نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۴۵۷ تا ۴۷۴
DOI: 10.22060/ceej.2021.18914.6996

ارزیابی اثر مقدار ماده‌ی هوازا در کاهش شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی هوادار

سید جواد وزیری کنگ علیائی[۱]، سینا گلچین[۲]، اسما سادات دبیری[۱]، حسن فضائلی[۲*]

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد واحد تهران-شمال، تهران، ایران.

خلاصه: ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری یکی از خرابی‌های شایع در روسازی‌های بتنی بوده که باعث کاهش دوام و سطح سرویس جاده می‌گردد. استفاده از مواد افزودنی مختلف به مقدار بهینه می‌تواند باعث کاهش این ترک خوردگی گردد. این تحقیق به بررسی اثر مقدار مصرف ماده هوازا در ایجاد هوای عمدی در روسازی‌های بتنی هوادار، در کنترل یا کاهش شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری می‌پردازد. بدین منظور اثر افزودن ماده‌ی هوازا به مقدار ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱۰ درصد وزن سیمان بر شدت ترک خوردگی‌های خمیری در طرح‌های اختلاط بتن روسازی با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۴۹ ، با استفاده از روش ASTM C۱۵۷۹ بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن ماده‌ی هوازا، باعث کاهش شدت ترک خوردگی خمیری در بتن هوادار نسبت به بتن معمولی گردید. دیده شد که با مصرف بیشتر ماده‌ی هوازا از یک درصد مشخص، شدت ترک خوردگی بیشتر شده که این مقدار مصرف مشخص و بهینه، در این تحقیق به میزان ۰/۰۷٪ به دست آمد. نتایج نشان داد که افزایش نسبت آب به سیمان در بازه‌های تغییر پایین‌تر، اثر بیشتر بر شدت ترک خوردگی دارد. همچنین درصد هوای عمدی ایجاد شده ناشی از مصرف بهینه‌ی ماده‌ی هوازا، کمتر از حداکثر درصد هوای عمدی مجاز در روسازی‌های بتنی می‌باشد. بنابراین با مصرف بهینه‌ی این ماده، می‌توان شدت ترک خوردگی‌های خمیری در روسازی‌های بتنی را کاهش داد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

کلمات کلیدی:
ماده‌ی هوازا
هوای عمدی
روسازی بتنی هوادار
ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری
مقدار ماده‌ی هوازا

۱- مقدمه

بیشتر روسازی‌های ساخته شده در ایران به منظور احداث جاده‌ها، سطوح پروازی و کف پارکینگ‌ها، از نوع روسازی آسفالتی بوده که علت آن فراوانی و ارزانی قیر، وجود بیشتر ماشین آلات و تجهیزات مربوط به روسازی‌های آسفالتی و آشنایی بیشتر متخصصان و متولیان امور راه‌سازی کشور با این نوع روسازی، می‌باشد. افزایش قیمت قیر در چند سال اخیر و در نتیجه افزایش قیمت تمام شده روسازی آسفالتی، مازاد تولید سیمان و از طرفی طول عمر بیشتر روسازی‌های بتنی نسبت به روسازی‌های آسفالتی، باعث شده است تا متولیان و متخصصان امور راه‌سازی کشور، روسازی بتنی را به عنوان گزینه‌ای در کنار روسازی آسفالتی مطرح نمایند [۱]. روسازی‌های بتنی از یک دال بتنی مسلح ساده ساخته شده که می‌تواند بر سطح بستر خاک ساخته شده و یا بر روی سطح اساس تثبیت شده یا دانه ای، قرار گیرد [۲]. طراحی و اجرای مناسب و ساخت با مصالح با دوام، از عوامل تضمین کننده‌ی دوام مناسب یک روسازی بتنی می‌باشد. یکی از عوامل کاهنده‌ی دوام در روسازی‌های بتنی، ترک خوردگی دال روسازی ناشی از عوامل مختلف بوده [۳] به طوری که در سیستم مدیریت روسازی راه‌ها، ۴ خرابی از ۱۹ خرابی تعریف شده در این روسازی بتنی راه‌ها، ناشی از ترک خوردگی دال است و باعث کاهش نشانه‌ی وضعیت روسازی[۱] می‌گردد. جمع شدگی خمیری یکی از عوامل ایجاد ترک در روسازی‌های بتنی در سنین اولیه بوده که با نام خرابی ترک خوردگی انقباضی در سیستم مدیریت روسازی جاده‌ها، شناخته می‌شود [۴].

جمع شدگی خمیری به دلیل تشکیل فشارهای مویینگی منفی ناشی از برابری نرخ تبخیر و آب انداختگی در سطح روسازی به وجود می آید [۸-۵]. پس از ساخت روسازی، نشست بتن ناشی از اختلاف وزن مصالح تشکیل دهنده‌ی آن، باعث شده تا آب مخلوط از طریق منافذ داخلی بتن خارج شده و به سطح روسازی منتقل شود که به این عمل، آب انداختگی بتن

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

1 Pavement Condition Index (PCI)

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

گفته می‌شود [۱۱-۹]. آب انداختگی نمونه تابع عوامل مختلفی مانند نسبت آب به سیمان [۱۲]، میزان مصرف سیمان [۱۳] و ارتفاع دال بتنی [۱۵ و ۱۴] می‌باشد. پس از قرار گیری لایه‌ی آب در سطح، شرایط محیطی محل ساخت روسازی، باعث شده تا این آب با نرخی، که وابسته به این شرایط می‌باشد، تبخیر گردد. پس از تعادل نرخ تبخیر و آب انداختگی در سطح بتن، مقدار فشارهای مویینگی منفی شده و جمع شدگی خمیری شکل می‌گیرد. در صورتی که از حرکت دال روسازی ناشی از این جمع شدگی، جلوگیری گردد، تنش‌های کششی در سطح دال به وجود می آید [۱۹-۱۶]. عوامل ایجاد حرکت مقید در روسازی شامل وجود میلگردهای مسلح کننده (در صورت مسلح بودن دال روسازی)، سنگدانه‌های درشت و اصطکاک بین سطح زیرین دال با سطح اساس روسازی می‌باشد. در صورت تجاوز مقدار تنش‌های کششی به وجود آمده از مقاومت کششی بتن تازه، ترک خوردگی ناحیه‌ای به وجود می‌آید [۲۲-۲۰]. با توجه به عدم الزام تعمیر خرابی به وجود آمده ناشی از این ترک خوردگی در روسازی‌های بتنی [۱] و همچنین هزینه بر بودن آن، این ترک‌ها در طول عمر روسازی باقی‌مانده و باعث کاهش دوام روسازی، سطح خدمت‌دهی و در نهایت باعث شکست دال می‌شود. بنابراین نیاز است تا با به کارگیری روش‌ها، مصالح و مواد مختلف، شدت این ترک خوردگی را کنترل کرد.

از مواد افزودنی مختلف در روسازی بتنی، جهت بهبود خصوصیات آن در کوتاه و دراز مدت، استفاده می‌گردد. استفاده از هر یک از این مواد تاثیرات متفاوتی بر خصوصیات بتن تازه و سخت شده دارد. افزودنی‌های هوازا یکی از این مواد افزودنی مورد استفاده در روسازی بتنی بوده که با ایجاد حباب‌های هوا در ابعاد بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر، جلوگیری از انعقاد این حباب‌ها به یکدیگر و اتصال حباب‌های هوا به ماتریس سیمان و سنگدانه‌ها، باعث ایجاد هوای عمدی در طرح مخلوط شده دوام روسازی در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان و اثر مواد شیمیایی را افزایش می‌دهد [۲۳]. نتایج تحقیق انجام شده توسط مرادلو و همکاران[1] نشان داد که مخلوط‌های بتنی حاوی ماده‌ی هوازا با میزان هوای بیشتر از ۴/۵٪، فاکتور دوام در برابر سیکل‌های ذوب و بخندان بیش از ۷۰٪ دارند [۲۴]. روسازی‌های بتنی معمولا در معرض یخ زدگی همراه با وجود دائمی رطوبت قرار داشته یا تحت اثر مواد شیمیایی یخ زا می‌باشند، بنابراین استفاده از مواد هوازا در مخلوط بتن روسازی جهت افزایش دوام بتن در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان و اثر مواد شیمیایی مختلف، نیاز می‌باشد. زیاری و همکاران[2]، اثر افزودن ماده‌ی افزودنی هوازا در روسازی‌های بتنی خود تراکم مورد استفاده در سطوح پروازی را بررسی کردند. نتایج کار آنان نشان داد که عمکلرد مخلوط‌های بتنی در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان، با افزودن ماده‌ی افزودنی هوازا، بهبود یافت [۲۵].

رویکردهای کنترل و کاهش ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی را می‌توان در دو دسته ی کلی شامل رویکردهای فعال[3] و رویکردهای غیر فعال[4] قرار داد [۲۶]. رویکردهای فعال با کاهش نرخ تبخیر از سطح بتن، سعی بر کنترل تعادل زود هنگام نرخ تبخیر و آب انداختگی داشته و باعث کاهش کنترل ترک خوردگی می‌گردد. روش‌های ارائه شده در ۳۰۵R ACI [۲۷] بر اساس این رویکرد می‌باشد. رویکردهای غیر فعال، شامل استفاده از طرح مخلوط بتنی بوده که از قابلیت ترک خوردگی کمتری برخوردار باشد که شامل استفاده از انواع الیاف [۲۸] و سیمان‌های با حرارت زایی کم است [۲۹]. استفاده از انواع مختلف مواد افزودنی یکی از روش‌های مورد استفاده در این رویکرد جهت کنترل و کاهش ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری است.

