

ترک خوردگی جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی: ارزیابی نقش های رقابتی افزودنی اصلاح کننده گرانروی (VMA) و الیاف میکرو پلی پروپیلن

مقاله علمی - پژوهشی

احسان سبحانی فرد، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
* حسن زیاری (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: h.ziari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۱۲۴-۱۰۹

چکیده

استفاده از مواد و مصالح نوین در صنعت راهسازی با هدف کنترل ایجاد و گسترش خرابی های سطح روسازی و همچنین بهینه کردن هزینه های کاربران اهمیت فراوان دارد. یکی از خرابی های رایج در روسازی های بتنی ترک خوردگی خمیری است. کاهش رشد و شدت این خرابی در عملکرد و دوام روسازی های بتنی موثر است. در تحقیق حاضر به بررسی تغییرات شدت ترک خوردگی خمیری روسازی های بتنی متاثر از افزودن اصلاح کننده گرانروی بتن (VMA) و الیاف میکرو پلی پروپیلن مصنوعی با استفاده از تحلیل تصاویر میکروسکوپی نور پراکنده شده است. در همین راستا متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری مطابق با روش استاندارد ASTM C1579 ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که الیاف و ماده VMA اثر چشمگیر بر رفتار ترک خوردگی دارد. الیاف منجر به کاهش متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب حداکثر تا میزان ۳۷، ۵۰ و ۶۹ درصد گردید. اما، ماده VMA باعث افزایش متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب حداکثر تا میزان ۱۱، ۱۱ و ۱۷ درصد شده است. بیشترین کاهش متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب به میزان ۳۳، ۴۷ و ۶۰ درصد در مخلوط بتنی حاوی هر دو ماده رخ داد. الیاف باعث تغییرات عرضی بیشتر شده، اما ماده VMA باعث تغییرات عرضی و طولی مشابه گردید. در مخلوط بتنی با مقادیر الیاف پایین تر (۴۵۵ گرم) و مقادیر مختلف ماده VMA، تغییرات عرضی و طولی مشابه بوده، اما در مقادیر الیاف بالاتر (۹۱۰ گرم) و مقادیر مختلف ماده VMA، اثر الیاف بر تغییرات عرضی و طولی ترک خوردگی غلبه کرده و تغییرات ترک عرضی بیشتر از ترک طولی شده است. یافته های این تحقیق می تواند در بهینه سازی طرح اختلاط بتن روسازی جهت بهبود مقاومت ترک خوردگی زودهنگام مفید باشد.

واژه های کلیدی: روسازی بتنی، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، الیاف میکرو پلی پروپیلن، ماده اصلاح کننده گرانروی بتن، شدت ترک خوردگی

۱- مقدمه

از مقاومت، دوام و سطح خدمت دهی بالاتری نسبت به روسازی های آسفالتی برخوردار بوده و می تواند سالیان زیادی بدون نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری و یا با تعمیر و نگهداری جزئی خدمت دهی کنند (Ma & Zhang, 2020). در ایران عوامل مختلفی مانند وجود ذخایر نفتی فراوان و قیر، ماشین آلات اجرای روسازی های آسفالتی و آشنایی بیشتر متخصصان،

روسازی های بتنی از یک دال بتنی به صورت مسلح یا ساده تشکیل می شوند. این دال بتنی می تواند به صورت مستقیم بر روی سطح خاک بستر کوبیده شده قرار گیرد و یا بر روی سطح اساس دانه ای یا تثبیتی قرار احداث گردد (Goyena & Fallis, 2019; Safiuddin et al., 2018). روسازی های بتنی در صورت طراحی، اجرا و نگهداری اولیه مطلوب،

مجریان و متولیان صنعت راهسازی کشور با این روسازی باعث شد تا بیشتر روسازی‌های ساخته شده از نوع آسفالتی باشد. از طرفی افزایش قیمت نفت و قیر، تولید مازاد سیمان در کشور و نیاز بیشتر روسازی‌های آسفالتی به عملیات تعمیر و نگهداری در سال‌های اخیر منجر شد تا گزینه استفاده از روسازی‌های بتنی بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

عملکرد، دوام و سطح خدمت دهی روسازی‌های بتنی به عوامل مختلفی از جمله: طراحی، اجرا و عمل آوری صحیح آن‌ها بستگی دارد. در روسازی‌های بتنی نیز همچون روسازی‌های آسفالتی خرابی‌های مختلفی وجود دارد. ترک خوردگی، یکی از انواع شایع خرابی‌ها در رویه‌های بتنی بوده به طوری که می‌توان آن را زمینه‌ی مرگ بتن در نظر گرفت (Anas et al., 2022; Kori & Goliya, 2022; Wang et al., 2024; Ziari et al., 2024; Ziari et al., 2024; Sobhani Fard et al., 2025). از محل ترک خوردگی‌های به وجود آمده در روسازی بتنی، امکان نفوذ آب و دیگر مواد خورنده به داخل بتن وجود دارد. در نتیجه عملکرد بتن و عناصر مسلح کننده در آن را کاهش می‌دهد. ترک خوردگی روسازی بتنی علاوه بر آنکه خود منجر به کاهش سطح خدمت‌دهی و عملکرد مطلوب روسازی شده، منجر به بروز سایر خرابی‌ها و تسریع در رشد و انتشار آن‌ها نیز خواهد شد.

در این میان، خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی اهمیت نسبی بالاتری دارد. جمع شدگی خمیری یکی از انواع جمع شدگی در مخلوط‌های بتنی بوده که در ساعات اولیه پس از اجرای سازه اتفاق می‌افتد (Moelich et al., 2021; Wyrzykowski et al., 2021; Zhang & Xiao, 2021). این نوع جمع شدگی در سازه‌های بتنی، زمانی رخ می‌دهد که مخلوط بتنی تازه بوده و کسب مقاومت لازم در آن انجام نشده است. جمع شدگی خمیری می‌تواند منجر به وقوع ترک خوردگی در روسازی بتنی شود. ترک خوردگی در هر سازه بتنی، زمینه ساز وقوع خرابی‌های بعدی در سازه بوده و همچنین می‌تواند منجر به شکست کلی آن شود. از این جهت، ارزیابی ترک خوردگی در روسازی بتنی و عوامل ایجاد کننده آن، در تعیین عملکرد و دوام آن اهمیت فراوان دارد. ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری نیز از این موضوع مستثنی نبوده و نیازمند بررسی و ارزیابی دقیق است (Liu et al., 2021; Sayahi, Emborg, Hedlund, & Cwirzen, 2021). جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی، در ساعات اولیه پس از اجرای سازه بتنی رخ می‌دهد. پس از برابری نرخ آب انداختگی و نرخ

تبخیر سطحی بتن، لایه آب سطحی در بتن حذف شده و پس از آن فشارهای مویینگی منفی شروع می‌گردند. فشارهای مویینگی منفی در سطح بتن منجر به جمع شدگی در مخلوط بتنی می‌شود. در صورتی که سازه بتنی مقید بوده و از حرکت ناشی از جمع شدگی در بتن جلوگیری شود، تنش‌های کششی در بتن به وجود می‌آید. وجود تنش‌های کششی در یک سازه با مخلوط بتنی تازه، می‌تواند با خرابی‌های متعددی همراه بوده چرا که پس از تجاوز میزان تنش‌های کششی ناشی از جمع شدگی خمیری از مقاومت کششی بتن تازه، ترک خوردگی در سازه به وجود می‌آید (Bendimerad et al., 2020; Sayahi, Emborg, Hedlund, Cwirzen, et al., 2021). ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در سازه‌های بتنی مسطح، که در معرض تبخیر سطحی قرار دارند، بیشتر رخ می‌دهد. از طرف دیگر، با توجه به این موضوع که روسازی‌های بتنی در محیط‌های سر باز اجرا شده و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، بیشتر در خطر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری قرار دارند. از این جهت، این نوع خرابی در روسازی‌های بتنی اهمیت پیدا می‌کند. در سیستم مدیریت روسازی بتنی، خرابی ناشی از جمع شدگی خمیری در دسته ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی قرار دارد. مطابق با این سیستم، سه نوع شدت خرابی شامل کم، متوسط و زیاد برای آن تعریف شده و در هیچ یک از شدت‌های خرابی، ترمیم یا تعمیر خاصی الزام نشده است (Shahin, 2005). در نتیجه، در صورت به وجود آمدن این نوع خرابی در روسازی بتنی، عملیات ترمیم بر روی آن صورت نگرفته و در طول عمر خدمت دهی روسازی باقی می‌ماند. بنابراین وجود خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری می‌تواند باعث کاهش چشمگیر دوام و سطح خدمت آن گردد. بنابراین، ارزیابی و شناخت رفتار این نوع خرابی در روسازی‌های بتنی در راستای ارتقاء عملکرد روسازی و جلوگیری از ایجاد سایر خرابی‌ها اهمیت دارد.

