



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

بررسی تأثیر کندگیرکننده بر خواص رئولوژی بتن خودتراکم

سعید فرخی زاده^۱، علی زال نژاد^۲، مهدی باقری

- ۱- استادیار مهندسی عمران گرایش مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، ایران
- ۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ایران
- ۳- کارشناسی ارشد معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، ایران
sfarokhi92@gmail.com

چکیده

بتن خودتراکم در برابر تغییرات دما نسبت به بتن معمولی، دارای حساسیت بیشتری می‌باشند. این امر نشان‌دهنده آن است که رفتار رئولوژیکی بتن تازه، تحت تأثیر درجه حرارت می‌باشد. تأثیرات محیطی و زمان طولانی در عملکرد بتن تازه خودتراکم سبب بروز مشکلاتی مثل پائین آمدن کارایی می‌شود. فوق‌روان‌کننده‌ها برای بهبود کارایی مخلوط‌های بتن خودتراکم استفاده می‌شوند ولی ماندگاری کارایی بتن خودتراکم، وقتی که تحت تأثیر آب‌وهوای محیط و یا زمان طولانی حمل‌ونقل قرار می‌گیرند همچنان یک موضوع بحث برانگیز است. در این مطالعه، کندگیرکننده به‌عنوان یک تابعی از دما و زمان برای بهبود ماندگاری کارایی در مخلوط‌های بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفت. دمای مخلوط‌های بتن خودتراکم با توجه به شرایط محیطی فصل‌های مختلف انتخاب شده است. از این جهت برای انجام آزمایش‌های کارایی و رئولوژی، ساخت نمونه‌ها در فصل‌های مختلف سال به انجام رسید. بر اساس نتایج به‌دست آمده از تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک حاصل از دستگاه رئومتر در طول زمان ۶۰ دقیقه، کندگیرکننده‌ها در دمای معمول و پایین می‌توانند سبب بهبود رئولوژی شود. در زمان استفاده از کندگیرکننده، باید از بالا رفتن دمای بتن جلوگیری کرد و در غیر این صورت باید از زمان بتن‌ریزی کاست، زیرا دمای بالا و افزایش زمان حمل-ونقل سبب افزایش تنش جاری می‌شود.

کلمات کلیدی: دما، زمان، تنش جاری، ویسکوزیته پلاستیک، کندگیرکننده

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، بتن خودتراکم به دلیل همگنی زیاد و سهولت در بتن‌ریزی به‌طور فزاینده‌ای در انواع مختلف سازه‌ها به‌خصوص در سازه‌هایی که معماری و طراحی آن‌ها بسیار ظریف و نیازمند میلگردگذاری فشرده هستند در حال رشد است. پودرهای معدنی مختلفی برای کاهش مقدار سیمان پرتلند و دستیابی به خواص تازه مطلوب در مخلوط‌های بتن گنجانده شده است [۸-۱]. در مخلوط‌های بتن خودتراکم، پوزولان‌های طبیعی یکی از مواد پودرهای معدنی هستند که به‌طور گسترده و ارزان در سراسر جهان، به‌ویژه در مناطق آتشفشانی، در دسترس هستند و دارای خصوصیات مطلوبی هستند که خواص تازه و سخت شده مخلوط را بهبود می‌بخشند [۹]. استفاده از پودر پومیس نیز در بهبود خواص رئولوژی بتن خودتراکم مفید گزارش شده است [۱۰ و ۱۱]. تأثیر میکروسیلیس بر خصوصیات رئولوژی کاملاً پیچیده است. در حجم ۳ تا ۵ درصد باعث کاهش تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک می‌شود. با این حال، در حجم ۵ تا ۱۰ درصد منجر به افزایش تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

می‌شود [۱۲-۱۷]. علیرغم مزایای استفاده از پوزولان‌ها در مخلوط‌های بتن خودتراکم، ماندگاری کم کارایی و تقاضای بالای فوق‌روان‌کننده، مهم‌ترین نگرانی‌های کاربرد آنهاست [۱۸]. ماندگاری کارایی در بتن خودتراکم حیاتی است در غیراین‌صورت مخلوط‌ها برای استفاده در مقاطع باریک و بسیار مسلح نمی‌توانند به‌درستی در قالب قرار گرفته و فشرده شوند. در حقیقت، از دست دادن کارایی در حمل‌ونقل‌های با مسافت طولانی، به‌عنوان یکی از دلایل اصلی افت کیفیت مخلوط بتن خودتراکم می‌باشد [۱۹]. یافتن یک روش مناسب برای درمان ماندگاری کارایی محدود به رعایت حداقل مقدار فوق‌روان‌کننده نیست. در بعضی شرایط، تقریباً غیرممکن است ترکیبی قوی برای دستیابی به کارایی مطلوب و همچنین ماندگاری کارایی، بدون کندگیرکننده حاصل شود [۲۰ و ۲۱]. مطالعات متعددی بر روی کندگیرکننده انجام شد به‌عنوان مثال، در مراجع [۲۲-۲۴] به‌منظور تنظیم زمان گیرش بتن با استفاده از نوعی کندگیرکننده، تحقیقاتی را برای بهبود کیفیت و کارایی بتن انجام دادند در این تحقیقات، اثرات نوع کندگیرکننده، محتوای آن و زمان عمل‌آوری بر روی بتن موردبررسی قرار گرفت. همچنین در مرجع [۲۵] استفاده از بتن با استفاده یک تثبیت‌کننده شبیه کندگیرکننده را برای کنترل مستقیم هیدراتاسیون سیمان پیشنهاد دادند.

کندگیرکننده‌ها در شرایط دیگر که نیاز به طولانی‌شدن گیرش و تأخیر واکنش می‌باشد مانند بتن حجیم [۲۶]، چاه‌های نفت و گاز [۲۷] و بتن فشرده غلظتی [۲۸] استفاده می‌شوند. کندگیرکننده‌های شیمیایی، سرعت افزایش گرمای هیدراتاسیون سیمان را کاهش می‌دهند بنابراین کندگیرکننده‌ها می‌توانند علاوه برای تأخیر گیرش سیمان در شرایط آب‌وهوای گرم، برای کنترل افزایش دما در بتن حجیم مورد استفاده قرار گیرند [۲۹ و ۳۰].

