



بررسی اثر شرایط محیطی مختلف بر خصوصیات زمانی ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در رویه‌های بتنی

حسن زیاری^۱، سیدجواد وزیری کنگ علیایی^{۲*}، حسن فضایی^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۰۴

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

کلمات کلیدی:

جمع‌شدگی خمیری

روسازی بتنی

شرایط محیطی مختلف

زمان تعادل

زمان شروع ترک خوردگی

خلاصه: ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در رویه‌های بتنی به دلیل خشک شدن سریع سطح روسازی، در ساعات اولیه پس از ساخت اتفاق می‌افتد. وجود این نوع ترک‌ها در رویه‌های بتنی، علاوه بر تأثیر منفی در زیبایی سازه، باعث کاهش دوام روسازی در دراز مدت و کاهش سطح خدمت‌دهی جاده می‌گردد. با توجه به شرایط محیطی مختلف و متغیر در محل اجرای روسازی، ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری نیز دستخوش تغییر می‌گردد. در این تحقیق خصوصیات زمانی ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری مخلوط بتنی، شامل زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر، و زمان شروع ترک خوردگی، با استفاده از روش استاندارد ASTM C1۵۷۹ در ۲۷ شرایط محیطی مختلف با استفاده از سیستم فیلم‌برداری پیوسته، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که تغییر شرایط محیطی، اثر بیشتری بر روی زمان تعادل نسبت به زمان شروع ترک خوردگی دارد. همچنین، رطوبت نسبی هوا، بیشترین تأثیر را بر روی مشخصات زمانی ترک خوردگی داشته، و اثرات دمای محیطی و سرعت جریان باد، نزدیک به هم می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر می‌تواند معیاری مناسب جهت پیش‌بینی خطر ترک خوردگی خمیری در رویه‌های بتنی در شرایط محیطی مختلف باشد. نیاز است تا با استفاده از روش‌های پیشگیرانه مناسب از کاهش زیاد زمان تعادل و افزایش سرعت ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در روسازی‌های بتنی، جلوگیری کرد.

۱- مقدمه

می‌توانند بدون تعمیر و نگهداری و یا با تعمیر و نگهداری اندک، در طول عمر طراحی خود خدمت‌دهی کنند. استفاده از مصالح با دوام و اجرای مناسب در رویه‌های بتنی جهت رسیدن به یک روسازی با دوام، امری مهم می‌باشد [۴]. یکی از عوامل کاهنده‌ی دوام در رویه‌های بتنی، ایجاد و رشد ترک می‌باشد. ترک در روسازی محلی برای نفوذ مواد خورنده به داخل روسازی بوده که به تخریب تدریجی بتن و میلگردهای مسلح کننده منجر می‌شود. جمع‌شدگی خمیری یکی از عوامل ایجاد ترک در رویه‌های بتنی بوده و باعث تخریب تدریجی سازه می‌گردد [۵-۱۰]. این نوع جمع‌شدگی که بیشتر در سازه‌های بتنی مسطح، مانند روسازی‌های بتنی اتفاق می‌افتد، می‌تواند باعث کاهش دوام آن گردد. در قطعات بتنی مسطح مانند روسازی‌های بتنی، پس از ساخت، به دلیل نیروی جاذبه و اختلاف وزن مصالح تشکیل‌دهنده‌ی بتن، عمل خود تراکمی صورت گرفته و آب داخل بتن از طریق منافذ داخلی به سطح روسازی منتقل می‌شود. به این مرحله‌ی انتقال آب به سطح بتن، فاز آب‌انداختگی گفته می‌شود. نرخ تبخیر در سطح بتن باعث تبخیر آب منتقل شده به آن، می‌شود. پس از برابری نرخ آب‌انداختگی و تبخیر در

استفاده از بتن در روسازی، یک انتخاب مقرون به صرفه و با عملکرد بالا، جهت ساخت جاده‌ها و بزرگراه‌ها می‌باشد [۱]. در ایران به دلایلی از جمله فراوانی قیر، آشنایی بیشتر دست‌اندرکاران عملیات راهسازی با روسازی آسفالتی و وجود ضوابط فنی در کشور، غالباً رویه‌ی راه‌ها آسفالتی می‌باشد. با افزایش قیمت قیر در چند سال گذشته، مازاد تولید سیمان و عمر بیشتر رویه‌های بتنی نسبت به آسفالتی، سبب شده است که آسفالت به عنوان تنها گزینه جهت احداث رویه مد نظر قرار نگرفته و متولیان امور راهسازی، رویه‌های بتنی را به عنوان یک گزینه در کنار رویه‌های آسفالتی مطرح کنند [۲]. این رویه‌ها از یک دال بتنی به صورت مسلح و یا غیر مسلح تشکیل شده است که می‌تواند به صورت مستقیم بر روی خاک بستر و یا اساس قرار گیرد [۳]. رویه‌های بتنی برای ساخت بزرگراه‌ها، فرودگاه‌ها، خیابان‌ها، راه‌های محلی، کاربردهای صنعتی و دیگر زیرساخت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در صورت طراحی مناسب و ساخت با مصالح با دوام، این رویه‌ها

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: javad_vaziri@alumni.iust.ac.ir



بگذارد.

بررسی اثرات محیطی بر روی روند ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری، مورد توجه برخی از محققان بوده است [۳۳-۳۶]. کواک و ها^۱ با استفاده از تعادل بین نرخ آب‌انداختگی و تبخیر، به بررسی تخمین زمان وقوع ترک خوردگی در دال‌های بتنی در شرایط محیطی مختلف پرداخته و نتیجه گرفتند که با استفاده از این مدل‌های عددی می‌توان این زمان را پیش‌بینی کرد [۳۷]. داودی و همکاران در یک مطالعه‌ی موردی، ترک خوردگی‌های ناشی از جمع‌شدگی و نشست خمیری را در شرایط محیطی با رطوبت بالا، مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند، با وجود رطوبت نسبی هوای بالا (تا ۹۷٪)، ترک خوردگی خمیری رخ می‌دهد. آنان علت این امر را وابسته بودن ترک خوردگی خمیری، به دیگر عوامل، مانند ارزش ماسه‌ای بتن، بیان کردند [۳۸]. یاکوبی و همکاران^۲ در تحقیق خود نتیجه گرفتند که شرایط محیطی سخت باعث افزایش سرعت رشد ترک خوردگی و عرض ترک شده که دلیل این امر، به تعادل رسیدن سریع تر نرخ آب‌انداختگی و تبخیر بیان شده است [۳۹]. اهمیت زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر از آن جهت می‌باشد که پس از این زمان، سطح روسازی بتنی مستعد ترک خوردگی بوده و در صورت انجام اقدامات پیش‌گیرانه، مانند مرطوب کردن سطح بتن و استفاده از ماده‌ی عمل‌آوری بتن، می‌توان از وقوع ترک‌های خمیری جلوگیری کرد و یا از شدت این ترک‌ها کاست. در شرایطی که متغیرهای طرح مخلوط و مشخصات سازه یکسان باشد، زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر به طور عمده وابسته به شرایط محیطی بوده و از آن جهت پیش‌بینی وقوع ترک خوردگی استفاده شده است. کواک و ها در تحقیقی دیگر به ارائه‌ی یک مدل رگرسیونی جهت تخمین زمان خشک شدن (زمان تعادل بین آب‌انداختگی و تبخیر) در شرایط محیطی مختلف در مخلوط بتنی پرداخته و از آن جهت پیش‌بینی وقوع ترک خوردگی استفاده کردند [۴۰]. با توجه به نوسانات شرایط محیطی محل ساخت روسازی، بررسی اثرات هر یک از عوامل محیطی بر روی زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر، و همچنین زمان شروع ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری، می‌تواند جهت کنترل و کاهش این نوع ترک‌ها، کمک زیادی بکند. بنابراین نیاز است تا ارتباط هر یک از عوامل محیطی با این دو متغیر بیشتر مورد بررسی قرار بگیرد.

با توجه به بررسی پیشینه‌ی تحقیق، مشاهده شد که تغییرات شرایط محیطی بر فاز آب‌انداختگی و خشک شدن بتن تأثیر داشته و در نهایت

سطح بتن، لایه‌ی آب موجود محو شده و فشارهای مویبندی منفی شکل می‌گیرد. این مرحله، فاز خشک شدن نام دارد [۱۱-۱۴]. این فشارهای منفی باعث جمع‌شدگی افقی در سطح بتن شده و در صورت مقید بودن روسازی ناشی از عوامل داخلی (مانند مصالح سنگی، میلگردهای مسلح کننده) و عوامل خارجی (مانند لایه‌ی اساس دانه‌ای و تثبیت شده)، تنش‌های کششی سطحی به وجود می‌آید. در صورت تجاوز مقدار تنش‌های کششی از مقاومت کششی بتن در ساعات اولیه، ترک‌های سطحی ایجاد می‌گردد [۱۵-۲۱].

مقدار و شدت ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری، به زمان شروع و مقدار فشارهای مویبندی در سطح روسازی بستگی دارد این فشارها پس از تجاوز نرخ تبخیر از نرخ آب‌انداختگی در سطح رویه ایجاد می‌گردد. پس از تعادل این دو نرخ، سطح روسازی در برابر ترک خوردگی خمیری مستعد شده [۲۲، ۲۳]، بنابراین این زمان، جهت پیش‌بینی زمان ترک خوردگی و انجام اقدامات پیشگیرانه از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. مقدار نرخ آب‌انداختگی در سطح بتن به عوامل مختلفی وابسته می‌باشد. در مخلوط‌های با مقدار زیاد سیمان، مقدار مواد ریزدانه افزایش یافته و باعث کاهش آب‌انداختگی می‌گردد [۲۴، ۲۵]. سیمان‌های با نرمی بالا، هیدراتاسیون سیمان را بیشتر کرده که این موضوع باعث کاهش آب‌انداختگی می‌گردد [۲۶، ۲۷]. همچنین، اندازه‌ی سنگدانه و نسبت آب به سیمان، در نرخ آب‌انداختگی مؤثر می‌باشد [۲۸]. ضخامت دال بتنی هم بر روی مقدار آب‌انداختگی تأثیر داشته؛ به طوری ضخامت بیشتر روسازی، باعث افزایش مقدار آب‌انداختگی می‌گردد [۲۹، ۳۰].

