و همچنین مشکلات اجرایی را افزایش داده و زمان پروژه را بیشتر می کند. از طرف دیگر، استفاده از میلگرد خود می تواند باعث ایجاد ترک خوردگی ناشی از نشست خمیری می شود. در صورت امکان جایگزین نمودن شبکه ی فولادی با الیاف ماکرو پلی پروپیلن، می تواند علاوه بر کاهش هزینه و زمان اجرایی، از افزایش بیشتر شدت ترک خوردگی جلوگیری نمود. پس از انجام این تحقیق در ابتدا استعداد ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی مورد استفاده در روسازی های بتنی ارزیابی می شود. سپس، اثر هر یک از عناصر مسلح کننده شامل شبکه ی فولادی و الیاف در کنترل و کاهش ترک خوردگی بررسی می شود. در انتها، اثر مقایسه ای این عناصر مسلح کننده مورد بررسی قرار می گیرد. نوآوری تحقیق حاضر، ارزیابی ترک خوردگی مخلوط های بتنی مورد استفاده در روسازی های بتنی با استفاده از روش تحلیل تصاویر دیجیتال، بررسی اثر الیاف ماکرو پلی پروپیلن در روسازی های بتنی در کاهش این ترک خوردگی، استفاده از شبکه ی فولادی در روسازی های بتنی و ارزیابی ترک خوردگی خمیری و مقایسه ی اثر این دو عنصر مسلح کننده با یکدیگر در روسازی های بتنی می باشد. بررسی این موارد می تواند کمک شایانی به افزایش دوام و بهبود عملکرد روسازی های بتنی کرده، از این جهت تحقیق حاضر به بررسی موارد ذکر شده می پردازد.

۲. روش تحقیق

۱.۲. مصالح

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، شامل سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان شرق مشهد با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود. مشخصات تحلیل شیمیایی این سیمان در جدول ۱ دیده می شود.

^۴ Mazzoli et al.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ دو مورد استفاده در این تحقیق

Table 1: Chemical characteristics of type 2 Portland cement used in this research

K ₂ O	Na ₂ O	IR	SO ₃	L.O.I	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	مشخصه ی شیمیایی
۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۳	۲/۰	۱/۴	۲/۹	۶۲/۵	۳/۹	۴/۶	۲۱/۰	مقدار (%)
-	-	<۰/۷۵	<۳	<۳	<۵	-	<۶	<۶	>۲۰/۰	مقدار الزامات مقرارت ملی ایران شماره ی ۳۸۹

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق، شامل مصالح سنگی آهکی و با حداکثر اندازه ی ۱۲٫۵ میلیمتر بود. مصالح سنگی ریزدانه با اندازه ی ۵-۰ میلیمتر، با جذب آب، مدول نرمی و چگالی نسبی به ترتیب به میزان ۱٫۰۸ درصد، ۳/۴۶ و ۲/۶۳ استفاده شد. مصالح سنگی درشت دانه در گروه ابعادی شامل ۵-۱۲ میلیمتر بود. چگالی نسبی و جذب آب مصالح سنگی ۵-۱۲ میلیمتر به ترتیب به میزان ۲/۶۳ و ۰/۷ درصد بود.

الیاف مورد استفاده در این تحقیق، شامل الیاف ماکرو مصنوعی بر پایه ی پلی پروپیلن با شکل تابیده با نام تجاری پلی تار ماندگار و مطابق با استاندارد ASTM C1116 و ASTM D7508 بود. در شکل ۱، شکل ظاهری این الیاف مشاهده می شود. مشخصات مکانیکی و مقاومتی این الیاف در جدول ۲ دیده می شود.



شکل ۱: الیاف ماکرو ی مصنوعی بر پایه ی پلی پروپیلن با شکل رشته های تابیده در هم

Figure 1: Polypropylene-based macro synthetic fibers with the form of twisted

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف ماکرو ی مصنوعی تابیده مورد استفاده در این تحقیق

Table 2: Physical and mechanical characteristics of macro synthetic fibers used in this research

ماکرو مصنوعی	نوع الیاف
پلی پروپیلن/پلی اولفین	جنس الیاف
تابیده در هم	شکل ظاهری
۵۴	طول (mm)
۰/۴۵	قطر (mm)
۶۰۰-۵۵۰	مقاومت کششی (MPa)
۶-۵	مدول الاستیسیته (GPa)
ندارد	جذب آب
۰/۹۱	وزن مخصوص (gr/cm ³)

شبکه فولادی مورد استفاده در این تحقیق، از جنس فولاد با مقاومت نهایی ۳۰۰ مگاپاسکال و قطر ۴ میلیمتر بود. این شبکه ها در شبکه های با ابعاد ۱۰۰*۱۰۰ میلیمتر ساخته شده که در طرح اختلاط بتن شاهد مورد استفاده قرار خواهد گرفت. میزان قطر در نظر گرفته شده برای شبکه ی فولادی با فواصل مشخص در دال بتنی با ابعاد ذکر شده در روش تحقیق، به گونه ای در نظر گرفته شد تا سطح فولاد به کار رفته نسبت به سطح دال بتنی، معادل با سطح فولاد معمول به کار رفته نسبت به سطح دال بتنی معمولی، مطابق با ضابطه ی ۷۳۱ [۴۲] باشد.