در هوای گرم باید اقدامات ویژه‌ای در هنگام مخلوط‌کردن، ریختن و عمل‌آوری بتن انجام شود. در حین ساخت بتن، دمای بالای محیط باعث ایجاد مشکلاتی مثل افزایش هیدراتاسیون سیمان و میزان تبخیر آب می‌شود. میزان هیدراتاسیون سیمان به درجه حرارت، ترکیب سیمان و همچنین استفاده از مواد افزودنی بستگی دارد. افزایش هیدراتاسیون سیمان و میزان تبخیر آب نه‌تنها بتن را از حالت تازه خارج می‌کند، بلکه بر مقاومت و دوام بتن سخت شده نیز تأثیر می‌گذارد [۳۱]. خصوصیات بتن تازه تحت تأثیر زیاد درجه حرارت محیط قرار می‌گیرد و در معرض تابش مستقیم خورشید و وزش باد شدیدتر می‌شود [۳۲ و ۳۳]. جمع شدگی پلاستیک قبل از گیرش بتن به دلیل تبخیر آب از سطح بتن اتفاق می‌افتد [۳۴]. جمع شدگی پلاستیک، ترک‌خوردگی و کاهش مقاومت به دلیل قرار گرفتن در معرض عوامل شدید محیطی رخ می‌دهد [۳۵ و ۳۶]. در مرجع [۳۷] مزایای استفاده از مواد افزودنی مختلف برای کنترل جمع‌شدگی بتن خودتراکم را گزارش کردند. محققان [۳۸ و ۳۹] تغییرشکل پلاستیک افقی مخلوط‌ها را با زودگیرکننده و کندگیرکننده مطالعه کردند بیشترین ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک برای مخلوط‌های حاوی زودگیرکننده مشاهده شد و به دنبال آن مخلوط مرجع و مخلوط کندگیرکننده قرار گرفت. کندگیرکننده‌ها در بتن خودتراکم قادر است آب انداختگی را به‌گونه‌ای طولانی کند که نمونه‌ها رطوبت سطح بتن را برای مدت ۶ ساعت حفظ کنند بنابراین هیچ ترک‌خوردگی جمع شدگی پلاستیک در طول این ۶ ساعت رخ نمی‌دهد [۴۰]. همچنین مشخص شده است کندگیرکننده اثر منفی بر مقاومت نهایی بتن ندارد [۴۱].

بررسی کارایی و رئولوژی بتن برای جلوگیری از انسداد در لوله‌های بتن‌ریزی و عبور از بین آرماتورهای متراکم امری ضروری است، فشار پمپ، طول لوله و مقدار جذب آب سنگدانه به دلیل تغییر در خواص رئولوژی بتن حائز اهمیت می‌باشد [۴۲]. خصوصیات رئولوژی مخلوط تازه سهم زیادی در اختلاط، پمپاژ، فرآیند تراکم و حتی خواص سخت شده بتن خودتراکم دارد [۴۳ و ۴۴]. کارایی و خصوصیات رئولوژی بتن با گذشت زمان و در حین پمپاژ تغییر می‌کند [۴۵-۵۱]. کندگیرکننده منجر به کندتر شدن سرعت رشد پارامترهای رئولوژی می‌شود که می‌توان با کاهش واکنش شیمیایی سیستم سیمان توضیح داد [۵۲]. محققان [۵۳-۵۵] نشان دادند که قطر اندازه‌گیری شده جریان اسلامپ با تنش جاری رابطه معکوس دارد. زمان انتشار اندازه‌گیری شده در آزمایش T₅₀ با ویسکوزیته پلاستیک متناسب می‌باشد. این مطالعات ارائه شده در مراجع [۵۶ و ۵۷] تأیید شده است. تأثیر سنگ و نوع ذرات بر خصوصیات رئولوژی مخلوط بتن، موضوع مطالعات زیادی از محققان بود [۱۴-۱۷ و ۵۸].

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

افزایش حجم ماسه در سنگدانه در محدوده ۳۵ تا ۵۵٪ باعث کاهش تنش جاری (افزایش جریان اسلامپ) می‌شود که سبب افزایش همزمان ویسکوزیته پلاستیک (افزایش زمان انتشار در آزمایش T₅₀) می‌شود. درحالی‌که افزایش شن از ۵۰٪ به ۶۰٪ باعث کاهش جریان اسلامپ حدود ۱۰ سانتی‌متر و افزایش زمان انتشار حدود ۱ ثانیه می‌شود [۵۹ و ۵۶].

در تحقیقات گذشته، روش‌های کنترل کارایی تحت شرایط مختلف محیطی بررسی می‌شد و هنوز گزارشی در مورد سلسله مراتب چگونگی تغییرات کندگیرکننده در بتن خودتراکم گزارش نشده است. ولی در این تحقیق تحت شرایط واقعی ساختمانی، یعنی بدون آنکه تمهیدات دمایی بتن در نظر گرفته شود پس از رساندن دمای بتن به دمای محیط، به بررسی و مقایسه تأثیر کندگیرکننده پرداخته شده است. در اولین هدف با استفاده از آزمایش‌های کارایی، به‌طور کیفی تأثیر کندگیرکننده بر تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک مخلوط‌های بتن تازه خودتراکم مقایسه می‌شود. سپس با استفاده از دستگاه رئومتر و به‌عنوان تابعی از دما و زمان، به‌طور کمی پارامترهای رئولوژی تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک مخلوط‌های بتن خودتراکم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

قبل در این تحقیق ۹ نسبت مخلوط با مقادیر مختلف کندگیرکننده ساخته شده است. برای ساخت مخلوط‌های بتن خودتراکم از سیمان پرتلند نوع ۲ با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است که مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی، در جدول ۱ آورده شده است.

سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل شن، ماسه درشت و ماسه ریز می‌باشند که به ترتیب دارای حداکثر اندازه ۱۲/۵، ۴/۷۵ و ۲/۳۶ میلی‌متر هستند دانه‌بندی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

کندگیرکننده در این تحقیق به‌صورت مایع و دارای وزن مخصوص ۱۱۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. از سوی دیگر در این تحقیق از فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات و افزودنی اصلاح‌کننده ویسکوزیته بر پایه پلی‌ساکارید استفاده شده است که به ترتیب دارای وزن مخصوص ۱۰۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند.