در مقابل، در صورتی که مشخصات طرح مخلوط و سازه یکسان باشد، مقدار آب‌انداختگی ثابت بوده و نرخ تبخیر آب موجود در سطح، می‌تواند متغیر باشد. نرخ تبخیر آب سطحی از بتن تابع عوامل محیطی شامل دمای محیط، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد است [۳۱]. با تغییر نرخ تبخیر در سطح بتن، زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر تغییر کرده که این موضوع باعث می‌شود زمان شروع تشکیل فشارهای مویبندی منفی نیز دستخوش تغییر گردد. در نتیجه، ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری تحت تأثیر این عوامل محیطی، تغییر می‌کند [۳۲]. در یک شرایط محیطی سخت از نظر نرخ تبخیر سطحی، سطح روسازی بتنی زودتر خشک شده و جمع‌شدگی خمیری، زودتر در آن اتفاق می‌افتد. با توجه به وابستگی رشد مقاومت کششی بتن در سنین اولیه به زمان، این موضوع می‌تواند باعث به وجود آمدن نگرانی شود. در نتیجه دوام روسازی‌های بتنی در سنین اولیه می‌تواند کاهش یافته و بر دوام این رویه‌ها در بلند مدت تأثیر

1 Kwak and Ha

2 Yakoubi *et al.*

بر ساعت بود ۲۷ شرایط محیطی با در نظر گرفتن ایجاد شرایط هوای گرم مختلف، محدودیت‌های اجرایی و آزمایشگاهی انتخاب شده، با این وجود، بیشتر مناطق بحرانی اقلیم ایران از نظر ترک‌خوردگی خمیری را نیز پوشش می‌دهد. شکل ۱ فرآیند کلی آزمایش‌ها و متغیرهای در نظر گرفته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

۲-۲- روش آزمایش

جهت بررسی روند جمع‌شدگی خمیری و ترک‌خوردگی ناشی از آن در شرایط محیطی مختلف، از مبانی اشاره شده در روش استاندارد ASTM C1۵۷۹ [۴۱] استفاده شده است. این روش می‌تواند ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در شرایط محیطی مختلف را در دال‌های بتنی ایجاد کند. در این روش محفظه‌ای با قابلیت حفظ و کنترل متغیرهای محیطی مورد نظر، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این محفظه قادر به ایجاد شرایط محیطی مورد بررسی در این آزمایش می‌باشد. شکل ۲ اجزای مختلف مربوط به محفظه انجام آزمایش و تعلقات آن را نشان می‌دهد. این محفظه توانایی ایجاد شرایط دمایی متغیر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی هوا از ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ با دقت ۱٪، و سرعت جریان باد از ۰ تا ۹ متر بر ثانیه (۳۲/۴ کیلومتر بر ساعت) با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه (۰/۳۶ کیلومتر بر ساعت) را دارد. جهت ایجاد جریان باد یکنواخت در طول نمونه، از کانال‌های شیشه‌ای متحرک که بر روی قالب قرار می‌گیرند استفاده می‌شود. در انجام آزمایش ابتدا شرایط محیطی مورد نظر، یک ساعت قبل از انجام آزمایش، ایجاد شده و کنترل می‌گردد. جهت بررسی جمع‌شدگی خمیری و روند ترک‌خوردگی، از سیستم تصویربرداری پیوسته با دوربین دیجیتال در طول مدت زمان آزمایش استفاده می‌شود.

۲-۳- مصالح و طرح اختلاط

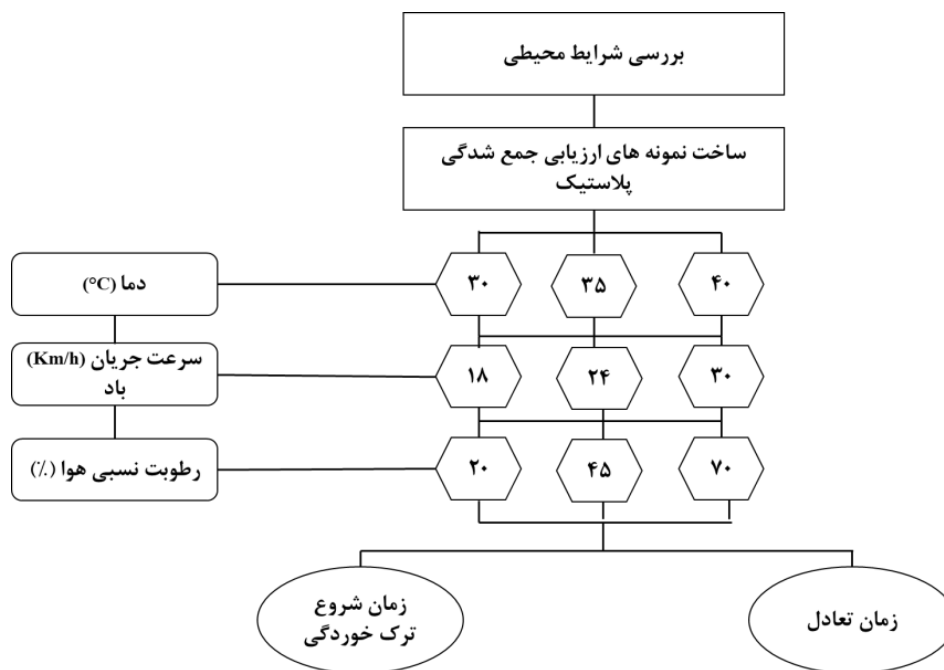
به منظور ساخت نمونه‌های بتن در این تحقیق از آب آشامیدنی و سیمان پرتلند نوع ۴۲.۵ CEM-I استفاده شده است. همچنین از سنگدانه‌های شکسته آهکی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر (۳/۴") برای سنگدانه‌های درشت و ۵ میلی‌متر (No ۴) برای سنگدانه‌های ریز مطابق با استاندارد ASTM C۳۳ [۴۲] استفاده شد. سنگدانه‌های ریز دارای مدول نرمی ۲/۸۸ و چگالی ویژه ۲/۵۴ بودند. چگالی ویژه سنگدانه‌های درشت، ۲/۶۸ بود. طرح مخلوط بتن در این تحقیق بر اساس ضوابط طرح مخلوط روسازی بتنی ارائه شده

می‌تواند زمان خشک شدن و وقوع ترک‌خوردگی را نیز دستخوش تغییر کند. همچنین تغییر هر یک از عوامل محیطی، شامل دمای محیط، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد، بر فاز آب‌انداختگی و فاز خشک شدن بتن تأثیرات متفاوتی با یکدیگر داشته که این موضوع بر ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری بتن نیز تأثیرگذار است. اما دیده می‌شود که با وجود انجام تحقیقاتی در زمینه‌ی بررسی اثر عوامل محیطی بر خصوصیات ترک‌خوردگی خمیری، بررسی اثر هر یک از این عوامل بر روی خصوصیات زمانی ترک‌خوردگی، شامل زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر، و زمان شروع ترک‌خوردگی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به همین دلیل، تحقیق حاضر به بررسی تأثیر عوامل محیطی بر خصوصیات زمانی ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در بتن روسازی می‌پردازد. با استفاده از روش آزمایشگاهی استاندارد، تعادل آب‌انداختگی و تبخیر، و ترک‌خوردگی خمیری در دال بتنی، در ۲۷ شرایط محیطی مختلف ارزیابی شده، و با استفاده از تحلیل تصاویر گرفته شده، زمان تعادل و زمان شروع ترک‌خوردگی هر حالت محیطی تعیین می‌گردد. سپس تأثیر هر یک از عوامل شامل دمای محیطی، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد بر تغییرات خصوصیات زمانی ترک‌خوردگی، بررسی شده و تحلیل و تفسیر می‌گردد.

۲-۲ روش و مصالح

۲-۱- متغیرهای مورد بررسی

بررسی تأثیر عوامل محیطی از جمله سرعت جریان باد، درصد رطوبت هوا و تغییرات دما، بر خصوصیات زمانی ترک‌خوردگی خمیری در مخلوط بتنی در شرایط جمع‌شدگی مقید از اهداف اصلی این تحقیق بوده است. بدین منظور در مجموع ۲۷ شرایط محیطی مختلف به صورت ترکیبی از ۳ مقدار درصد رطوبت هوا، ۳ مقدار دمای محیط و ۳ مقدار سرعت جریان باد مختلف مد نظر قرار گرفته و اثرات این متغیرها بر زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر، و زمان شروع ترک‌خوردگی بررسی گردیده است. مقدار حدقل دما و درصد رطوبت نسبی هوا، جهت ایجاد شرایط هوای گرم مطابق با مبحث نهم مقررات ملی، به میزان ۳۰ درجه سانتی‌گراد و ۷۰٪ انتخاب گردید. حداکثر دمای محیطی، با توجه به حداکثر دمای هوا در هنگام بتن‌ریزی مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۸۴۵۱، ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود. حداقل سرعت جریان باد، با توجه به توصیه‌ی استاندارد ASTM C1۵۷۹، به مقدار ۱۸ کیلومتر بر ساعت انتخاب شد. میزان تغییر دما، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد به ترتیب به میزان ۵ درجه سانتی‌گراد، ۴۵٪ و ۶ کیلومتر



