ارزیابی اثر الیاف مصنوعی پلی پروپیلن هیبریدی و اصلاح کننده ویسکوزیته بتن بر خرابی ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار

مقاله علمی – پژوهشی

احسان سبحانی فرد*، دانشجوی دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حسن زیاری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
رضا سبحانی فرد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی – مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
محسن امیری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی – مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ehsan_sobhanifard@civileng.iust.ac.ir

دریافت :۱٤۰۳/۱۰/۰۲ – پذیرش: ۱٤۰٤/۰۳/۰۱
صفحه ٤٥٤-٤٤۱

چکیده

خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار از جمله خرابی‌های رایج در این روسازی‌ها است. استفاده از الیاف مختلف، به خصوص الیاف پلی پروپیلن به دلیل دوام و عملکرد بالاتر، یکی از رویکردهای نوین و موثر در کاهش ترک خوردگی است. افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته ی بتن از جمله مواد افزودنی پرکاربرد در صنعت روسازی بتنی است. بررسی ترکیب این ماده با الیاف هیبرید میکرو و ماکرو پلی پروپیلن بر تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری دارای اهمیت است. تحقیق حاضر به ارزیابی اثر الیاف مصنوعی پلی پروپیلن هیبریدی و ماده افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته‌ی بتن بر خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار می‌پردازد. ماده‌ی اصلاح کننده ویسکوزیته‌ی بتن در مقادیر ۰,۱ و ۰,۲ درصد و الیاف هیبرید شامل الیاف میکرو در مقدار ۹۱۰ گرم و الیاف ماکرو در مقدار ۱۸۰۰ گرم در متر مکعب بتن تازه استفاده شد. متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری با استفاده از روش استاندارد ASTM C1579 و تحلیل تصاویر میکروسکوپیک ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که ماده اصلاح کننده ویسکوزیته‌ی بتن باعث افزایش شدت ترک خوردگی شده و متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی را حداکثر تا میزان ۱۱، ۱۲ و ۱۷ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، الیاف هیبرید باعث کاهش متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی حداکثر تا میزان ۷۷، ۵۲ و ۸۸ درصد گردید. قابل ذکر است، اثر مثبت الیاف بر اثر منفی اصلاح کننده ویسکوزیته‌ی بتن غلبه کرده و با ترکیب این دو ماده، شدت ترک خوردگی کاهش یافت. ترکیب ماده اصلاح کننده ویسکوزیته‌ی بتن با الیاف هیبرید اثرات منفی افزاینده نسبت به حالت مجزا از این مواد نداشت. ماده VM افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته‌ی بتن اثر مشابهی بر تغییرات عرضی و طولی ترک‌خوردگی داشته، اما الیاف هیبرید باعث تغییر بیشتر عرض ترک خوردگی نسبت به طول آن شد.

واژه‌های کلیدی: روسازی‌های بتنی ساده درزدار، خرابی ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری، الیاف هیبرید پلی پروپیلن، اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، تحلیل تصاویر میکروسکوپیک

۱- مقدمه

روسازی‌های بتنی نسبت به رویه‌های ساخته شده از مصالح آسفالتی، از مقاومت، دوام و عملکرد بالاتری برخوردار بوده و نیاز کمتری به تعمیر، ترمیم و بازسازی در طول عمر خدمت دهی خود دارند(Goyena & Fallis, 2019). این موضوع در روسازی‌های بتنی فرودگاهی که عملیات تعمیر و بازسازی آن با تبعات اقتصادی و اجتماعی بالایی به همراه بوده، اهمیت می‌یابد. پیشتر در ایران بیشتر روسازی‌های ساخته شده در کاربری‌های مختلف از نوع روسازی‌های آسفالتی بوده است.

با افزایش قیمت قیر و اضمحلال سریع تر روسازی‌های آسفالتی و همچنین تولید مازاد سیمان در کشور، روند استفاده از مصالح بتنی در ساخت روسازی‌های مختلف در ایران دستخوش تغییر شده و این روسازی‌ها، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. روسازی‌های بتنی از یک دال بتنی ساده و یا مسلح تشکیل شده که می‌تواند به طور مستقیم بر روی خاک بستر کوبیده شده اجرا شده و یا بر روی سطح اساس دانه‌ای یا تثبیتی قرار گیرند(Huang, 2004). روسازی‌های بتنی به طور کلی شامل رویه‌های بتنی ساده درزدار، مسلح درزدار و مسلح پیوسته تقیسم بندی می شوند(Delatte, 2014). در ایران بیشتر از روسازی‌های بتنی ساده با درزهای عرضی در کاربری‌های مختلف استفاده می‌شود. علت این امر، عدم استفاده از عناصر مسلح کننده و به دنبال آن کاهش هزینه، زمان و سختی اجرا می‌باشد. روسازی‌های بتنی ساده درزدار، شامل دال‌های بتنی ساده با درزهای عرضی به منظور کنترل ترک و درزهای طولی بوده که از میلگردهای انتقال بار در محل درز عرضی و میلگردهای دوخت در محل درزهای طولی استفاده می‌شود(Griffiths & Thom, 2007).