بررسی اثر مواد افزودنی مختلف بر جمع شدگی خمیری بتن، مورد توجه برخی از محققان بوده است. ویرزیکوفسکی و همکاران[5] با استفاده از نوترون توموگرافی، به بررسی جمع شدگی خمیری و کاهش آب ناشی از تبخیر سطحی و باز توزیع سیال در ملات‌های حاوی ماده‌ی افزودنی کاهنده‌ی جمع شدگی به مقدار ۰.۵٪ وزن آب مخلوط، پرداختند. نتایج کار آنان نشان داد که افزودن ماده‌ی افزودنی کاهنده‌ی جمع شدگی، باعث کاهش نرخ آب در ملات در مراحل اولیه‌ی خشک شدن گردیده و منجر به کاهش مقدار کل آب از دست رفته از ملات شد [۳۰]. یاکوبی و همکاران[6] اثر آب انداختگی، آب مازاد و ماده‌ی افزودنی فوق روان کننده بر روی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط‌های بتنی خود تراکم در آب و هوای گرم را بررسی کرده و مشاهده کردند که افزودن ۷٪ ماده‌ی افزودنی فوق روان کننده، باعث کاهش عرض ترک خوردگی به میزان ۲۵٪ گردید [۳۱]. قورچیان و همکاران[7] اثر افزودن مواد افزودنی کاهنده‌ی جمع شدگی، ماده‌ی افزودنی تسریع کننده بر پایه‌ی سیلیکات کلسیم هیدراته و ماده‌ی عمل آوری در کنترل ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در بتن را مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد که در میان مواد افزودنی استفاده شده، ماده‌ی افزودنی کاهنده‌ی جمع شدگی بتن، موثرترین روش جهت کاهش ترک خوردگی در مخلوط‌های

1 Moradllo et al.
2 Ziari et al.
3 Active solution
4 Passive solution
5 Wyrzykowski et al.
6 Yakoubi et al.
7 Ghourchiana et al.

جدول ۱. مشخصات فنی و ظاهری ماده‌ی سوپر هوازا مورد استفاده در این تحقیق

Table 1. Technical and physical properties of super air-entraining agent used in this study

حالت فیزیکی	مایع
رنگ	قهوه ای
وزن مخصوص	۱/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب
قابلیت انحلال	در آب
مقدار کلر	فاقد کلر
اسیدیته (PH)	۸
مقدار مصرف پیشنهادی	۰/۵ در ۱۰۰۰ وزن سیمان

بتنی بود [۲۶]. سیراجودین و گتو[1] نیز اثر افزودن دو ماده‌ی افزودنی کاهنده‌ی جمع شدگی بر پایه‌ی گلیکول بر کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در بتن را بررسی کردند. نتایج کار آنان نشان داد که ماده‌ی افزودنی کاهنده‌ی جمع شدگی باعث کاهش چشمگیر تبخیر از سطح بتن می‌شود [۳۲]. کامبرینک و همکاران[2] به بررسی اثر مواد افزودنی مختلف، از جمله، ماده‌ی افزودنی حباب هوا ساز بر پایه‌ی کلرید، بر ترک خوردگی بتن خمیری پرداختند. ماده افزودنی در دو درصد شامل ۰/۱۵ و ۰/۳ در ۱۰۰ کیلوگرم مواد سیمانی و در یک طرح اختلاط ثابت بررسی گردید. نتایج نشان داد که افزودن این ماده باعث کاهش ترک خوردگی شده و مقدار مصرف ۰/۳، اثر بهتری از خود نشان داد [۳۳]. تحقیقات بررسی شده، نشان داد که مواد افزودنی، با وجود مقدار مصرف کم نسبت به سایر مصالح تشکیل دهنده‌ی بتن، اثرات مثبت زیادی بر جمع شدگی و ترک خوردگی ناشی از آن در بتن دارد. بیشتر پژوهش‌های انجام شده بر روی اثر استفاده از ماده‌ی کاهنده‌ی جمع شدگی بتن در کنترل و کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، متمرکز است. با این وجود، اثر مثبت استفاده از ماده‌ی افزودنی هواساز بر کاهش ترک خوردگی خمیری دیده می‌شود، اما اثر مقادیر مصرف متفاوت این ماده بر ترک خوردگی خمیری نیاز به مطالعه‌ی بیشتر دارد.

با توجه به این که استفاده از بتن هوادار در روسازی‌های بتنی که در معرض سیکل‌های ذوب و یخ قرار دارند، ضروری بوده و همچنین از آن جا که بتن‌های هوادار نفوذ پذیری کمتری داشته و در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر حملات سولفات و واکنش قلیایی- سیلیسی دارد، استفاده از مواد افزودنی هوادار در روسازی‌های بتنی اهمیت پیدا می‌کند. با بررسی پیشینه‌ی پژوهش، مشاهده شد که افزودن هوای عمدی در بتن، می‌تواند اثر مثبتی بر کنترل و کاهش ترک خوردگی‌های خمیری در بتن داشته باشد. از طرفی با توجه به اثر منفی این هوای عمدی بر خصوصیات مقاومتی بتن، افزودن هوای عمدی می‌تواند اثر منفی نیز بر شدت ترک خوردگی‌های خمیری داشته باشد. بنابراین می‌تواند میزان مصرفی از ماده‌ی هوازا در روسازی بتنی هوادار وجود داشته باشد که در آن هوای عمدی ایجاد شده باعث کاهش حداکثری شدت ترک خوردگی خمیری گردد. مشاهده می‌شود که بررسی مقدار مصرف ماده هوازا جهت ایجاد هوای عمدی در روسازی‌های بتنی هوادار در کنترل و کاهش ترک خوردگی‌های خمیری، کمتر مورد توجه واقع شده است. از این جهت، تحقیق حاضر به بررسی اثر مقادیر مختلف ماده‌ی افزودنی هوازا بر شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری در طرح مخلوط‌های بتن روسازی هوادار با نسبت‌های آب به سیمان متفاوت پرداخته و سعی بر تعیین اثر مقدار مصرف این ماده در کنترل و کاهش ترک خوردگی خمیری دارد.

۲- مصالح و روش

۲- ۱- مصالح

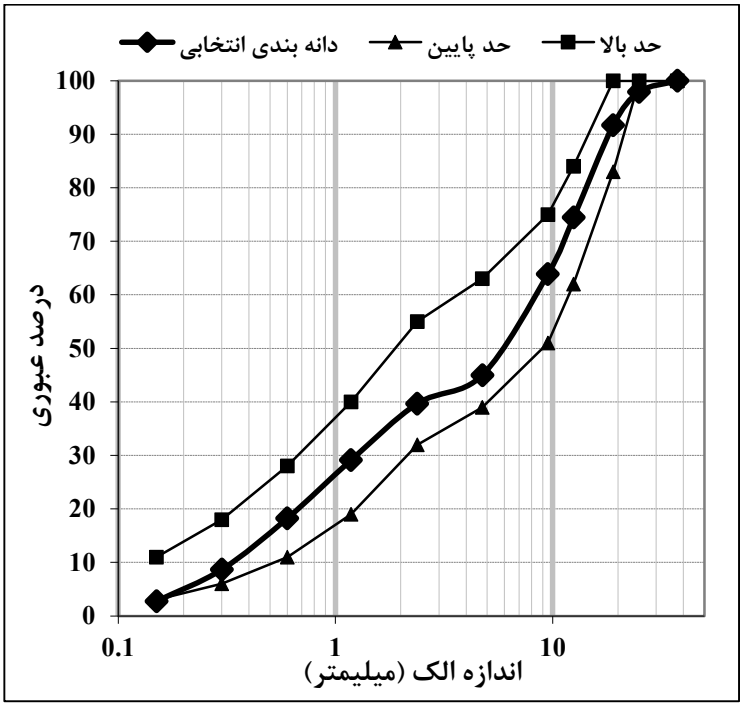
ماده‌ی افزودنی هوازای مورد استفاده در این تحقیق، ماده سوپر هوازا بوده که مشخصات فنی و ظاهری این ماده در جدول ۱ آورده شده است. مقدار مصرف پیشنهادی ارائه کننده این ماده، به مقدار ۵/۰ در ۱۰۰۰ وزن سیمان می‌باشد که در این تحقیق، از این مقدار به عنوان معیاری جهت تعیین مقادیر مصرف مختلف در طرح مخلوط‌های مورد بررسی، استفاده گردید.

1 Sirajuddin and Gettu
2 Combrinck et al.

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

Table 2. Chemical properties of Portland Cement Type II

مشخصه‌ی شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	LOI	SO_3^{-2}	IR	Na_2O	K_2O	Cl^-
مقدار (٪)	۲۱/۷۰	۵/۲۲	۳/۷۴	۶۴/۴۴	۲/۲۲	۱/۳۶	۲/۰۰	۰/۶۲	۰/۲۲	۰/۵۸	۰/۰۱
مقدار الزامات مقررات ملی ایران شماره ۳۸۹	>۲۰/۰	<۶	<۶	-	<۵	<۳	<۳	<۰/۷۵	-	-	-



شکل ۱. حدود دانه‌بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق

Fig. 1. Allowable and chosen aggregates gradation used in this study

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۲ با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده گردید. مشخصات شیمیایی این سیمان، ارائه شده توسط شرکت تولید کننده، در جدول ۲ دیده می‌شود.

