

بررسی اثر تغییر در نسبت‌های ترکیب بر ابقاپذیری بتن‌های خودتراکم

پرویز قدوسی*^۱، امیرمسعود صالحی^۲

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

^۲ استادیار دانشکده مهندسی، گروه عمران- مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه خوارزمی

(دریافت: ۹۶/۵/۲۴، پذیرش: ۹۷/۱۱/۲، نشر آنلاین: ۹۷/۱۱/۲)

چکیده

باوجود توسعه بیش از دو دهه‌ای بتن خودتراکم و مزایای متعدد آن، استفاده از این بتن در مقیاس‌های بزرگ کماکان مواجه با مشکلاتی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین ضعف‌های این بتن، حساسیت بسیار زیاد بتن نسبت به تغییرات جزئی مصالح یا ابقاپذیری^۱ کم این بتن می‌باشد. در این تحقیق با توسعه هشت بتن خودتراکم، اثر تغییر حجم خمیر، حجم درشت‌دانه، تغییر رده اسلامپ و افزودنی‌های هوازا و اصلاح‌کننده لزجت بر روی ابقاپذیری بتن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی ابقاپذیری هر بتن، مقدار آب آن به میزان $\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ وزنی تغییر داده شده و خواص تازه آن‌ها با استفاده از آزمایش‌های جریان اسلامپ، حلقه جی و پایداری الک اندازه‌گیری می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اثر تغییرات جزئی مقدار آب بر روی خواص اصلی بتن خودتراکم بسته به نسبت‌های ترکیب و افزودنی‌های به کار رفته متفاوت می‌باشد. حساس‌ترین بتن‌ها در این تحقیق، بتن‌هایی می‌باشند که حجم خمیر آن‌ها نسبت کم‌تر می‌باشد (با شاخص ابقاپذیری ۴۰ و ۴۹) و تغییرات مقدار آب در این بتن‌ها باعث گردید که مقدار آزمایش پایداری الک آن‌ها بیش از ۴۰٪ افزایش یابد.

کلیدواژه‌ها: بتن خودتراکم، ابقاپذیری، کارایی، تغییرات جزئی مصالح، ضریب تغییرات.

۱- مقدمه

اگرچه بتن خودتراکم برای مدت زمانی حدود دو دهه است که توسعه یافته، اما همچنان استفاده وسیع و گسترده از آن محدود می‌باشد. این موضوع بخشی به علت عدم شناخت کامل خواص این بتن و بخشی به دلیل حساسیت شدید عملکرد آن نسبت به تغییر پارامترهای طراحی یا به عبارتی ابقاپذیری ضعیف^۱ می‌باشد. بدین سبب، مشکلاتی در کنترل کیفیت بتن خودتراکم در ساخت در ابعاد حجیم و وسیع وجود دارد (Kwan و Ng، ۲۰۰۸؛ Sharendahl و Billberg، ۲۰۱۵؛ Shi و Caijun، ۲۰۱۵؛ Khayat، ۱۹۹۹).

ملزومات کارایی برای بتن‌ریزی مناسب بتن خودتراکم شامل؛ قابلیت پرمکندگی بالا که بتن قادر به پرکردن فضاهای محدود و گوشه‌ها با قابلیت دسترسی کم باشد؛ قابلیت عبور بالا که بتن قادر باشد از میان فضاهای کوچک میلگردهای مسلح کننده عبور کند و پایداری جداسدگی بالا که قادر به همگن ماندن بعد از جاری

شدن، ریختن و عبور از میان موانع و ... باشد (EFNARC، ۲۰۰۵؛ Hwang و همکاران ۲۰۰۶).

برای هر یک از مشخصه‌های کارایی (قابلیت پرمکندگی، قابلیت عبور و پایداری جداسدگی) روش‌های آزمایش متعددی وجود دارد. راهنماها و استانداردهای مختلف بر اساس نتایج برخی از این آزمایش‌ها، بتن خودتراکم را از نظر عملکرد تقسیم‌بندی کرده‌اند (ACI 238.1R-08، ۲۰۰۸). به عنوان مثال راهنمای اروپایی بتن خودتراکم آزمایش جریان اسلامپ برای قابلیت پرمکندگی، آزمایش جعبه ال^۲ برای قابلیت عبور و آزمایش پایداری الک به عنوان معیاری از مقاومت جداسدگی را معرفی و بر اساس آن‌ها سطوح عملکرد بتن‌های خودتراکم را دسته‌بندی کرده است (EFNARC، ۲۰۰۵).

علاوه بر این، سطح کارایی بتن خودتراکم باید سازگار با تکنیک‌های بتن‌ریزی نیز باشد. روش‌های مختلف بتن‌ریزی مانند تخلیه از کامیون، پمپ و ... می‌توانند انرژی متفاوتی در طی جریان

1 Roubustness
2. Weak robustness
3. L box

* پرویز قدوسی؛ شماره تماس: ۷۷۲۴۰۳۹۹-۰۲۱

آدرس ایمیل: ghoddousi@iust.ac.ir (پ. قدوسی)، am_salehi@khu.ac.ir (ا. م. صالحی).

(EFNARC، ۲۰۰۵). همچنین پیشنهادها مشابهی برای تغییرات میزان آب به مقدار $\pm 6\%$ از میزان آب هدف برای بررسی حساسیت بتن خودتراکم پیشنهاد گردیده است (مقدار ۵ تا ۱۰ لیتر در هر مترمکعب معادل تغییرات حدودی 6% وزنی کل آب بتن خودتراکم می‌باشد) (Schutter و Khayat، ۲۰۱۴).

در تحقیق حاضر برای بررسی اثر نسبت‌های ترکیب بر ابقاپذیری بتن خودتراکم، هفت طرح مخلوط با تغییر در نسبت‌های ترکیب و استفاده از افزودنی‌ها، براساس یک مخلوط پایه طراحی گردید. هر یک از این مخلوط‌ها در مقادیر مختلف تغییرات جزئی آب ($\pm 3\%$ و $\pm 6\%$ وزنی) ساخته شده و خواص کارایی آن‌ها اندازه می‌گردد. برای رتبه‌بندی بتن‌ها از نظر ابقاپذیری نیز از روش پیشنهادشده بر اساس ضریب تغییرات استفاده شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت بتن خودتراکم از سیمان پرتلند نوع دو و نیز از پودر سنگ‌آهک به عنوان پرکننده استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی این مواد در جدول (۱) آورده شده است. سنگ‌دانه‌های درشت مصرفی از نوع شکسته و از معادن شهریار با حداکثر اندازه $19/5 \text{ mm}$ و همچنین سنگ‌دانه‌های ریز مصرفی با حداکثر اندازه $4/75 \text{ mm}$ نیز از نوع شکسته و از معادن شهریار تأمین شده است. جنس هر دو نوع سنگ‌دانه از سنگ آهک بوده که مشخصات فیزیکی آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است. به منظور رسیدن به کارایی مورد نظر در مخلوط‌ها، از فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلاتی^۶ با وزن مخصوص 1100 kg/m^3 استفاده شده است.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان و پودر سنگ

آهک

مشخصات شیمیایی و فیزیکی	سیمان پرتلند	پودر سنگ آهک
SiO ₂	۲۰/۷۴	۲/۸۰
Al ₂ O ₃	۴/۹۰	۰/۳۵
Fe ₂ O ₃	۳/۵۰	۰/۵۰
MgO	۱/۲۰	۱/۸۰
CaO	۶۲/۹۵	۵۱/۲۲
SO ₃	۳/۰۰	۱/۲۴
K ₂ O	-	-
کسر وزن در اثر سرخ‌شدن	۱/۵۶	۴۲/۰۶
باقی‌مانده نامحلول	۰/۷۴	۲/۸۰
وزن مخصوص (kg/m^3)	۳۱۵۰	۲۶۶۰

اولیه بتن خودتراکم ایجاد کند. در راهنمای PCI^۶ (Team و P.S.C.C.F، ۲۰۰۳) پیشنهادهای برای کارایی بتن خودتراکم با توجه به انرژی جاسازی (روش بتن‌ریزی) و همچنین مشخصات عضو بتن‌ریزی شامل تراکم میلگرد، پیچیدگی شکل عضو، عمق عضو، اهمیت سطح نهایی، طول عضو، ضخامت دیوار و میزان سنگ‌دانه درشت، ارائه شده است.