آب مورد استفاده در ساخت مخلوط های بتن روسازی بتنی باید صاف و عاری از هرگونه مواد زائد، مطابق با ضابطه ی ۷۳۱ باشد. در این تحقیق از آب آشامیدنی محل آزمایشگاه به منظور ساخت مخلوط های بتنی استفاده گردید.

۲.۲. طرح اختلاط روسازی بتنی

طرح اختلاط بتن روسازی بتنی با استفاده از ضوابط ذکر شده در ضابطه ی ۷۳۱، دستور العمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه ها، انجام گرفت. در این ضابطه، معیار هایی به منظور تعیین نسبت های اختلاط بتن مورد استفاده در روسازی بتنی ذکر شده که نیاز است در طرح اختلاط بتن روسازی بتنی مد نظر قرار گیرد. در جدول ۳، معیار های تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه ی ۷۳۱، دیده می شود.

جدول ۳: معیار های تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه ی ۷۳۱

Table 3: Criteria for determining concrete mixtures proportions for concrete pavement according to Rule 731

معیار	مقدار	روش آزمایش
مقاومت فشاری	۳۰/۳	ASTM C39
مقاومت خمشی (به روش تیر ساده بارگذاری در یک سوم دهانه)	۴/۱	ASTM C78
حداقل سیمان (Kg/m^3)	۳۲۰- در شرایط بدون چرخه های ذوب و یخبندان	-
	۳۳۵- در شرایط با چرخه های ذوب و یخبندان	-
حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM)	۰/۵۳	-

بدین ترتیب، نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی به گونه ای تعیین گردید تا الزامات ذکر شده در جدول ۳ در آن رعایت گردد. میزان مصرف الیاف ماکرو پلی پروپیلن به میزان ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب گردید. این میزان مصرف با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، پروژه های اجرایی و توصیه و پیشنهاد های ارائه شده توسط عرضه کننده این مواد صورت گرفته است. بدین ترتیب تعداد یک طرح اختلاط شاهد، یک طرح اختلاط بتن شاهد با شبکه فولادی و یک طرح اختلاط بتن الیافی در این تحقیق مد نظر قرار گرفت. در جدول ۴، مشخصات وزنی طرح های اختلاط بتن مورد نظر در این تحقیق مشاهده می گردد.

جدول ۴: مقادیر وزنی طرح های اختلاط بتن روسازی بتنی مورد نظر در این تحقیق

Table 4: Weight values of the concrete pavement mixtures considered in this research

طرح اختلاط	معرف طرح اختلاط	سیمان (Kg/m ³)	مصالح سنگی ریزدانه (0-5 mm) (Kg/m ³)	مصالح سنگی درشت دانه ریز (5-12 mm) (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	الیاف (Kg/m ³)
شاهد	REC	۴۰۰	۱۰۲۸	۶۹۲	۲۰۰	۰
شبه فولادی	REINFORCED- REC	۴۰۰	۱۰۲۸	۶۹۲	۲۰۰	۰
الیافی	POLY1.8REC	۴۰۰	۱۰۲۸	۶۹۲	۲۰۰	۱/۸

۳.۲. ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری

ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی با استفاده از روش آزمایش استاندارد ASTM C1579 ارزیابی گردید. در این روش از یک قالب با ابعاد ۵۶۰*۳۵۵*۶۰ میلیمتر استفاده شد. به منظور افزایش ترک خوردگی در مخلوط های بتنی از یک ابزار فولادی با شکل و مشخصات هندسی مشخص در داخل قالب استفاده گردید. در این تحقیق به منظور افزایش بیشتر احتمال ترک خوردگی در مخلوط های بتنی، از سه افزاینده ترک در ابزار فولادی استفاده شد. شکل ۲ قالب و ابزار فولادی مورد نظر در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۲: قالب و ابزار فولادی مورد استفاده در آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری

Figure 2: Mold and steel tools used in the test to evaluate plastic shrinkage cracking

