

## ارزیابی مکانیزم فشار منافذ مویینه و مقاومت کششی مخلوط‌های بتنی تازه حاوی انواع افزودنی‌های معدنی تحت جمع‌شدگی خمیری

پرویز قدوسی\*

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

علی اکبر شیرزادی جاوید

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مازیار زرعی چیان

دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

ترک‌های خمیری در ساعات اولیه پس از بتن ریزی به علت تبخیر آب از سطح بتن ایجاد می‌شود. هدف این تحقیق بررسی ارتباط رشد فشار منافذ مویینه، مقاومت کششی در سنین اولیه و کرنش ناشی از جمع‌شدگی خمیری می‌باشد. در این رابطه دستگاه اندازه‌گیری فشار منافذ مویینه برای اولین بار در کشور ساخته شد و در مرحله‌ی ثبت اختراع می‌باشد. هشت نمونه بتن در دو دسته معمولی و خودتراکم شامل نمونه‌های بدون مواد جایگزین سیمان و نمونه‌های حاوی مواد پوزولانی ساخته شد. نتایج نشان می‌دهد که ارتباط مناسبی میان فشار منافذ مویینه و کرنش جمع‌شدگی خمیری وجود ندارد و سایر پارامترها مانند رشد مقاومت کششی می‌تواند نقش مهمی در حالت خمیری بتن ایفا کند. البته میان زمان شروع جمع‌شدگی و شروع منفی شدن فشار مویینه ارتباط مناسبی بر این تمامی نمونه‌ها برقرار می‌باشد. نتایج همچنین بیانگر تأثیر مثبت مقاومت کششی سنین اولیه در کنترل ترک‌های خمیری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، کرنش جمع‌شدگی خمیری، مقاومت کششی سنین اولیه، فشار منافذ مویینه.

\* نویسنده مسئول: ghoddousi@iust.ac.ir

## ۱- مقدمه

نرخ تبخیر آب از سطح بتن و میزان آب انداختگی از عواملی هستند که به طور مستقیم بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری تأثیر گذار هستند. از عوامل دیگر می توان به زمان گیرش، چگونگی اجرا و تاثیر اجزای بتن از قبیل میزان استفاده از مواد مکمل سیمانی از قبیل میکروسیلیس و متاکاؤلین، نسبت آب به سیمان، مقدار خمیر سیمانی و استفاده از الیاف اشاره کرد [۱].

تا کنون تحقیقات زیادی بر روی تاثیر عوامل مختلف از قبیل اجزای بتن بر ترکهای خمیری انجام گرفته است، برای مثال المسلم و همکاران [۵] تأثیر نسبت آب به سیمان را بر ترکها بررسی کردند و دریافتند که میزان ترکها با نسبت آب به سیمان رابطه مستقیم دارد و اعلام کردند که این نتیجه ممکن است به دلیل تأثیر مقامت کششی و یا به دلیل رشد فشار مویینه در مقابل افزایش نسبت آب به سیمان باشد. قدوسی و همکاران [۶] با ارزیابی اثر میکروسیلیس بر ترکها، به اثر مثبت آن بر کاهش مساحت ترکها دست یافتند و در نتایج خود دلیل این بهبود را تأثیر میکروسیلیس بر رشد سریع تر مقاومت کششی اعلام کردند. ترکی و همکاران [۷] با مقایسه بتن های خودتراکم و معمولی در دو نرخ تبخیر دریافتند زمانی که نرخ تبخیر پایین می باشد جمع شدگی خمیری بتن خودتراکم نسبت به نمونه بتن معمولی به دلیل کمتر بودن آب انداختگی بیشتر می باشد در حالی که هیچ اثری از ترک خوردگی در هر دو نمونه دیده نشد. در نرخ تبخیر بالا میزان جمع شدگی خمیری تقریباً در هر دو نمونه یکسان بود در حالی که ترک خمیری در بتن معمولی در مقایسه با بتن خودتراکم زودتر و با مساحت بیشتری ایجاد شدند. این محققان دلیل این رخداد را ظرفیت کششی بالاتر نمونه های خودتراکم بیان نمودند.

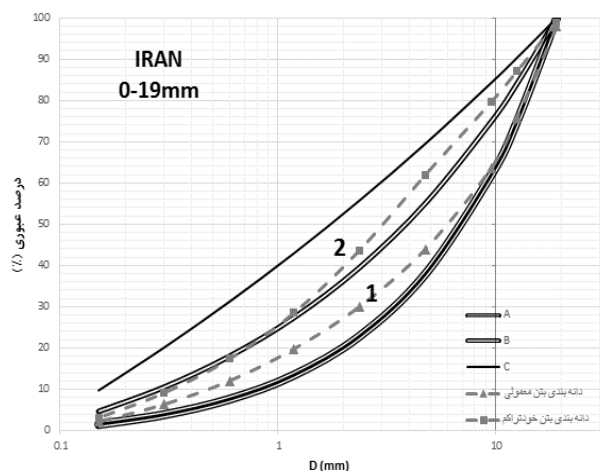
با مرور تحقیقاتی که تا کنون انجام گرفته اند می توان نتیجه گرفت که فشار منافذ مویینه دلیل اصلی وقوع جمع شدگی خمیری است ولی سایر عوامل تأثیر گذار از قبیل مقاومت کششی، اندازه منافذ و روابط میان این پارامترها مورد ارزیابی قرار نگرفتند.

همچنین در رابطه با خطر ایجاد ترک رویکردهای مختلفی بیان گردیده است. در استاندارد بتن آمریکا [۸] نرخ تبخیر را به عنوان پارامتر ایجاد ریسک ترک در نظر گرفته است و خطر ترک خوردگی را در نرخ تبخیر بالاتر از  $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  محتمل می داند. از طرف دیگر برخی از محققان جمع شدگی بتن را پارامتر ریسک ترک خوردگی بتن دانستند، در تحقیقاتی که هولت و همکاران

جمع شدگی خمیری در بتن تازه معمولاً در ساعات اولیه پس از اختلاط بتن رخ می دهد و خطر ناشی از ترک های خمیری، سازه های بتنی به ویژه اعضایی با نسبت سطح به حجم بالا از قبیل دال ها و یا رویه های بتنی راه را تهدید می نماید. جمع شدگی خمیری زمانی شروع می شود که به دلیل تبخیر و همچنین شروع روند هیدراسیون، لایه آب تشکیل شده ناشی از آب انداختگی از بین می رود [۱]. در نتیجه ذرات در نزدیکی سطح دیگر به وسیله مولکول های آب پوشیده نمی شوند، به دلیل نیروی چسبندگی سطحی آب با ذرات بتن، هلال هایی بر روی سطح بتن ایجاد می گردد که عامل ایجاد فشار منفی در منافذ بتن است و این فشار منجر به جمع شدگی در راستای عمودی و افقی می شود پس از رسیدن به یک فشار معین دیگر آب بین ذرات توانایی نگهداری آنها را کنار هم ندارند و به این دلیل هوا وارد این منافذ می گردد و جای آب را پر می نماید. به این فشار اصطلاحاً فشار هوای نفوذ کرده گفته می شود پس از این زمان خطر ترک خوردگی به بیشترین مقدار خود می رسد البته باید به این نکته اشاره نمود که افت ناگهانی فشار دلیلی بر وقوع حتمی ترکهای جمع شدگی خمیری نمی باشد بلکه غلبه تنش کششی ناشی از جمع شدگی ذرات مقید بر مقاومت کششی بتن نیز باید صورت گیرد. البته باید این نکته را خاطر نشان نمود ترک خوردگی بدون نفوذ هوا امکان پذیر نخواهد بود [۲]، بنابراین رشد فشار منفی منافذ مویینه عامل اصلی جمع شدگی و وقوع ترکها می باشد [۳].

