تحقیقات بتن
سال چهاردهم، شمارهٔ سوم
پاییز ۱۴۰۰
ص ۷۰ – ۶۱
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

بررسی تأثیر افزایش سیمان در دما و زمان‌های مختلف بر خواص رئولوژی بتن خودتراکم

سیّد عظیم حسینی *
استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران‌جنوب.
علی زال نژاد
دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران‌جنوب.

چکیده
بتن خودتراکم در برابر تغییرات دما نسبت به بتن معمولی، دارای حساسیت بیشتری می‌باشند. افزایش دما، بر نرخ هیدراتاسیون سیمان تأثیر می‌گذارد که اشتباهات جزئی در مصرف سیمان سبب مشکلات قابل‌توجهی در خواص بتن تازه خودتراکم به‌ویژه از دست دادن کارایی می‌شود ازاین‌رو برای کنترل کارایی در بتن خودتراکم، نیاز به آزمایش‌های متعدد در مقدار سیمان می‌باشد. در این تحقیق برای اندازه‌گیری خواص رئولوژی، دمای مخلوط‌های بتن با توجه به شرایط محیطی فصل‌های مختلف انتخاب شده است. ازاین‌جهت، برای انجام آزمایش‌های کارایی و رئولوژی، ساخت نمونه‌ها در فصل‌های مختلف سال به انجام رسید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تنش جاری شدن و لزجت خمیری حاصل از دستگاه رئومتر در طول زمان ٦٠ دقیقه، افزایش سیمان تا ٤٤٠ کیلوگرم بر مکعب، سبب بهبود رئولوژی می‌شود. با استناد به دیگر نتایج تحقیق، باید برای بهبود رئولوژی از بالا رفتن دمای بتن و زمان بتن‌ریزی کاست، زیرا در غیر این صورت، باعث سخت شدگی بتن و درنتیجه کاهش رئولوژی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: **بتن خودتراکم، رئولوژی، سیمان، کارایی، دما، زمان.**

* نویسنده مسئول: azim_hosseini@azad.ac.ir

۱- مقدمه

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 [۱].

رفتار رئولوژی بتن تازه، تحت تأثیر درجه حرارت قرار دارد. این امر مشکل مهمی در بتن خود تراکم است. حتی تغییرات کوچک در درجه حرارت، سبب از دست دادن قسمت قابل‌توجهی از خواص جریان می‌شود، ازاین‌رو باید توجه داشت که دما عامل مهمی است که در رئولوژی اثرگذار هست [۲و۳]. تغییرات در تنش جاری شدن و لزجت خمیری مخلوط با درجه حرارت، نشان روند مبهم وابسته به سیمان و سطح مخصوص سیمان هست. بنابراین ازآنجاکه دما، نقش مهمی در هیدراتاسیون سیمان و رئولوژی بتن خودتراکم دارد باید در نظر گرفته شود [۴-۷]. اغلب روش‌های منتشرشده در طراحی بتن خودتراکم، سعی در بهینه‌سازی دانه‌بندی و مقدار سیمان، برای بهینه کردن جریان و پایداری موفق خمیر، ملات و بتن تازه دارند [۲].

سازگاری سیمان و فوق‌روان‌کننده نیز به‌طور سنتی با استفاده از خمیرسیمان آزمایش می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که طراحی و توسعه بتن خودتراکم بر پایه آزمایش رئولوژی خمیرسیمان قرار دارد. بااین‌حال تأثیر عوامل مختلف بر خواص رئولوژی خمیرسیمان و بتن تازه همیشه صریح نیستند[۸]. از سوی دیگر ملات نیز به‌عنوان یک مدل برای پیش‌بینی خواص رئولوژی بتن خودتراکم به‌عنوان تابعی از زمان و درجه حرارت پیشنهاد می‌شود. طبق مطالعات پیشین سازگاری بین خواص رئولوژی ملات و بتن تازه خود متراکم وجود دارد [۹].

طبق آیین‌نامه ACI 238 [۱۰] و تحقیق لوکوسکی[1] [۱۱]، افزایش دما، سبب افزایش نرخ رشد تنش جاری شدن و کاهش نرخ رشد لزجت خمیری می‌شود. افزایش دما به دلیل تبخیر سریع آب اختلاط و شتاب هیدراتاسیون سیمان سبب از دست دادن خواص جریان و سخت شدن بتن‌ریزی می‌شود. حساسیت خواص رئولوژی به تغییرات دما، معمولاً به خواص سیمان و فوق‌روان‌کننده مربوط می‌شود. این مشکلات را می‌توان با استفاده از افزودنی شیمیایی، مقدار سیمان، نسبت آب به پودر و تغییر در دیگر اجزای تشکیل‌دهنده بتن کاهش داد [۲،۴-۷و۱۲].

