

بررسی خواص رئولوژی بتن خودتراکم با استفاده از نمودارهای رئوگراف

سید عظیم حسینی *

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

علی زال نژاد

دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

چکیده

بتن خودتراکم در برابر تغییرات زمان، دما و مصالح نسبت به بتن معمولی دارای حساسیت بیشتری می‌باشد. این موضوع به علت ترکیبی از نیازهای متنوع بتن خودتراکم در حالت تازه می‌باشد. رئولوژی اطلاعات ارزشمندی در مورد خصوصیات بتن تازه خودتراکم ارائه می‌دهد، ولی چگونگی دستیابی به بتن بهینه خودتراکم با استفاده از نمودارهای رئوگراف، می‌تواند اطلاعات کاربردی را سبب شود. در این تحقیق بتن‌های خودتراکم با مقادیر متفاوت سیمان، پودرسنگ، افزودنی اصلاح‌کننده لزجت و انواع فوق‌روان‌کننده تحت شرایط محیطی مختلف ساخته شده است و به عبارتی برای اندازه‌گیری خواص رئولوژی، 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. در این پژوهش با استفاده از نمودارهای رئوگراف، خواص رئولوژی اجزای بتن خودتراکم در طول زمان ۶۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده، استفاده از فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات نسبت به فوق‌روان‌کننده نفتالین سولفونات، رئولوژی بتن خودتراکم را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، افزایش سیمان تا ۴۴۰ کیلوگرم بر مکعب در بتن‌های خودتراکم حاوی اصلاح‌کننده لزجت، سبب بهبود رئولوژی می‌شود. بتن‌های با افزودنی اصلاح‌کننده لزجت، ۵۰ درصد افت جریان اسلامپ کمتری نسبت به بتن‌های پودری دارند بنابراین برای دمای بالا، بتن‌های پودری توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: دما، سیمان، پودرسنگ، افزودنی اصلاح‌کننده لزجت، فوق‌روان‌کننده.

* نویسنده مسئول: azim_hosseini@azad.ac.ir

۱- مقدمه

پلی کربوکسیلات بوده است.

پودرهای معدنی خواص بتن تازه خودتراکم را بهبود می‌دهند [۱۷-۲۴]. پوزولان‌های طبیعی از جمله پودر پومیس در بهبود خواص رئولوژی بتن خودتراکم مفید گزارش شده است [۲۵-۲۷]. تأثیر میکروسیلیس بر خصوصیات رئولوژی کاملاً پیچیده است. در حجم ۳ تا ۵ درصد باعث کاهش تنش جاری و لزجت خمیری می‌شود. با این حال، در حجم ۵ تا ۱۰ درصد منجر به افزایش تنش جاری و لزجت خمیری می‌شود [۲۸-۳۳].

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 [۳۴]. خصوصیات رئولوژی مخلوط تازه سهم زیادی در اختلاط، پمپاژ، فرایند تراکم و حتی خواص سخت شده بتن خودتراکم دارد [۳۵ و ۳۶]. رئولوژی بتن با گذشت زمان و در حین پمپاژ تغییر می‌کند در مورد علل تغییر در خصوصیات رئولوژی هنگام پمپاژ، محققان افزایش دمای ناشی اصطکاک بین بتن و سطح داخلی لوله، افزایش جذب آب سنگ‌دانه‌ها تحت فشار بالا، تغییرات در ساختار زنجیره‌ی مولکولی مخلوط شیمیایی و کاهش محتوای هوا را از دلایل اصلی را می‌دانند [۳۷-۴۳].

کندگیرکننده منجر به کندتر شدن سرعت رشد پارامترهای رئولوژی می‌شود که می‌توان با کاهش سرعت هیدراتاسیون سیمان توضیح داد [۴۴].

محققان [۴۵-۴۷] نشان دادند که قطر اندازه‌گیری شده جریان اسلامپ با تنش جاری رابطه معکوس دارد. زمان انتشار اندازه‌گیری شده در آزمایش T50 با لزجت خمیری متناسب می‌باشد.

این مطالعات ارائه شده در مراجع [۴۸ و ۴۹] تأیید شده است. تأثیر سنگ‌دانه و نوع ذرات بر خصوصیات رئولوژی مخلوط بتن، موضوع مطالعات زیادی از محققان بوده است [۳۰-۳۳ و ۵۰]. افزایش حجم ماسه در سنگ‌دانه در محدوده ۳۵ تا ۵۵٪ باعث کاهش تنش جاری (افزایش جریان اسلامپ) می‌شود که سبب افزایش همزمان لزجت خمیری (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 [۴۸ و ۵۱].

واژه رئولوژی به معنای مطالعه تغییر شکل و جریان مواد است. شناخت رفتار رئولوژی بتن خودتراکم سبب می‌شود که انتخاب مصالح مصرفی و طرح مخلوط به درستی انجام شود. رئوگراف به روشی سیستماتیک، تأثیر تغییرات متنوع مواد تشکیل‌دهنده بتن بر رفتار رئولوژی بتن خودتراکم را نشان می‌دهد بنابراین رئوگراف ابزاری مناسب و اساسی برای مقایسه و تحلیل انواع مخلوط‌های بتن خودتراکم می‌باشد. اثرات بسیاری از مواد افزودنی و همچنین ترکیبات اساسی بتن تازه از قبیل آب، ماده افزودنی حباب‌ساز، فوق روان‌کننده و میکروسیلیس در رئوگراف‌ها نشان داده شده است [۱]. طبق استاندارد ACI 238 [۲] و Lukowski [۳]، افزایش دما، سبب افزایش نرخ رشد تنش جاری و کاهش نرخ رشد لزجت خمیری می‌شود. زیرا افزایش دما سبب تبخیر سریع آب اختلاط و افزایش شتاب هیدراتاسیون سیمان می‌شود. این مشکلات را می‌توان با استفاده از افزودنی شیمیایی، نوع سیمان، نسبت آب به پودر و تغییر در دیگر اجزای تشکیل‌دهنده بتن کاهش داد [۴-۹]. اثر دما بر مخلوط با نسبت زیاد آب به پودر، متفاوت از مخلوط با نسبت کم آب به پودر می‌باشد به‌طور کلی بتن خودتراکم نوع پودری به‌طور قابل توجهی زمان گیرش را تسریع می‌بخشد این امر به دلیل کاهش نسبت آب به پودر و همچنین استفاده پرکننده سنگ‌آهک می‌باشد که به گیرش سرعت می‌بخشد بنابراین برای حمل و نقل‌های کوتاه و پیشرفت سریع در محل ساخت و ساز، بتن خودتراکم پودری را می‌توان بهترین انتخاب در نظر گرفت [۱۰-۱۲].

