

# بررسی جمع‌شدگی خمیری بتن‌های حاوی میکروسیلیس

پرویز قدوسی<sup>۱</sup>، امیرمازیار رئیس قاسمی<sup>۲\*</sup>، طیبه پرهیزکار<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران و مشاور مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

۲- پژوهشگر بخش بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

۳- استادیار مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

\* تهران: صندوق پستی ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵

raissghasemi@yahoo.com

(دریافت مقاله: تیر ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۳)

**چکیده** - جمع‌شدگی خمیری مخلوط بتن، یکی از مهمترین پارامترهایی است که در بتن‌ریزی هوای گرم باید مورد توجه قرار گیرد. در صورت انجام ندادن اقدامات پیشگیری کننده، احتمال ترک خوردگی زیاد خواهد بود، بویژه اگر از میکروسیلیس در ساخت بتن استفاده شود. در این تحقیق اثر میکروسیلیس در پدیده آب انداختن و تبخیر آب از سطح مخلوط بتن، بررسی آزمایشگاهی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در جمع‌شدگی مقید، علاوه بر رطوبت نسبی، دما و سرعت باد؛ تشعشع خورشید نیز اثر قابل توجهی در خصوصیات ترک دارد که این موضوع (اثر تشعشع خورشید) در نمودار تخمین شدت تبخیر و ترک خوردگی توصیه شده در ACI 305 R-96 در نظر گرفته شده است.

به‌طور کلی آسیب‌پذیری بتن حاوی میکروسیلیس بیشتر از بتن بدون میکروسیلیس است. با کاهش نسبت آب به سیمان، آسیب‌پذیری بتن حاوی میکروسیلیس محسوس‌تر است. همچنین یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که شدت آسیب فقط تابع مقاومت بتن یا آب انداختن نیست، بلکه تمامی عوامل محیطی مانند تشعشع خورشید و همچنین استفاده از میکروسیلیس نیز می‌تواند موثر باشند.

**کلید واژگان:** جمع‌شدگی خمیری، ترک خوردگی، بتن حاوی میکروسیلیس، عوامل محیطی.

## ۱- مقدمه

جمع‌شدگی خمیری در ساعات اولیه پس از بتن‌ریزی - که بتن حالت خمیری دارد - رخ می‌دهد. این نوع جمع‌شدگی گاهی با ترک خوردگی همراه می‌شود. جمع‌شدگی و ترک‌های مربوط به آن اغلب در بتن‌ریزی مانند دالها ایجاد می‌شود. پدیده ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری در شرایط اقلیمی گرم و خشک بیشتر مشاهده

می‌شود.  
بر اساس نمودار ارائه شده در ACI کمیته ۳۰۵ [۱] چنانچه روند تبخیر بیشتر از  $1 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$  (کیلوگرم آب بر متر مربع سطح بتن در ساعت) باشد احتمال ترک خوردگی در سطح بتن زیاد خواهد بود. مقدار بحرانی ذکر شده بر این مبنا ارائه شده است که در این مقدار، سرعت تبخیر بیشتر از سرعت آب انداختن بوده و بتن

بر مساحت ترک خوردگی افزوده شده است. بر اساس یافته‌های این تحقیق، مقدار بحرانی  $1 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$  برای تبخیر، معیار یگانه‌ای برای تخمین ترک خوردگی نیست. زیرا مخلوط بتن با مقاومت  $23 \text{ MPa}$  حداکثر روند تبخیر  $1/7 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$  داشت، اما ترک در این نوع بتن مشاهده نگردید. علت این پدیده، نسبت زیاد آب به سیمان و در نتیجه وجود آب کافی برای تبخیر است که موجب می‌شود در طول مدت آزمایش، تبخیر بیشتر از آب انداختن نشود.

## ۲- دستورالعمل آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

سنگدانه‌های ریز: سنگدانه‌های ریز مصرفی از نوع طبیعی بوده و دانه‌بندی آن مطابق با منحنی الف شکل ۱ بوده است.

سنگدانه‌های درشت: سنگدانه‌های درشت مصرفی از نوع شکسته و با حداکثر اندازه  $19 \text{ mm}$  میلی‌متر بوده و دانه‌بندی آن مطابق با منحنی ب شکل ۱ بوده است.

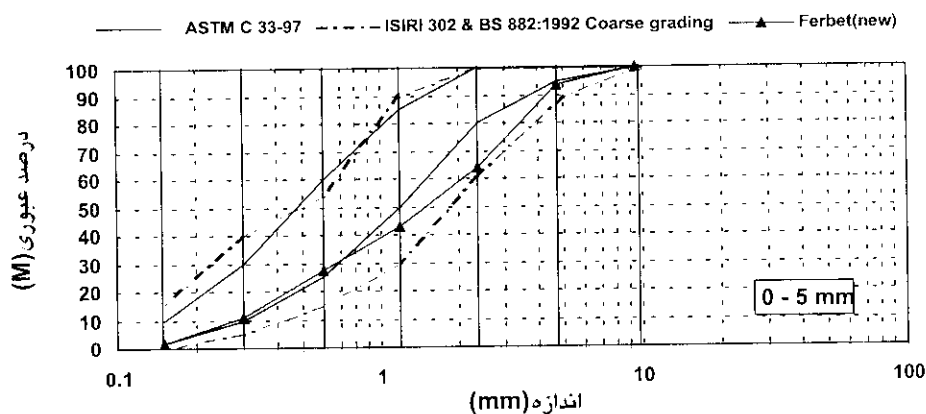
سیمان: سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند نوع ۲ و محصول کارخانه تهران بوده است. مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