با توجه به اهمیت شدت ترک خوردگی در روسازی‌های بتنی، کنترل و کاهش این نوع خرابی در این سازه‌های بتنی همواره مورد توجه محققان و مجریات صنعت روسازی بتنی بوده است. عوامل و شرایط مختلفی (همچون شرایط محیطی، یکنواختی مخلوط بتنی و غیره) بر شروع و انتشار این نوع ترک‌ها وجود دارد. یکی از مواد و مصالح نوین جهت کنترل و کاهش شدت ترک خوردگی در سازه‌های بتنی، الیاف مختلف می‌باشد. استفاده از الیاف در مخلوط‌های بتنی منجر به تغییر توزیع تنش در اطراف ترک‌ها شده و هم در مرحله شروع و هم

مرحله انتشار نقش مهمی ایفا می‌کند. بطور کلی الیاف‌های با طول بیشتر تاثیر قابل توجهی بر کاهش طول ترک‌خوردگی داشته و الیاف‌های با طول کمتر در کنترل عرض ترک‌خوردگی موثر می‌باشند. الیاف در مخلوط بتنی باعث افزایش مقاومت کششی بتن و بهبود خصوصیات جذب انرژی آن می‌شود (Kumar, 2022; Monazami et al., 2022; Ozturk & Ozyurt, 2022). همچنین، الیاف در بتن می‌تواند بر مدول گسیختگی آن تاثیر بگذارد. الیاف در مخلوط بتنی در محل ترک‌خوردگی‌های به وجود آمده، عمل پل زدن را انجام داده و باعث افزایش مقاومت پس از ترک‌خوردگی بتن می‌شود. در بین الیاف‌های مختلف، الیاف‌های مصنوعی بر پایه پلی پروپیلن به دلیل خصوصیات مقاومتی و دوامی مناسب و همچنین قابلیت تهیه در مقیاس صنعتی، بیشتر از دیگر الیاف‌ها مورد توجه است. الیاف مصنوعی بر پایه پلی پروپیلن از نظر خصوصیات هندسی و مکانیکی در دو دسته شامل الیاف میکرو و ماکرو تقسیم بندی می‌شود (Abdulridha et al., 2021; Yildiz et al., 2022; Zarei et al., 2022). گفتنی است الیاف میکرو پلی پروپیلن در کنترل و کاهش ریز ترک‌ها عملکرد مناسبی دارد.

استفاده از مواد افزودنی شیمیایی مختلف در روسازی‌های بتنی به منظور اصلاح یا تغییر مشخصات مخلوط‌های بتنی، اهمیت زیادی دارد. یکی از این مواد، ماده افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته بتن است (Bessaies-Bey et al., 2022; Zhao et al., 2021). این ماده به منظور اصلاح خاصیت گرانیوی بتن استفاده شده و می‌تواند نقش مهمی در کنترل پایداری و انسجام مخلوط‌های بتنی بازی کند. این ماده همچنین باعث کاهش آب انداختگی و روانی بتن و همچنین از جداسدگی مخلوط بتنی جلوگیری می‌کند، که این موارد می‌تواند در خصوصیات بتن تازه مانند جمع‌شدگی بتن تاثیرگذار باشد. همچنین ماده اصلاح‌کننده ویسکوزیته بتن در مخلوط‌های بتنی با میزان مواد ریز مختلف، مخلوط‌های بتنی با سیمان کم و مخلوط‌های بتنی با دانه بندی سنگدانه نا مناسب باعث بهبود عملکرد مخلوط بتنی می‌گردد (J. Chen et al., 2021; Y. Chen et al., 2020). این موضوع باعث شده تا استفاده از این ماده در مخلوط‌های بتنی مورد استفاده در روسازی‌های بتنی اهمیت یابد چرا که استفاده از سیمان کم در روسازی‌های بتنی به کاهش تبعات اقتصادی و زیست محیطی پروژه کمک شایانی می‌کند. همچنین، مخلوط روسازی بتنی اغلب با میزان اسلامپ پایین ساخته و اجرا شده و نیاز است تا مخلوط بتنی از انسجام

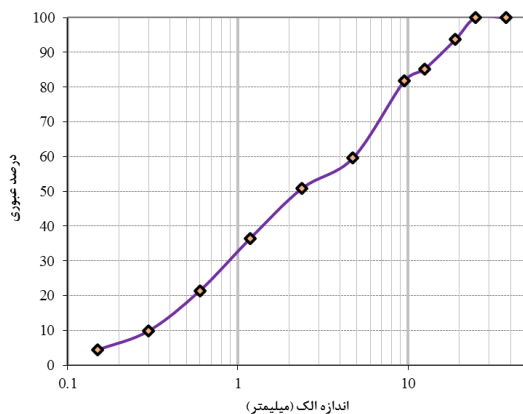
کافی و عدم جداسدگی، به منظور قابلیت اجرا با فینشر بتنی یا به صورت دستی، برخوردار باشد. از این جهت استفاده از این ماده در روسازی بتنی به جهت دستیابی به این هدف اهمیت پیدا می‌کند. استفاده از الیاف مختلف از جمله الیاف مصنوعی پلی پروپیلن در مخلوط‌های بتنی با هدف کنترل و کاهش ترک خوردگی مورد توجه برخی از محققان قرار گرفته است. برتلسن و همکاران به ارزیابی اثر الیاف مصنوعی پلی پروپیلن در ابعاد میکرو و الیاف بازیافتی بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روکش‌های سیمانی قرار گرفته بر روی بسترهای بتنی، با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال پرداختند. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که الیاف میکرو پلی پروپیلن حتی در مقدار مصرف حجمی ۰٫۱ درصد، عملکرد بهتری نسبت به الیاف بازیافتی در مقادیر مصرف حجمی ۲٫۰ درصد از خود نشان داده، که این موضوع اثر چشمگیر الیاف میکرو پلی پروپیلن در کاهش شدت ترک خوردگی خمیری را نشان داد (Bertelsen et al., 2019).

در یک مطالعه مروری جامع انجام شده توسط برتلسن و همکاران بر روی تاثیر خصوصیات الیاف مختلف بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های پایه سیمانی، مشخص گردید که الیاف مصنوعی پلیمری، به دلیل عملکرد مناسب، قیمت پایین و وجود خصوصیات مختلف، مورد توجه ویژه است (Bertelsen et al., 2020).

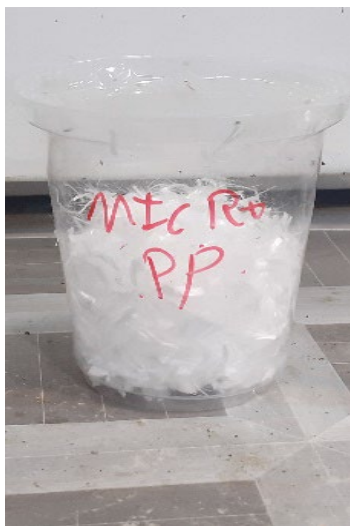
علکرد مناسب الیاف مصنوعی پلی پروپیلن توسط گاپتا و همکاران (Gupta & Banthia, 2016)، مازولی و همکاران (Mazzoli et al., 2015) و پلیسر و همکاران (Pelisser et al., 2010) عنوان شده است. برخی دیگر از محققان به ارزیابی اثر مواد افزودنی شیمیایی مختلف بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی پرداختند. کامبرینک و همکاران به ارزیابی اثر مواد افزودنی مایع مختلف شامل ماده افزودنی دیرگیر کننده، تسریع کننده، حباب ساز، روان کننده، کاهنده جمع شدگی و فوق روان کننده در دو پایه شیمیایی مختلف پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مواد افزودنی مختلف تاثیر چشمگیری بر تغییر رفتار ترک خوردگی خمیری داشته و باعث کاهش محسوس شدت آن می‌گردد. این موضوع به اثرات این ماده به کاهش فشار مویینگی منفی، نرخ تبخیر و نرخ نشست در مخلوط‌های بتنی مرتبط است (Combrinck et al., 2019). با وجود انجام مطالعات متعدد در این زمینه، بررسی اثر همزمان الیاف و مواد شیمیایی مختلف بر رفتار ترک خوردگی خمیری

نرمی به ترتیب به میزان ۲,۵۸، ۲,۸۸٪ و ۳,۴ مطابق با استانداردهای ASTM C128 و ASTM C136 می باشد (شکل ۱). چگالی نسبی و جذب آب برای مصالح سنگی درشت دانه ۵-۱۲ 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.