از سنگدانه‌های آهکی با حداکثر اندازه‌ی ۵ میلی‌متر برای سنگدانه‌های ریز و ۲۵ میلی‌متر برای سنگدانه‌های درشت، در ساخت طرح‌های اختلاط، استفاده گردید. بر اساس روش آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C۱۲۸ و ASTM C۱۳۶، چگالی نسبی، جذب آب و مدول نرمی مصالح سنگی ریزدانه به ترتیب به میزان ۲/۵۰، ۳/۲ و ۲/۴٪ تعیین شد. چگالی نسبی و جذب آب مصالح سنگی درشت دانه مطابق با استاندارد ASTM C۱۲۷ به ترتیب به میزان ۲/۶۰٪ و ۱/۲٪ به دست آمد. سنگدانه‌های درشت در دو گروه دانه‌بندی شامل سنگدانه‌های درشت با اندازه‌ی ۱۲-۵ میلی‌متر و ۲۵-۱۲ میلی‌متر، مورد استفاده قرار گرفت.

از آب آشامیدنی محل آزمایشگاه، جهت ساخت مخلوط‌های بتنی استفاده شد. آب مصرفی صاف و عاری از مقادیر زیاد از مواد روغنی، اسیدی و دیگر مواد مضر است.

۲- ۲- طرح اختلاط

نسبت‌های اختلاط بتن روسازی هوادار مورد استفاده در این تحقیق بر اساس الزامات و معیارهای ذکر شده در دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها، ضابطه‌ی شماره ۷۳۱، تعیین گردیده و از حدود این ضابطه، پیروی می‌کند. شکل ۱، حدود دانه‌بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی با حداکثر اندازه‌ی ۲۵ میلی‌متر، مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱، آورده شده

جدول ۳. معیارهای در نظر گرفته شده جهت تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی هوادار مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱

Table 3. Criteria considered for selecting air-entrained concrete pavement mixtures according to Manual No.731

معیار	مقدار	روش انجام آزمایش
اسلامپ	۱۰ تا ۷۰ میلی‌متر	ASTM C143
عیار سیمان در بتن هوادار	حداقل ۳۵۵ کیلوگرم در متر مکعب	-
نسبت آب به مواد سیمانی در بتن هوادار (W/C)	حداکثر ۰/۴۹	-
درصد هوای ایجاد شده در بتن هوادار	۵ تا ۸ درصد	ASTM C231

جدول ۴. نسبت‌های وزنی طرح مخلوط‌های بتن روسازی با مقادیر متفاوت نسبت آب به سیمان

Table 4. Proportions of concrete pavement mixtures with a different water-to-cement ratio

مصالح	w/c= 4/00	w/c= 45/0	w/c= 49/0
سنگدانه‌های ریز (۵-۰ میلی‌متر) (kg/m^3)	۸۴۹	۸۴۹	۸۴۹
سنگدانه‌های درشت (۱۲-۵ میلی‌متر) (kg/m^3)	۵۳۷	۵۳۷	۵۳۷
سنگدانه‌های درشت (۲۵-۱۲ میلی‌متر) (kg/m^3)	۳۵۹	۳۵۹	۳۵۹
سیمان (kg/m^3)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
آب (kg/m^3)	۱۶۸	۱۸۰	۱۹۶

است.

معیار های در نظر گرفته شده جهت تعیین نسبت‌های اختلاط مورد بررسی، مطابق با معیارهای ذکر شده در ضابطه‌ی ۷۳۱، در جدول ۳ آورده شده است. تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی هوادار، به گونه‌ای انجام شده که معیارهای مندرج در جدول ۳ بر آورده شود. این معیارها، حدود و مقادیر مجاز جهت تعیین نسبت‌های بتن روسازی بتنی، مطابق با ضابطه ۷۳۱ را مشخص می‌کند.

نسبت‌های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق، به طوری انتخاب گردید تا علاوه بر رعایت الزامات تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی هوادار مطابق با جدول ۲، طرح مخلوط از قابلیت ترک خوردگی بالایی برخوردار باشد. بدین منظور سه مقدار نسبت آب به سیمان شامل ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۴۹ در مخلوطهای بتنی هوادار با مقادیر متفاوت نسبت آب به سیمان، انتخاب گردید. این مقادیر علاوه بر افزایش قابلیت ترک خوردگی خمیری، اثر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خودزا[1]، که بیشتر در مخلوطهای بتنی با نسبت آب به سیمان پایین رخ می‌دهد را کاهش می‌دهد تا ترک خوردگی‌های به وجود آمده در دال های بتنی، بیشتر تحت تاثیر جمع شدگی خمیری باشد. همچنین مقدار حداکثر نسبت آب به سیمان انتخاب شده از مقدار حداکثر ذکر شده در ضابطه ۷۳۱، مندرج در جدول ۲، تجاوز نمی‌کند. مقدار عیار سیمان با توجه به حداقل مقدار ذکر شده توسط ضابطه، افزایش قابلیت ترک خوردگی در نمونه‌ها ناشی از افزایش مقدار سیمان، و محدوده‌ی مجاز اسلامپ روسازی بتنی مطابق با جدول ۲، به میزان ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب گردید. جدول ۴، مقادیر وزنی جهت جهت ساخت یک متر مکعب بتن در حالت اشباع با سطح خشک مصالح برای سه طرح اختلاط با نسبت‌های آب به سیمان متفاوت را نشان می‌دهد.

از اهداف اصلی این پژوهش بررسی اثر مقادیر مختلف ماده‌ی هوازا در طرح مخلوطهای بتن روسازی هوادار که نسبت‌های وزنی آن در جدول ۳

1 Autogenous shrinkage

شکل ۲. آزمایش تعیین مقدار هوای بتن تازه به روش فشاری مطابق با استاندارد ASTM C231

Fig. 2. Test method for determination of air content of fresh concrete using compression method according to standard ASTM C231

مشاهده می‌شود، بر ترک خوردگی خمیری می‌باشد. مقدار مصرف ماده‌ی افزودنی هوازا، باید به طوری انتخاب گردد که مقدار هوای ایجاد شده در بتن هوادار از مقدار حداکثر ذکر شده در جدول ۲ (۸٪) تجاوز نکند. با توجه به مقدار بیشتر هوا در طرح مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان بیشتر (در صورت ثابت بودن دیگر مصالح بتن) [۲۳]، درصد هوای ایجاد شده در طرح مخلوط با نسبت آب به سیمان ۰/۴۹ معیار قرار داده شد. مقدار مصرف افزودنی هوازا که در این طرح مخلوط باعث ایجاد هوا به میزان کمتر از حد مجاز (۸٪) گردد، در طرح مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان کمتر، میزان هوای کمتر از حد مجاز ایجاد خواهد کرد.

جهت تعیین مقدار حداکثر مصرف ماده هوازا، با افزودن مقادیر مختلف این ماده و روش آزمون و خطا، و سپس اندازه‌گیری مقدار هوای ایجاد شده به روش فشاری مطابق با روش استاندارد ASTM C۲۳۱، حداکثر مقدار درصد مصرف ماده هوازا نسبت به وزن سیمان، جهت ایجاد مقدار هوای بتن به میزان حداکثر ۸٪، تعیین گردید. با توجه به آزمایش، با مصرف ماده‌ی هوازا به میزان ۰/۱٪ وزن سیمان در مخلوط بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۹، میزان هوای ۷/۹٪ در بتن ایجاد گردید که از مقدار حداکثر ضابطه، کمتر می‌باشد. با توجه به این میزان به دست آمده، میزان مصرف پیشنهادی سازنده و امکانات موجود، سه مقدار مصرف ماده هوازا به میزان ۰/۰۴٪، ۰/۰۷٪ و ۰/۱۰ ٪ نسبت به وزن سیمان، تعیین گردید. شکل ۲ اندازه‌گیری مقدار هوای بتن به روش فشاری را نشان می‌دهد.

به این ترتیب، تعداد ۹ طرح مخلوط بتن روسازی هوادار به صورت ترکیبی از ۳ مقدار مصرف ماده‌ی هوازا شامل ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱۰ درصد، و ۳ مقدار نسبت آب به سیمان شامل ۰/۴۵، ۰/۴۹، و ۳ طرح مخلوط بدون ماده‌ی هوازا و ۳ مقدار آب به سیمان مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات و مقادیر وزنی مصالح جهت ساخت یک متر مکعب بتن در حالت اشباع با سطح خشک مصالح، در جدول ۵ دیده می‌شود. هر طرح مخلوط با علامت R مشخص شده و اعداد قرار گرفته پس از آن، به ترتیب بیانگر نسبت آب به سیمان و درصد مصرف ماده‌ی هوازا نسبت به وزن سیمان می‌باشد.

مقدار هوای طرح‌های اختلاط بتن هوادار، برای اطمینان از رعایت حداکثر میزان هوای بتن روسازی هوادار مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱، و همچنین مقدار هوای طرح مخلوط‌های بدون ماده‌ی هوازا، جهت مقایسه‌ی بهتر با دیگر طرح مخلوط‌ها، با روش استاندارد ASTM C۲۳۱ نیز، اندازه‌گیری شد. همچنین جهت تعیین میزان کارایی و اندازه‌گیری مقدار اسلامپ طرح‌های اختلاط بتن روسازی هوادار و بدون ماده‌ی هوازا، از آزمایش اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM C۱۴۳ استفاده گردید (شکل ۳).