کامبرینک [۱] در مقاله ی خود بر این عقیده است که همواره نفوذ هوا قبل و یا در هنگام گیرش اولیه اتفاق می افتد و ترکها بعد از گیرش اولیه ایجاد می گردند و شروع به رشد می کنند و در زمان گیرش ثانویه روند رشد آن به دلیل کسب مقاومت بیشتر، کند می گردد. بر اساس آزمایشات لوکیلی و همکاران [۴] بتن تازه در بازه زمانی گیرش اولیه تا گیرش ثانویه به کمترین مقدار ظرفیت کرنشی خود می رسد، دلیل این رخداد نیز رشد سریعتر مدول الاستیسیته نسبت به رشد مقاومت کششی آن است که با گذشت زمان و افزایش نرخ رشد مقاومت در برابر مدول الاستیسیته رشد این ترکها کمتر می گردد (به عبارت بهتر، کشش مویینه دیگر توانایی جابجایی ذرات را ندارد). این ترکها در ابتدا کم عرض و کم عمق هستند اما با گذشت زمان به دلیل عواملی از قبیل بارگذاری گسترش می یابند.

مترمکعب و شن شکسته ریزدانه با چگالی ۲۵۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز در طرح مخلوط ها به کار برده شدند. دانه بندی سنگدانه ها برای ساخت بتن های معمولی و خودتراکم از منحنی طرح ملی مخلوط ایران برای حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر انتخاب شده است. براساس توصیه در این آیین نامه محدوده مناسب برای بتن معمولی مناسب برای دال ها در ناحیه ۱ و برای بتن خودتراکم با بافت متوسط در محدوده ۲ می باشد (شکل ۱). فوق روان کننده ی پایه ی پلی کربوکسیلاتی نیز به عنوان افزودنی کاهنده آب مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱- منحنی دانه بندی مصالح سنگی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر

## ۲-۲- طرح مخلوط

در این تحقیق ۸ نوع بتن مورد آزمایش قرار می گیرد که به دو دسته معمولی و خودتراکم با نسبت های آب به سیمان ۰٫۴۵ و ۰٫۵۰، حاوی افزودنی های معدنی از قبیل متاکائولین و میکروسیلیس تقسیم می گردد. درصد جای گزینی متاکائولین و میکروسیلیس به ترتیب ۲۰ درصد و ۸ درصد وزن مواد سیمانی می باشد. دلیل استفاده از نسبت آب به سیمان ۰٫۴۵ استفاده رایج این نسبت در صنعت و از بین بردن اثر خود جمع شدگی در نمونه ها می باشد. جدول ۲ ترکیب و مقادیر بتن های معمولی و خودتراکم را نشان می دهد.

## ۳- روند آزمایشات

### ۳-۱- کارایی و رئولوژی نمونه های بتن خودتراکم

آزمایشات کارایی شامل جریان اسلامپ، T50 و قیف وی در این تحقیق مطابق استاندارد مرجع [۱۲] انجام گرفته است.

[۹] انجام داده اند خطر ترک خوردگی را در جمع شدگی بیش از  $1000 \mu\text{m/m}$ ، بالا ارزیابی نمودند در حالی که ترکی و همکاران [۷] این مقدار را بیش از  $2200 \mu\text{m/m}$  اعلام نموده اند. می توان بهترین رویکرد را برای بررسی ترک خوردگی در بتن ها را در نظریه بار و ظرفیت هامر جستجو نمود [۱۰] که در آن بار، میزان تنش ناشی از جمع شدگی مقید و ظرفیت، مقاومت کششی بتن می باشد که می توان آن را از دیدگاه کرنش مقید و ظرفیت کششی بتن نیز ارزیابی نمود. بنابراین می توان دریافت که به منظور بررسی عوامل موثر بر ترک خوردگی بتن باید تمامی عوامل موثر بر بار و ظرفیت بتن مورد بررسی قرار گیرد. در مطالعاتی که تا کنون بر روی عوامل موثر بر ترک انجام شده است تا کنون به بررسی مستقیم تاثیر تمامی این عوامل بر وقوع ترک پرداخته نشده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح

در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه تهران، مطابق با استاندارد ASTM C150 [۱۱] مورد استفاده قرار گرفتند. پودر سنگ، میکروسیلیس، و متاکائولین، مواد افزودنی معدنی مورد استفاده در طرح ها می باشد. خواص شیمیایی و چگالی سیمان و مواد معدنی در جدول ۱ آورده شده است.

### جدول ۱- ترکیبات شیمیایی و چگالی سیمان و افزودنی معدنی

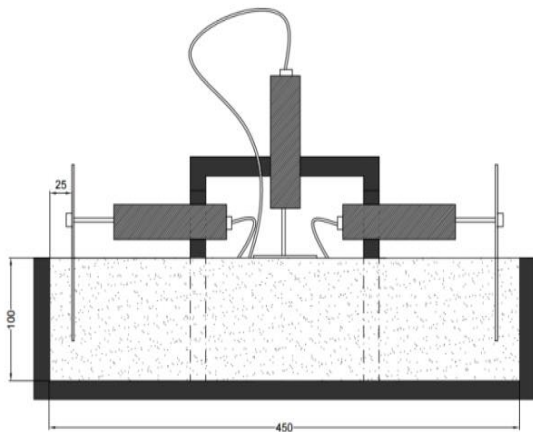
آنالیز شیمیایی	سیمان	میکروسیلیس	متاکائولین	پودر سنگ
برحسب درصد				
SiO <sub>2</sub>	20.74	94	52.8	2.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.9	1	36.3	0.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5	0.1	4.21	0.5
MgO	1.2	0.6	0.81	1.8
CaO	62.95	1	0.5	51.22
SO <sub>3</sub>	3	1.2	0	1.24
K <sub>2</sub> O	0	0	0	0
افت سرخ شدن	1.56	0	3.53	42.06
چگالی kg/m <sup>3</sup>	3150	2200	2600	2660

ماسه ی رودخانه ای با چگالی ۲۴۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب به عنوان ریزدانه در نمونه ها مورد استفاده قرار گرفت. شن شکسته درشت دانه با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر و چگالی ۲۵۴۰ کیلوگرم بر

