



بررسی اثر ماده ی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات بر تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی در شرایط محیطی سخت

پویا مهدیقلی^۱، آرمین سیاه منصور^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد

اسلامی واحد تهران- شمال، تهران، ایران

۲- کارشناس، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

p_mehdigholi@yahoo.com

خلاصه

ارزیابی تغییرات ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی متأثر از مواد افزودنی مختلف، نقش مهمی در عملکرد این سازه ها بازی می کند. در تحقیق حاضر، اثر ماده ی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات بر تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی در شرایط محیطی سخت بررسی گردید. متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی دال بتنی شاهد و حاوی ۰/۴ و ۰/۸ درصد ماده ی افزودنی فوق روان کننده با روش استاندارد ارزیابی گردید. دیده شده که ماده ی فوق روان کننده منجر به کاهش چشمگیر ترک خوردگی شده به طوری که در میزان مصرف ۰/۴، شدت ترک خوردگی به میزان چشمگیری کاهش یافته و در میزان مصرف ۰/۸، ترک خوردگی حذف گردید که علت این امر، افزایش نرخ آب انداختگی و کاهش نرخ تبخیر عنوان گردید. همچنین، مشاهده شد که ماده ی فوق روان کننده تأثیر بیشتری بر تغییرات عرضی ترک خوردگی نسبت به تغییرات طولی آن دارد. در انتها نتیجه شد که ماده ی فوق روان کننده در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی می تواند نقش موثری بازی کند.

کلمات کلیدی: روسازی های بتنی، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، ماده ی فوق روان کننده، پلی کربوکسیلات، شرایط محیطی سخت.

۱. مقدمه

بیشتر روسازی های ساخته شده در ایران، از نوع روسازی انعطاف پذیر و با استفاده از مصالح بتن آسفالتی ساخته شده اند. ارزان بودن قیر در گذشته، آشنایی بیشتر متخصصان و مجریان صنعت عمران با این نوع روسازی و وجود ماشین آلات و تجهیزات اجرای آن از عمده دلایل توجه بیشتر متولیان صنعت روسازی کشور به روسازی آسفالتی بوده است. در سال های اخیر با افزایش قیمت قیر، تولید مازاد سیمان در کشور و نیاز بیشتر روسازی های آسفالتی به عملیات تعمیر، ترمیم و بازسازی باعث شد تا توجه به روسازی های بتن سیمانی نیز بیشتر گردد. روسازی های بتنی از یک دال بتنی ساده یا مسلح ساخته می شود که به طور مستقیم بر روی خاک بستر کوبیده شده قرار داده شده و یا بر روی سطح اساس دانه ای یا تثبیتی احداث می شود [1]. روسازی های بتنی از مقاومت، دوام و عملکرد بالایی نسبت به روسازی های آسفالتی برخوردار بوده و در نتیجه نیاز کمتری به عملیات تعمیر و نگهداری پیدا می کند [2,3]. از این جهت این رویه ها مورد توجه بیشتر محققان و مجریان صنعت روسازی واقع شده است.

تداوم خدمت دهی یک روسازی بتنی و حفظ کیفیت آن، به عدم وجود خرابی و ترک خوردگی در آن می باشد. یکی از انواع شایع ترک خوردگی در روسازی های بتنی که در ساعات اولیه پس از ساخت روسازی رخ می دهد، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی است [4-6]. این نوع ترک خوردگی به دلیل تبخیر سطحی بالا در دال بتنی و تشکیل فشار های مویینگی منفی است. این فشار ها باعث ایجاد جمع شدگی خمیری در دال بتنی شده که در مقید بودن دال و جلوگیری از حرکت ناشی از جمع شدگی در آن، تنش های کششی در سطح روسازی بتنی شکل می گیرد. تجاوز شدت تنش های کششی از مقاومت کششی بتن تازه، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی را به همراه دارد [7-9]. ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بیشتر در سازه های بتنی مسطح مانند روسازی های بتنی رخ داده چرا که سطح وسیعی از سازه ی بتنی در معرض تبخیر سطحی قرار دارد. از آن جا که تبخیر سطحی به عوامل و شرایط محیطی شامل دمای محیطی، رطوبت نسبی هوا و میزان

جریان باد بستگی داشته، در نتیجه هر یک از این عوامل محیطی، نقش موثری در شدت ترک خوردگی بازی می کنند [10]. از این جهت، در شرایط محیطی سخت با دمای بالا، رطوبت نسبی هوای پایین و سرعت جریان باد زیاد، خطر وقوع ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری همواره دوام و کیفیت روسازی بتنی را تهدید می کند.