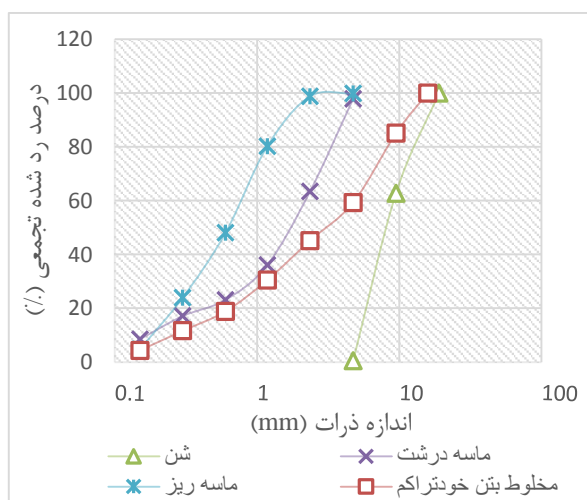
Ravina [۱۳] و Hampton [۱۴] از فوق‌روان‌کننده برای جبران جریان اسلامپ در دمای بالا استفاده کردند. مشخص شد که مواد افزودنی شیمیایی، کارایی بتن را بهبود می‌دهد و مقدار کل آب موردنیاز برای جبران جریان اسلامپ را کاهش می‌دهند. مطابق تحقیقات Nehdi و Al-Martini [۱۵ و ۱۶] در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، پلی کربوکسیلات یک فوق‌روان‌کننده مؤثر است زیرا در مقدارهای کم، قادر به دستیابی به مقادیر تنش جاری کم می‌باشند. ولی به نظر می‌رسد که نفتالین سولفونات حفظ جریان اسلامپ بهتری تا ۵۰ دقیقه از خود نشان می‌دهد و نتایج برای بتن‌های با مقادیر جریان اسلامپ یکسان نشان می‌دهد که بالاترین مقاومت فشاری در هنگام استفاده از فوق‌روان‌کننده

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان

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

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی

مصالح	جرم حجمی دانه‌ای اشباع با سطح خشک (kg/m ³)	جذب آب (%)
شن	۲۵۷۰	۲/۹۴
ماسه درشت	۲۷۰۰	۳/۲۳
ماسه ریز	۲۷۵۰	۳/۰۷۵



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی و مخلوط بتن خودتراکم

در سه مخلوط اول V420 بیانگر بتن خودتراکم از نوع افزودنی اصلاح‌کننده لزجت با عیار سیمان ۴۲۰ kg/m³ می‌باشد لازم به ذکر

در تحقیقات گذشته، روش‌های حفظ کارایی، مثل اثر نوع فوق‌روان‌کننده‌ها برای کنترل کارایی بتن خودتراکم تحت شرایط مختلف محیطی بررسی می‌شد. 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، با به کارگیری مقادیر مختلف سیمان، پودرسنگ، افزودنی اصلاح‌کننده لزجت و انواع فوق‌روان‌کننده‌ها، سعی در بهبود اثرات منفی ناشی از تغییرات دمایی بتن و زمان، شده است. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از آزمایش‌های کارایی، به‌طور کیفی تنش جاری شدن و لزجت خمیری مخلوط‌های بتن تازه خودتراکم مقایسه می‌شود. سپس با استفاده از دستگاه رئومتر، به‌طور کمی پارامترهای رئولوژی تنش جاری شدن و لزجت خمیری مخلوط‌های بتن خودتراکم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت مخلوط‌های بتن خودتراکم از سیمان پرتلند تیپ ۲ با دانسیته ۳۱۵۰ kg/m³ و پودرسنگ با دانسیته ۲۶۱۰ kg/m³ استفاده شد.

مشخصات شیمیایی سیمان در جدول ۱ ارائه شده است. سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل شن، ماسه درشت و ماسه ریز می‌باشد که به ترتیب دارای حداکثر اندازه ۱۲/۵، ۶ و ۳ میلی‌متر هستند مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌های مصرفی در جدول ۲ و دانه‌بندی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای بررسی اثر افزودنی‌های شیمیایی بر مشخصات رئولوژی از فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلات و نفتالین سولفونات به‌صورت مایع استفاده شده است که به ترتیب دارای وزن مخصوص ۱۰۳۰ و ۱۰۸۰ kg/m³ می‌باشند و برای مقایسه تأثیر پودرسنگ از افزودنی اصلاح‌کننده لزجت استفاده شد که دارای وزن مخصوص ۱۵۰۰ kg/m³ می‌باشد.

۲-۲- نسبت‌های اختلاط و رویه آزمایش

در این تحقیق ۱۸ مخلوط بتن خودتراکم ساخته شده است. نسبت‌های مخلوط ساخته‌شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲، با توجه به دستورالعمل [۵۲] ACI 237 انتخاب شده است که در جدول ۳ نشان داده شده است.

افزودنی اصلاح کننده لزجت به ترتیب با ۱۰۰ و ۵۰ kg/m³ پودرسنگ جایگزین می‌شوند که به منظور مقایسه پودرسنگ افزودنی اصلاح کننده لزجت در مخلوط‌های بتن خودتراکم می‌باشند. جریان اسلامپ هدف ۷۰±۲۰ mm انتخاب شد. دمای بتن با توجه به شرایط محیطی برای فصل‌های مختلف انتخاب شده است. ۳ محدوده دمایی یعنی دمای پایین ۸ تا ۱۰ درجه سلسیوس، دمای معمولی ۲۰ تا ۲۲ درجه سلسیوس و دمای بالا ۳۰ تا ۳۲ درجه سلسیوس به دست آمده است که در جدول ۳ به ترتیب با نمادهای L، N و H نشان داده شده است.

است که سه مخلوط اول، به عنوان مخلوط‌های مرجع می‌باشند و در آن‌ها از فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات استفاده شده است. سه مخلوط دوم با NS نشان داده شده است که به جای فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات از فوق‌روان‌کننده نفتالین سولفونات استفاده می‌شود که برای مقایسه فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات و نفتالین سولفونات می‌باشند. سه مخلوط سوم و چهارم با V440 و V460 نشان داده شده است که به ترتیب دارای عیار سیمان ۴۴۰ و ۴۶۰ kg/m³ می‌باشند که به جهت مقایسه عیار سیمان ساخته شده‌اند. سه مخلوط پنجم و ششم با P420 و C420 نشان داده شده است در این مخلوط‌ها،