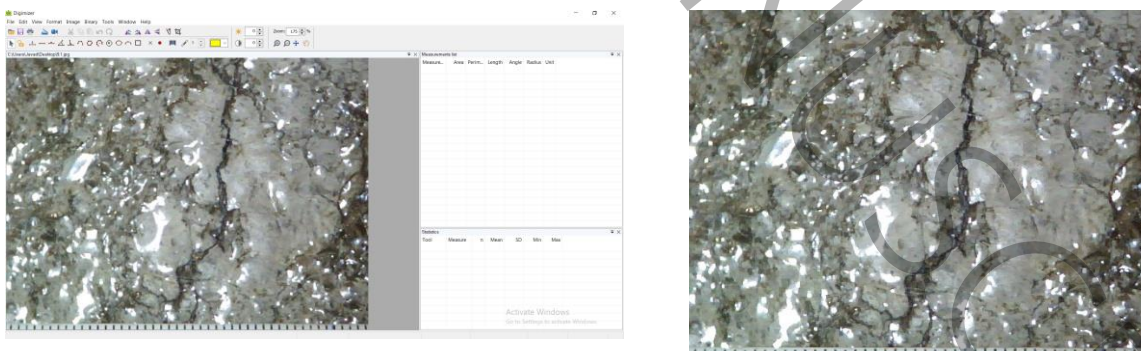
از یک محفظه ی شبیه ساز عوامل جوی به منظور ایجاد شرایط محیطی مورد نظر در آزمایش استفاده شد. این محفظه قابلیت ایجاد و کنترل شرایط محیطی مورد نظر شامل دمای محیطی از مقدار ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد با دقت ۰,۱ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی هوا از مقدار ۲۰ تا ۱۰۰ درصد با دقت ۱ درصد و سرعت جریان باد از مقدار ۰ تا ۳۰ کیلومتر بر ساعت

با دقت ۰٫۱ کیلومتر بر ساعت، را داشت. در این تحقیق به منظور افزایش شدت ترک خوردگی در مخلوط های بتنی، شرایط محیطی شامل دمای ۴۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی هوای ۲۰ درصد و سرعت جریان باد ۳۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شد. مدت زمان آزمایش به میزان ۸ ساعت در نظر گرفته شد تا حداکثر میزان ترک خوردگی در مخلوط های بتنی به وجود آید. در شکل ۳، محفظه ی شبیه ساز عوامل جوی و دال های بتنی دیده می شود.



شکل ۳: دال بتنی تحت آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در محفظه ی شبیه ساز عوامل جوی
Figure 3: Concrete slab under testing to evaluate plastic shrinkage cracking in the climate simulator chamber

پس از انجام آزمایش، تصاویر میکروسکوپی از قسمت های ترک خورده با استفاده از میکروسکوپ نوری متصل به رایانه تهیه گردید. سپس تصاویر تهیه شده در داخل نرم افزار تحلیل تصاویر دیجیتال وارد شده و پس از کالیبره نمودن تصویر با استفاده از اندازه ی واقعی یک جسم در داخل تصویر، مشخصات هندسی ترک خوردگی شامل طول، متوسط عرض و مساحت ترک خوردگی در هر دال بتنی با استفاده از ابزار تحلیل تصویر موجود در نرم افزار محاسبه گردید. در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی در نرم افزار تحلیل تصویر مشاهده می گردد.

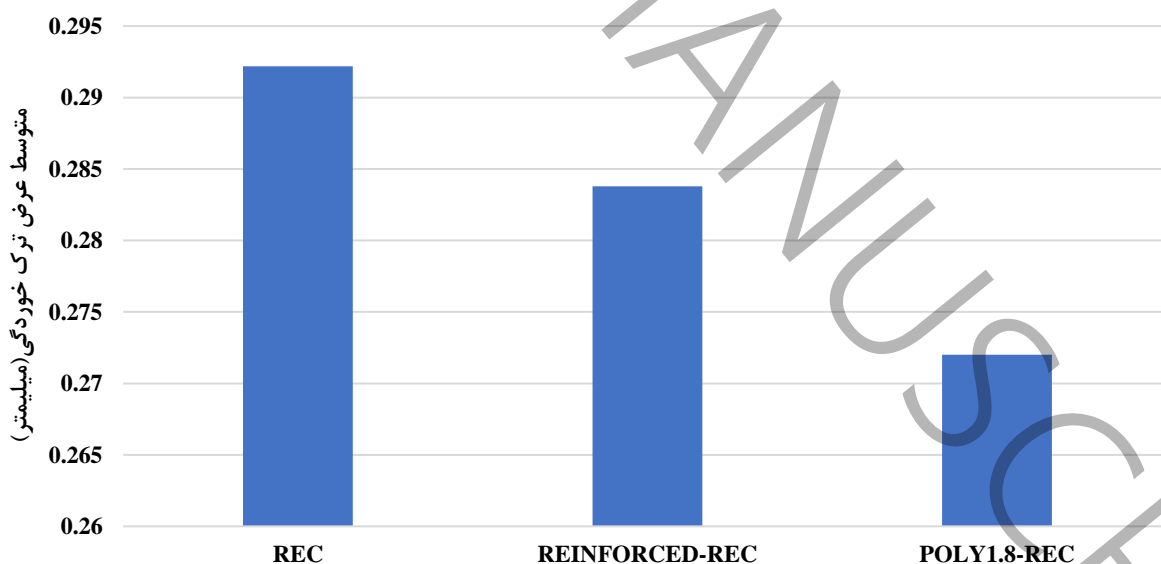


شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی از ترک خوردگی دال بتنی و تحلیل تصاویر دیجیتال در نرم افزار تحلیل تصویر
Figure 4: Microscopic images of concrete slab cracking and analysis of digital images in image analysis software