در ساخت روسازی های بتنی همانند دیگر سازه های بتنی، از مواد افزودنی مختلف به منظور اصلاح یا تغییر خصوصیات مختلف مخلوط های بتنی مورد استفاده قرار می گیرد. مواد افزودنی فوق روان کننده یکی از مواد پر کاربرد در ساخت سازه های بتنی مختلف از جمله روسازی های بتنی است. این مواد به منظور اصلاح روانی مخلوط های بتنی و تسهیل در اجرای سازه ی بتنی مورد استفاده قرار گرفته و از افزایش نسبت آب به مواد سیمانی و به دنبال آن، از کاهش خصوصیات مقاومتی و دوامی سازه جلوگیری می کند [11]. مواد افزودنی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات، نسل جدید مواد افزودنی اصلاح کننده ی روانی بتن بوده که به دلیل عملکرد بالا و میزان مصرف پایین، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است.

هر ماده افزودنی در مخلوط بتنی، علاوه بر تغییر یا اصلاح خصوصیات مورد نظر، می تواند منجر به تغییر دیگر خصوصیات مخلوط های بتنی گردد. این موضوع در مورد ماده ی افزودنی فوق روان کننده نیز وجود داشته، به طوری که ماده ی افزودنی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات، می تواند میزان هوای بتن، مقاومت فشاری و گرانیوی بتن را دستخوش تغییر کند. از این جهت این انتظار وجود دارد که این ماده بر شدت تغییرات ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری تاثیر بگذارد. بنابراین برخی از محققان به بررسی اثرات مواد افزودنی مختلف از جمله ماده ی افزودنی فوق روان کننده بر تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی پرداختند. در تحقیق انجام شده توسط کامبرینک و همکاران، اثر مواد افزودنی مختلف بر تغییر رفتار ترک خوردگی مخلوط های بتنی در حالت خمیری مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، از ماده ی افزودنی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات اثر نیز در روند مطالعه استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که ماده ی افزودنی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات اثر باعث تاخیر در شروع ترک خوردگی شده و همچنین شدت ترک خوردگی را تا میزان ۴۵ درصد کاهش می دهد [12]. در این تحقیق، مساحت ترک خوردگی آزمونه های بتنی مورد ارزیابی قرار گرفته و دیگر خصوصیات هندسی ترک خوردگی محاسبه نگردید. همچنین، تغییرات رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی مورد استفاده در روسازی های بتنی بررسی نگردید. با این حال، با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعه، می توان مشاهده نمود که افزودن ماده ی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات اثر بر روند تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری تاثیرات محسوسی دارد. سیاحی و همکاران به بررسی اثر مواد افزودنی مختلف بر ساز و کار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی خود متراکم پرداختند. دیده شده که مواد افزودنی مختلف مورد استفاده در این تحقیق، منجر به تغییر چشمگیر شدت ترک خوردگی در مخلوط های بتنی خود متراکم می شود. به عنوان مثال، ماده ی افزودنی حباب ساز و ماده ی افزودنی کاهنده ی جمع شدگی، منجر به کاهش فشار های مویینگی منفی و خطر ترک خوردگی می گردد [13]. سیراجودین و گتو نیز به بررسی اثر مواد افزودنی معدنی بر تغییرات ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتنی پرداخته و مشاهده کردند که مواد افزودنی کاهنده ی جمع شدگی و مواد افزودنی عمل آوری باعث تغییر محسوس رفتار ترک خوردگی شده، به طوری که با کاهش نرخ تبخیر سطحی در بتن، از شدت ترک خوردگی می کاهد [14]. در مطالعه ی مروری انجام شده توسط ژان و هی بر روی اثر مواد افزودنی کاهنده ی جمع شدگی، عنوان شد که ماده ی افزودنی کاهنده ی جمع شدگی بتن، علاوه بر کاهش شدت ترک خوردگی در بتن، می تواند باعث کاهش دیگر خصوصیات مخلوط های بتنی شده، در نتیجه نیاز است به همراه دیگر مواد افزودنی به منظور جبران این موضوع، استفاده شود [15].