دمای محیط ایده‌آل برای بتن‌ریزی از ۲۰ تا ۲۳ درجه سلسیوس متغیّر هست اما این دما همیشه امکان‌پذیر نیست، به ویژه برای پروژه‌هایی با مقیاس بزرگ‌تر که بتن‌ریزی‌شان پیوسته هست. مگر اینکه تمهیدات مناسبی برای بتن در نظر گرفته شود. در تحقیقات گذشته، استفاده از نسل جدید فوق‌روان‌کننده‌ها، خنک‌سازی و یا گرم کردن مواد اولیه بتن برای بتن‌های در معرض شرایط بد محیطی ارائه شده است [۱۳-۱۵].اثر دما بر مخلوط با نسبت زیاد آب به پودر (شامل سیمان و پودر سنگ)، متفاوت از مخلوط با نسبت کم آب به پودر است در بتن خودتراکم، کاهش نسبت آب به پودر، به‌طور قابل‌توجهی زمان گیرش را تسریع می‌بخشد و اثر منفی در حفظ کارایی دارد بنابراین برای حمل‌ونقل‌های طولانی و بتن‌ریزی‌های حجیم در محل ساخت‌وساز، بایستی آب مخلوط اضافه‌تر شود، اما مقاومت فشاری به‌شدت تحت تأثیر نسبت آب به سیمان می‌باشد نسبت آب به سیمان بالا، دلیل اصلی کاهش مقاومت فشاری بتن می‌باشد [۱۲و۱۶-۱۸].

در تحقیق دیاورا[2] و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [۱۹]، دو روش پیش‌اختلاط و مقدار مصرفی بالا که بیانگر زمان اضافه کردن آب و افزودنی‌های شیمیایی به بتن خودتراکم می‌باشد برای کاهش تأثیر زمان حمل‌ونقل و کاهش تأثیر هوای سرد و گرم، مقایسه شده‌اند. روش پیش‌اختلاط متشکل از اضافه کردن آب اضافی و یا مواد افزودنی درست قبل از بتن‌ریزی، برای بازگرداندن کارایی موردنظر هست البته پیش‌اختلاط با مواد افزودنی به‌جای آب، مناسب‌تر است، چراکه استفاده از آب می‌تواند اثرات جانبی بر روی خواص تازه و قابلیت بتن سخت شده را القا کند. همچنین روش مقدار مصرفی بالا شامل استفاده از مقدار اولیه بالاتر آب و مواد افزودنی در کارخانه بتن می باشد در این روش، مقدار آب و مواد افزونی باید متناسب با شرایط محیطی انتخاب شود تا کاهش کارایی و لزجت خمیری ایجادشده توسط زمان حمل و هوای گرم را جبران کند.

از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در بتن تازه خودتراکم، فوق‌روان-کننده هست. در تحقیق نهدی[3] و المارتینی[4] در سال ۲۰۰۹ [۲۰]،

[1] Łukowski
[2] Diawara
[3] Nehdi
[4] Al-Martini

اثرات دما و زمان در تکامل ویژگی‌های رئولوژی مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی ترکیب فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلات، ملامین سولفونات و نفتالین سولفونات مورد بررسی قرار گرفت. افزایش مقدار پلی‌کربوکسیلات تا مرز اشباع شدن سبب کاهش تنش جاری شدن و افزایش مقدار پلی‌کربوکسیلات فراتر از مقدار اشباع، سبب افزایش تنش جاری شدن می‌شود و به عبارتی مقدار اشباع، به مقدار بهینه فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات جهت رسیدن به تنش جاری شدن کمتر هست. همچنین پلی‌کربوکسیلات یک عامل مؤثر در بتن خودتراکم می‌باشد زیرا با مقدار کم پلی-کربوکسیلات، قادر به دستیابی به مقادیر کم تنش جاری شدن می-باشد که به همین منظور در این تحقیق از فوق‌روان‌کننده پلی-کربوکسیلات مورداستفاده قرارگرفته است.