جدول ۲- نسبت های اختلاط و نتایج کارایی

طرح مخلوط بتن خودتراکم				طرح مخلوط بتن معمولی				طرح مخلوط
SCC-4	SCC-3	SCC-2	SCC-1	NC-4	NC-3	NC-2	NC-1	
450	414	360	450	450	414	360	450	سیمان، kg/m <sup>3</sup>
225	202.5	202.5	202.5	225	202.5	202.5	202.5	آب، kg/m <sup>3</sup>
0	0	90	0	0	0	90	0	متاکائولین، kg/m <sup>3</sup>
0	36	0	0	0	36	0	0	میکروسیلیس، kg/m <sup>3</sup>
150	150	150	150	0	0	0	0	پودر سنگ، kg/m <sup>3</sup>
344.1	355	353.3	358.1	710.7	731.1	728.2	736.8	شن درشت، kg/m <sup>3</sup>
229.4	236.7	235.6	238.7	79	81.2	80.9	81.9	شن ریز، kg/m <sup>3</sup>
860.3	887.5	883.6	895.1	789.7	812.3	809.1	818.7	ماسه، kg/m <sup>3</sup>
0.5	0.45	0.45	0.45	0.5	0.45	0.45	0.45	نسبت آب به سیمان
0.3	0.7	1	0.5	0	0.2	0.2	0	فوق روان کننده (%وزن سیمان)
-	-	-	-	140	90	85	95	اسلامپ (mm)
710	650	630	680	-	-	-	-	قطر اسلامپ (mm)   جریان
1	2.13	3	1.18	-	-	-	-	T <sub>50</sub> (S)   اسلامپ
2.95	8.84	11.14	3.57	-	-	-	-	قیف V (S)

تعییه شده بر روی آن قرار می گیرد و به دستگاه ثبت کننده نتایج متصل می گردد که نتایج را هر ۱۰ دقیقه ثبت می نماید. به منظور کاهش اصطکاک بین نمونه و سطح قالب، قبل از ریختن بتن، کف آن را با روغن مخصوص قالب چرب کرده و پلاستیک نازکی روی آن قرار داده می شود.



شکل ۲- مقطع شماتیک قالب اندازه گیری جمع شدگی خمیری آزاد

### ۳-۵- آزمایش جمع شدگی مقید

در این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM c1579 [۱۴] قالبی با ابعاد ۱۰\*۱۵\*۴۵ سانتیمتر ساخته شد که در آن تغییراتی برای

### ۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه های بتن خودتراکم بر اساس استاندارد BS 1881 [۱۳] مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج، پس از عمل آوری ۲۸ روزه نمونه ها در حوضچه عمل آوری بدست آمده اند.

### ۳-۳- آزمایش آب انداختن

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM c232 مورد اندازه گیری قرار می گیرد. این قالب در محیطی با رطوبت ۱۰۰٪ و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد به منظور عدم تبخیر آب حاصل از آب انداختگی قرار داده می شود. آب حاصل از آب انداختگی در ساعت اول هر ۲۰ دقیقه و پس از آن هر ۳۰ دقیقه به وسیله سرننگ تخلیه می گردد و مقدار آن بر روی ترازو با دقت اندازه گیری ۰٫۱ گرم تعیین می گردد.

### ۳-۴- آزمایش جمع شدگی خمیری آزاد

برای این آزمایش قالبی از جنس پلکسی گلس با ابعاد داخلی ۱۰\*۱۵\*۴۵ سانتیمتر ساخته شده است که سه عدد میدل خطی تغییرات طولی<sup>۱</sup>، پس از ریختن بتن درون آن با استفاده از قاب

<sup>۱</sup> LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

### ۷-۳- آزمایش مقاومت کششی

این آزمایش براساس ASTM c496 [۱۵] با استفاده از نمونه های استوانه ای انجام می گیرد. با بررسی گیرش نهایی خمیر سیمان و با توجه به این که ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در بازه زمانی گیرش اولیه و نهایی رخ می دهد [۱] نمونه ها پس از رسیدن به گیرش نهایی (پس از ۳۵۰ دقیقه) درون قالب مخصوص آزمایش دو نیم شدگی قرار می گیرند و مقاومت کششی آنها تعیین می گردد. البته با توجه به مقاومت پایین نمونه ها در این سن این آزمایش با دقت اندازه گیری بالایی (۰,۰۱ مگاپاسکال) انجام گرفت.

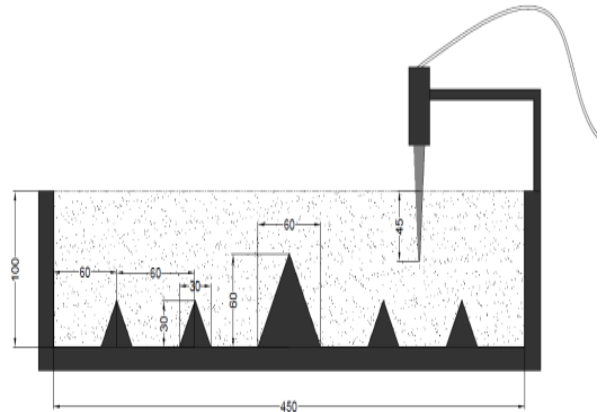
### ۸-۳- شرایط محیط آزمایش

بتن ها پس از ساخت با دمای مشخص درون قالب های ساخته شده ریخته شدند و در اتاقکی با دمای  $1 \pm 35$  درجه سانتیگراد، رطوبت  $1 \pm 35$  و سرعت باد ۵ متر بر ثانیه قرار داده شدند (شکل ۴). این محیط به این منظور تعبیه گردیده که نرخ تبخیر در آن ۰,۷ کیلوگرم بر متر مربع بر ساعت بر اساس فرمول پیشنهادی اونو [۱۶] می باشد. اگرچه این شرایط محیطی بر اساس مطالعه موردی انتخاب نشده است اما به شرایط محیطی منطقه محل آزمایش نزدیک می باشد. البته نرخ تبخیر بحرانی در استاندارد [۸] ACI 305r یک کیلوگرم بر متر مربع بر ساعت معین شده است اما مطالعات نشان داده است که نرخ تبخیر برای ترک خوردگی لزوماً نباید این عدد باشد و در نرخ پایین تر هم ترک در بتن رخ خواهد داد [۱۷]. به منظور ثابت نگه داشتن شرایط نرخ تبخیر در بتن های مختلف به وسیله فرمول ارائه شده در استاندارد ACI 305r [۸] بتن ها با دمای  $1 \pm 27$  درجه سانتیگراد ساخته شد. بررسی نرخ تبخیر، بوسیله توزین ظرف مخصوص برای هر نمونه انجام گرفت.



شکل ۴- اتاقک کنترل رطوبت و دما

مقید کردن بیشتر صورت گرفت. در وسط قالب از قطعه ای برای ایجاد ترک در این محل قرار داده شده است (شکل ۳). با گذشت حدود ۹۰ دقیقه از آزمایش، نمونه به منظور تعیین زمان شروع ترک ها مورد بررسی قرار می گیرند پس از اتمام آزمایش مساحت و عرض ترک ها با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر محاسبه می گردد.