بررسی پیشینه ی تحقیق نشان می دهد که مواد افزودنی مختلف بر تغییرات خصوصیات مختلف روسازی های بتنی تاثیر می گذارند. در میان مواد افزودنی مختلف در صنعت روسازی بتنی، ماده ی افزودنی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات، از جمله مواد افزودنی پر کاربرد در صنعت تکنولوژی بتن بوده که به منظور اصلاح خصوصیات روانی مخلوط های بتنی استفاده می شود. در نتیجه نیاز است تا اثر این ماده بر تغییرات خصوصیات روسازی های بتنی بررسی گردد. با توجه به شایع بودن خرابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی به خصوص در شرایط محیطی سخت، نیاز است تا اثر افزودن ماده ی افزودنی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات بر تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در این سازه های بتنی در شرایط محیطی سخت ارزیابی گردد. با وجود انجام تحقیقاتی در این زمینه، جای خالی تحقیقی که به بررسی دقیق تر این موضوع در روسازی های بتنی پردازد، احساس می شود. از این جهت تحقیق حاضر به بررسی اثر ماده ی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات بر تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی در شرایط محیطی سخت می پردازد. اهمیت بررسی این موضوع، علاوه بر پر نمودن خلا تحقیقاتی موجود و درک بهتر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی حاوی این ماده ی افزودنی، می تواند کمک شایانی به ساخت یک روسازی بتنی با دوام و عملکرد بالاتر کند.

۲. روش تحقیق

مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق، شامل مصالح سنگی آهکی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر بود. مصالح سنگی در سه گروه ابعادی شامل مصالح سنگی ریزدانه ۵-۱۰ میلیمتر و مصالح سنگی درشت دانه در دو گروه ۱۲-۵ میلیمتر و ۱۹-۱۲ میلیمتر در ساخت مخلوط های بتنی استفاده شد. مدول نرمی، چگالی نسبی و جذب آب مصالح سنگی ۵-۱۰ میلیمتر به ترتیب به میزان ۳/۴۶، ۲/۶۳ و ۱/۰۸ درصد بود. چگالی نسبی و جذب آب برای مصالح سنگی ۱۲-۵ میلیمتر به ترتیب به میزان ۲/۶۲ و ۰/۷ درصد و برای مصالح سنگی ۱۹-۱۲ میلیمتر به ترتیب به میزان ۲/۶۰ و ۰/۵۱ بود. سیمان مورد استفاده در ساخت مخلوط های بتنی، سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ با بود. وزن مخصوص سیمان مورد استفاده ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

از ماده ی افزودنی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات اثر با وزن مخصوص ۱/۱ کیلوگرم بر متر مکعب در روند تحقیق استفاده شد. آب آشامیدنی سیستم لوله کشی شبکه آزمایشگاه به منظور ساخت مخلوط های بتنی استفاده شد. تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی مورد نظر در این تحقیق، به گونه ای صورت گرفت تا معیار های ذکر شده توسط ضابطه ۷۳۱، دستور العمل طراحی، نظارت و اجرای روسازی بتنی راهها، برای بتن روسازی بتنی درزدار ساده رعایت گردد. در جدول ۱، معیار های در نظر گرفته شده به منظور تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی ساده آورده شده است.

جدول ۱: معیار های تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه ی ۷۳۱

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/GM)	۰/۵۳	-
هوای بتن	۵ تا ۸ درصد	ASTM C231

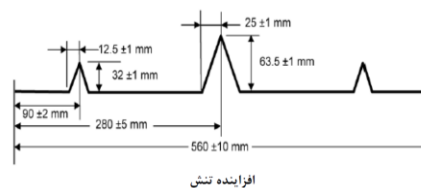
نسبت آب به مواد سیمانی، با توجه به رابطه ی بین نسبت آب به مواد سیمانی و مقاومت فشاری در دستور العمل ACI 211-09 و همچنین، حداکثر نسبت آب به مواد سیمان مجاز روسازی بتنی (جدول ۳)، به میزان ۰/۵ در نظر گرفته شد. این میزان نسبت آب به مواد سیمانی، از نظر ایجاد به منظور افزایش استعداد ترک خوردگی و همچنین، راحتی در ساخت آزمون ها، مناسب می باشد. میزان سیمان در مخلوط های بتنی، به میزان ۴۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب انتخاب شد. این میزان سیمان با توجه به دستیابی به حداقل مقاومت فشاری در مخلوط های بتنی و همچنین قرار گرفتن اسلامپ مخلوط های بتنی در حدود تعیین شده توسط ضابطه ی ۷۳۱ (۱۰ تا ۷۰ میلیمتر) در نظر گرفته شد. سهم هر یک از مصالح سنگی به گونه ای تعیین شد که نمودار ترکیب مصالح سنگی در حدود بالا و پایین دانه بندی پیشنهادی در روش ملی طرح مخلوط، ضابطه ی ض-۴۷۹ قرار گیرد. از این جهت، سهم مصالح سنگی ۵-۱۰ میلیمتر، ۱۲-۵ میلیمتر و ۱۹-۱۲ میلیمتر به ترتیب به میزان ۲۵، ۶۰ و ۱۵ درصد انتخاب شد.