عملکرد، دوام و سطح خدمت دهی این روسازی‌ها، به عوامل مختلفی از جمله طراحی، اجرا و عمل آوری صحیح روسازی بتنی دارد. یکی از عوامل کاهش دهنده عمر مفید روسازی‌های بتنی، ترک خوردگی دال بتنی است. ترک خوردگی محلی برای نفوذ آب و دیگر مواد خورنده به داخل دال بتنی بوده در نتیجه باعث تخریب موضعی و کلی روسازی می‌گردد. در خرابی‌های تعریف شده در سیستم مدیریت روسازی بتنی، ترک خوردگی بتن به طور مستقیم و غیر مستقیم عامل ایجاد کننده خرابی بوده و به نوعی در شکست کلی دال بتنی دخالت دارد(Shahin, 2005). از این جهت، بحث ترک خوردگی در روسازی‌های بتنی اهمیت یافته و مورد توجه محققان و مجریان صنعت روسازی بوده است. در این میان، خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار اهمیت نسبی بالاتری دارد. این نوع ترک خوردگی در ساعات اولیه پس از ساخت روسازی و به دلیل ایجاد فشارهای مویینگی منفی شکل گرفته در سطح روسازی ناشی از تبخیر سطحی سریع دال بتنی به وجود می‌آید (Kolawole et al., 2022; Rose et al., 2022; Ziari et al., 2022). پس از اجرای دال روسازی بتنی، اختلاف وزن مصالح تشکیل دهنده بتن باعث شده تا نشست دال بتنی رخ داده و آب مخلوط بتنی به سطح دال روسازی انتقال یابد. این فرآیند که آب انداختگی بتن نام داشته، با نرخی متاثر از متغیرهای مختلف شامل نسبت آب به مواد سیمانی، میزان مواد سیمانی و هندسه سازه بتنی، منجر به تزریق آب به سطح بتن می‌شود. شرایط و عوامل محیطی شامل دمای محیط، رطوبت نسبی هوا و جریان باد باعث تبخیر سطحی دال بتنی با نرخی مشخص می‌گردد. پس از برابری نرخ آب انداختگی با نرخ تبخیر سطحی، فشار آب حفره ای در دال بتنی منفی شده و فشارهای مویینگی تشکیل می‌گردد (Liu et al., 2021; Sayahi et al., 2021). این فشارها باعث ایجاد جمع شدگی خمیری در دال بتنی شده که در صورت مقید بتن روسازی بتنی، تنش‌های کششی سطحی در بتن به‌وجود می‌آید. تجاوز شدت تنش‌های کششی از مقاومت کششی بتن تازه باعث ایجاد خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی بتنی می‌گردد (Maj & Ubysz, 2021; Zhang & Xiao, 2021). این نوع خرابی در روسازی‌های بتنی ساده درزدار اهمیت بیشتری داشته چرا که از یک طرف عناصر مسلح کننده در این روسازی ها به منظور مقابله با تنش‌های کششی وجود نداشته و از طرف دیگر، با توجه به وقوع این نوع ترک خوردگی در ساعات اولیه پس از ساخت و عدم ایجاد درزهای کنترل ترک در روسازی در این ساعات، دال بتنی در معرض این نوع خرابی وجود دارد. از این جهت، استفاده از رویکردهای نوین به منظور کنترل و کاهش این خرابی در روسازی‌های بتنی مورد توجه محققان صنعت روسازی بتنی بوده است. استفاده از الیاف‌های مختلف یکی از روش‌های موثر و نوین جهت کاهش خرابی ترک خوردگی خمیری بوده که توجه زیادی را به خود جلب کرده است(Bertelsen et al., 2020). الیاف باعث بهبود مقاومت کششی و خمشی بتن شده و همچنین مقاومت ضربه ای آن را افزایش می‌دهد. الیاف با قرار گرفتن در محل ترک خوردگی و انجام عمل پل زدن از رشد و گسترش بیشتر ترک خوردگی بتن جلوگیری کرده و مقاومت پس از ترک خوردگی آن را افزایش می‌دهد (Kumar, 2022; Wang et al., 2024). در بین الیاف های مختلف، الیاف مصنوعی بر پایه پلی پروپیلن، به دلیل خصوصیات مقاومتی و دوامی مناسب و همچنین میزان مصرف پایین و تولید در مقیاس انبوه، مورد توجه بیشتری واقع شده و در سازه‌های بتنی مختلفی

مورد استفاده قرار گرفته است. این الیاف متناسب با خصوصیات مقاومتی و هندسی به دو نوع الیاف میکرو و ماکرو تقسیم می‌شوند. در صورت استفاده از یک نوع الیاف، مخلوط بتنی الیافی منفرد و در صورت ترکیب چند الیاف، مخلوط بتنی الیافی هیبریدی تلقی می‌گردد(Bertelsen et al., 2020). استفاده از مخلوط‌های بتنی الیافی هیبریدی با الیاف مصنوعی پلی پروپیلن به دلیل کسب مشخصات مطلوب و ایجاد یک سیستم مسلح سازی پیوسته، اهمیت داشته و در سازه‌های بتنی با کاربری مختلف مورد استفاده قرار گرفته است.

علاوه بر استفاده از الیاف، افزودنی‌های شیمیایی مختلفی در مخلوط‌های بتنی استفاده شده و گوناگونی و میزان مصرف هر یک از این مواد در حال افزایش است. این موضوع در روسازی‌های بتنی نیز وجود داشته و افزودنی‌های شیمیایی مختلفی به منظور دستیابی به خصوصیات مورد نظر در این سازه‌های بتنی استفاده می‌شود. یکی از این مواد، ماده افزودنی اصلاح کننده‌ی ویسکوزیته بتن است (Y. Chen et al., 2020). این ماده به منظور اصلاح خاصیت ویسکوزیته (گرانروی) بتن استفاده شده و می‌تواند نقش مهمی در کنترل پایداری و انسجام مخلوط‌های بتنی بازی کند. این ماده از جداشدگی مخلوط بتنی جلوگیری می‌کند (J. Chen et al., 2021; Zhao et al., 2021). لازم به ذکر است، اصلاح کننده 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(Bessaies-Bey et al., 2022). 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 جداشدگی، 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 می کند.

