

بررسی ابقاپذیری بتن های خودتراکم حاوی پودر سنگ آهک بر اساس پارامترهای رئولوژی

پرویز قدوسی^{۱*}، امیرمسعود صالحی^۲

۱. استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. استادیار، گروه عمران، دانشگاه خوارزمی

ghoddousi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۳/۲۱]

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۵/۲۴]

چکیده

یکی از موانع مهم توسعه بتن خودتراکم در مقیاس صنعتی و کاربردهای گوناگون، حساسیت بسیار زیاد یا ابقاپذیری^{*} بسیار کم این بتن در مقایسه با بتن معمولی می باشد. از این روی در تحقیق حاضر ابتدا ۷ طرح مخلوط بر اساس یک طرح پایه با تغییر در نسبت های ترکیب و نیز افزودن افزودنی ها، تنظیم گردیده و مورد آزمایش هدفمند قرار گرفته اند. بدین ترتیب که هر کدام از ۸ طرح مخلوط، در مقدار آب دقیق و نیز تغییر یافته به میزان $\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ ساخته شده و سپس خواص رئولوژی هر مخلوط تعیین می گردد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که یک شاخص مناسب برای بررسی ابقاپذیری بتن های خودتراکم، مساحت محصور بین خواص رئولوژی بتن ها در تغییر مقدار آب به میزان $\pm 3\%$ یا $\pm 6\%$ می باشد. بر اساس این شاخص، افزودن هوازا به بتن خودتراکم باعث بهبود ابقاپذیری و کاهش حجم خمیر باعث کاهش شدید ابقاپذیری می گردد.

کلیدواژه‌ها: ابقاپذیری بتن خودتراکم، تغییر جزئی مقدار آب، خواص رئولوژی، رئوگراف

۱- مقدمه

بتن خودتراکم باید قادر به دستیابی به خودتراکمی مناسب بدون تراکم (ویبره) و همگن ماندن بعد از عملیات بتن ریزی باشد. برای دستیابی به چنین خودتراکمی، بتن باید قادر به پرکردن فضاهای محدود و گوشه‌ها با قابلیت دسترسی کم (قابلیت پرکنندگی) و قابلیت عبور از میان فضاهای کوچک میلگردهای مسلح کننده و نیز مقاومت جداشدگی بالا بوده تا بتن قادر به همگن ماندن بعد از جاری شدن، ریختن و عبور از میان موانع و ... باشد [4-5].

توسعه بتن خودتراکم، یکی از مهمترین پیشرفت‌ها در صنعت ساختمان در سال‌های اخیر می‌باشد. این نوع بتن، قابلیت جاری شدن داشته و حفرات مابین میلگردها و گوشه قالب‌ها را بدون نیاز به ویبره و تراکم پر می‌کند. این بتن بصورت پیش ساخته و یا برای بتن ریزی در محل، قابل تولید و استفاده می‌باشد. از جمله مزایای بتن خودتراکم که یک بتن سازه‌ای بادوام است، به حداقل رساندن نیروی کار مورد نیاز و عدم وجود صدا، ناشی از تراکم بتن است [1-3].

که نشان دهنده تنش جاری (استاتیک) است، خاتمه می پذیرد [9].

با وجود مزایای متعدد بتن خودتراکم، استفاده وسیع و گسترده از آن محدود است. محدودیت کاربرد این نوع بتن در مقیاس بزرگ، بخشی بعلت عدم شناخت کامل خواص و بخشی بعلت ابقا پذیری ضعیف (حساسیت شدید عملکرد آن نسبت به تغییر پارامترهای طراحی) است [10].

بر اساس پیشنهاد راهنمای اروپایی بتن خودتراکم، زمانی یک بتن خودتراکم بطور مناسب طراحی شده است که به مقدار لازم قابلیت تحمل نوسانات روزانه در اجزاء سازنده خود را داشته و فشار بر بخش کنترل کیفیت و احتمال مشکلات در محل بتن ریزی را کاهش دهد [11].

در این پژوهش ابقا پذیری چندین نوع بتن خودتراکم که طرح مخلوط آنها هدفمند تنظیم شده است، با استفاده از تعیین پارامترهای رئولوژی تخمین زده می شود. بدین صورت که هر طرح مخلوط با مقدار آب دقیق و مقدار آب تغییر یافته به میزان $\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ ساخته شده و پارامترهای رئولوژی هر مخلوط اندازه گیری شده و در نهایت این نتایج برای تعیین شاخص مناسب برای تعیین ابقا پذیری بتن خودتراکم مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح مصرفی

مصالح پودری بتن خودتراکم شامل سیمان پرتلند نوع دو و پودر سنگ آهک است که مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی این مواد در جدول (۱) آورده شده است.

بتن های ساخته شده در این پژوهش دارای حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹/۵ میلی متر بوده و سنگدانه ها از نوع شکسته و دارای جنس آهکی است. مشخصات فیزیکی سنگدانه ها در جدول (۲) آورده شده است. همچنین دانه بندی سنگدانه های مصرفی در شکل (۱) نشان داده شده است.