الیاف مورد استفاده در این تحقیق، الیاف مصنوعی بر پایه پلی اولفین/ پلی پروپیلن شامل الیاف میکرو رسته ای مطابق با استاندارد ASTM C1116 و ASTM D7508 است. شکل ظاهری الیاف مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. منحنی دانه بندی مصالح سنگی



شکل ۲. الیاف مصنوعی میکرو پلی پروپیلن

مشخصات مکانیکی و فنی این الیاف در جدول ۱ آورده شده است.

در مخلوط های بتنی کمتر مورد توجه محققان بوده است. در این راستا می توان به مطالعه انجام شده توسط البویر و همکاران بر روی اثر ترکیب نانو سیلیس، پلیمرهای فوق جاذب آب و الیاف مصنوعی بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی اشاره کرد. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که اثر پلیمر های فوق جاذب آب در کاهش ترک خوردگی مخلوط های حاوی نانو سیلیس، بهتر از الیاف مصنوعی است (Olivier et al., 2018). این موضوع نشان می دهد عملکرد الیاف مصنوعی در ترکیب با مواد افزودنی دیگر تحت تاثیر قرار می گیرد.

با بررسی پیشینه پژوهش و مطالعات اخیر در زمینه ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی، مشاهده می شود که ارزیابی این نوع خرابی در روسازی های بتنی به دلیل کاهش چشمگیر سطح عملکردی، دوام و همواری روسازی از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از رویکرد افزودن الیاف های مختلف به منظور کنترل و کاهش ترک خوردگی خمیری، نتایج مناسبی از خود نشان داده و مورد توجه ویژه است. در این میان، الیاف مصنوعی پلی پروپیلن به دلیل مقاومت، دوام و عملکرد مناسب و قیمت پایین، از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرف دیگر، استفاده از مواد افزودنی شیمیایی مختلف در مخلوط های بتنی با هدف تغییر یا اصلاح خصوصیات مختلف بتن مورد توجه زیادی بوده است.

ماده اصلاح کننده گرانروی بتن یکی از این مواد شیمیایی بوده که به جهت اصلاح گرانروی بتن و حفظ انسجام مخلوط بتنی استفاده قرار می گیرد. با توجه به اهمیت استفاده از الیاف پلی پروپیلن و ماده اصلاح کننده گرانروی بتن و اهمیت ارزیابی خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی و همچنین وجود خلا تحقیقاتی در این زمینه، تحقیق حاضر به ارزیابی بررسی تغییرات شدت خرابی ترک خوردگی خمیری روسازی های بتنی متاثر از افزودن ماده اصلاح کننده گرانروی بتن و الیاف میکرو پلی پروپیلن مصنوعی با استفاده از تحلیل تصاویر میکروسکوپی نورپرداخته است.

۲- مصالح و روش تحقیق

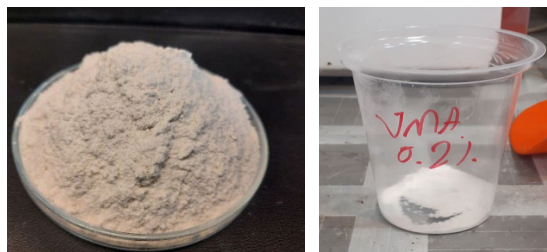
مصالح سنگی مورد استفاده از مصالح رودخانه ای بوده که شامل مصالح سنگی ریز دانه با اندازه ی ۵-۰ میلیمتر، مصالح سنگی درشت دانه با اندازه ی ۱۲-۵ میلیمتر و ۱۹-۱۲ میلیمتر است. مصالحی سنگی ریز دارای چگالی نسبی، جذب آب و مدول

جدول ۱. مشخصات مکانیکی و فنی الیاف مصنوعی

میکرو پلی پروپیلن	
نوع الیاف	میکرو
جنس الیاف	پلی پروپیلن خالص
شکل ظاهری	تک رشته صاف
طول (mm)	۱۲
قطر (mm)	۰,۰۳
مقاومت کششی (Mpa)	۳۴۵
مدول الاستیسیته (Mpa)	۳,۵
جذب آب (درصد)	ندارد
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۰,۹۱

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان

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	-



شکل ۳. شکل ظاهری ماده اصلاح کننده ویسکوزیته بتن

جدول ۳. معیارهای تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه ی ۷۳۱

روش انجام آزمایش	مقدار	معیار
ASTM C39	حداقل ۳۰	مقاومت فشاری (نمونه استوانه ای) (Mpa)
ASTM C78	حداقل ۴	مقاومت خمشی (به روش تیر ساده) با بارگذاری در یک سوم دهانه (Mpa)
ASTM C143	۷۰-۱۰	اسلامپ (mm)
-	حداقل ۳۳۵	عیار سیمان (kg/m ³)
-	حداکثر ۰,۵۳	نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)

بدین ترتیب نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی به گونه ای تعیین شد تا الزامات جدول ۲ در طرح اختلاط رعایت شود. الیاف میکرو در میزان مصرف پیشنهادی توسط تولید کننده و مطابق با تحقیقات گذشته به ترتیب به میزان ۰,۴۵۵ و ۰,۹۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده گردید. میزان مصرف اصلاح کننده

سیمان مورد استفاده در این تحقیق شامل سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود. در جدول ۲، مشخصات تحلیل شیمیایی این سیمان آورده شده است. اصلاح کننده ویسکوزیته بتن (VMA) مورد استفاده در این تحقیق، ماده شیمیایی پودری بر پایه هیدروکسی پروپیل متیل سلولز است. شکل ظاهری این ماده در شکل ۳ مشاهده می شود. ماده اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، به صورت پودری در مخلوط بتن تازه افزوده شده و مورد استفاده قرار می گیرد. میزان مصرف این ماده در حدود ۰,۱ تا ۰,۲ درصد وزن آب مورد استفاده در مخلوط بتن تازه می باشد. VMA منجر به افزایش تخلخل بتن، کاهش مقاومت، افزایش ترک خوردگی و همچنین تغییراتی در سرعت هیدراتاسیون سیمان می گردد. از آب آشامیدنی سیستم لوله کشی آزمایشگاه، جهت ساخت مخلوط های بتنی، استفاده گردید. افزودنی مورد استفاده در این تحقیق، فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر است. نسبت های اختلاط بتن مورد استفاده در روسازی بتنی باید به گونه ای تعیین شوند تا الزامات ذکر شده در ضابطه ی ۷۳۱، دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه ها رعایت گردد. این الزامات به منظور طراحی مخلوط بتن روسازی استفاده می گردد. در جدول ۳، معیارهای تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی بر اساس ضابطه ی ۷۳۱ مشاهده آورده شده است.



شکل ۵. قالب و ابزار فولادی مورد استفاده در تحقیق مطابق با استاندارد ASTM C1579

از یک محفظه ی کنترل شرایط محیطی به منظور ایجاد شرایط محیطی مورد نظر در آزمایش استفاده شد. این محفظه قابلیت ایجاد و کنترل شرایط محیطی مورد نظر شامل دمای محیطی را دارد. در این تحقیق به منظور افزایش شدت خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری 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. در شکل ۶، محفظه کنترل شرایط محیطی و دال بتنی دیده می شود.



شکل ۶. محفظه کنترل شرایط محیطی و دال بتنی تحت آزمایش

پس از انجام آزمایش، تصاویر میکروسکوپی از قسمت های ترک خورده با استفاده از میکرو سکوپ نوری متصل به رایانه تهیه گردید. در شکل ۷، دال بتنی ترک خورده و تهیه تصویر میکروسکوپی از دال بتنی مشاهده می شود.

