



بررسی اثر شرایط محیطی مختلف بر زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر در جمع شدگی خمیری روسازی‌های بتنی

حسن زیاری^۱، سید جواد وزیری کنگ علیائی^۱، حسن فضائلی^{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: ۱۳۹۹/۰۴/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

کلمات کلیدی:

جمع شدگی خمیری
روسازی بتنی
زمان تعادل
شدت ترک خوردگی
شرایط محیطی مختلف

خلاصه: یکی از عوامل ایجاد ترک‌های زود هنگام در روسازی‌های بتنی، جمع شدگی خمیری می‌باشد. این جمع شدگی پس از تعادل نرخ آب انداختگی و تبخیر و تشکیل فشارهای مویبندی منفی در سطح روسازی اتفاق می‌افتد. شرایط محیطی مختلف باعث تغییر در نرخ تبخیر شده و در نتیجه زمان تعادل و به دنبال آن شدت ترک خوردگی را نیز دست خوش تغییر می‌کند. در این تحقیق، با استفاده از روش استاندارد ASTM C ۱۵۷۹، به بررسی ارتباط بین زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر و مساحت ترک خوردگی در بتن در ۲۷ شرایط محیطی مختلف، شامل ترکیبی از سه دمای محیط، سه سرعت جریان باد و سه رطوبت نسبی هوا، با استفاده از سیستم تصویربرداری پیوسته و تحلیل تصاویر دیجیتال پرداخته می‌شود. نتایج تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که بین زمان تعادل و مساحت خوردگی، ارتباط معناداری وجود دارد. با کاهش زمان تعادل به مقدار ۶۹ دقیقه، مساحت ترک خوردگی به بیش از ۴ برابر افزایش یافت. دیده شده که ترکیب هر سه عامل محیطی تأثیر بیشتری نسبت به بحرانی بودن تنها یک عامل، بر شدت ترک خوردگی دارد. همچنین رطوبت نسبی هوا بیشترین اثر را بر زمان تعادل و شدت ترک خوردگی داشته، و اثر دمای محیطی و سرعت جریان باد نزدیک به هم می‌باشد. با توجه به نتایج، بیان شد که زمان تعادل می‌تواند به عنوان معیاری مناسب جهت بررسی اثر شرایط محیطی مختلف بر شدت ترک خوردگی خمیری در روسازی‌های بتنی، مورد استفاده قرار گیرد.

۱- مقدمه

یا با تعمیر و نگهداری اندک، خدمت‌دهی کنند [۳ و ۲]. از عوامل کاهش دوام این روسازی‌ها، وجود ترک در دال روسازی بوده که باعث خوردگی میلگردها و کاهش سطح سرویس‌دهی جاده می‌گردد. جمع شدگی خمیری، یکی از عوامل ایجاد ترک در سازه‌های بتنی مسطح، مانند روسازی‌ها می‌باشد. این جمع شدگی به دلیل خشک شدن سریع سطح روسازی ناشی از شدت تبخیر بالا در سطح دال، رخ می‌دهد. پس از آن، به دلیل وجود قیود مختلف در سازه، مانند میلگردهای مسلح کننده، لایه‌ی اساس دانه‌ای و تثبیت شده، تنش‌های کششی سطحی شکل گرفته و در صورت تجاوز این تنش‌ها از مقاومت کششی بتن در سنین اولیه، ترک خوردگی رخ می‌دهد [۴]. بیشتر ترک‌های به وجود آمده در سنین اولیه در روسازی، مربوط به این نوع ترک خوردگی می‌باشد [۹-۵]. این نوع خرابی در روسازی‌های بتنی، باعث کاهش زیبایی جاده شده و همچنین محلی برای ورود آب و مواد خورنده مانند اسید، به داخل روسازی می‌باشد که در نهایت باعث کاهش دوام و سطح سرویس جاده در بلند مدت می‌گردد. این موضوع، اهمیت شناخت بیشتر این نوع ترک خوردگی و عوامل موثر بر آن را در روسازی‌های بتنی بیان می‌کند.

روسازی‌ها به سه دسته کلی آسفالتی، بتنی و مرکب تقسیم بندی می‌شود. در ایران با توجه به وجود منابع زیاد و ارزان قیمت نفتی در سال‌های اخیر، بیشتر از روسازی‌های آسفالتی جهت ساخت راه‌ها و سطوح پروازی استفاده می‌شود. نیاز به تعمیر و نگهداری بیشتر، انسداد راه‌های در دست تعمیر، عمر کوتاه‌تر روسازی‌های آسفالتی از یک طرف و افزایش قیمت قیر و تولید مازاد سیمان در داخل کشور از طرف دیگر، همواره محققان و دست اندرکاران کشور در زمینه روسازی را به استفاده از روسازی‌های بتن سیمانی ترغیب کرده است [۱]. این روسازی‌ها از یک دال بتنی به صورت مسلح و غیرمسلح تشکیل شده است که می‌تواند به صورت مستقیم بر روی خاک بستر و یا اساس قرار گیرد. روسازی‌های بتنی برای ساخت بزرگراه‌ها، فرودگاه‌ها، خیابان‌ها، راه‌های محلی، کاربردهای صنعتی و دیگر زیر ساخت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در صورت طراحی مناسب و ساخت با مصالح با دوام، این روسازی‌ها می‌توانند بدون تعمیر و نگهداری و

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



بوده است [۲۳-۲۵]. کواک و ها^۱ به بررسی پیش‌بینی وقوع ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در دال‌های بتنی در شرایط محیطی مختلف با استفاده از تعادل بین نرخ آب انداختگی و تبخیر پرداختند و نتیجه گرفتند که با استفاده از مدل‌های عددی می‌توان زمان وقوع ترک خوردگی را پیش‌بینی کرد [۲۶]. تورکرای و لاکیلی^۲ به بررسی اثر سرعت جریان باد بر ترک خوردگی خمیری در بتن‌های خود تراکم پرداخته و نتیجه گرفتند که سرعت جریان باد باعث افزایش نرخ تبخیر و جمع شدگی در بتن می‌گردد [۲۷]. زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر، جهت پیش‌بینی وقوع ترک خوردگی نیز حائز اهمیت می‌باشد. پس از این زمان، لایه‌ی آب در سطح بتن حذف شده و بتن مستعد ترک خوردگی خمیری است، که در صورت انجام اقدامات پیشگیری مانند پاشش ماده عمل‌آوری، می‌توان شدت این نوع ترک خوردگی‌ها را کنترل کرد. کواک و ها به ارائه‌ی یک مدل رگرسیونی جهت تخمین زمان خشک شدن (زمان تعادل بین آب انداختگی و تبخیر) در شرایط محیطی مختلف در مخلوط بتنی پرداخته و از آن جهت پیش‌بینی وقوع ترک خوردگی استفاده کردند [۲۸]. هم‌بنطور بر مبنای ارتباط این شرایط محیطی با فاکتورهای شدت ترک خوردگی، مطالعاتی نیز انجام شده است. سنتیلکومار و ناتسان^۳ درصد مساحت کل ترک خوردگی خمیری در شرایط محیطی مختلف را با استفاده از یک مدل رگرسیونی چند متغیره پیش‌بینی کردند [۲۹]. تاثیر هر یک از عوامل محیطی بر فازهای مختلف جمع شدگی خمیری و اندرکنش آنان با شدت ترک خوردگی هم مورد توجه واقع شده و سعی در فهم بیشتر این اندرکنش بوده است. یاکوبی و همکاران^۴ 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 سریع‌تر نرخ آب انداختگی و تبخیر بیان شده است [۳۰]. با بررسی پیشینه‌ی پژوهش، دیده می‌شود که با توجه به تغییر شرایط محیطی در محل ساخت روسازی، زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر تغییر کرده و می‌تواند باعث تغییر در جمع شدگی خمیری گردد. این موضوع شدت ترک خوردگی را نیز دست‌خوش تغییر می‌کند. با توجه به این مطالعات، دیده می‌شود که بین زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر و شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، ارتباطاتی وجود داشته، اما این ارتباط به طور عمیق و همچنین در شرایط محیطی مختلف، بررسی نشده است.

ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری در روسازی‌های

ساز و کار ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بر مبنای تشکیل فشارهای مویبندی منفی در روسازی می‌باشد. این فشارها پس از خشک شدن سطح روسازی صورت می‌گیرد [۱۰-۱۲]. روسازی‌های بتنی، پس ساخت، وارد فاز آب انداختگی می‌شوند. به دلیل نیروی جاذبه و اختلاف وزن مصالح تشکیل دهنده‌ی بتن، عمل خودتراکمی صورت گرفته و آب مخلوط از طریق منافذ داخل آن به سطح بتن منتقل می‌شود [۱۳]. این فرآیند باعث نشست خمیری در بتن شده که وجود عواملی مانند میلگردهای مسلح کننده و تغییر ناگهانی مقطع در ارتفاع، می‌تواند باعث ترک خوردگی ناشی از نشست خمیری گردد. آب قرار گرفته بر روی سطح، متاثر از شرایط محیطی، تبخیر شده و پس از گذشت زمانی، تعادل آب انداختگی و تبخیر در روسازی صورت گرفته و لایه‌ی آب از سطح آن محو می‌گردد. در وضعیت تعادل، آب حاصل از آب انداختگی بتن به دلیل فرآیند تبخیر، حذف شده و آبی در سطح دال دیده نمی‌شود. در این زمان که زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر بوده، فاز خشک شدن بتن شروع شده و فشارهای مویبندی تشکیل می‌گردد که عامل ایجاد ترک خوردگی خمیری است [۱۵ و ۱۴]. نرخ آب انداختگی در بتن تابع عواملی مانند مقدار و نوع سیمان [۱۷ و ۱۶]، نرمی سیمان [۱۹ و ۱۸]، اندازه‌ی سنگدانه [۲۰] و ارتفاع دال بتنی [۲۲ و ۲۱] می‌باشد. در حالتی که مشخصات طرح مخلوط و هندسه‌ی سازه ثابت باشد، نرخ تبخیر آب از سطح بتن، متاثر از عوامل محیطی است. آب قرار گرفته بر روی سطح، با نرخی که وابسته به این عوامل محیطی است، تبخیر شده و پس از گذشت زمانی، نرخ آب انداختگی و تبخیر برابر شده و به تعادل می‌رسند. شرایط محیطی سخت‌تر، باعث کاهش زمان تعادل این دو نرخ شده و بتن، جمع شدگی خمیری را زودتر تجربه می‌کند. با تغییر شرایط محیطی، زمان تعادل و به دنبال آن زمان شروع فشارهای مویبندی منفی در سطح بتن تغییر کرده که باعث تغییر در شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری می‌گردد. بنابراین تغییرات شرایط محیطی بر روی زمان تعادل و به دنبال آن شدت ترک خوردگی تاثیر می‌گذارد. این موضوع باعث می‌شود تا این زمان جهت پیش‌بینی شدت ترک خوردگی، از اهمیت بالایی برخوردار بوده و سعی در بررسی بیشتر اثر عوامل محیطی بر آن شود.

