تحقیقات بتن
سال ششم، شمارهٔ اوّل
بهارو تابستان ۹۲
ص ۷۱ - ۵۳
تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۳۰
تاریخ پذیرش: ۹۳/۳/۱۶

بررسی تأثیر استفاده ترکیبی از دودهٔ سیلیس و زئولیت بر خواص بتن تازه و سخت‌شده خودتراکم

ملک‌محمد رنجبر*
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی دانشگاه گیلان
رحمت مدندوست
دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی دانشگاه گیلان
سید یاسین موسوی
دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشکدهٔ فنی دانشگاه گیلان

چکیده

استفاده از انواع پُرکننده به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در بتن خودتراکم می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها، کمتر شدن آلودگی زیست‌محیطی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهرمندی از محصولات جانبی کارخانجات تولیدی شود. با این‌حال، هرچند وجود پُرکننده‌ها باعث بهبود خاصیتی از بتن خودتراکم می‌شود ولی ممکن است باعث تنزل خاصیت دیگری شود. یکی از راه‌هایی که اخیراً توسط محققان برای کاهش اثرات منفی پُرکننده‌ها در بتن خودتراکم مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از آنها به‌صورت ترکیبی می‌باشد. هدف اصلی این مطالعه آن است که خواص بتن تازه و سخت شدهٔ خودتراکم حاوی ترکیب دوگانه و سه‌گانه سیمان، دودهٔ سیلیس و زئولیت را مورد ارزیابی قرار دهد. خواص بتن تازه شامل جریان اسلامپ، زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتی‌متر (T_{50})، قیف V شکل، جعبهٔ L شکل، شاخص پایداری چشمی و الک پایداری می‌باشد. خواص بتن سخت شده نیز برای مقاومت فشاری (در سنین مختلف شامل ۳، ۷، ۱٤، ۲۸ و ۹۰ روزگی)، مقاومت کششی و جذب آب (اولیه و نهایی) آزمایش شده است. همچنین برای مدلسازی رفتار واقعی بتن در کارهای اجرائی، جریان اسلامپ و مقاومت فشاری با گذشت زمان انتقال تخمین زده شده است.

نتایج بتن تازه نشان می‌دهد که با نسبت ترکیب مناسب دودهٔ سیلیس و زئولیت در بتن خودتراکم، پایداری و خاصیت رئولوژیکی مطلوب به‌دست خواهد آمد. همچنین افزودن دودهٔ سیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری اولیه و نهایی بتن خودتراکم حاوی زئولیت می‌گردد. از طرفی کاهش ابقاء جریان اسلامپ در نمونه‌های حاوی زئولیت با افزودن دودهٔ سیلیس تا حدودی جبران می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، کارائی، مقاومت، زمان انتقال.

* نویسنده مسؤول: mmranjbar@ymail.com

۱- مقدمه

برای مقابله با مشکلات ناشی از تراکم نامناسب بتن، بتن خودتراکم برای اولین بار در ژاپن تولید شد. بتن خودتراکم قادر است بدون احتیاج به لرزاندن خارجی، در مکان‌هایی با حجم بالای آرماتور بدون جداشدگی و آب‌انداختگی جریان پیدا نموده، قالب را پر نماید و فضای اطراف آرماتورها را در برگیرد. علاوه بر استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، می‌توان با افزایش میزان پودر و همچنین کاهش حجم درشت‌دانه بتن خودتراکم با پایداری و قابلیت تراکم مطلوب تولید نمود [۱]. بر طبق آیین‌نامهٔ EFNARC [۲]، عبارت پودر به عناصری از بتن خودتراکم که قطر آنها کوچکتر از ۱۲۵ µm می‌باشند شامل کسری از ماسه، سیمان و پرکننده، اطلاق می‌شود. در مطالعات جهت افزایش میزان پودر معمولاً افزایش میزان سیمان توصیه نمی‌گردد. زیرا که استفاده از میزان بالای سیمان می‌تواند سبب تنزل خواص مهندسی بتن گردد. از طرفی در حدود ۷ درصد از کل انتشار گاز CO_{2eq} (از عوامل گرم شدن کره زمین و تغییر در شرایط آب و هوایی) بر اثر تولید کلینکر در کارخانجات سیمان می‌باشد که نشان‌دهندهٔ این واقعیت است که استفاده از میزان بالای سیمان سبب افزایش آلودگی زیست‌محیطی می‌گردد [۳]. با توجه به نکات ذکر شده که نشان دهنده ضرورت استفاده بهینه از سیمان در ساخت بتن است، معمولاً افزایش میزان پودر در ساخت بتن خودتراکم شامل افزایش میزان پرکننده می‌گردد. لذا مطالعات فراوانی برای استفاده از پرکننده‌های مختلف مانند پودر سنگ آهک، خاکستر بادی، روباره و دوده سیلیس در بتن خودتراکم صورت پذیرفته است.

مطالعات گذشته نشان می‌دهند که استفاده از بیشتر پرکننده‌های موجود می‌تواند سبب کاهش مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن شود. به عنوان مثال، Sahmaran و همکاران [۴] با بررسی خواص بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی نشان دادند که بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی مقاومت کمتری در مقایسه با بتن خودتراکم شاهد کسب می‌نماید. بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی پرکننده‌های مختلف توسط Guneyisi و همکاران [۵] نشان می‌دهند که جایگزینی سربارهٔ کورهٔ آهنگدازی در نسبت‌های مختلف تا ۶۰ درصد می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ بتن شود. نتایج Uysal و Yilmaz [۶] نشان می‌دهند که استفاده از پودر سنگ آهک می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خودتراکم شود. تأثیر استفاده از پرکننده‌های متفاوت شامل خاکستر بادی، پودر آجر، پودر سنگ آهک و کائولینیت و همچنین افزودنی‌های شیمیایی بر روی خواص ملات خودتراکم توسط Sahmaran و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. نتایج نشان می‌دهند بسته به نوع افزودنی شیمیایی مصرفی در بیشتر اختلاط‌ها، مقاومت فشاری ملات خودتراکم کاهش می‌یابد. بررسی مقاومت فشاری ملات حاوی پودر مرمر توسط Guneyisi و همکاران [۸] نشان می‌دهد که در تمامی اختلاط ها جایگزینی پودر مرمر باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات می‌شود.

کاهش مقاومت فشاری اولیه بتن می‌تواند در پروژه‌های اجرایی باعث ایجاد مشکلاتی شود. به عنوان مثال کاهش مقاومت اولیه برای پروژه‌هایی که در آنها نیاز به کاهش زمان اجرا می‌باشد غیر قابل قبول است. لذا می‌بایست برای جبران کاهش مقاومت اولیه تمهیدات خاصی اندیشید. بر این مبنا، در این مطالعه استفاده ترکیبی از دودهٔ سیلیس و زئولیت در ساختار بتن خودتراکم بررسی می‌گردد. بویژه آنکه با توجه به قیمت پایین زئولیت در مقایسه با اکثر پرکننده‌های موجود، استفاده ترکیبی از دوده سیلیس و زئولیت می‌تواند از نقطه نظر اقتصادی مفید واقع شود. از طرفی فواید زیست‌محیطی استفاده از زئولیت نیز قابل انکار نمی‌باشد. اخیراً در مطالعه‌ای، Valipour و همکاران [۹] نشان دادند که با جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی زئولیت با سیمان در بتن معمولی کاهشی به ترتیب به میزان ۶۰/۳، ۶۹/۷ و ۶۴/۳ درصد در پتانسیل گرم شدن کره زمین[1] ایجاد می‌شود.

پودر زئولیت به عنوان یک مادهٔ معدنی، توسط محققان به عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان در بتن معمولی مورد توجه قرار گرفته است. پودر زئولیت حاوی مقادیر زیادی از SiO_2 و Al_2O_3 می‌باشد که می‌تواند با $Ca(OH)_2$ وارد واکنش شده و سبب بهبود خواص بتن سخت شده شود. نتایج مطالعهٔ انجام پذیرفته توسط Ahmadi و Shekarchi [۱۰] نشان می‌دهند که استفاده از زئولیت در بتن معمولی توانسته است باعث افزایش مقاومت فشاری بتن در تمامی سنین شود. در مطالعه‌ای دیگر

[1] Global warming potential reduction

Chan و Ji [۱۱] نشان دادند که افزودن زئولیت در درصد بهینه به بتن معمولی باعث افزایش ۱۴ درصدی در مقاومت فشاری ۲۸ روزگی بتن شده است. هرچند نتایج متناقضی نیز در این ارتباط گزارش شده است. بررسی رفتار بتن حاوی زئولیت محدود به بررسی خواص مکانیکی بتن نمی‌شود و مشخصه‌های دوام بتن معمولی حاوی زئولیت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. توسط Ahmadi و Shekarchi [۱۰] اشاره شده است که وجود زئولیت باعث کاهش میزان جذب آب بتن می‌گردد. در همین راستا، نتایج مطالعهٔ Najimi و همکاران [۱۲] نشان می‌دهند که استفاده از پودر زئولیت آثار مثبتی بر نفوذ آب، نفوذ یون کلر، سرعت‌خوردگی و انقباض بتن دارد. هرچند رفتار مطلوبی از بتن معمولی حاوی زئولیت در محیط‌های اسیدی مشاهده نمی‌گردد. همچنین Dousti و همکاران [۱۳] اشاره نموده است که ضریب انتشار یون کلر با افزایش میزان زئولیت در بتن معمولی کاهش می‌یابد.