ترک می‌خورد. در این نمودار شرایط اقلیمی مانند سرعت باد، رطوبت نسبی و دما و همچنین دمای بتن منظور شده است. اما اثر تشعشع خورشید و خاصیت آب انداختن انواع بتن‌ها بویژه بتن‌های حاوی پوزولان در نمودار  $\text{ACI 305 R-96}$  اعمال نشده است. تأثیر تشعشع مستقیم خورشید بر سرعت تبخیر آب و ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری، از دیدگاه پژوهشگران متفاوت ارزیابی شده است. تحقیق حسینیان و همکاران [۲] نشان می‌دهد که حفاظت بتن از تشعشع مستقیم خورشید، تبخیر را تا  $50\%$  درصد کاهش می‌دهد. ملاتهای آزمایش شده توسط راونیا و شالون [۳] نشان دهنده تبخیر بیشتر در نمونه‌ها در معرض تشعشع است. تحقیق انجام شده توسط وان دیجک و بودمن [۴] نیز نشان می‌دهد که هر چند تشعشع سبب افزایش دما در سطح بتن و روند تبخیر می‌شود، اما هیدراتاسیون سیمان تسریع شده و مقاومت سطح بتن افزایش می‌یابد. بر اساس این پدیده، دالهای ساخته شده در سایه، ترکهای بیشتری نسبت به دالهای ساخته شده در زیر نور آفتاب نشان دادند.

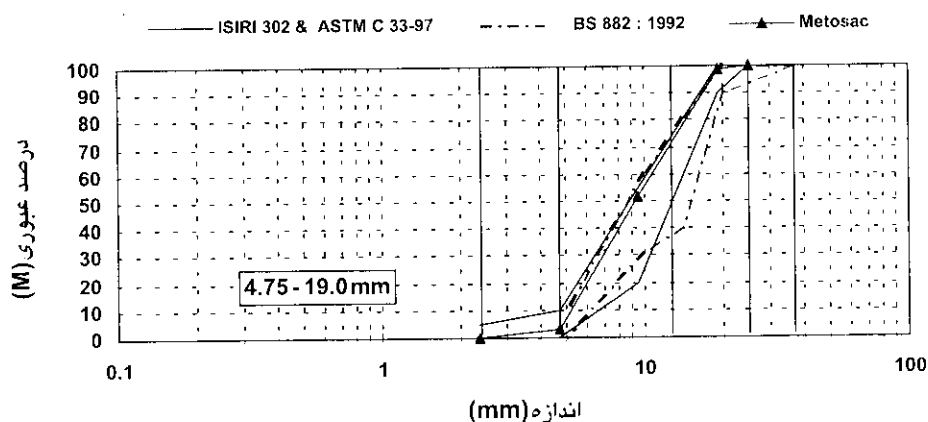
اثر نوع بتن در ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری توسط سلمان و همکاران [۵] بررسی شده است. نتایج این تحقیقات نشان داده که مقاومت بتن، تأثیر مهمی بر ترک خوردگی دارد و با افزایش مقاومت فشاری بتن،

جدول ۱ تجزیه شیمیایی سیمان و میکروسلیس

سیمان	ترکیب شیمیایی (%)	میکروسلیس	سیمان	ترکیب شیمیایی (%)	میکروسلیس	سیمان	ترکیب شیمیایی (%)
۵۲/۷۴	$\text{C}_3\text{S}$	۰/۶	۳/۴	$\text{MgO}$	۹۵/۱	۲۰/۹۶	$\text{SiO}_2$
۲۰/۳۱	$\text{C}_2\text{S}$	۱/۰۲	۶۱/۸۸	$\text{CaO}$	۰/۶	۴/۲	$\text{Al}_2\text{O}_3$
۳/۳۵	$\text{C}_3\text{A}$	۱/۲	۱/۷۹	$\text{SO}_3$	۱/۱	۴/۶	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
۱/۴۷	$\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$						



الف) منحنی دانه بندی سنگدانه های ریز



ب) منحنی دانه بندی سنگدانه های درشت

شکل ۱ منحنی دانه بندی مصالح سنگی

می‌شوند. گروه اول مخلوطهایی است که در معرض شرایط طبیعی اقلیمی و با مقدار تبخیر متغیر قرار داشتند و گروه دوم مخلوطهایی که در معرض شرایط کنترل شده و با مقدار تبخیر ثابت قرار گرفتند. نسبت مخلوطها در جدول ۲ ارائه شده است.

میکروسیلیس : میکروسیلیس مصرفی تولید کارخانه ازنا در ایران و دارای مشخصات شیمیایی جدول ۱ بوده است. فوق روان کننده: فوق روان کننده مورد استفاده دارای نام تجاری MELCRETE 101 F است.

## ۲-۲- نسبت مخلوطها

در این پروژه، مخلوطهای ساخته شده به دو گروه تقسیم

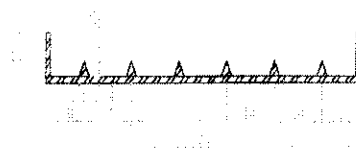
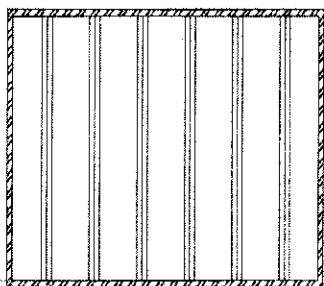
جدول ۲ نسبت اجزاء مخلوطهای بتن