جدول (۱) ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند

| وزن مخصوص (kg/m ³) | باقی‌مانده نامحلول | افت حرارتی | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | SO ₃ | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
|--------------------------------|--------------------|------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| ۳۱۵۰ | ۰/۷۴ | ۱/۵۶ | ۲۰/۷۴ | ۴/۹۰ | ۳/۵۰ | ۱/۲۰ | ۶۲/۹۵ | ۳/۰۰ | ۵۷/۶ | ۱۸/۱ | ۵/۸ | ۱۱/۱۶ |



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سنگدانه مصرفی

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۲-۲- نسبت‌های اختلاط و رویه آزمایش

نسبت‌های مخلوط بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ با توجه به دستورالعمل ACI 237R-07 [60] ساخته شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است. در سه مخلوط اول V420 بیانگر بتن خودتراکم از نوع افزودنی اصلاح‌کننده ویسکوزیته با عیار سیمان ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد لازم به ذکر است که سه مخلوط اول به‌عنوان مخلوط‌های مرجع می‌باشد که در آن کندگیرکننده استفاده نشده است. ۶ مخلوط دیگر با R3% و R6% نشان داده شده است. که به ترتیب دارای ۳ و ۶ درصد کندگیرکننده می‌باشند.

اسلامپ هدف 70 ± 30 میلی‌متر انتخاب شد. دمای بتن با توجه به شرایط محیطی برای فصل‌های مختلف انتخاب شده است. ۳ محدوده دمایی یعنی دمای پایین ۹ تا ۱۰ درجه سلسیوس، دمای معمولی ۲۰ تا ۲۲ درجه سلسیوس و دمای بالا ۳۰ تا ۳۲ درجه سلسیوس به‌دست آمده است که در جدول ۳ به ترتیب با نمادهای L، N و H نشان داده شده است.

برای رساندن دمای بتن خودتراکم به دماهای مختلف، ساخت نمونه‌های بتن خودتراکم در فصل‌های مختلف انجام شده است برای رسانیدن دمای بتن به دمای محیط همه مصالح شامل سنگدانه و سیمان در فضای محیط گذاشته شد و سپس برای رساندن دمای بتن به دمای محیط، دمای آب تغییر داده می‌شود.

برای ساخت مخلوط‌ها در گام اول ابتدا شن و ماسه به همراه یک‌سوم آب اختلاط در داخل مخلوط‌کن ریخته شده، سپس مخلوط‌کن به مدت زمان ۱ دقیقه روشن شده است تا مصالح سنگی به‌طور یکنواخت در مخلوط‌کن پخش شوند. در گام دوم سیمان و یک‌سوم آب به همراه فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات به مخلوط‌کن اضافه شده و تا ۳ دقیقه اختلاط صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این گام برای پخش بهتر فوق‌روان‌کننده در سیمان، فوق‌روان‌کننده ابتدا در آب حل شده است و سپس به سیمان اضافه شده است. در گام سوم اصلاح‌کننده ویسکوزیته پس حل شدن در یک‌سوم آب باقی‌مانده، در مخلوط‌کن ریخته شده و به مدت ۳ دقیقه اختلاط صورت می‌گیرد. در مدت ۳ دقیقه اختلاط، کندگیرکننده با فاصله زمانی ۱ دقیقه به مخلوط اضافه می‌شود سپس به مدت ۳ دقیقه فرآیند متوقف می‌شود درنهایت فرآیند اختلاط دو دقیقه دیگر ادامه یافته است تا بتن موردنظر حاصل شود. در گام آخر، اسلامپ بتن تازه خودتراکم کنترل می‌گردد. در این شرایط اگر اسلامپ بتن خودتراکم از اسلامپ هدف کمتر باشد فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اضافه می‌گردد و دوباره اختلاط صورت می‌گیرد، ولی در صورتی که اسلامپ بتن خودتراکم از اسلامپ هدف کمتر باشد مخلوط بتن خودتراکم دوباره ساخته می‌شود. پس از رسیدن بتن خودتراکم به اسلامپ هدف، آزمایش‌های کارایی بر روی بتن تازه انجام می‌گردد سپس برای انجام آزمایش رئولوژی، بتن تازه خودتراکم در طول زمان ۶۰ دقیقه در دستگاه رئومتر قرار می‌گیرد.

جدول ۲- نسبت‌های مخلوط بتن خودتراکم

| دمای محیط | کندگیرکننده (% سیمان) | اصلاح‌کننده لزجت (% سیمان) | شناسه مخلوط | | | | شناسه مخلوط | | |
|-----------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------|-----------|-----|-------------|-----|------------|
| | | | فوق‌روان‌کننده (% سیمان) | ماسه ریز | ماسه درشت | شن | | | |
| ۹ | ۰ | ۰/۶ | ۰/۵۴ | ۳۵۶ | ۷۱۳ | ۷۱۳ | ۱۷۶ | ۴۲۰ | V420-L-ref |
| ۲۰/۵ | ۰ | ۰/۶ | ۰/۵۷ | ۳۵۶ | ۷۱۳ | ۷۱۳ | ۱۷۶ | ۴۲۰ | V420-N-ref |
| ۳۱/۸ | ۰ | ۰/۶ | ۰/۶۱ | ۳۵۶ | ۷۱۳ | ۷۱۳ | ۱۷۶ | ۴۲۰ | V420-H-ref |
| ۹ | ۰/۳ | ۰/۶ | ۰/۶۴ | ۳۵۶ | ۷۱۳ | ۷۱۳ | ۱۷۶ | ۴۲۰ | R3%-L |
| ۲۱/۲ | ۰/۳ | ۰/۶ | ۰/۶۵ | ۳۵۶ | ۷۱۳ | ۷۱۳ | ۱۷۶ | ۴۲۰ | R3%-N |
| ۳۱/۵ | ۰/۳ | ۰/۶ | ۰/۷۵ | ۳۵۶ | ۷۱۳ | ۷۱۳ | ۱۷۶ | ۴۲۰ | R3%-H |
| ۹/۲ | ۰/۶ | ۰/۶ | ۰/۶۴ | ۳۵۶ | ۷۱۳ | ۷۱۳ | ۱۷۶ | ۴۲۰ | R6%-L |
| ۲۰/۸ | ۰/۶ | ۰/۶ | ۰/۶۵ | ۳۵۶ | ۷۱۳ | ۷۱۳ | ۱۷۶ | ۴۲۰ | R6%-N |
| ۳۲/۱ | ۰/۶ | ۰/۶ | ۰/۷۵ | ۳۵۶ | ۷۱۳ | ۷۱۳ | ۱۷۶ | ۴۲۰ | R6%-H |