میزان مصرف ماده ی افزودنی فوق روان کننده، به میزان ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزن مواد سیمانی انتخاب گردید. انتخاب این مقادیر با توجه به مقادیر توصیه شده توسط تولید کننده و همچنین امکان بررسی اثر افزودن ماده بر تغییرات شدت ترک خوردگی در آزمون های بتنی انتخاب گردید. بنابراین تعداد ۳ طرح اختلاط شامل ۱ طرح اختلاط شاهد و ۲ طرح اختلاط بتن حاوی مقادیر متفاوت ماده ی افزودنی فوق روان کننده در روند تحقیق در نظر گرفته شد. در جدول ۲ مقادیر وزنی نسبت های اختلاط طرح های مخلوط بتن مورد نظر در این تحقیق را نشان می دهد. با توجه به طراحی نسبت های اختلاط بتن شاهد، میزان روانی این طرح اختلاط در بازه ی ۱۰ تا ۴۰ میلیمتر، مطابق با آزمایش تعیین روانی بتن به روش اسلامپ ASTM C143 بود. با افزودن ماده ی فوق روان کننده به میزان ۰/۴ و ۰/۸ درصد به مخلوط بتنی شاهد، میزان روانی مخلوط بتنی MOH0.4 و MOH0.8 به ترتیب در حدود ۴۰ تا ۶۰ میلیمتر و ۶۰ تا ۸۰ میلیمتر قرار گرفت.

جدول ۲: نسبت های وزنی طرح های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق

طرح اختلاط	معرف طرح اختلاط	سیمان (kg/m^3)	مصلح سنگی ریزدانه ($0-5 \text{ mm}$) (kg/m^3)	مصلح سنگی درشت دانه ریز ($5-12 \text{ mm}$) (kg/m^3)	مصلح سنگی درشت دانه متوسط ($12-19 \text{ mm}$) (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)
شاهد	RE	۴۰۰	۱۰۳۹	۴۳۳	۲۵۹	۲۰۰	۰
فوق روان کننده	MOH0.4	۴۰۰	۱۰۳۷	۴۳۲	۲۵۸	۲۰۰	۱.۶
فوق روان کننده	MOH0.8	۴۰۰	۱۰۳۴	۴۳۱	۲۵۸	۲۰۰	۳.۲

در این تحقیق از روش استاندارد ASTM C1579 به منظور ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط های بتن روسازی بتنی استفاده گردید. در این روش، دال های بتنی به ابعاد $100 \times 355 \times 560$ میلیمتر ساخته شده و مورد ارزیابی قرار می گیرد. در کف قالب بتنی، از یک ابزار فولادی به منظور ایجاد ترک خوردگی در قسمت های از دال بتنی استفاده می شود. این ابزار، متشکل از دو قید در دو طرف آن و یک افزاینده ترک در مرکز آن است. از آن جا که ماهیت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری پراکنده بوده و در سطح روسازی پخش می شود، در نتیجه این ابزار امکان تجمع ترک خوردگی در یک مسیر مشخص، به منظور ارزیابی اثر متغیر های مستقل در تحقیق را به دست می دهد. با وجود قیود کناری و میانی در قالب، استعداد ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال بتنی افزایش یافته و در صورت وجود دیگر شرایط جمع شدگی خمیری، ترک خوردگی ناشی از آن در بتن به وجود می آید. در شکل ۱، قالب و ابزار فولادی در این تحقیق مشاهده می شود.