شکل ۱. فرآیند کلی آزمایش‌ها و متغیرهای مورد بررسی

Fig. 1. Experiment process and the studied variables

جدول ۱. حدود مشخصات مورد استفاده جهت تعیین نسبت‌های اختلاط بتن مورد استفاده در روسازی بر اساس ضابطه ۷۳۱

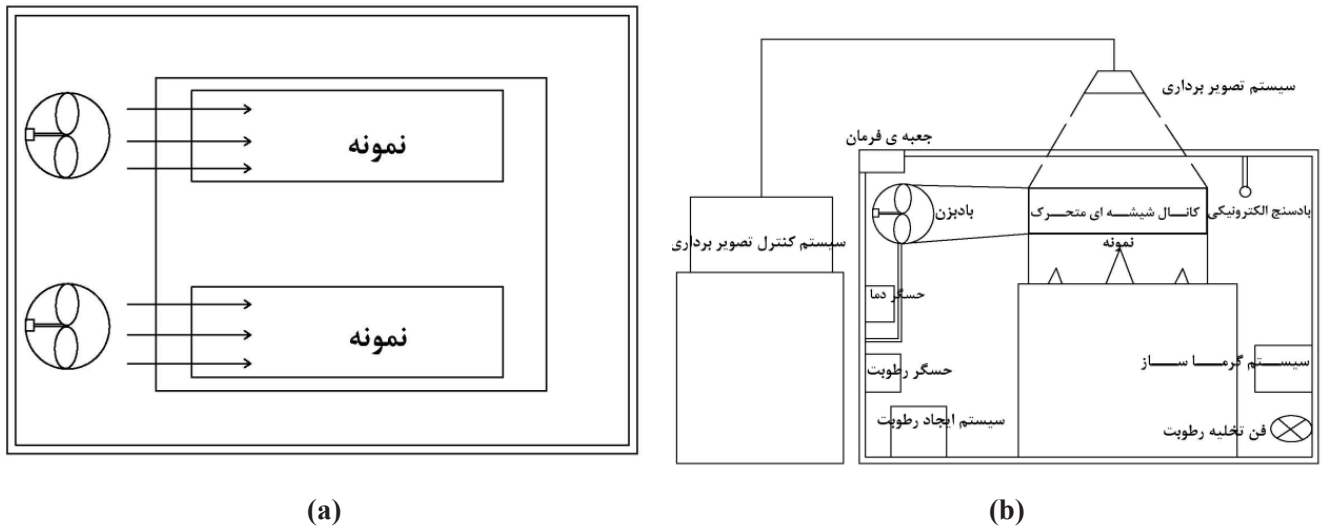
Table 1. Specifications used to design the concrete pavement mixture according to manual No.731

مقدار	معیار
حداکثر ۰/۵۳	نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)
حداقل ۳۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب	عیار سیمان
۱۰ تا ۷۰ میلی‌متر	اسلامپ

قابلیت ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در شرایط محیطی مختلف، در بتن وجود داشته باشد. بدین منظور نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵ انتخاب گردید. این نسبت، علاوه بر افزایش قابلیت ترک خوردگی خمیری، باعث می‌شود تا اثر جمع‌شدگی خودزا^۱، که در مخلوط‌های بتنی با نسبت آب به سیمان پایین رخ می‌دهد، حذف شده و این جمع‌شدگی تأثیری بر ترک خوردگی‌های به وجود آمده نداشته باشد. همچنین، مقدار عیار سیمان در

در دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها، ضابطه شماره ۷۳۱ [۲]، طرح گردیده و از حدود و مشخصات آن پیروی می‌کند. جدول ۱، مقدار مشخصات ضوابط مورد استفاده در این تحقیق جهت تعیین نسبت‌های طرح اختلاط بتن دال روسازی را نشان می‌دهد. در شکل ۲، حدود دانه‌بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی مورد استفاده در آزمایش، نشان داده شده است. نسبت‌های اختلاط طوری انتخاب گردید که علاوه بر رعایت حدود دانه‌بندی مصالح سنگی، حداکثر نسبت آب به سیمان و حداقل عیار سیمان، حداکثر

1 Autogenous shrinkage



شکل ۲. نمای محفظه‌ی شبیه‌ساز عوامل جوی: (a) نمای از بالا، (b): نمای از روبه‌رو

Fig. 2. Schematic view of the environmental simulator chamber; a) Plan view, b) Section view

جدول ۲. مقادیر وزنی مصالح استفاده شده در طرح اختلاط بتن

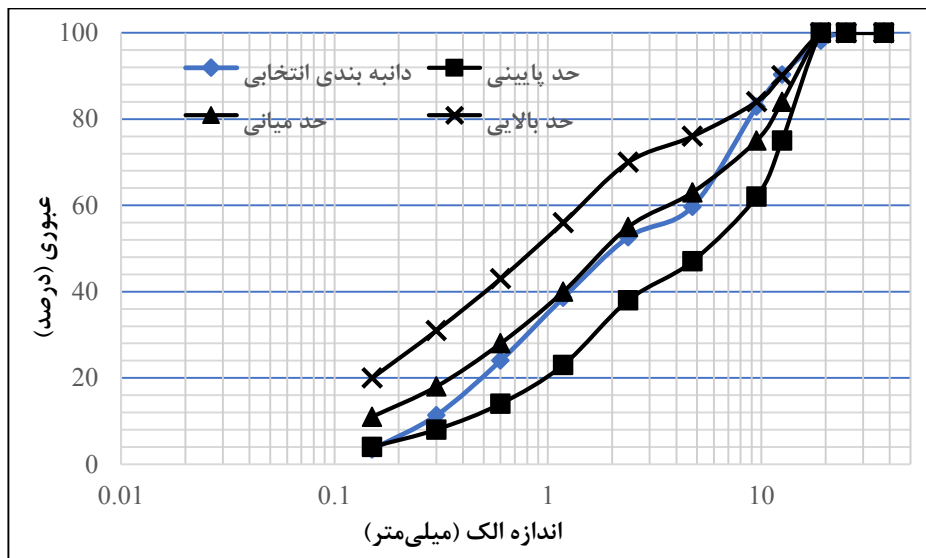
Table 1. Materials constituents for concrete mix design

مقدار (Kg/m ³)	نوع مصالح	مصالح
۴۶۰	سیمان پرتلند	سیمان
۹۲۸	۵-۰ mm	مصالح سنگی ریز
۴۰۳	۵-۱۲ mm	مصالح سنگی درشت
۲۴۵	۱۲-۱۹ mm	مصالح سنگی درشت
۲۳۰	آب آشامیدنی	آب

۲-۴- ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش

در ساخت نمونه‌ها به جهت این که دمای بتن تازه در همه‌ی دفعات آزمایش، دارای ثابتی باشد، مصالح سنگی و سیمان در کیسه‌های پلاستیکی در یک اتاقی که از نظر دما و رطوبت مورد کنترل واقع می‌شود، به مدت ۲۴ ساعت قبل از آزمایش نگهداری می‌شدند. همچنین دمای آب مصرفی قبل از اختلاط، به وسیله‌ی دما سنج

طرح مخلوط، به منظور افزایش قابلیت جمع‌شدگی، به میزان ۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شد. مشخصات طرح مخلوط مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. این طرح اختلاط در این تحقیق، جهت بررسی اثر شرایط محیطی بر ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در دال بتنی غیر مسلح، استفاده گردید.



شکل ۳. حدود دانه بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی مورد استفاده

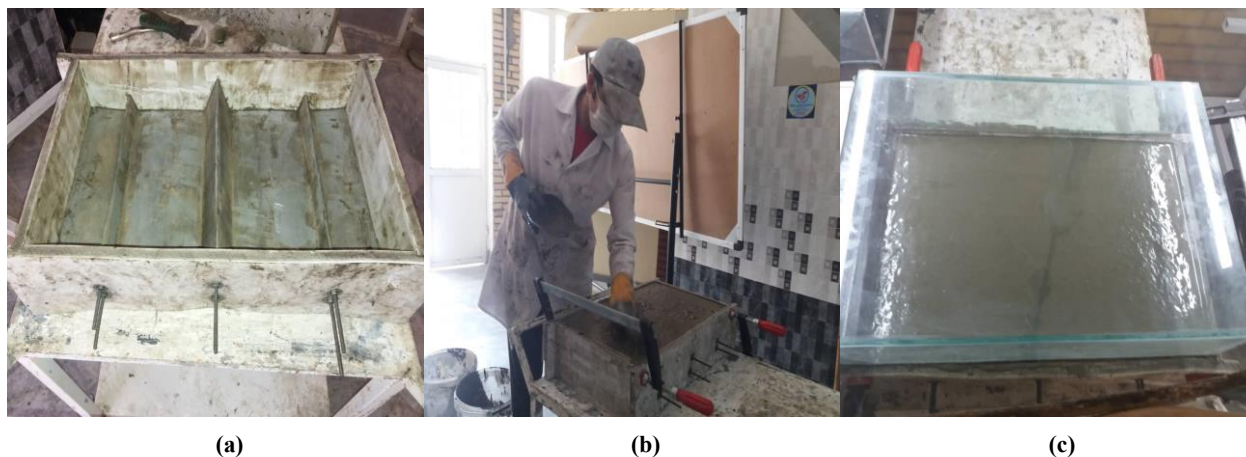
Fig. 3. Allowed and selected gradation of used aggregates

مؤثر جهت بررسی ترک خوردگی مخلوط‌های بتنی در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد [۴۳]، در این پژوهش هر شرایط مورد نظر، دو بار آزمایش شده و میانگین نتایج لحاظ می‌گردد. در صورت وجود اختلاف زیاد بین نتایج، آزمایش سوم انجام می‌شد. شکل ۳، قالب آزمایش، ساخت نمونه و نمونه‌ی در حال آزمایش در محفظه را نمایش می‌دهد.