جدول ۳- جزئیات نسبت‌های مخلوط انواع بتن‌های خودتراکم

دمای محیط	اصلاح کننده لزجت (درصد وزن سیمان)	نفتالین سولفونات (درصد وزن سیمان)	پلی کربوکسیلات (درصد وزن سیمان)	مقادیر (kg/m ³)				شناسه مخلوط	
				ماسه ریز	ماسه درشت	شن	پودرسنگ		
۹	۰/۶	-	۰/۶۴	۳۵۶	۷۱۳	۷۱۳	-	۴۲۰	V420-L
۲۰/۵	۰/۶	-	۰/۶۵	۳۵۶	۷۱۳	۷۱۳	-	۴۲۰	V420-N
۳۱/۸	۰/۶	-	۰/۷۵	۳۵۶	۷۱۳	۷۱۳	-	۴۲۰	V420-H
۸/۲	۰/۶	۱/۷	-	۳۵۶	۷۱۳	۷۱۳	-	۴۲۰	NS-L
۲۰/۳	۰/۶	۲	-	۳۵۶	۷۱۳	۷۱۳	-	۴۲۰	NS-N
۳۱/۴	۰/۶	۲/۴	-	۳۵۶	۷۱۳	۷۱۳	-	۴۲۰	NS-H
۸/۷	۰/۶	-	۰/۶۲	۳۴۸	۶۹۶	۶۹۶	-	۴۴۰	V440-L
۲۰/۴	۰/۶	-	۰/۶۳	۳۴۸	۶۹۶	۶۹۶	-	۴۴۰	V440-N
۳۰/۷	۰/۶	-	۰/۶۸	۳۴۸	۶۹۶	۶۹۶	-	۴۴۰	V440-H
۸/۵	۰/۶	-	۰/۵۸	۳۴۱	۶۸۱	۶۸۱	-	۴۶۰	V460-L
۲۰/۶	۰/۶	-	۰/۶۲	۳۴۱	۶۸۱	۶۸۱	-	۴۶۰	V460-N
۳۱/۵	۰/۶	-	۰/۶۵	۳۴۱	۶۸۱	۶۸۱	-	۴۶۰	V460-H
۸/۷	-	-	۰/۶۷	۳۳۶	۶۷۳	۶۷۳	۱۰۰	۴۲۰	P420-L
۲۰/۸	-	-	۰/۶۹	۳۳۶	۶۷۳	۶۷۳	۱۰۰	۴۲۰	P420-N
۳۲/۱	-	-	۰/۷۸	۳۳۶	۶۷۳	۶۷۳	۱۰۰	۴۲۰	P420-H
۹/۱	۰/۳	-	۰/۶۵	۳۴۶	۶۹۳	۶۹۳	۵۰	۴۲۰	C420-L
۲۰/۷	۰/۳	-	۰/۶۶	۳۴۶	۶۹۳	۶۹۳	۵۰	۴۲۰	C420-N
۳۱/۱	۰/۳	-	۰/۷۶	۳۴۶	۶۹۳	۶۹۳	۵۰	۴۲۰	C420-H

برای رساندن دمای بتن خودتراکم به دماهای مختلف، ساخت نمونه‌ها در فصل‌های مختلف انجام شده است برای رساندن 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

دستگاه رئومتر، تنش جاری و لزجت خمیری می‌باشد. این دستگاه از یک مخزن استوانه‌ای، یک پره ۴ تیغه متحرک با حرکت دورانی، یک موتور اعمال گشتاور پیچشی و یک دستگاه محاسبه گر به همراه نمایشگر تشکیل شده است. مخزن استوانه‌ای دارای ارتفاع ۳۲ سانتیمتر و به حجم ۲۹ لیتر می‌باشد. پره شامل یک میله می‌باشد که به انتهای آن چهار تیغه مستطیلی متصل شده است. این پره درون مخزن حاوی بتن قرار می‌گیرد و ابتدای آن به موتور اعمال گشتاور پیچشی متصل است که گشتاور اعمال شده را به نمونه بتن داخل مخزن منتقل می‌کند. برای تعیین کردن مقادیر تنش جاری و لزجت خمیری، 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.



شکل ۲- آزمایش‌های جریان اسلامپ و T50



شکل ۳- نمونه آزمایش و دستگاه رئومتر

مقادیر ثبت شده به صورت دو نمودار بالارونده و پایین رونده تصویر می‌گردد که از روی منحنی مقدار تنش جاری و لزجت خمیری

یک سوم آب اختلاط در داخل مخلوط کن ریخته شده، سپس مخلوط کن به مدت زمان ۱ دقیقه روشن شده است تا مصالح سنگی به طور یکنواخت در مخلوط کن پخش شوند. در گام دوم سیمان و یک سوم آب به همراه فوق روان کننده پلی کربوکسیلات به مخلوط کن اضافه شده و تا ۳ دقیقه اختلاط صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این گام برای پخش بهتر فوق روان کننده در سیمان، فوق روان کننده ابتدا در آب حل شده است و سپس به سیمان اضافه شده است. در گام سوم اصلاح کننده لزجت پس از حل شدن در یک سوم آب باقی مانده، در مخلوط کن ریخته شده و به مدت ۳ دقیقه اختلاط صورت می‌گیرد. سپس به مدت ۳ دقیقه فرآیند متوقف می‌شود در نهایت فرآیند اختلاط دو دقیقه دیگر ادامه یافته است تا بتن مورد نظر حاصل شود. در گام آخر، جریان اسلامپ بتن تازه خودتراکم کنترل می‌گردد. در این شرایط اگر جریان اسلامپ بتن خودتراکم از جریان اسلامپ هدف کمتر باشد فوق روان کننده پلی کربوکسیلات اضافه می‌گردد و دوباره اختلاط صورت می‌گیرد، ولی در صورتی که جریان اسلامپ بتن خودتراکم از جریان اسلامپ هدف کمتر باشد مخلوط بتن خودتراکم دوباره ساخته می‌شود. پس از رسیدن بتن به جریان اسلامپ هدف، آزمایش‌های کارایی بر روی بتن تازه انجام می‌گردد و در نهایت بتن تازه در طول زمان ۶۰ دقیقه در دستگاه رئومتر قرار می‌گیرد.

۳-۲- روش‌های آزمایش

آزمایش‌های ارزیابی کارایی بتن خودتراکم شامل آزمایش جریان اسلامپ، آزمایش جعبه L و آزمایش T50 مطابق دستورالعمل PCI [۵۳] انجام شده است. مطابق شکل ۲، در آزمایش جریان اسلامپ، میانگین قطر دایره‌ای که بتن پس از پخش شدن می‌سازد، معیار برای روانی بتن خواهد بود. آزمایش T50، زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد که به عنوان معیاری از لزجت خمیری بتن می‌باشد. آزمایش جعبه L، به این صورت است که بعد از پر کردن دستگاه از بتن خودتراکم و بلند کردن دریچه، نسبت انسداد ارتفاع (H_2/H_1)، اندازه گیری می‌شود.