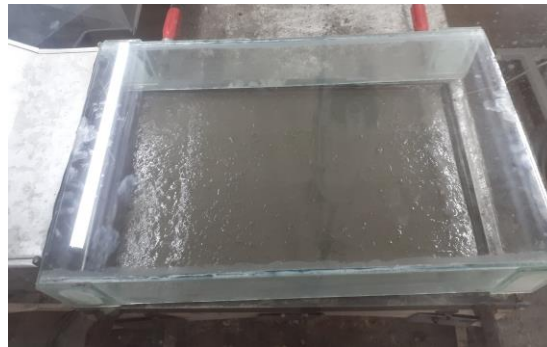
شکل ۱: قالب و ابزار فولادی مورد استفاده در تحقیق

مخلوط بتنی تازه در یک لایه داخل قالب ریخته شده و با استفاده از کوبه، مطابق با استاندارد ASTM C1579 متراکم می گردید. پس از آن، با استفاده از ماله سطح دال بتنی صاف می شد. پس از آماده سازی آزمون های بتنی، انتقال این آزمون ها به محفظه ی کنترل عوامل جوی صورت می گرفت. این محفظه، توانایی کنترل و حفظ شرایط محیطی شامل دمای محیطی، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد در میزان و به مدت زمان مشخص مطابق با استاندارد ASTM C1579 دارد. در شکل ۲، محفظه ی شبیه ساز عوامل جوی مورد استفاده در این تحقیق مشاهده می شود.



شکل ۲: محفظه ی شبیه ساز عوامل جوی مورد استفاده در تحقیق

شرایط محیطی مورد نظر در این تحقیق، شامل دمای محیطی ۴۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی هوای ۲۰ درصد و سرعت جریان باد ۳۰ کیلومتر بر ساعت، بود. این شرایط محیطی باعث ایجاد بیشترین استعداد ترک خوردگی در مخلوط های بتنی شده و باعث می شود تا تغییر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در آزمون های بتنی محسوس باشد. مدت زمان آزمایش، به میزان ۶ ساعت در نظر گرفته شد. در این مدت زمان، رشد ترک خوردگی های ناشی از جمع شدگی خمیری کامل شده و گیرش نهایی بتن نیز رخ می دهد. به منظور اطمینان از این موضوع، زمان گیرش اولیه و نهایی مخلوط های بتنی ارزیابی شده و با زمان شروع و پایان ترک خوردگی مقایسه گردید. در نتیجه، اطمینان از رشد نهایی ترک خوردگی در آزمون های بتنی حاصل می گردد. در شکل ۳، ساخت و آزمایش آزمون های بتنی مشاهده می شود.



شکل ۳: ساخت و آزمایش آزمون های بتنی در تحقیق

پس از اتمام آزمایش، آزمون ها از داخل محفظه به بیرون منتقل می شوند. سپس، با استفاده از میکروسکوپ نوری متصل به یک رایانه، تصاویر دیجیتال از مسیر ترک خوردگی که در راستای افزایش ترک در میانه ی آزمون بوده، گرفته می شود. تصاویر دیجیتال گرفته شده از مسیر ترک خوردگی، از فاصله ی ارتفاعی مشخصی گرفته شده تا امکان ارزیابی ترک خوردگی های ریز، محیا باشد. بدین ترتیب، مسیر ترک خوردگی در هر آزمون، تقسیم بندی شده و تصویر هر قسمت برداشت می شد. با توجه به فاصله ی ارتفاع عکس برداری در نظر گرفته شده در این تحقیق، حداکثر تعداد ۸ تا ۹ تصویر از مسیر ترک خوردگی در هر آزمون گرفته شده به طوری که با قرار دادن این تصاویر در کنار یکدیگر، تصویر کامل مسیر ترک خوردگی تشکیل می شد. جهت اندازه گیری متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی مراحل زیر برای هر دال بتنی انجام شد.