۲-۵- برداشت نتایج آزمایش

پس از قرار دادن نمونه در محفظه‌ی شبیه ساز عوامل جوی، آزمایش شروع می‌شود. زمان صفر آزمایش، توسط سیستم تصویربرداری در کامپیوتر ثبت می‌گردد. هر سه عامل محیطی در ابتدا، حین و انتهای آزمایش، کنترل گردیده تا از مقدار مورد نظر فاصله نگیرد. همچنین، همزمان با برداشت‌های انجام شده توسط دوربین، زمان‌های مورد نظر در آزمایش، از طریق بازرسی حضوری کنترل می‌گردید. پس از شروع آزمایش، بازرسی حضوری در فواصل ۱۵ دقیقه‌ای انجام شده و برداشت‌های صورت گرفته در فرم‌های مخصوص بازرسی، ثبت گردید. پس از رسیدن به زمان تعادل، به دلیل احتمال شروع اولین ترک بعد از تعادل، نمونه به صورت مداوم تا زمان شروع اولین ترک، کنترل شده و تغییرات ثبت شد. نتایج به دست آمده از روش بازرسی حضوری در تحلیل بهتر تصاویر، استفاده شده (مانند برآورد اولیه‌ی محدوده‌ی زمان تعادل و زمان شروع ترک خوردگی نمونه در تصاویر گرفته شده) اما با توجه به دقت بالاتر روش تحلیل تصاویر، نتایج حاصل از این

تماسی الکترونیکی، کنترل می‌شد. این موضوع باعث شد تا دمای طرح اختلاط بتن در تمامی دفعات در محدوده‌ی 1 ± 25 درجه سانتی‌گراد قرار گیرد. مخلوط بتنی در یک مخلوط کن با ظرفیت 0.06 متر مکعب آماده شد. ابتدا مصالح سنگی درشت، مصالح سنگی ریز و سیمان به مدت ۲ دقیقه به صورت خشک اختلاط گردیده و سپس آب اختلاط به مخلوط افزوده گردید. کارایی بتن به وسیله‌ی مخروط اسلامپ ارزیابی شد. قبل از بتن ریزی، درزهای موجود در قالب با استفاده از یک روغن گریس با چگالی بالا پر شده تا فرار آب مخلوط در حین قالب‌گیری و آزمایش، به حداقل امکان برسد. سپس داخل قالب‌ها را یک لایه روغن قالب کشیده تا از چسبندگی بتن به آن جلوگیری گردد. بتن ساخته شده، در قالب‌ها جای داده شده و با استفاده از کوبه متراکم گردیده و سطح بتن توسط یک ماله‌ی فلزی صاف گردید. سپس دمای بتن توسط دماسنج تماسی الکترونیکی اندازه‌گیری و ثبت شده و از قرار گرفتن این دما در حدود مجاز اطمینان حاصل می‌شد. عملیات قالب‌گیری و ماله‌کشی برای هر شرایط محیطی آزمایش شده، یکسان بود تا از خطاهای احتمالی ناشی از انجام آزمایش جلوگیری به عمل آید. پس از قالب‌گیری، نمونه‌های بتن در محفظه‌ی شبیه‌ساز عوامل جوی قرار داده شده و آزمایش شروع می‌گردد. با توجه به این موضوع که روش ارزیابی ترک خوردگی خمیری مورد استفاده در این تحقیق (روش ارائه شده در استاندارد ASTM C1۵۷۹) به دلیل تکرار پذیری رفتار ترک خوردگی‌های به وجود آمده در نمونه در راستای افزایش میانی ترک در هر بار تکرار آزمایش، روشی



شکل ۴. ساخت نمونه و انجام آزمایش؛ (a) قالب آزمایش طبق استاندارد ASTM C1579، (b) ساخت نمونه، (c) قرار دادن نمونه در محفظه شبیه‌ساز شرایط جوی و شروع آزمایش

Fig. 4. Specimen fabrication and testing; (a) ASTM C1579 mold, (b) specimen fabrication, and (c) Placing the specimen in the environmental simulation chamber and starting the experiment

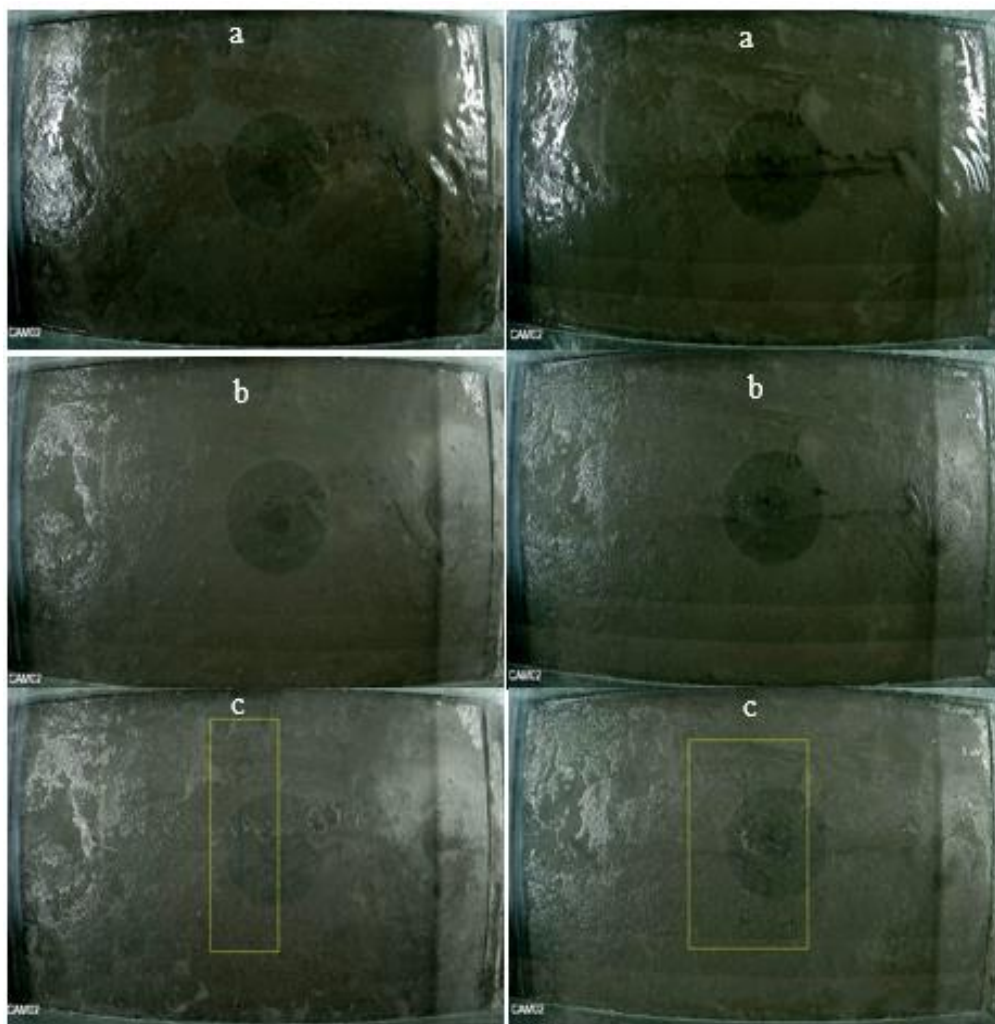
مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. جهت برداشت زمان تعادل نمونه‌ها، تصاویر گرفته شده در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از مشاهده‌ی کاهش شدید آب در سطح نمونه، فاصله‌ی بررسی تصاویر به ۱ دقیقه کاهش یافته و زمانی که آب در تمام سطح نمونه تبخیر شده و محو گردیده، به عنوان زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر نمونه، ثبت می‌گردد. تصاویر گرفته شده، به دفعات مکرر بازبینی شده و زمان تعادل تعیین می‌گردد. تصویر نمونه در زمان تعادل، با تصاویر نمونه بعد از این زمان و همچنین در زمان ترک‌خوردگی، جهت بررسی عدم وجود لایه‌ی آب در سطح نمونه نیز بررسی می‌شود. در شکل ۵، تصاویر دو نمونه آزمایش شده در دو شرایط محیطی مختلف در وضعیت آب‌اندازی، تعادل و ترک‌خوردگی، آورده شده است.

زمان اولین ترک یا ترک‌های قابل مشاهده، زمان شروع ترک‌خوردگی در نمونه بوده و جهت برداشت این زمان، تصاویر گرفته شده از زمان تعادل تا زمان بعد از ترک‌خوردگی، با فاصله‌ی زمانی ۴۰ ثانیه، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. پس از زمان تعادل، تصویر نمونه در سطح آن و در راستای افزایش‌دهی ترک با بزرگ‌نمایی به میزان مشخص ۱۰۰٪، به سه قسمت تقسیم شده، و هر قسمت، از نظر وجود ترک، بررسی می‌گردد. تصویری که در آن، ترک‌خوردگی یا ترک‌خوردگی‌هایی به وجود آمده و شروع به رشد طولی کند، به عنوان زمان شروع ترک‌خوردگی (زمان اولین ترک قابل مشاهده) ثبت می‌گردد. تصاویر محل ترک‌خوردگی به فاصله زمانی ۴۰ ثانیه

روش، معیار و مدنظر بوده است. با وجود این که در منابع علمی، بیشترین مقدار جمع‌شدگی خمیری در ۶ ساعت اولیه بیان شده است، اما با توجه به تنوع شرایط محیطی مختلف و اطمینان از ثبت اطلاعات جمع‌شدگی و ترک‌خوردگی به طور کامل، زمان آزمایش در این تحقیق، ۲۲ ساعت انتخاب گردید. در تمام این مدت از نمونه تصویربرداری شده و ترک ایجاد شده در نمونه مورد بررسی و کنترل قرار گرفت. تصاویر تهیه شده، جهت برداشت متغیرهای مورد نظر تحلیل و بررسی شد. در این تصاویر، خصوصیات زمانی شامل زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر، و زمان شروع ترک‌خوردگی با بررسی و تحلیل تصاویر گرفته شده، به دست می‌آید. پس از شروع آزمایش، نمونه شروع به آب‌انداختگی کرده و لایه‌ی آب در سطح بتن دیده شده و در زمان مشخصی، این لایه‌ی آب از سطح نمونه محو می‌شود. زمان حذف لایه‌ی آب از سطح بتن، به عنوان زمان تعادل (T_p) بر حسب دقیقه ثبت می‌شود. زمانی که اولین ترک یا ترک‌خوردگی‌های قابل مشاهده^۲ در سطح نمونه پدیدار شده و در جهت طولی و عرضی رشد کند، به عنوان زمان شروع ترک‌خوردگی (T_{sc}) بوده و بر حسب دقیقه ثبت می‌گردد.