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۲-۳- شرح آزمایش

۲-۳-۱- آزمایش‌های خواص بتن تازه

ارزیابی کارایی بتن خودتراکم شامل آزمایش جریان اسلامپ، آزمایش T_{50} ، آزمایش جعبه L، آزمایش حلقه J و آزمایش شاخص پایداری چشمی VSI مطابق دستورالعمل PCI [۶۱] انجام شده است. در شکل ۲، تعدادی از این آزمایش‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲- آزمایش‌های کارایی شامل جریان اسلامپ، T_{50} ، حلقه J و شاخص پایداری چشمی

مطابق شکل ۳، برای اندازه‌گیری معیارهای رئولوژی از دستگاه رئومتر استفاده شد که برای تعیین کردن مقادیر تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک، در مدت ۳۰ ثانیه سرعت پره به تدریج از ۰ تا ۰/۷ rps با فاصله ۰/۱ rps افزایش می‌یابد تا ساختار تغلیظ‌پذیری شکسته شود که به آن مدت شکستن گفته می‌شود سپس سرعت پره به صفر کاهش داده می‌شود. میانگین و حداکثر گشتاور نظیر مقادیر سرعت اعمال شده در بازه‌های ۵ ثانیه‌ای ثبت شده و پس از پایان آزمایش در صفحه نمایشگر نشان داده می‌شود. مقادیر ثبت شده به صورت دو نمودار بالارونده و پایین‌رونده تصویر می‌گردد که از روی منحنی مقدار تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک محاسبه می‌شود. که با معادل قرار دادن روابط ۱ و ۲، تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک به دست می‌آید. در واقع اگر رابطه ۱ با معیارهای اندازه‌گیری شده توسط رئومتر در رابطه ۲ مقایسه شود، معلوم می‌شود که به جای τ_0 و μ ، g و h اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$T = g + hN \quad (2)$$

که در آن T گشتاور (Nm)، N سرعت چرخش با واحد (rps)، g گشتاور جاری یا محل قطع منحنی با محور T با واحد (Nm) و h شیب منحنی یا ویسکوزیته گشتاور با واحد (Nm.S) است. از فرمول‌های فوق مشاهده می‌شود که g و h معادل τ_0 و μ است. بنابراین پس از به دست آوردن پارامترهای g و h از دستگاه رئومتر، توسط ضرایبی که از فرمول‌های زیر به دست می‌آید این دو پارامتر به تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک تبدیل می‌شود [۶۲]:

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} 4\pi H (g) \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)}{8\pi^2 H} (h) \quad (4)$$

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

در این فرمول‌ها τ_0 و μ برابر تنش جاری (Pa) و ویسکوزیته پلاستیک (Pa.s)، R_1 و R_2 برابر شعاع پره و شعاع ظرف، H ارتفاع پره و g و h نیز ضرایبی هستند که از خط حاصل از نقاط به دست می‌آیند.



شکل ۳- دستگاه رئومتر

۲-۳-۲- آزمایش بتن سخت شده

آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS 1881-part 116 [۶۳] انجام شده است. برای هر مخلوط بتن سخت شده، سه نمونه قالب‌گیری شد و نتایج، پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه در حوضچه عمل‌آوری به دست آمده‌اند. میانگین نتایج ۳ نمونه به عنوان نتیجه آزمایش در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و تفسیر

۳-۱- کارایی

نتایج آزمایش‌های کارایی مخلوط‌های بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ در جدول ۳ نشان داده شده است. در مقایسه مخلوط‌های حاوی کندگیرکننده (R3% و R6%) نسبت به مخلوط شاهد (V420)، کندگیرکننده‌ها اثر مثبتی در چسبندگی (T_{50}) گذاشته‌اند ولی به دلیل اثر منفی در تنش جاری، سبب افزایش مقدار ارتفاع اندازه‌گیری شده در حلقه J و کاهش نسبت ارتفاع جعبه L شده‌اند، این بدان معنی است که قابلیت عبور بتن خودتراکم از میان فواصل میلگردها کاهش یافته است این نتیجه، مطابق با مرجع [۶۴] که کندگیرکننده سبب اسلامپ اولیه کمتر شده است مطابقت دارد زیرا محققان [۵۳-۵۵] نشان دادند که قطر اندازه‌گیری شده جریان اسلامپ با تنش جاری رابطه معکوس دارد. مورد دیگری که در جدول ۳ ملاحظه می‌گردد وقتی که مقدار کندگیرکننده از ۰ به ۰/۳ درصد افزایش می‌یابد مقاومت فشاری ۲۸ روزه افزایش ناچیزی داشته است ولی وقتی مقدار کندگیرکننده به ۰/۶ درصد افزایش داده می‌شود مقاومت فشاری ۲۸ روزه حدوداً تا ۵ مگاپاسکال افزایش پیدا می‌کند این می‌تواند به دلیل آن باشد که مقدار ۰/۶ درصد کندگیرکننده، زمان کافی‌تری برای هیدراتاسیون بتن فراهم کرده باشد. در مرجع [۶۴]، افزایش کندگیرکننده تا یک مقدار مشخص سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود که با نتیجه تحقیق شباهت دارد.