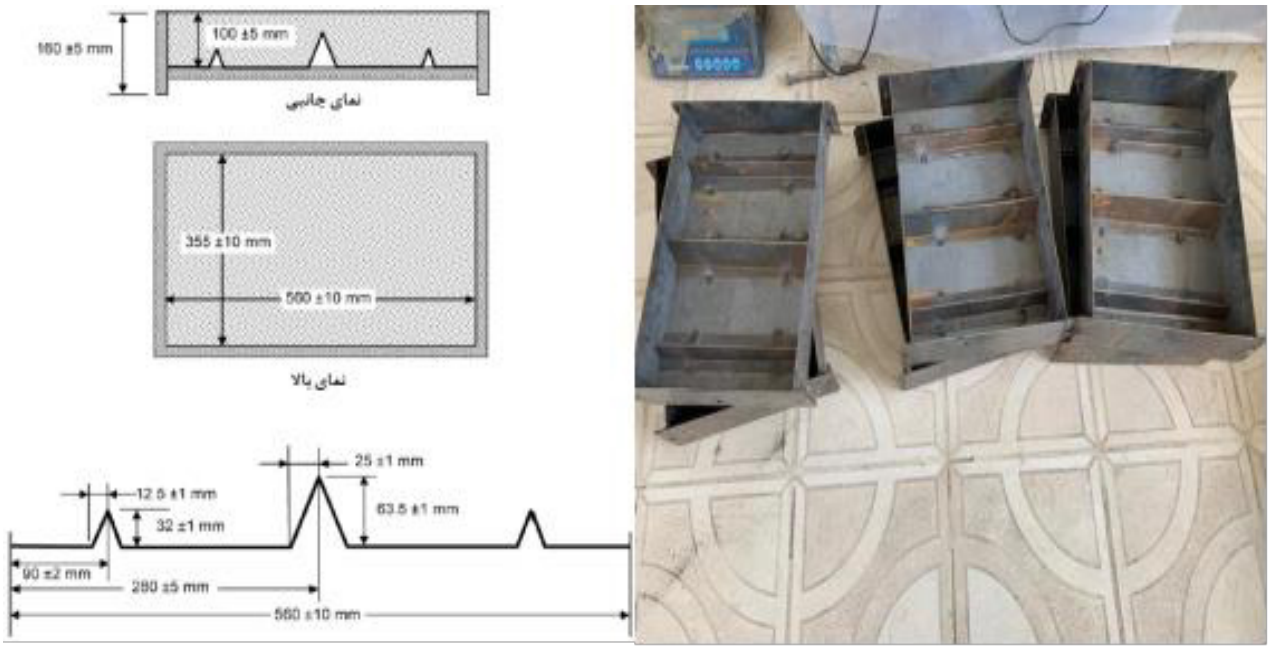
جدول ۵. نسبت‌های وزنی طرح مخلوط‌های بتن روسازی با مقادیر مختلف ماده‌ی هوازا و نسبت آب به سیمان

Table 5. Proportions of concrete pavement mixtures with different air-entraining agent content and water-to-cement ratio

طرح اختلاط	سنگدانه‌های ریز (۰-۵ میلی‌متر) (kg/m^3)	سنگدانه‌های درشت (۵-۱۲ میلی‌متر) (kg/m^3)	سنگدانه‌های درشت (۱۲-۲۵ میلی‌متر) (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	ماده‌ی هوازا (kg/m^3)
R-4/00,0.00	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۶۸	۰
R-4/00,04/0	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۶۸	۰/۱۶۰
R-4/00,07/0	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۶۸	۰/۲۸۰
R-4/00,0.10	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۶۸	۰/۴۰۰
R-45/0,0.00	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۸۰	۰
R-45/0,04/0	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۸۰	۰/۱۶۰
R-45/0,07/0	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۸۰	۰/۲۸۰
R-45/0,0.10	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۸۰	۰/۴۰۰
R-49/0,0.00	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۹۶	۰
R-49/0,04/0	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۹۶	۰/۱۶۰
R-49/0,07/0	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۹۶	۰/۲۸۰
R-49/0,0.10	۸۴۹	۵۳۷	۳۵۹	۴۰۰	۱۹۶	۰/۴۰۰

شکل ۳. اندازه‌گیری مقدار اسلامپ بتن روسازی مطابق با استاندارد ASTM C143

Fig. 3. Determination of concrete pavement slump according to standard ASTM C143



شکل ۴. مشخصات قالب و ابزار فولادی (سمت چپ)، قالب و ابزار فولادی مورد استفاده در این تحقیق (سمت راست)

Fig. 4. Properties of steel mold and form insert (left), steel mold, and form insert used in this study (right)

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

از روش آزمایش استاندارد ASTM C۱۵۷۹ جهت ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال‌های بتنی، استفاده می‌شود. در این روش از یک قالب با ابعاد مشخص جهت ساخت دال بتنی مورد بررسی، استفاده شده و جهت افزایش قابلیت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، از یک ابزار فولادی که شامل یک افزاینده‌ی ترک مثلثی در مرکز و دو قید در اطراف آن می‌باشد. استفاده می‌گردد. مشخصات قالب و ابزار فولادی مورد استفاده در این تحقیق، در شکل ۴ دیده می‌شود. بر اساس این استاندارد، در صورت استفاده از مخلوط بتنی با مصالح سنگی با اندازه‌ی بزرگ‌تر از ۱۹ میلی‌متر، ارتفاع دال بتنی برابر با ۶۵ میلی‌متر به علاوه‌ی حداقل دو برابر بزرگ‌ترین اندازه‌ی مصالح سنگی، می‌باشد. بنابراین ارتفاع دال‌های بتنی مورد بررسی در این تحقیق، برابر ۱۱۵ میلی‌متر می‌باشد.

دال‌های بتنی در یک محفظه که از نظر شرایط محیطی، کنترل می‌گردد، قرار گرفته و مورد آزمایش قرار می‌گیرند. شرایط محیطی مورد نظر در این تحقیق، شامل دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی هوای ۲۵ درصد و سرعت جریان باد ۱۸ کیلومتر بر ساعت، می‌باشد. این شرایط در یک محفظه‌ی محیطی و توسط سیستم‌های گرماساز، رطوبت‌ساز و دو بادبزن ایجاد شده و در مدت آزمایش، توسط سیستم‌های کنترل دما، رطوبت و بادسنج الکترونیکی، کنترل می‌گردید. شکل ۵، محفظه‌ی محیطی، سیستم‌های ایجاد و اندازه‌گیری شرایط محیطی را نشان می‌دهد.

تعداد ۹ طرح مخلوط بتن روسازی هوادار با مقادیر متفاوت نسبت آب به سیمان و درصدهای مصرف مختلف ماده‌ی هوازا مورد آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری واقع شد. همچنین ۳ طرح مخلوط بتن با مقادیر مختلف نسبت آب به سیمان و بدون مصرف ماده‌ی هوازا، جهت بررسی بهتر نمونه‌های حاوی ماده‌ی هوازا و نمونه‌های فاقد این ماده، آزمایش شد. در هر بار آزمایش، تعداد دو دال بتنی مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین نتایج، در نظر گرفته شد. در صورت اختلاف زیاد بین نتایج به دست آمده از دو نمونه، آزمایش بر روی نمونه‌ی سوم، انجام می‌گرفت.

جهت ساخت نمونه‌ها، ابتدا مصالح سنگی خشک و سیمان به مدت ۲ دقیقه به صورت خشک در میکسر اختلاط می شد. سپس آب و ماده‌ی هوازا با یکدیگر مخلوط شده و به مصالح سنگی و سیمان، اضافه می‌گردید. عملیات اختلاط جهت اطمینان از همگنی مناسب، به مدت ۵ دقیقه ادامه می‌یافت.

شکل ۵. محفظه‌ی محیطی، سیستم‌های ایجاد و اندازه‌گیری شرایط محیطی

Fig. 5. Environmental chamber, environmental conditions creation, and measurement systems