گروه مخلوط	معرف مخلوط	سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )	میکروسلیس ( $\text{kg/m}^3$ )	آب ( $\text{kg/m}^3$ )	شن ( $\text{kg/m}^3$ )	ماسه ( $\text{kg/m}^3$ )	نسبت آب به سیمان	فوق روان کننده (درصد وزن سیمان)
گروه اول	BC	۴۰۰	-	۱۶۸	۱۰۵۰	۷۶۰	۰/۴۲	۰/۲۰
	BM	۳۷۲	۲۸	۱۶۸	۱۰۵۰	۷۶۰	۰/۴۲	۰/۶۰
گروه دوم	C40	۴۰۰	-	۱۶۰	۹۳۳	۸۲۷	۰/۴۰	۰/۵۰
	M40	۳۷۲	۲۸	۱۶۰	۹۳۳	۸۲۷	۰/۴۰	۱/۰
	C55	۴۰۰	-	۲۲۰	۷۹۷	۸۶۳	۰/۵۵	-
	M55	۳۷۲	۲۸	۲۲۰	۷۹۷	۸۶۳	۰/۵۵	-
	C65	۴۰۰	-	۲۶۰	۷۳۸	۹۰۲	۰/۶۵	-
	M65	۳۷۲	۲۸	۲۶۰	۷۳۸	۹۰۲	۰/۶۵	-

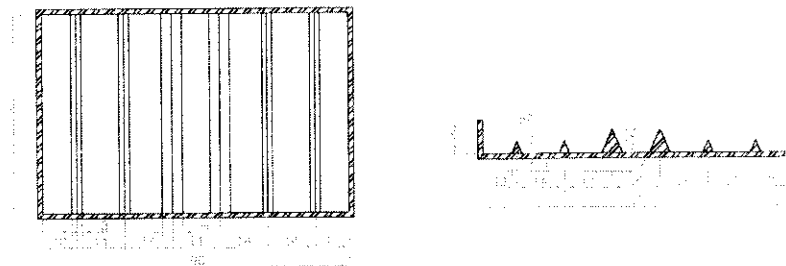
در شکل ۲ پلان و مقطع قالبها نشان داده شده است. ایجاد قید برای شبیه‌سازی جمع‌شدگی خمیری از نوع مقید است. این نوع جمع‌شدگی با شرایط واقعی مطابقت بیشتری دارد [۶] برای اندازه‌گیری مقدار تبخیر و آب انداختن از بلوک  $200 \times 100 \text{ mm}$  به ضخامت  $100 \text{ mm}$  استفاده شده است.

### ۲-۳- ساخت نمونه‌ها

برای تعیین مشخصات ترکها، از دالی به ابعاد  $900 \text{ mm} \times 600$  و به ضخامت  $100 \text{ mm}$  استفاده شد. در کف قالب از قطعاتی با مقطع مثلث شکل برای ایجاد قید استفاده شد. برای مخلوطهای گروه اول از قالبی با قیدهایی به اندازه‌های مختلف و برای مخلوطهای گروه دوم از قالب با قیدهایی به اندازه‌های مساوی استفاده شد.



شکل ۲- الف مورد استفاده در مخلوطهای گروه اول



شکل ۲ - ب قالب مورد استفاده در مخلوطهای گروه دوم

شکل ۲ پلان و مقطع قالب‌های دال

و حرف M نشان دهنده استفاده از میکروسیلیس است. در گروه دوم، اعداد، ۴۰، ۵۵ و ۶۵ به معنی مقدار آب بر حسب درصد مقدار سیمان است. مخلوطهای گروه اول در شرایط طبیعی قرار داشت و به همین دلیل شرایط محیطی مانند دما، رطوبت نسبی و سرعت باد در طول مدت آزمایش متغیر بوده است.

## ۲-۴- شرایط در معرض قرارگیری نمونه‌ها

شرایط در معرض قرارگیری انواع مخلوطهای بتن در جدول ۳ نشان داده شده است. حرف S در مخلوطهای گروه اول نشان دهنده در معرض تشعشع خورشید، حرف II به معنی در معرض سایه و حرف L به مفهوم شرایط آزمایشگاهی است. همچنین حرف C به معنی بتن شاهد

جدول ۳ شرایط نگهداری نمونه‌ها

سرعت باد (km/h)	رطوبت نسبی (%)	دمای محیط (°C)	معرف مخلوط	گروه مخلوط
۳-۰	۲۴ ± ۲	۳۹ ± ۲	BCS	گروه اول
۳-۰	۲۴ ± ۲	۳۹ ± ۲	BMS	
۵-۰	۲۷ ± ۲	۳۰ ± ۲	BCH	
۳-۰	۲۷ ± ۲	۳۰ ± ۲	BMII	
-	۲۹ ± ۲	۲۵ ± ۲	BCL	
۱۲	۲۰	۴۰	C40	گروه دوم
۱۲	۲۰	۴۰	M40	
۱۲	۲۰	۴۰	C55	
۱۲	۲۰	۴۰	M55	
۱۲	۲۰	۴۰	C65	
۱۲	۲۰	۴۰	M65	

## ۲-۵- شرح آزمایشها

عدم ایجاد ترک، بر اساس سرعت تبخیر و سرعت آب انداختن تعیین می‌شود و چنانچه این تحقیق بر این اساس انجام می‌گردد و قالبها بدون قید ساخته می‌شوند. نتایج تحقیق و حتی روش تحقیق با پژوهش انجام شده توسط سامان و همکاران [۵] نزدیک می‌شد.

بنابراین فلسفه تحقیق بر این اصل استوار شد که در تمام دالها، ترک خوردگی رخ می‌دهد و مبنای آسیب پذیری، خصوصیات ترکها و زمان ترک خوردگی در نظر گرفته شد.

در این تحقیق مخلوطها در دو نوع شرایط محیطی، بررسی شدند. گروه اول در معرض شرایط محیطی طبیعی و با تبخیرهای متغیر بودند. زمان این مرحله از پژوهش، تابستان بوده است. فلسفه انجام این مرحله، ارزیابی دقت شدت تبخیر تخمین زده شده بر اساس نمودار  $ACI$  305 R-96 است. همچنین اثر استفاده از میکروسیلیس در شدت آسیب پذیری مشخص شود. از طرف دیگر اثر تشعشع نور خورشید و سایه در خصوصیات ترکها بررسی شود.