ویسکوزیته بتن به میزان ۰٫۱ و ۰٫۲ درصد وزن آب اختلاط بتن تازه استفاده گردید. بدین ترتیب تعداد ۱ طرح اختلاط شاهد، ۲ طرح اختلاط بتن الیافی، ۲ طرح اختلاط بتن حاوی اصلاح کننده ویسکوزیته و ۲ طرح اختلاط بتن حاوی ترکیب الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح کننده ویسکوزیته در روند تحقیق مورد نظر قرار گرفت. مشخصات وزنی طرح اختلاط بتن تازه برای ساخت یک متر مکعب بتن تازه در حالت اشباع با سطح خشک مصالح بدین ترتیب بود: سیمان: ۴۰۰ کیلوگرم، مصالح سنگی ۵-۰ میلیمتر: ۱۰۰۷ کیلوگرم، مصالح سنگی ۵-۱۲ میلیمتر: ۴۲۸ کیلوگرم، مصالح سنگی ۱۹-۱۲ میلیمتر: ۲۵۷ میلیمتر، آب آزاد: ۲۰۰ کیلوگرم. در شکل ۸، ارزیابی میزان روانی مخلوط بتن روسازی بتنی به منظور دستیابی به میزان اسلامپ مجاز در بتن روسازی بتنی نشان داده شده است.

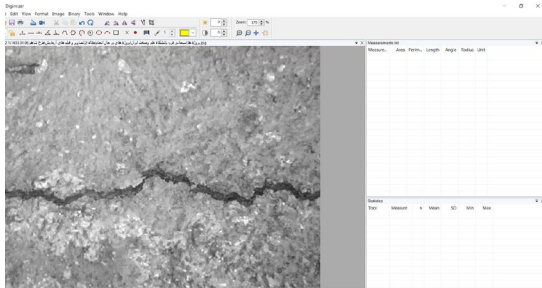


شکل ۸. ارزیابی میزان روانی مخلوط بتن روسازی بتنی مطابق با استاندارد ASTM C143

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 ۶۰x۳۵x۵۶۰ 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. شکل ۵ قالب و ابزار فولادی مورد نظر در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۷. دال بتنی ترک خورده و تهیه ی تصویر میکروسکوپی از دال بتنی



شکل ۸. تصاویر دیجیتال تهیه شده از قسمت ترک خوردگی در دال بتنی و تحلیل تصویر در نرم افزار تحلیل تصویر

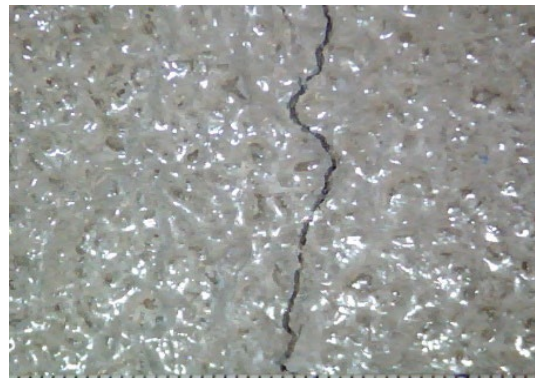
۳-۱- اثر الیاف میکرو پلی پروپیلن

شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مقادیر متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی شاهد (RE) و مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف ۴۵۵ (PP455) و ۹۱۰ (PP910) گرم در متر مکعب بتن تازه را نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن به مخلوط بتن شاهد، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری کاهش پیدا می کند. با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقدار مصرف ۴۵۵ گرم در متر مکعب بتن تازه به مخلوط بتن شاهد، متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی طرح مخلوط PP455 به ترتیب به میزان ۲۳، ۱۸ و ۳۹ درصد نسبت به طرح مخلوط RE کاهش پیدا می کند. این نتایج حاکی از اثر چشمگیر الیاف میکرو پلی پروپیلن در تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری و کاهش چشمگیر آن دارد. با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن به مخلوط بتن تازه، سختی ماتریس سیمان و سنگدانه افزایش می یابد. در نتیجه، مقاومت کششی در نواحی انتقال در بتن افزایش خواهد یافت. پس از شکل گیری موبینگ منفی در سطح دال بتنی و ایجاد تنش های ناشی از آن، تنش های کششی در ماتریس سیمان و سنگدانه به وجود می آید. در مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن،

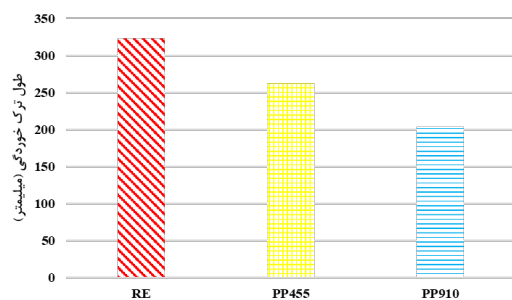
سپس تصاویر تهیه شده در داخل نرم افزار تحلیل تصاویر دیجیتال وارد شده و پس از کالیبره نمودن تصویر با استفاده از اندازه ی واقعی یک جسم در داخل تصویر، مشخصات هندسی ترک خوردگی شامل طول، متوسط عرض و مساحت ترک خوردگی در هر دال بتنی با استفاده از ابزار تحلیل تصویر موجود در نرم افزار محاسبه گردید. تحلیل تصویر و اندازه گیری مشخصات هندسی ترک خوردگی، با استفاده از روش به کار گرفته شده توسط زیاری و همکاران (Ziari et al., 2022)، صورت گرفت. در شکل ۸ تصاویر میکروسکوپی در نرم افزار تحلیل تصویر مشاهده می گردد.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، نتایج به دست آمده در روند تحقیق ارائه شده و مورد تحلیل و بحث قرار گرفته است. نتایج مورد بحث در این بخش در سه قسمت بررسی شده است. در ابتدا، اثر الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری تحلیل شده و سپس، تاثیر ماده اصلاح کننده گرانروی بتن بر شدت ترک خوردگی بحث می شود. در انتها، اثر ترکیب الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح کننده گرانروی بتن بر تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



افزایش میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن، تعداد الیاف بیشتری در محل ریز ترک خوردگی‌های به وجود آمده ناشی از تنش‌های کششی جهت انجام عمل پل زدن وجود دارد. این موارد باعث می‌شود تا مقاومت دال بتنی در برابر تنش‌های کششی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال‌های بتنی بهبود یافته و شدت ترک خوردگی خمیری کاهش بیشتر پیدا کند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اینطور استنباط نمود که میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن اثر چشمگیری در تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال‌های بتنی دارد. می‌توان انتظار داشت که با افزایش میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن، شدت ترک خوردگی خمیری کاهش بیشتر پیدا کند. به منظور ارزیابی بهتر میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن بر شدت تغییرات ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، مطالعات آتی در این زمینه مورد نیاز است.

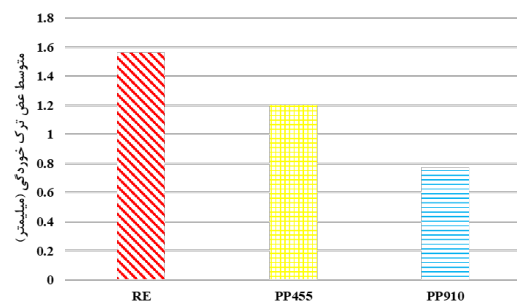


شکل ۱۰. مقادیر طول ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد و حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده نمود که الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف، اثر بیشتری بر تغییرات متوسط عرض ترک خوردگی، نسبت به تغییرات طول آن دارد. به عبارت دیگر، با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن به مخلوط بتنی شاهد، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بیشتر شاهد تغییرات عرضی نسبت به تغییرات طولی می‌باشند. این موضوع بیشتر در مقادیر مصرف بالاتر الیاف (۹۱۰ گرم) خود را نشان می‌دهد. با توجه به این موضوع که تغییرات مساحت ترک خوردگی در دال بتنی متأثر از تغییرات عرضی و طولی آن بوده، در نتیجه می‌توان اینطور عنوان نمود که در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن، متوسط عرض ترک خوردگی اثر بیشتری در تغییر مساحت ترک خوردگی دارد.

مقاومت کششی مخلوط بتنی تازه متأثر از حضور الیاف، بیشتر شده و در مقابل تنش‌های کششی ناشی از جمع شدگی خمیری مقاومت می‌کند. همچنین، پس از شکل‌گیری ریز ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در سطح مخلوط بتنی، الیاف میکرو پلی پروپیلن با قرارگیری در محل ترک و انجام عمل پل زدن، از گسترش بیشتر ترک خوردگی جلوگیری کرده، در نتیجه طاقت دال بتنی در برابر تنش‌های کششی را افزایش می‌دهد. این موارد باعث می‌شود تا با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن به مخلوط بتنی شاهد، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری کاهش می‌یابد.