همانگونه که بیان گردید، هدف از این مطالعه بررسی خواص بتن تازه و سخت شده خودتراکم حاوی ترکیب دودهٔ سیلیس و زئولیت می‌باشد. علاوه بر آن، اختلاط‌هایی که در ساخت آنها از دوده سیلیس و زئولیت به‌صورت مجزا استفاده شده و نیز برای مقایسه با حالت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته است. خواص بتن تازهٔ خودتراکم توسط آزمایشات جریان اسلامپ، زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتی‌متر (T_{50})، قیف V شکل، جعبهٔ L شکل، شاخص پایداری چشمی و الک پایداری بررسی می‌گردد. مقاومت فشاری در سنین مختلف، مقاومت کششی و جذب آب (اولیه و نهایی) بتن خودتراکم نیز در بخش بتن سخت شده تخمین زده می‌شود. همچنین برای مدلسازی رفتار واقعی بتن خودتراکم، جریان اسلامپ و مقاومت فشاری بتن خودتراکم با گذشت زمان انتقال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- برنامهٔ آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مورد استفاده

در این مطالعه سیمان پرتلند تیپ یک، دودهٔ سیلیس و همچنین زئولیت به عنوان مواد چسباننده به ترتیب با وزن مخصوص ۳/۱۵، ۲/۱۲ و ۲/۲۴ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ترکیب شیمیایی آنان در جدول ۱ نمایش داده شده است. ماسه از نوع رودخانه‌ای و همچنین شن از نوع شکسته با بزرگترین اندازهٔ اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. برای ایجاد روانی در محدودهٔ مطلوب از کاهندهٔ شدید آب (High Range Water Reducer) با نام تجاری Glenium51 با چگالی مابین $1/06\ g/cm^3$ و $1/08\ g/cm^3$ استفاده شده است. برای رسیدن به لزجت مناسب در نمونهٔ بتن مبنا از اصلاح کننده لزجت بر پایهٔ پلی ساکارید (Polysaccharide) در فاز مایع با غلظت ۲۰ درصد استفاده شده است.

جدول۱- ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و خاکستر بادی

	سیمان	دودهٔ سیلیس	زئولیت
SiO_2	۲۱/۴۶	۹۱/۷	۶۸/۴
Al_2O_3	۵/۵۵	۱	۱۲/۵
Fe_2O_3	۳/۴۶	۰/۹	۱/۳۲
CaO	۶۳/۹۵	۱/۶۸	۱/۵۱
MgO	۱/۸۶	۱/۸	۱/۴
SO_3	۱/۴۲	۰/۸۷	۰/۴۵
K_2O	۰/۵۴	-	۱/۳
Na_2O	۰/۲۶	۰/۱	۲/۲

۲-۲- نسبت‌های اختلاط

برای دستیابی به اهداف این مطالعه، چهارده اختلاط بتن خودتراکم با نسبت آب به چسبانده ۰/۳۸ و میزان کل مواد چسباننده $470\ kg/cm^3$ طراحی گردید. این اختلاط‌ها شامل یک اختلاط مبنا، ۳ اختلاط بتن خودتراکم حاوی ترکیب دو گانهٔ سیمان+دودهٔ سیلیس، ۴ اختلاط بتن خودتراکم حاوی ترکیب دوگانهٔ سیمان+زئولیت و ۶ اختلاط حاوی ترکیب سه‌گانهٔ سیمان+دودهٔ سیلیس+زئولیت می‌باشند. میزان جایگزنی دوده سیلیس ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و برای زئولیت ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. این میزان از جایگزینی بر مبنای مطالعات گذشته و همچنین طرح‌های آزمایشگاهی اولیه انتخاب شده است. لازم به ذکر است که در اختلاط مبنا که در آن از دودهٔ سیلیس و یا زئولیت استفاده نشده است، از اصلاح‌کنندهٔ لزجت جهت حفظ

خواص رئولوژیک بتن خودتراکم استفاده شده است. جزئیات اختلاط بتن خودتراکم در جدول ۲ نمایش داده شده است.

در بتن خودتراکم جریان اسلامپ به تنهایی پارامتر کنترل‌کننده روانی نمی‌باشد. لذا در مطالعات معمولاً جریان اسلامپ را در محدودهٔ کنترل شده نگاه داشته و تأثیر پارامترهای موجود را در دیگر خواص بتن تازهٔ خودتراکم جستجو می نمایند. محدوده‌ای که در این مطالعه انتخاب گردیده است، جریان اسلامپ مابین ۶۶۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر بر اساس ردهٔ دوم EFNARC (SF2) [۲] است (جدول ۳). این رده از بتن خودتراکم را می‌توان در بسیاری از کاربردهای معمولی مهندسی مانند تیر و یا ستون استفاده نمود. در این مطالعه، تنظیم نگاه داشتن جریان اسلامپ در محدودهٔ مورد نظر، با استفاده از تغییر میزان کاهندهٔ شدید آب صورت خواهد پذیرفت.

برای ساخت نمونه‌ها روندی مشابه با آنچه که Khayat و همکاران [۱۴] استفاده نموده‌اند، به‌کار گرفته شد. بر این مبنا، ابتدا سنگدانه‌ها شامل شن و ماسه به‌مدت ۳۰ ثانیه در بتونیر مخلوط شد. پس از آن، نصف آب مصرفی به‌مدت ۱ دقیقه در حالیکه که بتونیر روشن بود به مخلوط اضافه گردید. بعد از این مرحله بتونیر ۱ دقیقه خاموش شده و سپس مواد چسباننده شامل پرکننده‌ها و سیمان اضافه گردید و به‌مدت ۱ دقیقهٔ دیگر در بتونیر مخلوط شد. درحالیکه که بتونیر به‌مدت ۳ دقیقه روشن بود، آب باقیمانده و مادهٔ افزودنی کاهندهٔ شدید آب به مخلوط اضافه گردید. در نهایت بعد از ۲ دقیقه استراحت، بتن به میزان ۳ دقیقهٔ دیگر مخلوط گردید.

۲-۳- آزمایشات بتن خودتراکم

۲-۳-۱- آزمایشات بتن تازه

در این مطالعه آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم بر مبنای EFNARC انجام شد [۲]. بر این اساس، پایداری و پرکنندگی بتن خودتراکم توسط چهار مشخصهٔ اصلی آن شامل جریان‌پذیری، لزجت، قابلیت عبور و مقاومت در برابر جداشدگی تعریف می‌شود [۲]. هر کدام از این پارامترها توسط یک و یا چند آزمایش تخمین زده می‌شوند. در این مطالعه با توجه به قابلیت‌های مورد نیاز آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتی‌متر (T_{50})، قیف V شکل، جعبهٔ L شکل، شاخص پایداری چشمی و الک پایداری انتخاب شده‌اند. آزمایش جریان اسلامپ به منظور تعیین جریان‌پذیری و قابلیت پرکنندگی در سطح افق به هنگام نبود مانع صورت می‌گیرد. اساس آزمایش بر اصولی استوار است که آزمایش اسلامپ معمولی بر آن بنا نهاده شده است. قطر دایره‌ای که بتن پس از پخش شدن می سازد، معیار سنجش قابلیت جریان‌پذیری بتن خواهد بود. بر اساس EFNARC [۲]، جریان‌پذیری بتن خودتراکم در سه رده تقسیم‌بندی می‌گردد که جزئیات آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

لزجت بر طبق تعریف به مقاومت در برابر جریان بتن تازه وقتی جریان آغاز می‌شود اطلاق می‌گردد که معمولاً برای محل‌هایی با آرماتوربندی حجیم و در مواقعی که احتیاج به سطوح بتن‌ریزی مطلوب می‌باشد، می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. در این مطالعه، از زمان عبور از قیف V شکل و T_{50} برای تخمین لزجت بتن خودتراکم استفاده می‌شود. بر مبنای EFNARC [۲]، دو رده لزجت بتن خودتراکم وجود دارد که در جدول ۳ نمایش داده شده است. جعبهٔ L شکل نسبت ارتفاع بتن عبور نموده از دو یا سه عدد آرماتور با قطر و فاصلهٔ معلوم را پس از عبور مسافتی مشخص اندازه‌گیری می‌نماید. توسط این آزمایش توانایی بتن تازه جهت پرکنندگی و عبور در طول فضاهای محدود و آرماتوربندی متراکم بدون از بین رفتن یکپارچگی و همچنین هرگونه جداشدگی و یا انسداد ارزیابی خواهد شد. طبقه‌بندی بتن خودتراکم بر مبنای عبورکنندگی (نسبت انسداد) در جدول ۳ نشان داده شده است.