در تحقیقات گذشته، روش‌های حفظ کارایی، اثر نوع فوق‌روان-کننده‌ها و نحوه استفاده از 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، به بررسی و مقایسه اثر افزایش مقدار سیمان به‌عنوان تابعی از دما و زمان بر روی خواص رئولوژی بتن خودتراکم، به‌ویژه تنش جاری شدن و لزجت خمیری با استفاده از دستگاه رئومتر پرداخته شده است. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از آزمایش‌های کارایی، به طور 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

در این تحقیق ۹ طرح مخلوط با مقادیر مختلف سیمان ساخته شده است. در ساخت بتن‌ها از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان آبیک استفاده شده است که مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی، در جدول ۱ آورده شده است.

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

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان

مشخصات شیمیایی و فیزیکی	سیمان پرتلند
SiO_2	۲۰/۷۴
Al_2O_3	۴/۹۰
Fe_2O_3	۳/۵۰
MgO	۱/۲۰
CaO	۶۲/۹۵
SO_3	۳/۰۰
C_3S	۵۷/۶
C_2S	۱۸/۱
C_3A	۵/۸
C_4AF	۱۱/۱۶
افت حرارتی	۱/۵۶
باقی‌مانده 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	۳/۰۷

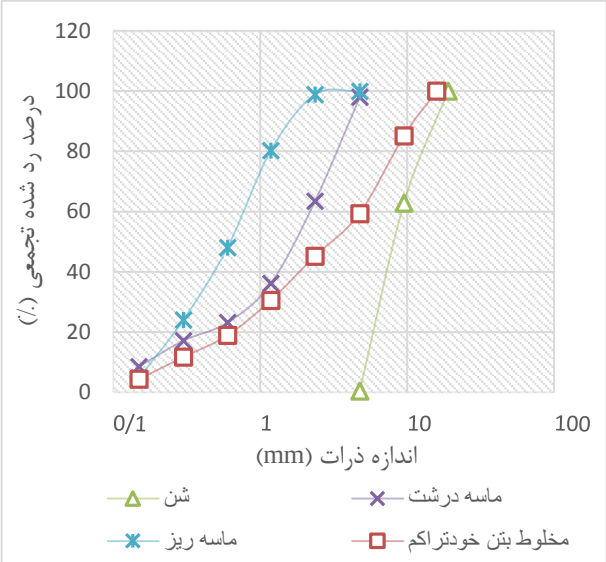
در این تحقیق از فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات و از افزودنی اصلاح‌کننده لزجت بر پایه پلی‌ساکارید که به‌ترتیب داری وزن مخصوص kg/m^3 ۱۰۳۰ و kg/m^3 ۱۵۰۰ می‌باشد استفاده شده است.

۲-۲- نسبت‌های اختلاط، نمونه‌برداری و رویه آزمایش

مخلوط‌های بتن خودتراکم با توجه به دستورالعمل ACI 237R-07 [۱۳]، با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ ساخته شده است که در جدول ۳ نشان داده شده است. در این مخلوط‌ها، V بیانگر نوع بتن

خودتراکم می‌باشد که به معنای بتن خودتراکم با افزودنی اصلاح‌کننده لزجت می‌باشد و عدد بعد از V بیانگر عیار سیمان می‌باشد که در سه دسته ۴۲۰، ۴۴۰ و ۴۶۰ kg/m^3 تعریف شده‌اند. اسلامپ هدف ۱۰±۷۰۰ 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 به‌دست‌آمده است که در جدول ۳، بعد از عیار سیمان، 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 مدت‌زمان 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 لزجت پس حل شدن در یک‌سوم آب باقی‌مانده، در مخلوط‌کن ریخته شده و به مدت ۳ دقیقه اختلاط صورت می‌گیرد 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 درصورتی‌که اسلامپ بتن خودتراکم از اسلامپ هدف کمتر باشد مخلوط بتن دوباره ساخته می‌شود. نهایتاً پس از رسیدن بتن به اسلامپ هدف، آزمایش‌های کارایی بر روی بتن تازه انجام می‌گردد و سپس بتن تازه در طول زمان ۶۰ دقیقه در دستگاه رئومتر قرار می‌گیرد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی و مخلوط بتن خودتراکم