یک بتن خودتراکم باید دارای کارایی بالا، برای جریان یافتن و پخش شدن تحت وزن خود، بدون تراکم، برای رسیدن به گوشه های دور دست و بخش های دارای محدودیت دسترسی از قالب باشد. کارایی بتن بستگی به میزان آب و مقدار فوق روان کننده موجود در بتن دارد. این شاخص در بتن خودتراکم شامل قابلیت جریان و قابلیت شکل پذیری است. عبارت قابلیت جریان ارجاع به مسافت و سرعت بتن در پهن شدگی تحت وزن خود و عبارت شکل پذیری مربوط به میزان توانایی بتن در شکل پذیری و تغییر شکل، تحت وزن خود است.

بتن به عنوان یک معلق^۱ از ذرات دانه ای از اندازه میکرونی مانند سیمان و دیگر ریزذرات تا ابعاد میلی متر مربوط به درشت دانه ها در نظر گرفت. از این روی خواص رئولوژی^۲ بتن تحت تأثیر نیروهای مختلف از جمله نیروهای کلوئیدی و ضربه ای بین اجزاء مختلف است که میزان این نیروها به اندازه ذرات وابسته است.

بتن تازه با تقریب بسیار خوبی به عنوان سیال غیر نیوتنی بینگهام در نظر گرفته می شود. لزوم آغاز حرکت این نوع سیال ویسکوپلاستیک، فائق آمدن بر تنش جاری است. پس از آغاز حرکت، یک رابطه خطی میان تنش برشی τ و نرخ برشی $\dot{\gamma}$ با شیب معادل ویسکوزیته پلاستیک وجود دارد. ویسکوزیته پلاستیک معمولاً با نماد یونانی μ نشان داده می شود [8-6].

برای اندازه گیری خواص رئولوژی بتن از رئومتر استفاده می شود که یکی از پرکاربردترین انواع آنها برای بتن، رئومترهای نسبی است. در این پژوهش برای اندازه گیری خواص رئولوژی بتن از دستگاه رئومتر نسبی توسعه یافته در دانشگاه علم و صنعت ایران بهره برده شده است. دستگاه رئومتر قادر به اجرای آزمون رشد تنش و اندازه گیری منحنی جریان است. در آزمون رشد تنش، پره در یک سرعت ثابت (۰/۰۵ دور در ثانیه) چرخیده و روند رشد گشتاور برداشت می شود. آزمون رشد تنش به محض تشخیص گشتاور بیشینه

* Robustness

۱ Suspension

۲ Rheology

کنترل (C) دو مخلوط قابلیت پرکنندگی بیشتری دارند که مخلوط های $F(SP)$ و $F(SP+W)$ است. یک مخلوط دارای قابلیت عبور کمتری است که از طریق افزایش نسبت درشت دانه به کل سنگدانه حاصل شده است (P).
مخلوط هایی با هدف کاهش مقاومت جداسدگی توسعه یافته اند که در آنها حجم خمیر کاهش یافته است ($S(L)$) و $S(C+L)$.

علاوه بر این دو مخلوط با استفاده از افزودنی هوازا (بتن A) و استفاده از اصلاح کننده لزجت (بتن ترکیبی V) با هدف بررسی تغییر در خواص بتن خودتراکم تازه ناشی از تغییر بتن از حالت پودری به ترکیبی مورد آزمایش قرار گرفته است. نسبت های ترکیب بتن های خودتراکم مختلف در جدول (۳) آورده شده است.

برای بررسی ابقا پذیری، تغییرات محدود در مقدار آب بتن ها اعمال شد. مقدار تغییر آب مخلوط با توجه به بند ۹-۷-۱-۲-۱ (پ) مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان [12] که "رواداری توزین هر یک از اجزای تشکیل دهنده بتن را تا $\pm 3\%$ " مجاز دانسته، به میزان $\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ تغییر داده و پارامترهای رئولوژی در هر مخلوط اندازه گیری می شود.

۲-۳ چگونگی مخلوط کردن و آزمایش ها

بتن های خودتراکم در یک مخلوط کن ثقلی با ظرفیت ۶۰ به حجم ۳۵ لیتر ساخته شده اند. هر طرح مخلوط، به مدت ۴ دقیقه مخلوط شده و پس از آن به مدت ۲ دقیقه استراحت می کند. سپس رفتار رئولوژی بتن های خودتراکم با استفاده از دستگاه رئومتر بتن خود تراکم دانشگاه علم و صنعت ایران که برای اولین بار در کشور توسط پژوهشگران این دانشگاه ساخته شده است، مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲).

این دستگاه رئومتر قادر به اجرای آزمون رشد تنش^۳ و اندازه گیری منحنی جریان^۴ است. در آزمون منحنی جریان، ابتدا با افزایش سرعت از ۰/۰۵ تا ۰/۵ دور بر ثانیه در ۷ گام و باقی ماندن به مدت ۳۰ ثانیه در ۰/۵ دور بر ثانیه و در نهایت نزول سرعت از ۰/۵ تا ۰/۰۲۵ دور بر ثانیه در ۷ گام انجام می گیرد (شکل ۳).

فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلاتی با وزن مخصوص 1100 kg/m^3 ، یک نوع اصلاح کننده لزجت با فرمول شیمیایی میکروبال پلی ساکراید و نیز یک نوع هواساز با PH حدود ۸/۵ و وزن مخصوص حدود 1010 kg/m^3 مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱. ویژگی های شیمیایی و فیزیکی سیمان و پودر سنگ آهک

Limestone	Cement type II	Properties
2.80	20.74	SiO ₂
0.35	4.90	Al ₂ O ₃
0.50	3.50	Fe ₂ O ₃
1.80	1.20	MgO
51.22	62.95	CaO
1.24	3.00	SO ₃
-	-	K ₂ O
42.06	1.56	LOI
2.80	0.74	IR
2660	3150	Specific gravity (kg/m ³)

Table 1. Chemical and physical properties of cement and limestone powder

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه های مصرفی

Water absorption	Grain volumetric mass	Aggregate type
(%)	Kg/m ³	
۱/۸	۲/۶	gravel
۳/۹	۲/۵۷	sand

Table 2. Physical properties of aggregates

شکل ۱. دانه بندی سنگدانه های مصرفی

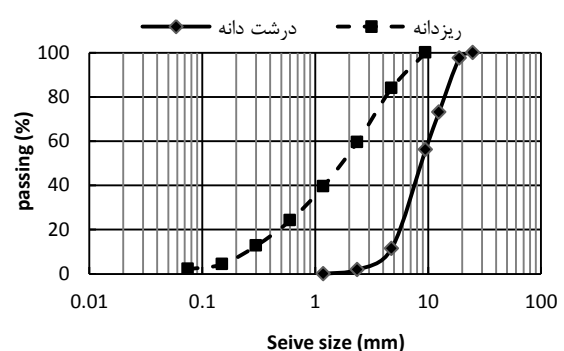


Fig. 1. Aggregate grading

۲-۲ طرح های مخلوط و چگونگی بررسی ابقا پذیری

مخلوط های مورد بررسی در این پژوهش با این هدف طراحی شده اند که هر کدام دستخوش یک تغییر هدفمند در خواص اصلی بتن خودتراکم شدند. بر اساس مخلوط بتن

جدول ۳. طرح مخلوط بتن ها

Mix code	w/c	water	cement	Limestone powder	sand	gravel	F/T	SP
				Kg/m ³				%*
C	0.5	200	400	175	916	611	0.6	0.92
F(SP)	0.5	200	400	175	916	611	0.6	1.11
F(SP+W)	0.46	185	400	175	927	618	0.6	1.30
P	0.5	200	400	175	763	763	0.5	1.04
S(L)	0.5	200	400	100	960	640	0.6	0.78
S(C+L)	0.49	185	375	160	987	658	0.6	1.07
A*	0.5	200	400	175	916	611	0.6	0.74
V*	0.5	200	400	100	960	640	0.6	0.88

* Percent of cement weight

+ Including 22 kg/m³ air entrain agent

× Including 0.33 kg/m³ viscosity modified admixture

^ Sand to aggregate ration

Table 3. Concrete mix design

جاری و ویسکوزیته بر اساس پارامترهای g و h تعیین می شود.

۳- نتایج آزمایشگاهی و تحلیل آنها

با هدف بررسی تغییرات پارامترهای رئولوژی نسبت به تغییرات جزئی آب در بتن های مختلف، بر اساس یک بتن خودتراکم مناسب (C)، ۷ طرح مخلوط جدید ساخته شده و علاوه بر ساخت بتن با مقدار دقیق مصالح، مخلوطها در مقادیر آب تغییر یافته به میزان $\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ ساخته شده و خواص رئولوژی آنها تعیین شد.

۳-۱- خواص رئولوژی بتن ها

مخلوطهای مورد آزمایش در این پژوهش با تغییر نسبت های ترکیب و استفاده از افزودنی ها بر اساس یک مخلوط پایه (C) توسعه یافته اند. در شکل (۴) تغییرات خواص رئولوژی این بتن ها روی رئوگراف (نمودار تغییرات تنش جاری در مقابل ویسکوزیته پلاستیک) نشان داده شده است.

همان گونه که مشاهده می شود، تنش جاری مخلوط های $F(SP)$ و $F(SP+W)$ بطور قابل توجهی کاهش یافته است. بیشترین کاهش تنش جاری مربوط به بتن $F(SP)$ است (حدود ۱۱ پاسکال) که جریان اسلامپ این بتن با استفاده از فوق روان کننده به میزان ۱۰۰ میلی متر افزایش یافته است.