با بررسی خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری و بحث استفاده از الیاف مصنوعی پلی پروپیلن به صورت هیبریدی و همچنین ماده افزودنی اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، مسئله‌ای که نیازمند بررسی بیشتری بوده، اثر استفاده از این دو ماده به صورت ترکیبی بر تغییرات خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار است. مطالعات زیادی بر روی بررسی اثر الیاف مختلف و همچنین مواد افزودنی مختلف بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی صورت گرفته است. با این حال تعداد کمتری از محققان صنعت بتن به بررسی اثر الیاف هیبریدی و ترکیب مواد مختلف بر تغییر رفتار ترک خوردگی خمیری پرداخته‌اند. به عنوان مثال، مورا و همکاران، اثر ترکیب الیاف فلزی منفرد و ماده کاهنده جمع شدگی بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی را بررسی کردند. در این تحقیق مشاهده شد که مخلوط بتنی حاوی هر دو ماده، بهترین عملکرد در کنترل ترک خوردگی را از خود نشان می‌دهد(Mora et al., 2001). در تحقیق دیگر، الیویر و همکاران به اثر ترکیب نانو سیلیس، پلیمرهای فوق جاذب آب و الیاف میکرو پلی پروپیلن به صورت منفرد پرداختند. نتایج کار آنان حاکی از آن بود که الیاف مصنوعی منفرد باعث کاهش ترک خوردگی مخلوط‌های بتنی حاوی نانو سیلیس شده، اما تاثیر کمتری نسبت به پلیمرهای فوق جاذب آب از خود نشان دادند (Olivier et al., 2018). همالاتا و رامش نیز به بررسی اثر خاکستر بادی و الیاف بازالت بر کاهش جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی پرداخته و نشان دادند که هر دو ماده در کاهش جمع شدگی موثر هستند(Hemalatha & Ramesh, 2019).

با بررسی مسئله مطرح شده و پیشینه پژوهش بررسی شده، مشاهده می‌شود که با وجود انجام برخی تحقیقات در این زمینه، مواردی وجود داشته که نیازمند بررسی بیشتری است. اثر الیاف مصنوعی پلی پروپیلن به صورت هیبریدی بر تغییر رفتار خرابی ترک خوردگی خمیری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، اثر ماده اصلاح کننده ویسکوزیته بتن بر تغییرات ترک خوردگی خمیری به طور واضح مشخص نگردیده است. مسئله با اهمیت دیگر، ارزیابی اثر ترکیب این ماده بر تغییر رفتار خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری است. بررسی مجموع این مواد در روسازی‌های بتنی ساده درزدار، علاوه بر پوشش خلا تحقیقاتی موجود، می‌تواند کمک شایانی به درک بهتر رفتار خرابی ترک خوردگی خمیری در روسازی‌های بتنی حاوی الیاف مصنوعی پلی پروپیلن و ماده

اصـــلاح کننده ویســـکوزیته بتن کرده و جهت اتخاذ تصـــمیم مناسـب‌تر به منظور اسـتفاده از هر یک از این مواد در روسازی بتنی، و ساخت یک روسازی با دوام و عملکرد بالاتر، مورد نظر قرار گیرد. از این جهـت تحقیق حـاضـــر بـه ارزیابی اثر الیاف مصنوعی پلی پروپیلن هیبریدی و ماده اصلاح کننده ویسکوزیته بتن بر خرابی ترک خوردگی ناشـــی از جمع شـــدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار می‌پردازد.

۲- مصالح و روش تحقیق

در این قســـمـت بـه معرفی مصـــالح بـه کـار رفته در روند و مشـخصـات آنان پرداخته و سـپس، نسـبت‌های اختلاط بتن روســـازی بتنی ســـاده درزدار ارائه می‌گردد. پس از آن، روش آزمایشـــگاهی اســـتاندارد جهت ارزیابی خرابی ترک خوردگی ناشـــی از جمع شـــدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی تشـــریح می‌گردد.

۲-۱-مصالح و روش تحقیق

سـیمان مورد استفاده در این تحقیق شامل سیمان پرتلند تیپ ۱-٤۲۵ با وزن مخصـــوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود. در جدول ۱، مشـــخصـــات تحلیل شـــیمیایی این ســـیمان دیده می‌گردد. مصالح سنگی مورد استفاده از مصالح رودخانه‌ای بوده که شـــامل مصـــالح ســـنگی ریز دانه با اندازه‌ی ۵-۰ میلی‌متر، مصـالح سنگی درشت دانه با اندازه ی ۱۲-۵ میلی‌متر و ۱۹-۱۲ میلی‌متر اسـت. مصالحی سنگی ریز دارای چگالی نسبی، جذب آب و مدول نرمی به ترتیب به میزان ۲,۵۸، ۲,۸۸٪ و ۳,٤ مطابق با استانداردهای ASTM C128 و ASTM C136 می‌باشد. چگالی نسـبی و جذب آب برای مصـالح سـنگی درشـت دانه ۱۲-۵ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۲,۵ و ۲,۵٪ و برای مصـــالح ســـنگی درشـــت دانه ۱۹-۱۲ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۲,٦ 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 میکروی رشته‌ای و ماکروی در هم تابیده مطابق با استاندارد ASTM C1116 و ASTM D7508 است. شکل ظاهری الیاف مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق

اکسید	مقدار (درصد)	الزامات استاندارد ایران (۳۸۹)
SiO_2	۲۱,۸٤	>۲۰
Al_2O_3	٤,۵٦	٦>
Fe_2O_3	۳,۵۲	٦>
CaO	٦۳,۰۱	-
MgO	۳,٦۰	۵>
SO_3	۱,۷۵	۳>
Na_2O	۰,۱۸	-
K_2O	۰,۵۳	-

شکل ۱. شکل ظاهری الیاف مصنوعی پلی پروپیلن مورد استفاده در این تحقیق: الیاف میکرو پلی پروپیلن (چپ) و الیاف ماکرو پلی پروپیلن (راست)

مشـخصـات مکانیکی و فنی این الیاف در جدول ۲ آورده شده است.