جدول ۳- جزئیات طرح مخلوط بتن‌های خودتراکم حاوی مقادیر مختلف سیمان

شناسه مخلوط	شناسه مخلوط					نسبت آب به	پلی‌کربوکسیلات	اصلاح‌کننده لزجت	دمای
	سیمان	آب	شن	ماسه درشت	ماسه ریز	سیمان (W/C)	(درصد وزن سیمان)	(درصد وزن سیمان)	محیط
V420-L-ref	۴۲۰	۱۷۶	۷۱۳	۷۱۳	۳۵۶	۰/۴۲	۰/۵۴	۰/۶	۹/۰
V420-N-ref	۴۲۰	۱۷۶	۷۱۳	۷۱۳	۳۵۶	۰/۴۲	۰/۵۷	۰/۶	۲۱/۲
V420-H-ref	۴۲۰	۱۷۶	۷۱۳	۷۱۳	۳۵۶	۰/۴۲	۰/۶۱	۰/۶	۳۱/۸
V440-L	۴۴۰	۱۸۵	۶۹۶	۶۹۶	۳۴۸	۰/۴۲	۰/۶۲	۰/۶	۸/۷
V440-N	۴۴۰	۱۸۵	۶۹۶	۶۹۶	۳۴۸	۰/۴۲	۰/۶۳	۰/۶	۲۰/۴
V440-H	۴۴۰	۱۸۵	۶۹۶	۶۹۶	۳۴۸	۰/۴۲	۰/۶۸	۰/۶	۳۰/۷
V460-L	۴۶۰	۱۹۳	۶۸۱	۶۸۱	۳۴۱	۰/۴۲	۰/۵۸	۰/۶	۸/۵
V460-N	۴۶۰	۱۹۳	۶۸۱	۶۸۱	۳۴۱	۰/۴۲	۰/۶۲	۰/۶	۲۰/۶
V460-H	۴۶۰	۱۹۳	۶۸۱	۶۸۱	۳۴۱	۰/۴۲	۰/۶۵	۰/۶	۳۱/۵

۲-۳- روش‌های آزمایش

آزمایش‌های ارزیابی کارایی بتن خودتراکم شامل آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50، حلقه J، شاخص پایداری چشمی، جعبه L و آزمایش قیف V مطابق دستورالعمل PCI [۲۱] انجام شده است.

در آزمایش جریان اسلامپ، میانگین قطر دایره‌ای که بتن پس از پخش شدن می‌سازد، معیار برای روانی بتن خواهد بود.

آزمایش T_{50}، زمان رسیدن به اسلامپ با قطر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد که به‌عنوان معیاری از لزجت خمیری بتن می‌باشد.

در شاخص پایداری چشمی، پس از ثابت شدن وضعیت ظاهری بتن در آزمایش جریان اسلامپ، با بازرسی چشمی سطح آن، عددی بین ۰ تا ۳ نسبت داده می‌شود. این عدد به شاخص پایداری چشمی (VSI) معروف است که بر اساس آیین‌نامه، شاخص پایداری چشمی مناسب بتن خود تراکم بین ۰ و ۱ می‌باشد.

در آزمایش حلقه J، پس از گذاشتن حلقه، آزمایش جریان اسلامپ دوباره گرفته می‌شود، در این آزمایش قطر نهایی بتن با آزمایش جریان اسلامپ مقایسه می‌شود. درواقع تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه J و جریان اسلامپ می‌تواند نشان‌دهنده درجه عبور بتن از بین آرماتورها باشد.

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

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)، اندازه‌گیری می‌شود. کل آزمایش باید در مدت حداکثر ۵ دقیقه انجام شود هدف از این آزمایش قابلیت پرکنندگی عبور بتن تازه می‌باشد.

آزمایش قیف V، مدت زمان خروج بتن از قیف V شکل می‌باشد که به‌عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن می‌باشد هرچه زمان اندازه‌گیری‌شده کمتر باشد، قابلیت عبور و روانی SCC بیشتر خواهد بود و زمان طولانی‌تر به مفهوم بلوکه شدن یا انسداد بتن می‌باشد.

برای اندازه‌گیری معیارهای رئولوژی، از دستگاه رئومتر مطابق شکل ۳ استفاده می‌شود. پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط دستگاه رئومتر، تنش جاری و لزجت خمیری می‌باشد.

