



بررسی اثر فشار منافذ مویینه بر جمع شدگی خمیری مخلوط های بتنی حاوی میکروسیلیس و متاکائولین و ارتباط آن با مقاومت کششی سنین اولیه

پرویز قدوسی^۱، علی اکبر شیرزادی جاوید^{۲*}، مازیار زرعی چیان^۳، محمد علی اعتباری^۴

^۱ استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

^{۲*} استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران (Shirzad@iust.ac.ir)

^۳ دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

^۴ کارشناسی مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۱۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۶/۱۴)

چکیده

ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری در اعضا بتنی که نسبت سطح به حجم بالایی دارند رخ می دهد. این ترکها در ساعات اولیه پس از بتن ریزی به علت تبخیر آب از سطح بتن قبل از سخت شدن بتن ایجاد می شود. هدف این تحقیق بررسی ارتباط رشد فشار منافذ مویینه، مقاومت کششی در سنین اولیه بتن و کرنش ناشی از جمع شدگی خمیری می باشد. در این رابطه دستگاه اندازه گیری فشار منافذ مویینه برای اولین بار در کشور ساخته شد و ثبت اختراع گردید. آزمایش در محیطی با نرخ ثابت تبخیر ۰٫۷ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت انجام شده است. هشت نمونه بتن در دو دسته معمولی و خودتراکم شامل نمونه بدون مواد جایگزین سیمان و نمونه های حاوی مواد پوزولانی از قبیل میکرو سیلیس و متاکائولین می باشد. نتایج نشان می دهد که در هر دو دسته بتن ارتباط مناسبی میان فشار منافذ مویینه و کرنش جمع شدگی خمیری وجود ندارد و این موضوع قابل برداشت می باشد که سایر پارامترها از قبیل رشد مقاومت کششی می تواند نقش مهمی در حالت خمیری بتن ایفا کند. البته میان زمان شروع جمع شدگی و شروع منفی شدن فشار مویینه ارتباط مناسبی برای تمامی نمونه ها برقرار می باشد. نتایج همچنین بیانگر تاثیر مثبت مقاومت کششی سنین اولیه بتن در کنترل ترک های خمیری می باشد. بر خلاف نمونه ۱- مرجع، در بتن های خودتراکم حاوی میکروسیلیس و متاکائولین هیچ گونه ترک خوردگی مشاهده نشده است. این در حالیست که فشار منافذ مویینه در نمونه های حاوی مواد جایگزین سیمانی در مقایسه با نمونه مرجع بیشتر است.

کلمات کلیدی

بتن خودتراکم؛ کرنش جمع شدگی خمیری؛ مقاومت کششی سنین اولیه؛ فشار منافذ مویینه.



Investigating the Effect of the Capillary Pore Pressure on Plastic Shrinkage of Concrete Mixtures Containing Silica Fume and Metakaolin and Its Relation with Early-Age Tensile Strength

Parviz Ghoddousi¹, Ali Akbar Shirzadi Javid^{2*}, Maziar Zareechian³, Mohammad Ali Etebari⁴

¹ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

^{2*} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (Shirzad@iust.ac.ir)

³ Ph.D. Candidate in Engineering and Construction Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

⁴ M.Sc. of Engineering and Construction Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Date of received: 05/02/2019, Date of accepted: 05/09/2019)

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 kg/m²/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 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.



۱- مقدمه

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 مخصوصاً اعضای 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 می باشد 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 ترک ها کمتر می گردد (به عبارت بهتر، کشش مویینه دیگر توانایی جابجایی ذرات را ندارد). این ترک ها در ابتدا کم عرض و کم عمق هستند اما با گذشت زمان به دلیل عواملی از قبیل بارگذاری گسترش می یابند. 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 تاثیر 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 متاکائولین، 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] تاثیر 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 تاثیر مقاومت 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 تاثیر میکروسیلیس بر رشد سریعتر مقاومت کششی اعلام کردند. تکرری 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 می باشد ولی سایر عوامل تاثیر گذار از قبیل مقاومت کششی، اندازه منافذ و روابط میان این پارامترها مورد ارزیابی قرار نگرفتند. همچنین در رابطه با خطر ایجاد ترک رویکرد های 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 می‌داند. از طرف دیگر برخی از محققان جمع شدگی بتن را پارامتر ریسک ترک خوردگی بتن دانستند، در تحقیقاتی که هولت و همکاران [۹] انجام داده اند خطر ترک خوردگی را در جمع شدگی بیش از $1000 \mu\text{m/m}$ ، بالا ارزیابی نمودند در حالی که ترکری و همکاران [۷] این مقدار را بیش از $2200 \mu\text{m/m}$ اعلام نموده اند. می‌توان بهترین رویکرد را برای بررسی ترک خوردگی در بتن‌ها 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 می‌باشد که می‌توان آن را از دیدگاه کرنش مقید و ظرفیت کششی بتن نیز ارزیابی نمود. بنابراین می‌توان 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.