بررسی تاثیر عوامل محیطی بر زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر، و شدت ترک خوردگی خمیری مورد توجه و بررسی محققان

- 1 Kwak and Ha
- 2 Turcry and Loukili
- 3 Senthilkumar and Natesan
- 4 Yakoubi et al.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱

Table 1. Chemical and physical specifications of cement type 1-425

K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۰/۴۵	۰/۵	۲/۰	۲/۷	۶۳/۵	۳/۸	۴/۵	۲۰/۹	سیمان (%)
-	-	۳>	۵>	-	۶>	۶>	>۲۰	الزامات استاندارد ایران (۳۸۹)

بین عوامل محیطی و مساحت ترک خوردگی ارائه می‌گردد.

۲- مصالح و روش‌ها

در این تحقیق، ابتدا خصوصیات مکانیکی مخلوط بتنی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی، تعیین می‌شود. سپس جهت ارزیابی ارتباط بین زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر و شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، از مفاهیم ارائه شده در روش ASTM C1579 و محفظه‌ی شبیه‌سازی عوامل جوی استفاده می‌شود. در این بخش ابتدا، مشخصات مصالح مصرفی و طرح مخلوط بتنی توضیح داده شده و سپس روش‌های آزمایش‌های انجام شده شرح داده می‌شود.

۲-۱- مصالح مصرفی

مصالح مصرفی جهت ساخت مخلوط بتنی در این تحقیق، شامل سیمان، سنگدانه و آب می‌باشد که مشخصات آنان در ادامه آورده شده است.

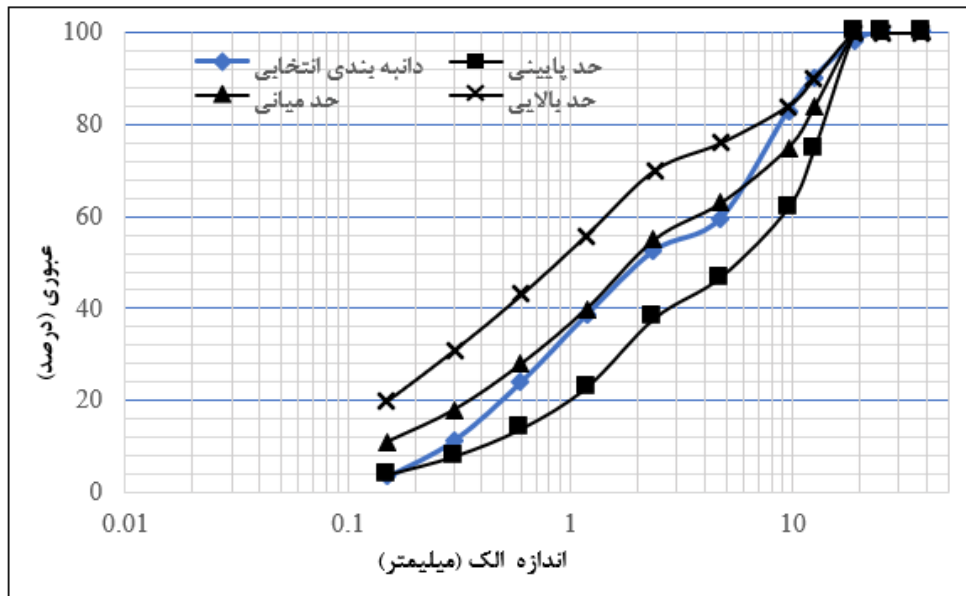
۲-۱-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان شرق مشهد می‌باشد که دارای جرم حجمی ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. نتایج تحلیل شیمیایی سیمان، در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۲- مصالح سنگی

در ساخت مخلوط بتنی از سنگدانه‌های شکسته آهکی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر (۴/۳") برای سنگدانه‌های درشت و ۵ میلی‌متر (No.۴) برای سنگدانه‌های ریز مطابق با استاندارد ASTM C33، استفاده شد. مدول نرمی و چگالی مخصوص سنگدانه‌های ریز به ترتیب ۸۸/۲ و ۵۴/۲ بوده و سنگدانه‌های درشت دارای چگالی مخصوص ۶۸/۲ بودند. دانه‌بندی ترکیبی سنگدانه در طرح مخلوط بتن، با توجه به حدود مشخص شده توسط ضابطه‌ی

بتنی، بر دوام این روسازی‌ها در بلند مدت تاثیر منفی داشته و می‌تواند زمینه را برای شکست سازه ایجاد کند. با توجه به سطح وسیع این روسازی‌ها، قرار گرفتن آنان در شرایط محیطی مختلف و تغییر شرایط محیطی محل ساخت روسازی، این نوع خرابی در روسازی‌های بتنی بیشتر مورد توجه می‌باشد. همچنین روش‌های عمل آوری مورد استفاده و زمان مناسب این عمل آوری، بر روی تعادل آب انداختگی و تبخیر و به دنبال آن بر شدت ترک خوردگی‌های به وجود آمده در سطح روسازی موثر است. بنابراین نیاز است تا تاثیر هر یک از عوامل محیطی بر روی زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر و شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری بررسی شده و ارتباط بین این متغیر زمانی با شدت ترک خوردگی مشخص گردد. این مسئله می‌تواند در درک بهتر این نوع خرابی در روسازی‌های بتنی در شرایط محیطی مختلف و همچنین کنترل و کاهش آن، کمک شایانی کند. با وجود این که تحقیقاتی جهت بررسی ارتباط عوامل محیطی با زمان تعادل و شدت ترک خوردگی خمیری در بتن انجام شده، اما مشاهده می‌شود که بررسی اثرات عوامل محیطی در طیف وسیع بر ارتباط زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر با شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری، کمتر مورد توجه بوده است. از این جهت، تحقیق حاضر، به بررسی تاثیر شرایط محیطی مختلف بر ارتباط بین زمان آب انداختگی و تبخیر و شدت ترک خوردگی‌های خمیری در بتن در شرایط محیطی مختلف پرداخته و سعی بر بررسی عمیق‌تر این دو متغیر دارد. بدین جهت، پس از تعیین خصوصیات مکانیکی مخلوط بتنی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی، آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری جهت ارزیابی ارتباط بین زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر و شدت ترک خوردگی‌های خمیری در شرایط محیطی مختلف انجام شده و سپس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، تحلیل و تفسیر می‌گردد. همچنین اثر هر یک از عوامل محیطی شامل دمای محیطی، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد بر شدت ترک خوردگی، بیشتر بررسی شده، و در انتها یک مدل رگرسیون خطی چند متغیره



شکل ۱. حدود دانه بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی

Fig. 1. Allowed and selected gradation of aggregates

جدول ۲. حدود مشخصات طرح مخلوط بتن مورد استفاده در روسازی بر اساس ضابطه ۷۳۱

Table 2. Specifications of concrete mix design used in pavement according to manual No. 731

مقدار	معیار
حداقل ۳۰ مگاپاسکال	مقاومت فشاری (نمونه استوانه‌ای)
حداقل ۴ مگاپاسکال	مقاومت خمشی (به روش تیر ساده با بارگذاری در یک سوم دهانه)
۱۰ تا ۷۰ میلی‌متر	اسلامپ
حداقل ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب	عیار سیمان
حداکثر ۰/۵۳	نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)

۲-۲- طرح مخلوط

طرح مخلوط بتن در این تحقیق بر اساس ضوابط طرح مخلوط ارائه شده در ضابطه‌ی ۷۳۱، طرح گردیده و از حدود و مشخصات آن پیروی می‌کند. در این ضابطه، حداقل مشخصات بتن مورد استفاده در ساخت روسازی‌های بتنی مشخص شده که برخی از این مشخصات در جدول ۲ دیده می‌شود. به جهت افزایش ظرفیت ترک خوردگی آزمون‌ها، مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان مخلوط به ترتیب به میزان ۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۵

۷۳۱، دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها [۱]، و روش ملی طرح مخلوط بتنی، مطابق شکل ۱ می‌باشد.

۲-۱-۳- آب

آب مصرفی در ساخت مخلوط بتنی، آب آشامیدنی از سیستم لوله کشی آزمایشگاه می‌باشد.

جدول ۳. نسبت های وزنی مخلوط بتنی مورد استفاده

Table 3. Materials constituents for mix design of used concrete

مصلح	نوع مصلح	مقدار (kg/m ³)
سیمان	پرتلند تیپ ۱-۴۲۵	۴۶۰
مصلح سنگی ریز	۵-۰ میلی متر	۹۲۸
مصلح سنگی درشت	۵-۱۲ میلی متر	۴۰۳
مصلح سنگی درشت	۱۲-۱۹ میلی متر	۲۴۵
آب	آب آشامیدنی	۲۳۰

۲-۴- آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری

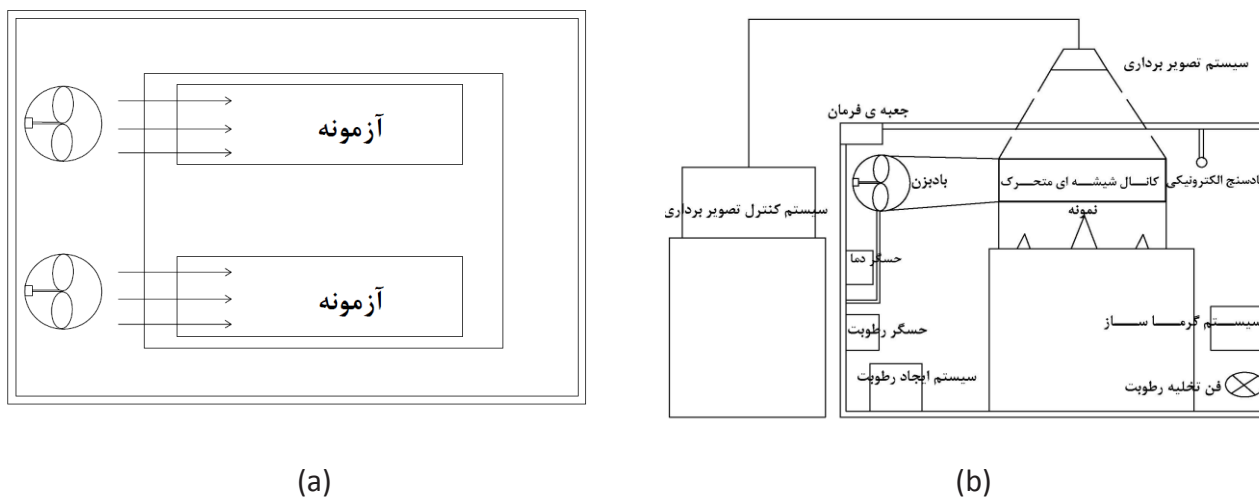
جهت بررسی روند جمع شدگی خمیری و ترک خوردگی ناشی از آن در شرایط محیطی مختلف، از مبانی اشاره شده در روش استاندارد ASTM C1579 استفاده شده است. این روش می تواند ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در شرایط محیطی مختلف را در بتن ایجاد کند. در این روش محفظه‌ی شبیه‌ساز عوامل جوی، با قابلیت حفظ و کنترل شرایط محیطی مورد نظر، جهت ایجاد شرایط محیطی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۲ محفظه‌ی شبیه‌ساز عوامل جوی به همراه اجزای آن را نشان می‌دهد.