ابقاپذیری به عنوان توانایی مخلوط بتن خودتراکم در نگهداری خواص، در حالت تازه و سخت شده در یک یا پیمان‌های متوالی، ناشی از تغییرات کوچک در ترکیب یا میزان اجزاء مخلوط تعریف می‌گردد. ابقاپذیری بستگی به ویژگی‌های مختلف شامل؛ ترکیب معین مخلوط، تاریخچه اختلاط مانند انرژی برشی و نرخ برشی و کاربرد مورد نظر و به خصوص بتن دارد. مسئله ابقاپذیری در بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی مهم‌تر بوده و معمولاً بتن خودتراکم حساس‌تر از بتن معمولی است زیرا (Bonon، ۲۰۰۷)؛

۱- ملزومات و ویژگی‌های مورد انتظار از بتن خود تراکم بیشتر از بتن معمولی است.

۲- طرح مخلوط بتن خودتراکم فوق‌العاده پیچیده‌تر از بتن معمولی است.

۳- ویسکوزیته و تنش تسلیم این بتن نسبت به بتن معمولی بسیار پایین‌تر است.

۴- بتن خودتراکم دارای خاصیت تغلیظ‌پذیری^۵ بیشتری نسبت به بتن معمولی است.

بر اساس پیشنهاد راهنمای اروپایی بتن خودتراکم، زمانی یک بتن خودتراکم به‌طور مناسب طراحی شده است که به‌مقدار لازم قابلیت تحمل نوسانات روزانه در اجزاء سازنده خود را داشته و فشار بر بخش کنترل کیفیت و احتمال مشکلات در محل بتن‌ریزی را کاهش دهد. به‌عبارت‌دیگر بتن خودتراکم با هدف دستیابی مشخصات وضعیت تازه متعادل، ساخته می‌شود که هرگونه تغییر در یکنواختی اجزاء سازنده ممکن است باعث خارج شدن از این تعادل شده و منجر به از بین رفتن قابلیت‌های پرکنندگی/ عبور یا جداشدگی گردد.

بر این اساس، از آنجایی که اغلب تغییرات اجزاء از جمله تغییرات در میزان رطوبت مصالح یا تغییرات در دانه‌بندی/ سطح ویژه می‌تواند با تغییرات آب معادل گردد، از این‌روی، این راهنما روش عملی تعیین بتن خودتراکم ابقاپذیر را باقی‌ماندن در طبقه مشخص عملکرد تازه در تغییرات ± 5 تا ± 10 لیتر در هر متر مکعب، پیشنهاد کرده است. به‌عبارت‌دیگر با تغییر میزان آب هدف (طرح مخلوط اصلی) به‌مقدار ± 5 و ± 10 لیتر و اندازه‌گیری خواص بتن تازه، می‌توان از ابقاپذیری/ عدم ابقاپذیری بتن آگاهی یافت

۲-۳- نحوه بررسی وضعیت ابقا پذیری بتن‌ها

برای بررسی وضعیت ابقا پذیری، یکی از اجزاء بتن خودتراکم دستخوش تغییرات جزئی شده و نتیجه این تغییر در خواص (آزمایش‌های) مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این روی با توجه به توصیه راهنماها و تحقیقات مختلف، آب به عنوان جزء بتنی که دستخوش تغییرات می‌گردد، انتخاب گردید. مقدار تغییر آب مخلوط با توجه به بند ۹-۷-۱-۲-پ) مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان (مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۲) 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 آزمایش‌های مختلف در حالت تازه و سخت شده آن، اندازه‌گیری می‌گردد. به عبارت دیگر از هر طرح مخلوط در این دسته، ۵ پیمانانه ساخته شده که یکی از آن‌ها با مقدار دقیق مصالح و ۴ مخلوط دیگر با مقدار آب تغییر یافته، می‌باشند.

۲-۴- نحوه مخلوط کردن و آزمایش‌ها

هر پیمانانه از بتن در حجم ۳۵ لیتر در یک مخلوط‌کن ثقلی با ظرفیت ۶۰ لیتر ساخته شده است. در ساخت کلیه بتن‌ها، رطوبت سنگ‌دانه‌ها مساوی یا بیشتر از حالت اشباع با سطح خشک بوده، تا اثرات جذب آب سنگ‌دانه‌ها بر خواص بتن تازه به حداقل برسد. هر طرح مخلوط، به مدت ۴ دقیقه مخلوط شده و پس از آن به مدت ۲ دقیقه استراحت می‌کند. برای بررسی قابلیت پرکنندگی آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50 و قیف وی، بررسی قابلیت عبور آزمایش حلقه جی (اختلاف ارتفاع و پهن شدگی) بر اساس دستورالعمل PCI Team (P.S.C.C.F. و ۲۰۰۳) و برای بررسی مقاومت جداشدگی، آزمایش‌های قیف وی پس از ۵ دقیقه، پایداری الک^{۱۱} بر اساس راهنمای اروپایی بتن خودتراکم (EFNARC، ۲۰۰۵)، بر روی بتن‌های مختلف انجام شده است.

جهت انجام آزمایش پایداری الک، یک نمونه ۱۰ لیتری از بتن تازه در داخل سطل ریخته شده و به مدت ۱۵ دقیقه به بتن اجازه هرگونه جداشدگی و نشست داخلی داده می‌شود (شکل (۱)). بعد از ۱۵ دقیقه، حدود ۲ لیتر، از بخش بالایی بتن، از ارتفاع حدود ۵۰۰ میلی‌متری، بر روی الک نمره ۴ (۵ میلی‌متر) به قطر ۳۵۰ میلی‌متر که در زیر آن سینی قرار داده شده است، ریخته می‌شود. پس از دو دقیقه اجازه عبور بخش ملات از الک بر روی سینی، جرم بتن ریخته شده بر روی الک، M_a و جرم ملات موجود در سینی M_b اندازه‌گیری شده و در نهایت نسبت جداشدگی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{Segregation Ratio (\%)} = \frac{M_b}{M_a} \times 100 \quad (1)$$

به جز فوق روان‌کننده که در کلیه بتن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، برای تولید یک مخلوط بتن خودتراکم ترکیبی، از یک نوع اصلاح‌کننده لزجت (VMA)^۷ میکروبال پلی‌ساکارید^۸ استفاده شده است. همچنین برای تولید یک بتن هوادار، از یک نوع هواساز جهت تولید حباب‌های هوای عمدی مورد استفاده قرار گرفت. این ماده، مایعی زرد رنگ با PH حدود ۸/۵ است که دارای وزن مخصوص حدود 1010 kg/m^3 می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌های مصرفی

نوع سنگ‌دانه	جرم حجمی دانه‌های اشیاع با	
	سطح خشک	جذب آب
	Kg/m ³	(%)
شن	۲۱۶	۱/۸
ماسه	۲۱۵۷	۳/۹

۲-۲- نسبت‌های مخلوط و نحوه بررسی ابقا پذیری

برای بررسی اثر نسبت‌های ترکیب و افزودنی‌های شیمیایی بر روی خواص بتن خودتراکم، بر اساس یک بتن خودتراکم (بتن کنترل C)، ۷ مخلوط مختلف با تغییر در نسبت‌های ترکیب و نیز استفاده از افزودنی‌های شیمیایی مختلف طراحی گردید.