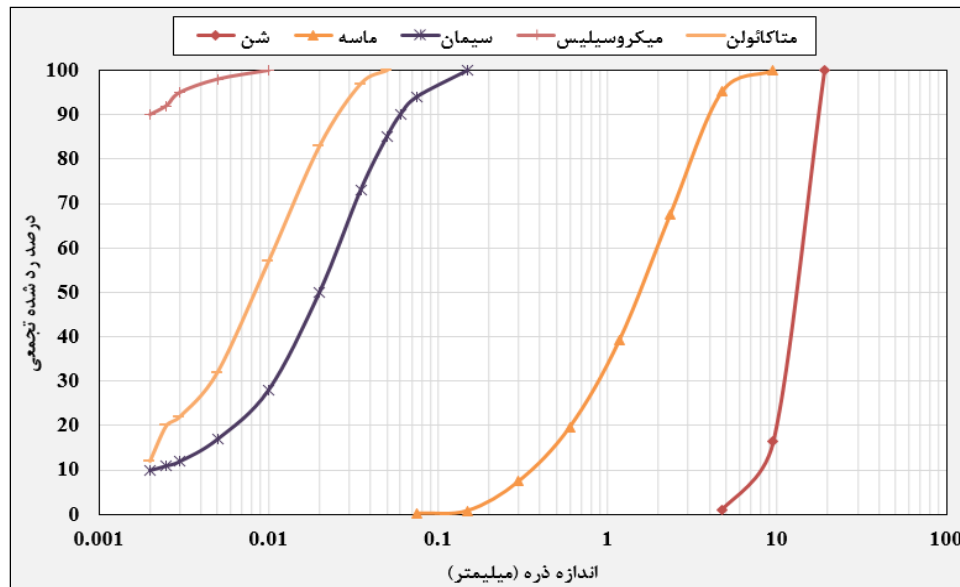
۲- برنامه آزمایشگاهی

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 طرح‌ها می‌باشد. خواص شیمیایی و چگالی سیمان و مواد معدنی در جدول (۱) آورده شده است. ماسه‌ی رودخانه‌ای با چگالی 2440 kg/m^3 بر مترمکعب به عنوان ریزدانه در نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. شن شکسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و چگالی 2540 kg/m^3 بر مترمکعب نیز در طرح مخلوط‌ها به کار برده شدند. دانه بندی سیمان، مواد جایگزین سیمانی و سنگدانه‌ها برای ساخت بتن‌های معمولی و خودتراکم در شکل (۱) آورده شده است. فوق روان کننده‌ی پایه‌ی پلی کربوکسیلاتی نیز به عنوان افزودنی کاهنده آب مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی و چگالی سیمان و افزودنی معدنی.

پودر سنگ	متاکائولین	میکروسیلیس	سیمان	آنالیز شیمیایی
بر حسب درصد				
۲/۸	۵۲/۸	۹۴	۲۰/۷۴	SiO ₂
۰/۳۵	۳۶/۳	۱	۴/۹	Al ₂ O ₃
۰/۵	۴/۲۱	۰/۱	۳/۵	Fe ₂ O ₃
۱/۸	۰/۸۱	۰/۶	۱/۲	MgO
۵۱/۲۲	۰/۵	۱	۶۲/۹۵	CaO
۱/۲۴	.	۱/۲	۳	SO ₃
.	.	.	.	K ₂ O
افت				
۴۲/۰۶	۳/۵۳	.	۱/۵۶	سرخ شدن
۲۶۶۰	۲۶۰۰	۲۲۰۰	۳۱۵۰	چگالی kg/m ³



شکل ۱: منحنی های دانه بندی سیمان، مواد جایگزین سیمانی و سنگدانه ها.

۲-۲- نسبت های مخلوط

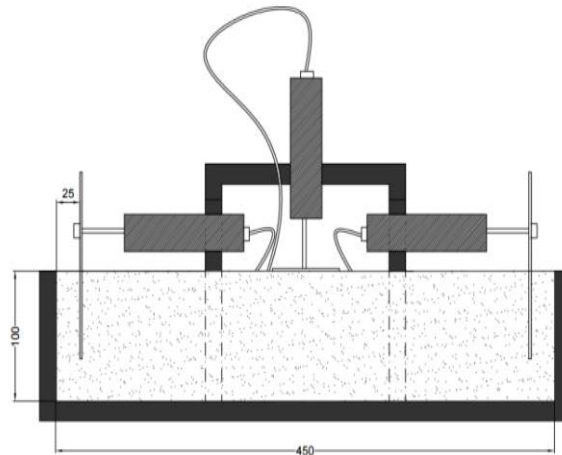
در این تحقیق ۸ نوع بتن مورد آزمایش قرار می گیرد که به دو دسته معمولی و خودتراکم با نسبت های آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۰، حاوی افزودنی های معدنی از قبیل متاکائولین و میکروسیلیس تقسیم می گردد. درصد جایگزینی متاکائولین و میکروسیلیس به ترتیب ۲۰ درصد و ۸ درصد وزن مواد سیمانی می باشد. دلیل استفاده از نسبت آب به 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.