مخلوطهای گروه دوم، دارای نسبتهای مختلف آب به سیمان بوده و در معرض تبخیر یکسان قرار گرفتند. بدین ترتیب اثر نسبتهای مختلف آب به سیمان و اثر وجود میکروسیلیس در خصوصیات ترک خوردگی مشخص شد.

## ۳-۱- مخلوطهای گروه اول - شرایط

### اقلیمی طبیعی (تبخیر متغیر)

#### الف) مشخصات بتن تازه

مشخصات بتن تازه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوطهای گروه اول در جدول ۴ نشان داده شده است. دمای بتن ارائه شده، دمای بتن قبل از شروع آزمایش (پس از بتن ریزی) است.

• عرض ترک، عرض ترکها در سطح دال در فواصل زمانی مختلف در طول مدت آزمایش به وسیله دستگاه میکروسکوپ با دقت ۰/۲ میلیمتر اندازه‌گیری شد.

• طول ترک، طول ترکها در سطح دال در فواصل زمانی مختلف در طول مدت آزمایش توسط متر با دقت ۱ میلیمتر اندازه‌گیری شد.

• مقدار تبخیر، برای اندازه‌گیری مقدار تبخیر در فواصل زمانی مختلف در طول مدت آزمایش، مقدار کاهش وزن، بتن با ترازو و دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری گردید.

• مقدار آب انداختن، برای اندازه‌گیری مقدار آب انداختن، مخلوطهای بتن در قالب  $100 \times 100 \text{ mm}$  در شرایط رطوبت ۱۰۰ درصد و دمای  $20 \times$  درجه قرار داده شدند و سپس در زمانهای مختلف توسط پیست آب ناشی از آب انداختن استخراج و اندازه‌گیری شد.

انتخاب شرایط رطوبت کنترل شده (۱۰۰ درصد رطوبت) به این دلیل بوده است که تبخیر به حداقل برسد تا اندازه‌گیری مقدار آب ناشی از آب انداختن امکان پذیر باشد. برای کاهش تبخیر به حداقل ممکن، بر سطح قالب ورق پلاستیک نیز قرار داده شد.

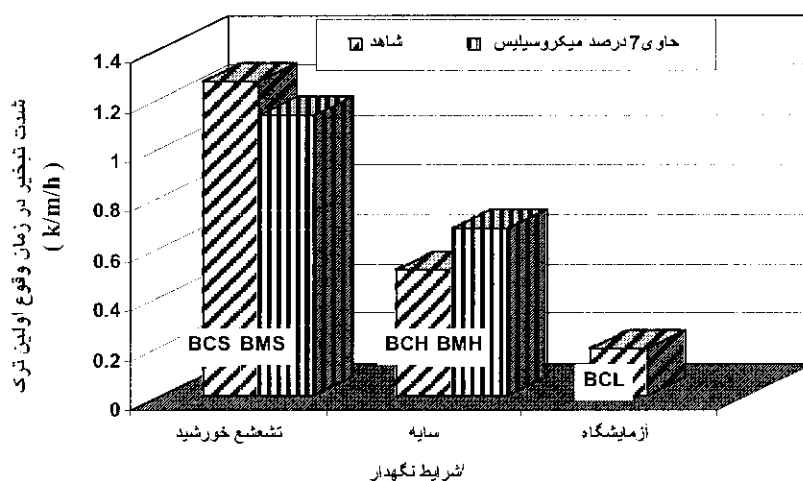
## ۳- نتایج و تفسیر

به‌طور کلی به علت وجود قید در کف تمامی قالبها، بروز ترک حتمی است (دلیل ایجاد قید، تطابق بیشتر آزمایش با شرایط واقعی بوده است).

از طرف دیگر، استفاده از قالبهای بدون قید احتمالاً موجب ایجاد ترک در برخی از دالها می‌شد و دردیگر دالها ترکی مشاهده نمی‌شد. زیرا مرز بین ترک خوردگی و

جدول ۴ مشخصات بتن تازه مخلوطهای گروه اول

معرف مخلوط	دمای بتن (°C)	اسلامپ (cm)	وزن مخصوص بتن تازه (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (MPa)
BCS	۲۶/۰	۶/۰	۲۳۷۰	۳۵/۵
BMS	۲۸/۵	۴/۰	۲۳۵۹	۴۴/۵
BCH	۲۷/۵	۶/۰	۲۳۶۵	۴۴
BMH	۲۶/۸	۶/۰	۲۳۳۴	۴۸/۵
BCL	۲۷/۵	۶/۰	۲۳۷۶	-



شکل ۳ حداکثر شدت تبخیر مخلوطهای گروه اول

را نشان می‌دهد که با یافته این بخش تحقیق مطابقت ندارد. شدت تبخیر دال در شرایط آزمایشگاهی BCL کمترین مقدار را نشان داد. این میزان با مقدار تخمین نمودگرام مطابقت دارد و به نظر می‌آید اثر سرعت باد و دیگر شرایط محیطی بر شدت تبخیر در نمودگرام ACI 305 R-96 کمتر از حد واقعی در نظر گرفته شده است.

#### پ) مشخصات ترکها

جدول ۵ مشخصات ترکها را در مخلوطهای گروه اول نشان می‌دهد. این نتایج بر اساس آخرین قرائت اندازه گیری شده (زمان گیرش بتن) حاصل شده است.