تصاویر گرفته شده جهت افزایش بیشتر کیفیت تصاویر و تحلیل دقیق‌تر، در نرم‌افزار تحلیل تصویر ۵.۳.۵ Digimizer Version وارد شده و جهت ارزیابی زمان تعادل و زمان شروع اولین ترک(های) قابل مشاهده،

- 1 Time of balance
- 2 Time of first visible Cracks



شکل ۵. خصوصیات زمانی نمونه در حال آزمایش؛ (a) آب‌انداختگی نمونه (b) تعادل آب‌انداختگی و تبخیر در سطح نمونه (c) ترک‌خوردگی نمونه

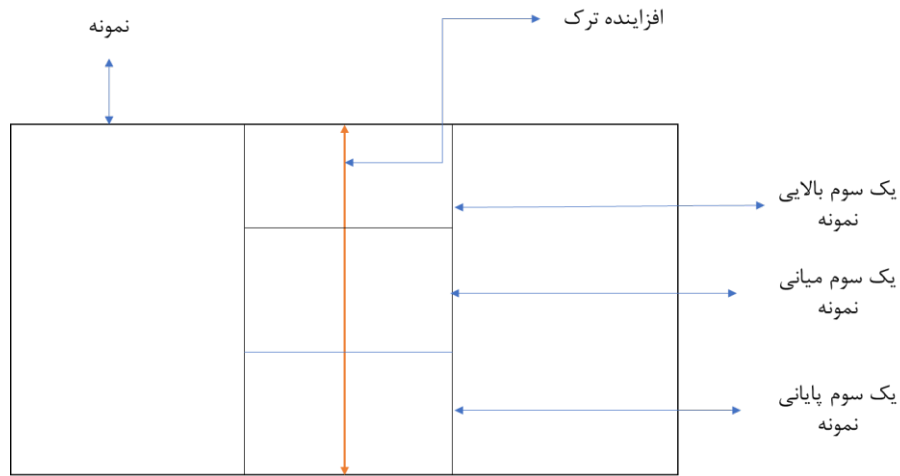
Fig. 5. Temporal characteristics of the specimen under testing; (a) bleeding of specimen, (b) balance of bleeding and evaporation in the specimen surface, and (c) cracking of specimen

۳- نتایج و بحث

در نتایج ارائه شده در این قسمت، هر عامل محیطی با علامت اختصاری که حرف اول آن می‌باشد، مشخص شده، بدین صورت که دمای محیطی با علامت T ، رطوبت نسبی هوا با علامت R و سرعت جریان باد با علامت W نامگذاری شده است. پس از این حروف، مقادیر هر یک از

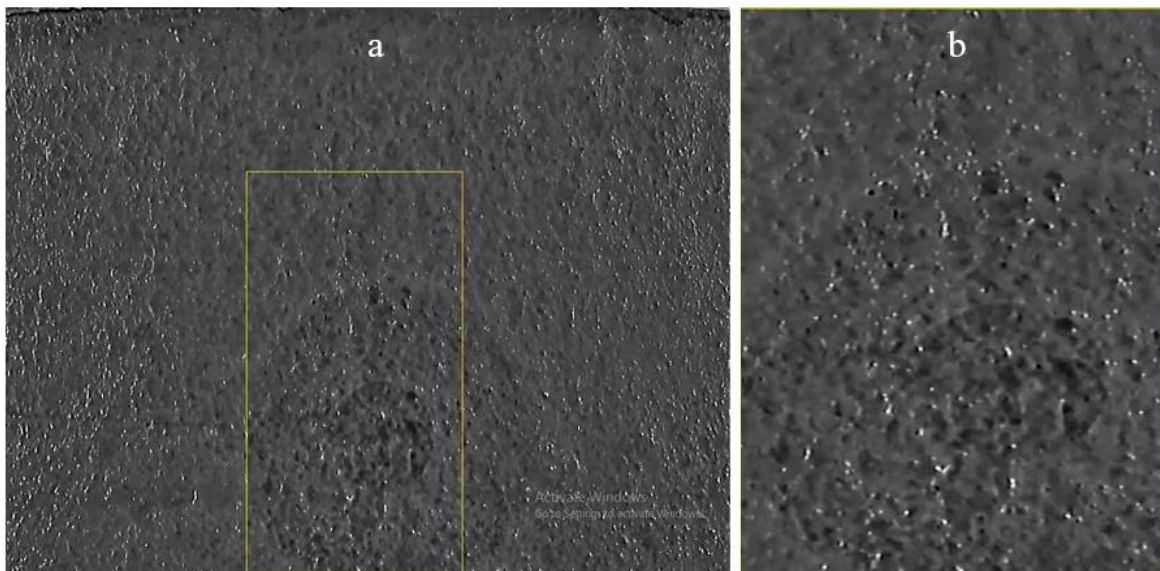
- 1 Temperature
- 2 Relative humidity
- 3 Wind speed

قبل ترک‌خوردگی و با بزرگ‌نمایی بیشتر در نرم‌افزار، مورد بازبینی مجدد قرار گرفته تا از نظر تعیین زمان ترک‌خوردگی، اطمینان حاصل شود. شکل ۶، تقسیم‌بندی تصاویر، جهت ارزیابی ترک‌خوردگی نمونه‌ها در نرم‌افزار تحلیل تصویر را نشان می‌دهد. در شکل ۷ و ۸، تصاویر بزرگ‌نمایی شده از محل ترک‌خوردگی نمونه در قسمت یک سوم بالایی نمونه در ۴۰ ثانیه قبل و در زمان ترک‌خوردگی را نشان می‌دهد.



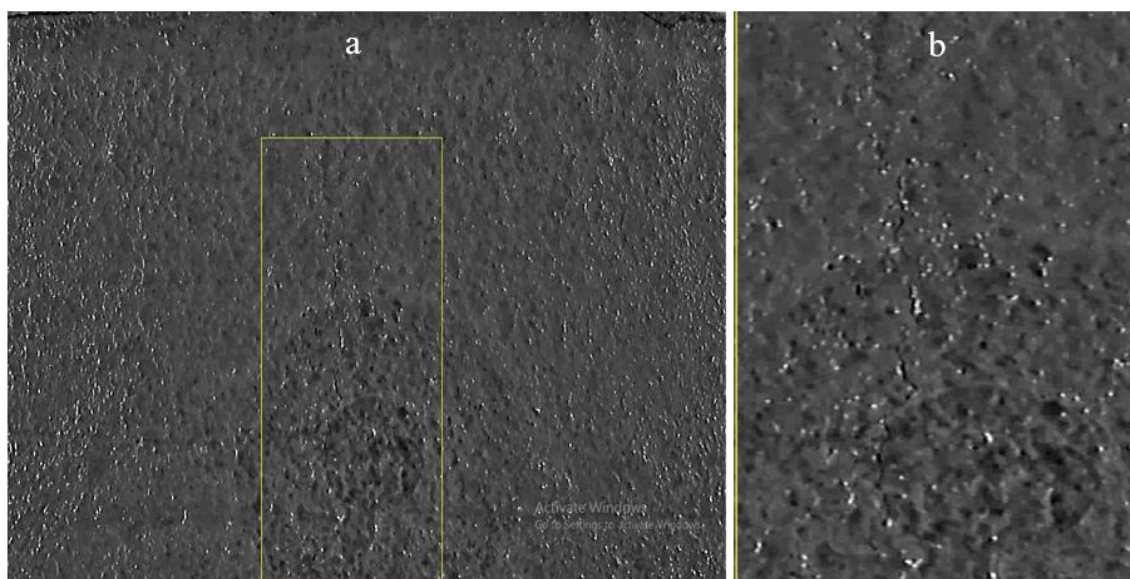
شکل ۶. تقسیمبندی تصویر سطح نمونه، جهت بررسی وجود ترک خوردگی در نرم افزار تحلیل تصویر

Fig. 6. Division of the image of the specimen surface to check for cracks in image analysis software



شکل ۷. تصویر محل ترک خوردگی نمونه، ۴۰ ثانیه قبل از وقوع ترک خوردگی؛ (a) تصویر بزرگ‌نمایی شده یک سوم بالایی نمونه، (b) تصویر بزرگ‌نمایی شده محل وقوع ترک خوردگی

Fig. 7. Image of the cracking spot in the specimen, 40 seconds before the occurrence of cracking; (a) the zoomed image of the upper third of the sample, (b) Zoomed image of the spot of cracking occurrence