شکل ۳- دستگاه رئومتر

این دستگاه از یک مخزن استوانه‌ای، یک پره ۴ تیغه متحرک با حرکت دورانی، یک موتور اعمال گشتاور پیچشی و یک دستگاه محاسبه‌گر 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 اعمال‌شده را به نمونه بتن داخل مخزن منتقل می‌کند. برای تعیین‌کردن مقادیر تنش جاری و لزجت خمیری، در مدت ۳۰ ثانیه سرعت پره به‌تدریج 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 اعمال‌شده در بازه‌های ۵ ثانیه‌ای ثبت شده و پس از پایان آزمایش در صفحه نمایشگر نشان داده می‌شود. مقادیر ثبت‌شده به‌صورت دو نمودار بالارونده و پایین‌رونده تصویر می‌گردد که از روی منحنی مقدار تنش جاری و لزجت خمیری محاسبه می‌شود. که با معادل قرار دادن روابط ۱ و ۲، تنش جاری شدن و لزجت خمیری به دست می‌آید. درواقع اگر مدل بینگهام با معیارهای اندازه‌گیری شده توسط رئومتر مقایسه شود، معلوم می‌شود که به‌جای τ_0 و μ، g و h اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود [۲۲]:

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

$$T = g + hN \quad (۲)$$

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) هست. از فرمول‌های فوق مشاهده می‌شود که g و h معادل τ_0 و μ در مدل بینگهام است. بنابراین پس از به دست آوردن پارامترهای g و h از دستگاه رئومتر، توسط ضرایبی که از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آید این دو پارامتر به تنش جاری شدن و لزجت خمیری تبدیل می‌شود [۲۰]:

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

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

در این فرمول‌ها τ_0 و μ برابر تنش جاری شدن (Pa) و لزجت خمیری (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 به‌دست‌آمده‌اند.

۳- نتایج و تفسیر

۳-۱- کارایی

نتایج آزمایش‌های کارایی مخلوط‌های بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ در جدول ۴ نشان داده شده است با توجه به جدول ۴، در مقایسه مخلوط‌های با سیمان ۴۴۰ و ۴۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب (V440 و V46) نسبت به مخلوط شاهد (V420)، افزایش سیمان مقدار حلقه J را کاهش، نسبت ارتفاع جعبه L را افزایش و سبب کاهش T_{50} شده است. این نتیجه با فرض آب به سیمان ثابت، با مرجع [۲۳] همخوانی دارد. لازم به ذکر است به همین دلیل، دستورالعمل EFNARC [۲۴] در صورت افزایش لزجت خمیری زیاد، افزایش نسبت آب به سیمان را توصیه کرده است.

جدول ۴- نتایج آزمایش کارایی بر روی انواع مخلوط‌های بتن خودتراکم

گروه مخلوط	جریان اسلامپ (mm)	T_{50} (s)	حلقه J (mm)	جعبه L (H_2/H_1)	قیف V (s)	شاخص پایداری چشمی (VSI)
V420-L-ref	۷۰۰	۲/۸۵	۳/۵	۰/۸۸	۹	۰
V420-N-ref	۷۰۰	۲/۷۲	۴	۰/۸۷	۸/۷	۰
V420-H-ref	۷۱۰	۲/۵۷	۴	۰/۸۵	۸/۴	۰
V440-L	۷۱۰	۳/۲	۳	۰/۹۴	۹/۳	۱
V440-N	۶۹۰	۳/۰۶	۳	۰/۹۳	۹	۰
V440-H	۷۰۰	۲/۸۵	۳/۵	۰/۹	۸/۹	۰
V460-L	۷۱۰	۲/۶۴	۳/۵	۰/۹۳	۸/۵	۰
V460-N	۷۰۰	۲/۴۷	۳/۵	۰/۹۱	۸/۲	۱
V460-H	۷۰۰	۲/۳۱	۴	۰/۹	۷/۸	۱

۳-۲- افت اسلامپ

مطابق با جدول ۵ در نسبت ثابت آب به سیمان، افزایش مقدار سیمان از ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب (V420) تا ۴۶۰ کیلوگرم مترمکعب (V460) در دماهای مختلف، ۳ تا ۷ سانتی‌متر افت اسلامپ را کاهش می‌دهد. این نتیجه با مرجع [۱۶]، که کاهش نسبت آب به پودر، سبب افزایش افت اسلامپ شده است مغایرت ندارد زیرا در مرجع [۱۶]، پودر افزایش یافته است ولی آب ثابت مانده است. از سوی دیگر، دستورالعمل ACI238-1R [۱۰]، برای بهبود کارایی، افزایش سیمان در نسبت ثابت آب به سیمان را توصیه کرده است که با نسبت‌های مخلوط این مقاله مطابقت دارد.