#### ب) شدت تبخیر

شدت تبخیر مخلوطها در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شدت تبخیر در دالهایی که در معرض تشنش خورشید (BMS, BCS) قرار داشتند، حدود ۲ برابر شدت تبخیر دالهای در معرض سایه (BMH, BCH) است. این یافته کاملاً با نتایج حسینیان و همکاران [۲] مطابقت دارد. از طرف دیگر در نمودگرام ACI 305 R-96 اثر تشنش خورشید در نظر گرفته نشده است. با مراجعه به نمودگرام ACI و با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی در این آزمایش، مشاهده می‌شود که مقدار تخمین تبخیر در نمودگرام کمتر از ۰/۵ kh/m<sup>2</sup>/h

جدول ۵ مشخصات ترکها در مخلوطهای گروه اول

مدت بروز اولین ترک (دقیقه)	حداکثر شدت تبخیر آب (kg/m <sup>2</sup> /h)	مساحت ترک (mm <sup>2</sup> )	حداکثر عرض ترک (mm)	کل طول ترکها (mm)	تعداد ترک	معرف مخلوط
۶۰	۱/۲۷	۸۶۴	۰/۷۲	۱۲۰۰	۲	BCS
۴۵	۱/۴۰	۵۱۶	۰/۴۳	۱۲۰۰	۲	BMS
۷۵	۰/۶۵	۱۰۰۸	۰/۸۴	۱۲۰۰	۲	BCH
۶۵	۰/۶۸	۸۶۴	۰/۷۲	۱۲۰۰	۲	BMH
۲۰۵	۰/۲۴	۳۰۰	۰/۵	۶۰۰	۱	BCL

تبخیر بیشتر از ۱/۰ kg/m<sup>2</sup>/h باشد، ترک خوردگی رخ می‌دهد. هر چند وجود قید با ارتفاع نسبتاً زیاد، خود می‌تواند عامل ترک خوردگی حتی در شدت کم تبخیر شده باشد.

برای بررسی بهتر موضوع ذکر شده، مقادیر اندازه گیری شده تبخیر و شرایط واقعی با مقادیر توصیه شده در نمودار ACI 305 R-96 در جدول ۶ مقایسه شده است.

از مقایسه نتایج جدول ۶ دو نکته مشاهده می‌شود. شدت تبخیر تخمین زده شده، کمتر از مقادیر واقعی است. به عبارت دیگر نمودار ACI 305 R-96 برای تخمین دقیق نیست و شرایط محیطی مانند تشعشع خورشید در نمودار در نظر گرفته نشده است. از طرف دیگر مقدار بحرانی تبخیر ۱ kg/m<sup>2</sup>/h نیست، بلکه مقادیر بحرانی، بسته به شرایط محیطی مانند سایه بودن، تابش تشعشع

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، عرض ترک در مخلوطهایی که در معرض تشعشع خورشید بوده‌اند (BMS, BCS) کمتر از مخلوطهای مشابهی است که در معرض سایه بوده‌اند (BMH, BCH). این یافته کاملاً با نتایج وان دیجک و بودمن [۴] مطابقت دارد. این پدیده ناشی از آن است که هر چند تشعشع سبب افزایش دما در سطح بتن و روند تبخیر می‌شود، اما هیدراتاسیون، تسریع شده و مقاومت سطح بتن افزایش می‌یابد. بر همین اساس عرض ترک در دالهایی که در سایه بودند نسبت به دالهای در معرض نور خورشید، بیشتر است.

نتیجه آزمایش مخلوط BCL نشان می‌دهد که با وجود مقدار کم تبخیر با شدت ۰/۱۹ kg/m<sup>2</sup>/h ترک خوردگی رخ می‌دهد، هر چند طول و عرض ترک کم باشد. این یافته با توصیه و نمودار ACI 305 R-96 مطابقت ندارد. بر اساس توصیه ACI، چنانچه شدت

جدول ۶ مقایسه شدت تبخیر به شرایط واقعی و مقایسه آن بر اساس نمودار

شدت واقعی تبخیر (kg/m <sup>2</sup> /h)	شدت تبخیر بر اساس نمودار ACI (kg/m <sup>2</sup> /h)	معرف مخلوط
۱/۲۷	۰/۳	BCS
۱/۴۰	۰/۴	BMS
۰/۶۵	۰/۴	BCH
۰/۶۸	۰/۴	BMH
۰/۲۴	۰/۲	BCL



مقاومت بتن، از مقدار شدت بحرانی تبخیر کم می‌شود. در حالی که مقاومت بتن‌های در معرض تشعشع خورشید (BMS, BSC) در مقایسه با بتن‌های در معرض سایه (BMH, NCH) تقریباً یکسان است (جدول ۷). از طرف دیگر مقاومت BCS کمتر از مقاومت BMS است. در حالی که شدت آسیب بتن BMS بیشتر از BCS است. بنابراین رابطه ارائه شده توسط آنو [۶] که با کاهش مقاومت، مقدار بحرانی تبخیر کاهش می‌یابد، حداقل برای جمع‌شدگی خمیری مقید شده صحت ندارد.

### ۳-۲- مخلوطها در شرایط اقلیمی کنترل شده (شدت ثابت تبخیر)

در این مرحله از تحقیق، مخلوطها در معرض شدت ثابت تبخیر قرار داده شد، تا شدت تبخیر به  $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  برسد. این مقدار تبخیر با شدت تبخیر بحرانی اعلام شده با ACI 305 R-96 مطابقت دارد. دلیل انتخاب این مقدار تبخیر، بررسی خصوصیات ترکها با تبخیر ثابت در مخلوطها با نسبتهای مختلف آب به سیمان بوده است.

#### الف) مشخصات بتن تازه

مشخصات بتن تازه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوطهای گروه دوم در جدول ۷ ارائه شده است.

#### ب) مشخصات ترکها

مشخصات ترکها در جدول ۸ ارائه شده است.