۳-۲- آزمایشهای مورد استفاده

در تحقیق حاضر، آزمایشات کارایی شامل جریان اسلامپ، T₅₀ و قیف وی در این تحقیق مطابق استاندارد مرجع [۱۲] انجام گرفته است. 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. آزمایش آب انداختن 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 سرنگ تخلیه می گردد و مقدار آن بر روی ترازو با دقت اندازه گیری ۰/۱ گرم تعیین می گردد. در آزمایش جمع شدگی خمیری آزاد قالبی از جنس پلکسی گلس با ابعاد داخلی ۴۵×۱۵×۱۰ سانتیمتر ساخته شده است که سه عدد مبدل خطی تغییرات طولی، پس از ریختن بتن درون آن با استفاده از قاب تعبیه 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.

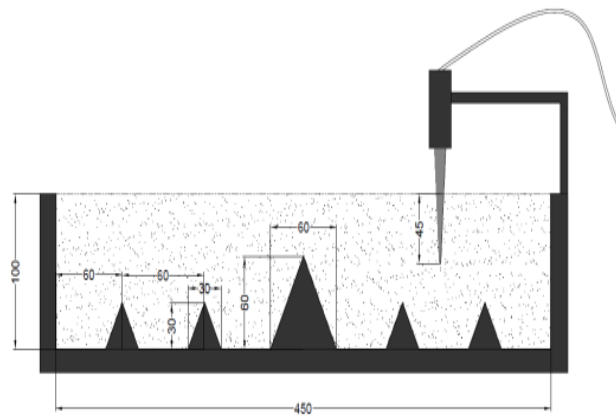


آزمایش جمع شدگی مقید بر اساس استاندارد ASTM c1579 [۱۴] قالبی با ابعاد $45 \times 15 \times 10$ سانتیمتر ساخته شد که در آن تغییراتی برای مقید کردن بیشتر صورت گرفت. در وسط قالب از قطعه ای برای ایجاد ترک در این محل قرار داده شده است (شکل ۲). با گذشت حدود ۹۰ دقیقه از آزمایش، نمونه به منظور تعیین زمان شروع 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 ۲: مقطع شماتیک قالب اندازه گیری جمع شدگی خمیری آزاد.

با توجه 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 موثر 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 ی 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.



شکل ۳: مقطع شماتیک قالب اندازه گیری جمع شدگی خمیری مقید.

آزمایش مقاومت کششی براساس ASTM C496 [۱۵] با استفاده از نمونه های استوانه ای انجام می گیرد. با بررسی گیرش نهایی خمیر سیمان و با توجه به اینکه 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 قاب 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.

۲-۴- شرایط محیطی آزمایش

بتن ها پس از ساخت با دمای مشخص درون قالب های ساخته شده ریخته شدند و در اتاقکی با دمای 1 ± 35 درجه سانتیگراد، رطوبت 1 ± 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 ACI 305R [۸] 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 ± 27 درجه سانتیگراد ساخته شد. بررسی نرخ تبخیر، به وسیله ی توزین ظرف مخصوص برای هر نمونه انجام گرفت.

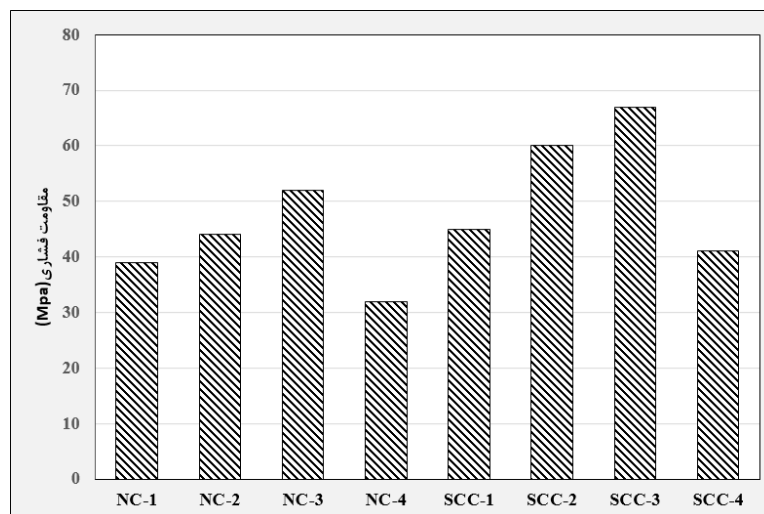


شکل ۴: اتاقک کنترل رطوبت و دما.