۳. نتایج و بحث

در این قسمت، نتایج به دست آمده از آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی شاهد و الیافی ارائه شده و مورد تحلیل و بحث قرار میگیرد. شکل های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب نتایج متوسط عرض ترک خوردگی، طول ترک خوردگی و مساحت ترک خوردگی مخلوط های بتنی شاهد، شبکه فولادی و الیافی دیده می گردد. با توجه به نتایج

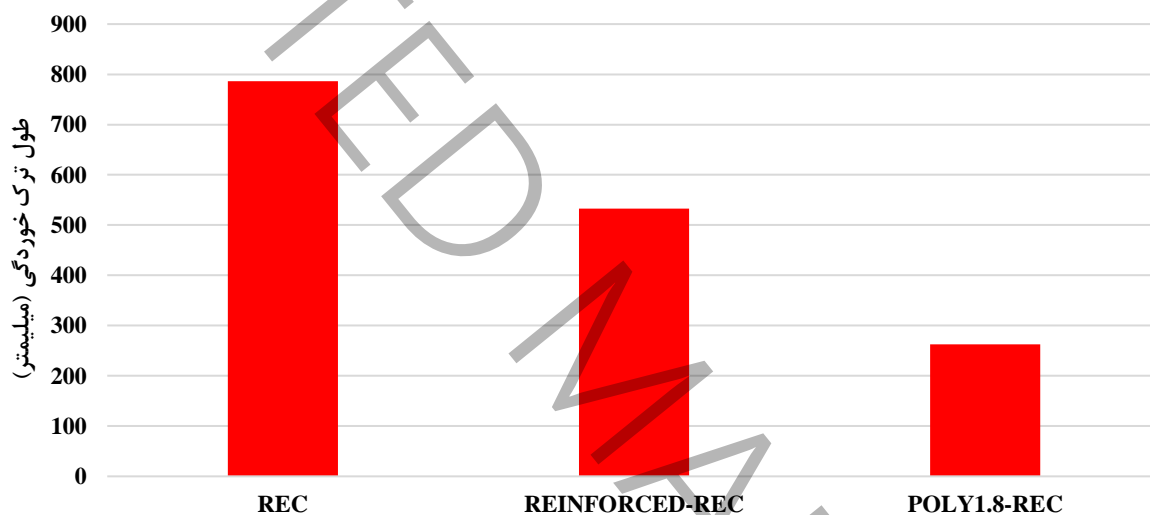
به دست آمده، مشاهده می گردد که شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در بتن با افزودن شبکه فولادی یا الیاف ماکرو پلی پروپیلن کاهش می یابد. متوسط عرض ترک خوردگی، طول ترک خوردگی و مساحت ترک خوردگی در طرح های اختلاط REINFORCED-REC نسبت به طرح اختلاط بتن شاهد به ترتیب به میزان ۲، ۳۲ و ۴۰ درصد کاهش و در طرح اختلاط POLY1.8REC به ترتیب به میزان ۷، ۶۷ و ۶۸ درصد کاهش می یابد. با افزودن شبکه فولادی به مخلوط بتنی شاهد، مقاومت کششی بتن متأثر از افزودن فولاد، افزایش می یابد. در نتیجه، مقاومت سازه ی بتنی تحت تنش های کششی ناشی از جمع شدگی خمیری افزایش می یابد. در مخلوط های بتنی الیافی، افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و بهبود قابلیت جذب انرژی مخلوط های بتنی می گردد. همچنین، الیاف با قرار گرفتن در محل ترک خوردگی، از رشد و گسترش ریز ترک های ایجاد شده در سطح بتن جلوگیری می کند. از این جهت، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی تار کاهش می یابد. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می گردد که مساحت ترک خوردگی بیشترین میزان تغییر را به خود اختصاص داده است. تغییر مساحت ترک خوردگی، متأثر از تغییر طول و متوسط عرض ترک خوردگی است. با بررسی نتایج دیده می گردد که طول ترک خوردگی در هر دو مخلوط بتنی بیشتر از متوسط عرض ترک خوردگی است. در نتیجه می توان اینطور استنباط کرد که شبکه فولادی و الیاف ماکرو پلی پروپیلن باعث تغییر چشمگیر طول ترک خوردگی شده اما اثر نا محسوسی بر تغییر متوسط عرض ترک خوردگی دارد. همچنین می توان این طور عنوان نمود که تغییر مساحت ترک خوردگی در مخلوط های بتنی حاوی شبکه فولادی یا الیاف ماکرو پلی پروپیلن به طور عمده متأثر از تغییر طول ترک خوردگی بتن است. با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت، دست آورد هایی این قسمت شامل این موارد می شود: الیاف ماکرو پلی پروپیلن و شبکه ی فولادی در کنترل و کاهش ترک خوردگی در جهت طولی تأثیر چشمگیری داشته و می تواند از رشد ترک در این راستا جلوگیری کند. اما، این دو عنصر مسلح کننده، توانایی کنترل و کاهش ترک خوردگی در جهت عرضی را نداشته و یا تأثیر چشمگیری از خود نشان نداند.