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

جدول (۳): نتایج آزمایش کارایی بر روی مخلوط‌های بتن خودتراکم

| مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa) | شاخص پایداری چشمی (VSI) | قیف V (s) | جعبه L (H ₂ /H ₁) | حلقه J (mm) | T ₅₀ (s) | جریان اسلامپ (mm) | گروه مخلوط |
|-------------------------------|----------------------------|-----------|---|----------------|---------------------|----------------------|----------------|
| ۴۲/۵ | ۰ | ۹ | ۰/۸۸ | ۳/۵ | ۲/۸۵ | ۷۰۰ | V420-L- ref |
| ۴۱/۴ | ۰ | ۸/۷ | ۰/۸۷ | ۴ | ۲/۷۲ | ۷۰۰ | V420-N- ref |
| ۳۹/۸ | ۰ | ۸/۴ | ۰/۸۵ | ۴ | ۲/۵۷ | ۷۱۰ | V420-H- ref |
| ۴۴/۹ | ۱ | ۹/۶ | ۰/۸۶ | ۴ | ۳/۱۲ | ۶۹۰ | R3%-L |
| ۴۲/۹ | ۰ | ۹/۳ | ۰/۸۶ | ۴/۵ | ۳ | ۶۸۰ | R3%-N |
| ۴۱/۳ | ۱ | ۹/۱ | ۰/۸۳ | ۵ | ۲/۹۵ | ۶۷۰ | R3%-H |
| ۴۷/۳ | ۰ | ۱۰/۲ | ۰/۸۶ | ۵/۵ | ۳/۲ | ۶۸۰ | R6%-L |
| ۴۵/۸ | ۱ | ۹/۶ | ۰/۸۵ | ۵/۵ | ۳/۱۵ | ۶۷۰ | R6%-N |
| ۴۴ | ۱ | ۹/۴ | ۰/۸۲ | ۶ | ۳/۰۳ | ۶۷۰ | R6%-H |

۳-۲- افت اسلامپ

همان‌طور که از نتایج جدول ۴ مشخص است افزایش زمان در دماهای مختلف تأثیر منفی بر افت جریان اسلامپ گذاشته است که با افزودن کندگیرکننده، کارایی بتن خودتراکم بهبود پیدا کرده است. نکته‌ای که حائز اهمیت است بتن خودتراکم حاوی ۰/۳ درصد کندگیرکننده (R3%) اثر خوبی بر کاهش افت اسلامپ گذاشته است این در حالی است وقتی مقدار کندگیرکننده به ۰/۶ درصد افزایش داده شده است نسبت به بتن خودتراکم با ۰/۳ درصد کندگیرکننده، اثر کمتری داشته است این یعنی با افزایش مقدار کندگیرکننده نمی‌توان اطمینان داشت که همان نرخ رشد بر کاهش افت اسلامپ را حفظ کند.

جدول ۴- نتایج افت اسلامپ بر روی مخلوط‌های بتن خودتراکم بر حسب سانتی‌متر

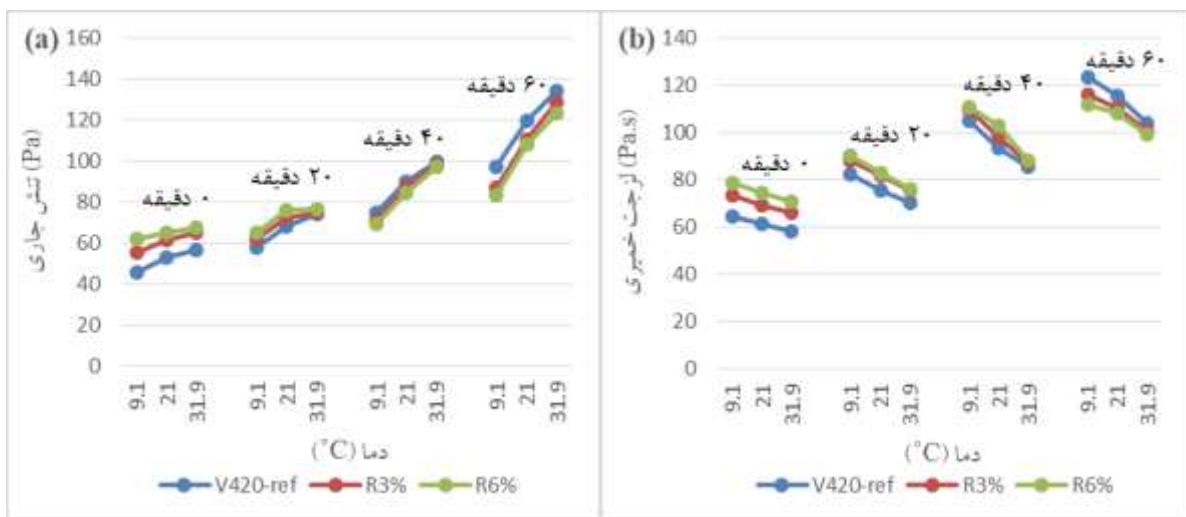
| بالا (۳۰-۳۲) | | | | معمولی (۲۰-۲۲) | | | | کم (۸-۱۰) | | دما (سلسیوس) | | |
|-----------------|------|------|----|-------------------|------|------|----|--------------|------|-----------------|----|------|
| ۶۰ | ۴۰ | ۲۰ | ۰ | ۶۰ | ۴۰ | ۲۰ | ۰ | ۶۰ | ۴۰ | ۲۰ | ۰ | |
| ۵۹ | ۶۳ | ۶۷/۵ | ۷۱ | ۶۲/۵ | ۶۵/۵ | ۶۸ | ۷۰ | ۶۵ | ۶۶ | ۶۸/۵ | ۷۰ | V420 |
| ۶۰ | ۶۱ | ۶۴/۵ | ۶۷ | ۶۴ | ۶۵/۵ | ۶۷ | ۶۸ | ۶۶ | ۶۷/۵ | ۶۸ | ۶۹ | R3% |
| ۵۹/۵ | ۶۱/۵ | ۶۵ | ۶۷ | ۶۳ | ۶۳/۵ | ۶۵/۵ | ۶۷ | ۶۶ | ۶۷ | ۶۷/۵ | ۶۸ | R6% |

۳-۳- رئولوژی

نتایج رئولوژی مخلوط‌های حاوی کندگیرکننده در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌طور کلی در همه زمان‌ها در دمای بالا، تنش جاری در بتن‌های حاوی کندگیرکننده، بسیار نزدیک به تنش جاری مخلوط شاهد (V420) دارد این نشان‌دهنده آن است که در زمان استفاده از کندگیرکننده، باید از بالا رفتن دمای بتن جلوگیری کرد. همچنین مطابق شکل ۴، در ابتدا کندگیرکننده‌ها اثر نامطلوبی بر تنش جاری گذاشته است که مطابق شکل، در زمان ۰ دقیقه برای بتن‌های حاوی ۰/۳ و ۰/۶ درصد کندگیرکننده به ترتیب ۱۰ و ۱۷ پاسکال، تنش جاری را نسبت به بتن‌های شاهد افزایش داده است و چون افزایش کندگیرکننده سبب کاهش اسلامپ اولیه و کاهش نرخ افت جریان اسلامپ می‌شود [۶۴ و ۵۲] و کاهش جریان اسلامپ از