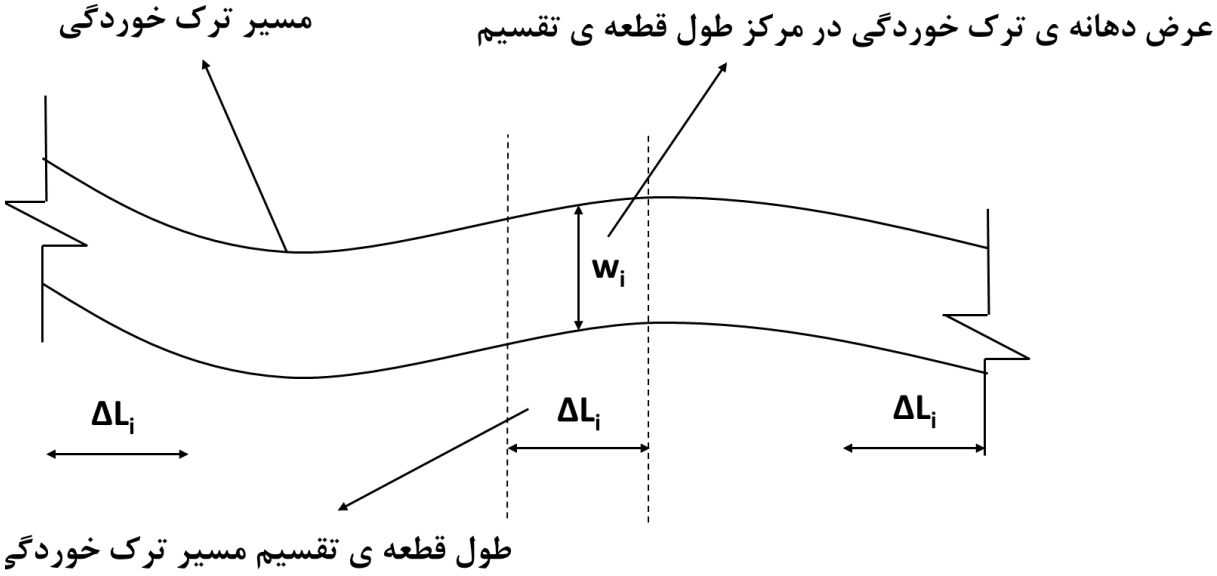
بدنه‌ی داخلی قالب‌های آزمایش، جهت عدم چسبندگی به مخلوط بتنی، با یک لایه روغن قالب پوشانده می‌شد. مخلوط بتنی در یک لایه به داخل قالب ریخته شده و عملیات تراکم و تسطیح با یک کوبه و ماله‌ی فلزی انجام می‌گرفت. سپس شرایط محیطی مورد نظر در محفظه ایجاد شده و هر دو نمونه در داخل محفظه قرار داده می‌شد. مدت زمان آزمایش، ۲۴ ساعت بوده و در این مدت، شرایط محیطی محفظه، توسط سیستم‌های اندازه‌گیری، کنترل می‌گردید. شکل ۶ نمونه‌های در حال آزمایش در داخل محفظه را نشان می‌دهد.

متغیر مورد بررسی در این آزمایش جهت تعیین شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در نمونه‌ها، متوسط عرض ترک خوردگی در نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C۱۵۷۹ است. عرض ترک خوردگی در یک مسیر مشخص ترک خوردگی، میانگین فواصل بین دهانه‌ی ترک خوردگی (w_i) در مرکز طول یک قطعه‌ی مشخص از مسیر ترک خوردگی (ΔL_i) مطابق با شکل ۷، تعریف می‌شود. با توجه به این تعریف، مسیر ترک خوردگی به قطعاتی با طول ΔL_i تقسیم شده و میزان عرض دهانه‌ی ترک خوردگی در مرکز طول هر قطعه، اندازه‌گیری می‌شود. سپس، با محاسبه‌ی میانگین میزان عرض‌های اندازه‌گیری شده، متوسط عرض ترک خوردگی در مسیر ترک، مطابق با رابطه ی (۱) تعیین می‌گردد. انتخاب مقدار مناسب ΔL_i به عوامل مختلفی شامل ابزار اندازه‌گیری، میزان نامنظمی در نحوه‌ی ترک خوردگی و دقت مورد نظر در اندازه‌گیری بستگی دارد. همچنین، این مقدار می‌تواند در طول یک مسیر ترک خوردگی، بسته به شکل ترک خوردگی، به صورت متفاوت انتخاب شود.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i}{n} \qquad (۱)$$

شکل ۶. نمونه‌های تحت آزمایش در محفظه‌ی شرایط محیطی

Fig. 6. Specimens under testing in the environmental chamber



شکل ۷. مشخصات هندسی عرض ترک خوردگی در مسیر ترک جهت تعیین متوسط عرض ترک خوردگی نمونه

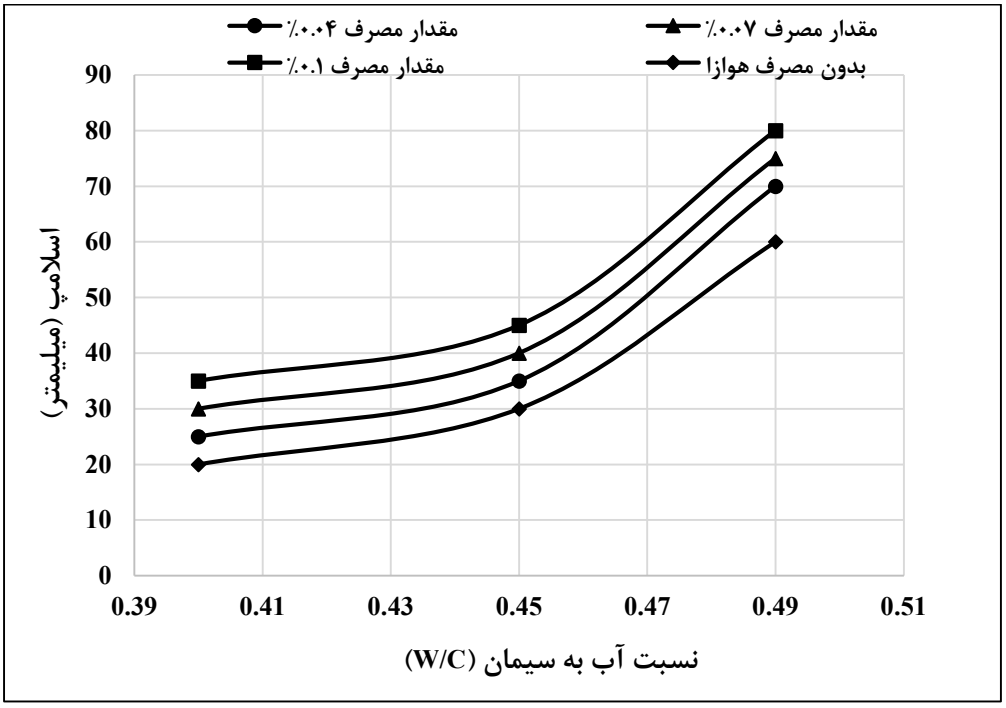
Fig. 7. Geometric properties of cracking width along the cracking path for determination of mean cracking width of specimen

شکل ۸. نمونه‌های آزمایش شده دال بتن روسازی هوادار در انتهای آزمایش

Fig. 8. Tested air-entrained concrete slab specimens at the end of the experiment

که در آن W متوسط عرض ترک خوردگی مسیر ترک در نمونه، w_i عرض دهانه‌ی ترک خوردگی در مرکز طول قطعه‌ی تقسیم و n تعداد قطعات تقسیم مسیر ترک خوردگی است.

با توجه به تعریف ذکر شده، پس از اتمام آزمایش، متوسط عرض ترک خوردگی هر نمونه اندازه‌گیری شد. در این تحقیق، جهت اندازه‌گیری متوسط عرض ترک خوردگی در هر نمونه، مسیر ترک خوردگی، به سه قطعه‌ی مختلف، شامل دو قطعه با طول ۵ سانتی‌متر در ابتدا و انتهای مسیر ترک خوردگی (که در مسیر عرض نمونه است) و قطعه‌ی میانی، تقسیم‌بندی گردید. این تقسیم‌بندی، به دلیل افزایش دقت در اندازه‌گیری انجام شده و همچنین، با توجه به نزدیکی دو قطعه‌ی ابتدایی و انتهایی مسیر ترک خوردگی به بدنه‌ی قالب، ترک خوردگی ایجاد شده در این قسمت، نسبت به قطعه‌ی میانی متفاوت بوده و نیاز به بررسی دقیق‌تر بود. سپس با استفاده از ابزار اندازه‌گیری دقیق (کولیس دیجیتال) با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۰۱ میلی‌متر، عرض دهانه‌ی ترک خوردگی اندازه‌گیری و ثبت گردید. در قطعات ابتدایی و انتهایی مسیر ترک خوردگی، به دلیل نامنظم‌تر بودن ترک خوردگی ناشی از تاثیر نزدیکی به بدنه‌ی قالب، دهانه‌ی ترک خوردگی در فاصله‌ی ۰/۵ سانتی‌متری (ΔL_0 =۱cm) اندازه‌گیری شد. عرض ترک خوردگی در قطعه‌ی میانی در فواصل ۱ سانتی‌متری (ΔL =۱cm) اندازه‌گیری گردید. در صورت نامنظم بودن مسیر ترک از نظر ترک خوردگی، فاصله‌ی اندازه‌گیری عرض دهانه‌ی ترک در هر یک از قطعات تقسیم‌بندی شده، کمتر می‌گردید. میانگین متوسط عرض ترک خوردگی در هر یک از سه قطعه، به عنوان متوسط عرض ترک خوردگی آن قطعه ثبت شده و میانگین متوسط عرض ترک خوردگی قطعات، متوسط عرض ترک خوردگی نمونه‌ی مورد بررسی، را به دست می‌دهد. این فرآیند در هر بار آزمایش، برای دو نمونه انجام شده و متوسط عرض ترک خوردگی آزمایش، از میانگین متوسط عرض ترک خوردگی دو نمونه، به دست آمد. در صورت اختلاف زیاد بین نتایج به دست آمده از دو نمونه، آزمایش سوم انجام می‌گردید. در شکل ۸، دو نمونه پس از اتمام آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۹. مقادیر اسلامپ طرح مخلوطهای بتن روسازی هوادار