شرایط محیطی آزمایش شده شامل ترکیبی از سه مقدار متغیر دمای محیطی، سه مقدار متغیر رطوبت نسبی هوا و سه مقدار متغیر سرعت جریان باد می‌باشد. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق شامل زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر و مساحت ترک خوردگی می‌باشد. تعادل آب انداختگی و تبخیر، حالتی است که لایه‌ی آب حاصل از آب انداختگی در سطح آزمونه، محو شده و آبی در سطح آن دیده نشود [۳۱]. زمان رسیدن به این تعادل در سطح آزمونه، زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر بوده که از بررسی و تحلیل تصاویر تهیه شده از سطح آزمونه‌ها توسط سیستم تصویربرداری، در نرم افزار تحلیل تصویر به دست می‌آید. مساحت ترک خوردگی، مجموع مساحت نواحی ترک خورده در سطح آزمونه بوده و از تحلیل تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ دیجیتال در نرم افزار تحلیل تصویر به دست می‌آید. نرم افزار تحلیل تصویر Digimizer version 5.3.5 جهت تحلیل و بررسی تصاویر تهیه شده توسط سیستم تصویربرداری و میکروسکوپ دیجیتال، مورد استفاده قرار گرفت. Digimizer یک نرم افزار تحلیل تصویر با کاربری

انتخاب شد. اگرچه انتخاب این مقادیر منجر به افزایش مقدار آب آزاد لازم جهت رسیدن به اسلامپ توصیه شده توسط آیین‌نامه شده و باعث می‌شود تا مقدار اسلامپ بتن در محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه قرار نگیرد (مقدار اسلامپ بتن تازه در قسمت نتایج و بحث و در ادامه ارائه می‌گردد)، با این حال با توجه به دلیل ذکر شده، سعی بر رعایت دیگر معیارها بود. نسبت‌های وزنی طرح مخلوط بتن مورد استفاده در جدول ۳ دیده می‌شود.

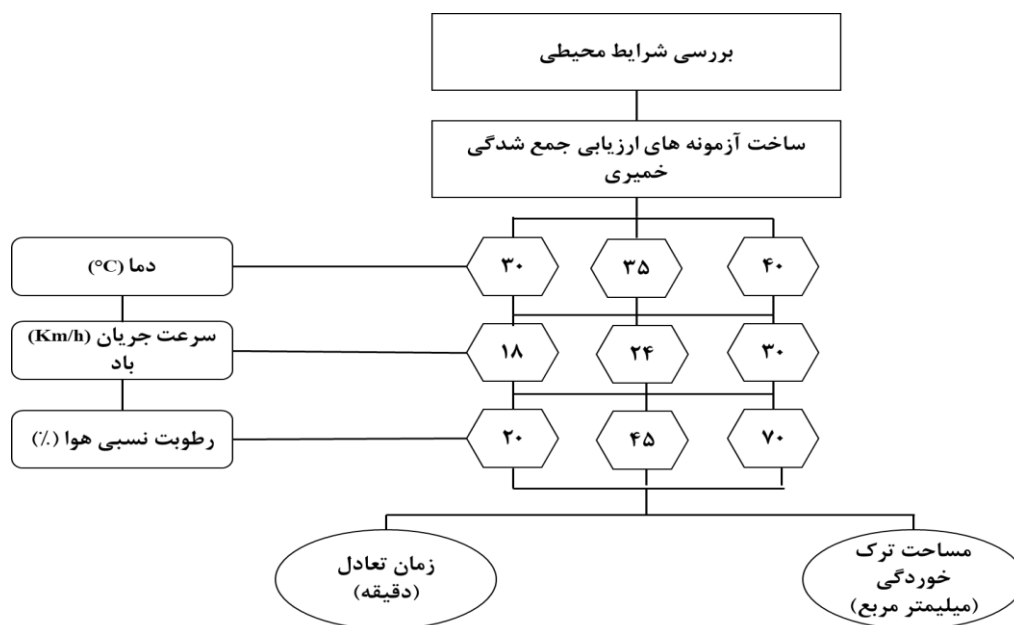
۲-۳- آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی بتن

خصوصیات مکانیکی بتن مورد بررسی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی می‌باشد. مقاومت فشاری بتن طبق روش ارائه شده در بخش پنجم استاندارد BS 1881-116 و بر روی آزمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر مکعبی انجام شده و سپس توسط ضرایب ارائه شده در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، تبدیل به مقاومت فشاری آزمونه‌ی استاندارد استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متر مربع گردید. سنین مورد نظر جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن، ۷ و ۲۸ روزه، تعیین شد. آزمایش تعیین مقاومت خمشی بتن جهت تعیین مدول گسیختگی مخلوط بتنی، طبق استاندارد ASTM C 78 و بر روی تیرهای بتنی به ابعاد ۴۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر مکعب و در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه، صورت گرفت. مقاومت کششی دو نیم شدن بتن بر طبق استاندارد ASTM C 496 تعیین شده و آزمونه‌های استوانه‌ای ۱۰×۲۰ در سنین ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. تعداد سه آزمونه در هر سن آزمایش جهت تعیین هر یک از خصوصیات مکانیکی مورد نظر، ساخته شد. آزمونه‌ها پس از ساخت، تا سن مورد نظر آزمایش، در شرایط استاندارد عمل آوری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۲. محفظه‌ی شبیه‌ساز عوامل جوی

Fig. 2. Environmental simulator chamber



شکل ۳. فرآیند آزمایش و متغیرهای مورد بررسی

Fig. 3. Experiment process and investigated variables

شکل ۳، فرآیند کلی آزمایش و متغیرهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. مخلوط بتنی در یک مخلوط کن با ظرفیت ۰/۰۶ 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 می‌شود. سپس بتن ساخته شده در قالب‌ها جای داده شده و با استفاده از کوبه متراکم

ساده و انعطاف بالا بوده که امکان اندازه‌گیری دستی دقیق اشیاء در تصاویر را به کاربر می‌دهد. عکس‌های وارد شده به نرم افزار می‌تواند شامل عکس‌های حاصل از تصویربرداری با اشعه‌ی ایکس، ریزگراف‌ها و در فرمت‌های مختلف مانند GIF، JPG، باشد. امکان افزایش کیفیت، تنظیم روشنایی و رنگ زمینه تصاویر و اندازه‌گیری دستی دقیق از قابلیت‌های این نرم افزار می‌باشد.



شکل ۴. محفظه‌ی شبیه‌ساز عوامل جوی، قالب آزمایش، آزمون‌گیری و انجام آزمایش

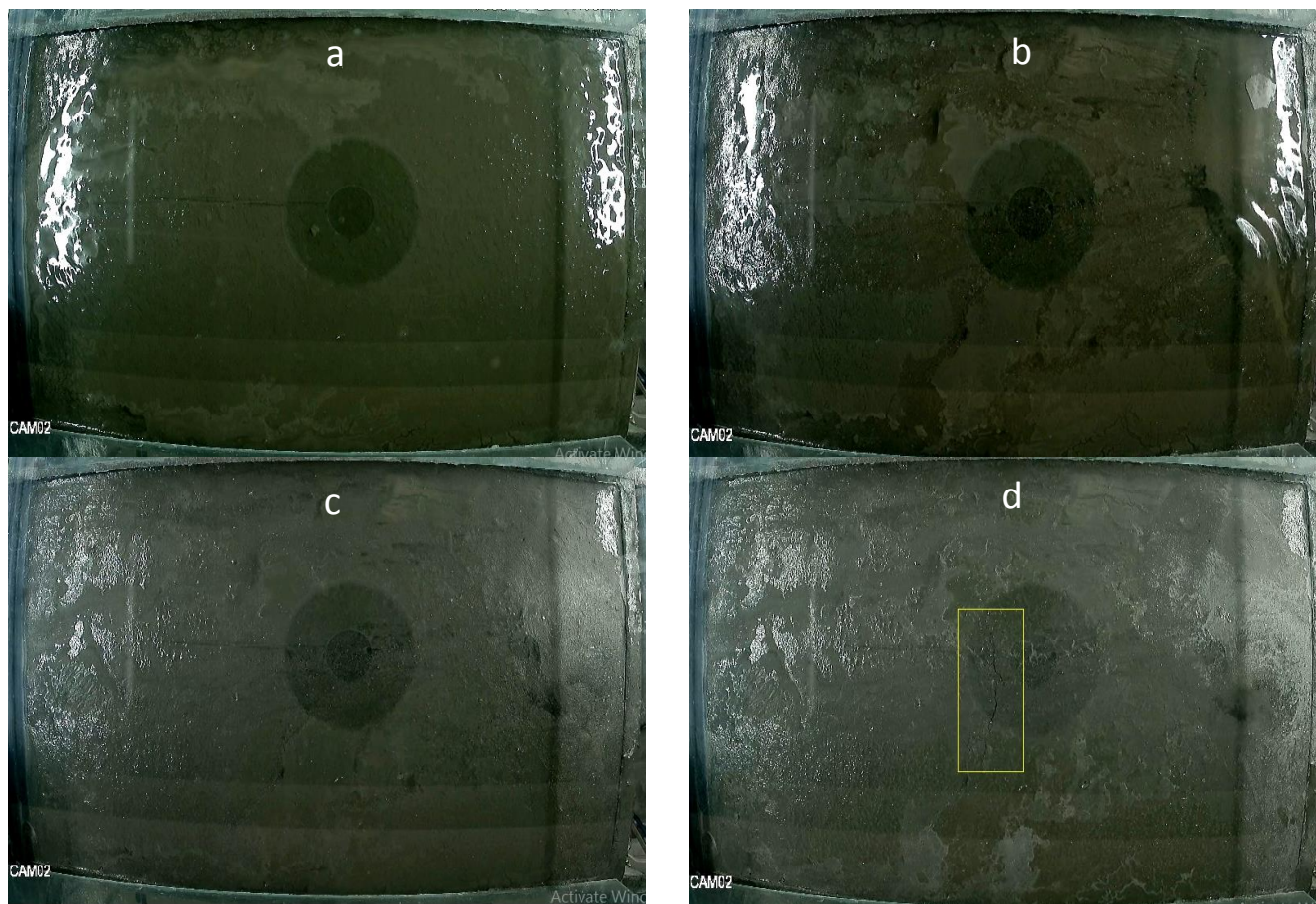
Fig. 4. Environmental simulator chamber, experiment mold, specimen fabrication, and testing