جهت دستیابی به طرح مخلوط کنترل، از روند پیشنهادی گزارش آیکار^۹ (Fowler and Koehler، ۲۰۰۷) استفاده شد. بر اساس این گزارش، ابتدا بر اساس جریان اسلامپ و نسبت ارتفاع جعبه ال، حجم خمیر و مقدار آب مخلوط تعیین گردیده و در نهایت مقدار سنگ‌دانه مورد نیاز با استفاده از روش حجمی مشخص می‌گردد. طرح مخلوط مطلوب با ساخت مخلوط اولیه و اصلاحات، به مقادیر مطلوب به دست آمده است.

نسبت‌های ترکیب در هر یک از مخلوط‌ها به گونه‌ای تغییر داده شده است تا یکی از خصوصیت اصلی بتن خودتراکم دستخوش تغییر گردد. نسبت‌های ترکیب بتن‌های خودتراکم مختلف در جدول (۳) آورده شده است.

بدین ترتیب مخلوط‌های $F(SP)$ و $F(SP+W)$ ، با هدف افزایش جریان اسلامپ به میزان ۱۰۰ میلی‌متر، مخلوط P با هدف کاهش قابلیت عبور (حلقه جی)^{۱۰} با کاهش نسبت ریزدانه به کل سنگ‌دانه‌ها و بتن‌های $S(L)$ و $S(C+L)$ با هدف کاهش مقاومت جداشدگی از طریق کاهش حجم خمیر توسعه یافته‌اند. بتن A با هدف بررسی اثر هوازا و نیز بتن ترکیبی V با هدف بررسی تغییر در خواص بتن خودتراکم تازه ناشی از تغییر بتن از حالت پودری به ترکیبی طراحی گردیده است.

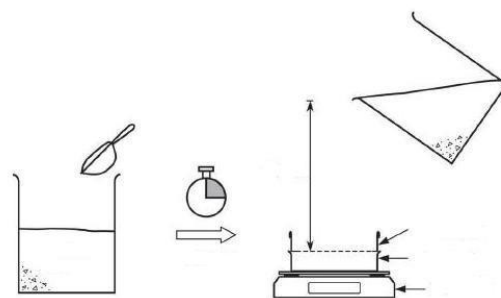
10. J ring
11. Sieve stability (GTM)

7. Viscosity Modifying Admixtures
8. Microbial polysaccharides
9. ICAR

۳-۱- تغییرات کارایی بتن‌ها

۳-۱-۱- جریان اسلامپ

آزمایش جریان اسلامپ به عنوان معیاری از قابلیت پرمکنندگی بتن، یکی از آزمایش‌های اصلی بتن خودتراکم جهت کنترل کیفیت در حالت تازه می‌باشد. شکل (۲)، تغییرات آزمایش جریان اسلامپ نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۲-الف) مشاهده می‌گردد، به‌طور کلی افزایش مقدار آب باعث افزایش جریان اسلامپ و کاهش آن باعث کاهش مقدار آزمایش می‌گردد. بر اساس شکل (۲-ب) که اختلاف بین مقادیر آزمایش در حالت آب دقیق و آب تغییر یافته را نشان می‌دهد، افزایش مقدار آب باعث تغییرات بیشتری نسبت به کاهش مقدار آب شده است. در حالت کاهش ۳٪ تغییرات محدودی در جریان اسلامپ به‌وجود آمده است. اما کاهش ۶٪ مقدار آب باعث کاهش جریان اسلامپ بیش از ۵۰ میلی‌متری در بتن‌های حاوی افزودنی‌های هوازا و اصلاح‌کننده لزجت شده است. در مقابل، کاهش ۶٪ مقدار آب باعث کاهش مقدار قابل توجه جریان اسلامپ نگردیده است.



شکل ۱- آزمایش پایداری الک^{۱۲}

۳- نتایج آزمایشگاهی و شرح آن‌ها

با هدف بررسی اثر نسبت‌های ترکیب و افزودنی‌ها بر ابقاپذیری، بر اساس یک بتن خودتراکم مناسب (C)، هفت طرح مخلوط جدید با تغییر در نسبت‌های ترکیب و استفاده از افزودنی‌ها ساخته شده و خواص اصلی کارایی بتن‌های خودتراکم آن اندازه‌گیری شده است. از هر مخلوط ۵ بار ساخته شده است و تنها تغییر ایجاد شده در این ۵ مخلوط، مقدار آب آن است که یک‌بار با مقدار آب دقیق و با تغییر ۳٪ و ۶٪ ساخته شده است. در ادامه نتایج آزمایش‌های مختلف کارایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۳- طرح مخلوط‌های بتن

SP	F/T	درشت‌دانه	ریزدانه	پودر سنگ‌آهک	سیمان	آب	W/C	کد مخلوط
				kg/m ³				
۰/۹۲	۰/۶	۶۱۱	۹۱۶	۱۷۵	۴۰۰	۲۰۰	۰/۵۰	C
۱/۱۱	۰/۶	۶۱۱	۹۱۶	۱۷۵	۴۰۰	۲۰۰	۰/۵۰	F (SP)
۱/۳۰	۰/۶	۶۱۸	۹۲۷	۱۷۵	۴۰۰	۱۸۵	۰/۴۶	F (SP+W)
۱/۰۴	۰/۵	۷۶۳	۷۶۳	۱۷۵	۴۰۰	۲۰۰	۰/۵۰	P
۰/۷۸	۰/۶	۶۴۰	۹۶۰	۱۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۰/۵۰	S (L)
۱/۰۷	۰/۶	۶۵۸	۹۸۷	۱۶۰	۳۷۵	۱۸۵	۰/۴۹	S (C+L)
۰/۷۴	۰/۶	۶۱۱	۹۱۶	۱۷۵	۴۰۰	۲۰۰	۰/۵۰	A*
۰/۸۸	۰/۶	۶۴۰	۹۶۰	۱۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۰/۵۰	V*

* درصدی از مقدار سیمان

+ حاوی ۲۲ kg/m³ افزودنی هوازا

x حاوی ۰/۳۳ kg/m³ افزودنی اصلاح‌کننده لزجت

۳-۱-۲- مدت زمان پهن‌شدگی (T50)

در شکل (۲)، تغییرات مدت زمان پهن‌شدگی برای بتن‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به نتایج، تغییرات زمان پهن‌شدگی به‌اندازه‌ای کم است که خطای اندازه‌گیری نیز می‌تواند مسبب بعضی از تغییرات باشد.