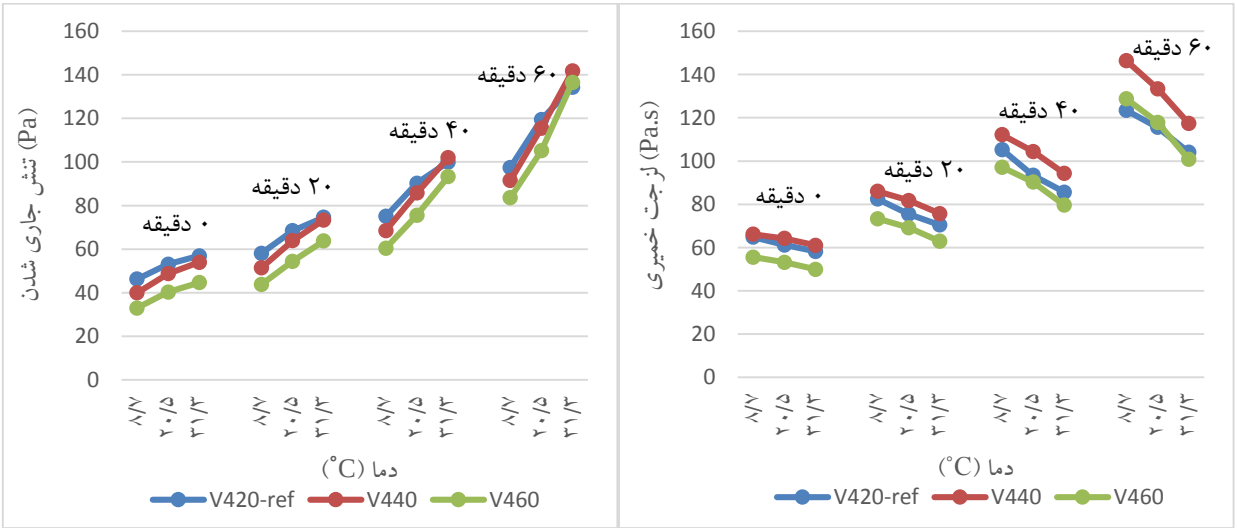
جدول ۵- نتایج افت اسلامپ بر روی مخلوط‌های بتن خودتراکم بر حسب سانتی‌متر

دما (سلسیوس)	کم (۷-۱۰)				معمولی (۲۰-۲۲)				بالا (۳۰-۳۲)			
زمان (دقیقه)	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۰	۲۰	۴۰	۶۰
V420	۷۰	۶۸/۵	۶۶	۶۵	۷۰	۶۸	۶۵/۵	۶۲/۵	۷۱	۶۷/۵	۶۳	۵۹
V440	۷۱	۷۰	۶۹	۶۸	۶۹	۶۸	۶۶/۵	۶۵/۵	۷۰	۶۸	۶۵	۶۳
V460	۷۱	۷۰/۵	۶۹/۵	۶۹	۷۰	۶۹	۶۸	۶۶/۵	۷۰	۶۸	۶۷/۵	۶۴/۵

۳-۳- رئولوژی

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود در زمان ۰ در دماهای مختلف، با افزایش سیمان از تنش جاری شدن مخلوط‌ها کاسته می‌شود که برای بتن با سیمان‌های ۴۴۰ و ۴۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب نسبت به بتن با سیمان ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب، به ترتیب در حدود ۷ و ۱۴ پاسکال کاهش یافته است. این نتیجه با تحقیق والویک و والویک [۲۳] مطابقت دارد. البته لازم به ذکر است با افزایش سیمان برخلاف تنش جاری شدن اولیه، نرخ رشد تنش جاری شدن با زمان افزایش یافته است یعنی برای دمای بالا، سیمان ۴۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب در زمان‌های ۴۰ و ۶۰ دقیقه و سیمان ۴۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب در زمان ۶۰ دقیقه، تنش جاری شدن بیشتری از بتن با سیمان ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب دارد. همچنین مطابق با شکل ۴، افزایش سیمان از ۴۲۰ و ۴۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ۴۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب، سبب کاهش لزجت خمیری می‌شود که با مرجع [۲۳] همخوانی دارد ولی با این وجود، افزایش سیمان از ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب به سیمان ۴۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، لزجت خمیری افزایش می‌یابد که این مغایرت شاید به دلیل آن باشد که سیمان‌های ۴۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب حد بهینه سیمان مصرفی باشد.