تعیین می‌گردد. تصویر نمونه در زمان تعادل، با تصاویر نمونه بعد از این زمان و همچنین در زمان ترک خوردگی، جهت بررسی عدم وجود لایه‌ی آب در سطح نمونه نیز بررسی می‌شود. این فرآیند برای همه‌ی آزمون‌های آزمایش شده انجام گردید. در شکل ۵، تصاویر یک آزمون در شروع آزمایش، وضعیت آب انداختگی، تعادل و ترک خوردگی، دیده می‌شود.

پس از اتمام آزمایش و گذشت ۲ ساعت از آن، با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال متصل به سیستم، تصاویر دیجیتال از محل ترک خوردگی در مسیر ترک، تهیه می‌شود. این عکس‌ها در نرم افزار تحلیل تصویر Digimizer version 5.3.5 جهت اندازه‌گیری مساحت ترک خوردگی وارد شده و تحلیل می‌شوند. با توجه به استاندارد ASTM C 1579، دقت اندازه‌گیری با استفاده از سیستم‌های تحلیل تصاویر، باید در حد مجاز تعیین شده توسط استاندارد باشد. بدین صورت که مقدار اختلاف اندازه‌ی واقعی یک قطعه‌ی مشخص (مانند اندازه‌ی شیار بر روی یک قطعه‌ی فلزی) با اندازه‌ی به دست آمده از تحلیل تصاویر، باید از 0.05 میلی‌متر تجاوز نکند. تصاویر دیجیتال از مسیر ترک خوردگی در فواصل ۴ سانتی‌متری، تهیه می‌شود. جهت کالیبره کردن عکس‌ها در نرم افزار و حصول اطمینان از دقت تحلیل تصاویر، از هر قطعه‌ی ترک خوردگی، سه عکس تهیه می‌شود. در عکس اول و دوم، یک اشل (مقیاس) استاندارد در دو جهت عمود بر هم در

گردیده و سطح بتن توسط یک مال‌ی فلزی صاف می‌شود. پس از قالب‌گیری، آزمون‌های بتن در محفظه‌ی شبیه‌ساز عوامل جوی قرار داده شده و آزمایش شروع می‌گردد. سیستم تصویربرداری پیوسته، تغییرات آزمون را ثبت می‌کند. مدت زمان آزمایش در این تحقیق ۲۲ ساعت انتخاب شد. تصاویر تهیه شده، جهت برداشت زمان تعادل برای هر یک از شرایط محیطی آزمایش شده، تحلیل و بررسی می‌شود. همچنین از عکس‌های گرفته شده توسط میکروسکوپ دیجیتال از آزمون‌ها در انتهای آزمایش، جهت اندازه‌گیری مساحت ترک خوردگی استفاده گردید. میانگین نتایج دو آزمون‌ی آزمایش شده، در نظر گرفته شد. شکل ۴ محفظه‌ی شبیه‌ساز عوامل جوی، قالب آزمایش و آزمون در حال آزمایش را نشان می‌دهد.

تصاویر گرفته شده جهت افزایش کیفیت و تحلیل دقیق‌تر، در نرم افزار تحلیل تصویر Digimizer وارد شده، و جهت ارزیابی زمان تعادل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. جهت برداشت زمان تعادل آزمون‌ها، 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 آب انداختگی و تبخیر نمونه، ثبت می‌گردد. تصاویر گرفته شده، به دفعات مکرر بازبینی شده و زمان تعادل



شکل ۵. خصوصیات زمانی آزمون در حال آزمایش: (الف): شروع آزمایش - (ب): آب انداختگی آزمون - (پ): تعادل آب انداختگی و تبخیر در سطح آزمون - (ج): ترک خوردگی آزمون

Fig. 5. Temporal characteristics of the specimen under testing: (a): Start of testing- (b): bleeding of specimen- (c): balance of bleeding and evaporation in the specimen surface- (d): cracking of specimen

بر روی اشل، با استفاده از نرم افزار تعیین شده و با اندازه‌ی واقعی آنان، مقایسه می‌گردد. در صورت رعایت حداکثر مقدار اختلاف بین اندازه‌ی واقعی با اندازه‌ی به دست آمده از نرم افزار، فرآیند تحلیل تصویر ادامه یافته و در غیر این صورت، عملیات کالیبراسیون دوباره انجام می‌شود. عکس سوم، ابتدا توسط فرمان تبدیل به مقیاس خاکستری^۲ به پیکسل‌های خاکستری و سیاه تبدیل می‌شود. این عمل، جهت مشخص شدن بهتر محل‌های ترک خوردگی (مناطق سیاه رنگ) و تمایز آن با قسمت‌های سالم بتن (قسمت‌های خاکستری رنگ)، انجام می‌گیرد. سپس با استفاده از فرمان نشانه گذاری^۳، محدوده‌ی ترک خوردگی مشخص می‌گردد.

محدوده‌ی ترک خوردگی، با پیکسل‌های سیاه رنگ از محدوده‌ی ترک

تصویر، قرار داده می‌شود. اندازه‌ی واقعی بین خطوط اشل، با توجه به مقیاس مورد استفاده در اشل (مثلاً ۱/۱۰۰)، مشخص می‌باشد. این دو عکس در نرم افزار وارد شده، و با استفاده از فرمان اندازه‌ی واحد^۱ در نرم افزار، خطی بین دو خط قرار گرفته بر روی اشل در تصویر رسم می‌شود. پس از رسم این خط واحد، نرم افزار از کاربر می‌خواهد که مقدار اندازه‌ی واقعی این خط را وارد کند. با توجه به این که اندازه‌ی واقعی بین این دو خط قرار گرفته بر روی اشل مشخص است (۱ میلی‌متر)، نرم افزار با ایجاد رابطه‌ی بین مقدار فاصله‌ی واقعی خط تعیین شده توسط کاربر و تعداد پیکسل‌های طی شده توسط این خط، فرآیند کالیبراسیون نرم افزار را انجام می‌دهد. جهت حصول اطمینان از دقت کالیبراسیون انجام شده، فاصله‌ی بین چند خط تصادفی

2 Convert to grayscale

3 Marker

1 Unit

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی

Table 4. Results of tests for determination of concrete mechanical properties

مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		مقاومت کششی (مگاپاسکال)		مدول گسیختگی (مگاپاسکال)	
۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه
۱۹/۴	۲۷/۷	۲/۴۰	۳/۳۰	۲/۹۰	۳/۹۵

مخصوص بتن در شرایط مطابق با استاندارد ASTM C 143 و ASTM C 138، به ترتیب به مقدار ۱۲۰ میلی‌متر، ۳/۱٪ و ۲۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. مقدار اسلامپ بتن از مقدار توصیه شد توسط نشریه ی ۷۳۱، بیشتر می‌باشد که علت این موضوع به دلیل افزایش قابلیت ترک خوردگی در طرح اختلاط بوده که توضیحات بیشتر در این زمینه در قسمت طرح مخلوط، ارائه گردید.

۳-۲- خصوصیات مکانیکی بتن

نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی بتن شامل آزمایش تعیین مقاومت فشاری، آزمایش تعیین مقاومت کششی و آزمایش تعیین مقاومت خمشی در جدول ۴ دیده می‌شود.

با توجه به این نتایج، مشاهده می‌شود که طرح مخلوط بتن که بر اساس ضابطه ی ۷۳۱ طرح شده بود، دارای مشخصات مکانیکی نزدیک به حدود مشخص شده در آیین‌نامه می‌باشد. مقاومت فشاری آزمون استاندارد بتن در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه به ترتیب به میزان ۱۹/۴۲ و ۲۷/۶۸ مگاپاسکال می‌باشد. مقاومت فشاری بتن به میزان ۴۳٪ از سن ۷ روزه تا سن ۲۸ روزه، رشد کرده است. حداقل مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه طبق جدول ۲، ۳۰ مگاپاسکال بوده که به مقدار به دست آمده از آزمایش، نزدیک است. مقدار مقاومت کششی بتن در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۲/۴۴ و ۳/۲۹ مگاپاسکال می‌باشد. با این که در ضابطه ی ۷۳۱، مقدار حداقل برای آن ذکر نشده است، اما این مشخصه ی بتن جهت ارزیابی مقاومت بتن در برابر ترک‌های ایجاد شده به خصوص در سنین اولیه، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. مقدار رشد مقاومت کششی بتن از سن ۷ روزه تا سن ۲۸ روزه به میزان ۳۵٪ می‌باشد. مدول گسیختگی بتن در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب به میزان ۲/۹ و ۳/۹۵ مگاپاسکال می‌باشد. این خصوصیت بتن در طراحی روسازی‌های بتنی بسیار اهمیت داشته و دال روسازی، بارهای وارده شده از