همچنین ماده اصلاح کننده ویسکوزیته بتن مورد استفاده در این تحقیق، ماده شـــیمیایی پودری بر پایه هیدروکســـی پروپیل متیل ســلولز است. شکل ظاهری این ماده در شکل ۲ نشان داده شـده اسـت. اصـلاح کننده ویسکوزیته بتن، به صورت پودری در مخلوط بتن تازه افزوده شده و مورد استفاده قرار گیرد. میزان مصـــرف این ماده در حدود ۰,۱ تا ۰,۲ درصـــد وزن آب مورد استفاده در مخلوط بتن تازه می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی و فنی الیاف مورد استفاده

نوع الیاف	میکرو	ماکرو
جنس الیاف	پلی پروپیلن خالص	پلی پروپیلن خالص
شکل ظاهری	تک رشته‌ای	در هم تابیده
طول (میلی‌متر)	۱۲	٥٤
قطر (میلی‌متر)	۰,۰۳	۰,٤٥
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۳٤٥	٦۰۰
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	۳,٥	٦
جذب آب (درصد)	ندارد	ندارد
وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰,۹۱	۰,۹۱

شکل ۲. شکل ظاهری اصلاح کننده ویسکوزیته بتن مورد استفاده در این تحقیق

از آب آشامیدنی سیستم لوله کشی آزمایشگاه، جهت ساخت مخلوط‌های بتنی، استفاده گردید.

ماده افزودنی مورد استفاده در این تحقیق، فوق روان‌کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر است.

۲-۲-نسبت اختلاط بتن روسازی بتنی ساده درزار

نسبت‌های اختلاط بتن مورد استفاده در روسازی بتنی باید به گونه‌ای تعیین شوند تا الزامات ذکر شده در ضابطه ۷۳۱، دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها رعایت گردد. این الزامات به منظور طراحی مخلوط بتن روسازی استفاده می‌گردد. در جدول ۲، معیارهای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی هوادار بر اساس ضابطه‌ی ۷۳۱ مشاهده می‌گردد.

جدول ۲. معیارهای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه ۷۳۱

معیار	مقدار	روش انجام آزمایش
مقاومت فشاری (نمونه استوانه‌ای) (مگاپاسکال)	حداقل ۳۰	ASTM C39
مقاومت خمشی (به روش تیر ساده با بارگذاری در یک سوم دهانه) (مگاپاسکال)	حداقل ٤	ASTM C78
اسلامپ (میلی‌متر)	۷۰-۱۰	ASTM C143
عیار سیمان (کیلومتر بر متر مکعب)	حداقل ۳۳٥	-
نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)	حداکثر ۰,٥۳	-

بدین ترتیب نسبت‌های اختلاط بتن در روسازی بتنی به گونه‌ای تعیین شد تا الزامات جدول ۲ در طرح اختلاط رعایت شود. الیاف میکرو و ماکروی مصنوعی در میزان مصرف پیشنهادی توسط تولید کننده و مطابق با تحقیقات گذشته به ترتیب به میزان ۰,۹ و ۱,۸ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شد. همچنین، میزان مصرف ماده اصلاح کننده ویسکوزیته بتن به میزان ۰,۱ و ۰,۲ درصد وزن آب اختلاط بتن تازه استفاده گردید. بدین ترتیب تعداد ۱ طرح اختلاط شاهد، ۱ طرح اختلاط بتن الیافی هیبریدی، ۲ طرح اختلاط بتن حاوی اصلاح کننده ویسکوزیته و ۲ طرح اختلاط بتن حاوی ترکیب الیاف هیبریدی و ماده اصلاح کننده ویسکوزیته در روند تحقیق مورد نظر قرار گرفت. در جدول ۳، نسبت‌های اختلاط بتن مورد نظر در این تحقیق آورده شده است. مشخصات وزنی طرح اختلاط بتن تازه (برای ساخت یک متر مکعب) در حالت اشباع با سطح خشک مصالح در ادامه بیان شده است: سیمان: ٤۰۰ کیلوگرم، مصالح سنگی ٥-۰ میلی‌متر: ۱۰۰۷ کیلوگرم، مصالح سنگی ۱۲-٥ میلی‌متر: ٤۲۸ کیلوگرم، مصالح سنگی ۱۹-۱۲ میلی‌متر: ۲٥۷ میلی‌متر، آب آزاد: ۲۰۰ کیلوگرم.

۲-۳-ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری

ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی با استفاده از روش آزمایش استاندارد ASTM C1579 ارزیابی گردید. در این روش از یک قالب با ابعاد ٦۰×۳٥٥×٥٦۰ میلیمتر استفاده شده است. به منظور افزایش ترک خوردگی در مخلوط‌های بتنی از یک ابزار فولادی با شکل و مشخصات هندسی مشخص در داخل قالب استفاده گردید. شکل ۳ قالب و ابزار فولادی مورد نظر در این تحقیق را نشان می‌دهد.

شکل ۳. قالب و ابزار فولادی مورد استفاده در تحقیق مطابق با استاندارد ASTM C1579

از یک محفظه‌ی 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 مخلوط‌های بتنی، شرایط محیطی برای دمای ٤۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی هوای ۲۰ درصد و سرعت جریان باد ۳۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شد. همچنین مدت زمان آزمایش ٦ ساعت در نظر گرفته شد تا حداکثر میزان ترک خوردگی در مخلوط‌های بتنی به وجود آید. در شکل ٤، محفظه کنترل شرایط محیطی و دال بتنی دیده نشان داده شده است.