افزایش جزئی مقدار آب باعث گردیده که در برخی مخلوط‌ها، جریان اسلامپ بیش از ۱۵۰ میلی‌متر افزایش یابد. افزایش ۳٪ آب باعث گردیده که مخلوط‌های P، S (C+L) و S (L)، دچار افزایش جریان اسلامپ بیش از ۱۰۰ میلی‌متر و افزایش ۶٪ باعث افزایش جریان اسلامپ بیش از ۱۵۰ میلی‌متر گردیده است. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش حجم خمیر و افزایش درشت‌دانه باعث ایجاد حساسیت بیشتر آزمایش جریان اسلامپ نسبت به تغییرات مقدار آب می‌گردد.

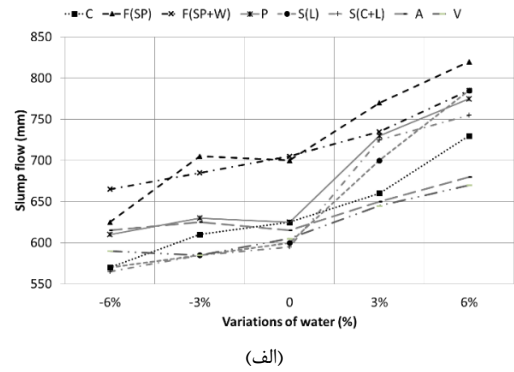
باین وجود با بررسی‌های در اکثر بتن‌ها افزایش مقدار آب مخلوط باعث کاهش مدت زمان پهن‌شدگی می‌گردد. در حالت کاهش آب، در اکثر بتن‌ها زمان پهن‌شدگی افزایش یافته است (شکل ۳-الف)). اختلاف مدت زمان پهن‌شدگی مخلوط‌ها با مخلوط با مقدار دقیق آب (شکل ۳-ب)) نشان می‌دهد که افزایش مقدار آب باعث کاهش زمان گردیده است. این کاهش در بتن‌های مختلف بسیار متغیر است. باین حال بیشترین کاهش در بتن S(C+L) بوده که حدود ۰/۶ ثانیه بوده است.

۳-۱-۳- آزمایش کیف وی

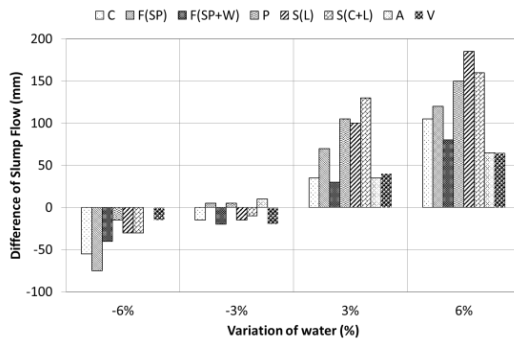
تغییرات آزمایش کیف وی در زمان ساخت در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۴-الف)، تغییرات مقدار آب در بتن‌های مختلف دارای الگوی یکسانی نبوده و در برخی حالات باعث افزایش و یا کاهش زمان کیف وی شده است. بر اساس شکل (۴-ب)، تغییرات زمان وی در برخی بتن‌ها با تغییر مقدار آب به بیشتر از دو ثانیه نیز رسیده است. در بتن P، کاهش مقدار آب باعث افزایش مدت زمان حدود ۲/۵ ثانیه شده است. اما در حالت افزایش مقدار آب، مقدار زمان کیف وی در بتن F(SP+W) نزدیک به سه ثانیه کاهش یافته است. از سوی دیگر در بتن‌های P، S(L) و S(C+L) افزایش مقدار آب باعث افزایش مدت زمان کیف وی شده است.

با توجه به این که مدت زمان کیف وی معیاری از ویسکوزیته بتن خود تراکم است (Banfill, ۲۰۰۳) انتظار می‌رود که افزایش مقدار آب باعث کاهش ویسکوزیته و به عبارتی باعث کاهش مدت زمان عبور از کیف وی و بالعکس می‌گردد. اما این نتیجه در بتن‌های مورد بررسی ایجاد نشده است. به‌عنوان مثال در بتن‌های P، S(L) و S(C+L) افزایش مقدار آب باعث افزایش مدت کیف وی گردیده و به عبارتی باعث افزایش ویسکوزیته بتن شده است. تناقض ایجاد شده ممکن است مربوط به کاهش مقاومت جراثشگی این بتن‌ها می‌باشد که موجب برخورد بیشتر درشت‌دانه‌ها گردیده و باعث کند شدن سرعت خروج بتن می‌گردد (Banfill, ۲۰۰۳).

آزمایش کیف وی پس از پنج دقیقه بتن‌های مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است. بر این اساس در اکثر بتن‌ها تغییرات مقدار آب باعث افزایش زمان خروج بتن از کیف وی پس از پنج دقیقه استراحت گردیده است. در صورت همگنی بتن، افزایش زمان کیف وی به مفهوم افزایش ویسکوزیته می‌شود.

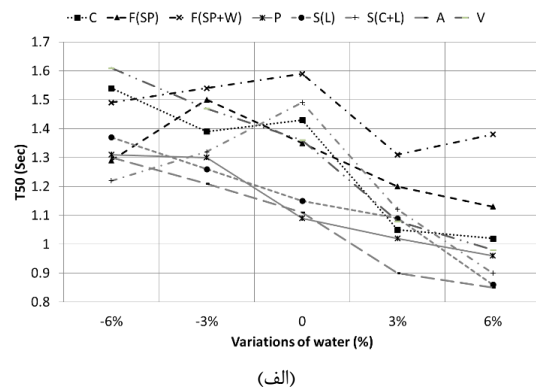


(الف)

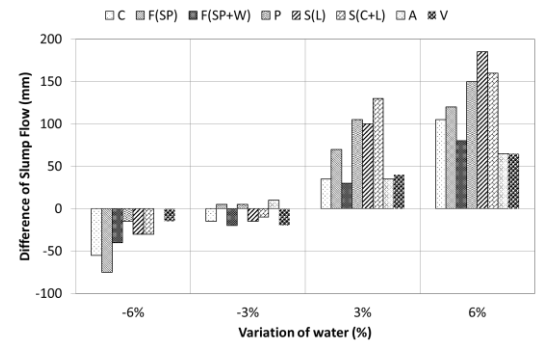


(ب)

شکل ۲- تغییرات آزمایش جریان اسلامپ نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب: (الف) مقادیر اندازه‌گیری شده، (ب) مقدار تغییرات



(الف)



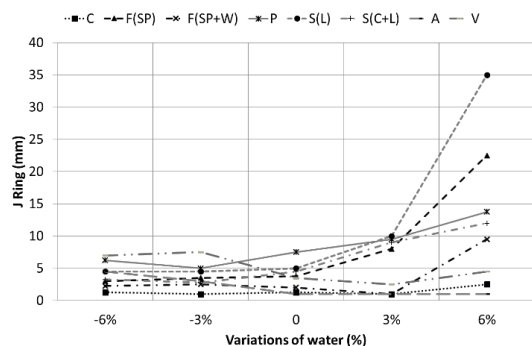
(ب)

شکل ۳- تغییرات آزمایش T50 نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب: (الف) مقادیر اندازه‌گیری شده، (ب) مقدار تغییرات