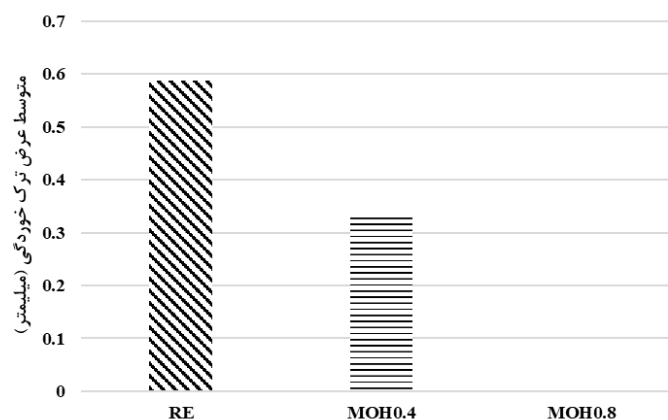
- ۱- وارد نمودن تصویر دیجیتال به رایانه و نرم افزار تحلیل تصویر
 - ۲- کالیبره نمودن تصویر موجود با استفاده از نوار ابزار کالیبراسیون در نرم افزار
 - ۳- نقطه گذاری محدوده ی ترک خوردگی با استفاده از ابزار نقطه گذاری
 - ۴- وصل نمودن نقاط محدوده ی ترک خوردگی به هم با استفاده از نوار ابزار ایجاد محدوده بسته
 - ۵- محاسبه ی طول دو نقطه ی قرار گرفته در دهانه ی ترک خوردگی و ثبت آن به عنوان عرض ترک خوردگی
 - ۶- تکرار مرحله ی ۵ برای تمامی نقاط و ثبت میانگین طول های اندازه گیری شده به عنوان متوسط عرض ترک خوردگی
 - ۷- ارزیابی طول نقطه ی میانی محدوده ی بسته و ثبت آن به عنوان طول ترک خوردگی
 - ۸- ثبت مساحت محیط بسته با استفاده از نوار ابزار تعیین مساحت ترک خوردگی و ثبت آن به عنوان مساحت ترک خوردگی
- با توجه به نحوه ی اندازه گیری متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی در هر دال بتنی، میزان تغییرات هر مشخصه ی هندسی ترک خوردگی، منحصر به فرد بوده و الزاماً، برآیند تغییرات متوسط عرض و طول ترک خوردگی با تغییر مساحت ترک خوردگی برابر نخواهد بود. پس از تحلیل تصاویر دیجیتال از دو آزمون از هر طرح اختلاط بتن و ثبت میانگین نتایج، مقادیر متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی برای هر طرح اختلاط تهیه می شد. در شکل ۴، تصویر دیجیتال قسمتی از ترک خوردگی یک آزمون در این تحقیق مشاهده می شود.



شکل ۴: تصویر دیجیتالی از محل ترک خوردگی در دال بتنی

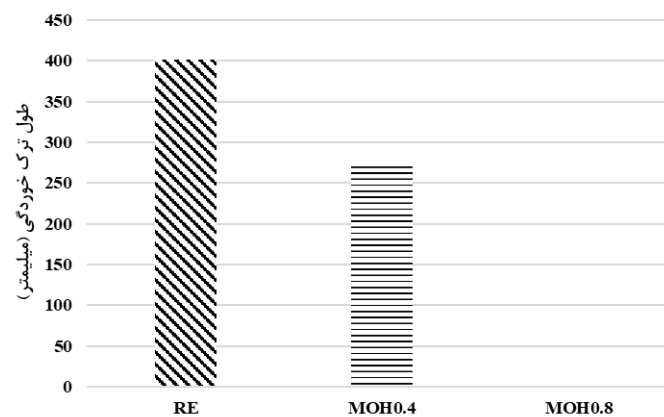
۳. نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده در روند تحقیق، در این قسمت ارائه شده و مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد. شکل های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی شاهد (RE) و دال های بتنی حاوی ماده ی فوق روان کننده به میزان ۰/۴ درصد (MOH0.4) و ۰/۸ درصد (MOH0.8) وزن مواد سیمانی را نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می گردد که با افزودن ماده ی فوق روان کننده، شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی کاهش پیدا می کند. متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی در دال بتنی MOH0.4 نسبت به دال بتنی RE به ترتیب به میزان ۴۳، ۳۳ و ۵۱ درصد کاهش می یابد. با افزودن ماده ی فوق روان کننده، روانی مخلوط بتنی افزایش یافته، در نتیجه تراکم دال بتنی بهتر صورت می گیرد. این موضوع باعث می شود تا نشست دال بتنی و انتقال آب به سطح بتن (آب انداختگی) بیشتر و با نرخ بالاتری اتفاق افتد. بنابراین، لایه ی آب قرار گرفته در سطح دال بتنی حاوی ماده ی فوق روان کننده بیشتر از دال بتنی فاقد این ماده است. این موضوع منجر به آن می شود تا تعادل نرخ آب انداختگی و تبخیر دال بتنی دیرتر رخ داده و همچنین میزان نرخ تبخیر کاهش یابد. با تاخیر زمان تعادل و نزدیک تر شدن این زمان به زمان گیرش مخلوط بتنی، مدت زمان بحرانی ترک خوردگی که از زمان تعادل تا زمان گیرش نهایی بوده، کمتر شده و ترک خوردگی خمیری در مدت زمان کمتری، دال بتنی را تهدید می کند. همچنین، شروع شکل گیری فشار های مویینگی منفی و تنش های کششی ناشی از آن در دال بتنی حاوی این ماده، در زمانی صورت می گیرد که مقاومت کششی مخلوط بتنی بیشتر از دال بتنی فاقد این ماده است. در نتیجه نیروی مقاوم (مقاومت کششی) بیشتری در برابر نیروی محرک (تنش کششی) وجود دارد. از طرف دیگر، با کاهش نرخ تبخیر سطحی در دال بتنی حاوی ماده ی فوق روان کننده ناشی از افزایش آب انداختگی، منجر به کاهش میزان شدت فشار های مویینگی و جمع شدگی ناشی از آن می شود. به عبارت دیگر، از شدت تنش های کششی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال بتنی حاوی ماده فوق روان کننده، کاسته می شود. این موارد باعث می شود تا شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در این دال ها، کاهش یابد.