از شاخص پایداری چشمی به عنوان یکی از ساده‌ترین و مشهورترین روش‌ها برای ارزیابی پایداری بتن خودتراکم بهره گرفته می‌شود. بر طبق این شاخص، پایداری بتن خودتراکم در چهار گروه بین صفر (فوق‌العاده پایدار) تا ۳ (فوق‌العاده ناپایدار)

جدول۲- جزئیات طرح اختلاط‌ها

نام اختلاط	سیمان (kg/m^3)	دودهٔ سیلیس (kg/m^3)	زئولیت (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	کاهندهٔ شدید آب(kg/m^3)	اصلاح‌کننده (kg/m^3) لزجت
SCC	۴۷۰	–	–	۱۷۹	۹۳۷	۸۱۰	۲/۸۵	۱/۲۴
ZE5	۴۴۶/۵	–	۲۳/۵	۱۷۹	۹۴۰	۸۰۷	۳/۴۱	-
ZE10	۴۲۳	–	۴۷	۱۷۹	۹۴۵	۸۰۰	۳/۶۵	-
ZE15	۳۹۹/۵	–	۷۰/۵	۱۷۹	۹۵۳	۷۹۰	۴/۹۱	-
ZE20	۳۷۶	–	۹۴	۱۷۹	۹۵۵	۷۸۰	۴/۹۱	
SF5	۴۴۶/۵	۲۳/۵	–	۱۷۹	۹۳۷	۸۰۷	۲/۱۹	–
SF10	۴۲۳	۴۷	–	۱۷۹	۹۳۱	۸۰۲	۳/۳	-
SF15	۳۹۹/۵	۷۰/۵	–	۱۷۹	۹۲۷	۷۹۵	۵/۲۳	-
ZE5SF5	۴۲۳	۲۳/۵	۲۳/۵	۱۷۹	۹۳۷	۸۱۰	۵/۶۵	-
ZE10SF5	۳۹۹/۵	۲۳/۵	۴۷	۱۷۹	۹۲۷	۸۰۰	۷/۷۲	-
ZE15SF5	۳۷۶	۲۳/۵	۷۰/۵	۱۷۹	۹۲۵	۷۹۳	۷/۴۵	-
ZE5SF10	۳۹۹/۵	۴۷	۲۳/۵	۱۷۹	۹۲۹	۷۹۷	۶/۳۴	-
ZE5SF15	۳۷۶	۷۰/۵	۲۳/۵	۱۷۹	۹۲۵	۷۹۳	۷/۱۴	–
ZE10SF10	۳۷۶	۴۷	۴۷	۱۷۹	۹۲۲	۷۹۰	۷/۵۸	–

تقسیم‌بندی می‌شود. بعد از برداشتن مخروط اسلامپ، جداشدگی دینامیکی بتن به‌صورت چشمی با بررسی تجمع درشت‌دانه‌ها و یا ضخامت خمیر سیمان در گوشه بتن پخش‌شده ارزیابی می‌گردد. شاخص الک پایداری برای ارزیابی مقاومت در برابر جداشدگی در بتن خودتراکم در حالت استاتیکی مناسب می‌باشد. جداشدگی استاتیکی عملکرد بتن را بلافاصله بعد از قالب‌گیری تا رسیدن به زمان گیرش را توصیف می‌نماید. مقاومت جداشدگی استاتیکی نامناسب در بتن خودتراکم می‌تواند باعث تأثیر بر ناحیهٔ اتصال سنگدانه- خمیر سیمان و به تبع آن کاهش مقاومت فشاری و افزایش نفوذپذیری گردد. در جدول ۳ جزئیات رده‌بندی شاخص الک پایداری توسط EFNARC [۲] ارائه شده است.

۲-۳-۲- آزمایشات بتن سخت‌شده

پس از اتمام آزمایش‌های بتن تازه نمونه‌ها در داخل قالب‌های مربوطه بدون هرگونه تراکم خارجی ریخته شدند. مقاومت فشاری بتن خودتراکم در سنین مختلف شامل ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزگی بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر مقاومت فشاری، نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰cm جهت بررسی مقاومت کششی بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزگی استفاده گردید. برای هر طرح اختلاط میانگین مقاومت فشاری و کششی ۳ نمونه ملاک قرار گرفته است. جذب آب بتن خودتراکم بر اساس ASTM C 642 در سن ۲۸ روزگی اندازه‌گیری شد. بر این مبنا، برای هر اختلاط ۳ نمونه در آون در دمای ۱۰۰-۱۱۰ درجه سانتیگراد تا رسیدن به وزن ثابت نگهداری شدند و سپس جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی (زمانی که تفاضل جرم بعد از فاصله‌های زمانی ۱۲ ساعته قابل چشم‌پوشی است) گزارش شده است.

جدول ۳- رده‌بندی بتن تازه خودتراکم بر مبنای EFNARC[۲]

ردهٔ جریان‌پذیری	جریان اسلامپ
ردهٔ اول (SF1)	۶۵۰-۵۵۰
ردهٔ دوم (SF2)	۷۵۰-۶۶۰
ردهٔ سوم (SF3)	۸۵۰-۷۶۰

ردهٔ ویسکوزیته	T_{50} زمان عبور از قیف V شکل	
VS1/VF1	≤۲	≤۸
VS2/VF2	>۲	۲۵-۹

ردهٔ عبورکنندگی	نسبت انسداد
PA1	برای دو میلگرد ≥ ۰/۸
PA2	برای سه میلگرد ≥ ۰/۸

ردهٔ مقاومت در برابر جداشدگی	شاخص پایداری الک
SR1	≤٪۲۰
SR2	≤٪۱۵

۲-۳-۳- آزمایشات بتن خودتراکم با گذشت زمان انتقال

معمولاً بلافاصله بعد از ساخت، با حفظ خواص بتن تازه می‌بایست بتن را از محل ساخت به محل بتن‌ریزی نهایی منتقل نمود. لذا بررسی خواص بتن در طول دوره زمانی انتقال بتن امری ضروری به‌نظر می‌رسد. در مطالعات انجام پذیرفته در ارتباط با تأثیر تأخیر زمانی بر خواص بتن، زمان انتقال تعریف می‌شود. زمان انتقال[1] بتن به زمان صرف شده بین اولین تماس آب و سیمان در حین ساخت بتن تا ابتدای زمان بتن‌ریزی اطلاق می‌شود [۱۵]. بتن خودتراکم به علت نسبت کم آب به سیمان و همچنین مقدار مواد سیمانی بالا احتیاج به توجه بالاتری در مقوله زمان انتقال بتن دارد. اما متأسفانه توجه محدودی در مطالعات نسبت به زمان انتقال بتن خودتراکم صورت پذیرفته است. در این مطالعه جریان اسلامپ و مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت به‌صورت مجزا و ترکیبی با گذشت زمان انتقال مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

۳-۱- خواص بتن تازه خودتراکم

۳-۱-۱- جریان اسلامپ

تغییرات میزان جریان اسلامپ و کاهندهٔ شدید آب در اختلاط‌های بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت به‌صورت مجزا و ترکیبی در شکل ۱ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود مقدار جریان اسلامپ در تمامی نمونه‌ها در محدوده ۶۶۵ تا ۷۱۰ میلی‌متر متغییر می‌باشد. این محدوده از جریان اسلامپ با تنظیم میزان کاهندهٔ شدید آب از ۲/۱۹ تا ۸/۵۷ kg/m^3 به‌دست آمده است.

از شکل ۱ مشخص است که در نمونه‌های حاوی دودهٔ سیلیس به علت ریزی بالای آن تقاضای آب نسبت به بتن خودتراکم مبنا افزایش می‌یابد. لذا در این مطالعه برای حفظ جریان اسلامپ با افزایش میزان دودهٔ سیلیس، میزان کاهندهٔ شدید آب افزایش یافته است. در روندی مشابه در مطالعهٔ Guneyisi و همکاران [۵]، با افزایش میزان دودهٔ سیلیس تا ۱۵ درصد، شاهد افزایش ۴۲ درصدی در میزان کاهندهٔ شدید آب برای نگاه داشتن جریان اسلامپ در محدودهٔ ۶۷۰ تا ۶۹۵ میلی‌متر هستیم. همچنین شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزایش زئولیت احتیاج به میزان بالاتری از کاهندهٔ شدید آب برای حفظ جریان اسلامپ در محدوده SF2 می‌باشد. نتیجهٔ مشابه برای بتن معمولی حاوی زئولیت نیز توسط Ahmadi و Shekarchi [۱۰] به‌دست آمده است. آنان دلیل این رفتار را بر مبنای میزان بالای تخلخل در ساختار زئولیت و همچنین سطح مخصوص بالای آن جستجو نموده اند. از طرفی شکل ۱ نشان می‌دهد که جریان اسلامپ در ZE5 با ۵ درصد زئولیت ۶۸۰ میلی‌متر می‌باشد در حالیکه این مقدار برای ZE10 که محتوی ۱۰ درصد زئولیت است به میزان ۶۶۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که افزایش

[1] Hauling time

میزان زئولیت سبب کاهش روانی بتن خودتراکم می‌شود. این درحالی است که مقدار مصرف کاهنده شدید آب در ZE10 از اختلاط ZE5 بیشتر می‌باشد. این نتیجه در راستای مطالعهٔ Feng و همکاران [۱۶] برای بتن معمولی حاوی زئولیت است. همچنین Najimi و همکاران [۱۲] نشان دادند که استفاده از زئولیت باعث کاهش جریان‌پذیری بتن معمولی خواهد شد که این کاهش جریان‌پذیری با استفاده از فوق‌روان‌کننده قابل جبران می‌باشد.

هرچند Chan و Ji [۱۱] نشان دادند که استفاده از زئولیت در بازهٔ ۵ تا ۱۵ درصد تأثیر چندانی بر اسلامپ بتن معمولی ندارد. این نتایج متفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در ترکیبات معدنی و شیمیایی و همچنین خواص فیزیکی زئولیت به کار برده شده در مطالعات باشد. در مقایسه با نمونه‌های حاوی دودهٔ سیلیس استنباط می‌شود که در نمونه‌های حاوی زئولیت احتیاج به مقادیر بالاتری از کاهندهٔ شدید آب برای رسیدن به میزان اسلامپ مشابه وجود دارد. در نمونه‌های حاوی ترکیب سه‌گانه سیمان-دودهٔ سیلیس-زئولیت روند مشابه با آنچه در استفاده مجزا از هر کدام دیده شد، دنبال می‌شود. به عنوان مثال، در اختلاط‌های ZE5SF5، ZE10SF5 و ZE15SF5 با میزان ثابت جایگزینی دودهٔ سیلیس (۵ درصد)، افزودن زئولیت سبب کاهش جریان اسلامپ از ۷۱۰ تا ۶۸۰ میلی‌متر گردیده است.