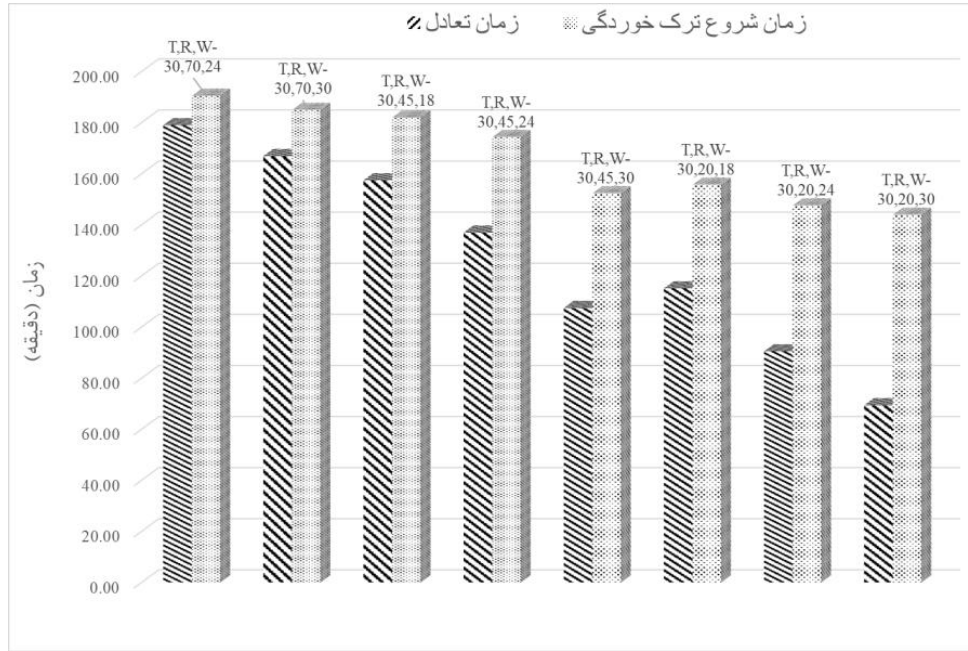


شکل ۸. تصویر محل ترک خوردگی نمونه، در زمان شروع اولین ترک‌های قابل مشاهده: (a) تصویر بزرگ‌نمایی شده یک سوم بالایی نمونه، (b) تصویر بزرگ‌نمایی شده محل وقوع ترک خوردگی

Fig. 8. Image of the cracking spot in the specimen, at the start of the first visible cracks; (a) the zoomed image of the upper third of the sample, (b) Zoomed image of the spot of cracking occurrence

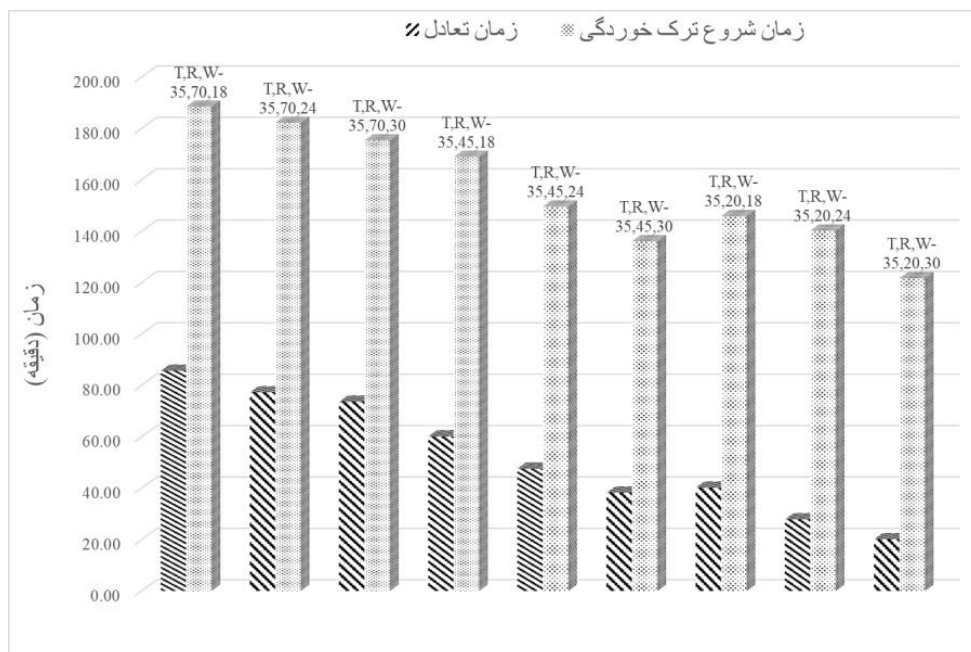
محیطی بدون ترک خوردگی معرفی می‌گردد. شکل‌های ۹ تا ۱۱، میزان زمان تعادل (T_b) و زمان شروع ترک خوردگی (T_{sc}) در ۲۶ حالت محیطی آزمایش شده را نشان می‌دهد. در این نمودارها با ثابت در نظر گرفتن عامل دمای محیطی و رطوبت نسبی هوا، دیده می‌شود که افزایش سرعت جریان باد در تمامی حالت‌ها، باعث شده است تا متغیرهای زمانی کاهش یابند. سرعت جریان باد باعث می‌شود تا ذرات آب معلق در هوا که حاصل از تبخیر آب سطحی بتن بوده، دور شود. با این عمل، مقدار رطوبت در این ناحیه کاهش یافته و اجازه می‌دهد تا مولکول‌های آب بیشتری گسسته شده و تبخیر شود. بنابراین با افزایش سرعت جریان باد، شدت تبخیر آب سطحی بتن افزایش یافته و به دنبال آن متغیرهای زمانی کاهش می‌یابند. مقادیر متوسط و حداکثر میزان کاهش نسبی متغیرهای زمانی در شرایط محیطی مختلف در اثر تغییر سرعت جریان باد از ۱۸ کیلومتر بر ساعت به ۳۰ کیلومتر بر ساعت، برای زمان تعادل ۳۷٪ و ۵۰٪ و زمان شروع ترک خوردگی به ترتیب به میزان ۱۵٪ و ۲۲٪ می‌باشد. تغییر سرعت جریان باد تأثیر بیشتری بر روی زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر نسبت به زمان شروع ترک خوردگی داشته است. افزایش سرعت جریان باد

شرایط محیطی به ترتیب قرار گرفتن علامت اختصاری آنان، آورده می‌شود. دمای محیطی بر حسب درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی هوا بر حسب درصد و سرعت جریان باد بر حسب کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس به عنوان نمونه شرایط $T, R, W-35, 45, 30$ معرف شرایط محیطی شامل دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۵ درصد و سرعت جریان باد ۳۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. همچنین، شرایط محیطی شامل $T, R, W-30, 70, 18$ ، شرایط محیطی است که در آن ترک خوردگی نمونه رخ نداده است. نرخ تبخیر محاسباتی این شرایط محیطی بر اساس رابطه‌ی ارائه شده در ACI ۳۰۵ [۴۴] نیز، خطر ترک خوردگی پایینی ایجاد می‌کند. عدم ترک خوردگی نمونه در این شرایط، با نتایج پژوهش داودی و همکاران [۳۸] که ترک خوردگی خمیری را در رطوبت‌های بالا مشاهده کردند، تفاوت دارد. علت این امر می‌تواند این موضوع باشد که در تحقیق آنان، اثر ترک خوردگی ناشی از نشست خمیری نیز وجود داشته و جمع‌شدگی خمیری، که متأثر از شرایط محیطی بوده، تنها عامل ترک خوردگی نبوده است. به جهت عدم تأثیرات غیرمعمول این حالت محیطی در نتایج و نمودارهای ارائه شده، این شرایط محیطی در نتایج و نمودارها وارد نشده و به عنوان شرایط



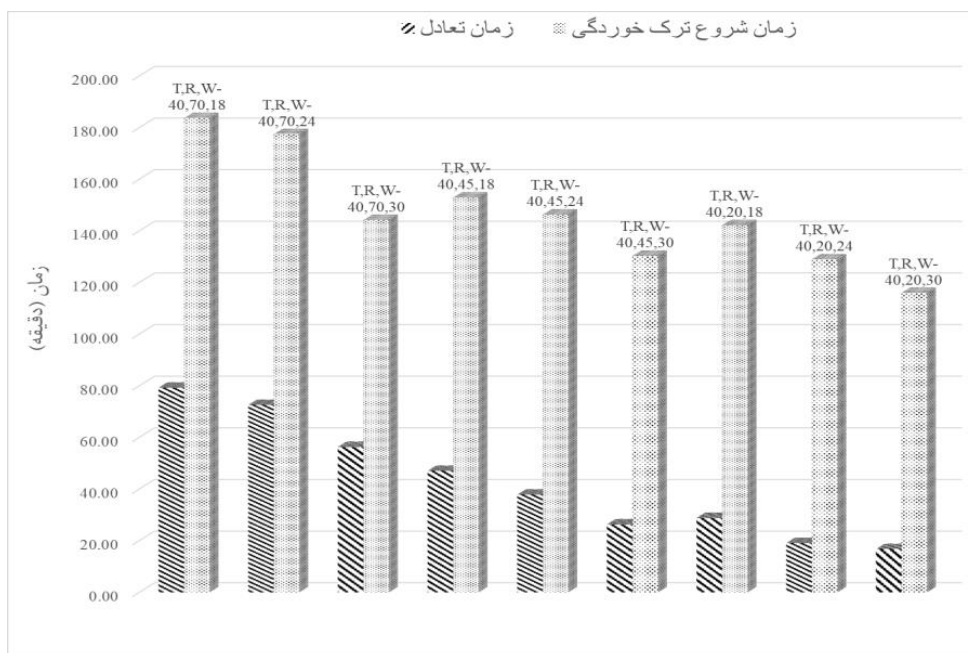
شکل ۹. مقدار خصوصیات زمانی نمونه‌های آزمایش شده در شرایط محیطی مختلف

Fig. 9. Values of temporal characteristics of tested specimens in different climate conditions



شکل ۱۰. مقدار خصوصیات زمانی نمونه‌های آزمایش شده در شرایط محیطی مختلف

Fig. 10. Values of temporal characteristics of tested specimens in different climate conditions



شکل ۱۱. مقدار خصوصیات زمانی نمونه‌های آزمایش شده در شرایط محیطی مختلف

Fig. 11. Values of temporal characteristics of tested specimens in different climate conditions

جریان باد به یک میزان مشخص (در اینجا به میزان ۶ کیلومتر بر ساعت) در سرعت جریان بادهای پایین تر تأثیر بیشتری بر زمان تعادل و زمان شروع ترک خوردگی نسبت به سرعت جریان بادهای بالاتر دارد. می‌توان این طور برداشت کرد که میزان تغییر زمان تعادل و زمان شروع ترک خوردگی در اثر تغییر سرعت جریان باد، دارای حد مشخصی است و پس از آن، با تغییر بیشتر سرعت جریان باد، این دو متغیر، تغییر بیشتری نمی‌کنند. با این حال، میزان تفاوت بین تغییر زمان تعادل و شروع ترک خوردگی در دو بازه‌ی تغییر سرعت ذکر شده، نزدیک به هم می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج دیده می‌شود که زمان تعادل تأثیر بیشتری نسبت به زمان شروع ترک خوردگی در هر دو بازه گرفته است که این موضوع تأکید دیگری بر تأثیر غالب سرعت جریان باد بر تبخیر آب روی سطح بتن می‌باشد.