Fig. 9. The slump values of air-entrained concrete pavement mixtures

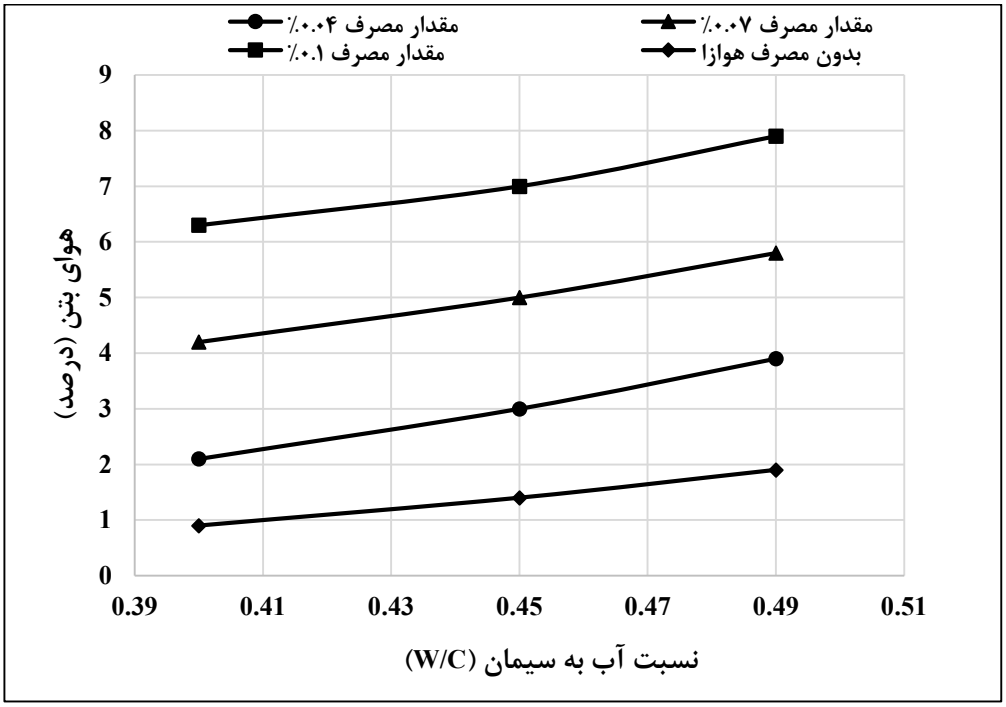
۳- نتایج و بحث

۳- ۱- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

در این قسمت، نتایج بتن تازه شامل، نتایج آزمایش اسلامپ و درصد هوای طرح مخلوطهای مورد بررسی، ارائه می‌گردد. در شکل ۹، نتایج آزمایش اسلامپ طرح‌های مخلوط با مقادیر متفاوت نسبت آب به سیمان و درصدهای مصرف مختلف مادهی هوازا، دیده می‌شود. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار اسلامپ در تمامی طرح مخلوطها، افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت آب به سیمان و ثابت بودن دیگر مقادیر، مقدار آب آزاد جهت ایجاد روانی مخلوط افزایش یافته، و در نتیجه، مقدار اسلامپ بتن افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود در یک نسبت آب به سیمان ثابت، با افزایش مقدار مصرف مادهی هوازا، مقدار اسلامپ بتن افزایش می‌یابد. افزودن مادهی هوازا و در نتیجه، افزایش مقدار هوای بتن، باعث بهبود خصوصیات بتن خمیری شده و باعث افزایش میزان کارایی مخلوط می‌گردد. با توجه به نتایج اسلامپ، دیده می‌شود که حداکثر میزان اسلامپ در طرح مخلوطهای بتن روسازی هوادار مورد بررسی، به میزان ۸۰ میلی‌متر می‌باشد. این میزان از حداکثر مقدار مجاز اسلامپ بتن روسازی هوادار مندرج در جدول ۲ (۷۰ میلی‌متر)، بیشتر است که علت آن افزایش میزان هوای بتن ناشی از افزودن مادهی هوازا می‌باشد. اما این میزان اختلاف زیاد نبوده و مقدار اسلامپ بتن‌های مورد بررسی، نزدیک به مقدار مجاز می‌باشد.

در شکل ۱۰، مقادیر درصد هوای بتن در طرح مخلوطهای بتن هوادار و بدون فاقد مادهی هوازا را در نسبت‌های آب به سیمان مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، مشاهده می‌شود که در یک درصد مصرف ثابت، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار هوای بتن، افزایش یافته است. علت این موضوع این است که با افزایش نسبت آب به سیمان، میزان آب موجود برای ایجاد حباب‌های در داخل مخلوط افزایش یافته، در نتیجه مقدار هوای بتن افزایش می‌یابد. همچنین لازم به ذکر است که افزایش هوای به وجود آمده ناشی از افزایش نسبت آب به سیمان ناشی از افزایش هوای غیر عمدی[1] در بتن بوده

1 Entrapped air



شکل ۱۰. میزان هوای طرح مخلوط‌های بتن روسازی هوادار

Fig. 10. Air content of air-entrained concrete pavement mixtures

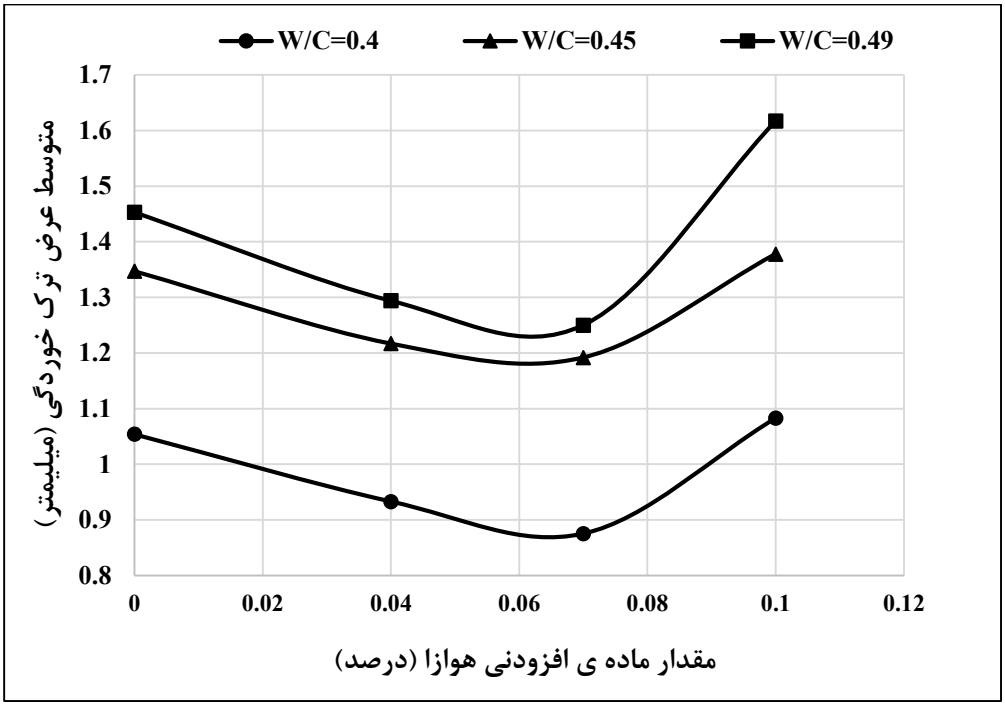
در حالی که افزودن ماده‌ی هوازا، هوای عمدی[1] ایجاد می‌کند که از نظر ابعاد و اثرات آن بر طرح مخلوط، با یکدیگر متفاوت می‌باشد. دیده می‌شود که حداکثر میزان هوای به وجود آمده در طرح مخلوط‌های روسازی بتنی هوادار (۷/۹٪) از حداکثر میزان مجاز (۸٪) کمتر می‌باشد.

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

نمودار شکل ۱۱، تغییرات میزان متوسط عرض ترک خوردگی طرح‌های مخلوط بتن هوادار با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۴۹ را در درصدهای مصرف ۰، ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱۰درصد را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که افزودن ماده‌ی هوازا، باعث کاهش نسبی متوسط عرض ترک خوردگی در نسبت‌های آب به سیمان مختلف شده است. با افزودن ماده‌ی هوازا به میزان ۰/۰۴ درصد، متوسط عرض ترک خوردگی در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۴۹ به ترتیب به میزان ۱۱، ۹ و ۱۰ درصد نسبت به نمونه‌های فاقد ماده‌ی هوازا، کاهش می‌یابد. مواد افزودنی هوازا باعث کاهش تنش سطحی در سطح میان آب و هوا در مخلوط شده و در نتیجه باعث کاهش تنش سطحی در بتن می‌گردد. همچنین این مواد، باعث کاهش نرخ آب انداختگی شده که این موضوع باعث کاهش نرخ آب تبخیر در سطح بتن می‌گردد. نتیجه‌ی مشابهی در پژوهش انجام شده توسط کامبرینگ و همکاران [۳۳]، مشاهده شد.

با افزودن بیشتر ماده‌ی هوازا، کاهش شدت ترک خوردگی ادامه می‌یابد. افزایش ماده‌ی هوازا از مقدار ۰/۰۴ به ۰/۰۷ درصد، باعث کاهش متوسط عرض ترک خوردگی در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۴۹، به ترتیب به میزان ۶، ۲ و ۳ درصد می‌شود. با افزودن بیشتر هوای عمدی در بتن، آب انداختگی و تنش کششی سطحی بیشتر کاهش یافته و در نتیجه، شدت ترک خوردگی، کمتر می‌شود. با این حال دیده می‌شود که میزان کاهش ترک خوردگی در این افزایش مصرف، نسبت به افزایش مصرف از ۰ به ۰/۰۴ درصد، کمتر می‌باشد. این موضوع نشان دهنده‌ی کاهش اثر مواد هوازا در کنترل ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری می‌باشد.