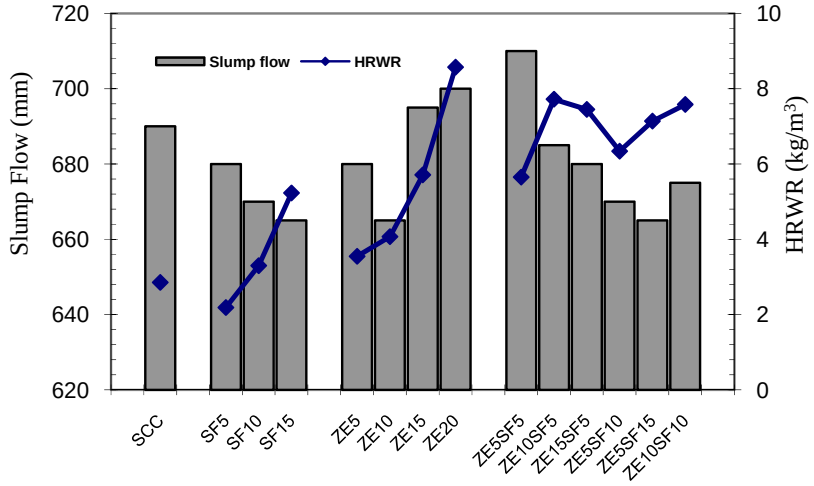
۳-۱-۲- زمان‌های رسیدن T_{50} و عبور از قیف V شکل

تأثیر مقادیر متفاوت جایگزینی دودهٔ سیلیس و زئولیت بر زمان T_{50} در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، زمان T_{50} در محدودهٔ ۲/۵ تا ۳/۱ ثانیه برای نمونه‌های حاوی دودهٔ سیلیس، در محدودهٔ ۲/۴ تا ۴/۶۷ ثانیه برای نمونه‌های حاوی زئولیت و همچنین در محدودهٔ ۲/۷۶ تا ۴/۵۵ ثانیه برای نمونه‌های ترکیبی دوده سیلیس و زئولیت متغییر است. شکل ۲ نشان می‌دهد که افزایش دودهٔ سیلیس و زئولیت باعث افزایش زمان T_{50} می‌شود. روند مشابه برای ترکیب دودهٔ سیلیس و زئولیت نیز برقرار است. ولی با اینحال زمان T_{50} در تمامی اختلاط‌ها بین ۲ تا ۵ ثانیه است. در این محدوده از زمان T_{50}، لزجت مخلوط به اندازهٔ کافی بالا می‌باشد تا باعث افزایش مقاومت در برابر جداشدگی و همچنین محدود نمودن فشار بیش از حد به قالب شود [۱۷]. زمان T_{50} کمتر از ۲ ثانیه می‌تواند باعث جداشدگی و زمان بالاتر از ۵ ثانیه می‌تواند باعث افزایش احتمال انسداد گردد.

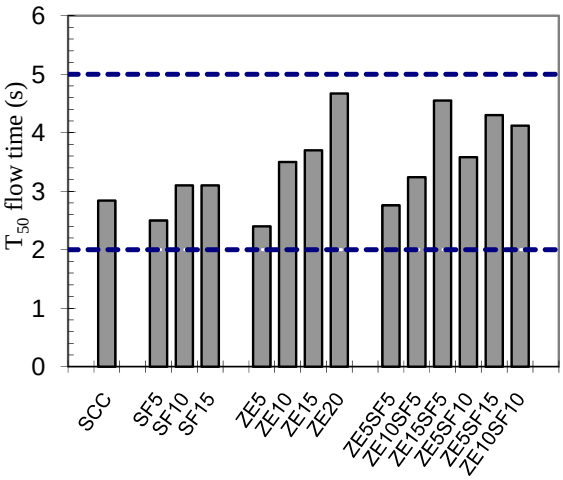
زمان عبور از قیف V شکل در نمونه‌های بتن خودتراکم نیز تخمین زده شده و نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. این زمان در محدودهٔ ۷/۹ تا ۱۴/۷ ثانیه برای بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت بصورت مجزا و ترکیبی متغییر می‌باشد. این مقادیر از زمان عبور از قیف V شکل برای اختلاط بتن خودتراکم مبنا (SCC) که ۷/۸ ثانیه محاسبه شده بود، بالاتر است. این بدان معناست که وجود پرکننده‌ها لزجت پلاستیک مخلوط را افزایش می‌دهند.

در اختلاط‌های حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت از هیچ‌گونه اصلاح کنندهٔ لزجتی استفاده نشده است. این امر می‌تواند حتی سبب کاهش قیمت مواد مصرفی و به عبارتی تولید بتن خودتراکم اقتصادی گردد. مطالعه انجام پذیرفته توسط Şahmaran و همکاران نشان می‌دهد [۱۸] که با جایگزینی زئولیت به عنوان اصلاح کنندهٔ لزجت در گروت‌های سیمانی، خواص رئولوژیک مناسبی به‌دست می‌آید به‌ویژه آنکه زئولیت در کنار یک روان‌کنندهٔ مناسب به‌کار برده شود. البته نتایجی متفاوت برای دودهٔ سیلیس گزارش شده است. درحالی‌که Hassan و همکاران [۱۹] اشاره نمودند که دودهٔ سیلیس تأثیری بر لزجت بتن خودتراکم ندارد، توسط Mohamed [۲۰] افزایش زمان قیف V شکل با افزودن دودهٔ سیلیس در بتن خودتراکم گزارش شده است.

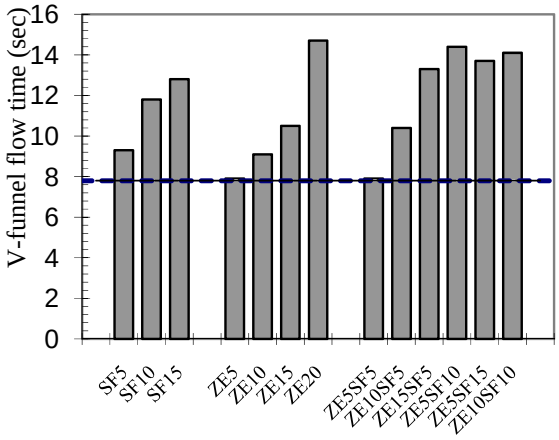
بر مبنای مطالعات Felekoglu و همکاران [۲۱]، اختلاط‌های بتن خودتراکم با زمان عبور از قیف V شکل بالاتر از ۲۰ ثانیه پذیرفته نمی‌شود. آنان ادعا نمودند که این اختلاط‌ها به علت لزجت بالا، تمایل به حبس هوا در درون خود دارند. این بدین معناست که در این اختلاط‌ها قابلیت تراکم مطلوب دست‌یافتی نیست. با این حال اختلاط‌های بتن خودتراکم حاوی دوده T_{50} سیلیس و زئولیت به‌صورت مجزا و ترکیبی دارای زمان عبور از قیف V شکل پایین تر از ۲۰ ثانیه هستند. پیشتر اشاره شد که EFNARC [۲]، لزجت بتن خودتراکم را بر مبنای زمان‌های عبور از قیف V شکل، در دو گروه VS1/VF1 و