برای اندازه گیری معیارهای رئولوژی، از دستگاه رئومتر مطابق شکل ۳ استفاده می‌شود. پارامترهای اندازه گیری شده توسط

سولفونات سبب بهبود کارایی شده است این نتیجه با تحقیق چن [۵۵] که پلی کربوکسیلات را به دلیل ساختار ملکولی و سازگاریش با سیمان، قوی تر از نفتالین سولفونات معرفی کرده است مطابقت دارد. در مقایسه مخلوط با سیمان 460 kg/m^3 نسبت به مخلوط شاهد و مخلوط با سیمان 440 kg/m^3 افزایش مقدار سیمان سبب کاهش T_{50} شده است. و از طرفی دیگر، افزایش سیمان از 420 kg/m^3 به 440 و 460 kg/m^3 سبب افزایش مقدار جعبه L شده است. نتیجه با فرض آب به سیمان ثابت، با تحقیق Wallevik [۱] همخوانی دارد. به همین دلیل مطابق ACI238 [۲] افزایش سیمان در نسبت ثابت آب به سیمان منجر به کاهش لزجت خمیری و کاهش تنش جاری می شود. دلیل این امر می تواند به دلیل اثر افزایش سیمان در انسجام مخلوطها باشد. که از این جهت، کاهش T_{50} به دلیل کاهش لزجت خمیری و افزایش نسبت ارتفاع جعبه L به دلیل کاهش تنش جاری منطقی می باشد. لازم به ذکر است دستورالعمل EFNARC [۵۶]، در صورت افزایش لزجت خیلی زیاد، افزایش نسبت آب به سیمان را توصیه کرده است.

مورد دیگری که در شکل ۵ مشهود است افزایش پودرسنگ (P420 و C420) نسبت ارتفاع جعبه L را افزایش داده است. افزایش قابلیت عبور نشان داد که افزایش پودرسنگ نقش روغن کاری را سبب می شود. از سوی دیگر مطابق شکل ۴، افزایش مقدار پودرسنگ سبب کاهش چسبندگی یعنی T_{50} می شود این امر می تواند به دلیل افزایش در مقدار فوق روان کننده پلی-کربوکسیلات برای رسیدن به جریان اسلامپ ۷۰۰ میلی متر باشد و این نتایج با تحقیق Mueller و Wallevik [۵۷] و Gesoğlu و همکارانش [۵۸] مطابقت دارد. به همین دلیل مطابق ACI 238 [۲] افزودنی اصلاح کننده لزجت سبب بهبود چسبندگی و در مقابل افزایش پودرسنگ تا 100 kg/m^3 ، سبب کاهش چسبندگی می-شود.

مطابق شکل ۴ و ۵، افزایش دما، تأثیر منفی در آزمایش های T_{50} جعبه L می گذارد دلیل این امر آن است که، افزایش درجه حرارت، روند هیدراتاسیون سیمان را به طور قابل توجهی تسریع می بخشد که منجر به کاهش میزان آب آزاد و حذف سریع تر فوق روان کننده در لایه ای از محصولات هیدراتاسیون می شود. در نتیجه این اثر سبب کاهش روانی خمیر سیمان می شود. افزایش

محاسبه می شود. که با معادل قرار دادن روابط ۱ و ۲، تنش جاری شدن و لزجت خمیری به دست می آید. در واقع اگر مدل بینگهام با معیارهای اندازه گیری شده توسط رئومتر مقایسه شود، معلوم می شود که به جای τ_0 و μ ، g و h اندازه گیری و محاسبه می شود [۵۴]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (۱)$$

$$T = g + hN \quad (۲)$$

که در آن T = گشتاور (Nm)، N = سرعت چرخش (rps)، g = گشتاور جاری یا محل قطع منحنی با محور T (Nm) و h = شیب منحنی یا لزجت گشتاور (Nm.S) است. از فرمول های فوق مشاهده می شود 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 فرمول های زیر به دست می آید این دو پارامتر به تنش جاری و لزجت خمیری تبدیل می شود [۵۴]:

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} 4\pi H (g) \quad (۳)$$

$$\mu = \frac{\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)}{8\pi^2 H} (h) \quad (۴)$$

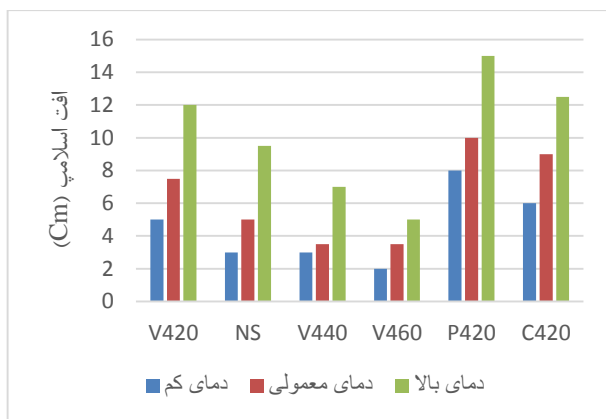
در این فرمولها τ_0 و μ برابر تنش جاری (Pa) و لزجت خمیری (Pa.s) می باشند. R_1 ، R_2 و H برابر شعاع پره، شعاع ظرف و ارتفاع پره هستند که به ترتیب دارای مقادیر ۵، ۱۵ و ۱۲ سانتی متر هستند. g و h نیز ضرایبی هستند که از خط حاصل از نقاط به دست آیند.

۳- نتایج و تفسیر

۳-۱- کارایی

نتایج آزمایش های کارایی، در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است که نتایج نسبت به بتن های شاهد (V420) متناظر با دمایشان حاصل شد. با مقایسه مخلوط های حاوی نفتالین سولفونات (NS) و پلی کربوکسیلات (V420)، مخلوط های حاوی پلی کربوکسیلات (V420) اثر مثبتی در T_{50} گذاشته است و نسبت ارتفاع جعبه L را افزایش داده است. بنابراین پلی کربوکسیلات نسبت به نفتالین

اسلامپ را کاهش می‌دهد. این نتیجه با دستورالعمل ACI 238 [۲] که برای بهبود کارایی، افزایش سیمان در نسبت ثابت آب به سیمان را توصیه کرده است مطابقت دارد. نکته دیگری که در شکل ۶ حائز اهمیت است افت جریان اسلامپ بتن خودتراکم حاوی نفتالین سولفونات (NS) نسبت به بتن خودتراکم حاوی پلی‌کربوکسیلات (V420) کمتر می‌باشد. این نتیجه با تحقیق Nehdi و Al-Martini [۱۶] که بتن حاوی نفتالین سولفونات نسبت به بتن حاوی پلی‌کربوکسیلات در ۵۰ دقیقه ابتدایی، افت جریان اسلامپ کمتری دارد مطابقت دارد.