مقایسه خصوصیات ترکها در مخلوطهای C40 و M40 نشان می‌دهد که وجود میکروسیلیس اثر قابل توجهی بر حداکثر عرض ترک و مساحت ترک دارد. همچنین فاصله زمانی تا بروز اولین ترک در مخلوط حاوی میکروسیلیس کوتاهتر بوده است. همین تفاوتها بین بتن حاوی میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس در مخلوطها با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ و ۰/۶۵ نیز مشاهده می‌شود، اما اختلافها نسبت به مخلوط با نسبت

خورشید متفاوت خواهد بود. به عبارت دیگر در مواردی که جمع‌شدگی خمیری از نوع مقید باشد، مقدار بحرانی شدت تبخیر بسیار کمتر از مقدار بحرانی توصیه شده در ACI است. حتی در شدت تبخیر به مقدار  $0.24 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  (در مورد مخلوط BCL)، ترک خوردگی رخ می‌دهد.

مقایسه نتایج (جدول ۵) بتن‌های حاوی میکروسیلیس (BMS, BMH) و بتن‌های نظیر بدون میکروسیلیس (BSC, BCL) نشان می‌دهد که مقدار بحرانی تبخیر چندان تفاوت ندارد. حتی حداکثر عرض ترک و مساحت ترک در مخلوطهای حاوی میکروسیلیس کمتر از مخلوطهای نظیر بدون میکروسیلیس است. آسیب پذیر بودن مخلوط حاوی میکروسیلیس فقط در زمان شروع ترک کمتر از مخلوطهای بدون میکروسیلیس است. ظاهراً این یافته به این دلیل است که شدت آب انداختن حاوی میکروسیلیس کمتر از بتن بدون میکروسیلیس است، اما ظاهراً به دلیل مقاومت کششی بیشتر در بتن حاوی میکروسیلیس اثر یکدیگر را تا حدودی جبران می‌کنند.

بدون کلی، در جمع‌شدگی خمیری مقید شده در هر مقدار تبخیر و در تمام مخلوطها (حاوی میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس)، ترک خوردگی رخ می‌دهد و فقط زمان ترک خوردگی متغیر است. علت این پدیده این است که در هنگام شدت کم تبخیر، برای آنکه مقدار تبخیر بیشتر از مقدار آب انداختن باشد، زمان بیشتری نیاز است. برای مثال در مورد مخلوط BCL با شدت تبخیر  $0.24 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  مدت ۲۰۵ دقیقه طول کشید تا ترک خوردگی بروز کند.

از طرف دیگر، با وجود یکسان بودن مخلوطها، از نظر نسبت اجزای مخلوطها و به دلیل وجود قید، در تمام مخلوطها، ترک خوردگی رخ داده است. در نتیجه رابطه ارائه شده توسط آنو [۶] با یافته‌های این پروژه نفاذ می‌شود. زیرا آنو [۶] رابطه بین مقدار بحرانی تبخیر با مقاومت بتن را ارائه داده است. که بر اساس آن با افزایش

جدول ۷ مشخصات بتن در مخلوطهای گروه دوم

مقاومت فشاری (MPa)	وزن مخصوص بتن تازه ( $\text{kg/m}^3$ )	اسلامپ (cm)	دمای بتن ( $^{\circ}\text{C}$ )	معرف مخلوط
۶۲	۲۳۵۴	۷/۰	۱۷	C40
۶۳	۲۳۱۸	۸/۵	۱۹/۵	M40
۵۱	۲۳۱۳	۱۲/۵	۱۷/۲	C55
۵۳	۲۳۰۵	۱۱/۵	۲۱	M55
۴۱	۲۳۴۰	۲۰	۱۷/۲	C65
۴۳	۲۳۲۱	۱۴	۱۷/۱	M65

جدول ۸ مشخصات ترکها در مخلوطهای گروه دوم

مدت بروز اولین ترک (دقیقه)	مساحت ترک ( $\text{mm}^2$ )	حداکثر عرض ترک (mm)	کل طول ترکها (mm)	تعداد ترک	معرف مخلوط
۱۴۵	۱۲۰۰	۱/۲۰	۱۲۰۰	۲	C40
۱۲۰	۱۵۸۶	۲/۲۰	۸۰۰	۲	M40
۱۶۵	۱۱۷۰	۱/۰	۱۲۰۰	۲	C55
۱۵۰	۱۳۴۰	۱/۱۰	۱۶۰۰	۲	M55
۲۴۵	۱۱۰۰	۱/۷۰	۶۰۰	۱	C65
۲۳۵	۱۲۷۸	۲/۲۰	۶۰۰	۱	M65

افزایش نسبت آب به سیمان از مساحت ترکها کاسته شده است. این پدیده در بتن حاوی میکروسیلیس محسوستر است.

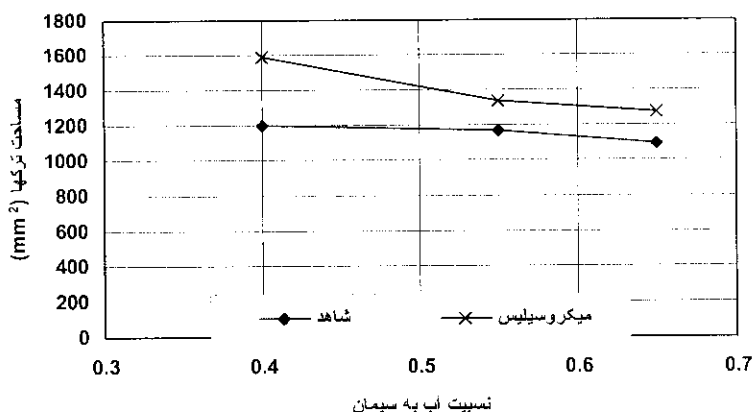
همچنین ملاحظه می شود که در نسبت آب به سیمان ۰/۴، مساحت ترکها در بتن حاوی میکروسیلیس و بتن بدون میکروسیلیس، اختلاف بیشتری دارد.