شکل ۱- تغییرات جریان اسلامپ در برابر میزان مصرف کاهندهٔ شدید آب

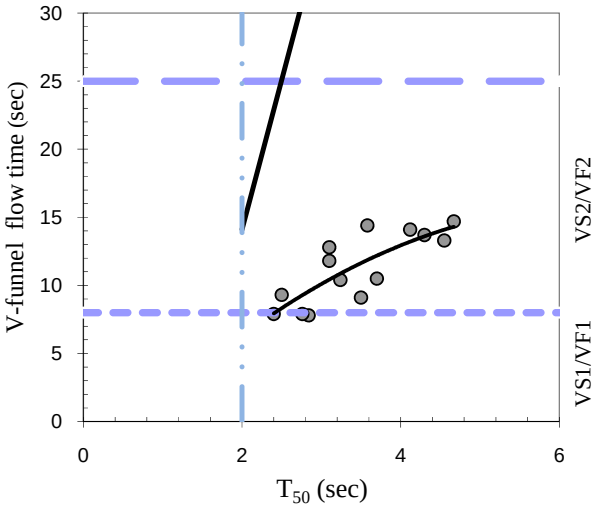


شکل ۲- تأثیر افزودن دودهٔ سیلیس و زئولیت بر زمان T_{50}



شکل ۳- تأثیر افزودن دودهٔ سیلیس و زئولیت بر زمان عبور از قیف V شکل

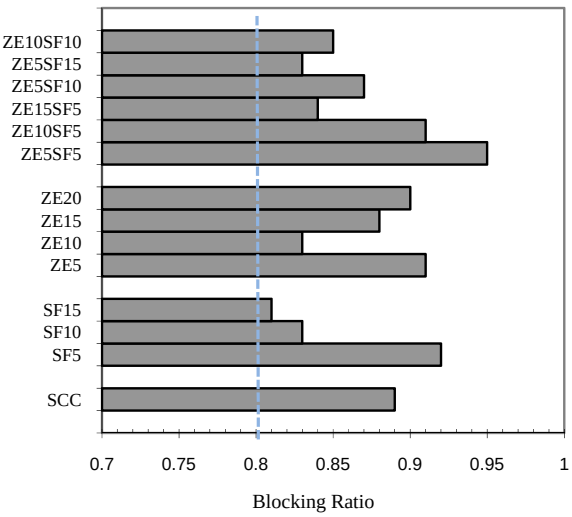
VS2/VF2 تقسیم‌بندی نموده است. جزئیات زمان های T_{50} و عبور از قیف V شکل برای بتن خودتراکم حاوی پرکننده‌های ترکیبی برای طبقه‌بندی در این دو گروه در شکل ۴ نمایش داده شده است. بر این مبنا، اغلب نمونه‌های بتن خودتراکم در گروه VS2/VF2 طبقه‌بندی می‌شوند. قابل ذکر است که این رده از بتن خودتراکم با کلاس جریان اسلامپ SF2 قابل استفاده در انواع رمپ‌ها و دیوار و شمع‌های بتنی می‌باشد. در شکل ۴ نشان داده شد که ارتباط مناسبی بین زمان عبور از قیف V شکل برای بتن خودتراکم حاوی پرکننده‌های دودهٔ سیلیس و زئولیت به‌صورت مجزا و ترکیبی وجود دارد. این رابطه به صورت رابطهٔ چند جمله‌ای به فرم $VF=-0.47 \times T^2 + 6.16 \times T - 4.1$ برقرار می‌باشد.



شکل ۴- رابطهٔ زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل

۳-۱-۳- نسبت انسداد در جعبهٔ L شکل

شکل ۵ نشان‌دهندهٔ تأثیر استفادهٔ مجزا و ترکیبی از دودهٔ سیلیس و زئولیت در ساختار بتن خودتراکم بر میزان نسبت انسداد می‌باشد. بتن خودتراکم مبنا دارای نسبت انسداد ۰/۸۹ است که با جایگزینی درصدهای متفاوت دودهٔ سیلیس در محدودهٔ ۰/۸۱ تا ۰/۹۲ تغییر می نماید. از طرفی، افزودن زئولیت باعث تغییر نسبت انسداد در محدودهٔ ۰/۹۱ تا ۰/۸۳ شده است. بر طبق EFNARC [۲]، میزان نسبت انسداد بالای ۰/۸ توصیه نمی‌گردد. اختلاط‌های بتن خودتراکم حاوی ترکیب دودهٔ سیلیس و زئولیت نیز دارای نسبت انسداد بالاتر از ۰/۸ (توصیه شده توسط EFNARC [۲]) هستند. در مطالعه‌ای توسط Gesoglu و همکاران [۲۲] بر روی بتن خودتراکم حاوی سیمان، خاکستر بادی، دودهٔ سیلیس و روباره به‌صورت ترکیب دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه نشان داده شده است که ترکیب سه‌گانه و چهارگانه باعث بهبود پرکنندگی و عبورکنندگی بتن می‌گردد. بیشترین میزان نسبت انسداد در این مطالعه نیز در ترکیب سه‌گانه سیمان-دودهٔ سیلیس- زئولیت (ZE5SF5) تخمین زده شده است که به نوعی می‌تواند در راستای مطالعهٔ Gesoglu و همکاران [۲۲] باشد.



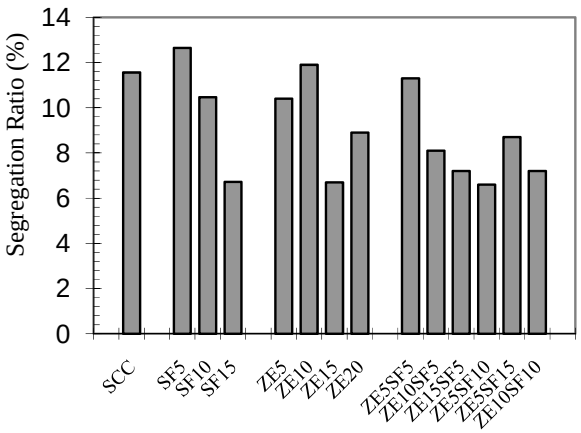
شکل ۵- نسبت انسداد نمونه‌های بتن خودتراکم

۳-۱-٤- شاخص پایداری چشمی

همانگونه که ذکر شد، یکی از ساده ترین و مشهورترین روش‌ها برای ارزیابی پایداری بتن خودتراکم شاخص پایداری چشمی است. لذا از این شاخص در این مطالعه نیز استفاده شده است. بر این اساس تمامی نمونه‌ها دارای شاخص پایداری چشمی صفر و یا یک می‌باشندکه نشان‌دهندهٔ پایداری مناسب بتن خودتراکم حاوی انواع پرکننده‌ها است. شاخص پایداری چشمی در حالت بتن سخت شده نیز می‌تواند در ارزیابی پایداری بتن خودتراکم مفید واقع گردد. جهت این منظور تغییراتی در اندازه و درصد مساحت توزیع درشت‌دانه‌ها از بالا تا پایین نمونه کششی استوانه‌ای شکسته‌شده مربوط به آزمایش شکاف برزیلی وجود ندارد که نشانهٔ وضعیت پایدار جداشدگی دارد.

۳-۱-۳- شاخص جدا شدگی الک

شکل ۶ نشان‌دهندهٔ میزان شاخص جداشدگی بتن خودتراکم حاوی مقادیر متفاوت دودهٔ سیلیس و زئولیت می‌باشد. تمامی اختلاط‌ها دارای شاخص جداشدگی کمتر از ۱۵ درصد هستند که نشان‌دهندهٔ مقاومت مطلوب در برابر جداشدگی است. شاخص پایداری الک مابین ۱۵ تا ۳۰ درصد نشان از پایداری بحرانی و شاخص پایداری بالاتر از ۳۰ درصد حاکی از پایداری خیلی ضعیف دارد. مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که محدودهٔ مناسب برای کمترین مقدار شاخص جداشدگی الک ۵ درصد می‌باشد که در تمامی اختلاط‌های این مطالعه صادق می‌باشد. خاطر نشان می‌کند که در بعضی از مطالعات عدد ۵ درصد ملاک عمل واقع نشده است و اختلاط‌های بتن خودتراکم با شاخص جداشدگی الک ۱/۴ درصد تولید شده است [۴].

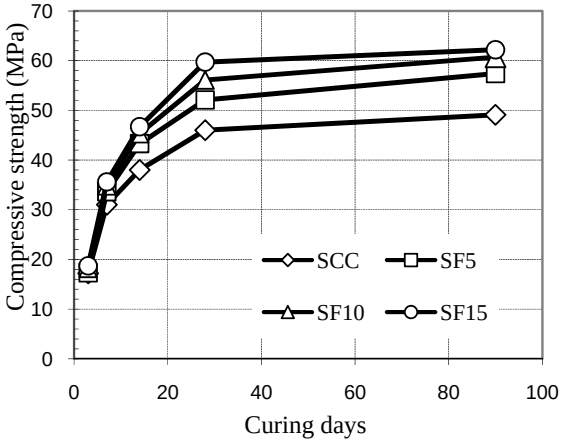


شکل ۶- شاخص جداشدگی الک در نمونه‌های بتن خودتراکم

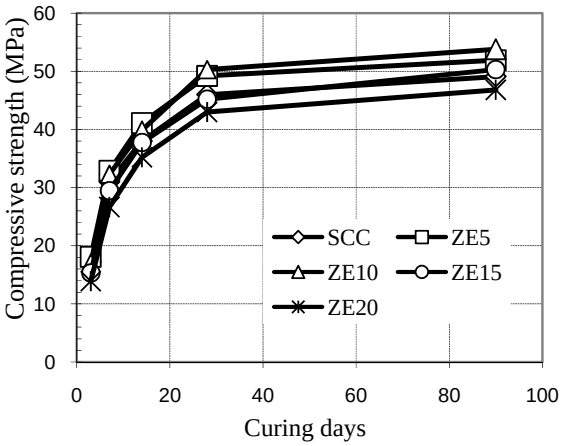
۳-۲- خواص بتن سخت شدهٔ خودتراکم

۳-۲-۱- مقاومت فشاری

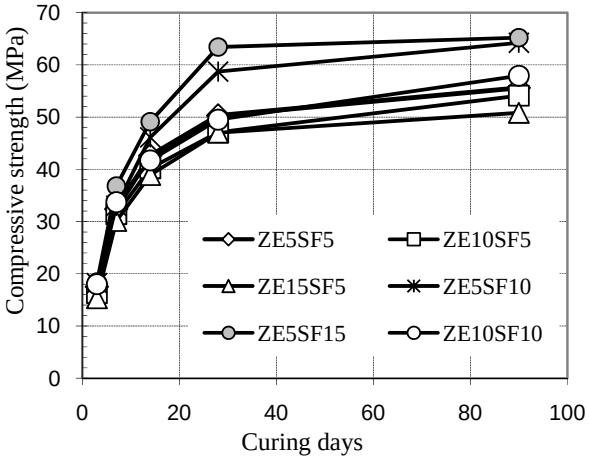
مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت در سنین مختلف شامل ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزگی محاسبه گردید و نتایج برای بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس، زئولیت و ترکیب دودهٔ سیلیس-زئولیت به ترتیب در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نمایش داده شده است. بر این مبنا مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها از ۱۳/۹ تا ۶۵/۲ MPa متغییر است. در تمامی نمونه‌ها شاهد افزایش مقاومت فشاری با افزایش سن نمونه‌ها هستیم. هرچند این افزایش مقاومت در سنین اولیه بالاتر می‌باشد.