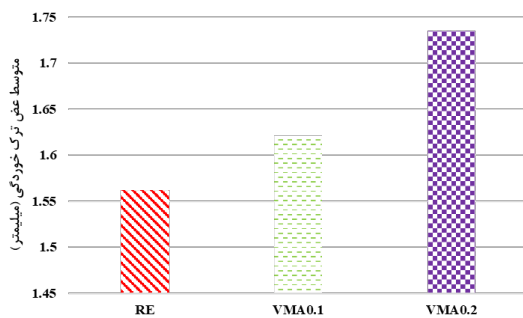
بررسی بیشتر نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزودن بیشتر الیاف میکرو پلی پروپیلن، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی الیافی بیشتر کاهش پیدا می‌کند. با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن به میزان ۹۱۰ گرم در متر مکعب بتن تازه، متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی مخلوط بتنی PP910 به ترتیب به میزان ۳۷، ۵۰ و ۶۹ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۹. مقادیر متوسط عرض ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد و حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن

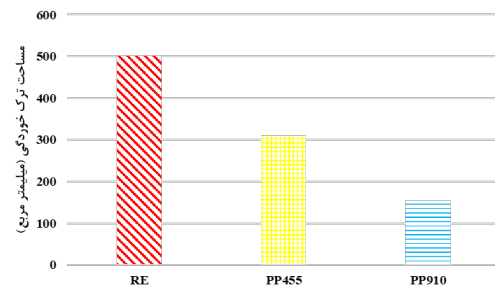
این موضوع نشان دهنده اثر محسوس میزان مصرف الیاف بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال‌های بتنی است. با افزایش میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن در مخلوط بتنی، تعداد الیاف در ماتریس سیمان و سنگدانه افزایش می‌یابد. در نتیجه تعداد الیاف بیشتری به منظور افزایش طاقت و سختی سیمان و بهبود مقاومت کششی در نواحی انتقال سطحی وجود دارد. بنابراین، با افزایش میزان مصرف الیاف و به دنبال آن افزایش تعداد الیاف در مخلوط بتنی، مقاومت کششی مخلوط بتن تازه افزایش یافته و نیروی مقاوم بیشتری در برابر نیروی محرک (تنش کششی) ناشی از جمع شدگی خمیری در دال بتنی وجود دارد. علاوه بر این، با

خوردگی را به دنبال دارد. در نتیجه با افزودن ماده اصلاح کننده گرانروی بتن، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری تمایل به افزایش پیدا می کند. از طرف دیگر، ماده اصلاح کننده گرانروی بتن به دلیل تغییر در خصوصیات مخلوط بتن تازه به خصوص خاصیت گرانروی آن، باعث کاهش خصوصیات مقاومتی نیز می گردد. این موضوع ناشی می تواند ناشی از خاصیت دیرگیر کنندگی این ماده در مخلوط بتنی باشد به طوری که کسب مقاومت مخلوط بتنی حاوی این ماده، به زمان بیشتری نیاز دارد. در نتیجه در ساعات اولیه پس از ساخت و همچنین در مدت زمان معمول تعیین مشخصات مقاومتی مخلوط بتنی (سن ۲۸ روزه) مقاومت کمتری پیدا می کند. مجموع این موارد منجر به افزایش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی حاوی ماده اصلاح کننده گرانروی بتن می گردد.



شکل ۱۲. مقادیر متوسط عرض ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد و حاوی ماده اصلاح کننده گرانروی بتن

با بررسی بیشتر نتایج مشاهده می گردد که افزودن بیشتر ماده اصلاح کننده گرانروی بتن منجر به افزایش بیشتر شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی می گردد. با افزودن ماده اصلاح کننده گرانروی بتن به میزان ۰٫۲ درصد، متوسط عرض، طول و مساحت به ترتیب به میزان ۱۱، ۱۱ و ۱۷ درصد افزایش می یابد. با توجه به این نتایج می توان به دو موضوع اشاره کرد. موضوع اول، اثر منفی ماده اصلاح کننده گرانروی بتن بر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی است. از آن جا که میزان افزایش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در این میزان مصرف ماده اصلاح کننده گرانروی، محسوس بوده، این نتایج می تواند تاییدی بر داشتن اثر منفی ماده اصلاح کننده گرانروی بتن بر تغییرات ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی باشد. موضوع دوم، اثر چشمگیر ماده اصلاح کننده گرانروی بتن بر تغییرات رفتار ترک خوردگی

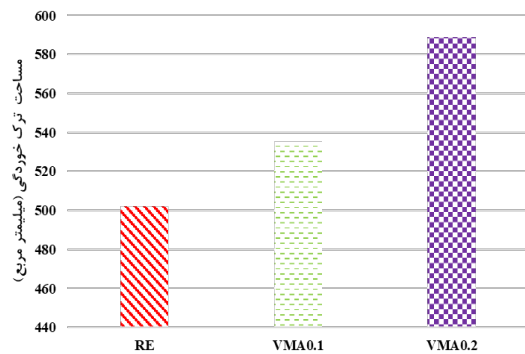


شکل ۱۱. مقادیر مساحت ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد و حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن

۳-۲- اثر ماده اصلاح کننده گرانروی بتن

شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مقادیر متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی شاهد (RE) و مخلوط های بتنی حاوی ماده اصلاح کننده گرانروی بتن در مقادیر مصرف ۰٫۱ (VMA0.1) و ۰٫۲ (VMA0.2) در صد وزن آب مخلوط بتن تازه مشاهده می شود. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که ماده اصلاح کننده گرانروی بتن اثر منفی در دال بتنی داشته و شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری را افزایش می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که با افزودن ماده اصلاح کننده گرانروی به میزان ۰٫۱ درصد، متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری به ترتیب به میزان ۴، ۲ و ۷ درصد افزایش می یابد. با وجود اثر منفی ماده اصلاح کننده گرانروی بتن در تغییر رفتار ترک خوردگی خمیری در دال های بتنی، شدت افزایش ترک خوردگی نامحسوس دیده می شود. اما می توان جهت تغییرات شدت ترک خوردگی متأثر از افزودن ماده اصلاح کننده گرانروی، افزایشی مشاهده کرد. علت این امر را می توان ناشی از افزایش میزان گرانروی بتن و به دنبال آن، افزایش فاز خمیری در مخلوط بتنی دانست. پس از اجرای دال بتنی، مخلوط بتنی در فاز خمیری قرار پیدا می کند. در این فاز، میزان تبخیر از میزان آب انداختگی بتن می تواند بیشتر شده و پس از آن محدوده بحرانی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری شروع شده و تا زمان گیرش اولیه بتن ادامه پیدا می کند. با افزودن ماده اصلاح کننده گرانروی بتن، گرانروی مخلوط بتنی افزایش یافته، در نتیجه مخلوط بتنی در مدت زمان بیشتری در محدوده بحرانی از نظر ترک خوردگی قرار داده می شود. با توجه به استعداد بالای مخلوط بتنی به ترک خوردگی در این محدوده، افزایش میزان محدوده بحرانی، افزایش شدت ترک

نزدیک به هم می‌دهد. در نتیجه اثر این ماده بر تغییرات عرضی و طولی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری یکسان بوده و این موضوع باعث می‌شود تا تغییرات عرضی و طولی ترک خوردگی به طور تقریباً یکسان متأثر باعث تغییرات مساحت ترک خوردگی گردد.