شکل ۵: مقادیر متوسط عرض ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی شاهد و حاوی ماده ی فوق روان کننده پس از اتمام زمان آزمایش

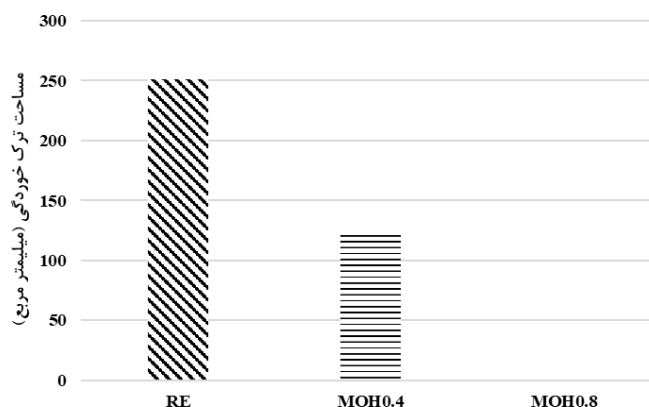
با بررسی بیشتر نتایج مشاهده می گردد که با افزایش میزان مصرف ماده ی فوق روان کننده، روند کاهش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری ادامه داشته، به طوری که میزان ترک خوردگی به سمت صفر میل کرده و حذف می گردد. همانطور که از نتایج به دست آمده پیداست، متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی در دال بتنی MOH 0.8 صفر بوده و ترک خوردگی در این دال بتنی حذف شده است. این نتایج حاکی از آن است که افزایش میزان مصرف ماده ی فوق روان کننده با تاثیرات مثبت آن در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری رابطه مستقیم داشته به طوری که با افزایش مقدار این ماده در مخلوط های بتنی، شدت ترک خوردگی به میزان چشمگیری کاهش یافته و در مقدار مصرف ۰/۸ درصد وزن مواد سیمانی، حذف می گردد. علت این امر، همانند آن چه در در قسمت قبل اشاره شده، تاثیرات مثبت این ماده در افزایش نرخ آب انداختگی و کاهش میزان نرخ تبخیر در دال بتنی بوده که منجر به کاهش محسوس شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی می گردد. در نتیجه میتوان عنوان نمود که میزان مصرف ماده ی فوق روان کننده بر تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری اثر چشمگیری دارد. ذکر این نکته لازم است که میزان مصرف ۰/۸ درصد وزن مواد سیمانی برای ماده ی فوق روان کننده مورد استفاده در این روند این تحقیق، میزان بالایی تلقی شده و منجر به افزایش شدید آب انداختگی در مخلوط بتنی می شود. از طرف دیگر، گرانروی مخلوط بتنی حاوی این میزان مصرف ماده ی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات اثر به طور چشمگیری افزایش می یابد. در نتیجه عملکرد ماده ی فوق روان کننده همانند یک ماده ی چسبنده در بتن عمل کرده و منجر به آن می شود که مقاومت کششی سطحی بتن نیز بالا برود. این موضوع نیز می تواند در حذف ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی حاوی این ماده موثر باشد. با این حال، افزایش شدید نرخ آب انداختگی و کاهش محسوس نرخ تبخیر در این دال ها، از دلایل موثر و مهم در حذف ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال های بتنی حاوی این ماده می باشد.