شکل ۷- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی دودهٔ سیلیس در سنین مختلف



شکل ۸- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی زئولیت در سنین مختلف



شکل ۹- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ترکیب دودهٔ سیلیس و زئولیت در سنین مختلف

وجود دودهٔ سیلیس در بتن خودتراکم باعث افزایش چشمگیری در مقاومت بتن شده است. بیشترین رشد افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزگی، برای ۱۵ درصد جایگزینی و به میزان ۲۹ درصد مقاومت فشاری بتن خودتراکم مبنا نتیجه گردیده است. در روندی مشابه Guneyisi و همکاران [۵] با بررسی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس نشان دادند بیشترین افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزگی بتن خودتراکم در نسبت‌های مختلف آب به چسباننده برای ۱۵ درصد جایگزینی دودهٔ سیلیس ۱۵ درصد است. افزایش مقاومت فشاری با افزودن دودهٔ سیلیس را می‌توان به بهبود ریزساختار بتن مرتبط دانست. واکنش دودهٔ سیلیس با هیدروکسیدکلسیم که در هنگام واکنش‌های هیدراتاسیون بوجود می‌آید سبب تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته و به دنبال آن بهبود مقاومت فشاری می‌گردد. همچنین خاصیت پرکنندگی دانه‌های ریز سیمان می‌تواند سبب اصلاح تخلل بتن، افزایش مقاومت و مشخصه‌های دوام آن گردد. بهبود چسبندگی خمیر سیمان-سنگدانه با افزودن دودهٔ سیلیس نیز از دیگر عوامل افزایش مقاومت فشاری بتن است.

از شکل ۸ استنباط می‌گردد که وجود زئولیت در اختلاط‌های بتن خودتراکم باعث افزایش مقاومت فشاری تا ۹ درصد شده است. در روندی مشابه، Sabet و همکاران [۲۳] گزارش نمودند که جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت باعث افزایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم تا ۴ درصد می‌شود. در آن مطالعه نیز جایگزینی ۲۰ درصدی زئولیت باعث کاهش مقاومت فشاری شده است.

البته لازم به ذکر است که عموماً تأثیر زئولیت بر مقاومت بتن به نسبت آب به چسباننده‌ٔ آن بستگی دارد. توسط Najimi و همکاران [۱۲] نشان داده شده است که در نسبت آب به چسباننده ۰/۵، وجود زئولیت باعث کاهش مقاومت فشاری تا ۳۷ درصد گردیده است. این درحالی است که در مطالعهٔ دیگر توسط آنان [۱۰] با نسبت آب به چسباننده ۰/۴ بتن حاوی زئولیت در تمامی سنین مقاومت فشاری بیشتری نسبت به بتن مبنا از خود نشان داده است.

نمودار ۸ همچنین نشان می‌دهد که زئولیت در بلند مدت عملکرد بهتری از خود در مقایسه با سنین اولیه عمل‌آوری نشان می‌دهد. به عنوان مثال، جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصدی زئولیت باعث کاهش مقاومت فشاری بتن در ۳ روزگی می‌گردد که با افزایش سن بتن تا ۹۰ روزگی افزایش مقاومتی به ترتیب ۹ و ۲ درصدی در مقاومت فشاری را می‌توان شاهد بود. روندی مشابه توسط Valipour و همکاران [۲۴] برای بتن معمولی حاوی زئولیت گزارش شده است.

با مقایسه اشکال ۷ و ۸ می‌توان بدین نتیجه رسید که دودهٔ سیلیس اغلب در افزایش مقاومت فشاری در تمامی سنین و در تمامی درصدهای مشابه جایگزینی از زئولیت بهتر عمل می نماید که می‌تواند به علت فعالیت پوزولانی بالای دودهٔ سیلیس در مقایسه با زئولیت باشد. علاوه بر مطالعهٔ Sabet و همکاران [۲۳] که نشان می‌دهد بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس عملکرد بهتری در بهبود مقاومت از خود در مقایسه با بتن خودتراکم حاوی زئولیت دارد، این رفتار در بتن توانمند توسط Chan و Ji [۱۱] و برای بتن معمولی توسط Ahmadi و Shekarchi [۱۰] گزارش شده است.

با در نظر گرفتن ترکیب دوگانه پرکننده‌ها در شکل ۹، به غیر از اختلاط های ZE10SF5 و ZE15SF5، بقیه اختلاط‌ها مقاومت فشاری بالاتری از بتن مبنا دارند. هرچند حتی این اختلاط نیز در سنین ۱۴ روزگی و بالاتر مقاومت بالاتری از بتن مبنا کسب می‌نمایند. بیشترین مقاومت فشاری در بین نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت در اختلاط ZE5SF15 اتفاق افتاده است. نتایج مقاومت فشاری این اختلاط نشان می‌دهد که بتن خودتراکم با ۱۵٪ دودهٔ سیلیس- ۵٪ زئولیت مقاومت فشاری بالاتری نسبت به بتن خودتراکم مبنا، بتن خودتراکم حاوی ۱۵٪ دودهٔ سیلیس و یا بتن خودتراکم حاوی ۵٪ زئولیت به ترتیب به میزان ۳۸، ۶ و ۲۸ درصد کسب می نمایند. همانند ترکیب دوگانهٔ سیمان-زئولیت، در این قسمت نیز در یک نسبت ثابت دودهٔ سیلیس با افزایش میزان زئولیت مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. اگرچه ترکیب آن با دودهٔ سیلیس می‌تواند این کاهش مقاومت فشاری را تا حدودی جبران نماید. به عنوان مثال با افزودن ۱۵ درصد دودهٔ سیلیس در بتن خودتراکم حاوی ۵ درصد زئولیت مقاومت فشاری ۲، ۱۲، ۱۹، ۲۸ و ۲۶ درصد به ترتیب در سنین ۳، ۷،۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزگی بهبود می‌یابد.

۳-۲-۲- مقاومت کششی (شکافت)

مقاومت کششی بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت در سن ۲۸ روزگی محاسبه شده و نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تقریباً روندی مشابه با آنچه در مقاومت فشاری دیده شد، در مقاومت کششی نیز برقرار است. به عنوان مثال همانند مقاومت فشاری در هر سه نسبت جایگزینی دودهٔ سیلیس مقاومت کششی هم افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش مقاومت کششی برای نمونه‌های حاوی دودهٔ سیلیس و یا زئولیت به ترتیب در حدود ۱۸ و ۲ درصد نسبت به بتن مبنا نتیجه شده است. این میزان برای مقاومت فشاری ۲۸ روزگی در حدود ۲۹ و ۹ درصد می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی بیشتر است. روند مشابه در بتن خودتراکم حاوی ترکیب دودهٔ سیلیس و خاکستر بادی در مطالعهٔ Yazıcı [۲۵] قابل مشاهده می‌باشد.

با ترکیب زئولیت و دودهٔ سیلیس در اغلب نمونه‌ها شاهد افزایش مقاومت کششی نسبت به بتن خودتراکم مبنا یا حتی نسبت به بتن حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت به‌صورت مجزا هستیم به‌نحوی‌که بیشترین میزان مقاومت کششی برای اختلاطی با ۱۵٪ دودهٔ سیلیس و ۵٪ زئولیت به میزان ۳/۷۹ MPa محاسبه شد. در مجموع می‌توان بیان نمود که کاهش مقاومت کششی ناشی از افزایش میزان زئولیت را می‌توان با افزودن دودهٔ سیلیس بهبود بخشید. به عنوان مثال، بتن خودتراکم حاوی ۱۰ درصد دودهٔ سیلیس و ۱۰ درصد زئولیت، مقاومت کششی بالاتری نسبت به

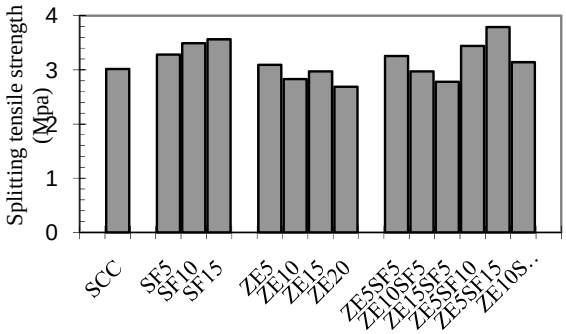
بتن خودتراکم حاوی ۱۰ و یا ۲۰ درصد زئولیت به ترتیب به میزان ۱۱ و ۱۷ درصد دارد.

ارزیابی و تعیین رابطه‌ای جهت پیش بینی مقاومت کششی بتن بر مبنای مقاومت فشاری آن همواره مورد توجه محققان صنعت بتن قرار گرفته است. در این مطالعه، تغییرات مقاومت فشاری استوانه‌ای در مقابل مقاومت کششی در بتن خودتراکم حاوی پرکننده‌های متفاوت در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. بر این مبنا، می‌توان رابطه توانی به فرم $f_t= 0.22\times(f_{cy})^{0.69}$ بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی با ضریب همبستگی مناسب (R^2=۰/۸۴) ارائه نمود.