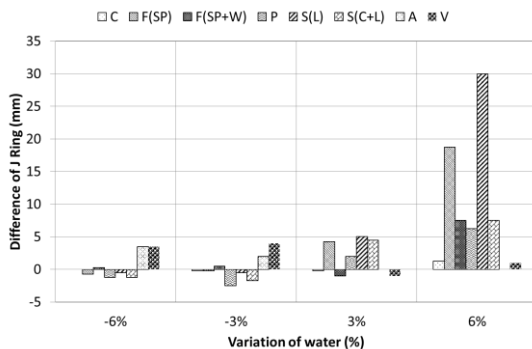
البته افزایش ویسکوزیته در بسیاری از بتن‌ها به مفهوم افزایش چسبندگی نمی‌باشد و بخشی از افزایش ویسکوزیته به علت کاهش مقاومت جداشدگی و افزایش برخورد سنگ‌دانه‌ها می‌باشد (Banfill, ۲۰۰۳). در بتن‌هایی مانند P، S(L) و S(C+L) افزایش زمان قیف وی، در حالت افزایش و کاهش مقدار آب به علت کاهش مقاومت جداشدگی و برخورد سنگ‌دانه‌ها می‌گردد.

۳-۱-۴- آزمایش حلقه جی

نتایج اختلاف ارتفاع حلقه جی در شکل (۶) نشان داده شده است؛ بر این اساس، بتن‌های مختلف دارای روند نسبتاً مشخصی می‌باشند به صورتی که با کاهش مقدار آب، تغییرات بسیار کمی در مقدار آزمایش حلقه جی ایجاد می‌گردد. اما افزایش جزئی آب مخلوط باعث افزایش اختلاف ارتفاع شده و با بیشتر شدن مقدار آب، اختلاف ارتفاع بیشتر می‌شود. بتن‌های S(C+L)، F(SP)، و P در تغییرات ۶٪ آب، با عبور از مقدار حلقه جی ۱۰ میلی‌متری، در واقع مشخصات بتن خودتراکم را کسب نموده‌اند. بر اساس نتایج شکل (۶-ب)، بیشترین تغییرات آزمایش جی مربوط به افزایش ۶٪ آب در بتن‌های مختلف می‌باشد. در این میان دو بتن F(SP) و S(L) از دارای بیشترین تغییرات بوده و به ترتیب ۱۸ و ۳۰ میلی‌متر افزایش اختلاف حلقه جی را متحمل شده‌اند.

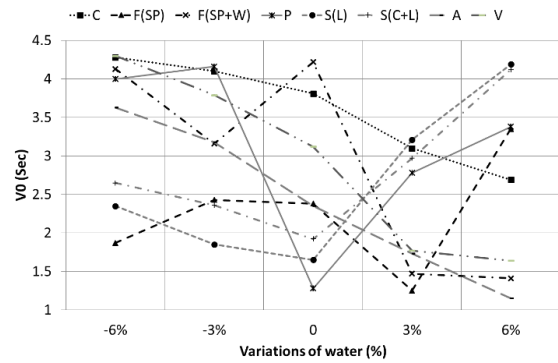


(الف)

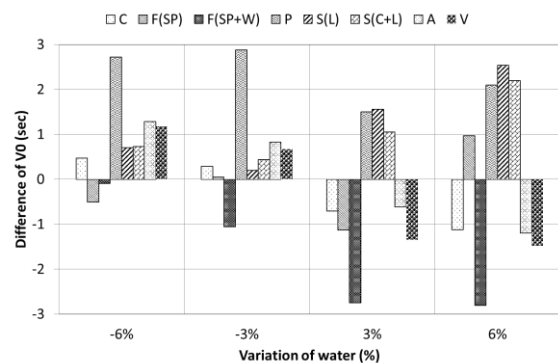


(ب)

شکل ۶- تغییرات آزمایش حلقه جی - اختلاف ارتفاع نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب: الف) مقادیر اندازه‌گیری شده، ب) مقدار تغییرات

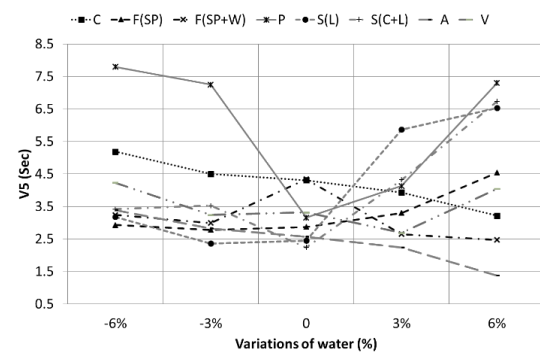


(الف)

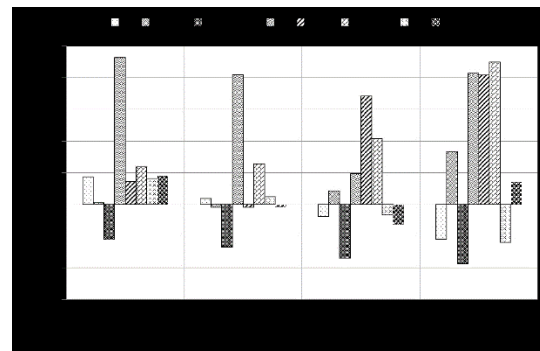


(ب)

شکل ۴- تغییرات آزمایش V_0 نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب: الف) مقادیر اندازه‌گیری شده، ب) مقدار تغییرات



(الف)



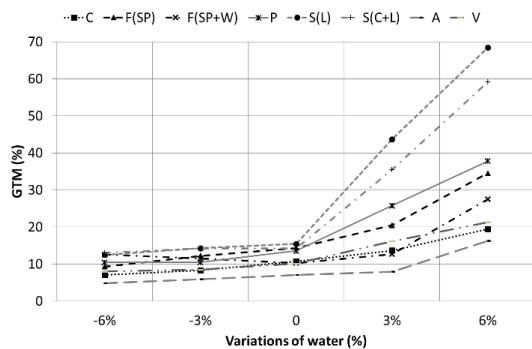
(ب)

شکل ۵- تغییرات آزمایش V_5 نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب: الف) مقادیر اندازه‌گیری شده، ب) مقدار تغییرات

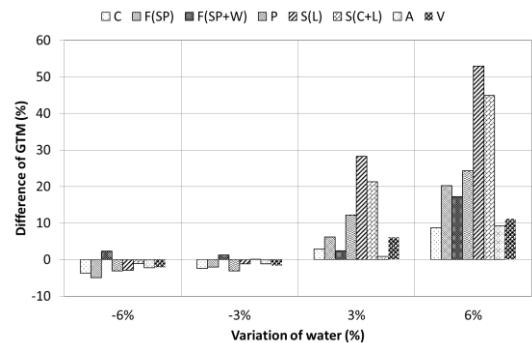
خمیر آن‌ها کاهش یافته است. در این بتن‌ها ($S(C+L)$ و $S(L)$) تغییر ۶٪ در میزان آب باعث افزایش بیش از ۴۰ درصدی آزمایش پایداری الک گردیده و موجب کاهش شدید مقاومت جداشدگی این بتن‌ها شده است.