شکل ۳- مقطع شماتیک قالب اندازه گیری جمع شدگی خمیری مقید

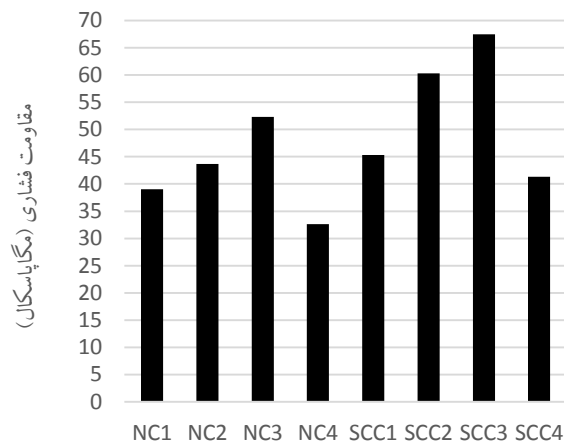
### ۶-۳- آزمایش فشار منافذ مویینه

باتوجه به تحقیقات پیشین [۱-۳] فشار منافذ مویینه عامل اصلی جمع شدگی می باشد اندازه گیری روند رشد فشار منافذ مویینه در درک بهتر پدیده جمع شدگی مؤثر می باشد. به همین دلیل آزمایش فشار منافذ مویینه در قالب جمع شدگی مقید با استفاده از دستگاهی که برای این تحقیق اولین بار در کشور ساخته شد، انجام گرفت. دستگاه ساخته شده نسبت به نمونه های ساخته شده در خارج از کشور این مزیت را دارد که با توجه به قرار دادن فیلتر مناسب در نوک سوزن، با مشکلات ارائه شده در مرجع [۳] به دلیل انسداد نوک سوزن به وسیله ملات، کمتر مواجه است. این فشار با استفاده از سنسور فشار متصل به سوزنی که با آب بدون حباب هوا پر شده است و در ارتفاع ۴۵ میلیمتری درون بتن قرار داده می شود اندازه گیری می شود و نتایج آن هر دقیقه توسط رایانه ثبت می گردد. به منظور جلوگیری از تاثیر گذاری سوزن اندازه گیری فشار مویینه بر شکل ترک های خمیری و با توجه به مرتبط بودن فشار آب منفذی در نمونه، سوزن مویینه در فاصله ۱۰ سانتیمتری از انتهای قالب قرار داده می شود (شکل ۳). البته با توجه به ارتباط آب موجود در منافذ بتن فشار به طور یکنواخت در این منافذ رشد می نماید.

#### ۴- نتایج و تفسیر

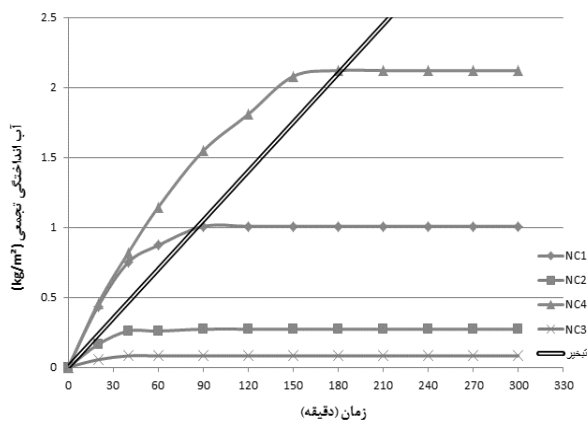
##### ۴-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن معمولی و خودتراکم در شکل ۵ آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده نمونه‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس و متاکائولین نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت فشاری ۲۸ روزه بالاتری را کسب نمودند. سه دلیل هسته زایی، خواص پرکنندگی و پوزولانی را می‌توان دلیل عمده این افزایش می‌باشد [۱۸].



شکل ۵- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها

دلیل اصلی این رخداد سطح مخصوص بالای میکروسیلیس نسبت به بقیه مصالح می‌باشد که به دلیل خاصیت پرکنندگی بالاتر موجب پرشدن منافذ می‌گردد و به دلیل منافذ ریزتر [۲۱] شیب رشد سریع تری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. از طرف دیگر نمونه بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰٫۵ (NC-4) کمترین شیب رشد فشار مویینه را به خود اختصاص داده است که دلیل این موضوع را می‌توان در افزایش قطر منافذ با افزایش نسبت آب به سیمان دید که با توجه به نسبت شعاع انحنا با فشار منفی منافذ قابل توجهی می‌باشد [۲۲].



شکل ۶- نتایج آب انداختگی نمونه‌ها

##### ۴-۲- آب انداختن نمونه‌ها

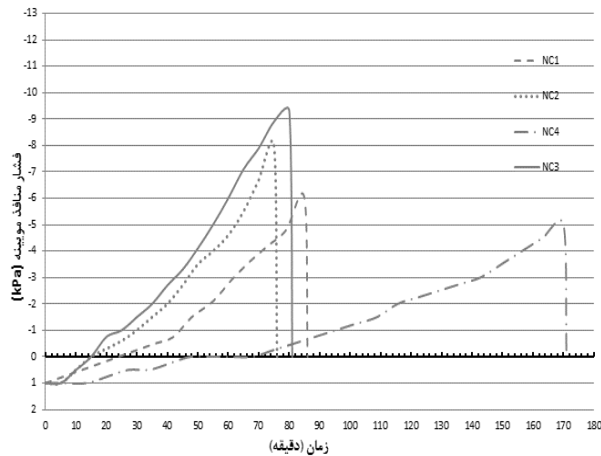
نرخ آب انداختگی برای بتن‌های معمولی در شکل ۶ آمده است. میزان آب انداختگی برای بتن‌های خودتراکم با توجه به ریزتر بودن دانه‌بندی و استفاده از پودر سنگ تقریباً برابر صفر باشد که تکراری و همکاران [۱۹] در تحقیقات خود نیز به این نتیجه دست یافتند. در رابطه با بتن‌های معمولی در صورت استفاده از افزودنی‌های معدنی با توجه به سطح مخصوص بالاتر آن‌ها نسبت به سیمان، میزان آب انداختگی تحت تأثیر قرار گرفت که این تفاوت همان‌طور که در نتایج قدوسی و همکاران [۲۰] به آن اشاره شد در مورد بتن همراه با میکروسیلیس مشهودتر می‌باشد.

##### ۴-۳- فشار منفی منافذ مویینه

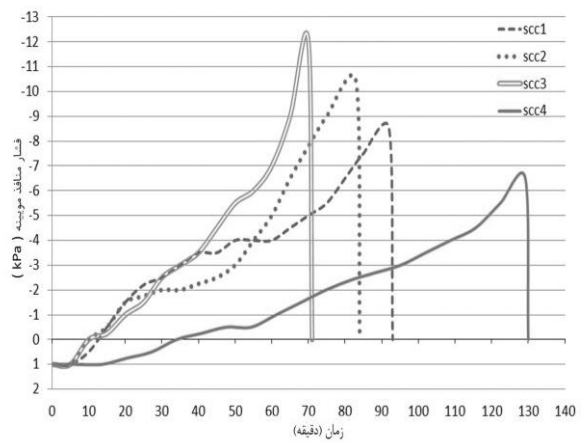
استفاده از مواد پوزولانی باعث افزایش شیب رشد منحنی فشار مویینه می‌گردد. با توجه به شکل ۷، بیشترین شیب رشد فشار منافذ مربوط به نمونه حاوی میکروسیلیس (SCC-3) می‌باشد.