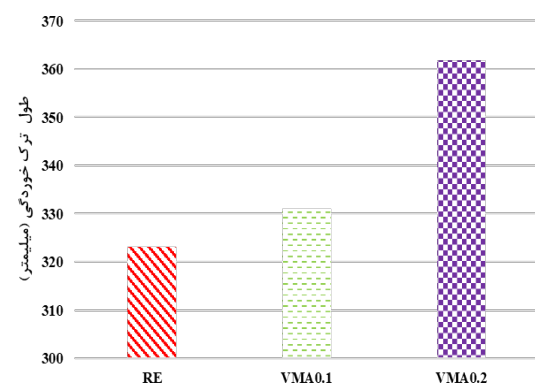


شکل ۱۴. مقادیر مساحت ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد و حاوی ماده اصلاح کننده گرانروی بتن

۳-۳-۳ اثر ترکیب الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح کننده گرانروی بتن

شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ به ترتیب مقادیر متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی مخلوط بتنی شاهد (RE) و مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف و ماده اصلاح کننده گرانروی بتن به ترتیب به میزان ۴۵۵ گرم و ۰٫۱ درصد (PP455VMA0.1)، ۴۵۵ گرم و ۰٫۲ درصد (PP455VMA0.2)، ۹۱۰ گرم و ۰٫۱ درصد (PP910VMA0.1) و ۹۱۰ گرم و ۰٫۲ درصد (PP910VMA0.2) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌گردد که اثر ترکیب الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح کننده گرانروی بتن، باعث کاهش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال‌های بتنی می‌شود در مخلوط بتنی PP455VMA0.1 متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب به میزان ۱۶، ۱۹ و ۳۰ درصد کاهش و در مخلوط بتنی PP455VMA0.2 به ترتیب به میزان ۱۳، ۹ و ۲۲ درصد کاهش پیدا می‌کند. همانطور که در دو قسمت قبل عنوان گردید، با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن، مقاومت کششی و سختی ماتریس سیمان افزایش یافته، در نتیجه دال بتنی در برابر تنش‌های کششی ناشی از فشارهای مویینگی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، ماده اصلاح کننده گرانروی بتن منجر به افزایش محدوده‌ی بحرانی

ناشی از جمع شدگی خمیری است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اینطور استنباط نمود که میزان مصرف ماده‌ی اصلاح کننده‌ی بتن تأثیر محسوسی بر تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی دارد. علت به وجود آمدن این دو موضوع را می‌توان اینگونه عنوان نمود که با افزایش میزان مصرف ماده اصلاح کننده گرانروی بتن، گرانروی بتن، گرانروی مخلوط بتنی بیشتر افزایش یافته، در نتیجه محدوده‌ی بحرانی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری افزایش می‌یابد. در نتیجه احتمال وقوع ترک خوردگی و افزایش شدت آن در دال بتنی افزایش می‌یابد. علت دیگر را می‌توان ناشی از کاهش بیشتر خصوصیات مقاومتی مخلوط بتنی با افزایش میزان مصرف ماده اصلاح کننده گرانروی بتن دانست چرا که با کاهش خصوصیات مقاومتی مخلوط بتنی به خصوص در ساعات اولیه پس از ساخت، نیروی مقاوم کمتری به منظور مقابله با نیروی محرک ناشی از جمع شدگی خمیری (تنش‌های کششی ناشی از فشار مویینگی) وجود دارد. برآیند این دو موضوع منجر به افزایش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری با افزایش میزان مصرف ماده اصلاح کننده گرانروی بتن می‌گردد. انتظار می‌رود که با افزایش میزان مصرف این ماده، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری شاهد افزایش بیشتری باشد. بررسی بیشتر این موضوع نیازمند تحقیقات آتی در این زمینه است.

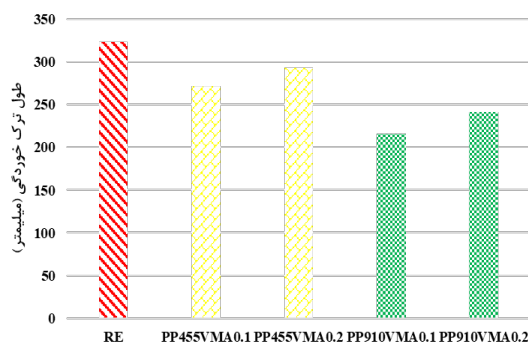


شکل ۱۳. مقادیر طول ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد و حاوی ماده اصلاح کننده گرانروی بتن

بررسی بیشتر نتایج به دست آمده در این قسمت، نشان می‌دهد که تأثیر ماده اصلاح کننده گرانروی بتن بر تغییرات متوسط عرض ترک خوردگی با اثر این ماده بر تغییرات طول ترک خوردگی به تقریباً به یک میزان بوده و تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند. به عبارت دیگر، با افزودن ماده اصلاح کننده گرانروی بتن، تغییرات عرضی و طول ترک خوردگی با نرخ

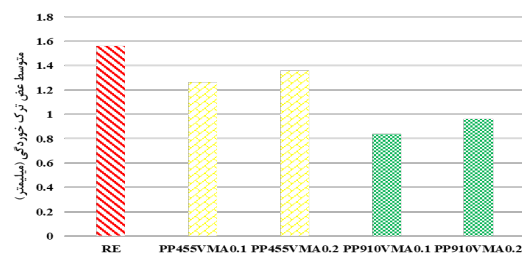
۴- یافته‌ها

بررسی بیشتر نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن در مخلوط‌های بتنی حاوی ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری کاهش بیشتری پیدا می‌کند. متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی در مخلوط بتنی PP910VMA0.1 به ترتیب به میزان ۴۷، ۳۳ و ۶۰ درصد کاهش و در مخلوط بتنی PP910VMA0.2 به ترتیب به میزان ۳۸، ۲۵ و ۵۱ درصد کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده و همچنین نتایج پیشتر عنوان شده، دیده می‌شود که با افزایش میزان الیاف میکرو پلی پروپیلن در مخلوط بتنی حاوی ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن در مقادیر مصرف مختلف، اثر مثبت الیاف در کنترل و کاهش ترک خوردگی بیشتر شده و منجر به کاهش بیشتر شدت ترک خوردگی خمیری می‌گردد. این موضوع را می‌توان از این منظر عنوان نمود که با افزایش میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن، ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن توانایی حفظ اثر منفی خود در افزایش ترک خوردگی را نداشته و برآیند اثر این دو ماده، منجر به کاهش بیشتر شدت ترک خوردگی می‌گردد. اما پس از افزایش میزان مصرف ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن (۲،۰ درصد) از اثر مثبت الیاف میکرو پلی پروپیلن در کاهش ترک خوردگی کاسته شده و میزان کاهش شدت ترک خوردگی کمتر می‌گردد. علت این موضوع همانطور که در تحلیل نتایج ابتدای این قسمت عنوان گردید، اثر منفی ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن در افزایش محدوده ترک خوردگی خمیری و کاهش خصوصیات مقاومتی آن است. با این وجود، در مخلوط بتنی حاوی ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن در مقادیر بالاتر (۲،۰ درصد)، اثر الیاف میکرو پلی پروپیلن بر اثر این ماده غلبه کرده و اثر نهایی باعث کاهش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال‌های بتنی است.



شکل ۱۶. مقادیر طول ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد و حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن

ترک خوردگی خمیری و همچنین کاهش خصوصیات مقاومتی در مخلوط‌های بتنی شده، در نتیجه شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری افزایش می‌یابد. در مخلوط بتنی حاوی هر دو ماده، اثر مثبت الیاف میکرو پلی پروپیلن در کنترل و کاهش شدت ترک خوردگی بر اثر منفی ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن در افزایش شدت ترک خوردگی غلبه کرده و برآیند ترکیب این دو ماده منجر به اثر کاهشی در شدت ترک خوردگی می‌گردد. این موضوع حاکی از برتری اثر الیاف میکرو پلی پروپیلن در خنثی‌سازی و کاهش اثر منفی ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن در ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی است. اما دیده می‌شود که با ثابت نگه داشتن میزان الیاف میکرو پلی پروپیلن در مخلوط بتنی و افزایش میزان ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن، شدت ترک خوردگی افزایش بیشتر یافته و باعث کاهش اثر مثبت الیاف در کاهش شدت آن می‌گردد. با توجه به این نتایج می‌توان اینطور استنباط نمود که با در نظر گرفتن میزان الیاف مشخص در مخلوط بتنی و افزایش میزان ماده اصلاح‌کننده گرانروی، الیاف میکرو پلی پروپیلن قادر به حفظ اثر مثبت خود در کاهش شدت ترک خوردگی نبوده، و شدت ترک خوردگی شروع به افزایش پیدا می‌کند. این موضوع می‌تواند ناشی از تاثیر بیشتر ماده اصلاح‌کننده گرانروی در مقادیر مصرف بالاتر در کاهش شدت ترک خوردگی بوده که منجر به کاهش اثر مثبت الیاف میکرو پلی پروپیلن می‌گردد. با این حال، حتی در مقادیر مصرف ماده اصلاح‌کننده گرانروی در مقادیر بالاتر (۲،۰ درصد)، الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقدار مصرف پایین‌تر (۴۵۵ گرم) اثر نهایی خود در کاهش شدت ترک خوردگی را حفظ می‌کند.