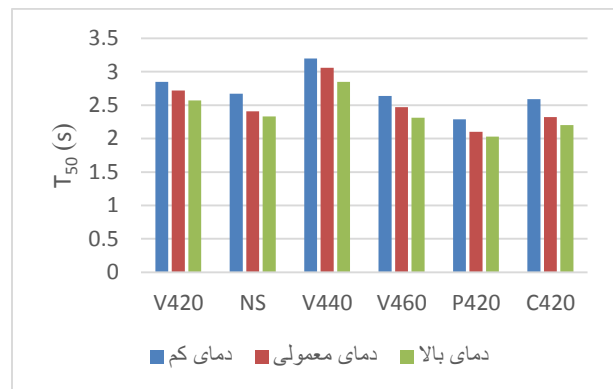


شکل ۶- نتایج افت جریان اسلامپ برای انواع مخلوط‌های بتن خودتراکم

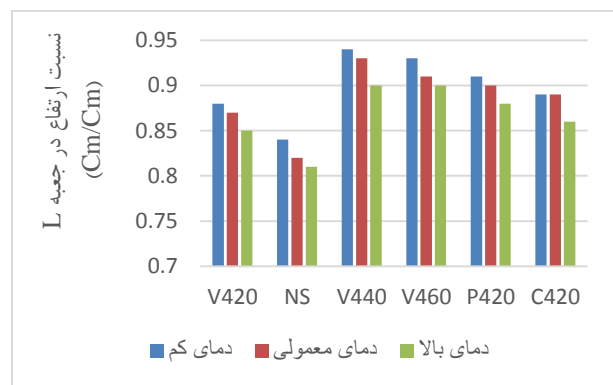
۳-۳- رئوگراف

شکل‌های ۷ تا ۹ به ترتیب در دماهای مختلف، با استفاده از رئوگراف، تغییرات رئولوژی در زمان ۰ و ۶۰ دقیقه را نشان می‌دهند. در زمان ۰، رئولوژی در دماهای مختلف، روند ثابتی داشته است. افزایش زمان تا ۶۰ دقیقه، سبب تشدید تغییرات و گاهی سبب عوض شدن روند تغییرات بر رئولوژی می‌شود. مطابق با نمودارهای رئوگراف مخلوط‌های بتن، در مقایسه فوق‌روان‌کننده‌ها، مخلوط‌های حاوی نفتالین سولفونات (NS) نسبت مخلوط-های حاوی پلی‌کربوکسیلات (V420)، همواره سبب افزایش تنش جاری و کاهش لزجت خمیری می‌شود. افزایش زمان تا ۶۰ دقیقه به دلیل نرخ رشد کمتر نفتالین سولفونات، سبب کاهش اختلاف تنش جاری و افزایش اختلاف لزجت خمیری می‌شود. این نتیجه با تحقیق Nehdi و Al-Martini [۱۶] که بتن حاوی نفتالین سولفونات نسبت به بتن حاوی پلی‌کربوکسیلات در ۵۰ دقیقه ابتدایی، خواص

دما باعث سفت شدن خمیرسیمان و به تبع آن افزایش فعالیت‌های شیمیایی بالاتر خمیرسیمان می‌شود [۸ و ۹].



شکل ۴- نتایج آزمایش T50 برای انواع مخلوط‌های بتن خودتراکم

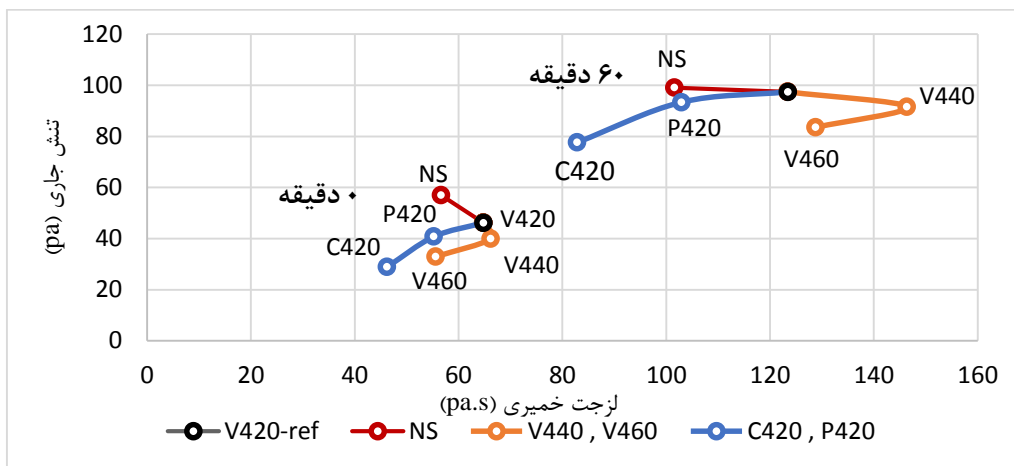


شکل ۵- نتایج آزمایش جعبه L برای انواع مخلوط‌های بتن خودتراکم

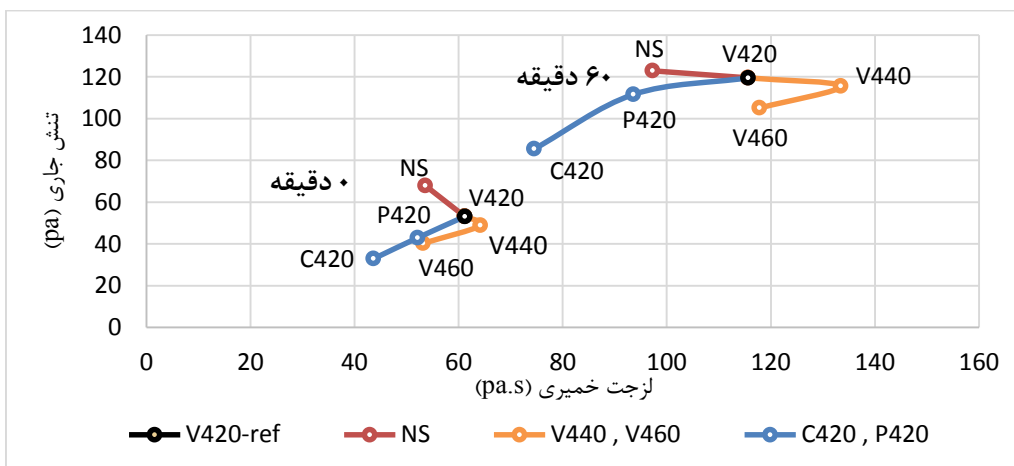
۳-۲- افت جریان اسلامپ

نتایج افت جریان اسلامپ مخلوط‌های بتن خودتراکم نسبت به بتن-های مرجع (V420) مقایسه شده است. مطابق با شکل ۶، افزایش دما سبب افزایش افت جریان اسلامپ می‌شود. علاوه بر افزایش دما، افزایش مقدار پودرسنگ (P420 و C420) در نسبت ثابت آب به سیمان، سبب افزایش افت جریان اسلامپ می‌شود. این نتیجه با تحقیق Schmidt و همکاران [۱۰]، که کاهش نسبت آب به پودر، سبب افزایش افت جریان اسلامپ شده است مطابقت دارد. بنابراین برای دمای بالا و زمان‌های حمل طولانی، بتن‌های پودری توصیه نمی‌شود. مطابق شکل ۶، در نسبت ثابت آب به سیمان، افزایش مقدار سیمان از ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب (V420) تا ۴۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب (V460)، ۳ تا ۷ سانتی‌متر افت جریان