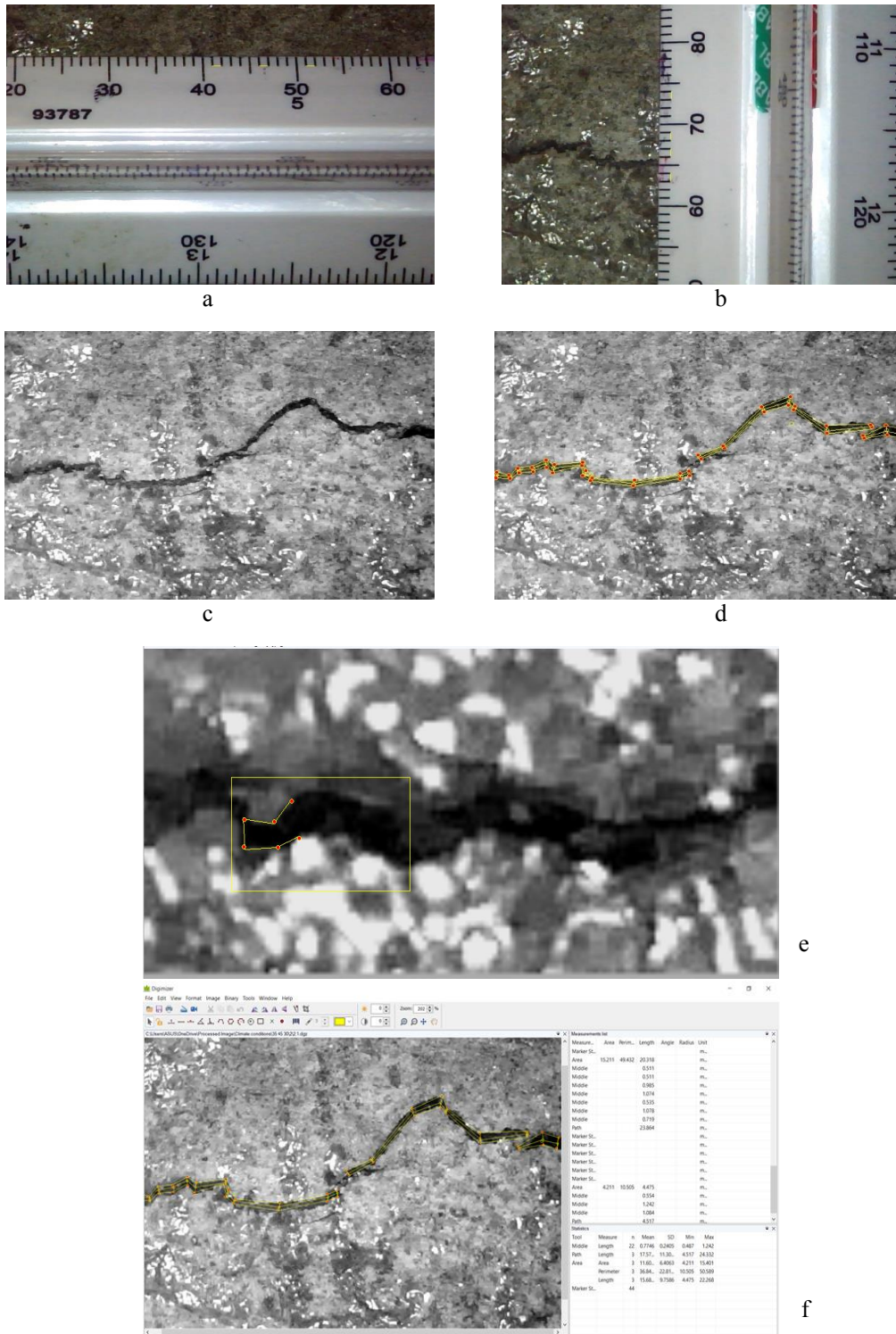
نخورده ی بتن با پیکسل‌های خاکستری متمایز است. همچنین از دیگر فرمان‌های نرم افزار جهت افزایش کیفیت تصویر نیز استفاده می‌شود تا ناحیه ی ترک خوردگی به خوبی مشخص گردد. نقاط در طول مسیر ترک خوردگی و در دو طرف دهانه ی ترک گذاشته می‌شود. در هر قسمت که مسیر ترک خوردگی تغییر کند، نقاط جدیدی در دو طرف دهانه، گذاشته می‌شود. این عملیات از ابتدای ترک خوردگی تا انتهای آن انجام شده، و در صورت وجود قطعات ناپیوسته ی ترک خوردگی، این عملیات برای هر قسمت ترک خوردگی، انجام می‌گیرد. سپس با استفاده از فرمان محدوده، نقاط قرار گرفته در محیط ترک خوردگی به یکدیگر وصل شده و محدوده ی بسته ی ترک خوردگی ایجاد می‌گردد. نرم افزار، مساحت این ناحیه را با استفاده از تعداد پیکسل‌های قرار گرفته در آن و با توجه به کالیبراسیون انجام شده، محاسبه می‌کند که همان مساحت ناحیه ی ترک خوردگی می‌باشد. این فرآیند برای همه ی عکس‌های گرفته شده از یک آزمون، انجام شده و از جمع مساحت‌های به دست آمده از تحلیل همه ی تصاویر یک آزمون، مساحت کل ترک خوردگی آن به دست می‌آید. این فرآیند تحلیل تصاویر، برای همه ی آزمون‌های آزمایش شده، انجام گردید. در شکل ۶ تصاویر مربوط به تحلیل یک تصویر دیجیتال از محل ترک خوردگی، در نرم افزار را نشان می‌دهد.

۳-۳- نتایج و بحث

در این قسمت، پس از ارائه ی مشخصات بتن تازه، نتایج آزمایش تعیین خصوصیات مکانیکی بتن، بیان شده و سپس نتایج حاصل از آزمایش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در شرایط محیطی مختلف، تحلیل و تفسیر می‌گردد.

۳-۱- مشخصات بتن تازه

مشخصات بتن تازه شامل مقادیر اسلامپ، درصد هوا و وزن



شکل ۶. فرایند اندازه‌گیری مساحت ترک خوردگی با استفاده از روش تحلیل تصویر: کالیبره کردن تصویر در دو جهت عمود بر هم (a, b)، تبدیل عکس به پیکسل‌های خاکستری و سیاه (c)، نقطه گذاری و تعیین محدوده‌ی ترک خوردگی (d)، بزرگ نمایی تصویری محل ترک خوردگی در نرم افزار برای تمایز بهتر قسمت ترک خورده با قسمت بدون ترک جهت نقطه گذاری و ایجاد محدوده‌ی ترک خوردگی (e)، محاسبه‌ی مساحت ناحیه‌ی ترک خوردگی توسط نرم افزار (f)

Fig. 6. The process of measurement of cracking area using image analysis method: calibrating the image in two directions perpendicular to each other (a,b), converting the image to gray and black pixels (c), pointing and defining the cracking boundaries (d), Zooming the image of the cracking spot in the software to better distinguish the cracked area with the non-cracked area for pointing and defining cracking boundaries (e), Calculation of cracking area by software

جدول ۵. نتایج آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در شرایط محیطی مختلف

Table 5. Results of test for the evaluation of plastic shrinkage cracking in different environmental conditions

دما (C°)	رطوبت (%)	سرعت باد (Km/h)	زمان تعادل (min)	مساحت ترک خوردگی (mm ²)
۳۰	۷۰	۱۸	۱۹۳/۸۰	۰
۳۰	۷۰	۲۴	۸۵/۷۲	۹۶/۲۹
۳۵	۷۰	۱۸	۸۵/۶۷	۱۰۰/۰۲
۳۰	۷۰	۳۰	۸۰/۸۳	۱۰۴/۴۲
۴۰	۷۰	۱۸	۷۹/۲۳	۱۱۰/۲۲
۳۵	۷۰	۲۴	۷۷/۲۵	۱۱۲/۰۳
۳۰	۴۵	۱۸	۷۵/۷۲	۱۳۵/۳۷
۳۵	۷۰	۳۰	۷۳/۶۲	۱۴۰/۷۶
۴۰	۷۰	۲۴	۷۲/۵۵	۱۴۸/۱۲
۳۰	۴۵	۲۴	۶۱/۳۵	۱۵۷/۴۳
۳۵	۴۵	۱۸	۶۰/۱۲	۱۶۴/۴۲
۴۰	۷۰	۳۰	۵۶/۳۰	۱۷۳/۱۳
۳۰	۲۰	۱۸	۵۳/۰۸	۱۹۲/۲۸
۳۰	۴۵	۳۰	۵۰/۶۵	۱۹۹/۲۷
۴۰	۴۵	۱۸	۴۷/۰۲	۲۰۲/۴۳
۳۵	۴۵	۲۴	۴۷/۵۸	۲۱۱/۶۸
۳۰	۲۰	۲۴	۴۱/۵۳	۲۲۱/۵۱
۳۵	۲۰	۱۸	۴۰/۱۵	۲۳۰/۱۹
۳۵	۴۵	۳۰	۳۸/۱۸	۲۴۷/۱۹
۴۰	۴۵	۲۴	۳۷/۸۲	۲۴۵/۴۹
۳۰	۲۰	۳۰	۳۰/۶۷	۲۵۵/۶۳
۴۰	۲۰	۱۸	۲۸/۸۰	۲۶۰/۲۳
۳۵	۲۰	۲۴	۲۷/۸۲	۲۶۵/۹۰
۴۰	۴۵	۳۰	۲۶/۳۰	۲۹۲/۷۹
۳۵	۲۰	۳۰	۲۰/۱۰	۳۴۰/۶۴
۴۰	۲۰	۲۴	۱۹/۰۵	۳۶۰/۴۴
۴۰	۲۰	۳۰	۱۶/۷۲	۴۰۷/۲۶

بهتر ترک خوردگی در تمامی شرایط محیطی آزمایش شده، انجام گرفت. همچنین، مقادیر به دست آمده از آزمایش، به مقادیر ذکر شده در آیین‌نامه، بسیار نزدیک می‌باشد.