شکل ۲. دستگاه رئومتر بتن



Fig. 2. Rheometer of concrete

شکل ۳. آزمون منحنی جریان دستگاه رئومتر

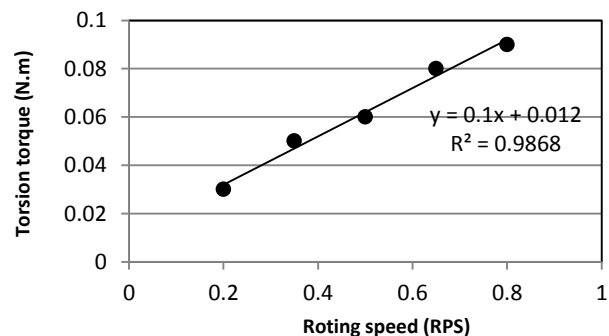


Fig. 3. Flow curve test of rheometer

در نهایت برای تحلیل داده های بدست آمده، روی نتایج تغییرات گشتاور در مقابل سرعت چرخش، یک برازش خطی عبور داده می شود. تقاطع این خط با محور گشتاور، g مرتبط با تنش جاری و شیب خط h مرتبط با ویسکوزیته پلاستیک است. در نهایت بر اساس روابط توسعه یافته، پارامترهای تنش

۲-۳ تغییر پارامترهای رئولوژی با تغییر جزئی مقدار آب همان‌گونه که در بخش ۲-۲ اشاره شد، برای بررسی ابقاپذیری بتن‌ها، هر یک از ۸ مخلوط، علاوه بر مخلوط با مقدار آب دقیق، با مقدار آب تغییر یافته میزان $\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ نیز بتن‌ها ساخته شده و خواص رئولوژی آنها با استفاده از رئومتر تعیین شد.

در شکل (۵)، تغییرات مقدار تنش جاری بتن‌های مختلف (نسبت به مقدار تنش جاری مرجع) در تغییرات مقدار مختلف آب نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش جزئی مقدار آب باعث افزایش قابل توجه مقدار تنش جاری شده است. به گونه‌ای که در بتن $S(L)$ این افزایش بیش از ۸۰ پاسکال است. اما در حالت کاهش آب این تغییرات محدودتر بوده و بیشینه تغییرات ۱۴ پاسکال است. البته در بیشتر بتن‌ها کاهش مقدار آب نه تنها باعث کاهش تنش جاری نشده بلکه در بیشتر موارد باعث افزایش تنش جاری شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده، بیشترین اختلاف ایجاد شده در تنش جاری، طبق انتظار مربوط به افزایش ۶٪ آب است که به ترتیب در بتن‌های $S(L)$ ، $S(C+L)$ و $F(SP)$ است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش حجم خمیر، باعث ایجاد حساسیت زیاد تنش جاری نسبت به تغییرات مقدار آب می‌شود. پس از کاهش حجم خمیر، افزایش قابلیت پراکنندگی بتن فقط با فوق روان کننده، باعث حساس شدن تنش جاری بتن نسبت به تغییرات جزئی آب می‌شود.

نتایج تغییرات ویسکوزیته پلاستیک نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب در شکل (۶) نشان داده شده است. برخلاف نتایج تنش جاری، مقدار ویسکوزیته پلاستیک بطور متناسب با تغییرات آب تغییر می‌کند. بطوری که کاهش جزئی مقدار آب باعث افزایش مقدار ویسکوزیته و افزایش مقدار آب باعث کاهش ویسکوزیته می‌شود. علاوه بر این در قیاس با پارامتر تنش جاری، تغییرات ویسکوزیته بسیار محدودتر بوده و حداکثر به ۱۰ پاسکال-ثانیه می‌رسد. بیشترین مقدار تغییرات به ترتیب مربوط به بتن‌های $F(SP+W)$ ، P ، $S(L)$ و $S(C+L)$ است. کمترین مقدار تغییرات نیز مربوط به بتن‌های A و V است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تأثیر فوق روان کننده‌ها روی تنش جاری بتن خودتراکم بوده و تأثیر چندانی بر ویسکوزیته پلاستیک ندارند. همچنین بتن $F(SP+W)$ که افزایش جریان اسلامپ ۱۰۰ میلی‌متری آن ناشی از کاهش مقدار آب و افزایش مقدار فوق روان کننده بوده است، دچار کاهش تنش جاری به میزان ۶ پاسکال و نیز افزایش حدود ۳ پاسکال ثانیه ای ویسکوزیته پلاستیک شده است.

افزایش حجم درشت دانه در بتن خودتراکم (مخلوط P) باعث افزایش محدود تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک شده است. اما کاهش حجم خمیر باعث افزایش بیشتر این دو پارامتر شده است. کاهش حجم خمیر بتن از ترکیب سیمان و پودر سنگ باعث افزایش ۲ پاسکال تنش جاری و ۶ پاسکال ثانیه ای ویسکوزیته پلاستیک شده است. علاوه بر این کاهش حجم خمیر تنها با استفاده از کاهش پودر سنگ آهک باعث بیشترین افزایش تنش جاری و ویسکوزیته پلاستیک شده است.