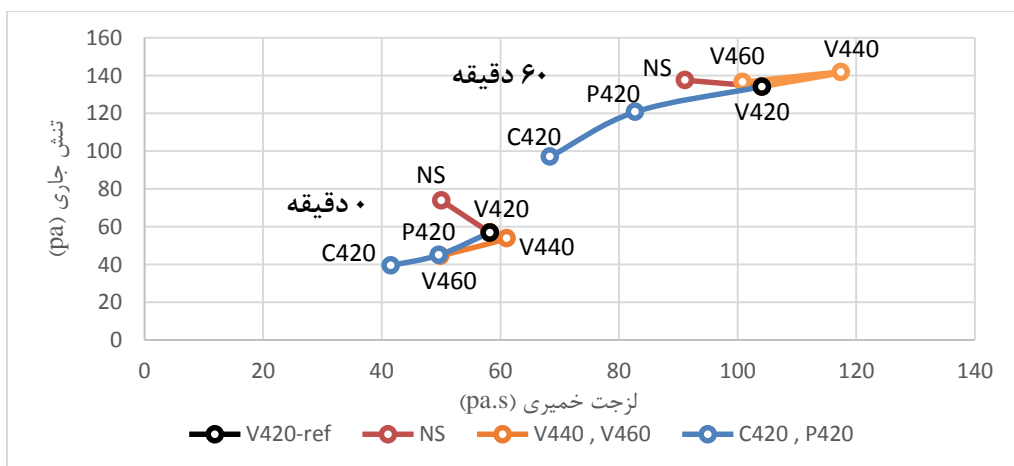
رنولوژی پایدارتری دارد مطابقت دارد. لازم به ذکر است که کاهش دما، اختلاف لزجت را در حدود ۲ تا ۱۰ pa.s کاهش داده است.



شکل ۷- اثر افزودنی‌های شیمیایی، سیمان و پودرسنگ بر رنولوژی در دمای پایین



شکل ۸- اثر افزودنی‌های شیمیایی، سیمان و پودرسنگ بر رنولوژی در دمای معمولی



شکل ۹- اثر افزودنی‌های شیمیایی، سیمان و پودرسنگ بر رنولوژی در دمای بالا

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در رنولوژی، سیمان است. با زمان ۰، افزایش سیمان تا 440 kg/m^3 سبب افزایش لزجت مقایسه مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی مقادیر مختلف سیمان خمیری و کاهش تنش جاری می‌شود اما افزایش سیمان تا ($V420$ ، $V440$ و $V460$)، مطابق با نمودارهای رئوگراف در 460 kg/m^3 سبب کاهش تنش جاری و لزجت خمیری شده

لزجت اثر بهتری در لزجت خمیری مخلوط‌های بتن خودتراکم دارد بنابراین مطابق با دستورالعمل EFNARC [۵۶] که افزودنی اصلاح‌کننده لزجت را به‌عنوان نقش کلیدی در بتن خودتراکم معرفی می‌کند تطابق دارد. از سوی دیگر صرف‌نظر از نوع مخلوط‌ها، اختلاف لزجت خمیری مخلوط‌ها در زمان‌های مساوی و در دماهای مختلف، تقریباً نرخ ثابتی دارد ولی برخلاف دما، با افزایش زمان به ۶۰ دقیقه، اختلاف لزجت خمیری بیشتر می‌شود به فرض برای بتن با پودرسنگ 100 kg/m^3 با افزایش زمان از ۰ دقیقه به ۶۰ دقیقه، اختلاف لزجت خمیری نسبت به بتن بدون پودرسنگ تقریباً از 20 pa.s به 40 pa.s می‌رسد.

۴- نتیجه‌گیری

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

- فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات سبب تنش جاری کمتر و لزجت خمیری بیشتری نسبت به فوق‌روان‌کننده نفتالین سولفونات در بتن خودتراکم می‌شود بنابراین در مقاطع پر فولاد استفاده از فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات توصیه می‌شود. البته افت جریان اسلامپ بتن خودتراکم حاوی نفتالین سولفونات نسبت به بتن خودتراکم حاوی پلی‌کربوکسیلات کمتر است، این بدان معناست که نفتالین سولفونات در بتن خودتراکم سبب حفظ سیالیت بیشتری می‌شود. بنابراین بهتر است در صورت استفاده از فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات، جریان اسلامپ بتن قبل از بتن‌ریزی کنترل شود و در صورت نیاز اصلاح شود.

- بتن نوع اصلاح‌کننده لزجت، افت جریان اسلامپ کمتری نسبت به بتن‌های حاوی پودرسنگ دارد و در دماهای مختلف سیالیت خود را سریع‌تر از دست می‌دهد. در نتیجه برای حمل و نقل‌های کوتاه و پیشرفت سریع در محل ساخت و ساز، بتن پودری را می‌توان بهترین انتخاب در نظر گرفت و همچنین، اگر هدفمان کاهش افت جریان اسلامپ و بتن‌ریزی آهسته باشد، بتن حاوی اصلاح‌کننده لزجت می‌تواند انتخاب بهینه باشد و به عبارتی برای بتن‌ریزی در دمای بالا و زمان‌های حمل طولانی، بتن‌های پودری توصیه نمی‌شود.

- با افزایش مقدار پودرسنگ، تنش جاری و لزجت خمیری کاهش یافته است این امر نشان‌دهنده آن است که افزودنی اصلاح‌کننده لزجت اثر بهتری در لزجت خمیری دارد.

است این امر برای زمان ۶۰ دقیقه، فقط برای دمای سرد صادق است و برای دمای معمولی و گرم روندی کاملاً متفاوت داشته است. در زمان ۰ در دماهای مختلف، با افزایش سیمان از تنش جاری مخلوط‌ها کاسته می‌شود که برای بتن با سیمان‌های 440 و 460 kg/m^3 نسبت به بتن با سیمان 420 kg/m^3 ، به ترتیب در حدود ۷ و 14 pa کاهش یافته است. این نتیجه با تحقیق Wallevik [۱] مطابقت دارد. البته لازم به ذکر است با افزایش سیمان برخلاف تنش جاری اولیه، نرخ رشد تنش جاری با زمان افزایش یافته است. برای دمای بالا، سیمان 440 و 460 kg/m^3 در زمان ۶۰ دقیقه، تنش جاری بیشتری از بتن با سیمان 420 kg/m^3 دارد. در زمان ۰، افزایش سیمان از 420 و 440 کیلوگرم بر مترمکعب به 460 کیلوگرم بر مترمکعب، سبب کاهش لزجت خمیری می‌شود که با تحقیق Wallevik [۱] همخوانی دارد. نکته دیگری که از نمودارهای رئوگراف حائز اهمیت است از آنجایی که افزایش سیمان و کاهش دما، نرخ رشد لزجت را افزایش می‌دهد [۵۹] به همین دلیل در زمان ۶۰ دقیقه و در دمای پایین، سیمان 440 و 460 kg/m^3 لزجت بیشتری نسبت به سیمان 420 kg/m^3 کسب کرده است. بنابراین در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سیمان سبب بهبود رئولوژی می‌شود. علت این پدیده‌ها می‌تواند به دلیل اثر افزایش سیمان در انسجام مخلوط‌ها باشد.