۳-۲- رتبه‌بندی بتن‌ها از نظر ابقاپذیری

از آنجایی که تغییرات هر یک از آزمایش‌های بتن خودتراکم نسبت به تغییرات جزئی آب مخلوط متفاوت و نامنظم بوده و تعداد آزمایش‌های لازم برای نشان دادن خواص اصلی بتن خودتراکم متعدد و زیاد می‌باشد؛ بنابراین بررسی تغییرات تک‌تک آزمایش‌ها، برای مقایسه ابقاپذیری بتن‌های خودتراکم مفید نمی‌باشد. از این‌رو برای تخمین و مقایسه ابقاپذیری بتن‌های خودتراکم نیازمند روش‌هایی می‌باشیم که تغییرات آزمایش‌های متعدد را به‌طور هم‌زمان در نظر بگیرد. از این‌رو برای رتبه‌بندی کمی بتن‌ها از نظر ابقاپذیری، از روش ضریب تغییرات به پیشنهاد Naji و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است.



(الف)

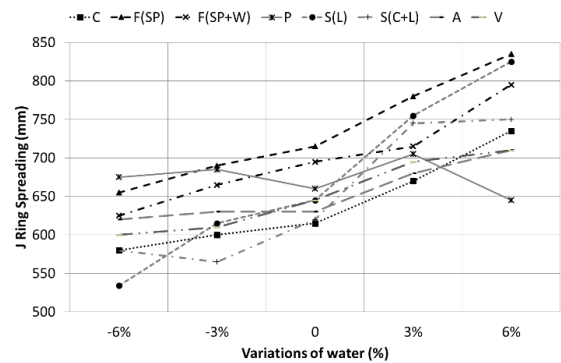


(ب)

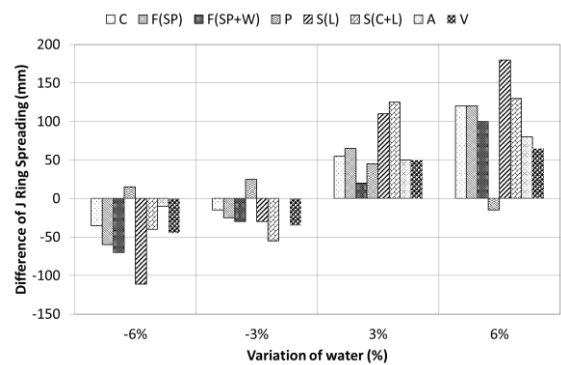
شکل ۸- تغییرات آزمایش پایداری الک نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب: الف) مقادیر اندازه‌گیری شده، ب) مقدار تغییرات

ضریب تغییرات (COV)^{۱۳}، میزان پراکندگی به ازای یک واحد از میانگین را بیان می‌کند. این مقدار بی‌بعد است به همین دلیل

در شکل (۷)، میزان پهن‌شدگی در آزمایش حلقه جی نشان‌داده شده است. تغییرات این آزمایش نشان می‌دهد که در بیشتر بتن‌ها افزایش مقدار آب باعث افزایش مقدار پهن‌شدگی می‌گردد (شکل (۷-الف)). بر اساس شکل (۷-ب)، بیشترین تغییرات مربوط به بتن‌هایی که حجم خمیر آن‌ها کاهش یافته است. در بتن‌های $S(C+L)$ و $S(L)$ ، افزایش مقدار آب باعث افزایش بیش از ۱۰۰ میلی‌متری اختلاف میزان پهن‌شدگی شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۷- تغییرات آزمایش حلقه جی- پهن‌شدگی نسبت به تغییرات جزئی مقدار آب: الف) مقادیر اندازه‌گیری شده، ب) مقدار تغییرات

۳-۱-۵- آزمایش جداشدگی الک

تغییرات مقاومت جداشدگی بتن خودتراکم از بر اساس آزمایش پایداری الک (GTM) در شکل (۸) نشان داده شده است. در شکل (۸-الف) ملاحظه می‌گردد که افزایش مقدار آب مخلوط، به‌طور کلی باعث افزایش مقدار جداشدگی بتن شده است. افزایش مقدار آب به میزان ۶٪ باعث گردیده که مقدار پایداری الک کلیه بتن‌ها به‌جز بتن کنترل (C) و حاوی هوازا (A) به بالای درصد ۲۰ درصد رسیده و درواقع با افزایش ۶٪ آب دیگر این بتن‌ها شرایط بتن خودتراکم بودن را تأمین نمی‌کنند. بر اساس شکل (۸-ب) بیشترین افزایش در مقدار پایداری الک در بتن‌هایی است که حجم

شده است. بر اساس این مقدار، رتبه‌بندی بتن‌ها در هر آزمایش انجام می‌شود. واضح است که ضریب تغییرات کم‌تر به معنی پراکندگی کم‌تر نتایج آزمایش و در نتیجه ابقاپذیرتر بودن بتن در آن آزمایش می‌باشد.

مناسب برای مقایسه داده‌های آماری است که واحدهای مختلفی دارند. از همین روی و بر اساس پیشنهاد Nazi و همکاران ۲۰۱۱ برای بررسی وضعیت ابقاپذیری بتن‌های خودتراکم مختلف نسبت به هم، مقادیر ضریب تغییرات در هر آزمایش و در هر بتن، پس از تعیین میانگین و انحراف استاندارد، تعیین و در جدول (۴) آورده