شکل ۴. تغییر مشخصات رئولوژی بتن‌ها با تغییر نسبت‌های ترکیب و

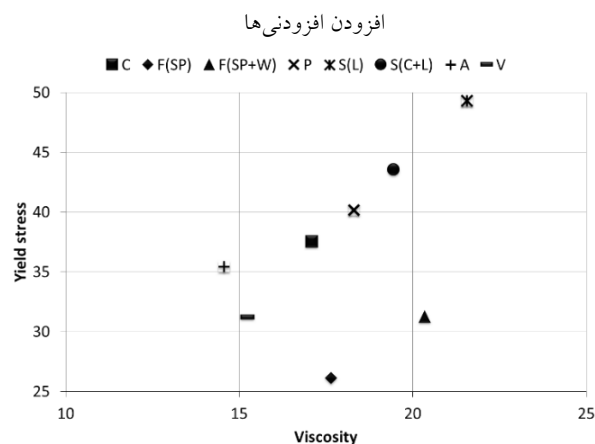


Fig. 4. Change of rheology parameters with change in compositions and admixtures

استفاده از افزودنی‌ها باعث کاهش تنش جاری و ویسکوزیته شده است. استفاده از هوازا در بتن باعث کاهش هر دو پارامتر شده است که البته کاهش ویسکوزیته بیشتر است. استفاده از اصلاح کننده لزجت به جای بخشی از پودر سنگ (V) باعث کاهش هر دو پارامتر رئولوژی شده است.

شکل ۵. اختلاف مقدار تنش جاری با تغییر جزئی مقدار آب نسبت به بتن مرجع؛ الف) افزایش آب؛ ب) کاهش آب

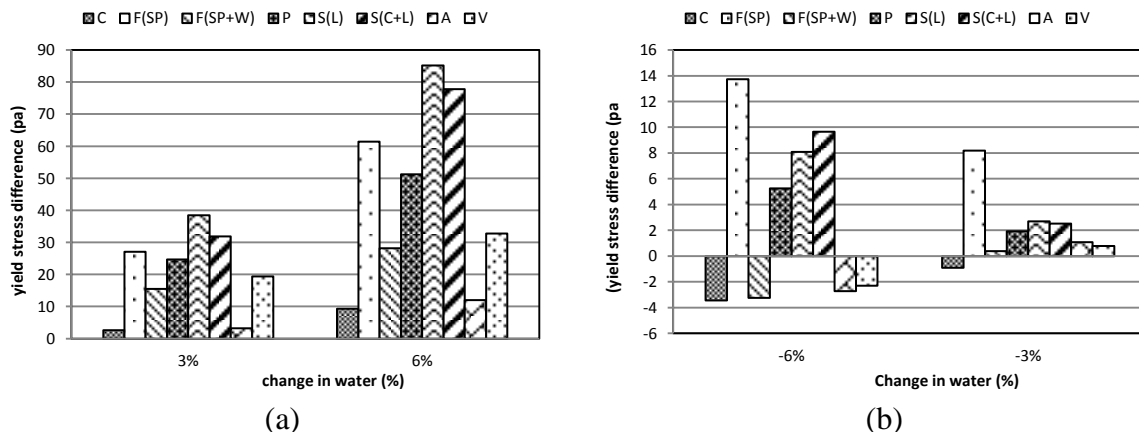


Fig. 5. Difference of yield stress with change in water in control mix a) increase in water; b) decrease in water

شکل ۶. اختلاف مقدار ویسکوزیته پلاستیک با تغییر جزئی مقدار آب نسبت به بتن مرجع؛ الف) افزایش آب؛ ب) کاهش آب

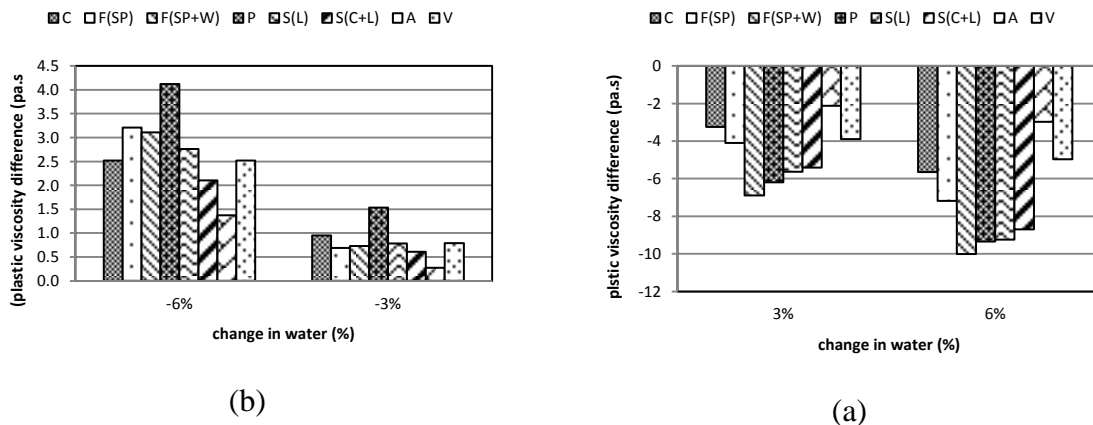


Fig. 6. Difference of plastic viscosity with change in water in control mix a) increase in water; b) decrease in water