مطابق نمودارهای رئوگراف با مقایسه مخلوط‌های P420، V420 و C420، افزایش پودرسنگ همواره در زمان و دماهای مختلف، سبب کاهش تنش جاری و لزجت خمیری شده‌اند. در زمان ۰ با افزایش مقدار پودرسنگ، تنش جاری ۱۰ تا 20 pa کاهش یافته است. این امر می‌تواند به دلیل افزایش در مقدار فوق‌روان‌کننده برای رسیدن به جریان اسلامپ 700 میلی‌متر باشد این نتیجه با تحقیق Mueller و Wallevik [۵۷] همخوانی دارد.

نکته دیگری که از نمودارهای رئوگراف مخلوط‌های بتن خودتراکم حائز اهمیت است با افزایش زمان و دما اختلاف تنش جاری مخلوط‌ها بیشتر می‌شود به فرض با افزایش پودرسنگ از 50 kg/m^3 به 100 kg/m^3 برای زمان ۶۰ دقیقه، اختلاف تنش جاری برای دمای معمولی 26 pa افزایش یافته است. از سوی دیگر، با افزایش مقدار پودرسنگ در مخلوط‌های P420 و C420، لزجت خمیری مخلوط‌ها نسبت به مخلوط V420 کاهش یافته است این قضیه نشان‌دهنده آن است که افزودنی اصلاح‌کننده

[12] Schmidt, W., Brouwers, J., Kühne, H. C., & Meng, B. (2010). "Effects of superplasticizer and viscosity-modifying agent on fresh concrete performance of SCC at varied ambient temperatures." In *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete*. Springer, Dordrecht. pp. 65-77, 2010.

[13] Ravina, D., "Retempering of prolonged-mixed concrete with admixtures in hot weather." In *Journal Proceedings*, 72(6): 291-295, 1975.

[14] Hampton, J.S., "Extended workability of concrete containing high-range water-reducing admixtures in hot weather." *Special Publication*, 68: 409-422, 1981.

[15] Nehdi, M. and Al-Martini, S., "Coupled effects of high temperature, prolonged mixing time, and chemical admixtures on rheology of fresh concrete." *ACI Materials Journal* 106(3): 1-10. 2009.

[16] Al-Martini, S. and M Nehdi. "Effects of Heat and Mixing Time on Self-Compacting Concrete." *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials* 163(3): 175-182, 2010.

[17] Van Damme, H. "Concrete material science: Past, present, and future innovations." *Cement and concrete research*, 112: 5-24, 2018.

[18] Rodríguez, G., Blanco, A., Pujadas, P. and Aguado, A., "Self-compacting concrete in the Temple of Sagrada Familia." *Journal of Architectural Engineering*, 23(3): 1-8, 2017.

[20] Assaad, J.J., "Influence of recycled aggregates 19 dynamic/static stability of self-consolidating concrete." *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 6(6): 345-365, 2017.

[20] Nagaratnam, B.H., Rahman, M.E., Mirasa, A.K., Mannan, M.A. and Lame, S.O., "Workability and heat of hydration of self-compacting concrete incorporating agro-industrial waste." *Journal of Cleaner Production*, 112: 882-894, 2016.

[21] Jahandari, S., Saberian, M., Tao, Z., Mojtahedi, S.F., Li, J., Ghasemi, M. and Li, W. "Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes." *Cold Regions Science and Technology*, 160: 242-251, 2019.

[22] Saberian, M. and Li, J., "Investigation of the mechanical properties and carbonation of construction and demolition materials together with rubber." *Journal of cleaner production*, 202: 553-560, 2018.

[23] Saberian Boroujeni, M., Li, J. and Cameron, D., "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): 1-7, 2019.

- برای دمای پایین و معمولی، افزایش سیمان در نسبت ثابت آب به سیمان، سبب بهبود رئولوژی می شود از این جهت برای بهبود کارایی و رئولوژی، انتخاب مناسبی می باشد

۵- مراجع

[1] Wallevik, O. H. and Wallevik, J. E., "Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes." *Cement and concrete research*, 41(12): 1279-1288, 2011.

[2] ACI 238.1R-08, "Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete." American Concrete Institute, 2008.

[3] Łukowski, P., "Influence of temperature on efficiency of superplasticizing admixtures for concrete." *Journal of Building Chemistry*, 1(1): 32-36, 2016.

[4] De Schutter, G., Bartos, P. J., Domone, P. and Gibbs, J., "Self-compacting concrete." Caithness: Whittles Publishing, 2008.

[5] Al-Martini, S. and Nehdi, M., "Effect of chemical admixtures on rheology of cement paste at high temperature." *Journal of ASTM international*, 4(3): 1-17, 2007.

[6] Brameshuber, W. and Uebachs, S., "The influence of the temperature on the rheological properties of self-compacting concrete." In *Proc. Third Int. RILEM Symposium* (Ed. Wallevik, O. and Nielsson, I.), pp. 174-183, 2003.

[7] Golaszewski, J. "Effect of temperature on rheological properties of superplasticized cement mortars." *Special Publication* 239: 423-440, 2006.

[8] Petit, J. Y., Wirquin, E., Vanhove, Y. and Khayat, K., "Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete." *Cement and concrete research*, 37(5): 655-670, 2007.

[9] Petit, J. Y., Khayat, K. H., and Wirquin, E., "Coupled effect of time and temperature on variations of plastic viscosity of highly flowable mortar." *Cement and concrete research*, 39(3): 165-170, 2009.

[10] Schmidt, W., Brouwers, H.J.H., Kuehne, H.C. and Meng, B., "Effects of the characteristics of high range water reducing agents and the water to powder ratio on rheological and setting behavior of self-consolidating concrete." *Advances in Civil Engineering Materials*, 3(2): 127-141, 2014.

[11] Schmidt, W., Brouwers, H.J.H., Kühne, H.C. and Meng, B., "Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures." *Cement and Concrete Composites*, 49: 111-126, 2014.