نکته دیگری که حائز اهمیت است ازآنجایی‌که افزایش سیمان و کاهش دما، نرخ رشد لزجت را افزایش می‌دهد [۲۳] به همین دلیل در زمان ۶۰ دقیقه و در دمای ۸/۷ درجه سلسیوس سیمان ۴۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب لزجت بیشتری نسبت به سیمان ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب کسب کرده است.

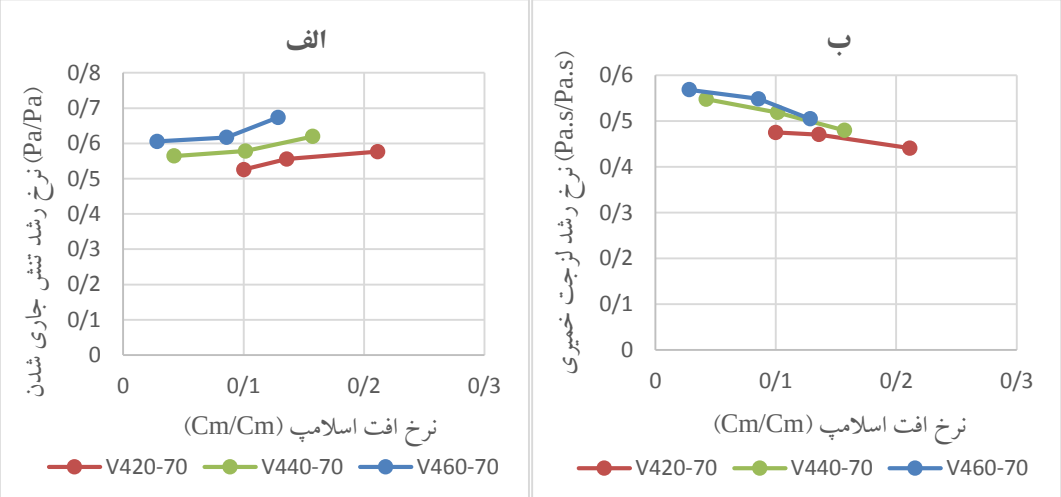


شکل ۴- اثر دما، زمان و افزایش سیمان بر تنش جاری شدن و لزجت خمیری بتن‌های خودتراکم

۳-٤- تأثیر نرخ افت اسلامپ

در شکل ۵ در طول زمان ۶۰ دقیقه، نرخ رشد افت اسلامپ، نرخ رشد تنش جاری شدن و نرخ رشد لزجت خمیری نشان داده شده است. با افزایش سیمان در نسبت ثابت آب به سیمان، نرخ افت اسلامپ و لزجت خمیری کاهش، ولی نرخ رشد تنش جاری شدن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش دما سبب افزایش نرخ افت اسلامپ و نرخ رشد تنش جاری شدن و کاهش نرخ رشد لزجت خمیری می‌شود.

ازاین‌رو درصورتی‌که زمان حمل‌ونقل زیاد یا هوای محیط گرم باشد مطابق با توصیه دستورالعمل ACI238-1R [۱۰]، سیمان را در نسبت ثابت آب به سیمان افزایش می‌دهیم تا علاوه بر اینکه نرخ افت اسلامپ کاهش می‌یابد قابلیت عبور افزایش یابد.



شکل ۵- اثر نرخ رشد افت اسلامپ بر رئولوژی: الف) نرخ رشد تنش جاری شدن ب) نرخ رشد لزجت خمیری

٤- نتیجه‌گیری

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

- زآنجایی‌که افزایش دما و زمان، سبب افزایش تنش جاری شدن و کاهش لزجت خمیری می‌شود، بنابراین باید از بالا رفتن دمای بتن جلوگیری کرد.
- برای جلوگیری از تأثیر منفی دمای بالای ۳۰ درجه سلسیوس و زمان ۶۰ دقیقه، سیمان را در نسبت ثابت آب به سیمان افزایش می‌دهیم تا علاوه بر اینکه افت اسلامپ کاهش می‌یابد کارایی افزایش یابد.
- افزایش سیمان تا مقدار بهینه یعنی ۴۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، سبب بهبود رئولوژی یعنی کاهش تنش جاری شدن و افزایش لزجت خمیری می‌شود. ولی بعد از مقدار بهینه سیمان، افزایش سیمان سبب کاهش تنش جاری شدن و لزجت خمیری می‌شود.
- با افزایش سیمان در نسبت ثابت آب به سیمان، نرخ رشد افت اسلامپ و لزجت خمیری کاهش می‌یابد ولی نرخ رشد تنش جاری شدن افزایش می‌یابد

۵- مراجع

[1] 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.