جدول ۴- نتایج پارامترهای آماری آزمایش‌های کارایی و رتبه‌بندی بتن‌ها در هر آزمایش

آزمایش	شاخص	کد مخلوط							
		V	A	S (C+L)	S (L)	P	F (SP+W)	F (SP)	C
جریان اسلامپ	میانگین	۶۱۹	۶۳۷	۶۴۵	۶۴۸	۶۷۴	۷۱۵	۷۲۴	۶۳۹
	انحراف استاندارد	۳۶/۹۸	۲۷/۹۷	۸۸/۰۳	۹۱/۹۶	۷۳/۷۷	۴۶/۹۰	۷۴/۲۸	۶۰/۲۵
	ضریب تغییرات	۵/۹۷	۴/۲۹	۱۳/۶۵	۱۴/۱۹	۱۰/۹۵	۶/۵۶	۱۰/۲۶	۹/۴۳
	رتبه	۲	۱	۷	۸	۶	۳	۵	۴
T ₅₀	میانگین	۱/۳۰	۱/۰۷	۱/۲۱	۱/۱۵	۱/۱۴	۱/۴۶	۱/۲۹	۱/۲۹
	انحراف استاندارد	۰/۲۶	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۲۴
	ضریب تغییرات	۲۰/۳۳	۱۸/۱۱	۱۸/۲۴	۱۶/۷۹	۱۴/۱۷	۷/۸۸	۱۱/۰۲	۱۸/۳۴
	رتبه	۸	۵	۶	۴	۳	۱	۲	۷
V ₀	میانگین	۲/۹۲	۲/۴۱	۲/۸۰	۲/۶۵	۳/۱۲	۲/۸۸	۲/۲۶	۳/۶۰
	انحراف استاندارد	۱/۱۹	۱/۰۲	۰/۸۳	۱/۰۵	۱/۱۶	۱/۳۸	۰/۷۸	۰/۶۸
	ضریب تغییرات	۴۰/۶۹	۴۲/۲۲	۲۹/۶۳	۳۹/۶۵	۳۷/۳۳	۴۷/۸۵	۳۴/۳۶	۱۸/۸۳
	رتبه	۶	۷	۲	۵	۴	۸	۳	۱
V ₅	میانگین	۳/۵۰	۲/۴۸	۴/۰۵	۴/۰۸	۵/۹۳	۳/۱۴	۳/۲۸	۴/۲۶
	انحراف استاندارد	۰/۶۳	۰/۷۴	۱/۶۷	۱/۹۸	۲/۱۲	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۳
	ضریب تغییرات	۱۷/۹۴	۳۰/۰۴	۴۱/۳۳	۴۸/۴۸	۳۵/۸۱	۲۳/۴۳	۲۲/۲۱	۱۷/۱۷
	رتبه	۲	۵	۷	۸	۶	۴	۳	۱
J ring _a	میانگین	۵	۲/۱۰	۶/۳۰	۱۱/۸۰	۸/۴۰	۳/۴۵	۸/۱۵	۱/۴۰
	انحراف استاندارد	۲/۱۸	۱/۶۰	۴/۰۳	۱۳/۱۷	۳/۴۲	۳/۴۳	۸/۲۷	۰/۶۳
	ضریب تغییرات	۴۳/۵۹	۷۶/۰۴	۶۳/۹۵	۱۱۱/۶۵	۴۰/۷۳	۹۹/۴۱	۱۰۱/۴۵	۴۴/۸۲
	رتبه	۲	۵	۴	۸	۱	۶	۷	۳
J rings	میانگین	۶۵۲	۶۵۴	۶۵۲	۶۷۴/۸	۶۷۴	۶۹۹	۷۳۵	۶۴۰
	انحراف استاندارد	۴۹/۳۲	۳۹/۱۲	۸۹/۴۸	۱۱۵/۴۱	۲۳/۰۲	۶۳/۴۸	۷۲/۲	۶۲/۷۵
	ضریب تغییرات	۷/۵۶	۵/۹۸	۱۳/۷۲	۱۷/۱	۳/۴۲	۹/۰۸	۹/۸۲	۹/۸۰
	رتبه	۳	۲	۷	۸	۱	۴	۶	۵
پایداری الک	میانگین	۱۲/۸۳	۸/۴۲	۲۷/۲۷	۳۰/۸۸	۱۹/۶۴	۱۴/۹۲	۲۰/۱۹	۱۱/۸۷
	انحراف استاندارد	۵/۷۵	۴/۵۵	۲۰/۱۶	۲۴/۶۲	۱۱/۹۶	۷/۱۲	۱۴/۲۲	۴/۹۵
	ضریب تغییرات	۴۴/۸۵	۵۴/۰۶	۷۳/۹۱	۷۹/۷۵	۶۰/۹۱	۴۷/۷۲	۷۰/۴۲	۴۱/۷۰
	رتبه	۲	۴	۷	۸	۵	۳	۶	۱

جدول ۵- رتبه‌بندی بتن خودتراکم بر اساس ابقاپذیری با استفاده از روش ضریب تغییرات

رتبه ابقاپذیری	مجموع	رتبه ابقاپذیری در هر یک از آزمایش‌های تازه							کد مخلوط
		GTM	J rings	J ring _a	V ₅	V ₀	T ₅₀	SF	
۱	۲۲	۱	۵	۳	۱	۱	۷	۴	C
۲	۲۵	۲	۳	۲	۲	۶	۸	۲	V
۳	۲۶	۵	۱	۱	۶	۴	۳	۶	P
۴	۲۹	۴	۲	۵	۵	۷	۵	۱	A
۵	۲۹	۳	۴	۶	۴	۸	۱	۳	F (SP+W)
۶	۳۲	۶	۶	۷	۳	۳	۲	۵	F (SP)
۶	۴۰	۷	۷	۴	۷	۲	۶	۷	S (C+L)
۷	۴۹	۸	۸	۸	۸	۵	۴	۸	S (L)

در جدول (۵) نتایج رتبه‌بندی بتن‌های مختلف بر اساس هر آزمایش و مجموع این رتبه‌بندی‌های جزء نشان داده شده است. بر اساس این روش، مجموع نتایج به‌دست‌آمده معیار تعیین ابقاپذیری بتن‌ها می‌باشد. همان‌طور که از نتایج رتبه‌بندی ابقاپذیری بتن‌ها ملاحظه می‌شود، مخلوط کنترل (C) ابقاپذیرترین بتن می‌باشد. از سوی دیگر بتن‌های $S(L)$ و $S(C+L)$ دارای کم‌ترین میزان ابقاپذیری می‌باشند. به‌عبارت‌دیگر کاهش حجم خمیر بتن خودتراکم که باعث افزایش جداسدگی این بتن می‌گردد، باعث کاهش قابل‌توجه ابقاپذیری می‌گردد. نکته قابل‌توجه در این رتبه‌بندی آن است که مخلوط A در رتبه چهار قرار گرفته است. این بدان معنی است که براساس این روش رتبه‌بندی، افزودن هوازا به بتن باعث افزایش حساسیت بتن خودتراکم می‌گردد.

۵- مراجع

- مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان، "طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه"، دفتر تدوین مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۲.
- ACI 238.1R-08, "Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete", 2008.
- Banfill PFG, "The Rheology of Fresh Cement and Concrete- A Review", Proceeding 11th International Cement Congress, Durban, 2003.
- Bonen D, Deshapande Y, Olek J, Shen L, Struble D, Lange D, Khayat K, "Robustness of SCC", The Center for Advanced Cement Based Materials, 2007.
- EFNARC Self Compacting Concrete European Project Group, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete", BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC and ERMCO, 2005.
- Hwang SD, Khayat KH, Bonneau O, "Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications", ACI Materials Journal, 2006, 103, 121-129.
- Khayat K, "Workability, Testing and Performance of Self-Consolidating Concrete", ACI Materials Journal, 1999, 96, 346-353.
- Khayat K, De Schutter G, "Mechanical Properties of Self Compacting Concrete", Technical Committee 228-MPS, 2014.
- Koehler EP, Fowler DW, "ICAR mixture proportioning procedure for self- consolidating concrete", 2007.
- Kwan AKH, Ng IYT, "Performance Criteria for Self-Consolidating Concrete", HKIE Transactions, 2008, 15 (2), 35-41.
- Naji S, Hwang SD, Khayat KH, "Robustness of Self-Consolidating Concrete Incorporating Different Viscosity-Enhancing Admixture", ACI Materials Journal, 2011, 108, 423-438.
- Sharendahl A, Billberg P, "Casting of Self Compacting Concrete", Final Report of RILEM Technical Committee 188-CSC, 2006.
- Shi and Caijun, "A review on mixture design methods for self- compacting concrete", Construction and Building Materials, 2015, 84, 387-398.
- Team PSCCF, "Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in PCI Member Plants", PCI Journal, 2003, 48 (3), 14-18.

۴- نتیجه‌گیری

(۱) اثر تغییرات جزئی مقدار آب بر روی خواص اصلی بتن خودتراکم بسته به نسبت‌های ترکیب و افزودنی‌های به‌کار رفته متفاوت می‌باشد. در برخی از آزمایش‌ها این اثر قابل‌توجه و در برخی اثر کم‌تری دارد.