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

جریان اسلامپ ۷۰۰ میلی‌متر، سبب افزایش تنش جاری می‌شود [۶۵] بنابراین با در نظر گرفتن جریان اسلامپ، نتیجه حاصل شده منطقی می‌باشد. البته از آنجایی که کندگیرکننده‌ها سبب کاهش نرخ رشد تنش جاری با زمان می‌شوند بعد از زمان ۴۰ دقیقه، تنش جاری کمتری نسبت به تنش جاری بتن‌های شاهد دارند که هر چه دمای بتن کمتر باشد این اختلاف بیشتر است. نکته‌ی دیگری که حائز اهمیت است کندگیرکننده‌ها همان‌طور که در ابتدا سبب افزایش تنش جاری و کاهش نرخ تنش جاری، سبب افزایش ویسکوزیته پلاستیک و کاهش نرخ ویسکوزیته پلاستیک با زمان نیز شدند کاهش نرخ رشد تنش جاری برای بتن خودتراکم حاوی کندگیرکننده بعد از زمان ۴۰ دقیقه خود را نشان داد این در حالی است که کاهش نرخ رشد ویسکوزیته پلاستیک برای بتن خودتراکم حاوی کندگیرکننده، بعد از زمان ۶۰ دقیقه نمایان شد. با این اوصاف، بتن حاوی کندگیرکننده در زمان‌های بیشتر از ۴۰ دقیقه می‌تواند سبب بهبود رئولوژی شود.



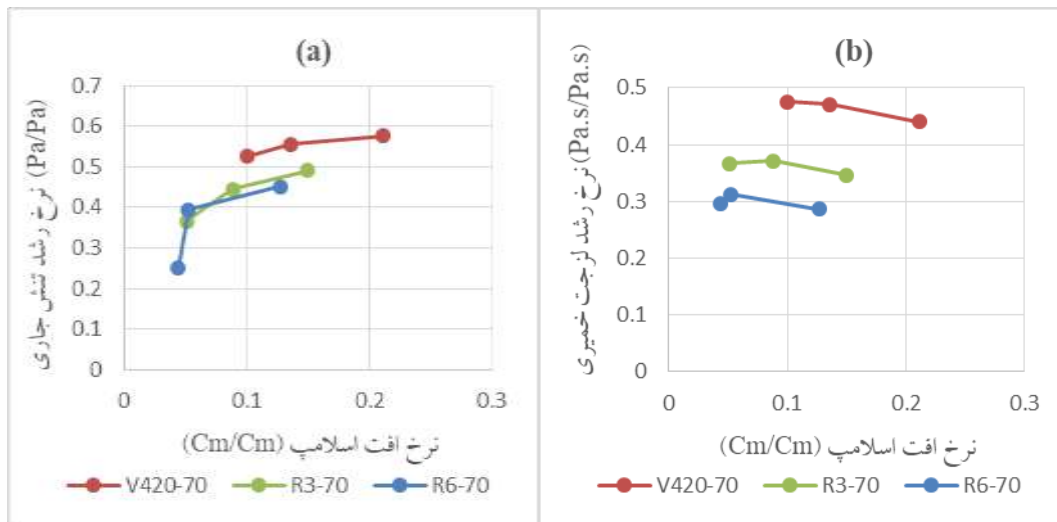
شکل ۴- اثر دما، زمان و کندگیرکننده بر (a): تنش جاری و (b): ویسکوزیته پلاستیک

۳-۴- تأثیر نرخ افت اسلامپ

در شکل ۵، نرخ افت اسلامپ، نرخ رشد تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک نشان داده شده است. افزایش کندگیرکننده تا ۰/۳ درصد وزن سیمان سبب کاهش نرخ افت اسلامپ، نرخ رشد تنش جاری و نرخ رشد ویسکوزیته پلاستیک می‌شود ولی افزایش کندگیرکننده تا ۰/۶ درصد وزن سیمان، علی‌رغم اینکه سبب کاهش نرخ رشد ویسکوزیته پلاستیک شده است ولی تأثیر چندانی در نرخ رشد تنش جاری و نرخ رشد افت اسلامپ نداشته است و به عبارتی نرخ رشد تنش جاری و افت اسلامپ مخلوط ۰/۶ درصد کندگیرکننده مشابه با مخلوط با ۰/۳ درصد کندگیرکننده می‌باشد پس می‌توان نتیجه گرفت که برای کاهش افت اسلامپ نیاز به افزایش کندگیرکننده بیش از یک حد معین نمی‌باشد.

مطابق با مطالعات گذشته [۲۹، ۳۰، ۵۲ و ۶۴] چون کندگیرکننده‌های شیمیایی علاوه بر کاهش افت اسلامپ، سبب کاهش سرعت هیدراتاسیون سیمان و به تبع آن منجر به کندتر شدن سرعت رشد پارامترهای رئولوژی می‌شود، بنابراین نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق منطقی می‌باشد.

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۵- اثر نرخ افت اسلامپ بر نرخ رشد: (a): تنش جاری و (b): ویسکوزیته پلاستیک

۴- نتیجه گیری

بر پایه مطالب مطرح شده در این تحقیق، نتایج زیر حاصل شد:

- در همه زمان‌ها در دمای بالا، خواص رئولوژی در بتن‌های حاوی کندگیرکننده، بسیار نزدیک به بتن بدون کندگیرکننده است، این نشان دهنده آن است که در زمان استفاده از کندگیرکننده، باید از بالا رفتن دمای بتن جلوگیری کرد.
- در ابتدا کندگیرکننده‌ها سبب افزایش تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک می‌شود که با افزایش مقدار کندگیرکننده‌ها، این اثر بیشتر می‌شود، البته از آنجایی که کندگیرکننده‌ها نرخ رشد تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک را کاهش می‌دهد بعد از زمان ۴۰ دقیقه، بتن دارای کندگیرکننده دارای خواص رئولوژی بهتری نسبت به بتن معمولی می‌باشد.
- با افزایش مقدار کندگیرکننده از ۰ درصد به ۰/۳ درصد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه تقریباً بدون تغییر مانده است ولی با افزایش مقدار کندگیرکننده به ۰/۶ درصد، مقاومت فشاری افزایش پیدا می‌کند این می‌تواند به دلیل آن باشد که مقدار ۰/۶ درصد کندگیرکننده، زمان کافی‌تری را برای هیدراتاسیون بهتر بتن فراهم می‌کند.