۳- نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری

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

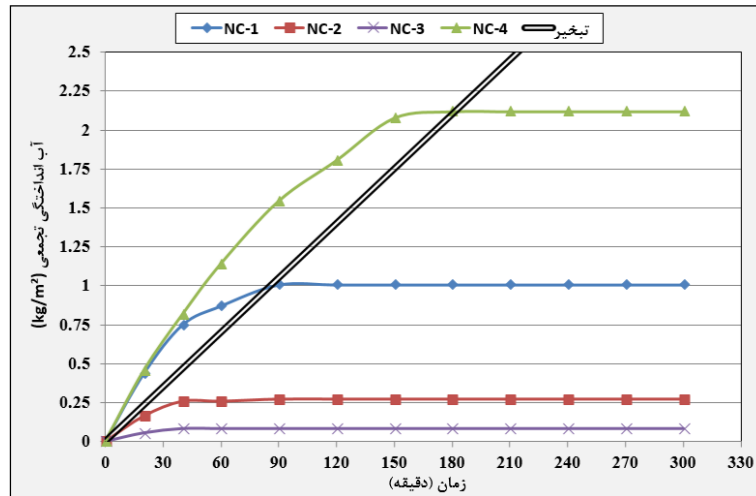


شکل ۵: نتایج مقاومت فشاری نمونه ها.



۳-۲- آب انداختن نمونه ها

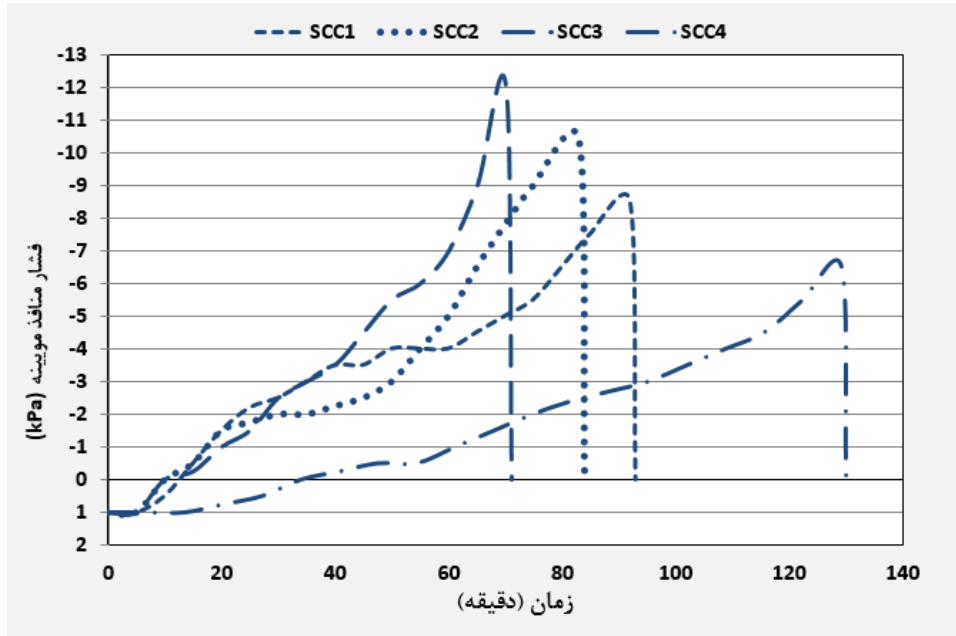
نرخ آب انداختگی برای بتن های معمولی در شکل ۶ آمده است. میزان آب انداختگی برای بتن های خودتراکم با توجه به ریزتر بودن دانه بندی و استفاده از پودر سنگ تقریباً برابر صفر باشد که ترکیب و همکاران [۱۹] در تحقیقات خود نیز به این نتیجه دست یافتند. در رابطه با بتن های معمولی در صورت استفاده از افزودنی های معدنی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



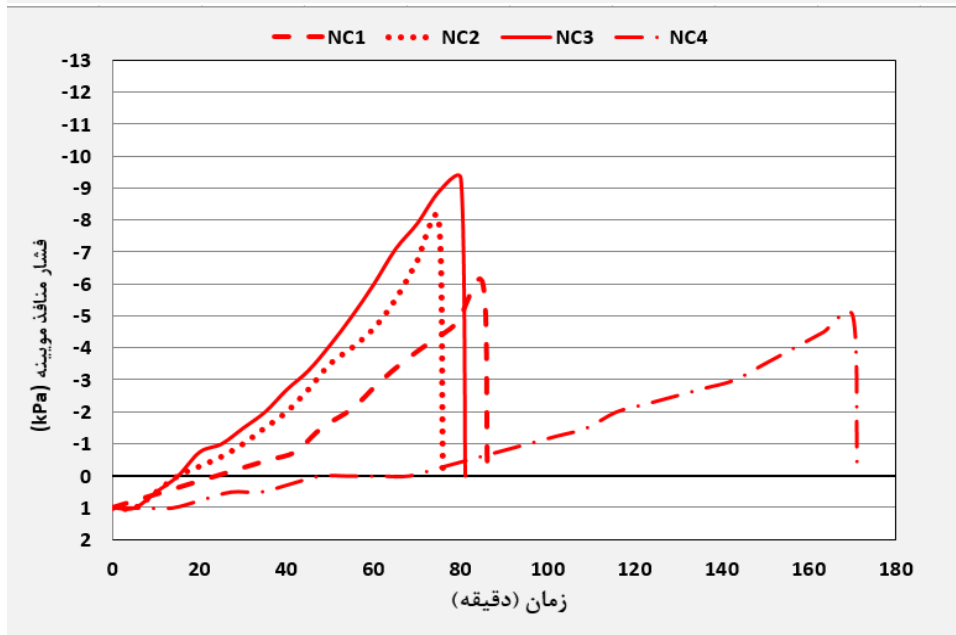
شکل ۶: نتایج آب انداختگی نمونه ها.