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

[3] Gołaszewski, J., and G. Cygan. "The effect of temperature on the rheological properties of self-compacting concrete." Proceedings of the ninth international symposium on brittle matrix composites (BMC 9), Warsaw, Poland. 2009.

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

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

[6] 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: p. 655-670, 2007.
[7] Petit, Jean-Yves, Kamal H. Khayat, and Eric Wirquin. "Coupled effect of time and temperature on variations of plastic viscosity of highly flowable mortar." Cement and Concrete Research, 39.3: p. 165-170, 2009.
[8] Aïtcin, P.C., "High-Performance Concrete, "E and FN Spon., New York, 1998.
[9] Gołaszewski, J., Kostrzanowska-Siedlarz, A., Cygan, G. and Drewniok, M., "Mortar as a model to predict self-compacting concrete rheological properties as a function of time and temperature." Construction and building materials, 124: pp. 1100-1108, 2016.
[10] ACI 238.1R-08, "Report on Measurments of Workability and Rheology of Fresh Concrete", American Concrete Institute ,2008.
[11] Łukowski, P., "Influence of temperature on efficiency of superplasticizing admixtures for concrete." Journal of Building Chemistry 1, no. 1, p. 32-36, 2016.
[12] Al-Martini, S. and Nehdi, M., "Effect of chemical admixtures on rheology of cement paste at high temperature." Journal of ASTM International, 4.3: p. 1-17, 2007.
[13] ACI 237R-07, "Self-consolidating Concrete." American Concrete Institute, 2007.
[14] Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B. and Panarese, W.C., "Design and control of concrete mixtures, " Skokie, IL: Portland Cement Association,Vol. 5420, 2002.
[15] Neville, A.M. and Brooks, J.J., "Concrete technology(the second edition)." 2010.
[16] 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): p. 127-141, 2014.
[17]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, p. 111-126, 2014.
[18] Schmidt, W., Brouwers, J., Kühne, H.C., and Meng, B., "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, p. 65-77, 2010.
[19] Diawara, H. and Ghafoori, N., "Influence of Combined Hauling Time and Temperature on Flow Properties of Self-Consolidating Concrete: Retempering Remediation." Journal of Materials in Civil Engineering, 24 (1), p 1-7, 2012.
[20] 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: p. 1-10, 2009.
[21] 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.
[22] 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: p. 171-181, 2009.
[23] 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), p. 1279-1288, 2011.
[24] EFNARC, EFCA. "Guidelines for Viscosity Modifying Admixtures For Concrete." 2006.

Investigating the effect of cement at different temperatures and durations on the rheological properties of the self-compacting concrete

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

The self-compacting concrete is more sensitive to changes in the temperature with respect to the ordinary concrete. Increase in the temperature affects the cement hydration rate and minor mistakes in the amount of used cement could bring about significant problems concerning the properties of self-compacting concrete, mostly affecting workability. Therefore in order to understand the cement mechanism in the self-compacting concrete, care should be exercised to regulate workability through right consumption of cement. In this research the temperature of the concrete mixtures was selected with respect to the ambient conditions in different seasons. Thus, after reaching the concrete temperature to the ambient temperature, the rheological properties of the self-compacting concrete with different amounts of cement as a function of mixing time, and temperature with water to cement ratio of 0.42 were investigated. According to the obtained results from the rheometer in terms of the yield stress and plastic viscosity during 60 minutes, it was found that addition of cement up to 440 kg/m^3 improves the rheology. Furthermore referring to the results of this research it should be stated that for improving the rheology, one should prevent rise of temperature in the concrete and reduce the concrete placing time, otherwise it could result in concrete hardening and consequently reduced rheological properties.

Keywords: Self-compacting concrete, Rheology, Cement, Workability, Temperature.

* Corresponding Author: azim_hosseini@azad.ac.ir