۳-۳- ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری

مقدار زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر، و مساحت ترک خوردگی حاصل از آزمایش ارزیابی ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بتن در ۲۷ شرایط محیطی مختلف در جدول ۵ مشاهده می‌شود. در نتایج ارائه شده در این قسمت، هر عامل محیطی با علامت اختصاری که حرف اول آن می‌باشد،

طرف ترافیک طرح را به صورت خمشی تحمل کرده و به سطح زیرین خود انتقال می‌دهد. میزان افزایش نسبی مدول گسیختگی بتن از سن ۱۴ روزه تا سن ۲۸ روزه به میزان ۳۶٪ می‌باشد. حداقل مقدار مدول گسیختگی ۲۸ روزه طبق جدول ۱، ۴ مگاپاسکال بوده که به مقدار به دست آمده از آزمایش، نزدیک می‌باشد. با توجه به نتایج، دیده می‌شود که مقادیر مقاومت فشاری و مدول گسیختگی به دست آمده، از مقادیر ذکر شده در نشریه ۷۳۱، کمتر می‌باشد که این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش قابلیت ترک خوردگی خمیری در طرح مخلوط بتن باشد. همانطور که در قسمت طرح مخلوط گفته شد، انتخاب این طرح اختلاط با توجه به هدف پژوهش جهت بررسی

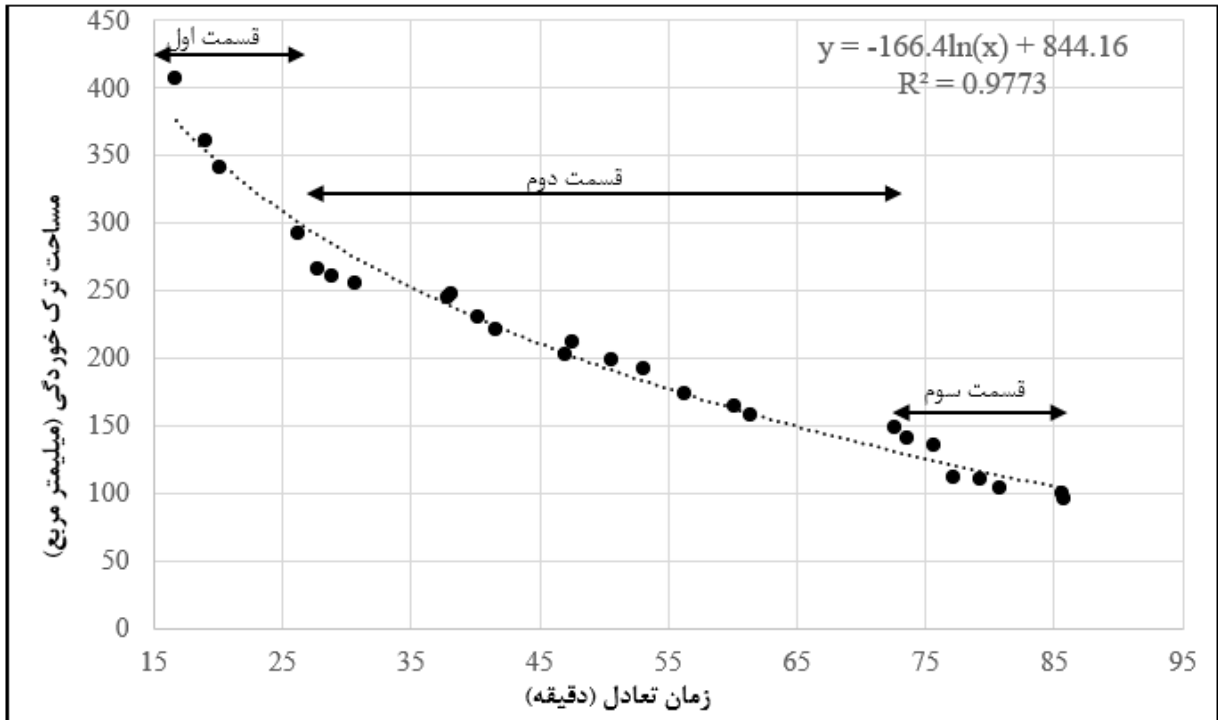
مشخص شده بدین صورت که دمای محیطی با علامت T^1 ، رطوبت نسبی هوا با علامت R^2 و سرعت جریان باد با علامت W^3 نام‌گذاری شده است. پس از این حروف، مقادیر هر یک از شرایط محیطی به ترتیب قرار گرفتن علامت اختصاری آنان، آورده می‌شود. دمای محیطی بر حسب درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی هوا بر حسب درصد و سرعت جریان باد بر حسب کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته می‌شود. همچنین، شرایط محیطی شامل $T, R, W - 30, 70, 18$ ، شرایط محیطی است که در آن ترک خوردگی آزمونه رخ نداده است. به جهت عدم تأثیرات غیر معمول این حالت محیطی در نتایج و نمودارهای ارائه شده، این شرایط محیطی در نتایج و نمودارها وارد نشده و به عنوان شرایط محیطی بدون ترک خوردگی معرفی می‌گردد.

شکل ۷، نمودار تغییرات مساحت کل ترک خوردگی نسبت به زمان تعادل در هر یک از شرایط محیطی آزمایش شده را نشان می‌دهد. در این نمودار، مساحت کل ترک خوردگی و زمان تعادل متناظر با آن در هر یک از شرایط محیطی آزمایش شده مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار شکل ۷، دیده می‌شود بین زمان تعادل و مساحت ترک خوردگی در شرایط محیطی مختلف، ارتباط معناداری وجود دارد. مقدار ضریب همبستگی منحنی برازش شده بین این دو متغیر، $0.97/73\%$ بوده که این معناداری این ارتباط را بیان می‌کند. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) منحنی برازش شده در نرم افزار IBM SPSS Statistics 26 در جدول ۶ دیده می‌شود. با توجه به بزرگ بودن مقدار F و $sig = 0.000 < 0.05$ ، نتیجه می‌شود که منحنی برازش شده مناسب بوده، چرا که سهم مدل در تغییرات کل از نسبت سهم خطا بسیار بیشتر می‌باشد. در این تحلیل، مقدار خطای نوع اول 0.05 در نظر گرفته شد. در نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش زمان تعادل مساحت ترک خوردگی کاهش می‌یابد. با کاهش زمان تعادل از مقدار حداکثر آن (۸۶ دقیقه) به مقدار حداقل آن (۱۷ دقیقه) مساحت ترک خوردگی بیش از ۴ برابر (از مقدار ۹۶ میلی‌متر مربع به ۴۰۷ میلی‌متر مربع) افزایش یافته است. می‌توان این نمودار را در سه قسمت بررسی کرد. در قسمت اول نمودار، افزایش زمان تعادل از ۱۷ دقیقه به ۲۸ دقیقه باعث کاهش نسبی مساحت ترک خوردگی به میزان ۱۳۹ میلی‌متر مربع شده است. شیب بین نقاط ابتدا و انتهای این قسمت از نمودار به میزان $12/64$ میلی‌متر مربع بر دقیقه بوده و مساحت ترک خوردگی با نرخ تندتری کاهش می‌یابد. در قسمت دوم

- 1 Temperature
- 2 Relative humidity
- 3 Wind Speed

نمودار، شیب بین نقاط ابتدا و انتهای نمودار به میزان $2/6$ میلی‌متر مربع بر دقیقه است. در این قسمت از نمودار، کاهش مساحت در بازه‌ی زمان تعادل ۲۸ دقیقه تا ۷۳ دقیقه، با شیب ملایم‌تری انجام گرفته به طوری که در این بازه‌ی افزایش زمان تعادل، کاهش مساحت به مقدار ۱۱۷ میلی‌متر مربع رخ می‌دهد. در قسمت انتهایی نمودار، شدت نرخ کاهش مساحت دوباره شدت گرفته است. شیب بین ابتدا و انتهای این قسمت از نمودار به مقدار $4/33$ میلی‌متر مربع بر دقیقه افزایش یافته و افزایش زمان تعادل از ۷۳ دقیقه به ۸۵ دقیقه باعث کاهش مساحت به میزان ۵۲ میلی‌متر مربع می‌شود. این موضوع به دلیل، شدت نرخ تبخیر پایینی است که ترکیب عوامل جوی در این قسمت از نمودار ایجاد می‌کند. شرایط محیطی که باعث تشدید نرخ تبخیر مساحت ترک خوردگی در قسمت اولیه نمودار گردیده به طور عمده شامل دمای بالا (۳۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد)، رطوبت نسبی پایین (۲۰ تا 45%) و سرعت جریان باد بالا (۲۴ تا ۳۰ کیلومتر بر ساعت) می‌باشد. این مسئله بیان می‌کند که ترکیب مقادیر بحرانی هر سه عامل یا ترکیب دو عامل بحرانی و یک عامل نسبتاً ملایم‌تر (از نظر نرخ تبخیر)، مساحت ترک خوردگی را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد. ترکیب شرایط محیطی با شدت ملایم‌تر در قسمت دوم نمودار که بیشتر شامل دمای کمتر (۳۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد)، رطوبت نسبی بیشتر (۴۵ تا 70%) و سرعت جریان هوای کمتر (۱۸ تا ۲۴ کیلومتر بر ساعت) باشد، نرخ شدت ترک خوردگی را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که جهت کاهش مساحت ترک خوردگی و افزایش زمان تعادل، نیاز به حذف یا کاهش همه‌ی عوامل نبوده و می‌توان با ترکیب هر سه عامل محیطی به یک شرایط ملایم‌تر (مانند شرایط دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی 45% و سرعت وزش باد ۲۴ کیلومتر بر ساعت) رسید.

شرایط محیطی نرم در قسمت سوم نمودار، شامل دمای پایین (۳۰ درجه سانتی‌گراد)، رطوبت نسبی بالا (70%) و سرعت جریان هوای کمتر (۱۸ کیلومتر بر ساعت) باعث کاهش شدیدتر نرخ ترک خوردگی می‌گردد به طوری که پس از شرایط محیطی $T, R, W - 30, 70, 24$ که شرایط محیطی ملایم محسوب می‌شود، ترک خوردگی به میزان زیادی کاهش یافته و در نهایت در شرایط محیطی $T, R, W - 30, 70, 18$ ، ترک خوردگی رخ نداده است. نکته‌ی قابل توجه در این قسمت این است که ترکیب دو عامل بسیار ضعیف (از نظر ایجاد نرخ تبخیر) و یک عامل نسبتاً بحرانی، می‌تواند منجر به شرایطی شود که شدت ترک خوردگی به میزان قابل توجهی کاهش یابد (مانند