(الف)

(ب)

شکل ٤. الف) محفظه کنترل شرایط محیطی و ب) دال بتنی تحت آزمایش

پس از انجام آزمایش، تصاویر میکروسکوپیک از قسمت‌های ترک خورده با استفاده از میکروسکوپ نوری متصل به رایانه تهیه گردید. در شکل ٥، دال بتنی ترک خورده و تهیه تصویر میکروسکوپیک از دال بتنی نشان داده شده است.

(الف)

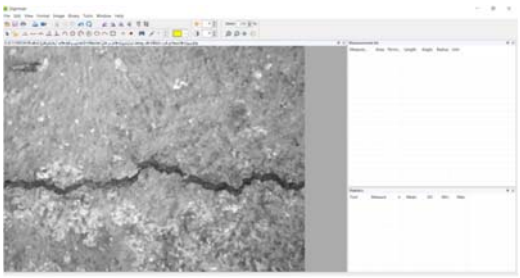
(ب)

شکل ۵. الف. تهیه تصویر میکروسکوپیک از دال بتنی و ب. دال بتنی ترک خورده

۳- تحلیل

سپس تصاویر تهیه شده در داخل نرم افزار تحلیل تصاویر دیجیتال وارد شده و پس از کالیبره نمودن تصویر با استفاده از اندازه 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 اندازه‌گیری مشخصات هندسی ترک خوردگی، با استفاده از روش به کار گرفته شده توسط زیاری و همکاران(Ziari et al., 2022)، صورت گرفت. در شکل ٦ تصاویر میکروسکوپیک در نرم افزار تحلیل تصویر نشان داده شده است.

(الف)



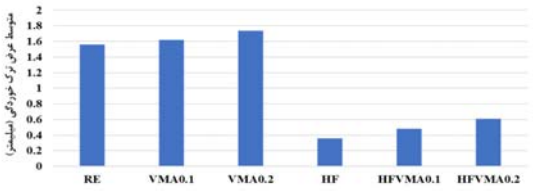
(ب)

شکل ٦. الف) تصاویر دیجیتال تهیه شده از قسمت ترک خوردگی در دال بتنی ب) تحلیل تصاویر در نرم افزار

٤- بحث

در این قسمت نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده روی دال‌های بتنی ارائه شده است. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ به ترتیب مقادیر متوسط عرض ترک خوردگی، طول ترک خوردگی و مساحت ترک خوردگی در مخلوط‌های بتنی شاهد (RE)، مخلوط حاوی اصلاح کننده ویسکوزیته در مقادیر ۰,۱ (VMA0.1) و ۰,۲ (VMA0.2) درصد، مخلوط حاوی الیاف هیبرید پلی پروپیلن (HF)، مخلوط حاوی الیاف هیبرید پلی پروپیلن و اصلاح کننده ویسکوزیته در مقادیر ۰,۱ (HFVMA0.1) و ۰,۲ (HFVMA0.2) درصد را نشان داده شده است. نتایج به دست آمده را می‌توان در سه قسمت بررسی کرد. قسمت اول تحلیل اثر اصلاح کننده ویسکوزیته بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که با افزودن اصلاح کننده ویسکوزیته، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی

شاهد افزایش می یابد. متوسط عرض، مساحت و طول ترک خوردگی مخلوط بتنی VMA0.1 به ترتیب به میزان ۳، ۲ و ۷ درصد افزایش یافته است. همچنین، واکنش مخلوط بتنی به افزودن اصلاح کننده ویسکوزیته به صورت منفی بوده و شدت ترک خوردگی در بتن تمایل به افزایش دارد. با این حال، میزان افزایش شدت ترک خوردگی در میزان مصرف اصلاح کننده ویسکوزیته محسوس نمی‌باشد. این تمایل به افزایش شدت ترک خوردگی در مخلوط بتنی با افزودن ماده اصلاح کننده ویسکوزیته را می‌توان اینگونه عنوان نمود که با افزودن این ماده، ویسکوزیته مخلوط بتنی افزایش می‌یابد، در نتیجه مدت زمانی که مخلوط بتنی در حالت خمیری بوده، افزایش می‌یابد. همانطور که در قسمت مقدمه بررسی گردید، افزایش زمان حالت خمیری و تاخیر در زمان گیرش بتن باعث شده تا مدت زمان بحرانی ترک خوردگی خمیری افزایش یابد. در نتیجه، احتمال ترک خوردگی در هر قسمت از دال بتنی که میزان تنش‌های کششی ناشی از جمع شدگی خمیری از مقاومت کششی بتن تازه تجاوز کند، افزایش می یابد. این موضوع باعث می‌شود تا شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی با افزودن اصلاح کننده ویسکوزیته بتن افزایش یابد. با بررسی بیشتر نتایج، مشاهده می‌شود که با مصرف بیشتر اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی شاهد، افزایش بیشتری می‌یابد. متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی VMA0.2 به ترتیب به میزان ۱۱، ۱۲ و ۱۷ درصد افزایش یافته است. با توجه به این نتایج می‌توان عنوان نمود که اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، اثر منفی بر شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی داشته و با افزایش میزان مصرف این ماده، شدت ترک خوردگی افزایش بیشتری داشته است. علت این موضوع ناشی از آن است که با افزودن بیشتر اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، ویسکوزیته مخلوط بتنی افزایش بیشتری یافته، در نتیجه مدت زمان حالت خمیری بتن و به دنبال آن، مدت زمان بحرانی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در بتن افزایش می‌یابد. باتوجه به این نتایج، می‌توان اینطور استنباط نمود که میزان مصرف اصلاح کننده ویسکوزیته بتن تاثیر چشمگیری بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی دارد. انتظار می‌رود که با افزایش مصرف این ماده، شدت ترک خوردگی با نرخ بالاتری افزایش یابد. بررسی این موضوع، نیازمند تحقیقات آتی در این زمینه است. با بررسی مجموع موارد ارزیابی شده در این قسمت، می‌توان عنوان نمود که اصلاح کننده ویسکوزیته بتن باعث افزایش شدت خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار می‌شود. همچنین، میزان مصرف این ماده بر تغییر رفتار خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در این روسازی‌ها اثر چشمگیری داشته، به طوری که با افزایش میزان مصرف آن، شدت خرابی با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد.