ت) اثر نسبت آب به سیمان بر زمان شروع ترکها  
اثر نسبت آب به سیمان بر زمان شروع ترک خوردگی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با کاهش نسبت آب به سیمان، از زمان شروع ترک خوردگی کاسته می شود. در نسبت آب به سیمان کم (۰/۴) اختلاف زمان شروع ترک خوردگی در بتن حاوی میکروسیلیس و بتن بدون میکروسیلیس محسوستر است.

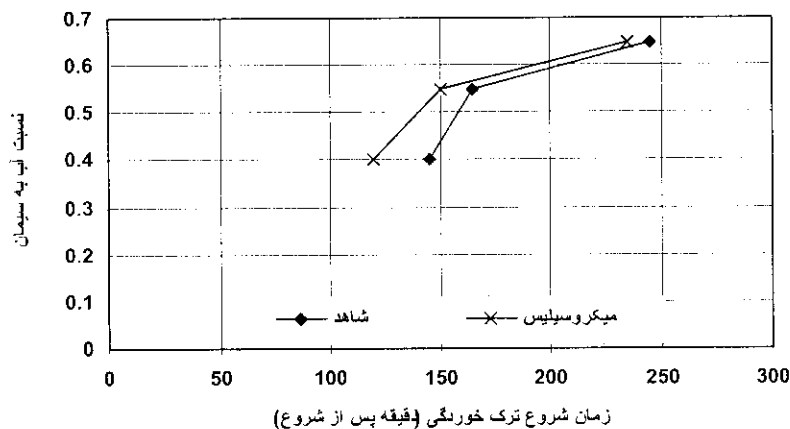
آب به سیمان ۰/۴۰ کمتر است. این یافته نشان می دهد که در نسبت آب به سیمان کم، آسیب پذیری بتن حاوی میکروسیلیس بیشتر است.

مقایسه تعداد ترکها در دالهای مختلف نشان می دهد که افزایش نسبت آب به سیمان، موجب کاهش تعداد ترکها شده است؛ اما حداکثر عرض ترک تقریباً در تمامی مخلوطها برابر است. این یافته نشان می دهد که در مخلوطهای با نسبت کم آب به سیمان، از تعداد ترکها کاسته می شود، اما برای آزاد شدن انرژی جمع شدگی، عرض ترک در حد قابل ملاحظه ای خواهد بود.

پ) اثر نسبت آب به سیمان بر مساحت ترکها  
اثر نسبت آب به سیمان بر مساحت ترکها در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با



شکل ۴ اثر نسبت آب به سیمان در مساحت ترکها



شکل ۵ اثر نسبت آب به سیمان در زمان شروع ترک خوردگی

بدون اعمال روش پیشگیری و با روش پیشگیری از ترک مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تعداد ترکها، مساحت ترک و مدت بروز اولین ترک با استفاده از روش پیشگیری به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. به عبارت دیگر استفاده از آب سرد و کاهش دمای بتن می‌تواند آسیب پذیری مخلوط بتن را کاهش دهد. اما به‌طور کامل آسیب دیدگی را حذف نمی‌کند. در روش دوم برای جلوگیری از ترک خوردگی، از پوشش پلاستیک استفاده شد. بلافاصله پس از ساخت مخلوط و

#### ث) روشهای جلوگیری از ترک خوردگی

برای جلوگیری از ترک خوردگی دو روش متداول، برای مخلوط C40 بررسی شد. روش اول، کاهش دمای بتن با استفاده از آب سرد و روش دوم، استفاده از پوشش پلاستیک برای کاهش تبخیر است. به منظور انجام روش اول، ابتدا آب مخلوط بتن سرد شد تا به دمای ۴ °C برسد. پس از مخلوط کردن آب با اجزای بتن، دمای بتن به ۱۳ °C رسید. در جدول ۹ خصوصیات ترک برای مخلوط C40

جدول ۹ مشخصات ترکها در مخلوط C40 با اعمال روش پیشگیری از ترک

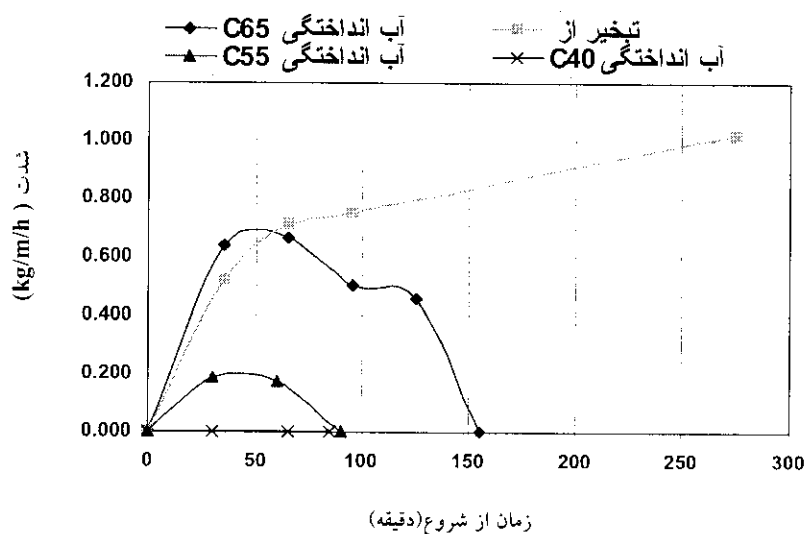
مدت بروز اولین ترک (دقیقه)	مساحت ترک (mm)	حداکثر عرض ترک (mm)	کل طول ترکها (mm)	تعداد ترک	معرف مخلوط
۱۴۵	۱۲۰۰	۱/۲۰	۱۲۰۰	۲	C40 بدون اعمال روش پیشگیری از ترک
۲۶۰	۵۴۶	۱/۱۰	۶۰۰	۱	C40 با اعمال روش (۱) پیشگیری از ترک