شکل ۷. تغییرات پارامترهای رئولوژی بتن ها نسبت به تغییر جزئی مقدار آب؛ الف) مخلوط C؛ ب) مخلوط F(SP)

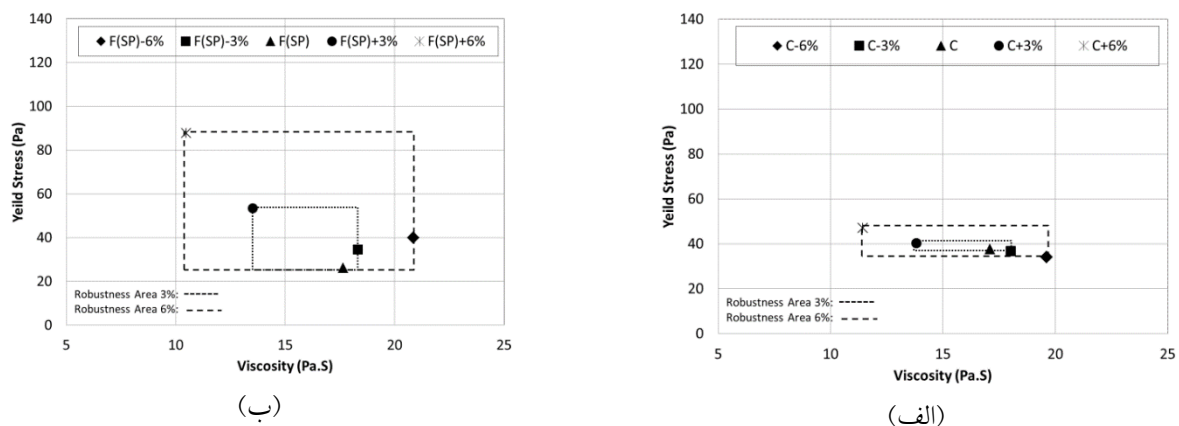


Fig. 7. Change in rheology parameters of concretes with change in water content; a) Mix c; b) mix F(SP)

برای تعریف کامل رفتار یک بتن در حالت تازه به هر دو این پارامترها نیاز است، بنابراین یک راه حل مناسب استفاده از رئوگراف است.

۳-۳ شاخص ابقا پذیری بر اساس پارامترهای رئولوژی همان گونه که اشاره شد، کمیت های رئولوژی پایه ای برای مصالح با اساس سیمانی، بوسیله مقادیر تنش جاری شدن T و ویسکوزیته پلاستیک μ تخمین زده می شوند. از آنجایی که

جدول مشاهده می‌شود، رتبه‌بندی ابقاپذیری در تغییرات $\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ مقدار آب یکسان است.

بر اساس رتبه‌بندی ابقاپذیری، بتن حاوی هوازا دارای بیشترین ابقاپذیری در بین کلیه بتن‌ها بوده و حتی ابقاپذیری آن از بتن کنترل (C) نیز بیشتر است؛ و این نتیجه نشان می‌دهد که افزودن هوازا به بتن باعث ابقاپذیرتر شدن آن می‌شود.

پس از بتن کنترل، بتن حاوی اصلاح کننده لزجت قرار دارد که برخلاف پژوهش‌های مختلف [13-16] که نشان‌دهنده کاهش حساسیت بتن با استفاده از ماده اصلاح کننده لزجت است، استفاده از اصلاح کننده لزجت در این پژوهش باعث بزرگتر شدن مساحت محصور رئولوژی شده است.

از میان مخلوط‌ها با تغییر در نسبت‌های ترکیب، بتن‌ها با حجم خمیر کاهش یافته دارای کمترین ابقاپذیری است. از میان دو روش کاهش حجم خمیر، کاهش حجم خمیر از طریق کاهش مقدار پودر سنگ $S(L)$ باعث ابقاپذیری کمتری نسبت به بتن با حجم خمیر کاهش یافته از طریق کاهش سیمان و پودر سنگ $(S(C+L))$ شده است. همچنین افزایش حجم درشت دانه در بتن خودتراکم نیز باعث کاهش ابقاپذیری بتن شده است.

در نهایت افزایش قابلیت پرکنندگی (جریان اسلامپ) بتن‌ها نیز باعث کاهش محدودتر ابقاپذیری شده است. در این میان، حساسیت بتنی که قابلیت پرکنندگی آن فقط با فوق روان کننده $(F(SP))$ افزایش یافته است، از بتنی که از ترکیب کاهش مقدار آب و افزایش فوق روان کننده $(F(SP+W))$ بیشتر است.

در شکل (۷) تغییرات پارامترهای رئولوژی بتن‌ها نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب بر روی رئوگراف نشان داده شده است. بر اساس این شکل‌ها می‌توان گفت که کاهش مقدار آب در بتن‌های مختلف باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود اما تأثیر مشخص و یکسانی روی تنش جاری بتن‌های مختلف ندارد. در حالت افزایش جزئی مقدار آب بتن‌ها، ویسکوزیته بتن کاهش یافته و در بیشتر بتن‌ها تنش جاری افزایش یافته است.