لازم به ذکر است، ابتدا با اعمال ضرایب مربوطه، مقاومت فشاری مکعبی تبدیل به مقاومت فشاری استوانه‌ای شده است و سپس تغییرات مقاومت کششی بر مبنای مقاومت فشاری ترسیم گردیده است. این ضرایب تبدیلی برای بتن خودتراکم توسط Domone [۲۶] با گردآوری نتایج موجود در مطالعات مختلف ارائه گردیده است. همچنین در شکل ۱۱ رابطهٔ پیشنهادی CEB_FIP [۲۷] برای محدودهٔ بالا، پایین و میانگین تغییرات مقاومت کششی بر مبنای مقاومت فشاری استوانه‌ای ارائه گردیده است. ملاحظه می‌گردد که اعداد به‌دست آمده در این مطالعه در محدودهٔ توصیه شده توسط CEB_FIP [۲۷] قرار دارد. با این‌حال استفاده از رابطهٔ محدودهٔ میانگین CEB_FIP [۲۷] جهت بررسی تغییرات مقاومت فشاری استوانه‌ای در مقابل مقاومت کششی تخمین بالاتری از مقاومت کششی در یک مقاومت فشاری مشخص ارائه می‌دهد. شاید بتوان عنوان نمود که این نتیجه در راستای مطالعهٔ Parra و همکاران [۲۸] می‌باشد که نشان دادند در سنین بالا (۲۸ و ۹۰ روزگی) مقاومت کششی بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی در یک مقاومت فشاری مشخص کمتر است.

۳-۲-۳- جذب آب

در این مطالعه جذب آب اولیه و نهایی بتن خودتراکم در سن ۲۸ و ۹۰ روزگی محاسبه گردیده و نتایج به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. کیفیت بتن توسط CEB [۲۹] به سه رده "ضعیف"، "متوسط" و "خوب" به ترتیب بر مبنای جذب آب ۵ درصد و بالاتر، بین ۳ تا ۵ درصد و کمتر از ۳ درصد تقسیم‌بندی شده است. بر این مبنا، تمامی نمونه‌ها دارای جذب آب اولیه در ردهٔ کیفیتی "خوب" هستند. همچنین جذب آب نهایی ۲۸ روزگی بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس، زئولیت و ترکیب دودهٔ سیلیس-زئولیت در محدودهٔ ۰/۹۷ تا ٪۲/۰۲، ۱/۷۴ تا ٪۳/۴۱ و ۱/۲۷ تا ٪۱/۹۳ متغیر می‌باشد که نسبتاً پایین می‌باشد. جذب آب در بتن حاوی زئولیت در تمامی سنین از بتن خودتراکم مبنا کمتر است که در راستای نتیجهٔ مطالعهٔ Ahmadi و Shekarchi [۱۰] برای بتن معمولی می‌باشد. از طرفی همانگونه که انتظار می‌رفت جذب آب نمونه‌های حاوی دودهٔ سیلیس نیز پایین‌تر از بتن خودتراکم است.

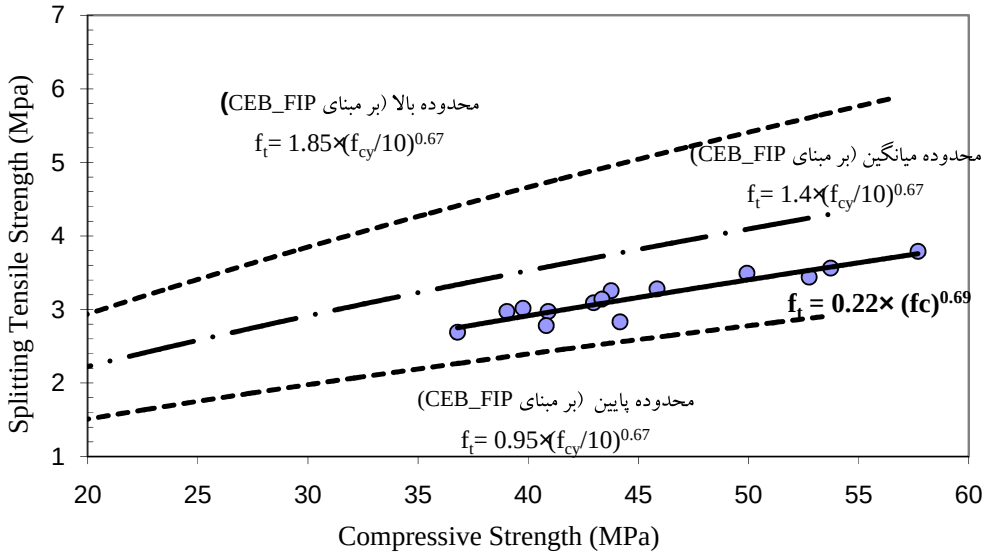


شکل ۱۰- مقاومت کششی بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت

با توجه به شکل ۱۲ و ۱۳ میزان جذب آب نمونه‌های حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت با مقایسه جذب آب در ۲۸ و ۹۰ روزگی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، جذب آب بتن با افزایش سن بتن کاهش می‌یابد. میزان کاهش جذب آب در بتن حاوی زئولیت در محدودهٔ ۱۶ تا ۲۳ درصد و در بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس در محدوده ۳ تا ۹ درصد است. این موضوع نشان از فعالیت پوزولانی بالای زئولیت در بلند مدت دارد.

۳-۳- آزمایشات بتن خودتراکم با گذشت زمان انتقال

بر طبق مطالعهٔ انجام پذیرفته توسط Bouzoubaa و Lachemi، عموماً بتن خودتراکم با جریان اسلامپ زیر ۵۰ سانتی‌متر نمی‌تواند از بین آرماتوربندی حجیم عبور نماید و بنابراین نمی‌توان در عمل آن را در ردهٔ بتن خودتراکم تقسیم‌بندی نمود [۳۰]. در این مطالعه نیز فقط خواص بتن خودتراکم با جریان اسلامپ بالای ۵۰۰ میلی‌متر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.



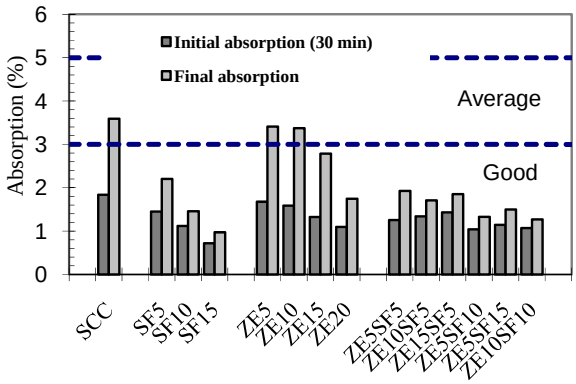
شکل ۱۱- رابطهٔ مقاومت فشاری و کششی بتن خودتراکم

۳-۳-۱- جریان اسلامپ

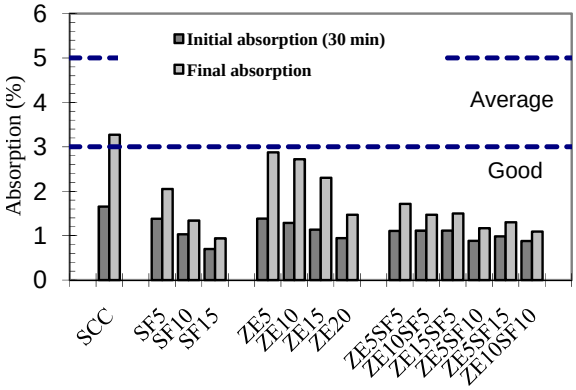
بر طبق اطلاعات نویسنده متاسفانه تاکنون مطالعه جامعی بر روی عملکرد پرکننده‌های ترکیبی بر خواص بتن تازه و سخت شده خودتراکم با گذشت زمان انتقال صورت نپذیرفته است که در این مطالعه سعی می‌شود، این نقیضه تا حدودی جبران شود.

شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ نشان دهندهٔ تغییرات جریان اسلامپ با گذشت زمان انتقال در زمان‌های ۸، ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب برای بتن خودتراکم حاوی سیمان-دودهٔ سیلیس، سیمان-زئولیت و سیمان-دوده سیلیس-زئولیت می‌باشد. بر این مبنا در تمامی نمونه ها صرفنظر از نوع و میزان پرکنندهٔ مورد استفاده با گذشت زمان انتقال شاهد کاهش جریان اسلامپ می‌باشیم. مکانیسم کاهش جریان اسلامپ با افزایش زمان انتقال را می‌توان در افزایش سطح مخصوص ویژه[۱] ملات (به علت خردشدگی سیمان[۲]، خردشدگی سنگدانه و افزایش محصولات سیمان هیدراته[۳]) و همچنین جذب سطحی فوق‌روان‌کننده با گذشت زمان انتقال جستجو نمود [۳۱-۳۳].