با ثابت در نظر گرفتن عامل دمای محیطی و سرعت جریان باد در نمودار های شکل ۶ تا ۸، دیده می‌شود که کاهش رطوبت نسبی هوا در تمامی حالت‌ها، باعث شده است تا متغیرهای زمانی کاهش یابند. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که با کاهش رطوبت نسبی هوا از مقدار ۷۰٪ به ۲۰٪ در تمامی حالات، متغیرهای زمانی کاهش می‌یابند. مقدار رطوبت نسبی

باعث می‌شود تا آب قرار گرفته شده بر روی سطح بتن با سرعت بیشتری تبخیر شده و وارد محیط شود. تأثیر بیشتر سرعت جریان باد در کاهش زمان تعادل به این علت است که میزان تأثیر تغییر سرعت جریان باد در دوره‌ی آب‌انداختگی بیشتر از تأثیر آن در دوره‌ی خشک شدن می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت جریان باد بیشترین تأثیر را بر روی زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر داشته و تأثیر این تغییر متغیر محیطی بر زمان شروع ترک خوردگی کمتر می‌باشد.

مقدار متوسط میزان کاهش نسبی در زمان تعادل و زمان شروع ترک خوردگی در شرایط محیطی مختلف در اثر تغییر سرعت جریان باد از ۱۸ کیلومتر بر ساعت به ۲۴ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۲۴٪، ۹٪ و در اثر تغییر از ۲۴ کیلومتر بر ساعت به ۳۰ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۱۹٪ و ۸٪ می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش یا کاهش سرعت جریان باد به میزان ۶ کیلومتر بر ساعت باعث تغییر در متغیرهای زمانی شده است. تغییر زمان تعادل در اثر تغییر سرعت جریان باد از ۱۸ کیلومتر بر ساعت به ۲۴ کیلومتر بر ساعت بیشتر می‌باشد. با این وجود تفاوت این تغییرات نزدیک به هم است. این نتایج بیان می‌کند که میزان تأثیر تغییر سرعت

بیشتری داشته و سریع تر تبخیر می‌گردد. بنابراین دمای بیشتر محیط، باعث افزایش شدت تبخیر و به دنبال آن کاهش متغیرهای زمانی می‌گردد. میزان متوسط و حداکثر کاهش نسبی متغیرهای زمانی در شرایط محیطی مختلف ناشی از افزایش دما از ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای زمان تعادل به ترتیب ۳۹٪ و ۵۴٪ و برای زمان شروع ترک‌خوردگی به ترتیب ۱۵٪ و ۲۲٪ می‌باشد. این نتایج حاکی از آن است که تغییر دما از ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ۴۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر بیشتری بر زمان تعادل نسبت به زمان شروع ترک‌خوردگی دارد. افزایش دمای محیط باعث افزایش نرخ هیدراتاسیون سیمان می‌شود. به این علت، انتقال آب از داخل بتن به سطح آن سخت‌تر می‌شود. بنابراین آب کمتری به سطح نمونه منتقل می‌شود. از طرفی افزایش دمای محیط، نرخ شدت تبخیر سطحی در سطح بتن را افزایش داده و آب سطحی با نرخ بیشتری تبخیر شده و وارد محیط می‌شود. این دو موضوع باعث می‌شود تا تغییر دمای محیط تأثیر بیشتری بر زمان تعادل داشته و سطح بتن در مدت زمان کمتری وارد فاز خشک شدن بشود. به دنبال آن، زمان تشکیل فشارهای منفذی منفی در بتن کاهش یافته و همچنین مقدار جمع‌شدگی افقی با افزایش شدت نرخ تبخیر سطحی، افزایش می‌یابد. بنابراین، زمان ترک‌خوردگی با افزایش دمای محیط، کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده، دیده می‌شود که تأثیر تغییر دمای محیط بر روی زمان تعادل بیشتر از زمان شروع ترک‌خوردگی می‌باشد.

متوسط میزان کاهش نسبی زمان تعادل و زمان شروع ترک‌خوردگی در شرایط محیطی مختلف ناشی از افزایش دمای محیط از ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۲۲٪ و ۹٪ و ناشی از افزایش دما از ۳۵ درجه سانتی‌گراد به ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۲۳٪ و ۶٪ است. نتایج نشان می‌دهد که میزان تغییر متغیرهای زمانی به دلیل افزایش یا کاهش دما به میزان ۵ درجه سانتی‌گراد، به یک میزان بوده و اختلاف زیادی با یکدیگر ندارند. رفتار جمع‌شدگی بتن در اثر تغییر دمای محیط به مقدار مشخص (در اینجا ۵ درجه سانتی‌گراد) به طور نسبی یکسان می‌باشد. همچنین زمان تعادل در بازه‌های دمایی ذکر شده، دچار تغییر بیشتری نسبت به زمان شروع ترک‌خوردگی شده است.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده نتیجه می‌شود که:

۱. تغییر شرایط محیطی باعث تغییر در مقدار شدت نرخ تبخیر آب از سطح نمونه شده و خصوصیات زمانی ترک‌خوردگی

هوا، به مقدار آب موجود در هوا اشاره می‌کند. مقدار بیشتر رطوبت در هوا به معنای مقدار بیشتر آب در هوا می‌باشد. بنابراین با کاهش رطوبت محیط، شدت تبخیر آب سطحی افزایش یافته و متغیرهای زمانی کاهش می‌یابند. مقدار متوسط کاهش نسبی زمان تعادل و زمان شروع ترک‌خوردگی در شرایط محیطی مختلف ناشی از کاهش رطوبت نسبی هوا از ۷۰٪ به ۲۰٪، به ترتیب ۶۴٪ و ۲۴٪، و مقدار حداکثر این کاهش نسبی برای زمان تعادل و زمان شروع ترک‌خوردگی ۷۲٪ و ۴۹٪ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش رطوبت تأثیر بیشتری بر روی زمان تعادل نسبت به زمان شروع ترک‌خوردگی دارد. این مسأله بیانگر این موضوع می‌باشد که تغییر رطوبت نسبی هوا تأثیر بیشتری بر تغییر زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر نسبت به زمان شروع ترک‌خوردگی دارد. این تغییر بیشتر زمان تعادل نسبت به تغییر زمان شروع ترک‌خوردگی به دلیل تأثیر بیشتر تغییر رطوبت نسبی هوا در دوره‌ی آب‌انداختگی در سطح بتن نسبت به دوره‌ی خشک شدن آن دارد. با توجه به این نتایج دیده می‌شود که با کاهش رطوبت نسبی هوا، سرعت تبخیر آب قرار گرفته بر روی سطح بتن بیشتر شده و سطح بتن در مدت زمان کمتری از فاز آب‌انداختگی به فاز خشک شدن وارد می‌شود. بدین ترتیب، کاهش رطوبت نسبی هوا، باعث کاهش زمان ترک‌خوردگی در سطح بتن می‌گردد. میزان متوسط کاهش نسبی متغیرهای زمانی در شرایط محیطی مختلف ناشی از تغییر رطوبت نسبی هوا از ۷۰٪ به ۴۵٪ برای زمان تعادل و زمان شروع ترک‌خوردگی به ترتیب ۴۳٪ و ۱۸٪، و ناشی از تغییر رطوبت نسبی هوا از ۴۵٪ به ۲۰٪ برای زمان تعادل و زمان شروع ترک‌خوردگی به ترتیب ۳۸٪ و ۱۲٪ می‌باشد. همان‌طور که از نتایج پیدا است تغییر رطوبت نسبی هوا از ۷۰٪ به ۴۵٪ تأثیر بیشتری بر متغیرهای زمانی دارد. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر هر یک از متغیرهای زمانی در اثر تغییر رطوبت نسبی هوا به یک مقدار مشخص (در اینجا به میزان ۲۵ درصد) در مقدار رطوبت‌های بالای محیط، تأثیر بیشتری بر رفتار جمع‌شدگی بتن دارد. با این حال، میزان تغییر متغیرهای زمانی در هر دو بازه‌ی تغییر رطوبت نسبی هوا بسیار نزدیک به هم می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو بازه‌ی رطوبت نسبی هوای ذکر شده، زمان تعادل تأثیر بیشتری نسبت به زمان ترک‌خوردگی پذیرفته است.