- [36] Mahmoodzadeh, F. and Chidiac, S.E., "Rheological models for predicting plastic viscosity and yield stress of fresh concrete." *Cement and Concrete Research*, 49: 1-9, 2013.
- [37] Choi, M., Park, K. and Oh, T., "Viscoelastic properties of fresh cement paste to study the flow behavior." *international journal of concrete structures and materials*, 10(3): 65-74, 2016.
- [38] Feys, D., De Schutter, G., Khayat, K. H. and Verhoeven, R. "Changes in rheology of self-consolidating concrete induced by pumping." *Materials and Structures*, 49(11): 4657-4677, 2016.
- [39] Ko, J.H., Moon, H.J., Seok, W.K., Park, S.J. and Kim, H.J., "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): 203-210, 2008.
- [40] Ko, J.W., Kim, J.J., Lee, S.H., Moon, H.J. and Park, S.J., "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): 71-78, 2010.
- [41] Kwon, S.H., Park, C.K., Jeong, J.H., Jo, S.D. and Lee, S.H., "Prediction of concrete pumping: Part II-Analytical prediction and experimental verification." *ACI Materials Journal*, 110(6): 657-668, 2013.
- [42] Secieru, E., Cotardo, D., Mechtcherine, V., Lohaus, L., Schröfl, C. and Begemann, C., "Changes in concrete properties during pumping and formation of lubricating material under pressure." *Cement and Concrete Research*, 108: 129-139, 2018.
- [43] Kwon, S.H., Jang, K.P., Kim, J.H. and Shah, S.P., "State of the art on prediction of concrete pumping." *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3): 75-85, 2016.
- [44] Tan, H., Zou, F., Ma, B., Liu, M., Li, X. and Jian, S., "Effect of sodium tripolyphosphate on adsorbing behavior of polycarboxylate superplasticizer." *Construction and Building Materials*, 126: 617-623, 2016.
- [45] Domone, P.J. and JIN, J., "Properties of mortar for self-compacting concrete." In *Self-compacting concrete*, Stockholm, pp. 109-120, 1999.
- [46] Schwartzentruber, L.A., Le Roy, R. and Cordin, J., "Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC)." *Cement and Concrete Research*, 36(7): 1203-1213, 2006.
- [47] Norberg, J., Norberg, P. B. and Billberg, P., "Effects of a new generation of superplasticizers on
- [24] Ardalan, R.B., Jamshidi, N., Arabameri, H., Joshaghani, A., Mehrinejad, M. and Sharafi, P. "Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO₂ oxide and spraying nanosilicon practices." *Construction and Building Materials*, 146: 128-135, 2017.
- [25] Nagrockienė, D., Girskas, G. and Skripkiūnas, G. "Properties of concrete modified with mineral additives." *Construction and Building Materials*, 135: 37-42, 2017.
- [26] Güneysi, E., Gesoğlu, M., Al-Rawi, S. and Mermerdaş, K. "Effect of volcanic pumice powder on the fresh properties of self-compacting concretes with and without silica fume." *Materials and structures*, 47(11): 1857-1865, 2014.
- [27] Granata, M. F. "Pumice powder as filler of self-compacting concrete." *Construction and Building Materials*, 96: 581-590, 2015.
- [28] Carlsward, J., Emborg, M., Utsi, S. and Oberg, P. "Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete." In *Proceeding of the Third international RILEM conference on SCC*, Island, Vol. 33, pp. 143-153, 2003.
- [29] Wallevik, Ó.H. and Nielsson, I., 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 506-513, 2003.
- [30] Li, J., Yin, J., Zhou, S. and Li, Y. "Mix proportion calculation method of self-compacting high performance concrete." *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating*, pp. 199-205, 2005.
- [31] Skarendahl, Å. and Petersson, Ö., "Self-compacting concrete." *Proceedings of 1st International Symposium Self-Compacting Concrete*, Stockholm, 1999.
- [32] Kostrzanowska-Siedlarz, A. and Gołaszewski, J., "Rheological properties of high performance self-compacting concrete: effects of composition and time." *Construction and Building Materials*, 115: 705-715, 2016.
- [33] Tattersall, G.H. and Banfill, P.F., "The Rheology of Fresh Concrete." Pitman Books Limited, Boston, 1983.
- [34] Jang, K.P., Kwon, S.H., Choi, M.S., Kim, Y.J., Park, C.K. and Shah, S.P., "Experimental observation on variation of rheological properties during concrete pumping." *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1): p.79, 2018.
- [35] Figueiras, H., Nunes, S., Coutinho, J.S. and Andrade, C., "Linking fresh and durability properties of paste to SCC mortar. cement and concrete composites, 45: 209-226, 2014.

- the properties of fresh concrete." Special Publication, 173: 583-598, 1997.
- [48] Szwabowski, J. and Gołaszewski, J., "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, 2010.
- [49] Bartos, P.J.M., Sonebi, M. and Tamimi, A.K., 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, 2007.
- [50] De Schutter, G., Bartos, P.J., Domone, P. and Gibbs, J. Self Compacting Concrete, Whittles Publishing, Dunbeath, p. 296, 2008.
- [51] Soutsos, M.N., and Domone, P.L., "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, 1993.
- [52] ACI 237R-07, "Self-consolidating Concrete." American Concrete Institute, 2007.
- [53] Team, PCI Self-Consolidating Concrete FAST. "Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in PCI Member Plants." PCI Journal, 48.3: p. 14-18, 2003.
- [54] Heirman, G., Hendrickx, R., Vandewalle, L., Van Gemert, D., Feys, D., De Schutter, G., Desmet, B. and Vantomme, J., "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): 171-181, 2009.
- [55] Chen, Chun-Tao. Interactions between Portland cements and carboxylated and naphthalene-based superplasticizers. Diss. University of Illinois at Urbana-Champaign, (2007).
- [56] EFNARC, EFCA. "Guidelines for Viscosity Modifying Admixtures For Concrete." (2006).
- [57] Mueller, Florian V., and Olafur H. Wallevik. "Effect of Limestone Filler Addition in Eco-SCC: Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete." Proceedings of SCC2010, Montreal, Canada (2010): 26-29.
- [58] Gesoğlu, Mehmet, Erhan Güneyisi, and Erdoğan Özbay. "Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume." Construction and Building Materials 23.5 (2009): 1847-1854.
- [59] Mindess, Sidney, F. J. Young, and David Darwin. "Concrete." 2nd Edition, 2003.

Investigation of Rheological Properties of Self-Compacting Concrete Using Rheographs

Seyyed Azim Hosseini *

Assistant Professor, School of Civil Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch.

Ali Zal nezhad

PhD student in Construction and Management Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch.

Abstract

Basically, self-compacting concrete mixtures (SCC) are more susceptible to temperature, time, and ingredients compared to the conventional ones. This matter is because of the combination of varied needs in the fresh mode, extremely complexed mixture proportions, and its naturally low yield stress. The rheology provides valuable information about the properties of fresh self-compacting concrete (SCC), but investigation of the procedure for achieving optimal SCC mix using the so-called rheographs can further provide practically useful information. In the present research, having their properties functions of temperature and mixing time, SCC samples were prepared with different amounts of cement, limestone, viscosity-modifying admixture and superplasticizer. In order to measure the rheological properties of the prepared samples, the SCC mix temperature was adjusted according to the dominant environmental conditions in different seasons. Accordingly, the samples were prepared during different seasons of the year to check for their workability and rheology. Rheographs were used to investigate the rheological properties of the SCC mixes during a period of 60 min. According to the results, the use of polycarboxylate superplasticizer and increasing the amount of cement at a given water-to-cement ratio were found to improve the rheological properties of the resultant concrete mix. increasing Portland cement to 440 kg/m³ in SCC mixtures containing viscosity modifying admixtures (VMA) improved rheology. On the other hand, the powder type SCC mixtures had 50% more slump loss compared to VMA type SCC mixtures. Therefore, the powder concrete is not recommended for high-temperature operating conditions.

Keywords: temperature, cement, limestone, viscosity-modifying admixture, superplasticizer.

* Corresponding Author: azim_hosseini@azad.ac.ir