شکل ۵: مقادیر متوسط عرض ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی شاهد، شبکه فولادی و الیافی
Figure 5: The average width of plastic shrinkage cracking in reference, steel and fiber concrete mixtures

با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می گردد که کاهش متوسط عرض ترک خوردگی در مخلوط های بتنی حاوی شبکه فولادی و الیاف ماکرو پلی تار ماندگار کمترین میزان کاهش در بین مشخصات هندسی ترک خوردگی را به خود اختصاص داده است. همچنین، میزان کاهش مساحت ترک خوردگی از میزان کاهش طول ترک خوردگی در این دو مخلوط

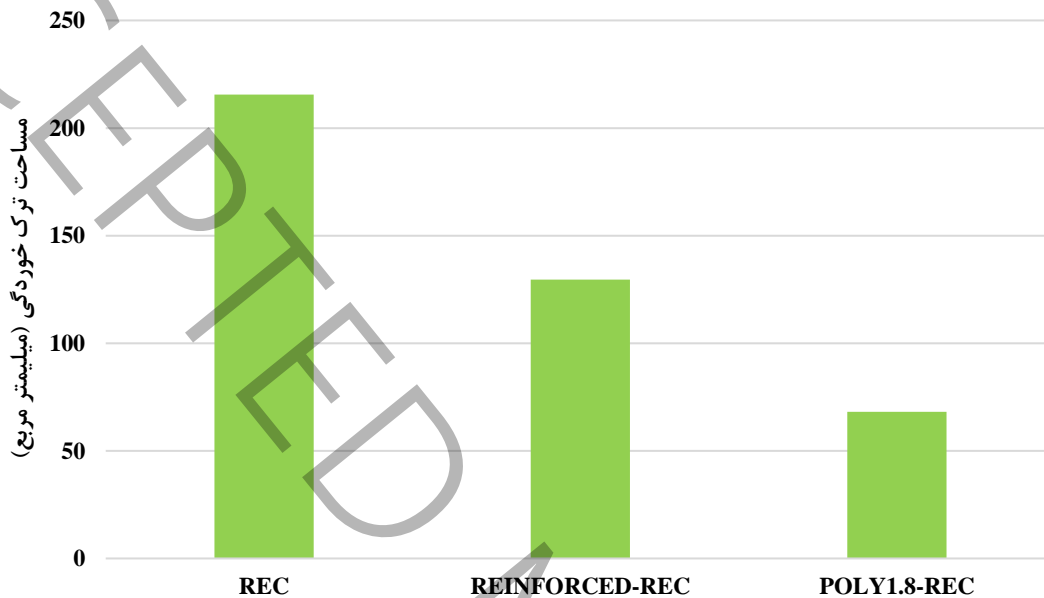
بتنی بیشتر است. دیده می‌گردد که رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی حاوی شبکه فولادی مشابه با رفتار ترک خوردگی در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن است. به عبارت دیگر، تغییرات متغیرهای هندسی ترک خوردگی در مخلوط‌های بتنی حاوی شبکه فولادی و الیاف پلی تار یکسان بوده به طوری که در هر دو طرح اختلاط، مساحت ترک خوردگی بیشترین میزان تغییر و متوسط عرض ترک خوردگی کمترین میزان تغییر را پیدا می‌کند. از این جهت، می‌توان اینطور استنباط کرد که الیاف ماکرو پلی پروپیلن می‌تواند جایگزین شبکه فولادی به منظور کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی شده به گونه‌ای که رفتار ترک خوردگی در هر دو مخلوط مشابه با یکدیگر باشد. موارد بررسی شده شامل دست‌آوردی بدین شرح است: با توجه به این موضوع که شبکه‌ی فولادی تغییر رفتار ترک خوردگی مشابه در جهت طولی و عرضی در روسازی‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن می‌شود. تحلیل به دست آمده حاکی از آن است که الیاف ماکرو پلی پروپیلن می‌تواند جایگزین میلگرد‌های فولادی در روسازی‌های بتنی به منظور کنترل و کاهش رشد ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری باشد.



شکل 6: مقادیر طول ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی شاهد، شبکه فولادی و الیافی
Figure 6: The cracking length of plastic shrinkage cracking in reference, steel and fiber concrete mixtures