۳-۳- فشار منفی منافذ مویینه

استفاده از مواد پوزولانی باعث افزایش شیب رشد منحنی فشار مویینه می گردد. با توجه به شکل ۵، بیشترین شیب رشد فشار منافذ مربوط به نمونه حاوی میکروسیلیس (SCC-3) می باشد. دلیل اصلی این رخداد سطح مخصوص بالای میکروسیلیس نسبت به بقیه مصالح می باشد که به دلیل خاصیت پرکنندگی بالاتر موجب پر شدن منافذ می گردد و به دلیل منافذ ریزتر [۲۱] شیب رشد سریعتری نسبت به سایر نمونه ها 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 می توان در افزایش قطر منافذ با افزایش نسبت آب به سیمان دید که با توجه به نسبت عکس شعاع انحنا با فشار منفی منافذ قابل توجهی می باشد [۲۲].



(الف)



(ب)

شکل ۵: فشار منافذ مویینه نمونه ها؛ الف: بتن خودتراکم ؛ ب: بتن معمولی.

۴-۳- جمع شدگی خمیری

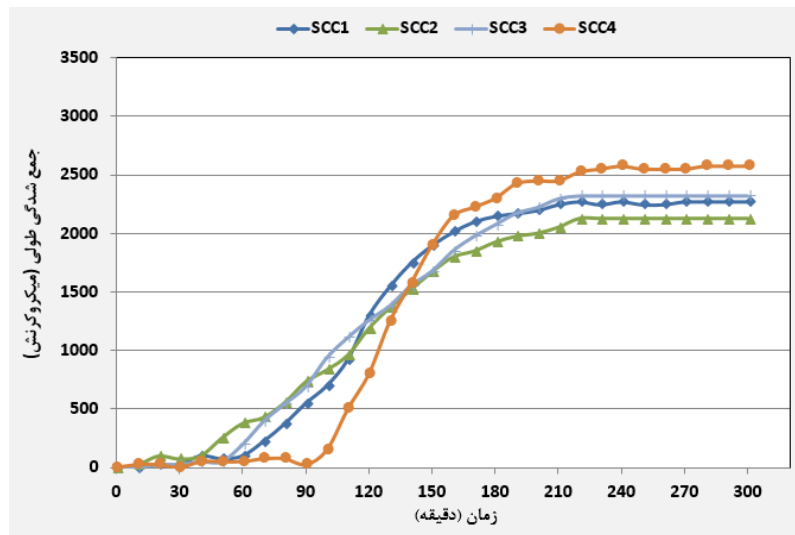
نتایج مربوط به جمع شدگی طولی نمونه های بتن خودتراکم نیز در شکل (۶) آمده است. اندکی پس از شروع منفی شدن فشار منافذ مویینه ، جمع شدگی طولی شروع به رشد می نماید در این زمان ، نرخ رشد نشست هم به تدریج کم می گردد. با بررسی نتایج به این نکته می توان دست یافت که در نرخ تبخیر بالا تفاوت خیلی زیادی بین جمع شدگی طولی نمونه ها احساس نمی شود و حتی بتن خودتراکم حاوی مواد پوزولانی، با وجود فشار مویینه بیشتر نسبت به بتن معمولی جمع شدگی کمتری نسبت به این بتن ها دارد.



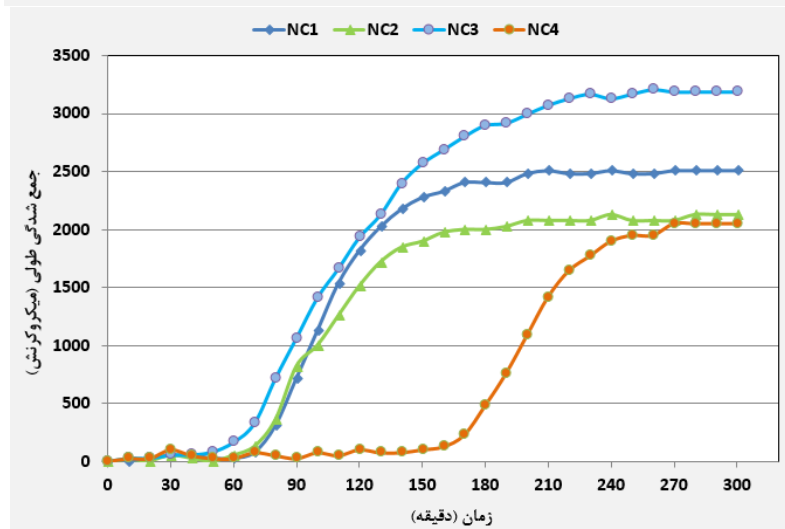
دلیل نخست می تواند ریزتر بودن منافذ در بتن های خودتراکم حاوی مواد مکمل سیمانی و عدم توانایی جمع شدگی بیشتر در آن باشد [۲۳]. دلیل دومی که برای این امر می توان متصور بود رشد بیشتر مقاومت کششی حتی در سنین اولیه به دلیل خواص هسته زایی و پرکنندگی [۱۸] در بتن خودتراکم حاوی افزودنی و جلوگیری بتن از جمع شدگی بیشتر می باشد.