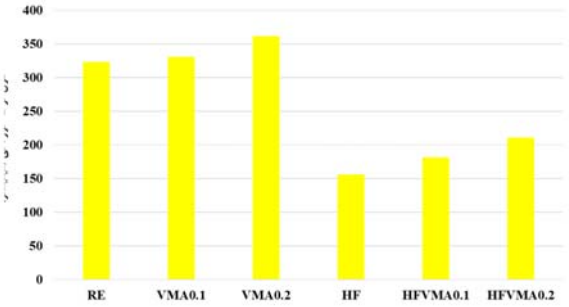


شکل ۷. مقادیر متوسط عرض ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی

در قسمت دوم تحلیل نتایج، شدت خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی حاوی الیاف هیبریدی با مخلوط بتنی شاهد مقایسه شده و اثر این الیاف مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌گردد با افزودن الیاف میکرو و ماکرو پلی پروپیلن، شدت ترک خوردگی در مخلوط بتنی شاهد به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی در مخلوط بتنی HF به ترتیب به میزان ۷۷، ۵۲ و ۸۸ درصد کاهش یافته است. این موضوع اثر محسوس الیاف هیبرید بر کاهش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی را نشان می‌دهد. در تحقیقات گذشته، مشاهده شده است که افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن منجر به کاهش متوسط عرض ترک خوردگی شده است (Bertelsen et al., 2020; Ma et al., 2002, 2004). همچنین در برخی دیگر از تحقیقات که به بررسی اثر الیاف ماکرو پلی پروپیلن بر تغییر رفتار ترک خوردگی خمیری پرداخته، مشاهده شد که این الیاف نیز در کنترل و کاهش شدت ترک خوردگی خمیری اثر چشمگیری

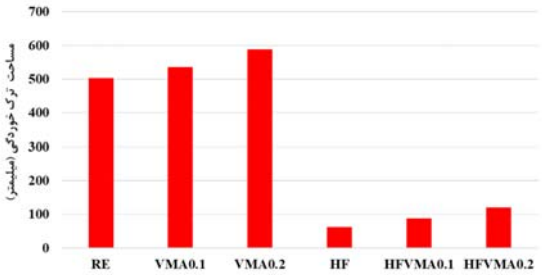
دارد(Mazzoli et al., 2015). اما، نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که با افزودن هر دو نوع الیاف میکرو و ماکرو پلی پروپیلن به مخلوط بتنی، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی در یک شرایط ترک خوردگی یکسان نسبت به تحقیقات گذشته، بصورت قابل ملاحظه کاهش یافته است. علت این موضوع ناشی از آن است که با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن، از رشد و گسترش ریز ترک خوردگی در مخلوط بتنی جلوگیری می‌گردد (شکل ۹). الیاف ماکرو پلی پروپیلن نیز باعث کنترل رشد ترک خوردگی با طول بیشتر شده و از رشد ترک خوردگی‌های بزرگتر جلوگیری می‌کند. با مصرف هر دو نوع الیاف، یک سیستم مسلح سازی پیوسته در مخلوط بتنی به وجود آمده، به طوری که از رشد و گسترش ترک خوردگی ریز و درشت جلوگیری می‌کند.

در نتیجه شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف هیبریدی پلی پروپیلن به میزان چشمگیری کاهش پیدا کند. با بررسی موارد ارزیابی شده در این قسمت، می‌توان عنوان نمود که الیاف هیبرید پلی پروپیلن اثر چشمگیری در کنترل و کاهش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار داشته و می‌تواند از رشد و گسترش این ترک خوردگی در روسازی بتنی جلوگیری کند.



شکل ۸. طول ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی

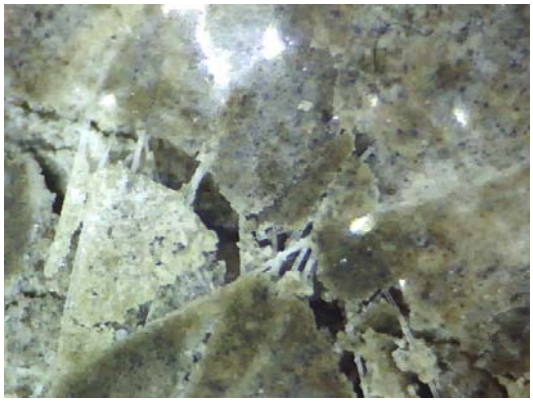
در قسمت سوم تحلیل نتایج به دست آمده، اثر الیاف هیبرید در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی حاوی ماده اصلاح کننده ویسکوزیته بتن بررسی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که با افزودن الیاف میکرو و ماکرو پلی پروپیلن به مخلوط بتنی حاوی اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، اثر منفی این ماده در افزایش شدت ترک خوردگی خمیری در مخلوط بتنی کاهش یافته است. متوسط عرض، مساحت و طول ترک خوردگی مخلوط بتنی HFVMA0.1 به ترتیب به میزان ٦٩، ٤٤ و ٨٣ درصد کاهش می‌یابد. در مخلوط بتنی HFVMA0.2 نیز متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب به میزان ٦٠، ٣٤ و ٧٦ درصد کاهش یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده در قسمت اول و نتایج به دست آمده در این قسمت، مشاهده می‌گردد که افزودن اصلاح کننده ویسکوزیته بتن تاثیر منفی بر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری داشته و این اثر منفی ناشی از افزایش مدت زمان حالت خمیری و به دنبال آن افزایش مدت زمان بحرانی ترک خوردگی است. اما پس از افزودن الیاف هیبرید پلی پروپیلن و ایجاد سیستم مسلح سازی پیوسته در ماتریس سیمان و سنگدانه، اثر مثبت الیاف بر اثر منفی اصلاح کننده ویسکوزیته بتن غلبه کرده، در نتیجه شدت ترک خوردگی در مخلوط‌های بتنی حاوی این دو ماده نسبت به طرح مخلوط بتن شاهد، کاهش یافته است. این موضوع را می‌توان در هر دو طرح مخلوط HFVMA0.1 و HFVMA0.2 مشاهده نمود. انتظار می رود که با افزودن بیشتر الیاف هیبرید پلی پروپیلن به مخلوط بتنی حاوی اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، اثر منفی این ماده در افزایش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی الیافی هیبریدی به طور کامل حذف گردد. البته بررسی این موضوع نیازمند تحقیقات بیشتر است.