مراجع

1. Van Damme, H., 2018. Concrete material science: Past, present, and future innovations. Cement and concrete research, 112, pp.5-24.
2. Rodríguez, G., Blanco, A., Pujadas, P. and Aguado, A., 2017. Self-compacting concrete in the Temple of Sagrada Familia. Journal of Architectural Engineering, 23(3), pp.1-8.
3. Assaad, J.J., 2017. Influence of recycled aggregates on dynamic/static stability of self-consolidating concrete. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 6(6), pp.345-365.
4. Nagaratnam, B.H., Rahman, M.E., Mirasa, A.K., Mannan, M.A. and Lame, S.O., 2016. Workability and heat of hydration of self-compacting concrete incorporating agro-industrial waste. Journal of Cleaner Production, 112, pp.882-894.
5. Jahandari, S., Saberian, M., Tao, Z., Mojtahedi, S.F., Li, J., Ghasemi, M. and Li, W., 2019. Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes. Cold Regions Science and Technology, 160, pp.242-251.
6. Saberian, M. and Li, J., 2018. Investigation of the mechanical properties and carbonation of construction and demolition materials together with rubber. Journal of cleaner production, 202, pp.553-560.



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

7. Saberian Boroujeni, M., Li, J. and Cameron, D., 2019. Effect of crushed glass on behavior of crushed recycled pavement materials together with crumb rubber for making a clean green base and subbase. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7), pp.1-7.
8. Ardalan, R.B., Jamshidi, N., Arabameri, H., Joshaghani, A., Mehrinejad, M. and Sharafi, P., 2017. Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO₂ oxide and spraying nanosilicon practices. *Construction and Building Materials*, 146, pp.128-135.
9. Nagrockienė, D., Girskas, G. and Skripiūnas, G., 2017. Properties of concrete modified with mineral additives. *Construction and Building Materials*, 135, pp.37-42.
10. Güneysi, E., Gesoğlu, M., Al-Rawi, S. and Mermerdaş, K., 2014. Effect of volcanic pumice powder on the fresh properties of self-compacting concretes with and without silica fume. *Materials and structures*, 47(11), pp.1857-1865.
11. Granata, M. F., 2015. Pumice powder as filler of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 96, pp.581-590.
12. Carlsward, J., Emborg, M., Utsi, S. and Oberg, P., 2003. Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete. In *Proceeding of the Third international RILEM conference on SCC*, Island, 33, pp.143-153.
13. Wallevik, Ö.H. and Nielsson, I., 2003. 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, pp.506–513.
14. Li, J., Yin, J., Zhou, S. and Li, Y., 2005. Mix proportion calculation method of self-compacting high performance concrete. *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating*, pp.199–205.
15. Skarendahl, Å. and Petersson, Ö., 1999. Self-compacting concrete. *Proceedings of 1st International Symposium Self-Compacting Concrete*, Stockholm.
16. Kostrzanowska-Siedlarz, A. and Gołaszewski, J., 2016. Rheological properties of high performance self-compacting concrete: effects of composition and time. *Construction and Building Materials*, 115, pp.705-715.
17. Tattersall, G.H. and Banfill, P.F., 1983. *The Rheology of Fresh Concrete*. Pitman Books Limited, Boston.
18. Ghafari, E., Baig, A., Nicoletta, K., Feys, D., Ferron, R.D. and Khayat, K.H., 2014. Admixture compatibility of alternative supplementary cementitious materials for pavement and structural concrete. Missouri University of Science and Technology. Center for Transportation Infrastructure and Safety.
19. Prasittisopin, L. and Trejo, D., 2015. Effects of mixing variables on hardened characteristics of portland cement mortars. *ACI Materials Journal*, 112(3), pp.399-408.
20. Ghasemi, M., Rasekh, H., Berenjian, J., and AzariJafari, H., 2019. Dealing with workability loss challenge in SCC mixtures incorporating natural pozzolans: a study of natural zeolite and pumice. *Construction and Building Materials*, 222, pp.424-436.
21. AzariJafari, H., Kazemian, A., Ahmadi, B., Berenjian, J. and Shekarchi, M., 2014. Studying effects of chemical admixtures on the workability retention of zeolitic Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 72, pp.262-269.
22. Han, C. G., Han, M. C., Yoon, C.W. and Oh, S.G., 2002. Setting and Mechanical Properties of Concrete with Super Retarding Agent Content and Curing Temperature. In *6th Joint Symposium on Building Materials and Construction between Korea and Japan*, Vol. 6, pp. 173-178.
23. Han, M.C. and Han, C.G., Use of maturity methods to estimate the setting time of concrete containing super retarding agents. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), pp.164-172.
24. Han, C.G., Han, M.C., Yoon, C.W. and Sim, B.K., 2002. Setting and mechanical properties of concrete using saccharic type super retarding agent. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 14(4), pp.589-596.
25. Okawa, Y., Yamamiya, H. and Nishibayashi, S., 2000. Study on the reuse of returned concrete. *Magazine of Concrete Research*, 52(2), pp.109-115.
26. Zhu, P., Jiang, L., Shi, Y., Xu, N., & Jin, M., 2020. Influence of retarders on hydration and microstructure development of cement containing high-volume limestone powder. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141(2), pp.685-696.
27. Murthy, R.R., Chavali, M. and Mohammad, F., 2020. Synergistic effect of nano-silica slurries for cementing oil and gas wells. *Petroleum Research*, 5(1), pp.83-91.
28. Chhorn, C. and Lee, S.W., 2017. Consistency control of roller-compacted concrete for pavement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), pp.1757-1763.