با بررسی بیشتر نتایج دیده می‌گردد که اثر الیاف ماکرو پلی پروپیلن در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری مخلوط‌های بتنی بیشتر از اثر شبکه فولادی است. این موضوع با توجه به مقایسه‌ی شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن و شبکه فولادی قابل بررسی است. علت این موضوع را می‌توان متأثر از دو عامل دانست. اول اینکه، الیاف ماکرو پلی پروپیلن به صورت همگن در مخلوط بتنی قرار دارد. از این جهت، احتمال حضور این الیاف در نقاط مختلف مخلوط بتنی بیشتر از شبکه فولادی بوده چرا که موقعیت شبکه فولادی در داخل سازه‌ی بتنی مشخص و ثابت است. با توجه به ماهیت پراکنده بودن موقعیت ترک خوردگی در سطح بتن، احتمال وجود الیاف در محل‌های شروع ترک خوردگی بیشتر بوده، در نتیجه شدت ترک خوردگی مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن کمتر از مخلوط‌های بتنی حاوی شبکه فولادی می‌گردد. علت دوم، می‌تواند ناشی از این موضوع باشد که موقعیت قرارگیری هر تار الیاف نسبت به صفحه‌ی قرارگیری آن در مخلوط بتنی متغیر است. به بیان دیگر، هر تار الیاف نسبت به محورهای عمودی و افقی دارای زاویه بوده و الزاماً در جهت افقی یا عمودی قرار نمی‌گیرد. در حالی که شبکه فولادی در دو جهت طولی و عرضی (در راستای محور افقی و محور عمودی) قرار می‌گیرد. از آنجا که ترک ایجاد شده در مخلوط بتنی می‌تواند در راستای‌های مختلف شروع به رشد کند، احتمال کنترل رشد و گسترش ترک توسط الیاف بیشتر از شبکه فولادی است چرا که احتمال عمود شدن راستای الیاف بر راستای ترک خوردگی بیشتر از راستای شبکه فولادی است. با توجه به دلایل ذکر شده

می توان اینطور استنباط کرد که اثر افزودن الیاف در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی بیشتر از اثر شبکه فولادی در کاهش این ترک خوردگی است. تحلیل انجام شده دست آورد های بدین شرح را به دنبال دارد: الیاف ماکرو پلی پروپیلن عملکرد مناسب تر و بهتری در روسازی های بتنی نسبت به شبکه ی فولادی در کنترل و کاهش ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری دارد.



شکل ۷: مقادیر مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی شاهد، شبکه فولادی و الیافی
Figure 7: The cracking area of plastic shrinkage cracking in reference, steel and fiber concrete mixtures

۴. نتیجه گیری

تحقیق حاضر به ارزیابی اثر مقایسه ای الیاف ماکرو پلی پروپیلن پلی تار و میلگرد های مسلح کننده در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی پرداخت. اهمیت این تحقیق، به منظور درک بهتر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی تحت تاثیر استفاده از شبکه ی فولادی و الیاف ماکرو پلی پروپیلن بوده به طوری که بتوان به جهت کاهش هزینه، سختی و زمان اجرای پروژه، الیاف ماکرو پلی پروپیلن را جایگزین شبکه ی فولادی کرد. نوآوری این تحقیق در بررسی اثر هر دو عنصر مسلح سازی شامل الیاف ماکرو پلی پروپیلن و شبکه ی فولادی بر تغییر رفتار ترک خوردگی در روسازی های بتنی، مقایسه ی اثر این دو عنصر با یکدیگر و به کارگیری روش های نوین ارزیابی ترک خوردگی و تحلیل تصاویر دیجیتال به منظور ارزیابی شدت ترک خوردگی در دال های بتنی بود. مهم ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- مشاهده شده که شبکه فولادی و الیاف ماکرو پلی پروپیلن باعث تغییر چشمگیر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی می گردد. با استفاده از شبکه فولادی یا الیاف ماکرو پلی پروپیلن به مخلوط های بتنی، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بتن به میزان چشمگیری کاهش می یابد.
- دیده شد که با استفاده از شبکه فولادی در مخلوط های بتنی شاهد، متوسط عرض ترک خوردگی، طول ترک خوردگی و مساحت ترک خوردگی به ترتیب به میزان ۲، ۳۲ و ۴۰ درصد کاهش می یابد.

- افزودن الیاف ماکرو پلی تار به مخلوط های بتنی باعث کاهش متوسط عرض ترک خوردگی، طول ترک خوردگی و مساحت ترک خوردگی به ترتیب تا میزان ۷، ۶۷ و ۶۸ درصد می گردد.
- مشاهده شد که کاهش میزان طول ترک خوردگی در مخلوط های بتنی حاوی شبکه فولادی یا الیاف ماکرو پلی تار به صورت چشمگیر رخ داده اما متوسط عرض ترک خوردگی در این مخلوط های بتنی به میزان نا محسوسی کاهش می یابد. همچنین، مساحت ترک خوردگی بیشترین کاهش را در بین متغیر های هندسی ترک خوردگی داشته باشد.
- دیده شد که تغییر مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی حاوی شبکه فولادی یا الیاف ماکرو پلی پروپیلن به طور عمده متأثر از تغییر طول ترک خوردگی بوده و اثر متوسط عرض ترک خوردگی در تغییر مساحت ترک خوردگی نا چیز است.
- نتایج نشان داد که تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی حاوی شبکه فولادی با مخلوط های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن، مشابه است. از این جهت، الیاف ماکرو پلی پروپیلن با مشخصات مصرفی در این تحقیق می تواند جایگزین مناسبی برای شبکه فولادی باشد.
- دیده شد که اثر الیاف در کنترل و کاهش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بیشتر از اثر شبکه فولادی در کاهش این نوع ترک خوردگی است. علت این موضوع می تواند ناشی از پراکندگی بیشتر الیاف در مخلوط بتنی و احتمال قرار گیری این مواد در راستاهای مختلف نسبت به شبکه فولادی باشد.
- شکل ظاهری، مشخصات فنی و مقدار مصرف الیاف ماکرو مصرفی می تواند تاثیر بسزایی در عملکرد آن در کنترل ترک خوردگی ها داشته باشد، بنابراین بررسی این موضوع و اطمینان از کیفیت الیاف مصرفی قبل از کاربرد هر نوع الیاف در پروژه های اجرایی توصیه می گردد.