##### ۴-۴- جمع شدگی خمیری

نتایج مربوط به جمع شدگی طولی نمونه‌های بتن خودتراکم نیز در شکل ۸ آمده است. اندکی پس از شروع منفی شدن فشار منافذ مویینه، جمع شدگی طولی شروع به رشد می‌نماید در این زمان، نرخ رشد نشست هم به تدریج کم می‌گردد. با بررسی نتایج به این نکته می‌توان دست یافت که در نرخ تبخیر بالا تفاوت خیلی زیادی بین جمع شدگی طولی نمونه‌ها احساس نمی‌شود و حتی بتن خودتراکم حاوی مواد پوزولانی، با وجود فشار مویینه بیشتر نسبت به بتن معمولی جمع شدگی کمتری نسبت به این بتن‌ها دارد. دلیل نخست می‌تواند ریزتر بودن منافذ در بتن‌های خودتراکم حاوی مواد مکمل سیمانی و عدم توانایی جمع شدگی بیشتر در آن باشد [۲۳]. دلیل دومی که برای این امر می‌توان متصور بود رشد بیشتر مقاومت کششی حتی در سنین اولیه به دلیل خواص هسته زایی و پرکنندگی [۱۸] در بتن خودتراکم حاوی افزودنی و جلوگیری بتن از جمع شدگی بیشتر می‌باشد.

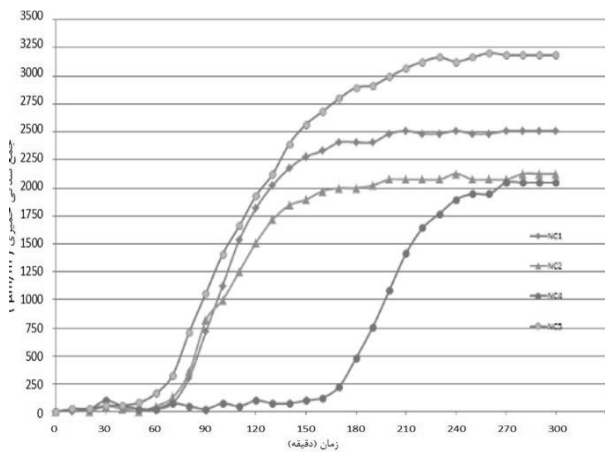


(ب)

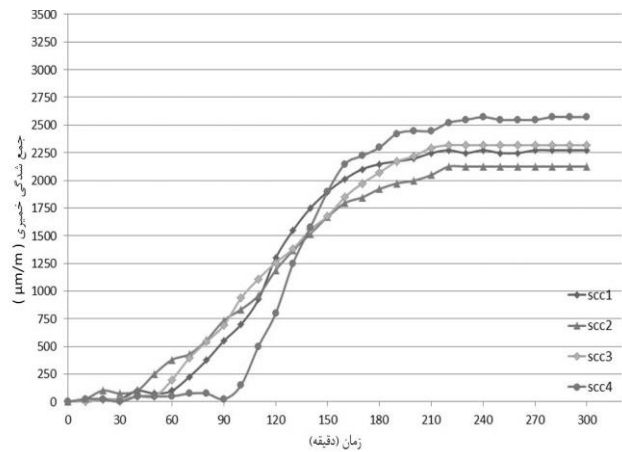


(الف)

شکل ۷- فشار منافذ مویینه نمونه ها: (الف) بتن خودتراکم (ب) بتن معمولی



(ب)



(الف)

شکل ۸- جمع شدگی آزاد نمونه ها: (الف) بتن خودتراکم (ب) بتن معمولی

زمانی که فشار مویینه توانایی جدا سازی نمونه را از قالب ایجاد نماید جمع شدگی شروع می گردد.

جدول ۳- مجذور ضریب همبستگی روابط بین

پارامترهای فشار مویینه و جمع شدگی خمیری

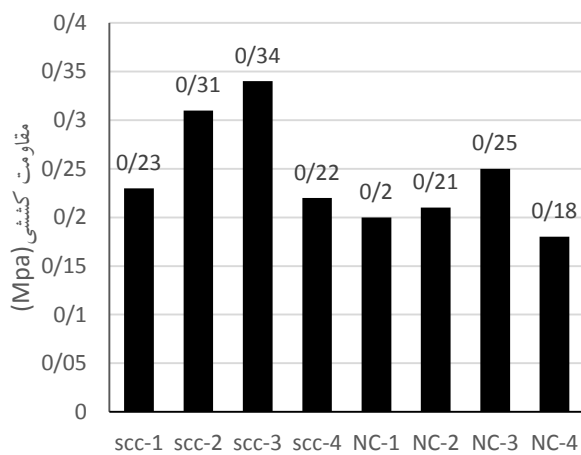
نوع رابطه	مجذور ضریب همبستگی ( $R^2$ )
رابطه بین شیب رشد فشار مویینه و شیب رشد جمع شدگی خمیری	۰,۲۰۰۶
رابطه بین شیب رشد فشار مویینه و حداکثر جمع شدگی خمیری	۰,۲۷۲۱
رابطه بین حداکثر فشار مویینه و شیب رشد جمع شدگی خمیری	۰,۲۶۶۴
رابطه بین حداکثر فشار مویینه و حداکثر جمع شدگی خمیری	۰,۳۲۴۳

#### ۴-۵- ارتباط بین فشار منافذ مویینه و جمع شدگی خمیری

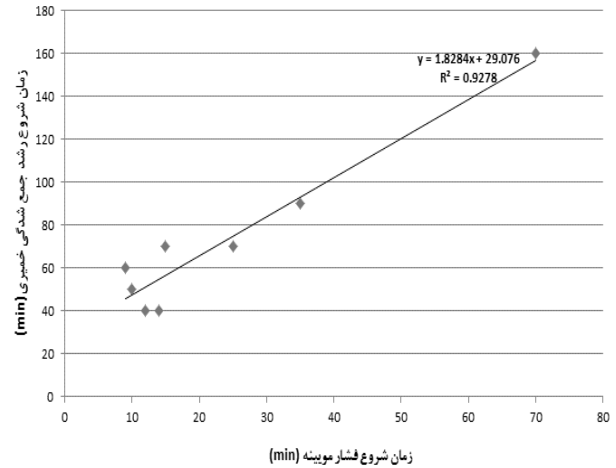
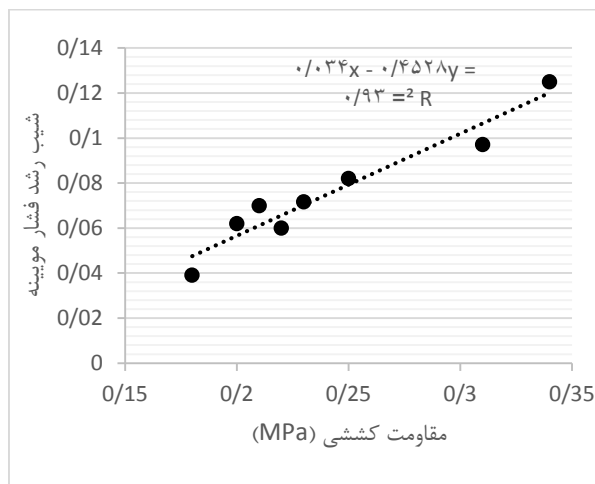
این دلایل را می توان با بررسی ضریب همبستگی روند تغییرات پارامترهای فشار منافذ مویینه ( فشار حداکثر و روند رشد فشار مویینه) در مقابل حداکثر و شیب جمع شدگی خمیری ارزیابی نمود. براساس جدول ۳ می توان دریافت که این دو عامل رابطه‌ی مناسبی با یکدیگر ندارند و سایر عوامل از قبیل اندازه منافذ، آب انداختن و رشد مقاومت کششی نقش مؤثری بر این روند دارند.

البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که فشار منافذ مویینه عامل اصلی در شروع جمع شدگی خمیری می باشد. همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است زمان شروع رشد فشار منفی منافذ با زمان آغاز جمع شدگی با ضریب همبستگی بالایی مرتبط است و

بر اساس این شکل رابطه این پارامترها رابطه تقریباً مستقیمی دارند. دلیل این رابطه را می توان با نحوه ی توزیع منافذ در نمونه ها توجیه نمود. براساس معادله گاوس-لاپلاس [۲] هر اندازه توزیع منافذ در بتن ریزتر باشد روند رشد فشار منافذ مویینه سریع تر می باشد و از طرف دیگر مقاومت کششی با اندازه منافذ رابطه عکس دارند. بنابراین فشار مویینه به عنوان عامل محرک و مقاومت کششی به عنوان عامل مقاوم جمع شدگی با یکدیگر رابطه تقریباً مستقیمی دارند که این تناسب می تواند با اندازه منافذ توجیه شود یعنی در بتنی که فشار مویینه بالاست مقاومت کششی و اندازه ی منافذ هم به گونه ایست که مانع جمع شدگی بتن می گردد این سه پارامتر با هم بر روی جمع شدگی موثر می باشد و تا زمانی که اثر نیروهای محرک نتواند بر نیروهای مقاوم غلبه نماید ترک خوردگی در بتن رخ نخواهد داد.



شکل ۱۰- مقاومت کششی در سن گیرش نهایی



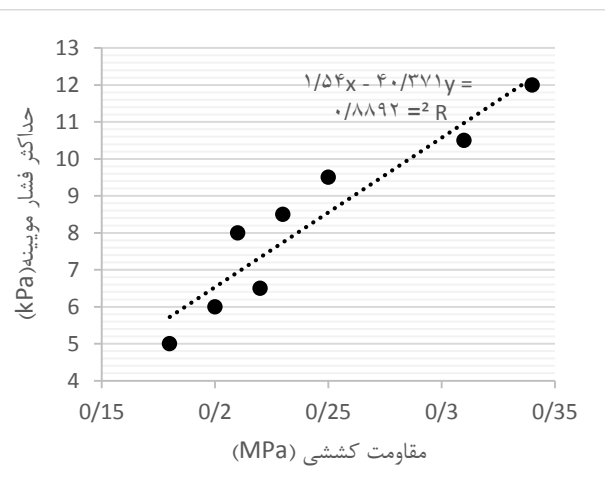
شکل ۹- رابطه بین زمان شروع فشار مویینه و زمان جمع شدگی خمیری

#### ۶-۴- بررسی مقاومت کششی مخلوط های بتنی

در شکل ۱۰ نتایج مقاومت کششی در سن گیرش نهایی برای نمونه های بتن خودتراکم ارائه شده است. با بررسی نتایج می توان دریافت که نمونه های حاوی مواد افزودنی معدنی مقاومت کششی بالاتری دارند دلیل این افزایش را می توان به خاصیت هسته زایی و پرکنندگی این مصالح در بتن خودتراکم مرتبط دانست زیرا در این سن نمی توان شروع فعالیت پوزولانی را متصور بود. [۱۸]. نتایج همچنین نشان می دهد با افزایش نسبت آب به سیمان مقاومت کششی نمونه ها کاهش می یابد. این نتیجه براساس مرجع [۲۴] تصدیق می گردد.

#### ۷-۴- رابطه بین فشار منافذ مویینه و مقاومت کششی

رابطه بین مقاومت کششی و پارامترهای فشار منافذ مویینه از قبیل حداکثر فشار و روند رشد فشار مویینه در شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۱- رابطه بین فشار منافذ مویینه و مقاومت کششی



جمع شدگی حداکثر و مساحت ترکهای ایجاد شده در شکل ۱۲ آورده شده است.

جدول ۵- پارامترهای ترک خوردگی

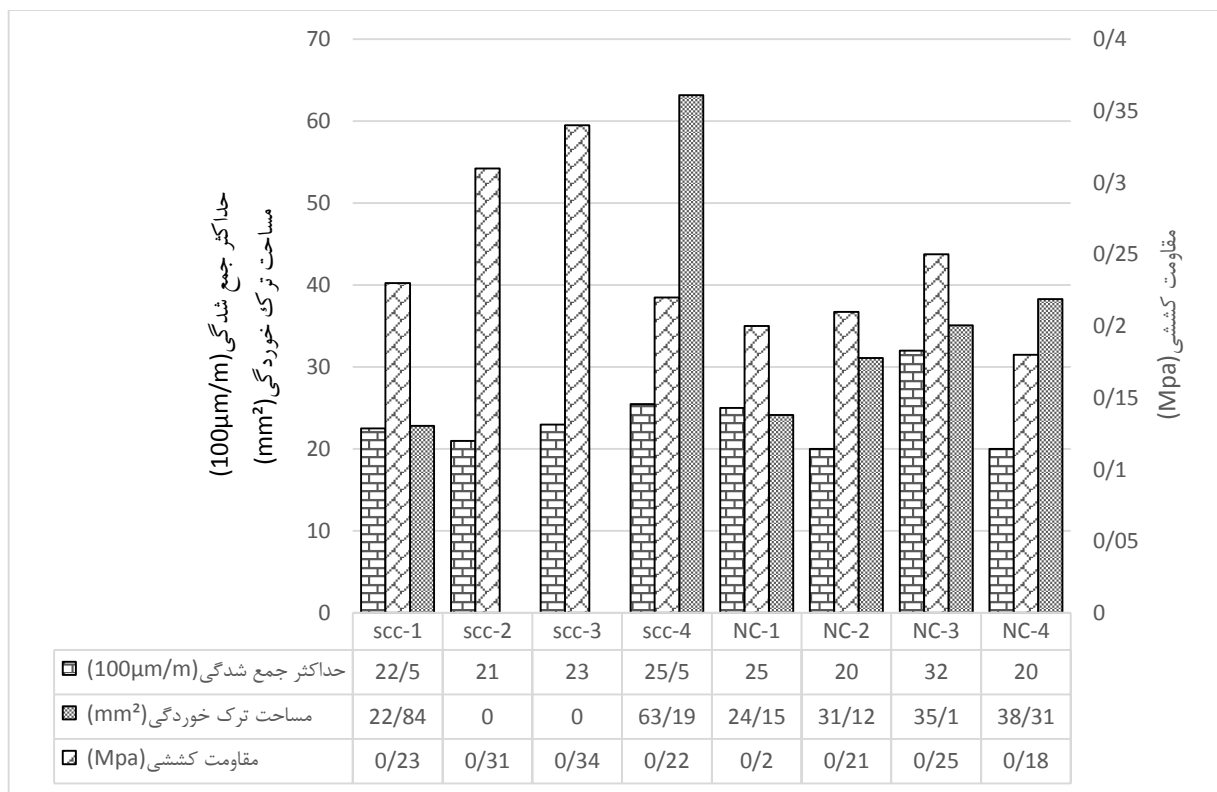
معرف مخلوط	مساحت (mm <sup>2</sup> )	عرض متوسط (mm)	زمان شروع (min)
SCC-1	۲۲,۸۴	۰,۲۶۷	۱۳۶
SCC-2	۰	۰	-
SCC-3	۰	۰	-
SCC-4	۶۳,۱۹	۰,۶۰۱	۱۳۸
NC-1	۲۴,۱۵	۰,۲۹۸	۱۱۰
NC-2	۳۱,۱۲	۰,۳۴۲	۱۰۷
NC-3	۳۵,۱	۰,۴۰۱	۹۸
NC-4	۳۸,۳۱	۰,۳۸۹	۱۸۱