۳-۵- 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 رابطه ی مناسبی با یکدیگر ندارند و سایر عوامل از قبیل اندازه منافذ، آب انداختن و رشد مقاومت کششی نقش موثری بر این روند دارند.



(الف)



(ب)

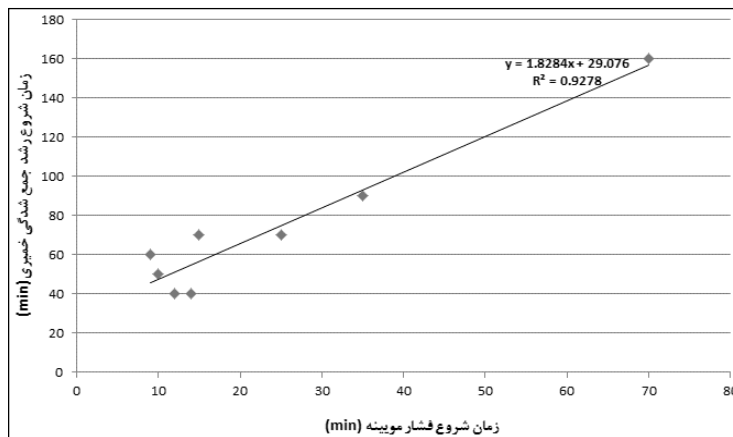
شکل ۶: جمع شدگی آزاد نمونه ها ؛ الف: بتن خودتراکم ؛ ب: بتن معمولی.



جدول ۳. مجذور ضریب ضریب همبستگی روابط بین پارامترهای فشار مویینه و جمع شدگی خمیری.

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

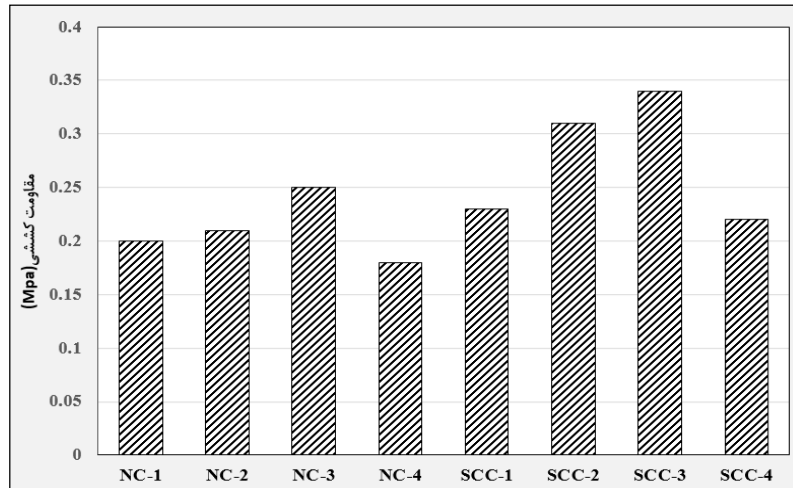
البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که فشار منافذ مویینه عامل اصلی در شروع جمع شدگی خمیری می باشد. همانطور که در شکل (۷) قابل مشاهده است زمان شروع رشد فشار منفی منافذ با زمان آغاز جمع شدگی با ضریب همبستگی بالایی مرتبط است و زمانی که فشار مویینه توانایی جدا سازی نمونه را از قالب ایجاد نماید جمع شدگی شروع می گردد.



شکل ۷: رابطه بین زمان شروع فشار مویینه و زمان جمع شدگی خمیری.