به صورت کلی، نتایج به دست آمده از کل تحقیق، حاکی از آن است که استفاده از الیاف ماکرو پلی پروپیلن و الیاف فولادی در کنترل و کاهش رشد طولی ترک خوردگی بسیار موثر بوده اما اثر چشمگیری در کاهش رشد عرضی آن ندارد. علاوه بر آن، رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی حاوی شبکه ی فولادی با دال های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن نزدیک به یکدیگر بوده، در نتیجه امکان جایگزین این شبکه های فولادی با الیاف ماکرو پلی پروپیلن است. همچنین، این الیاف به دلیل خصوصیات پخش شدگی در زوایا و نقاط مختلف دال بتنی، از عملکرد بالاتری نسبت به شبکه ی فولادی در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری برخوردار است. با این حال، تحقیق حاضر با محدودیت هایی اجرایی و زمانی شامل آزمودن شبکه های مختلف فولادی با ابعاد و فواصل مشخص، استفاده از الیاف ماکروی مصنوعی مختلف در مقادیر متفاوت، بررسی شرایط محیطی و جوی مختلف، به همراه بود. بررسی این موارد می تواند در تحقیقات آتی در این زمینه مورد توجه قرار گیرد.

- [1] N. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance, Crc Press, 2018.
- [2] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials, McGraw-Hill Education, 2014.
- [3] R.B. Mallick, T. El-Korchi, Pavement engineering: principles and practice, CRC Press, 2008.
- [4] Y.H. Huang, Pavement analysis and design, Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2004.
- [5] M.Y. Shahin, Pavement management for airports, roads, and parking lots, 1994.
- [6] J.T. Kolawole, R. Combrinck, W.P. Boshoff, Plastic cracking behaviour of concrete and its interdependence on rheo-physical properties, *Composites Part B: Engineering*, 230 (2022) 109527.
- [7] M. Wyrzykowski, S. Ghourchian, B. Münch, M. Griffa, A. Kaestner, P. Lura, Plastic shrinkage of mortars cured with a paraffin-based compound–Bimodal neutron/X-ray tomography study, *Cement and Concrete Research*, 140 (2021) 106289.
- [8] F. Sayahi, M. Emborg, H. Hedlund, A. Cwirzen, M. Stelmarczyk, The severity of plastic shrinkage cracking in concrete: a new model, *Magazine of Concrete Research*, 73(6) (2019) 315-324.
- [9] F. Sayahi, M. Emborg, H. Hedlund, A. Cwirzen, Effect of steel fibres extracted from recycled tyres on plastic shrinkage cracking in self-compacting concrete, *Magazine of Concrete Research*, 73(24) (2021) 1270-1282.
- [10] H. Rong, W. Dong, W. Yuan, X. Zhou, An improved ring test to assess cracking resistance of concrete under restrained shrinkage, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 113 (2021) 102976.
- [11] G. Moelich, J. Van Zyl, N. Rabie, R. Combrinck, The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete, *Cement and Concrete Composites*, 123 (2021) 104182.
- [12] M. Maj, A. Ubysz, Cracking of composite fiber-reinforced concrete foundation slabs due to shrinkage, *Materials Today: Proceedings*, 38 (2021) 2092-2098.
- [13] Q. Liu, J. Xiao, A. Singh, Quantification of plastic shrinkage and cracking in mortars containing different recycled powders using digital image correlation technique, *Construction and Building Materials*, 293 (2021) 123509.
- [14] I. Bertelsen, L. Ottosen, G. Fischer, Quantitative analysis of the influence of synthetic fibres on plastic shrinkage cracking using digital image correlation, *Construction and Building Materials*, 199 (2019) 124-137.
- [15] P. Nanduri, A critical review on early-age cracking in concrete, *Int J Civ Eng Technol*, 11 (2021) 74-83.
- [16] F. Sayahi, M. Emborg, H. Hedlund, A. Cwirzen, Effect of admixtures on mechanism of plastic shrinkage cracking in self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, 117(5) (2020) 51-59.
- [17] G.M. Moelich, J. Kruger, R. Combrinck, Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete, *Composites Part B: Engineering*, 200 (2020) 108313.
- [18] G. Moelich, R. Combrinck, A weather data analysis method to mitigate and prevent plastic shrinkage cracking, *Construction and Building Materials*, 253 (2020) 119066.
- [19] D. Meyer, W. Boshoff, R. Combrinck, Utilising super absorbent polymers as alternative method to test plastic shrinkage cracks in concrete, *Construction and Building Materials*, 248 (2020) 118666.
- [20] J.T. Kolawole, R. Combrinck, W.P. Boshoff, Shear rheo-viscoelasticity approach to the plastic cracking of early-age concrete, *Cement and Concrete Research*, 135 (2020) 106127.
- [21] W. Boshoff, V. Mechtcherine, D. Snoeck, C. Schröfl, N. De Belie, A.B. Ribeiro, D. Cusson, M. Wyrzykowski, N. Toropovs, P. Lura, The effect of superabsorbent polymers on the mitigation of plastic shrinkage cracking of conventional concrete, results of an inter-laboratory test by RILEM TC 260-RSC, *Materials and structures*, 53 (2020) 1-16.
- [22] I. Bertelsen, L. Ottosen, G. Fischer, Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review, *Construction and Building Materials*, 230 (2020) 116769.
- [23] A.Z. Bendimerad, B. Delsaute, E. Rozière, S. Staquet, A. Loukili, Advanced techniques for the study of shrinkage-induced cracking of concrete with recycled aggregates at early age, *Construction and Building Materials*, 233 (2020) 117340.
- [24] F. Sayahi, M. Emborg, H. Hedlund, A. Cwirzen, M. Stelmarczyk, The severity of plastic shrinkage cracking in concrete: a new model, *Magazine of Concrete Research*, 73(6) (2021) 315-324.
- [25] P.-m. Zhan, Z.-h. He, Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 201 (2019) 676-690.
- [26] T. Hemalatha, G. Ramesh, Mitigation of plastic shrinkage in fly ash concrete using basalt fibres, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(8) (2019) 759-769.
- [27] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, M. Plamondon, P. Lura, On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 115 (2019) 251-263.
- [28] R. Combrinck, W.P. Boshoff, Tensile properties of plastic concrete and the influence of temperature and cyclic loading, *Cement and Concrete Composites*, 97 (2019) 300-311.