شکل ۱۵. مقادیر متوسط عرض ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد

و حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن

بتنی حاوی ۰٫۱ و ۰٫۲ درصد ماده گرانروی بتن، تغییرات عرضی و طولی ترک خوردگی نزدیک به هم و مشابه بود. برآیند این دو موضوع باعث گردیده تا در مخلوط بتنی حاوی ۴۵۵ گرم الیاف و ماده اصلاح‌کننده گرانروی در مقادیر مصرف مختلف، میزان تغییرات عرضی به سمت مقدار تغییرات طولی حرکت کرده و تغییر رفتار ترک خوردگی در عرض و طول مشابه یکدیگر شوند. اما این موضوع در مخلوط بتنی حاوی ۹۱۰ گرم الیاف میکرو پلی پروپیلن، متفاوت است. همانطور که از نتایج پیداست، در مخلوط بتنی حاوی این میزان الیاف و ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن در مقادیر مصرف مختلف (۰٫۱ و ۰٫۲ در صد)، تغییرات عرضی ترک خوردگی بیشتر از تغییرات طولی آن است. با توجه به این نتایج می‌توان اینطور نتیجه گرفت که با افزایش میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن در مخلوط‌های بتنی حاوی ماده اصلاح‌کننده گرانروی بتن، الیاف منجر به تغییر رفتار عرضی و طولی ترک خوردگی شده و باعث ایجاد تغییر بیشتر عرض ترک خوردگی نسبت به طول آن می‌گردد.

۵- نتیجه گیری

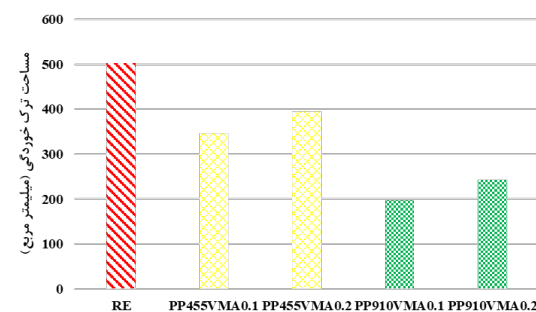
مهم ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است. (لازم به ذکر است نتایج این پژوهش با در نظر گرفتن مشخصات مواد، مصالح و شرایط آزمایشگاهی حاکم ارائه شده و ممکن است با تغییر هر یک از این موارد، نتایج متفاوتی حاصل گردد).

۱- با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری کاهش یافته به طوری که متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب حداکثر تا میزان ۳۷، ۵۰ و ۶۹ درصد (نسبت به نمونه شاهد) کاهش پیدا کرده است.

۲- الیاف میکرو پلی پروپیلن اثر بیشتری بر تغییرات عرضی ترک خوردگی نسبت به تغییرات طولی آن دارد. این موضوع در مقادیر مصرف بالاتر الیاف (در اینجا ۹۱۰ گرم در متر مکعب بتن تازه)، بیشتر مشاهده گردید.

۳- اصلاح کننده گرانروی بتن اثر چشمگیری بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در رو سازی های بتنی دارد. این موضوع در مقادیر مصرف بالاتر این ماده (در اینجا ۰٫۲ درصد وزن آب بتن تازه) بیشتر مشهود بود.

با توجه به نتایج بررسی شده می‌توان مشاهده نمود که میزان اثر منفی ماده اصلاح کننده گرانروی بتن در مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف تقریباً نزدیک به هم می باشد. به عبارت دیگر با افزایش ماده اصلاح کننده گرانروی از میزان ۰٫۱ به ۰٫۲، میزان کاهش مقادیر متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی در مخلوط بتنی حاوی ۴۵۵ گرم الیاف، نزدیک به میزان کاهش مقادیر متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی در مخلوط بتنی حاوی ۹۱۰ گرم الیاف می باشد. بنابراین می‌توان اینطور استنباط نمود که ماده اصلاح کننده گرانروی بتن در مقادیر مصرف مختلف می‌تواند رفتار مشابهی در افزایش شدت ترک خوردگی در مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف دارد. بررسی بیشتر این موضوع نیازمند تحقیقات آتی در این زمینه است.



شکل ۱۷. مقادیر مساحت ترک خوردگی مخلوط بتن شاهد و حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح کننده گرانروی بتن

در مخلوط بتنی حاوی ۴۵۵ گرم الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح کننده گرانروی در مقادیر مختلف (۰٫۱ و ۰٫۲ در صد)، میزان کاهش متوسط عرض ترک خوردگی نزدیک به میزان کاهش طول آن است. به عبارت دیگر، تغییرات عرضی و طولی ترک خوردگی در این مخلوط های بتنی مشابه یکدیگر بوده و اختلاف چشمگیری با یکدیگر ندارند. همانطور که در نتایج بررسی شده در قسمت های قبلی عنوان گردید، افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن باعث تغییرات عرضی بیشتر نسبت به تغییرات طولی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری می‌گردد. اختلاف بین تغییرات عرضی و طولی ترک خوردگی در مخلوط بتنی حاوی ۴۵۵ گرم الیاف وجود داشته اما کمتر از اختلاف بین این دو مشخصه هندسی ترک خوردگی در مخلوط بتنی حاوی ۹۱۰ گرم است. همچنین، در مخلوط های

-Bendimerad, A. Z., Delsaute, B., Rozière, E., Staquet, S. & Loukili, A. (2020). Advanced techniques for the study of shrinkage-induced cracking of concrete with recycled aggregates at early age. *Construction and Building Materials*, 233, 117340.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117340

-Bertelsen, I. M. G., Ottosen, L. M. & Fischer, G. (2019). Quantitative analysis of the influence of synthetic fibres on plastic shrinkage cracking using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 199, 124–137.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.268

-Bertelsen, I. M. G., Ottosen, L. M. & Fischer, 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

-Bessaies-Bey, H., Khayat, K. H., Palacios, M., Schmidt, W. & Roussel, N. (2022). Viscosity modifying agents: Key components of advanced cement-based materials with adapted rheology. *Cement and Concrete Research*, 152, 106646.

-Chen, J., Qiao, M., Gao, N., Wu, J., Shan, G., Zhu, B. & Ran, Q. (2021). Acrylate based post-acting polymers as novel viscosity modifying admixtures for concrete. *Construction and Building Materials*, 312, 125414.

-Chen, Y., Figueiredo, S. C., Li, Z., Chang, Z., Jansen, K., Çopuroğlu, O. & Schlangen, E. (2020). Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. *Cement and Concrete Research*, 132, 106040.

-Combrinck, R., Kayondo, M., le Roux, B. D., de Villiers, W. I. & Boshoff, W. P. (2019). Effect of various liquid admixtures on cracking of plastic concrete. *Construction and Building Materials*, 202, 139–153.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.060

-Goyena, R. & Fallis, A. . (2019). Pavement Engineering - Principles and Practice. In *Journal of Chemical Information and Modeling*, Vol. 53, Issue 9.

doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

-Gupta, R. & Banthia, N. (2016). Correlating plastic shrinkage cracking potential of fiber reinforced cement composites with its early-age constitutive response in tension. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(4), 1499–1509.

doi.org/10.1617/s11527-015-0591-9

-مشخصات هندسی ترک خوردگی دال‌های بتنی با افزودن ماده اصلاح کننده گرانروی بتن به میزان قابل توجهی افزایش یافته به گونه‌ای که متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب حداکثر تا میزان ۱۱، ۱۱ و ۱۷ درصد (نسبت به نمونه شاهد) افزایش یافت.

-در مخلوط های بتنی حاوی ترکیب الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح کننده گرانروی بتن، اثر مثبت الیاف بر اثر منفی VMA غلبه کرده و برآیند این موضوع باعث کاهش شدت ترک خوردگی مخلوط های بتنی حاوی هر دو ماده گردید.

-با توجه به نتایج حاصله، مخلوط بتنی حاوی ۹۱۰ گرم در متر مکعب بتن تازه الیاف و ۰٫۱ درصد ماده اصلاح کننده گرانروی مطلوب ترین عملکرد را در کنترل و کاهش ترک خوردگی خمیری داشته است. در این مخلوط متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب به میزان ۴۷، ۳۳ و ۶۰ درصد کاهش پیدا کرده است.