با ثابت در نظر گرفتن عامل رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد در نمودارهای ۶ تا ۸، دیده می‌شود که افزایش دمای محیط، باعث کاهش متغیرهای زمانی شده است. دمای محیط بر سرعت حرکت مولکول‌های آب تأثیر می‌گذارد. یک مولکول هوا که سریع حرکت می‌کند، احتمال گسستگی

در اولین فرصت ممکن، از روش‌های مناسب عمل‌آوری، مانند استفاده از مواد عمل‌آوری، پهن کردن گونی چتایی و پاشیدن مداوم آب بر روی این گونی‌ها، استفاده کرد. بنابراین نیاز است با استفاده از نیروی کار ماهر و ماشین‌آلات مناسب و برنامه‌ریزی دقیق در احداث جاده، زمان امکان انجام عمل‌آوری روسازی کاهش یابد. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ تبخیر ناشی از تغییر شرایط محیطی، زمان تعادل کاهش یافته و به دنبال آن زمان شروع ترک‌خوردگی نیز کاهش می‌یابد. با توجه به این که پس از این زمان، سطح روسازی مستعد ترک‌خوردگی است، بنابراین زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر در سطح روسازی‌های بتنی می‌تواند معیاری مناسب برای پیش‌بینی خطر ترک‌خوردگی خمیری در شرایط محیطی مختلف و همچنین بررسی تأثیرات تغییر هر یک از عوامل محیطی بر این ترک‌خوردگی باشد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

T_b	زمان تعادل
T_{sc}	زمان شروع ترک‌خوردگی
T	دما ی محیط
R	رطوبت نسبی هوا
W	سرعت جریان باد

منابع

- [1] Nobili, L. Lanzoni, A.M. Tarantino, Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 888-895.
- [2] 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)
- [3] Y.H. Huang, Pavement analysis and design, 2004.
- [4] N.J. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance, CRC Press, 2014.
- [5] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, M. Plamondon, P. Lura, On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials, *Cement and Concrete*

ناشی از جمع‌شدگی خمیری را دستخوش تغییر می‌کند. هر یک از عوامل محیطی بررسی شده شامل دمای محیط، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد، میزان تأثیر متفاوتی بر خصوصیات زمانی ترک‌خوردگی خمیری دارند.

۲. با تغییر عوامل محیطی، میزان تغییر خصوصیات زمانی با یکدیگر متفاوت می‌باشد. مشاهده شد که تغییر شرایط محیطی تأثیر بیشتری بر روی زمان تعادل آب‌انداختگی و تبخیر نسبت به زمان شروع ترک‌خوردگی دارد. بنابراین تأثیر شرایط محیطی بر فاز آب‌انداختگی بیشتر از فاز خشک شدن در سطح بتن می‌باشد.

۳. در بین عوامل محیطی بررسی شده دیده شد که تغییر رطوبت نسبی هوا، بیشترین تأثیر را بر خصوصیات زمانی ترک‌خوردگی خمیری دارد.

۴. میزان تأثیر دمای محیطی و سرعت جریان باد بر روی خصوصیات زمانی جمع‌شدگی خمیری، تقریباً به یک میزان بود. این موضوع، نزدیکی تأثیرات این دو عامل بر خصوصیات ترک‌خوردگی خمیری را بیان می‌کند.

۵. میزان تغییر خصوصیات زمانی جمع‌شدگی خمیری در بازه‌های تغییر هر یک از عوامل محیطی، نشان داد که در هر بازه‌ی تغییر، زمان تعادل تأثیر بیشتری نسبت به زمان شروع ترک‌خوردگی پذیرفته است. جهت بررسی بهتر رفتار تغییرات این دو متغیر در هر بازه، نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد.

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که تغییر شرایط محیطی، بیشترین تأثیر را بر زمان تعادل داشته و نیاز است جهت کنترل و کاهش ترک‌خوردگی خمیری، از کاهش شدید این زمان در روسازی جلوگیری کرد. با توجه به نتایج، رطوبت نسبی هوا بیشترین تأثیر را بر خصوصیات زمانی داشته و کنترل این عامل، از اهمیت نسبی بیشتری برخوردار است. پاشش مه آب^۱ در نزدیکی سطح روسازی، باعث کاهش تبخیر آب در سطح شده و به حفظ رطوبت کمک می‌کند. همچنین با نصب سایه‌بان در کنار روسازی، می‌توان از افزایش دمای سطحی روسازی ناشی از تابش خورشید جلوگیری کرد. در مناطق پر باد، استفاده از بادشکن راه‌حل دیگری جهت کنترل تبخیر آب از سطح روسازی به دلیل وزش باد می‌باشد. استفاده از رویکردهایی مانند تغییر زمان ساخت روسازی، باعث کنترل همزمان دو یا سه عامل محیطی (مانند دمای پایین تر و رطوبت نسبی هوای بالاتر در شب نسبت به ظهر) شده و راه‌حل مؤثرتری می‌باشد. این روش‌ها، قبل از زمانی است که امکان عمل‌آوری روسازی فراهم باشد. جهت جلوگیری از کاهش زمان تعادل و افزایش زمان شروع جمع‌شدگی در روسازی‌های بتنی، نیاز است

1 Water fog spray

- of early ages., *New Approaches in Civil Engineering*, 3(2) (2019). (in Persian)
- [15] 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.
- [16] Bertelsen, L. Ottosen, G. Fischer, Quantitative analysis of the influence of synthetic fibres on plastic shrinkage cracking using digital image correlation, *Construction and Building Materials*, 199 (2019) 124-137.
- [17] A.Z. Bendimerad, E. Rozière, A. Loukili, Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete, *Construction and Building Materials*, 121 (2016) 733-745.
- [18] 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.
- [19] Juarez, G. Fajardo, S. Monroy, A. Duran-Herrera, P. Valdez, C. Magniont, Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite, *Construction and Building Materials*, 91 (2015) 164-170.
- [20] R. Combrinck, W.P. Boshoff, Typical plastic shrinkage cracking behavior of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 65(8) (2013) 486-493.
- [21] W.P. Boshoff, R. Combrinck, Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete, *Cement and Concrete Research*, 48 (2013) 34-39.
- [22] A.A.S. Javid, Mechanisms and strategies to increase the durability of concrete against plastic settlement, plastic shrinkage and drying cracking, in: *First National Conference on Concrete Durability*, Tehran, Iran, 2018. (in Persian)
- [23] F. Mazaree Dezfoli, M. Khodadad Saryazdi, M. Yazdian, Investigation of the effect of polypropylene fibers and lightweight Leica on concrete plastic shrinkage cracking, in: *International Conference on Structural Research*, 115 (2019) 251-263.
- [6] P. Nazemi, H. Molaie Moghadam, M. Khodadad Saryazdi, A review of the study of early cracks in young concrete and methods of removing or reducing it, in: *First National Conference of Civil Engineering, Architecture and Sustainable Development*, Yazd, Iran, 2014. (in Persian)
- [7] F. Pelisser, A.B.d.S.S. Neto, H.L. La Rovere, R.C. de Andrade Pinto, Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking, *Construction and building materials*, 24(11) (2010) 2171-2176.
- [8] J. Mora-Ruacho, R. Gettu, A. Aguado, Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete, *Cement and Concrete Research*, 39(3) (2009) 141-146.
- [9] A. Sivakumar, M. Santhanam, A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete, *Cement and concrete composites*, 29(7) (2007) 575-581.
- [10] P. Lura, B. Pease, G.B. Mazzotta, F. Rajabipour, J. Weiss, Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks, *ACI Materials Journal*, 104(2) (2007) 187.
- [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] 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.
- [13] G.S. Islam, S.D. Gupta, Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2) (2016) 345-354.
- [14] 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

- correlation to evaluate plastic shrinkage cracking in cement-based materials, *Construction and Building Materials*, 182 (2018) 108-117.
- [35] M. Nasir, O.S.B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot weather, *Construction and Building Materials*, 152 (2017) 943-953.
- [36] P. Turcry, A. Loukili, Evaluation of Plastic shrinkage Cracking of self-compacting concrete, (2006).
- [37] H.-G. Kwak, S.-J. Ha, Plastic shrinkage cracking in concrete slabs. Part I: a numerical model, *Magazine of Concrete Research*, 58(8) (2006) 505-516.
- [38] M.R. Davodi, M. Sayad Asgharian, H. Dadras, A.R. durrani, Investigation of the cause of plastic shrinkage and settlement in fresh concrete in high relative humidity environmental conditions (Case study in Bandar Anzali), in: 2nd National Conference on Structure, Geotechnics and Earthquake, Mazandaran, Iran, 2012. (in Persian)
- [39] 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.
- [40] H.-G. Kwak, S.-J. Ha, Plastic shrinkage cracking in concrete slabs. Part II: numerical experiment and prediction of occurrence, *Magazine of Concrete Research*, 58(8) (2006) 517-532.
- [41] ASTM, 1579, Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert), (2006).
- [42] ASTM C33, Standard specification for concrete aggregates, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, (2003).
- [43] 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.
- Engineering, Tehran, Iran, 2018. (in Persian)
- [24] W. Dias, Influence of mix and environment on plastic shrinkage cracking, *Magazine of concrete research*, 55(4) (2003) 385-394.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] K. Yang, M. Zhong, B. Magee, C. Yang, C. Wang, X. Zhu, Z. Zhang, Investigation of effects of Portland cement fineness and alkali content on concrete plastic shrinkage cracking, *Construction and Building Materials*, 144 (2017) 279-290.
- [28] F. Matalkah, Y. Jaradat, P. Soroushian, Plastic shrinkage cracking and bleeding of concrete prepared with alkali activated cement, *Heliyon*, 5(4) (2019) e01514.
- [29] 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.
- [30] R. Combrinck, L. Steyl, W.P. Boshoff, Interaction between settlement and shrinkage cracking in plastic concrete, *Construction and Building Materials*, 185 (2018) 1-11.
- [31] M. Kayondo, R. Combrinck, W. Boshoff, State-of-the-art review on plastic cracking of concrete, *Construction and Building Materials*, 225 (2019) 886-899.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] P. Zhao, A.M. Zsaki, M.R. Nokken, Using digital image

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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Ziari, S. J. Vaziri Kang Olyaei, H. Fazaeli, Investigation of the Effect of Different Climate Conditions on the Temporal Characteristic of Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Pavements, Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 4857-4874.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18580.6904](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18580.6904)