۳-۶- مقاومت کششی

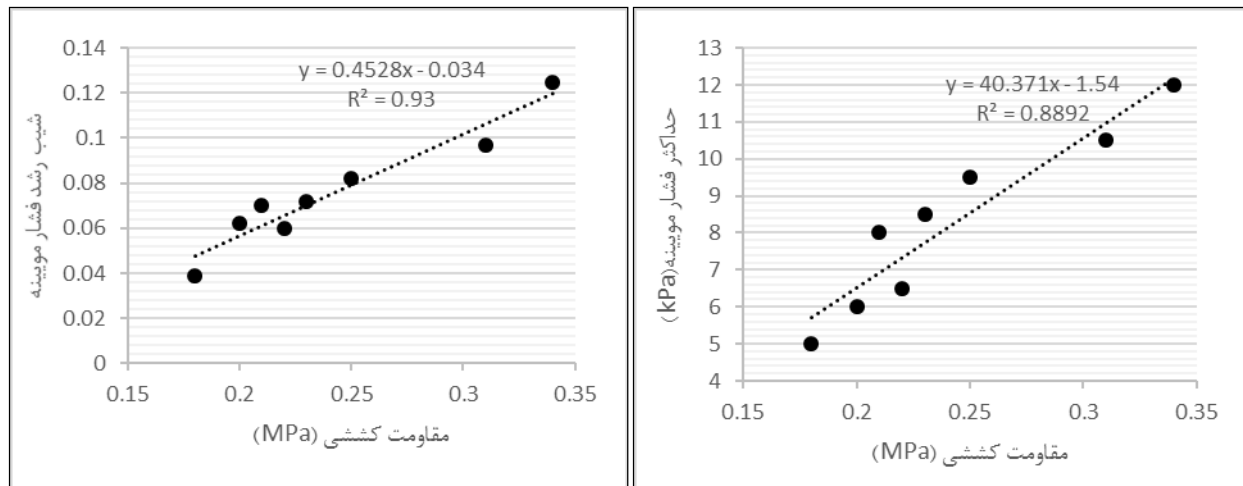
در شکل (۸) نتایج مقاومت کششی در سن گیرش نهایی برای نمونه های بتن خودتراکم ارائه شده است. با بررسی نتایج می توان دریافت که نمونه های حاوی مواد افزودنی معدنی مقاومت کششی بالاتری دارند دلیل این افزایش را می توان به خاصیت هسته زایی و پرکنندگی این مصالح در بتن خودتراکم مرتبط دانست زیرا در این سن نمی توان شروع فعالیت پوزولانی را متصور بود. [۱۸]. نتایج همچنین نشان میدهد با افزایش نسبت آب به سیمان مقاومت کششی نمونه ها کاهش می یابد. این نتیجه براساس مرجع [۲۴] تصدیق می گردد.



شکل ۸: مقاومت کششی در سن گیرش نهایی.

۳-۷- 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 (۹) ارائه شده است. بر اساس این شکل رابطه این پارامترها رابطه تقریباً مستقیمی دارند. دلیل این رابطه را می توان با نحوه 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 سریعتر 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 ۹: رابطه بین فشار منافذ مویینه و مقاومت کششی.



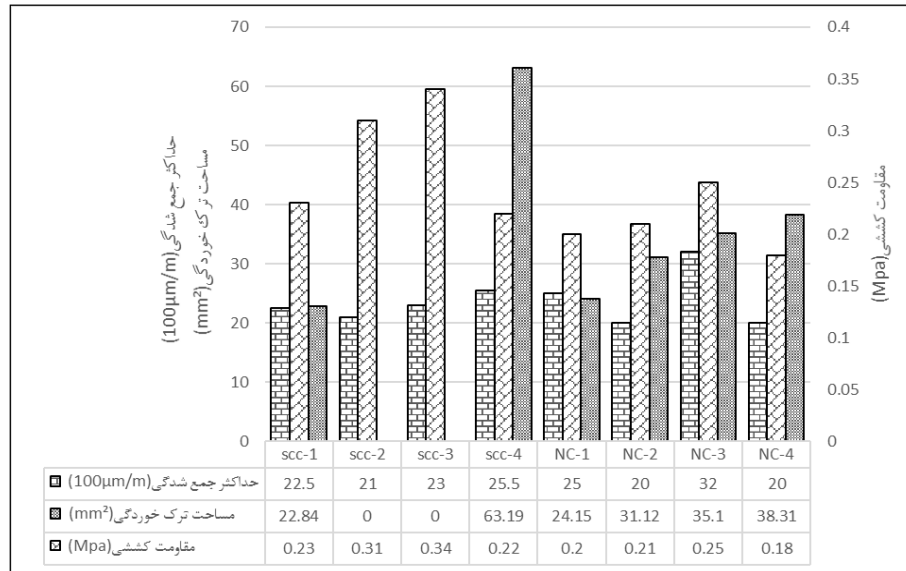
۳-۸- ارزیابی ترکهای ناشی از جمع شدگی مقید

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.

جدول ۵. پارامترهای ترک خوردگی.

معرف مخلوط	مساحت (mm ²)	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

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 تند تری 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 جمع شدگی حداکثر و مساحت ترکهای ایجاد شده در شکل (۱۰) آورده شده است.



شکل ۱۰: مقایسه عوامل موثر بر ترک های خمیری.