همچنین از رئوگراف بتن‌های مختلف مشاهده می‌شود که تغییرات $\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ مقدار آب باعث تغییرات متفاوت پارامترهای رئولوژی در بتن‌های مختلف شده است. این تغییرات متفاوت نشان دهنده تأثیر نسبت‌های ترکیب بتن‌های خودتراکم و نیز نوع افزودنی‌های مصرفی در آنها بر حساسیت پارامترهای رئولوژی (تنش جاری و ویسکوزیته) اثرگذار است. برای بررسی کمی و دقیق ابقاپذیری بتن‌های مختلف، یک راه حل مناسب، استفاده از مساحت محصور بین تغییرات پارامترهای رئولوژی بر روی رئوگراف می‌شود. در شکل (۵) مساحت محصور ابقاپذیری نشان داده شده است.

مساحت محصور بین نقطه چین ریز مربوط به تغییرات $\pm 3\%$ آب و مساحت محصور بین خط چین درشت مربوط به تغییرات $\pm 6\%$ در پارامترهای رئولوژی است. واضح است که تغییرات $\pm 3\%$ مقدار آب باعث تغییرات کمتر پارامترهای رئولوژی نسبت به تغییرات $\pm 6\%$ مقدار آب می‌شود.

در جدول (۴)، مساحت محصور 3% و 6% محاسبه و آورده شده است. هر چه مساحت محصور کمتر باشد، نشان‌دهنده تغییرات محدودتر پارامترهای رئولوژی و در نتیجه ابقاپذیرتر بودن بتن‌ها است. در این جدول رتبه‌بندی ابقاپذیری بتن‌ها در تغییرات $\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ آورده شده است. بر اساس این نتایج این

جدول ۴. رتبه‌بندی بتن خودتراکم بر اساس ابقاپذیری با استفاده از روش ضریب تغییرات

Concrete	Robustness $\pm 3\%$		Robustness $\pm 6\%$	
	Index	Ranking	Index	Ranking
A	7.9	1	64.3	1
C	14.8	2	104.9	2
V	91	3	263.4	3
F(SP+W)	118	4	412.3	4
F(SP)	130	5	639	5
P	191.5	6	691.2	6
S(C+L)	191.9	7	841	7
S(L)	247	8	1023	8

Table 4. Robustness ranking of SCCs with the use of Coefficient of variation

۴- نتیجه گیری

(۱) بیشترین تأثیر فوق روان کننده بر خواص رئولوژی بتن خودتراکم، روی تنش جاری آن است و تأثیر چندانی بر ویسکوزیته پلاستیک ندارد. بدین ترتیب که با افزایش فوق روان کننده، تنش جاری نیز افزایش می یابد. افزایش حجم درشت دانه و نیز کاهش حجم خمیر بتن خودتراکم باعث افزایش تنش جاری و ویسکوزیته می شود. این تغییرات در بتن هایی که حجم خمیر آنها کاهش می یابد، قابل توجه تر است.

(۲) بطور کلی افزایش جزئی مقدار آب باعث افزایش تنش جاری بتن خودتراکم می شود اما کاهش مقدار آب در برخی بتن ها باعث افزایش و برخی بتن ها باعث کاهش تنش جاری شده است. در مقابل، ویسکوزیته بتن های خودتراکم در مقابل تغییرات مقدار آب تغییرات مشخص داشته و این تغییرات معکوس است. بطوریکه کاهش جزئی مقدار آب بتن باعث افزایش ویسکوزیته و افزایش جزئی مقدار آب باعث کاهش ویسکوزیته بتن خودتراکم شده است.

(۳) یک شاخص کمی مناسب برای بررسی ابقاپذیری بتن ها خودتراکم، تعیین مساحت محصور بین پارامترهای رئولوژی در تغییرات $\pm 3\%$ یا $\pm 6\%$ مقدار آب است. بدین ترتیب که بتن خودتراکم مورد نظر به عنوان نمونه در تغییرات مقدار آب $\pm 3\%$ ساخته شده و پارامترهای رئولوژی آن اندازه گیری می شود. با پیاده سازی این نتایج روی رئوگراف، و تعیین مساحت محصور بین پارامترهای رئولوژی می توان شاخص کمی از ابقاپذیری را محاسبه کرد.

(۴) بر اساس شاخص ابقاپذیری رئولوژی، اضافه کردن هوازا به بتن خودتراکم باعث افزایش ابقاپذیری بتن خودتراکم می شود. از سوی دیگر، جایگزینی بخش از پودر سنگ آهک با اصلاح کننده لزجت باعث کاهش محدود ابقاپذیری می شود. در مقابل کاهش حجم خمیر باعث کاهش قابل توجه ابقاپذیری می شود. همچنین افزایش حجم درشت دانه باعث کاهش ابقاپذیری می شود.