بر اساس شکل می توان دریافت در نمونه بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰,۵ مساحت ترک خمیری اختلاف زیادی با سایر نمونه ها دارد که اختلاف زیاد بین مقاومت کششی آن با سایر نمونه ها و همچنین بالاترین میزان جمع شدگی این نمونه می تواند دلیل بر اثبات این مدعا باشد.

#### ۴-۸- ارزیابی ترک های ناشی از جمع شدگی مقید

در جدول ۵ نتایج پارامترهای ترک خوردگی نمونه های بتن خودتراکم آورده شده است. نکته مهم عدم وقوع ترک در نمونه های حاوی متاکائولین (SCC-2) می باشد. دو دلیل برای این رخداد می توان بیان نمود، اولاً مقدار جمع شدگی به عنوان دلیل ایجاد تنش در این نمونه ها کمتر می باشد، ثانیاً رشد بهتر مقاومت کششی در سنین اولیه در این نمونه ها منجر به مقاومت در برابر تنش ناشی از جمع شدگی مقید شده است.

شرایط بتن حاوی میکرو سیلیس (SCC-3) تقریباً مانند بتن حاوی متاکائولین (SCC-2) می باشد با این تفاوت که به دلیل سطح مخصوص بیشتر میکروسیلیس رشد فشار مویینه در آن با شیب تندتری ایجاد می گردد. همین امر موجب گردیده است که جمع شدگی در این بتن (حتی با وجود ریزتر بودن منافذ و رشد سریعتر مقاومت) بیشتر از نمونه مرجع بتن خودتراکم باشد که با وجود جمع شدگی کمتر، ترک خوردگی در آن رخ داده است. بنابراین می توان اینگونه برداشت نمود مقاومت کششی می تواند تاثیر مهمی بر کنترل ترک خوردگی بتن داشته باشد. برای درک بهتر این موضوع نتایج حداکثر جمع شدگی، مقاومت کششی در زمان



شکل ۱۲- مقایسه عوامل موثر بر ترک های خمیری

با توجه به بررسی‌های کیفی انجام شده می‌توان به نقش پررنگ مقاومت کششی در نرخ تبخیر بالا در شرایطی که رشد قابل توجهی دارد، در جلوگیری از وقوع ترک‌ها اشاره نمود که این مورد در رابطه با نمونه با آب انداختگی بالا دیده نشده است البته این نکته قابل توجه می‌باشد که این دو عامل تنها پارامترهای تاثیرگذار بر ترک‌های خمیری نمی‌باشد ولی اینگونه می‌توان دریافت که به طور نسبی تاثیر مقاومت کششی در نرخ تبخیر بالا از آب انداختگی در این شرایط، بر جلوگیری از وقوع ترک‌ها بیشتر می‌باشد

نکته‌ی دیگری که از این شکل می‌توان دریافت این است که هر اندازه در نمونه‌ای جمع شدگی بالاتر و مقاومت کششی پایین‌تر باشد در مساحت ترک‌های خمیری نیز افزایش دیده می‌شود و بالعکس. بنابراین می‌توان دریافت که برای بررسی ترک‌ها هر دو سوی معادله یعنی بار و ظرفیت (که در اینجا میزان جمع شدگی به عنوان نیروی محرک و میزان مقاومت کششی به عنوان نیروی مقاوم می‌باشد) باید بررسی گردد که با اظهارات هامر [۱۰] مطابقت دارد.

## ۵- نتایج و تفسیر

یافته‌های این تحقیق عبارتند از:

- نتایج بدست آمده از دستگاه اندازه‌گیری فشار منافذ مویینه نشان از کارکرد مناسب این دستگاه دارد که می‌تواند اطلاعات مناسبی را در رابطه با زمان شروع جمع شدگی و روند آن ارائه کند که در صورت لزوم تمهیدات مورد نیاز جهت جلوگیری ترک‌های خمیری اتخاذ گردد.
- فشار منافذ مویینه تنها عامل تاثیرگذار بر جمع شدگی خمیری نمی‌باشد بلکه روند رشد مقاومت کششی و نحوه‌ی توزیع منافذ نیز می‌توانند نقش مهمی در این رخداد ایفا کند.
- فشار منفی منافذ مویینه عامل اصلی و نیروی محرک جمع شدگی خمیری می‌باشد و رابطه‌ی تقریباً مستقیمی بین زمان شروع جمع شدگی خمیری و رشد فشار مویینه وجود دارد.
- مقاومت کششی نسبت به آب انداختگی در کنترل ترک‌های بتن در نرخ تبخیر بالا، مؤثرتر می‌باشند و استفاده از مواد افزودنی معدنی از قبیل متاکائولین و میکروسیلیس در بتن خودتراکم (مقاومت بیشتر، آب انداختگی صفر) منجر به عدم ایجاد ترک در نمونه‌ها گردیده است.
- هر اندازه در نمونه‌ای جمع شدگی بالاتر و مقاومت کششی پایین‌تر باشد در مساحت ترک‌های خمیری نیز افزایش دیده می‌شود و بالعکس. این می‌تواند توجیهی بر این باشد که تنها با یک عامل نمی‌توان به توجیه ترک‌های خمیری پرداخت و تنها می‌توان ریسک وقوع ترک‌ها را با یک عامل بررسی نمود.