شکل ۶: مقادیر طول ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی شاهد و حاوی ماده ی فوق روان کننده پس از

اتمام زمان آزمایش

مشاهده می شود که تغییرات متوسط عرض ترک بیشتر از تغییرات طول ترک خوردگی در دال بتنی MOH0.4 است. این موضوع نشان می دهد که ماده ی افزودنی فوق روان کننده تاثیر بیشتری بر تغییرات عرضی ترک خوردگی نسبت به تغییرات طولی آن دارد. با توجه به وابسته بودن تغییرات مساحت ترک خوردگی به تغییرات عرضی و طولی آن، قابل انتظار است که تغییرات مساحت ترک خوردگی بیشتر از تغییرات دو متغیر هندسی دیگر باشد. با توجه به مطالب این قسمت، می توان اینطور استنباط نمود که عرض ترک خوردگی حساسیت بیشتری به ماده ی افزودنی فوق روان کننده، نسبت به طول آن دارد.



شکل ۷: مقادیر مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی شاهد و حاوی ماده ی فوق روان کننده پس از تمام زمان آزمایش

۴. نتیجه گیری

- تحقیق حاضر به بررسی اثر ماده ی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات بر تغییرات شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی در شرایط محیطی سخت پرداخت. مهم ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:
- ماده ی افزودنی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات اثر تاثیرات چشمگیری بر تغییرات ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی داشته و منجر به کاهش محسوس این ترک خوردگی گردید.
 - با افزودن ماده ی فوق روان کننده به میزان ۰/۴ درصد وزن مواد سیمانی، متوسط عرض، طول و مساحت ترک خوردگی روسازی های بتنی به ترتیب به میزان ۴۳، ۳۳ و ۵۱ درصد کاهش می یابد.
 - نتایج حاکی از آن بود که در میزان مصرف ۰/۸ درصد وزن مواد سیمانی، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی حذف گردید.
 - نتایج نشان داد که ماده ی افزودنی فوق روان کننده بر تغییرات عرضی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی های بتنی تاثیر بیشتری نسبت به تغییرات طولی آن دارد.

۵. منابع

- [1] N.J. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance, Crc Press, 2014.
- [2] G. Griffiths, N. Thom, Concrete Pavement Design Guidance Notes, 2007.
- [3] Y.H. Huang, Pavement Analysis and Design, Second Edition, 2004.
- [4] G.M. Moelich, J.E. van Zyl, N. Rabie, R. Combrinck, The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete, Cem. Concr. Compos. 123 (2021) 104182. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104182>.
- [5] H. Zhang, J. Xiao, Plastic shrinkage and cracking of 3D printed mortar with recycled sand, Constr. Build. Mater. 302 (2021) 124405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124405>.
- [6] H. Rong, W. Dong, W. Yuan, X. Zhou, An improved ring test to assess cracking resistance of concrete under restrained shrinkage, Theor. Appl. Fract. Mech. 113 (2021) 102976. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102976>.
- [7] Q. Liu, J. Xiao, A. Singh, Quantification of plastic shrinkage and cracking in mortars containing different recycled powders using digital image correlation technique, Constr. Build. Mater. 293 (2021) 123509. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123509>.
- [8] J. Temitope, R. Combrinck, W. Peter, Shear rheo-viscoelasticity approach to the plastic cracking of early-age concrete Solid phase, Cem. Concr. Res. 135 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106127>.
- [9] G.M. Moelich, R. Combrinck, A weather data analysis method to mitigate and prevent plastic shrinkage cracking, Constr. Build. Mater. 253 (2020) 119066. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119066>.
- [10] H. Ziari, H. Fazaeli, S.J. Vaziri Kang Olyaei, M.A. Ziari, 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, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 15 (2022) 138–158.
- [11] M.L. KOSMATKA, Steven H.; WILSON, Design and Control of Concrete Mixtures – The Guide to Applications, Methods and Materials., 2011.
- [12] R. Combrinck, M. Kayondo, B.D. le Roux, W.I. de Villiers, W.P. Boshoff, Effect of various liquid admixtures on cracking of plastic concrete, *Constr. Build. Mater.* 202 (2019) 139–153. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.060>.
- [13] F. Sayahi, M. Emborg, H. Hedlund, A. Cwirzen, Effect of Admixtures on Mechanism of Plastic Shrinkage Cracking in Self-Compacting Concrete, *ACI Mater. J.* 117 (2020). <https://doi.org/10.14359/51724623>.
- [14] M. Sirajuddin, R. Gettu, Plastic shrinkage cracking of concrete incorporating mineral admixtures and its mitigation, *Mater. Struct. Constr.* 51 (2018). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1173-4>.
- [15] P. min Zhan, Z. hai He, Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review, *Constr. Build. Mater.* 201 (2019) 676–690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.209>.