شکل ۹. مقادیر مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی مورد نظر در تحقیق

با بررسی بیشتر نتایج به دست آمده، می‌توان مشاهده نمود که میزان کاهش شدت ترک خوردگی در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف هیبریدی و اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، از میزان کاهش شدت آن در مخلوط‌های بتنی حاوی تنها الیاف هیبریدی، کمتر است.

(الف)



(ب)

(ج)

شکل ۹. الف) تصاویر میکروسکوپیک ترک خوردگی از دال بتنی شاهد، ب) قرار گیری الیاف میکرو پلی پروپیلن در محل ترک خوردگی و کنترل ریز ترک و ج) قرار گیری الیاف ماکرو پلی پروپیلن در محل ترک خوردگی و کنترل درشت ترک

مخلوط‌های بتنی الیافی هیبریدی گذاشته و با افزودن بیشتر این ماده، اثر منفی آن افزایش بیشتر می‌یابد. در نتیجه می‌توان اینطور استنباط نمود که عملکرد و اثر اصلاح کننده ویسکوزیته بتن در این موضوع بیان کننده آن است که اصلاح کننده ویسکوزیته بتن اثر منفی خود را در افزایش شدت ترک خوردگی افزایش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی فاقد الیاف و حاوی الیاف هیبریدی وجود داشته و منجر به افزایش شدت ترک خوردگی می‌گردد.

با مقایسه نتایج شدت ترک خوردگی در مخلوط‌های بتنی حاوی اصلاح کننده ویسکوزیته بتنی و مخلوط‌های بتنی حاوی این ماده به همراه الیاف هیبریدی، می‌توان گفت میزان تغییر مشخصات شدت ترک خوردگی آنان نزدیک به یکدیگر است. به عبارت دیگر، میزان اثر منفی اصلاح کننده ویسکوزیته بتن در مخلوط‌های بتنی فاقد الیاف با مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف هیبریدی، تقریبا به یک میزان بوده، و ترکیب اصلاح کننده ویسکوزیته بتن با الیاف هیبریدی، منجر به اثرات منفی بیشتر در افزایش شدت ترک خوردگی نمی‌گردد. از این جهت، می توان ترکیب اصلاح کننده ویسکوزیته بتن با الیاف هیبرید پلی پروپیلن را فاقد اثرات منفی بر افزایش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری دانسته، و تنها می توان اثر منفی اصلاح کننده ویسکوزیته در افزایش شدت ترک خوردگی را مشاهده نمود.

با بررسی نتایج به دست آمده در هر سه قسمت تحلیل شده در این بخش، می توان عنوان نمود که در مخلوط‌های بتنی حاوی اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، متوسط عرض و طول ترک خوردگی به میزان نسبتا یکسانی تغییر کرده و افزایش می‌یابد. این موضوع بیان کننده آن است که اثر اصلاح کننده ویسکوزیته بتن بر تغییرات عرضی و طولی ترک خوردگی نزدیک به هم بوده و رشد ترک خوردگی با نرخی مشابه در جهت عرضی و طولی رخ می‌دهد. اما در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف هیبریدی، مشاهده می‌گردد که متوسط عرض ترک خوردگی کاهش بیشتری نسبت به طول ترک خوردگی پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، الیاف هیبرید پلی پروپیلن اثر بیشتری بر متوسط عرض ترک خوردگی، نسبت به طول آن دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت اصلاح کننده ویسکوزیته بتن باعث افزایش شدت خرابی ترک خوردگی در روسازی‌های بتنی ساده درزدار می‌گردد. از طرف دیگر، الیاف هیبرید پلی پروپیلن منجر به کاهش شدت خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های ساده درزدار

می‌شود. با افزودن هر دو اصلاح کننده ویسکوزیته بتن و الیاف هیبریدی، می‌توان شدت خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار را به میزان قابل توجهی کاهشی مشاهده کرد. به عبارت دیگر، در صورت استفاده از اصلاح کننده ویسکوزیته بتنی در این روسازی‌ها، با استفاده از الیاف هیبریدی پلی پروپیلن، می‌توان کاهش چشمگیر در شدت خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی مشاهده نمود.

۵- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به ارزیابی اثر الیاف مصنوعی پلی پروپیلن هیبریدی و اصلاح کننده ویسکوزیته بتن بر خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار پرداخته است. پس از معرفی و بیان مسئله مورد نظر در تحقیق، مشخصات مصالح و مواد به کار رفته در تحقیق بررسی و سپس، روش تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی ساده درزدار بیان شده است. پس از آن، روش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی تشریح شده و سپس نتایج به دست آمده از تحقیق تحلیل شده است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

-افزودن اصلاح کننده ویسکوزیته بتن باعث افزایش شدت خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار شده است.