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. نکته ی دیگری که از این شکل می توان دریافت این است که هر اندازه در نمونه ای جمع شدگی بالاتر و مقاومت کششی پایین تر باشد در مساحت ترک های خمیری نیز افزایش دیده می شود و بالعکس. بنابراین می توان دریافت که برای بررسی ترک ها 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 می باشد) باید بررسی گردد که با اظهارات هامر [۱۰] مطابقت دارد.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

یافته های این تحقیق عبارتند از:

الف- نتایج بدست آمده از دستگاه اندازه گیری فشار منافذ مویینه نشان از کارکرد مناسب این دستگاه دارد که می تواند اطلاعات مناسبی را در رابطه با زمان شروع جمع شدگی و روند آن ارائه کند که در صورت لزوم تمهیدات مورد نیاز جهت جلوگیری ترک های خمیری اتخاذ گردد.

ب- فشار منافذ مویینه تنها عامل تاثیر گذار بر جمع شدگی خمیری نمی باشد بلکه روند رشد مقاومت کششی و نحوه ی توزیع منافذ نیز می توانند نقش مهمی در این رخداد ایفا کند.

ج- فشار منفی منافذ مویینه عامل اصلی و نیروی محرک جمع شدگی خمیری می باشد و رابطه ی تقریباً مستقیمی بین زمان شروع جمع شدگی خمیری و رشد فشار مویینه وجود دارد.

د- مقاومت کششی نسبت به آب انداختگی در کنترل ترکهای بتن در نرخ تبخیر بالا، موثرتر می باشند 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 نمونه ها گردیده است.

و- هر اندازه در نمونه ای جمع شدگی بالاتر و مقاومت کششی پایین تر باشد در مساحت ترک های خمیری نیز افزایش دیده



می شود و بالعکس. این می تواند توجیهی بر این باشد که تنها با یک عامل نمی توان به توجیه ترک های خمیری پرداخت و تنها می توان ریسک وقوع ترک ها را با یک عامل بررسی نمود.

۵- مراجع

- 1- Combrinck, R. and Boshoff, W. P., 2013, **Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete**, Magazine of Concrete Research, 65(8), 486-493.
- 2- Slowik, V., Schmidt, M. and Fritzsich, R., 2008, **Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value**, Cement and Concrete composites, 30(7), 557-565.
- 3- Wittmann, F., 1976, **On the action of capillary pressure in fresh concrete**, Cement and Concrete Research, 6(1), 49-56.
- 4-Roziere, E., Cortas, R. and Loukili, A., 2015, **Tensile behaviour of early age concrete: New methods of investigation**, Cement and Concrete Composites, 55, 153-161.
- 5- Almusallam, A., 1998, **Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments**, Construction and Building Materials, 12(6), 353-358.
- 6- Ghoddousi, P., Raeis, G. A., and Parhizkar, T., 2007, **A comparison between plastic shrinkage of concrete containing silica fume and the normal concrete**.
- 7- Turcry, P. and Loukili, A., 2006, **Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete**, ACI Materials journal, 103(4), 272-279.
- 8- ACI 305R, 1999, **Hot Weather Concreting**, American Concrete Institute International.
- 9- Holt, E., 2005, **Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages**, Cement and concrete research, 35(3), 464-472.
- 10- Hammer, T., 2001, **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.
- 11-ASTM C150 / C150M-16e1, 2016, **Standard Specification for Portland Cement**, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 12-The European Guidelines for Self-Compacting Concrete - EFNARC, 2005.
- 13-BS 1881-122, 2011, **Testing concrete. Method for determination of water absorption**
- 14-ASTM C1579-13, 2013, **Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 15-ASTM C496 / C496M-11, 2004, **Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 16- Uno, P. J., 1998, **Plastic shrinkage cracking and evaporation formulae**. ACI Materials Journal, 95(4), 14-23.
- 17-Qi, C., Weiss, J. and Olek, J., 2003, **Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function**, Materials and Structures, 36(6), 386-395.
- 18-Stark, J., Möser, B. and Bellmann, F., 2007, **Nucleation and growth of CSH phases on mineral admixtures**, in Advances in Construction Materials, Springer, 531-538.



- 19-Turcry, P. and Loukili, A., 2006, **Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete**, ACI Materials journal, 103(4), 80-91.
- 20-Ghoddousi, P. and Javid, A. A. S., 2012, **Effect of reinforcement on plastic shrinkage and settlement of self-consolidating concrete as repair material**, Materials and structures, 45(1-2), 41-52.
- 21-Berodier, E. and Scrivener, K., 2012, **Impact of filler on hydration kinetics**, in 32nd Cement and Concrete Science Conference.
- 22-Lafhaj, Z., 2006, **Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content**, Cement and Concrete Research, 36(4), 625-633.
- 23-Berodier, E. and Scrivener, K., 2012, **Impact of filler on hydration kinetics**, in 32nd Cement and Concrete Science Conference.
- 24-Tasdemir, M., Lydon, F. and Barr, B., 1996, **The tensile strain capacity of concrete**, Magazine of Concrete Research, 48(176), 211-218.