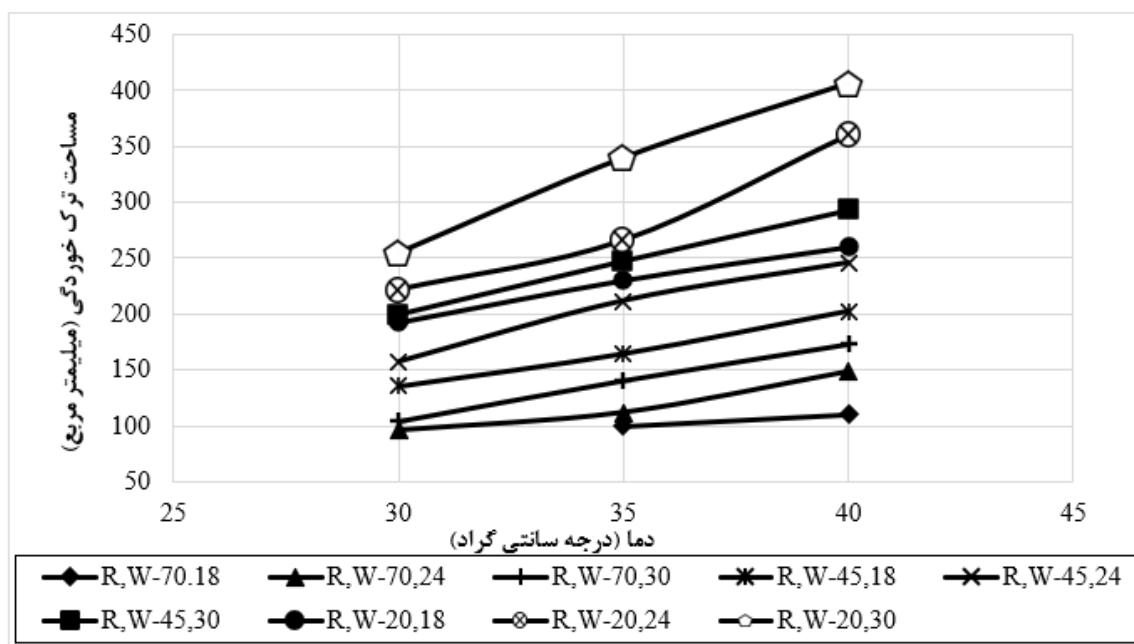
شکل ۷. نمودار تغییرات مساحت ترک خوردگی نسبت به زمان تعادل آزمون در شرایط محیطی مختلف

Fig. 7. Graph of changes in cracking area relative to the time of balance in specimens in different environmental conditions

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) منحنی برازش شده مساحت ترک خوردگی نسبت به زمان تعادل

Table 6. Results of analysis of variance (ANOVA) of the fitted curve of the cracking area relative to the time of balance

	مجموع مربعات	df	مربع متوسط	F	Sig
سهم مدل	۱۶۸۸۰۰,۶۲۳	۱	۱۶۸۸۰۰,۶۲۳	۱۰۳۵,۳۲ ۴	۰,۰۰۰
نسبت سهم خطا	۳۹۱۲,۹۹۱	۲۴	۱۶۳,۰۴۱	-	-
تغییرات کل	۱۷۲۷۱۳,۶۱۴	۲۵	-	-	-



شکل ۸. نمودار تغییرات مساحت ترک خوردگی نسبت به دمای محیطی در شرایط محیطی مختلف

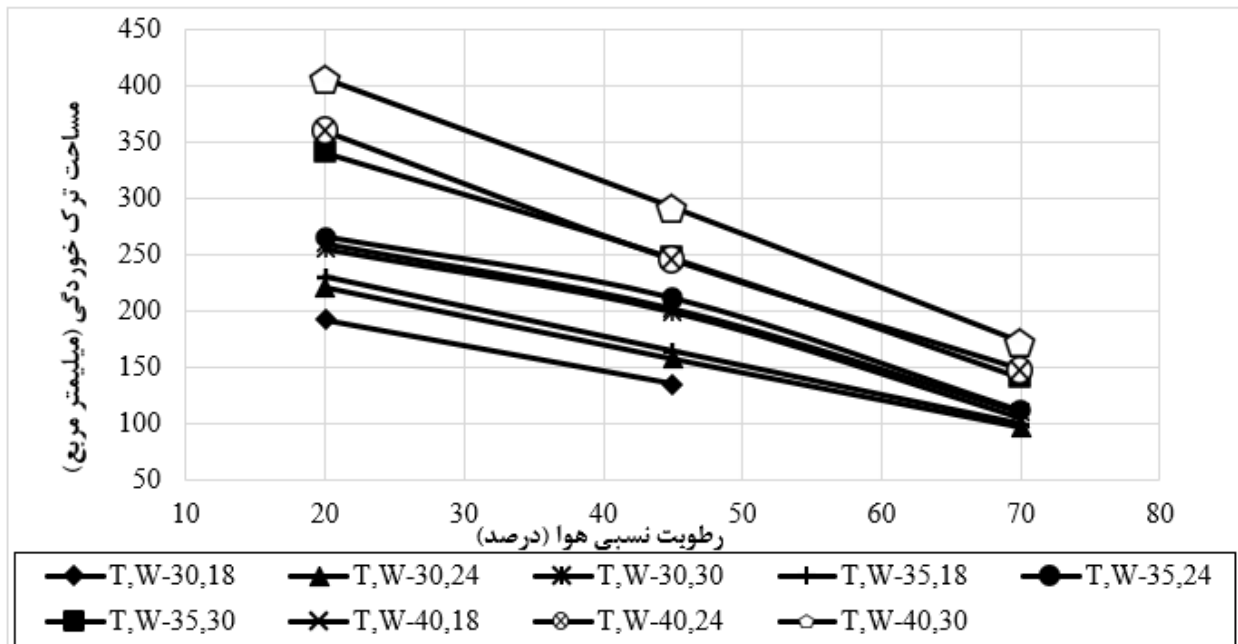
Fig. 8. Graph of changes in cracking area relative to ambient temperature in different environmental conditions

۴۷٪، در شرایط محیطی مختلف شده است. با توجه به این نتایج، مشخص است که مساحت ترک خوردگی بیشترین افزایش نسبی را در اثر تغییر رطوبت نسبی هوا دارد. همچنین تغییر مساحت ترک خوردگی در اثر تغییر دمای محیطی به مقدار جزئی از اثر تغییر سرعت جریان باد بیشتر بوده، اما این اختلاف چشمگیر نیست. بنابراین، تغییر رطوبت نسبی هوا تأثیرات بیشتری بر افزایش شدت ترک خوردگی، داشته و اثر دما و سرعت جریان باد، نزدیک به هم می‌باشد.

جهت بررسی بیشتر ارتباط بین هر یک از عوامل محیطی با مساحت ترک خوردگی و ارائه‌ی یک مدل شدت ترک خوردگی در شرایط محیطی مختلف، تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره در نرم افزار IBM SPSS Statis-26 انجام شده و مدل مساحت ترک خوردگی به همراه نتایج حاصل از تحلیل مدل، ارائه می‌گردد. همچنین تحلیل واریانس (ANOVA) مدل ارائه شده، نیز انجام شده و نتایج حاصل از آن مورد بررسی واقع می‌گردد. از مدل رگرسیون خطی چند متغیره جهت ارائه‌ی مدل پیش‌بینی ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری در دیگر پژوهش‌ها استفاده شده و نتایج خوبی از آن، گزارش شده است [۲۹]. رابطه‌ی کلی مدل رگرسیون خطی چند متغیره در رابطه‌ی (۱) نشان داده شده است.

شرایط دمای ۳۵ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی ۷۰٪ و سرعت جریان باد ۱۸ کیلومتر بر ساعت که مساحت ترک خوردگی آن نسبت به حداکثر مساحت ترک خوردگی ۰/۲۴ برابر شده است). با توجه به نتایج جدول ۵، دیده می‌شود که تغییر رطوبت نسبی هوا از ۲۰٪ به ۷۰٪، بیشترین اثر را بر روی تغییرات زمان تعادل و مساحت ترک خوردگی دارد. همچنین اثر تغییرات دمای محیطی از ۳۰ درجه سانتی گراد به ۴۰ درجه سانتی گراد، به مقدار جزئی از اثرات تغییر سرعت جریان باد از ۱۸ کیلومتر بر ساعت به ۳۰ کیلومتر بر ساعت بر زمان تعادل و مساحت ترک خوردگی بیشتر است. با این حال اثر این دو عامل محیطی بر تغییرات زمان تعادل و مساحت ترک خوردگی نزدیک به هم می‌باشد.

در این قسمت به بررسی بیشتر تغییرات هر یک از عوامل محیطی بر شدت ترک خوردگی پرداخته می‌شود. شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰، به ترتیب اثر دمای محیطی، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان باد بر مساحت ترک خوردگی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، دیده می‌شود تغییر دمای محیطی از ۳۰ به ۴۰ درجه سانتی گراد، تغییر رطوبت نسبی هوا از ۷۰٪ به ۲۰٪ و تغییر سرعت جریان باد از ۱۸ به ۳۰ کیلومتر بر ساعت، باعث متوسط افزایش نسبی مساحت ترک خوردگی به ترتیب به میزان ۵۴٪، ۱۳۸٪ و



شکل ۹. نمودار تغییرات مساحت ترک خوردگی نسبت به رطوبت نسبی هوا در شرایط محیطی مختلف

Fig. 9. Graph of changes in cracking area relative to the relative humidity of air in different environmental conditions

رطوبت نسبی هوا، باعث کاهش مساحت ترک خوردگی می‌شود که این موضوع هم راستا با نتایج قسمت قبل است. همچنین، با توجه به مقدار قدر مطلق ضریب بتای استاندارد ضرایب، دیده می‌شود که رطوبت نسبی هوا بیشترین اثر را بر مساحت ترک خوردگی داشته و اثر دمای محیطی به مقدار جزئی از اثر سرعت جریان باد، بیشتر است.

رابطه‌ی (۲)، مدل رگرسیون خطی چند متغیره مساحت ترک خوردگی را نسبت به سه عامل محیطی نشان می‌دهد.

$$A_c = -125.612 + 8.976 * T - 3.376 * R + 6.814 * W \quad (2)$$

که در آن که در آن A_c مساحت ترک خوردگی (میلی متر مربع)، T دمای محیط (درجه سانتی گراد)، R رطوبت نسبی هوا (درصد) و W سرعت جریان باد (کیلومتر بر ساعت) می‌باشد.