-با افزودن اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، متوسط عرض، طول مساحت ترک خوردگی به ترتیب حداکثر تا میزان ۱۱، ۱۲ و ۱۷ درصد افزایش یافته است.

-مشاهده شد که میزان مصرف اصلاح کننده ویسکوزیته بتن بر تغییرات خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری اثر محسوسی دارد.

-مصرف اصلاح کننده ویسکوزیته بتن در مقادیر پایین (در این تحقیق به میزان ۰,۱ درصد وزن آب بتن تازه) منجر به افزایش چشمگیر خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار نمی گردد.

-افزودن الیاف هیبرید پلی پروپیلن (میکرو و ماکرو پلی پروپیلن)، شدت خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی ساده درزدار به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد.

-با افزودن الیاف هیبرید پلی پروپیلن، متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی به ترتیب به میزان ۷۷، ۵۲ و ۸۸ درصد کاهش یافته است.

-نتایج نشان داد که با افزودن الیاف هیبرید پلی پروپیلن به مخلوط بتنی حاوی اصلاح کننده ویسکوزیته بتن، اثر مثبت الیاف بر اثر منفی این ماده غلبه کرده و شدت خرابی ترک خوردگی کاهش پیدا کرده است.

-متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی در مخلوط بتنی حاوی الیاف و اصلاح کننده ویسکوزیته بتن در مقدار کمتر (۰,۱ درصد) به ترتیب به میزان ۶۹، ۴۴ و ۸۳ درصد و در مقدار بیشتر (۰,۲ درصد) به ترتیب به میزان ۶۰، ۳۴ و ۷۶ درصد کاهش پیدا کرده است.

-نتایج نشان داد که اثر منفی اصلاح کننده ویسکوزیته بتن در روسازی‌های بتنی ساده درزدار فاقد الیاف و حاوی الیاف در افزایش شدت ترک خوردگی مشابه است.

۶- مراجع

-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.

-Delatte, N. J. (2014). Concrete pavement design, construction, and performance. *Crc Press*.

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

-Mora, J., Martin, M. A., Gettu, R. & Aguado, A. (2001). Study of plastic shrinkage cracking in concrete, and the influence of fibers and a shrinkage reducing admixture. *Industria Italiana Del Cemento*, *71*(11).

-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**

-Rose, A., James, J. S., John, E. & Paul, S. (2022). A review on the influence of shrinkage reducing admixtures on concrete. *10*(X), 1–7.

-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.*

-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**

-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 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. Issue 9. **doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004**

-Griffiths, G. & Thom, N. (2007). Concrete Pavement Design Guidance Notes.

-Hemalatha, T. & Ramesh, G. (2019). Mitigation of plastic shrinkage in fly ash concrete using basalt fibres. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *46*(8), 759–769. **doi.org/10.1139/cjce-2018-0075**

-Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design, Second Edition. In *Upper Saddle River, NJ:07458 Prentice Hall.*

-Kolawole, J. T., Combrinck, R. & Boshoff, W. P. (2022). Plastic cracking behaviour of concrete and its interdependence on rheo-physical properties. *Composites Part B: Engineering*, *230* (November 2021), 109527. **doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109527**

-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, Y., Tan, M. & Wu, K. (2002). Effect of different geometric polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking of cement mortars. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *34*(247), 165–169. **doi.org/10.1007/bf02533585**

-Ma, Y., Zhu, B., Tan, M. & Wu, K. (2004). Effect of Y type polypropylene fiber on plastic shrinkage cracking of cement mortar. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *37*(266), 92–95. **doi.org/10.1617/13920**

-Maj, M. & Ubysz, A. (2021). Cracking of composite fiber-reinforced concrete foundation slabs due to shrinkage. *Materials Today: Proceedings*, *38*(xxxx), 2092–2098. **doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.155**

-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**

Evaluation the Effect of Hybrid Polypropylene Synthetic Fibers and Concrete Viscosity Modifier Agent on Plastic Shrinkage Cracking Distress in Jointed Plain Concrete Pavements

Ehsan Sobhani Fard, Ph.D., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Hassan Ziari, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Reza Sobhani Fard, M.Sc., Grad., School of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

Mohsen Amiri, M.Sc., Grad., School of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

E-mail: ehsan_sobhanifard@civileng.iust.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

plastic shrinkage cracking distress in jointed plain concrete pavements is one of the most common types of distress in these pavements. The use of different fibers, especially polypropylene fibers due to their durability and higher performance, is one of the new and effective approaches in reducing cracking. Concrete viscosity modifier (VMA) is one of the widely used additives in the concrete pavement industry. It is important to investigate the combination of this material with micro and macro polypropylene hybrid fibers on the changes in plastic sherinkage cracking distress. The current research evaluates the effect of hybrid polypropylene synthetic fibers and VMA material on the plastic shrinkage cracking distress in jointed plain concrete pavements. Macro fibers were used in the amount of 1800 gr/m^3 of fresh concrete. The average width, length and area of plastic shrinkage cracking were evaluated using the ASTM C1579 standard method and digital microscopic image analysis. The results showed that the VMA material increased the intensity of cracking and increased the average width, length and area of cracking up to 11%, 12% and 17%, respectively. Hybrid fibers reduced the average width, length and area of maximum cracking up to 77%, 52% and 88%, respectively. It was seen that the positive effect of fibers overcame the negative effect of VMA material and by combining these two materials, the severity of cracking decreased. The combination of VMA material with hybrid fibers did not increase negative effects compared to these materials alone. The VMA material had a similar effect on the transverse and longitudinal changes of the cracking, but the hybrid fibers caused a greater change in the width of the crack than its length.

Keywords: Jointed Plain Concrete Pavements, Plastic Shrinkage Cracking Distress, Polypropylene Hybrid Fibers, Concrete Viscosity Modifier Agent (VMA), Digital Microscopic Image Analysis