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

29. Ataie, F.F., 2019. Influence of Cementitious System Composition on the Retarding Effects of Borax and Zinc Oxide. *Materials*, 12(15), p.2340.
30. Massarweh, O., Maslehuddin, M., Al-Dulaijan, S.U. and Shameem, M., 2020. Performance evaluation of heavy oil fly ash as a retarder of Portland cement hydration. *Journal of Building Engineering*, 101881.
31. Saafan, M.A.A. and Bait AL-Shab, T., 2020. Behavior of Self-Compacting Concrete in Simulated Hot Weather. *ERJ. Engineering Research Journal*, 43(3), pp.223-230.
32. Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M., Shameem, M. and Ibrahim, M., 2007. Shrinkage of plain and silica fume cement concrete under hot weather. *Cement and Concrete Composites*, 29(9), pp.690-699.
33. Shalon, R., 1978. Report on behaviour of concrete in hot climate. *Matériaux et Construction*, 11(2), pp.127-131.
34. ACI Committee 116, 2000. *Cement and Concrete Terminology*, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute: Farmington Hills.
35. Ahmadi, B.H., 2000. Initial and final setting time of concrete in hot weather. *Materials and Structures*, 33(8), pp.511-514.
36. Ishee, C. and Surana, S., 2019. Hot weather concreting. In *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, Woodhead Publishing, pp.131-150.
37. Kar, S. and Sanjay, S.S., 2016. Effect of admixtures on shrinkage properties in self compacting concrete. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5(2), pp.292-296.
38. Kronlöf, A., Leivo, M. and Sipari, P., 1995. Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar. *Cement and Concrete Research*, 25(8), pp.1747-1754.
39. Combrinck, R. and Boshoff, W.P., 2013. Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65(8), pp.486-493.
40. Leemann, A., Nygaard, P. and Lura, P., 2014. Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 46, pp.1-7.
41. Khalid, N.H. A., Hussin, M.W., Ismail, M., Basar, N., Ismail, M.A., Lee, H.S., and Mohamed, A., 2015. Evaluation of effectiveness of methyl methacrylate as retarder additive in polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 93, pp.449-456.
42. Jang, K.P., Kwon, S.H., Choi, M.S., Kim, Y.J., Park, C.K. and Shah, S.P., 2018. Experimental observation on variation of rheological properties during concrete pumping. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), p.79.
43. Figueiras, H., Nunes, S., Coutinho, J.S. and Andrade, C., 2014. Linking fresh and durability properties of paste to SCC mortar. *cement and concrete composites*, 45, pp.209-226.
44. Mahmoodzadeh, F. and Chidiac, S.E., 2013. Rheological models for predicting plastic viscosity and yield stress of fresh concrete. *Cement and Concrete Research*, 49, pp.1-9.
45. Choi, M., Park, K. and Oh, T., 2016. Viscoelastic properties of fresh cement paste to study the flow behavior. *international journal of concrete structures and materials*, 10(3), pp.65-74.
46. Feys, D., De Schutter, G., Khayat, K. H. and Verhoeven, R. 2016. Changes in rheology of self-consolidating concrete induced by pumping. *Materials and Structures*, 49(11), pp.4657-4677.
47. Ko, J.H., Moon, H.J., Seok, W.K., Park, S.J. and Kim, H.J., 2008. A study on the 1:1 full scale core wall mock-up test of high strength concrete performed by testing pumpability. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 24(8), pp.203-210.
48. Ko, J.W., Kim, J.J., Lee, S.H., Moon, H.J. and Park, S.J., 2010. An experimental study on the physical property change of high strength concrete for high-rise building before and after concrete pumping transfer. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 26(9), pp.71-78.
49. Kwon, S.H., Park, C.K., Jeong, J.H., Jo, S.D. and Lee, S.H., 2013. Prediction of concrete pumping: Part II- Analytical prediction and experimental verification. *ACI Materials Journal*, 110(6), pp.657-668.
50. Secrieru, E., Cotardo, D., Mechtcherine, V., Lohaus, L., Schröfl, C. and Begemann, C., 2018. Changes in concrete properties during pumping and formation of lubricating material under pressure. *Cement and Concrete Research*, 108, pp.129-139.
51. Kwon, S.H., Jang, K.P., Kim, J.H. and Shah, S.P., 2016. State of the art on prediction of concrete pumping. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3), pp.75-85.
52. Tan, H., Zou, F., Ma, B., Liu, M., Li, X. and Jian, S., 2016. Effect of sodium tripolyphosphate on adsorbing behavior of polycarboxylate superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 126, pp.617-623.
53. Domone, P.J. and JIN, J., 1999. Properties of mortar for self-compacting concrete. In *Self-compacting concrete*, Stockholm, pp.109-120.



دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

54. Schwartzentruber, L.A., Le Roy, R. and Cordin, J., 2006. Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC). *Cement and Concrete Research*, 36(7): 1203-1213.
55. Norberg, J., Norberg, P. B. and Billberg, P., 1997. Effects of a new generation of superplasticizers on the properties of fresh concrete. *Special Publication*, 173: 583-598.
56. Szwabowski, J. and Gołaszewski, J., 2010. Properties of cement paste and aggregate filling with cement paste as formative factors of self-compactness and compressive strength of concrete. *Cement Wapno Beton*, 2.
57. Bartos, P.J.M., Sonebi, M. and Tamimi, A.K., 2007. Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests, Report of RILEM Technical Committee 145-WSM RILEM Report 24, RILEM Publications S.A.R.L., p. 127.
58. De Schutter, G., Bartos, P.J., Domone, P. and Gibbs, J., 2008. *Self Compacting Concrete*, Whittles Publishing, Dunbeath, p. 296.
59. Soutsos, M.N., and Domone, P.L., 1993. Design of high strength concrete mixes with normal weight aggregates. In *Proc. of the 3rd International Symposium on Utilization of High Strength Concrete*, Lillehammer, Norway.
60. ACI 237R-07, 2007. *Self-consolidating Concrete*. American Concrete Institute.
61. Team, PCI Self-Consolidating Concrete FAST., 2003. Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in PCI Member Plants. *PCI Journal*, 48.3, pp.14-18.
62. Heirman, G., Hendrickx, R., Vandewalle, L., Van Gemert, D., Feys, D., De Schutter, G., Desmet, B. and Vantomme, J., 2009. Integration approach of the Couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer: Part II. Influence of mineral additions and chemical admixtures on the shear thickening flow behaviour. *Cement and Concrete research*, 39(3), pp.171-181.
63. Standard, B. S. Part 116., 1881. Standard test method for compressive strength of cubic concrete specimens: British Standards Institution.
64. Alsadey, S., 2013. Effects of Super Plasticizing and Retarding Admixtures on Properties of Concrete. *International Conference on Innovations in Engineering and Technology*.
65. Laskar, A.I., 2009. Correlating slump, slump flow, vebe and flow tests to rheological parameters of high-performance concrete. *Materials Research*, 12(1), pp.75-81.