-در مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده اصلاح کننده گرانروی بتن، در مقادیر مصرف پایین الیاف (۴۵۵ گرم)، تغییرات عرضی و طولی ترک خوردگی نزدیک به یکدیگر شده و رفتاری مشابه از خود نشان دادند. این در حالیکه با افزایش درصد الیاف تغییرات عرضی ترک خوردگی بیشتر از تغییرات طولی آن مشاهده گردید.

-نتایج بدست آمده در این پژوهش با در نظر گرفتن برخی محدودیت ها همچون: تعداد دال های بتنی، شرایط محیطی کنترل شده، اندرکنش الیاف و ماده اصلاح کننده گرانروی و غیره ارائه شده که امید است در مطالعات آتی این محدودیت ها مرتفع گردند.

۶- مراجع

-Abdulridha, M. A., Salman, M. M. & Banyhussan, Q. S. (2021). Effect Polypropylene of Fiber on Drying Shrinkage Cracking of Concrete Pavement Using Response Surface Methodology. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 25(3), 10–21.

doi.org/10.31272/jeasd.25.3.2

-Anas, M., Khan, M., Bilal, H., Jadoon, S. & Khan, M. N. (2022). Fiber Reinforced Concrete: A Review Engineering Proceedings, 22(1), 1–7.

doi.org/10.3390/engproc2022022003

- 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), 2171–2176.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.041
- Safiuddin, M., Kaish, A. B. M. A., Woon, C. O. & Raman, S. N. (2018). Early-age cracking in concrete: Causes, consequences, remedial measures, and recommendations. *Applied Sciences*, 8(10), 1730.
- Sayahi, F., Emborg, M., Hedlund, H. & Cwirzen, A. (2021). Effect of steel fibres extracted from recycled tyres on plastic shrinkage cracking in self-compacting concrete. *Magazine of Concrete Research*, 73(24), 1270–1282.
doi.org/10.1680/jmacr.20.00116
- Sayahi, F., Emborg, M., Hedlund, H., Cwirzen, A. & Stelmarczyk, M. (2021). The severity of plastic shrinkage cracking in concrete: A new model. *Magazine of Concrete Research*, 73(6), 315–324.
doi.org/10.1680/jmacr.19.00279
- Shahin, M. Y. (2005). Pavement management for airports, roads, and parking lots, Vol. 501. *Springer New York*.
- Sobhani Fard, E., Ziari, H., Sobhani Fard, R., & Amiri, M. (2025). Evaluation the effect of hybrid polypropylene synthetic fibers and concrete viscosity modifier agent on plastic shrinkage cracking distress in jointed plain concrete pavements. *Journal of Transportation Research*, 22(2), 441-454
- Wang, Z. jian, Liu, Y. dong, Luo, W. yu, Wu, L. ming, Ye, X. yang & Zhang, X. (2024). An analysis of the mechanical properties of precast steel fiber reinforced concrete pavement joints. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(7), 1588–1596.
doi.org/10.1080/15376494.2022.2139875
- Wyrzykowski, M., Ghourchian, S., Münch, B., Griffa, M., Kaestner, A. & Lura, P. (2021). Plastic shrinkage of mortars cured with a paraffin-based compound – Bimodal neutron/X-ray tomography study. *Cement and Concrete Research*, 140 (November 2020), 106289.
doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106289
- Yildizel, S. A., Tayeh, B. A. & Uzun, M. (2022). The evaluation of calcium carbonate added and basalt fiber reinforced roller compacted high performance concrete for pavement. *Case Studies in Construction*
- Kori, K. & Goliya, S. S. (2022). Use of Discrete fiber in road pavement. *Materials Today: Proceedings*, 65(August), 1856–1860.
doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.042
- Kumar, R. (2022). Hybrid Fiber Reinforced Concrete Composite for Construction of Rigid Pavements. *Journal of Cement Based Composites*, 3(1), 1–8.
doi.org/10.36937/cebacom.2022.5630
- Liu, Q., Xiao, J. & Singh, A. (2021). Quantification of plastic shrinkage and cracking in mortars containing different recycled powders using digital image correlation technique. *Construction and Building Materials*, 293, 123509.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123509
- Ma, H. & Zhang, Z. (2020). Paving an engineered cementitious composite (ECC) overlay on concrete airfield pavement for reflective cracking resistance. *Construction and Building Materials*, 252, 119048.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119048
- Mazzoli, A., Monosi, S. & Plescia, E. S. (2015). Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods. *Construction and Building Materials*, 101, 596–601.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.090
- Moelich, G. M., van Zyl, J. E., Rabie, N. & Combrinck, R. (2021). The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 123(July), 104182.
doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104182
- Monazami, M., Sharma, A. & Gupta, R. (2022). Evaluating performance of carbon fiber-reinforced pavement with embedded sensors using destructive and non-destructive testing. *Case Studies in Construction Materials*, 17(June), e01460.
doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01460
- 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, 85–98.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.102
- Ozturk, O. & Ozyurt, N. (2022). Effects of Polypropylene Macro Fibers on the Structural Requirements, Cost and Environmental Impact of Concrete Pavements. *Engineering Proceedings*, 32.
doi.org/10.3390/engproc2022017032

reduce diffusion in cement-based materials: Effect of molecular mass. *Construction and Building Materials*, 290, 123207.

-Ziari, H., Fazaeli, H., Vaziri Kang Olyaei, S. J. & Ziari, M. A. (2022). Evaluation of effects of temperature, relative humidity, and wind speed on practical characteristics of plastic shrinkage cracking distress in concrete pavement using a digital monitoring approach. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(1), 138–158.

-Ziari, H., Sobhanifard, E., & Omidinasab, F. (2024). Evaluation of the effect of silica fume on the permeability characteristics of concrete pavements containing fibers. *Journal of Transportation Research*, 21(3), 345-362.

Materials, 17(June), e01293.
doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01293

-Zarei, A., Rooholamini, H. & Ozbakkaloglu, T. (2022). 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), 470–484.

doi.org/10.1007/s42947-021-00049-7

-Zhang, H. & Xiao, J. (2021). Plastic shrinkage and cracking of 3D printed mortar with recycled sand. *Construction and Building Materials*, 302(May), 124405.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124405

-Zhao, L., Feng, P., Shao, L., Ye, S. & Liu, X. (2021). Using viscosity modifying admixture to

Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Pavements: Assessing the Competing Roles of Viscosity Modifying Agent (VMA) and Micro Polypropylene Fibers

*Ehsan Sobhani fard, Ph.D., Student, School of Civil Engineering,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

***Hassan Ziari**, Professor, School of Civil Engineering,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: h.ziari@iust.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

The incorporation of novel materials in the pavement construction is essential for mitigating the initiation and propagation of early-age distresses as well as optimizing the costs of users. Plastic shrinkage cracking is a prevalent form of early damage in concrete pavements, significantly affecting durability. Present study investigates the changes in the severity of plastic shrinkage cracking distress in concrete pavements influenced by the addition of concrete viscosity modifier agent (VMA) and micro synthetic polypropylene fibers using microscopic image analysis. In this regard the average width, length, and area of plastic shrinkage cracking were evaluated according to the ASTM C1579 standard method. The results showed that the fibers and VMA material have a significant effect on cracking behavior. The fibers led to a decrease in the average width, length, and area of cracks by a maximum of 50%, 37%, and 6%, respectively. However, the VMA material increased the average width, length, and area of cracks by a maximum of 11%, 11%, and 17%, respectively. The greatest reduction in the average width, length and area of cracks occurred in the concrete mixture containing both materials, by 47%, 33% and 60%, respectively. The fibers caused more transverse changes, but the VMA material caused similar transverse and longitudinal changes. In the concrete mixture with lower fiber amounts (455 g/m³) and different VMA materials, the transverse and longitudinal changes were similar, but in higher fiber amounts (910 g/m³) and different VMA materials, the effect of fibers dominated the transverse and longitudinal changes of cracking, and transverse changes occurred more than longitudinal changes. These findings contribute to a more optimized design of concrete mixtures for enhanced resistance to early-age cracking in pavement applications.

Keywords: Concrete Pavement, Plastic Shrinkage Cracking, Micro Polypropylene Fibers, Concrete Viscosity Modifier Agent (VMA), Cracking Severity