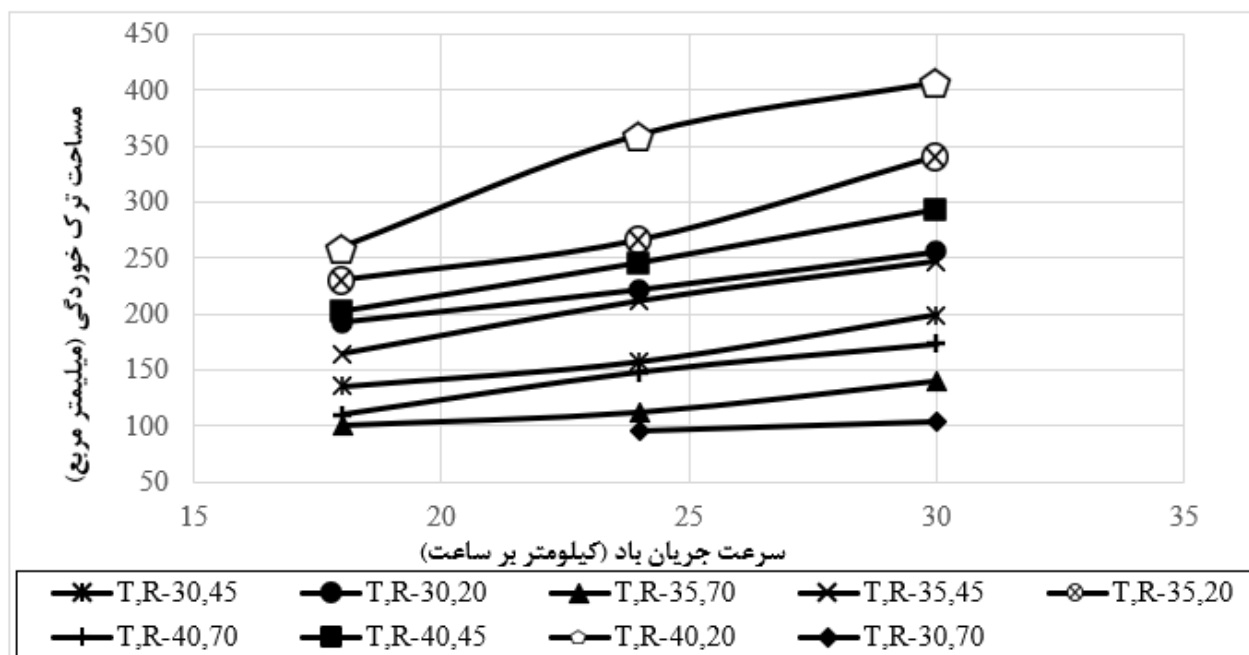
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ارتباط بین زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر با شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بتن در شرایط محیطی مختلف بررسی گردید. پس از انجام آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی بتن

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_3 + e \quad (1)$$

که در آن Y متغیر وابسته‌ی مورد نظر، x_1 ، x_2 ، x_3 ، β_0 ، β_1 ، β_2 و β_3 ضرایب مدل رگرسیونی و e خطای مدل رگرسیون می‌باشند. جدول ۷، نتایج حاصل از تحلیل واریانس مدل مساحت ترک خوردگی در نرم افزار را نشان می‌دهد. بزرگ بودن مقدار F و مقدار $\text{sig} = 0.000 < 0.05$ نشان می‌دهد که مدل رگرسیون مناسب خواهد بود به دلیل آن که بیشتر تغییرات متغیر وابسته در مدل رگرسیون دیده شده است. به این معنی که سهم مدل در تغییرات کل به نسبت سهم خطا، بسیار بیشتر است. در این تحلیل، مقدار خطای نوع اول، 0.05 در نظر گرفته شده است.

جدول ۸، نتایج حاصل از تحلیل مدل مساحت ترک خوردگی و ضرایب آن را نشان می‌دهد. با توجه به نزدیک بودن ضرایب همبستگی، مربع همبستگی و مربع همبستگی تنظیم شده، به عدد یک به نظر می‌رسد مدل رگرسیونی مناسب است. مقدار مثبت ضرایب دمای محیطی و سرعت جریان باد و مقدار منفی ضریب رطوبت نسبی هوا، بیان می‌کند که افزایش دمای محیطی و سرعت جریان باد باعث افزایش مساحت ترک خوردگی، و افزایش



شکل ۱۰. نمودار تغییرات مساحت ترک خوردگی نسبت به سرعت جریان باد در شرایط محیطی مختلف

Fig. 10. Graph of changes in cracking area relative to wind speed under in environmental conditions

نمی‌گردد. با ترکیب دو عامل محیطی ملایم با یک عامل محیطی شدید (از نظر نرخ تبخیر سطحی) می‌توان از کاهش شدید زمان تعادل و افزایش شدت ترک خوردگی جلوگیری کرد.

- رطوبت نسبی هوا بیشترین تاثیر را بر زمان تعادل و مساحت ترک خوردگی دارد.

- اثر دمای محیطی و سرعت جریان باد بر زمان تعادل و مساحت ترک خوردگی، نزدیک به هم می‌باشد

- زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر، می‌تواند فاکتور مهمی جهت پیش‌بینی و کنترل ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری در شرایط محیطی مختلف در زمان ساخت روسازی، باشد. کنترل این فاکتور جهت کنترل و کاهش ترک خوردگی در روسازی بتنی، ضروری است.

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، نتیجه می‌شود که در صورت کاهش شدید زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر در یک شرایط محیطی سخت در محل ساخت روسازی، شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع شدگی خمیری به میزان زیادی افزایش می‌یابد. با کنترل زمان تعادل

شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی، ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری بتن در ۲۷ شرایط محیطی مختلف با استفاده از سیستم تصویر برداری پیوسته و تحلیل تصاویر دیجیتال، ارزیابی شد. برخی از مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- بین زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر و شدت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری، ارتباط معناداری دیده می‌شود. با کاهش زمان تعادل، مقدار مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری افزایش می‌یابد.

- با کاهش زمان تعادل از مقدار حداکثر آن به مقدار حداقل آن که ناشی از سخت‌تر شدن شرایط محیطی است، مساحت ترک خوردگی بیش از ۴ برابر افزایش یافت. این موضوع اهمیت تاثیر شرایط محیطی بر زمان تعادل آب انداختگی و تبخیر و به دنبال آن شدت ترک خوردگی خمیری را به خصوص در شرایط محیطی سخت (از نظر نرخ تبخیر) نشان می‌دهد.

- ترکیب شرایط محیطی در شدت ترک خوردگی موثر بوده و بحرانی بودن تنها یک عامل، الزاما باعث افزایش شدت ترک خوردگی

جدول ۷. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) مدل مساحت ترک خوردگی

Table 7. Results of analysis of variance (ANOVA) of the cracking area model

	مجموع مربعات	df	مربع متوسط	F	Sig
سهم مدل	۱۶۴۴۷۷,۴۵۰	۳	۵۴۸۲۵,۸۱۷	۱۴۶,۴۴۸	۰,۰۰۰
نسبت سهم خطا	۸۲۳۶,۱۶۴	۲۲	۳۷۴,۳۷۱	-	-
تغییرات کل	۱۷۲۷۱۳,۶۱۴	۲۵	-	-	-

جدول ۸. نتایج تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره مدل مساحت ترک خوردگی

Table 8. Results of multivariate linear regression analysis of the cracking area model

	مقدار ضرایب	خطای استاندارد	ضریب بتای استاندارد	ضریب همبستگی (R)	مربع ضریب همبستگی (R ²)	مربع ضریب همبستگی تنظیم شده (Adjusted R ²)
ضریب ثابت	-۱۲۵,۶۱۲	۳۹,۶۷۹	-			
دمای محیط (T)	۸,۹۷۶	۰,۹۴۳	۰,۴۴۵			
رطوبت نسبی هوا (R)	-۳,۳۷۶	۰,۱۸۹	-۰,۸۳۶	۰,۹۷۶		
سرعت جریان باد (W)	۶,۸۱۴	۰,۷۸۶	۰,۴۰۵		۰,۹۵۲	۰,۹۴۶

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.
- [2] N.J. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance, Crc Press, 2014.
- [3] Y.H. Huang, Pavement analysis and design, 2004.
- [4] 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.
- [5] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, M. Plamondon, P.

آب انداختگی و تبخیر در زمان ساخت روسازی و همچنین بعد از اجرای آن (تا زمان گیرش نهایی بتن)، می‌توان از افزایش شدت ترک خوردگی‌های خمیری جلوگیری کرده و به دنبال آن از کاهش دوام روسازی در بلند و همچنین کاهش سطح همواری و سرویس‌دهی آن جلوگیری کرد که باعث کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری این روسازی‌ها می‌گردد. بنابراین زمان تعادل می‌تواند معیاری مناسب جهت بررسی اثرات عوامل محیطی مختلف بر شدت ترک خوردگی‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری در سازه‌های بتنی مسطح و به خصوص روسازی‌های بتنی باشد. همچنین نتایج نشان داد که رطوبت نسبی هوا، بیشترین تاثیر را بر زمان تعادل و مساحت ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری دارد. کنترل این عامل محیطی، می‌تواند باعث کاهش شدید ترک خوردگی‌های خمیری در سطح روسازی گردد.

- [15] P.-m. Zhan, Z.-h. He, Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 201 (2019) 676-690.
- [16] W. Dias, Influence of mix and environment on plastic shrinkage cracking, *Magazine of Concrete Research*, 55(4) (2003) 385-394.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] F. Matalkah, Y. Jaradat, P. Soroushian, Plastic shrinkage cracking and bleeding of concrete prepared with alkali activated cement, *Heliyon*, 5(4) (2019) e01514. <https://doi.org/01510.01016/j.heliyon.02019.e01514>.
- [21] R. Combrinck, L. Steyl, W.P. Boshoff, Interaction between settlement and shrinkage cracking in plastic concrete, *Construction and Building Materials*, 185 (2018) 1-11.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] P. Zhao, A.M. Zsaki, M.R. Nokken, Using digital image correlation to evaluate plastic shrinkage cracking in cement-based materials, *Construction and Building Materials*, 182 (2018) 108-117.
- [25] M. Nasir, O.S.B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, Effect Lura, On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 115 (2019) 251-263.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, P. Lura, A poromechanics model for plastic shrinkage of fresh cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 109 (2018) 120-132.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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] S. Senthilkumar, S. Natesan, Prediction of restrained plastic shrinkage cracking in plain cement concrete, Magazine of Concrete Research, 57(9) (2005) 579-587.
- [30] 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.
- [31] 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.
- 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.
- [26] 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.
- [27] P. Turcry, A. Loukili, Evaluation of Plastic shrinkage Cracking of self compacting concrete, (2006).
- [28] 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Ziari, H. Fazaeli, S. J. Vaziri Kang Olyaei, Investigation of Effects of Different Environmental Conditions on Balance Time of Bleeding and Evaporation in Plastic Shrinkage of Concrete Pavements, Amirkabir J. Civil Eng., 53(12) (2022) 5083-5102.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18686.6927