امکان‌پذیر نبود. زیرا به محض آب انداختن، آب از سطح بتن تبخیر می‌شد. بر همین اساس، نمونه‌ها در ابعاد کوچکتر (۱۰۰×۱۰۰×۲۰۰) ساخته شده و در شرایط کنترل شده (۱۰۰ درصد رطوبت نسبی و دمای ۲۰ درجه) همراه با پوشش پلاستیک قرار داده شد. بدین ترتیب امکان جمع‌آوری آب ناشی از آب انداختن فراهم شد. شکل ۶ شدت تبخیر و شدت آب انداختن مخلوطهای C40, C55 و C60 را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، شدت آب انداختگی به ترتیب از مخلوطهای C60, C55 و C40 کاسته شده است. به همین دلیل است که با کاهش آب انداختن به شدت آسیب دیدگی مخلوطها افزوده شده است.

ریختن آن در دال و ویبره کردن، ورق پلاستیک کاملاً بر سطح بتن پوشش داده شد. برای اطمینان از کاهش تبخیر، ورق پلاستیک بر روی لبه‌های قالب بدون هیچگونه منفذی، نصب شد. نتایج نشان می‌دهد که دال در طول مدت آزمایش ترک نمی‌خورد. به عبارت دیگر استفاده از ورق پلاستیک روش موثری برای پیشگیری از ترک خوردگی است.

### ج) شدت آب انداختگی

برای اندازه‌گیری شدت آب انداختن مخلوطها ضرورت داشت که آب از روی سطح مخلوطها با پیست جمع‌آوری و وزن آن اندازه‌گیری شود. اما در هنگامی که دالها در شرایط فرآیند تبخیر بودند، انجام این آزمایش



شکل ۶ مقایسه شدت تبخیر و شدت آب انداختن انواع مخلوطها

نیست، بلکه تمامی عوامل محیطی مانند تشعشع خورشید و همچنین استفاده از میکروسیلیس نیز مؤثر است. -از دو روش پیشگیری ترک خوردگی، شامل استفاده از آب سرد در مخلوط و استفاده از پوشش پلاستیک بر روی سطح بتن، روش حفاظت سطح بتن با استفاده از ورق پلاستیک در کاهش آسیب پذیری مؤثرتر است.

### ۵- منابع

- [1] ACI 305 R-96; "Hot Weather Concreting"; Manual of Concrete Practice, Part 2, American Concrete Institute; Detroit, 1996.
- [2] Hasanian, G.S.; Khallaf, T.A.; Mahmood, K.; "Water Evaporation from Freshly Placed Concrete in Hot Weather"; Cement and Concrete Research; Vol. 19; 1989; 465-475.
- [3] Ravina, D.; "Plastic Shrinkage Cracking"; ACI Journal; Proceedings April 1968; 282-291.
- [4] Van Dijk, J.; Boardman, V.R.; "Plastic Shrinkage Cracking of Concrete"; Rilem International Symposium on Concrete and Reinforced Concrete in Hot Countries; 1971; 225-239.
- [5] Samman, T.A.; Mirza, W.H.; Wafa F.F.; "Plastic Shrinkage Cracking of Normal and High-Strength Concrete: A Comparative Study"; ACI Materials Journal; V.93; No-1; 1996; 36-40.
- [6] Uno, P.J.; "Plastic Shrinkage Cracking and Evaporation Formulas"; ACI Materials Journal; V.95; No. 4; 1998; 365-375.

### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج و یافته‌های به‌دست آمده در این تحقیق - که بر اساس جمع‌شدگی خمیری مقید بوده است - می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت.

- در جمع‌شدگی مقید، علاوه بر رطوبت نسبی، دما و سرعت باد، تشعشع خورشید نیز اثر قابل توجهی بر خصوصیات ترک دارد. شدت تبخیر دالها در معرض تشعشع خورشید در حدود ۲ برابر شدت تبخیر دالها در معرض سایه بوده است. از طرف دیگر حداکثر عرض ترک در دالهایی که در معرض تشعشع خورشید بوده‌اند کمتر از مخلوطهای مشابهی است که در معرض سایه بوده‌اند.

- اثر تشعشع خورشید و سایه در نمودار تخمین شدت تبخیر و خطر ترک خوردگی ACI 305 R-96 با مقادیر به‌دست آمده در این تحقیق تطابق ندارد که نشان دهنده دقت کم نمودار ACI است. اشکال دیگر نمودار ACI در این است که دمای محیط بیشتر از ۳۵°C را در نظر نگرفته است.

- نسبت آب به سیمان در شدت آسیب‌دیدگی بر اساس خصوصیات ترکها نقش مهمی دارد. با افزایش نسبت آب به سیمان، از شدت آسیب دیدگی و مساحت ترکها کاسته می‌شود. زیرا، کاهش نسبت آب به سیمان، سبب کاهش آب انداختن می‌شود، در نتیجه شدت تبخیر بیشتر از شدت آب انداختن می‌شود.

- به‌طور کلی آسیب‌پذیری بتن حاوی میکروسیلیس بیشتر از بتن بدون میکروسیلیس است و با کاهش نسبت آب به سیمان، آسیب‌پذیری بتن حاوی میکروسیلیس محسوستر است.

- شدت آسیب فقط تابع مقاومت بتن یا آب انداختن