۵- مراجع

References

1. Rougeau, P., J. L. Maillard, and Mary-Dippe, C., "Comparative study on properties of self-compacting and high performance concrete used in precast construction," International RILEM symposium on self-compacting concrete, 1999.
2. Boel, Veerle, et al. "Transport properties of self compacting concrete with limestone filler or fly ash," Materials and structures, 2007, Vol. 40.5, pp. 507-516.
3. Sua-iam, G. and Makul N., "Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate," Construction and Building Materials, 2013, Vol. 38, pp. 455-464.
4. Shi, Caijun, "A review on mixture design methods for self-compacting concrete," Construction and Building Materials, 2015, Vol. 84, pp. 387-398.
5. Saak, Aaron W., Hamlin M. Jennings, and Surendra P. Shah. "New methodology for designing self-compacting concrete," ACI Materials Journal, 2001 Vol. 98.6.
6. Chhabra, R. P. and Richardson, J. F., "Non-Newtonian Flow and Applied Rheology," second edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2008.
7. Barnes, H. A., Hutton, J. F. and Walters, K., "An Introduction to Rheology," Elsevier Science Publishers B.V., 1989.
8. Flatt, R. "Towards a prediction of superplasticized concrete rheology," Materials and structures, 2004, Vol. 37(5), pp. 289-300.
9. Koehler, E. and Fowler, D., 2004. Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete—Research report Icar 105-3F. International center for Aggregates Research, Washington.
10. Bonen, David, Yogini Deshpande, Jan Olek, Lin Shen, Leslie Struble, David Lange, and Kamal Khayat, 2007, ". Robustness of SCC." Self-Consolidating Concrete: 4.
11. Self-Compacting Concrete European Project Group, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete," BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC and ERMCO, 2005, p. 63.
12. National building code 9; "Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings" 2013 (In Persian).
13. Gettu, R., Shareef, S. N. and Ernest, K. J. D., "Evaluation of the Robustness of SCC," Indian Concrete Journal, 2009, Vol. 83, pp. 13-19.
14. Khayat, K. H., Hu, C. and Monty, H., "Stability of SCC, Advantages and Potential Applications," RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete, 1999.
15. Roussel, N., "A Theoretical Frame to Study Stability of Fresh Concrete," Materials and Structures, 2006, Vol. 39, pp. 81-91.
16. Yurugi, M., et al. "Mix proportion for highly workable concrete," Proceedings of Concrete, 2000, pp. 579-589.

Study of self-consolidating concrete robustness containing limestone powder based on rheological parameters

Parviz Ghoddousi¹, Amir Masoud Salehi²

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

2. Assistant professor, Kharazmi University, Faculty of Engineering

Abstract:

One of the major obstacles to development of self-consolidating concrete (SCC) on the industrial scale and various applications is the high sensitivity or very low robustness of this concrete to conventional concrete. From this, in the present study, a total of eight SCC mixes have been produced and their rheology parameters were tested. A control mix (C) was the initial target and, seven series of mixes were developed with variations of each of the principal properties (i.e. filling and passing ability and segregation resistance) or using of AEA and VMA admixture. In order to evaluate the robustness of each mixture, in addition to the mixture with amount of water content, four mixtures were made that the water content of each mix was changed $\pm 3\%$ and $\pm 6\%$ relative to the base water content and then the rheological properties of each mixture were determined.

The rheology parameters (yield stress, plastic viscosity) values were determined by a coaxial rheometer. This automated rheometer is a rate-controlled rheometer that was employed to carry out rheological measurements 10 minutes after the initial contact between water and cement. It consists of a four-bladed vane that is immersed into the concrete and rotated at various speeds while the torque acting on the vane is measured.

The objective of using rheology measurements is to provide scientific parameters that are capable of describing multiple aspects of workability. This fact is true especially for self-consolidating concrete that has several properties in fresh state. So, it is required to perform several tests to evaluate these properties that in addition to increase the quality control time, it also raises the costs and reduces the accuracy.

Therefore, it seems logical to determine rheological parameters that are an accurate test with high sensitivity. Instead of measuring multiple properties of fresh state through different workability tests for achieving to a proper robustness index for SCC.

Therefore a good approximation of the fundamental rheological quantities for cement based material can be obtained in terms of yield stress (τ_0) and plastic viscosity (μ). In this study a rheograph is defined as a graph that X axis is yield stress (τ_0) and Y axis is plastic viscosity (μ). This graph that has been named "rheograph" is a convenient and essential tool to compare different concrete batches and examine the behavior relative to changed constituents, quantities of constituents, and/or relative to different times from water addition (and so forth). Thus rheograph is a systematical way to reveal the effects of slight decrease and increase in mixing water.

The results of the study show that a slight increase in the amount of water increases the yield stress of SCC, but decreasing water content in some concrete increases and in some concrete reduces the yield stress. In contrast, in plastic viscosity of SCC, a slight decrease in the amount of water content increases the viscosity and a slight increase in the amount of water reduces the plastic viscosity of SCC.

An appropriate index for estimating the robustness of SCC is the area enclosed between the rheological properties of concrete in changing the water content by $\pm 3\%$ or $\pm 6\%$. According to this index, the addition of air entraining admixture to SCC improves robustness and reduces the amount of paste volume resulting in a severe reduction of robustness.

Keywords: Robustness of Self Consolidating Concrete, Slight Change in Water Content, Rheology Properties, Rheograph