(۲) نتایج تغییرات جزئی مقدار آب بر روی آزمایش جریان اسلامپ نشان می‌دهد که کاهش حجم خمیر بتن (مخلوط‌های $S(L)$ و $S(C+L)$) و نیز افزایش نسبت درشت‌دانه به کل سنگ‌دانه‌ها (مخلوط P)، باعث افزایش تغییرات آزمایش جریان اسلامپ نسبت به تغییرات جزئی آب می‌گردد. از سوی دیگر، کاربرد هوازا (مخلوط A) و نیز تبدیل بتن خودتراکم از نوع پودری به ترکیبی (مخلوط V)، باعث کاهش تغییرات جریان اسلامپ ناشی از تغییرات جزئی مقدار آب می‌گردد.

(۳) تغییرات آزمایش حلقه جی (اختلاف ارتفاع) تحت تأثیر تغییرات جزئی مقدار آب تا حدودی متأثر از نسبت‌های ترکیب و نیز افزودنی‌های موجود در بتن می‌باشد که البته این تأثیر کم‌تر از آزمایش جریان اسلامپ است. در این آزمایش، بیشترین اثر ناشی از کاهش حجم خمیر بتن (مخلوط $S(L)$) و نیز افزایش جریان اسلامپ با استفاده از فوق روان‌کننده می‌باشد (مخلوط F(SP)).

(۴) تغییر خاصیت جداسدگی بتن‌های خودتراکم بر اساس آزمایش پایداری الک ناشی از تغییرات جزئی مقدار آب، به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر نسبت‌های ترکیب و نیز افزودنی‌های موجود در بتن می‌باشد. با کاهش حجم خمیر، بیشترین میزان حساسیت در خاصیت جداسدگی بتن ایجاد شده است. همچنین افزایش درشت‌دانه مخلوط و نیز افزایش قابلیت پرکنندگی بتن باعث افزایش تغییرات آزمایش پایداری الک می‌گردد.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Change in Composition Ratios on the Robustness of Self-Consolidating Concrete

Parviz Ghoddousi^{1,*}, Amir Masoud Salehi²

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

² Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

Received: 16 August 2017; Accepted: 23 January 2019

Keywords:

Self-consolidating concrete, Robustness, Workability, Slight change in material content, Coefficient of variation.

1. Introduction

The mix design of SCC may be achieved the better requirements of workability by using a targeted variation in mix proportion (Shi and Caijun, 2015). However, these changes lead to problems such as a change in the robustness of SCC (Kwan and Ng, 2008). In other words, in order to complete the optimization of SCC mix proportion, the robustness of SCC must be considered in addition to the workability restrictions. Hence, the main objective of this study is the evaluation of the SCCs robustness self-consolidating concretes.

2. Methodology

2.1. Experimental study

The evaluation and comparison of the robustness of eight selected SCCs is the aim of this research. A control mix considered to be a "good" SCC was the initial target and, seven series of mixes with variations of each of the principal properties, i.e., filling ability, passing ability, and segregation resistance, based on the following principles, were developed. In order to increase the filling ability of the control mix ((SP) and F (W+SP)), while the ratio of cement to powder was decreased and the SP dosage was increased, the aggregate ratio has been remained constant. In order to decrease the passing ability (P), while the composition of mortar was kept invariable, the volume of coarse aggregate was increased, and a slight decrease in SP dosage was subjected. To design modified segregation concrete base on the control mix proportion, the volume of paste was decreased, and the amount of water and SP dosage was increased moderately (S(C+L), S (L)).

In order to evaluate the robustness of each mixture, in addition to the reference mixture, four batches were made that the water content of each batch is changed ± 3 and $\pm 6\%$ relative to the base water content. Then workability of each batch was measured based on different fresh SCC tests.

3. Results and discussion

3.1. Effect of slight change in water in fresh tests

In results of a slight change of water content in the slump flow test indicate that an increase in water content leads to an increase in the slump flow test. This increase is variable in different SCCs, and the SCC with lower paste volume has been had the maximum changes. The results of the J ring test show that a 6% increase in water content (based on the exact water of mixture) of concrete with lower paste volume and also concrete

* Corresponding Author

E-mail addresses: ghoddousi@iust.ac.ir (Parviz Ghoddousi), am_salehi@khu.ac.ir (Amir Masoud Salehi).

with higher coarse aggregate cause to increase in J ring test higher than 10 mm therefore, these SCCs couldn't tolerate 6% increase in water content.

The maximum influence of water change has created in segregation resistance of SCCs. 6% increase in water content caused to pass of sieve stability test of six SCCs from 20%. Therefore these concrete couldn't tolerate a 6% increase in water content (Fig. 1).

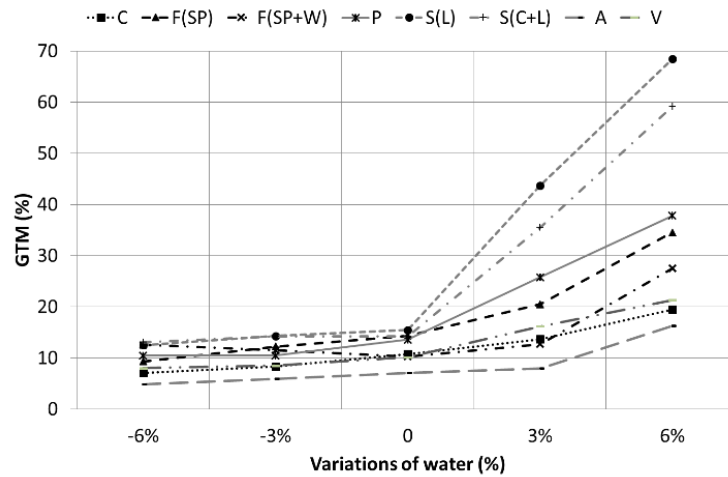


Fig. 1. Variation of Sieve stability test due to a slight change of water content

3.2. Robustness Ranking

Since, several tests are required to show the fresh properties of SCCs and variations in any of these tests are not systematic, the comparison of individual tests is not useful for comparing the robustness of SCCs. To achieve this purpose, it is required to methods that are considered changes in all tests simultaneously. Hence, in order to compare the robustness of SCCs, the coefficient of variation method is used (Table 1).

Table 1. Robustness ranking of SCCs based on the coefficient of variation method

Concrete	Sub-ranking of fresh concrete tests							SUM	Robustness Ranking
	SF	T ₅₀	V ₀	V ₅	J ring _A	J ring _S	GTM		
C	4	7	1	1	3	5	1	22	1
V	2	8	6	2	2	3	2	25	2
P	6	3	4	6	1	1	5	26	3
A	1	5	7	5	5	2	4	29	4
F(SP+W)	3	1	8	4	6	4	3	29	5
F(SP)	5	2	3	3	7	6	6	32	6
S(C+L)	7	6	2	7	4	7	7	40	6
S(L)	8	4	5	8	8	8	8	49	7

4. Conclusions

Since, several tests are required to show the fresh properties of SCCs and variations in any of these tests are not systematic, the comparison of changes of individual tests is not useful for comparing the robustness of SCCs. To achieve this purpose, it is required to employ analysis methods that consider changes in all tests simultaneously. Therefore, in this research, based on the proposed method by Naji et al. the coefficient of variation was used. The results of this method indicate that decrease in paste volume of SCC cause the most decrease in robustness.

5. References

Shi and Caijun, "A review on mixture design methods for self-compacting concrete", Construction and Building Materials, 2015, 84, 387-398.
 Kwan AKH, Ng IYT, "Performance Criteria for Self-Consolidating Concrete", HKIE Transactions, Taylor and Francis, 2008, 15 (2), 35-41.