1 Entrained air



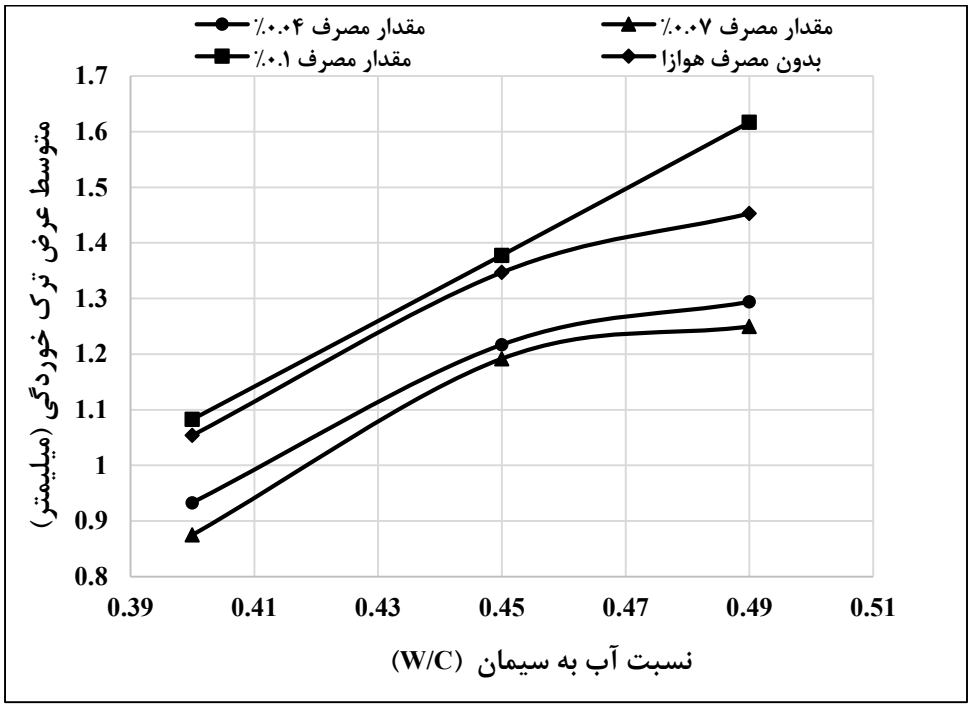
شکل ۱۱. تغییرات متوسط عرض ترک خوردگی در طرح مخلوط‌های بتن روسازی هوادار نسبت به درصد مصرف ماده‌ی هوازا

Fig. 11. Change of mean cracking width of air-entrained concrete pavement mixtures relative to air-entraining agent content

با افزایش مصرف درصد از مقدار ۰/۰۷ به ۰/۱ درصد، شدت ترک خوردگی به طور چشمگیری افزایش یافته به طوری که متوسط عرض ترک خوردگی در نسبت‌های اختلاط ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۴۹ به ترتیب به میزان ۲۴، ۱۵ و ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. افزودن بیشتر ماده‌ی هوازا که باعث افزایش بیشتر مقدار هوای عمدی در مخلوط بتنی شده، باعث کاهش مقاومت کششی مخلوط می‌گردد. با توجه به این که عامل مقاومت در برابر تنش‌های کششی ناشی از فشارهای موبینگی در سطح بتن، مقاومت کششی مخلوط می‌باشد، بنابراین افزایش بیشتر از اندازه‌ی هوای عمدی در مخلوط، باعث افزایش ترک خوردگی خمیری می‌گردد. می‌توان این طور استنباط کرد که با افزودن بیشتر ماده‌ی هوازا از یک درصد مصرف مشخص، اثر منفی هوای عمدی در کاهش مقاومت بتن، بر اثر مثبت آن بر کاهش تنش‌های موبینگی و سطحی ناشی از جمع شدگی خمیری، غلبه کرده و باعث افزایش شدت ترک خوردگی می‌گردد.

با توجه به نمودار شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که مقدار مصرفی که با افزودن بیشتر ماده‌ی هوازا از آن، شدت ترک خوردگی افزایش می‌یابد، در نزدیکی مقدار مصرف ۰/۰۷ درصد می‌باشد. این مقدار، می‌تواند به عنوان درصد مصرف بهینه‌ی ماده‌ی افزودنی هوازا در کنترل و کاهش ترک خوردگی، مد نظر قرار گیرد. با توجه به تنوع مواد افزودنی هوازا و درصد مصرف‌های مختلف پیشنهادی، نیاز است تا مقدار هوای ایجاد شده در مخلوط بتنی با افزودن ماده‌ی هوازا در این درصد مصرف بهینه، مشخص شود. با توجه به نمودار شکل ۹، دیده می‌شود که با افزودن ۰/۰۷ ماده‌ی هوازا در طرح مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۴۹، مقدار هوا به ترتیب به میزان ۴/۲، ۵ و ۵/۸ درصد در مخلوط بتنی هودار ایجاد می‌شود. بدین ترتیب، این میزان هوای ایجاد شده در بتن روسازی هوادار ناشی از افزودن ماده‌ی هوازا، می‌تواند مقدار بهینه‌ی هوا جهت کاهش حداکثری ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری باشد.

شکل ۱۲، نمودار تغییرات متوسط عرض ترک خوردگی در طرح مخلوط‌های بتن روسازی هوادار با مقادیر مصرف مختلف ماده‌ی هوازا را



شکل ۱۲. تغییرات متوسط عرض ترک خوردگی در طرح مخلوطهای بتن روسازی هوادار نسبت به نسبت آب به سیمان

Fig. 12. Change of mean cracking width of air-entrained concrete pavement mixtures relative to the water-to-cement ratio

نسبت به نسبت آب به سیمان‌های متفاوت، نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، دیده می‌شود که افزایش نسبت آب به سیمان، در همه‌ی طرح اختلاطها، باعث افزایش شدت ترک خوردگی شده است. علت این موضوع، افزایش میزان فشارهای مویینگی و کاهش مقاومت کششی، با افزایش نسبت آب به سیمان می‌باشد [۱۲].

با افزایش نسبت آب به سیمان از مقدار ۰/۴۰ به مقدار ۰/۴۵، متوسط عرض ترک خوردگی در مقادیر مصرف ۰، ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱۰ درصد به ترتیب میزان ۲۸، ۳۰، ۳۶ و ۲۷ درصد افزایش می‌یابد. افزایش نسبت آب به سیمان از مقدار ۰/۴۵ به مقدار ۰/۴۹، باعث افزایش متوسط عرض ترک خوردگی در مقادیر مصرف ۰، ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱۰ درصد، به ترتیب میزان ۷، ۶، ۵ و ۱۷ درصد می‌شود. با توجه به این نتایج، دیده می‌شود که افزایش شدت ترک خوردگی در بازه‌ی افزایش نسبت آب به سیمان ذکر شده، در مخلوطهای حاوی ماده‌ی هوازا، بیشتر بوده اما اختلاف بین این تغییرات به صورت چشمگیر نمی‌باشد. همچنین، مشاهده می‌شود که تاثیر افزایش نسبت آب به سیمان بر شدت ترک خوردگی، در بازه‌ی تغییر نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ به ۰/۴۵، بیشتر از بازه‌ی تغییر ۰/۴۵ به ۰/۴۹ است. علت این امر این می‌تواند باشد که با افزایش نسبت آب به سیمان از مقدار ۰/۴ به ۰/۴۵، اثر کاهش مقاومت کششی و افزایش فشار مویینگی، باعث افزایش چشمگیر شدت ترک خوردگی می‌گردد. اما با افزایش بیشتر نسبت آب به سیمان، میزان آب انداختگی بتن بیشتر شده و در نتیجه مقدار آب بیشتری در سطح، جهت جبران تبخیر آب، وجود دارد. در نتیجه تعادل آب انداختگی و تبخیر دیرتر اتفاق می‌افتد و باعث کاهش شدت ترک خوردگی می‌گردد. جهت بررسی بیشتر این موضوع، نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه است.

در انتهای این قسمت، لازم به ذکر است که با وجود این که افزودن ماده‌ی هوازا در مقدار مصرف مناسب، باعث کاهش شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوطهای بتنی مورد بررسی گردید، اما اثرات این ماده در کاهش خصوصیات مقاومتی روسازی بتنی نیز باید مد نظر قرار گیرد. به دلیل ایجاد تخلخل در مخلوط بتنی ناشی از ایجاد هوای

عمدی، مشخصات مقاومتی روسازی بتنی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی می‌تواند تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش یابد. این موضوع با توجه به اهمیت هر یک از این مشخصه‌های مقاومتی در عملکرد روسازی‌های بتنی، می‌تواند باعث بروز مشکلات و چالش‌هایی در شرایط اجرایی و واقعی گردد. بنابراین نیاز است تا جهت رفع این موضوع، بررسی‌های بیشتر قرار گیرد. انجام اصلاحات لازم در طرح اختلاط، کنترل میزان مصرف ماده‌ی هوازا و افزایش مشخصات مقاومتی بتن روسازی بتنی (بیشتر از حداقل مقادیر ذکر شده در ضابطه‌ی ۷۳۱) می‌تواند به عنوان راه حل‌های موثر و اجرایی، مد نظر قرار گیرد. با این وجود، تحقیقات و بررسی‌های بیشتری در این زمینه نیاز است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی مقدار مصرف ماده‌ی هوازا جهت ایجاد هوای عمدی در روسازی بتنی هوادار در کاهش ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری پرداخته شد. اثر مقادیر مختلف ماده‌ی هوازا بر شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری در طرح مخلوط‌های بتن روسازی هوادار با نسبت‌های آب به سیمان مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج به دست آمده تحلیل و تفسیر گردید. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق، به شرح زیر است:

افزودن ماده‌ی هوازا و افزایش هوای عمدی در بتن، باعث کاهش شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری تا میزان ۱۷٪ در بتن هوادار نسبت به بتن فاقد ماده‌ی هوازا شد.