- [29] S.H. Kosmatka, M. Wilson, Design and Control of Concrete Mixtures: The Guide to Applications, Methods and Materials, (2011).
- [30] A. Zarei, H. Rooholamini, T. Ozbakkaloglu, Evaluating the properties of concrete pavements containing crumb rubber and recycled steel fibers using response surface methodology, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(2) (2022) 470-484.
- [31] G.A. Arce, H. Noorvand, M.M. Hassan, T. Rupnow, N. Dhakal, Feasibility of low fiber content PVA-ECC for jointless pavement application, *Construction and Building Materials*, 268 (2021) 121131.
- [32] B. Alam, İ.Ö. Yaman, Fatigue performance of PVA fibre reinforced cementitious composite overlays, *International Journal of Pavement Engineering*, 22(7) (2021) 822-828.
- [33] M.A. Abdulridha, M.M. Salman, Q.S. Banyhussan, Effect polypropylene of fiber on drying shrinkage cracking of concrete pavement using response surface methodology, *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 25(3) (2021) 10-21.
- [34] 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.
- [35] H. Rooholamini, R. Sedghi, B. Ghobadipour, M. Adresi, Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete, *Construction and building materials*, 211 (2019) 88-98.
- [36] J. Mora, M. Martín, R. Gettu, A. Aguado, Study of plastic shrinkage cracking in concrete and the influence of fibers and a shrinkage reducing admixture, *Industria Italiana del Cemento*, (2001) 828-837.
- [37] Y. Ma, M. Tan, K. Wu, Effect of different geometric polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking of cement mortars, *Materials and Structures*, 35 (2002) 165-169.
- [38] C. Qi, J. Weiss, J. Olek, Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function, *Materials and Structures*, 36 (2003) 386-395.
- [39] N. Banthia, R. Gupta, Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete, *Cement and concrete Research*, 36(7) (2006) 1263-1267.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] C. Design, Maintenance Manual for Highways Concrete Pavements No. 731 in, The Ministry of Road & Urban Development, Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs, (2017).(In Persian)

Evaluation of the comparative effect of macro polypropylene fibers and steel reinforcement bars in controlling and reducing plastic shrinkage cracking in concrete pavements

ABSTRACT

Reducing the severity of plastic shrinkage cracking in concrete pavements by using new materials and comparing with traditional methods by using new analysis methods can increase the durability and improve the performance of concrete pavements. The current research examines the comparative effect of macro polypropylene fibers and reinforcement bars in controlling and reducing plastic shrinkage cracking in concrete pavements. The severity of cracking in the reference concrete mixture, steel bars mesh at intervals of 100 x 100 mm and macro polypropylene fibers in the amount of 1.8 Kg/m³ was evaluated according to the ASTM C1579 standard method. The results indicated that both reinforcement bars and fibers significantly reduce the cracking area up to 40% in concrete containing reinforcement and 68% in fiber-reinforced concrete. The length of the crack changes more than the average width of the crack. The cracking behavior of concrete containing steel bars mesh is similar to the cracking behavior of fiber concrete, as a result, macro polypropylene fibers may be considered as a suitable substitute for steel bars mesh. It was also seen that the effect of fibers in reducing cracking is greater than the effect of steel bar mesh.

KEYWORDS

Concrete pavement, Plastic shrinkage cracking, Steel bar mesh, Macro polypropylene fibers, Comparative effect.