## ۴-۹- تاثیر پارامترهای مقاومت کششی و آب انداختن

### بر ترک‌های خمیری

نکته‌ی دیگر در ارتباط با نتایج این است که در هر دو نمونه‌ای که ترک نخورده اند میزان آب انداختگی تقریباً صفر می‌باشد. بنابراین به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر عوامل موثر بر جلوگیری از ترک‌های خمیری در هر کدام از نمونه‌ها نتایج کیفی عوامل موثر در جدول ۶ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بررسی هدف بر این است که با توجه به وضعیت ترک‌ها تاثیر مقاومت کششی و آب انداختن به عنوان عامل مقاوم بر ترک‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. در هر کدام از نمونه‌ها که عوامل از حد معمول فاصله داشته باشد به علامت‌های مثبت و منفی مورد بررسی قرار می‌گیرند و در حالت معمول با نشان (O<sup>1</sup>) نمایش داده می‌شود (حد معمول بر اساس میانگین نتایج در نظر گرفته شده است) و تأثیر بیشتر هر کدام از عوامل را با تعداد بیشتر این علامت‌ها نشان داده می‌شود و در نهایت با بررسی این عوامل با وضعیت ترک خوردگی می‌توان گفت که تاثیر کدام عامل مهم‌تر می‌باشد.

جدول ۶- بررسی کیفی عوامل موثر بر جلوگیری از ترک‌های خمیری

معرف مخلوط	مقاومت کششی	آب انداختن	وضعیت ترک‌ها
SCC1	+	--	کم
NC1	-	++	کم
SCC2	+++	--	ترک نخورده است
NC2	-	+	متوسط
SCC3	++++	--	ترک نخورده است
NC3	++	O	زیاد
SCC4	O	--	خیلی خیلی زیاد
NC4	--	+++	خیلی زیاد

<sup>1</sup> Ordinary

- [14]. Assaad, J. and Khayat, K. H., Effect of coarse aggregate characteristics on lateral pressure exerted by self-consolidating concrete. *ACI materials journal*, [2005]. 102(3): p. 145.
- [15]. Assaad, J., Khayat, K. H., and Mesbah, H., Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, [2003]. 100(2): p. 99-107.
- [16]. Uno, P. J., Plastic shrinkage cracking and evaporation formulae. *ACI Materials Journal*, [1998]. 95(4).
- [17]. Qi, C., Weiss, J., and Olek, J., Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function. *Materials and Structures*, [2003]. 36(6): p. 386-395.
- [18]. Stark, J., Möser, B., and Bellmann, F., Nucleation and growth of CSH phases on mineral admixtures, in *Advances in Construction Materials 2007*. 2007, Springer. p. 531-538.
- [19]. Turcry, P. and Loukili, A., Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete. *ACI Materials journal*, [2006]. 103(4).
- [20]. Ghoddousi, P. and Javid, A. A. S., Effect of reinforcement on plastic shrinkage and settlement of self-consolidating concrete as repair material. *Materials and structures*, [2012]. 45(1-2): p. 41-52.
- [21]. Berodier, E. and Scrivener, K. Impact of filler on hydration kinetics. in *32nd Cement and Concrete Science Conference*. 2012.
- [22]. Lafhaj, Z., et al., Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. *Cement and Concrete Research*, [2006]. 36(4): p. 625-633.
- [23]. Berodier, E. and Scrivener, K., Impact of filler on hydration kinetics. [2012].
- [24]. Tasdemir, M., Lydon, F., and Barr, B., The tensile strain capacity of concrete. *Magazine of Concrete Research*, [1996]. 48(176): p. 211-218.
- [1]. Combrinck, R. and Boshoff, W. P., Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete. *Magazine of Concrete Research*, [2013]. 65(8): p. 486-493.
- [2]. Slowik, V., Schmidt, M., and Fritzsche, R., Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. *Cement and Concrete composites*, [2008]. 30(7): p. 557-565.
- [3]. Wittmann, F., On the action of capillary pressure in fresh concrete. *Cement and Concrete Research*, [1976]. 6(1): p. 49-56.
- [4]. Roziere, E., Cortas, R., and Loukili, A., Tensile behaviour of early age concrete: New methods of investigation. *Cement and Concrete Composites*, [2015]. 55: p. 153-161.
- [5]. Almusallam, A., et al., Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments. *Construction and Building Materials*, [1998]. 12(6): p. 353-358.
- [6]. GHODOUSI, P., RAEIS, G. A., and Parhizkar, T., A COMPARISON BETWEEN PLASTIC SHRINKAGE OF CONCRETE CONTAINING SILICA FUME AND THE NORMAL CONCRETE. [2007].
- [7]. Turcry, P. and Loukili, A., Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete. *ACI Materials journal*, [2006]. 103(4): p. 272-279.
- [8]. Assaad, J. and Khayat, K., Effect of mixture consistency on formwork pressure exerted by highly flowable concrete. *Journal of materials in civil engineering*, [2006]. 18(6): p. 786-791.
- [9]. Holt, E., Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. *Cement and concrete research*, [2005]. 35(3): p. 464-472.
- [10]. Hammer, T., On the strain capacity and cracking mechanisms of high strength concrete at very early age. *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle materials*, [2001].
- [11]. Assaad, J. and Khayat, K. H., Kinetics of formwork pressure drop of self-consolidating concrete containing various types and contents of binder. *Cement and concrete research*, [2005]. 35(8): p. 1522-1530.
- [12]. Assaad, J. J. and Khayat, K. H., Effect of casting rate and concrete temperature on formwork pressure of self-consolidating concrete. *Materials and structures*, [2006]. 39(3): p. 333-341.
- [13]. Khayat, K., et al., Effect of section width and casting rate on variations of formwork pressure of self-consolidating concrete. *Materials and structures*, [2005]. 38(1): p. 73-78.

## Evaluating Mechanism of Capillary Pore Pressure and Tensile Strength in Fresh Concrete Including Various Types of Mineral Admixtures under Plastic Shrinkage

Parviz Ghoddousi \*

Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST)

Ali Akbar Shirzadi javid

Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST)

Maziar Zareechian

Master of Construction and Management Engineering, PhD student in Iran University of Science and Technology (IUST)

### Abstract

Plastic shrinkage occurs in fresh concrete usually within few hours after mixing the concrete and risk of its cracks endangered concrete structures especially in the elements with high surface to volume ratio such as slabs or highway pavement. An experimental investigation on capillary pore pressure, tensile strength and plastic shrinkage of concrete is presented here. The aim of research is to study the relationship between capillary pore pressure build up in concretes, early age tensile strength and plastic shrinkage strain. Capillary pore pressure apparatus was created for the first time in Iran for this research. Test was done in a climate chamber with the constant evaporation rate of  $0.7 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ . Eight types of concrete in two categories such as normal concrete and self-consolidating concrete were tested including mixture without any mineral admixtures and containing of pozzolanic materials such as silica fume and metakaolin. The results indicated that there is no strong relationship between capillary pore pressure and plastic shrinkage strain and it can be concluded that other parameters such as tensile strength development can play an important role in the plastic state of concrete. However, it should be mentioned that capillary pressure is the main cause and driving force of concrete shrinkage and the onset of capillary pressure is directly related to the onset of shrinkage. The results also showed that early age tensile strength can be effective factor in controlling cracks of concrete. No cracks appeared in the mixtures containing of silica fume and metakaolin because of tensile strength improvement up to 55 and 32 percent respectively, in comparison with the reference mixture. However capillary pore pressure in these mixtures was higher than pressure in the reference mixture.

**Keywords:** Self-consolidating Concrete, Plastic Shrinkage Strain, Early-age Tensile Strength, Capillary Pore Pressure.

---

\* Corresponding Author: ghoddousi@iust.ac.ir