با افزایش بیشتر ماده‌ی هوازا، شدت ترک خوردگی بیشتر کاهش می‌یابد. اما این میزان کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در مخلوط بتنی با هوازای بیشتر (۰/۱٪) نسبت مخلوط با هوازای کمتر (۰/۰۷٪)، کاهش می‌یابد.

در یک درصد مصرف مشخص ماده‌ی هوازا (۰/۰۷٪)، استفاده بیشتر از آن، باعث افزایش شدت ترک خوردگی خمیری می‌گردد.

این درصد مصرف مشخص، درصد بهینه‌ی مصرف ماده‌ی هوازا بوده که باعث ایجاد هوای عمدی در مخلوط بتن روسازی هوادار شده به طوری که کمترین میزان شدت ترک خوردگی در آن رخ می‌دهد. همچنین افزودن این میزان ماده هوازا، باعث ایجاد مقدار هوای عمدی کمتر از مقدار مجاز هوای عمدی در روسازی بتنی هوادار (۸٪) می‌گردد.

میزان تاثیر افزایش نسبت آب به سیمان بر افزایش شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری در بازه‌ی تغییر نسبت آب به سیمان پایین‌تر (۰/۴۵-۰/۴)، بیشتر از بازه‌ی تغییر بالاتر (۰/۴۹-۰/۴۵) می‌باشد.

افزایش نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های با ماده‌ی هوازا، اثر بیشتری در افزایش شدت ترک خوردگی خمیری نسبت به مخلوط‌های بدون این ماده، دارد. اما اختلاف بین اثرات آن‌ها بر شدت ترک خوردگی، چشمگیر نمی‌باشد.

با استفاده از نتایج این تحقیق، نتیجه می‌شود که افزودن ماده هوازا جهت ایجاد هوای عمدی در روسازی‌های بتنی، اثر مثبتی بر کنترل یا کاهش شدت ترک خوردگی داشته، بنابراین می‌توان استفاده از این ماده را به عنوان رویکردی جهت کاهش ترک خوردگی‌های خمیری در نظر داشت. این مورد، با توجه به اثر مثبت این ماده بر دوام روسازی‌های بتنی در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در این تحقیق، تنها متوسط عرض ترک خوردگی به عنوان متغیر مورد نظر جهت ارزیابی شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری مد نظر قرار گرفت. ارزیابی دیگر متغیرهای مرتبط با جمع شدگی خمیری مانند میزان جمع شدگی، زمان ترک خوردگی، زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر، و بررسی تاثیر مقدار مصرف ماده‌ی هوازا بر این متغیرها، به جهت شناخت بیشتر رفتار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی هوادار، مورد نیاز بوده که می‌تواند در تحقیقات آتی مد نظر قرار گیرد.

منابع

[1] Design, Construction and Maintenance Manual for Highways Concrete Pavements No.731 in, The Ministry of Road & Urban Development. Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs 2017.(in Persian)

[2] Y.H. Huang, Pavement analysis and design, 2004.

[3] N.J. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance, Crc Press, 2014.

[4] M.Y. Shahin, Pavement management for airports, roads, and parking lots, Springer New York, 2005.

[5] G. Moelich, R. Combrinck, A weather data analysis method to mitigate and prevent plastic shrinkage cracking, Construction and Building Materials, 253 (2020) 119066.

[6] D. Meyer, W.P. Boshoff, R. Combrinck, Utilising super

absorbent polymers as alternative method to test plastic shrinkage cracks in concrete, Construction and Building Materials, 248 (2020) 118666.

[7] P. Ghoddousi, A.A.S. Javid, M.A. Etebari, Investigation of the effect of capillary pore pressure on paste shrinkage of concrete mixtures containing microsilica and metakaolin and its relationship with tensile strength of early ages., New Approaches in Civil Engineering, 3(2) (2019).

[8] R. Combrinck, W.P. Boshoff, Tensile properties of plastic concrete and the influence of temperature and cyclic loading, Cement and Concrete Composites, 97 (2019) 300-311.

[9] F. Sayahi, Plastic Shrinkage Cracking In Concrete: Mitigation and Modelling, Luleå University of Technology, 2019.

[10] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, M. Plamondon, P. Lura, On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials, Cement and Concrete Research, 115 (2019) 251-263.

[11] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, P. Lura, A poromechanics model for plastic shrinkage of fresh cementitious materials, Cement and Concrete Research, 109 (2018) 120-132.

[12] A. Almusallam, M. Maslehuddin, M. Abdul-Waris, M. Khan, Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments, Construction and Building Materials, 12(6-7) (1998) 353-358.

[13] W. Dias, Influence of mix and environment on plastic shrinkage cracking, Magazine of Concrete Research, 55(4) (2003) 385-394.

[14] R. Combrinck, L. Steyl, W.P. Boshoff, Interaction between settlement and shrinkage cracking in plastic concrete, Construction and Building Materials, 185 (2018) 1-11.

[15] R. Combrinck, L. Steyl, W.P. Boshoff, Influence of concrete depth and surface finishing on the cracking of plastic concrete, Construction and Building Materials, 175 (2018) 621-628.

[16] M. Kayondo, R. Combrinck, W. Boshoff, State-of-the-art review on plastic cracking of concrete, Construction and Building Materials, 225 (2019) 886-899.

[17] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, L. Baquerizo, P. Lura, Susceptibility of Portland cement and blended cement concretes to plastic shrinkage cracking, Cement and Concrete Composites, 85 (2018) 44-55.

[18] S. Ghourchian, Plastic Shrinkage Cracking in Concrete: From Mechanisms to Mitigation Strategies, ETH Zürich, 2018.

[19] V. Slowik, T. Hübner, M. Schmidt, B. Villmann, Simulation of capillary shrinkage cracking in cement-like materials, Cement and Concrete Composites, 31(7) (2009) 461-469.

[20] K. Gunasekaran, R. Annadurai, P. Kumar, Plastic shrinkage and deflection characteristics of coconut shell concrete slab, Construction and Building Materials, 43 (2013) 203-207.

[21] R. Combrinck, W.P. Boshoff, Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete, Magazine of Concrete Research, 65(8) (2013) 486-493.

[22] W.P. Boshoff, R. Combrinck, Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete, Cement and Concrete Research, 48 (2013) 34-39.

[23] S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese, Design and control of concrete mixtures, Portland Cement Association Skokie, IL, 2002.

[24] M.K. Moradllo, C. Qiao, R.M. Ghantous, M. Zaw, H. Hall, M.T. Ley, W.J. Weiss, Quantifying the freeze-thaw performance of air-entrained concrete using the time to reach critical saturation modelling approach, Cement and Concrete Composites, 106 (2020) 103479.

[25] H. Ziari, P. Hayati, J. Sobhani, Air-entrained air field self-consolidating concrete pavements: strength and durability, International Journal of Civil Engineering, 15(1) (2017) 21-33.

[26] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, L. Baquerizo, P. Lura, Performance of passive methods in plastic shrinkage cracking mitigation, Cement and Concrete Composites, 91 (2018) 148-155.

[27] ACI, ACI 305R: Hot weather concreting, in, ACI Farmington Hills, MI, USA, 2010.

[28] I. Bertelsen, L. Ottosen, G. Fischer, Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review, Construction and Building Materials, 230 (2020) 116769.

[29] A.A.S. Javid, Mechanisms and strategies to increase the durability of concrete against plastic settelement, plastic shrinkage and drying cracking, in: First National Conference on Concrete Durability, Tehran,iran, 2018.

[30] M. Wyrzykowski, P. Trtik, B. Münch, J. Weiss, P. Vontobel, P. Lura, Plastic shrinkage of mortars with shrinkage reducing admixture and lightweight aggregates studied by neutron tomography, Cement and Concrete Research, 73 (2015) 238-245.

[31] I. Yakoubi, S. Aggoun, H. Ait Aider, H. Houari, The influence of bleeding, extra water and superplasticizer on the SCC plastic shrinkage cracking: case of hot weather, Journal of adhesion science and Technology, 30(23) (2016) 2596-2618.

[32] M. Sirajuddin, R. Gettu, Plastic shrinkage cracking of concrete incorporating mineral admixtures and its mitigation, Materials and Structures, 51(2) (2018) 48.

[33] R. Combrinck, M. Kayondo, B. le Roux, W. de Villiers, W. Boshoff, Effect of various liquid admixtures on cracking of plastic concrete, Construction and Building Materials, 202 (2019) 139-153.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. J. Vaziri Kang Olyaei, S. Golchin, A. S. Dabiri, H. Fazaeli, Assessment of the Effect of Air-Entraining Agent Content in Reducing the Severity of Plastic Shrinkage Cracking in Air-entrained Concrete Pavements, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 457-474.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18914.6996