میزان کاهش جریان اسلامپ در بتن خودتراکم مبنا بعد از ۳۰ دقیقه در حدود ۱۱ درصد می‌باشد که در صورت وجود ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد دودهٔ سیلیس به ترتیب به میزان ۱۲، ۱۴ و ۱۸ درصد



شکل ۱۲- جذب آب بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت (۲۸ روزگی)



شکل ۱۳- جذب آب بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت (۹۰ روزگی)

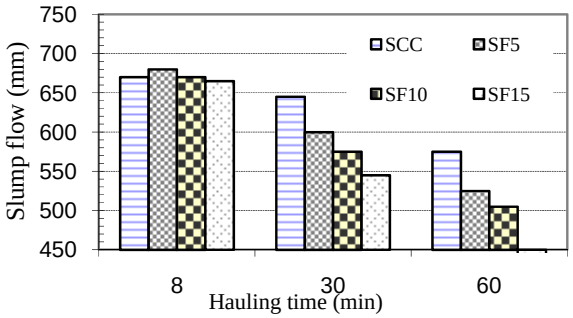
[۱] Specific surface area of concrete mortar
[۲] Cement particles' grinding
[۳] Growth of cement hydrated products

افزایش می‌یابد (شکل ۱۴). لذا می‌توان نتیجه گرفت که وجود دودهٔ سیلیس می‌تواند باعث کاهش ابقاء جریان اسلامپ گردد. مطالعهٔ گذشته توسط Madandoust و همکاران [۳۴] نیز نشان می‌دهد که بتن خودتراکم حاوی ۱۰ درصد دودهٔ سیلیس در نسبت آب به چسباننده ۰/۳۸ قادر به حفظ ۸۳/۳ درصدی جریان اسلامپ خویش در ۳۰ دقیقه می‌باشد که منطبق بر نتایج این مطالعه می‌باشد. همچنین با گذشت ۶۰ دقیقه از زمان انتقال بتن خودتراکم حاوی ۵ و ۱۰ درصد دودهٔ سیلیس قادر هستند ۷۷ و ۷۵ درصد از جریان اسلامپ خویش را حفظ نمایند. این درحالی است که میزان جریان اسلامپ در جایگزینی ۱۵ درصد دودهٔ سیلیس با گذشت ۶۰ دقیقه از زمان انتقال پایین‌تر از ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد که در نتیجه نمی‌توان آن را به عنوان بتن خودتراکم در نظر گرفت.

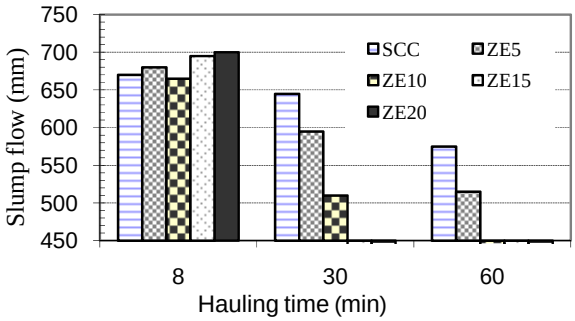
با توجه به تأثیر افزودن زئولیت (شکل ۱۵)، بتن خودتراکم حاوی ۲۰ درصد زئولیت نمی‌تواند خاصیت تراکم مطلوب را بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از زمان انتقال تامین نماید و نهایتاً ۱۰ درصد جایگزینی زئولیت در بتن خودتراکم توانسته است تا ۳۰ دقیقه جریان اسلامپ خویش را حفظ نماید. در مقایسه با دیگر پرکننده‌ها، نتایج مطالعه Madandoust و Mousavi [۳۵] نشان می‌دهند که در نسبت آب به چسباننده ۰/۳۸ بتن خودتراکم حاوی درصدهای متفاوت متاکائولن با جریان اسلامپ بالای ۶۰۰ میلی‌متر قابل تولید می‌باشد. همچنین بتن خودتراکم حاوی ۱۷درصد خاکستر بادی [۳۶] و ۱۵ درصد روباره [۳۷] نیز به ترتیب در نسبت‌های آب به چسباننده ۰/۴۲ و ۰/۴ قادرند تا ۹۰ دقیقه اسلامپ خویش را حفظ نمایند. درحالی‌که نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که بتن خودتراکم حاوی ۱۰ درصد زئولیت با نسبت آب به چسباننده ۰/۳۸پس از ۳۰ دقیقه ۷۶/۷ درصد از جریان اسلامپ خویش را حفظ می نماید که نشانهٔ عملکرد ضعیف زئولیت در مقایسه با متاکائولن، خاکستر بادی و روباره است. علت این موضوع را می‌توان با این حقیقت مرتبط دانست که زئولیت‌ها دارای تعداد زیادی سوراخ‌های ریز و کانال‌هایی که ابعاد آن از 3×10^{-4} تا 4×10^{-4} μm متغیر می‌باشد که می‌تواند آب اختلاط را در طول زمان انتقال جذب نمایند. ضعف در ابقاء جریان اسلامپ می‌تواند منجر به سخت‌شدگی غیرمعمول در بتن تازه، کاهش مقاومت و دوام، ایجاد دشواری در پمپ‌کردن و جای‌گیری بتن گردد.

از شکل ۱۶ که در آن تأثیر ترکیب دودهٔ سیلیس و زئولیت بر تغییرات جریان اسلامپ با گذشت زمان انتقال نشان داده شده است، می‌توان استنباط نمود به غیر از اختلاط ZE10SF5، مابقی نمونه‌ها که در آنها از ۱۰ درصد زئولیت استفاده شده است، نمی‌توانند تا ۳۰ دقیقه جریان اسلامپ خویش را حفظ نمایند. همانگونه که پیشتر توضیح داده شد، این وضعیت می‌تواند به ساختار زئولیت مرتبط باشد.

در مطالعات حداقل زمان انتقال ۳۰ دقیقه عنوان شده است، که بر این مبنا برای استفاده از اختلاط‌هایی که در آن‌ها از ۱۰ درصد زئولیت و یا بالاتر استفاده شده است می‌بایست تمهیدات مناسب اندیشیده شود.



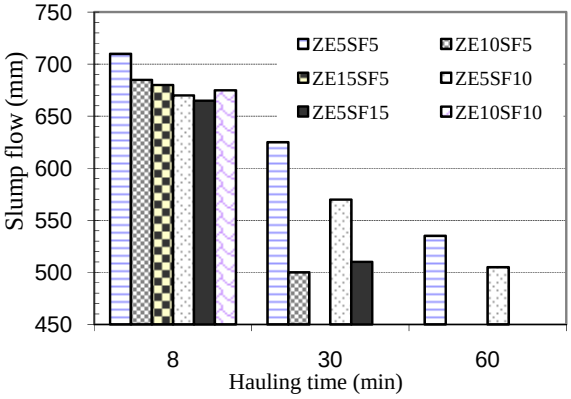
شکل ۱۴- تغییرات جریان اسلامپ بتن خودتراکم حاوی دوده سیلیس



شکل ۱۵- تغییرات جریان اسلامپ بتن خودتراکم حاوی زئولیت

افزودن آب قبل از بتن‌ریزی و یا استفاده کاهنده شدید آب قبل از بتن‌ریزی از جمله روش‌های موجود می‌باشد. البته معمولاً استفاده از کاهنده شدید آب ترجیح داده می‌شود. لازم به ذکر است که اختلاط ZE5SF15 که دارای بیشترین مقاومت در بین همه اختلاط‌ها بود، توانسته در حداقل زمان انتقال (۳۰ دقیقه)

جریان‌پذیر باشد. بین اختلاط‌های حاوی ترکیب دودهٔ سیلیس و زئولیت فقط اختلاط های ZE5SF5 و ZE5SF10 قادر به ابقاء جریان اسلامپ خویش تا ۶۰ دقیقه بودند.

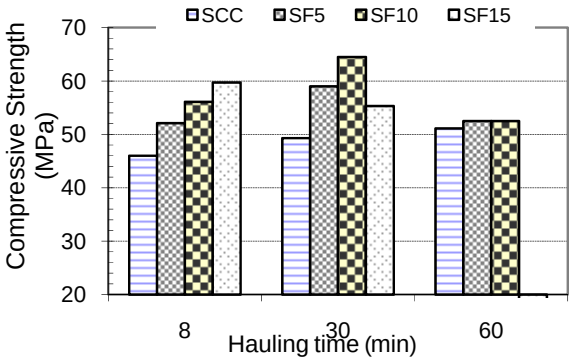


شکل ۱۶- تغییرات جریان اسلامپ بتن خودتراکم حاوی ترکیب دودهٔ سیلیس و زئولیت

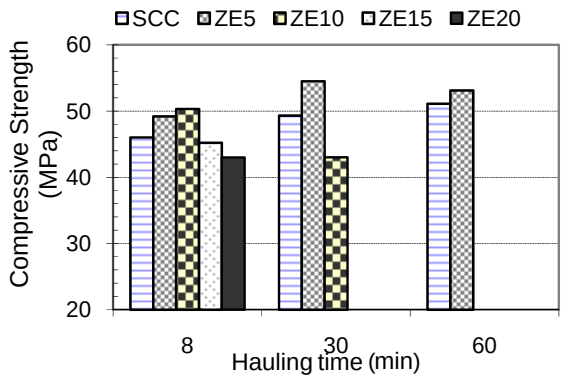
۳-۳-۲- مقاومت فشاری

تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزگی بتن خودتراکم در زمان‌های انتقال متفاوت شامل ۸، ۳۰ و ۶۰ دقیقه اندازه‌گیری شده و نتایج در حضور دودهٔ سیلیس، زئولیت و ترکیب دودهٔ سیلیس-زئولیت به ترتیب در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ نمایش داده شده است. همانگونه که در بخش بررسی جریان اسلامپ با گذشت زمان انتقال بیان گردید، در این بخش نیز مقاومت فشاری نمونه‌هایی که دارای جریان اسلامپ بالای ۵۰۰ میلی‌متر هستند محاسبه گردیده است.

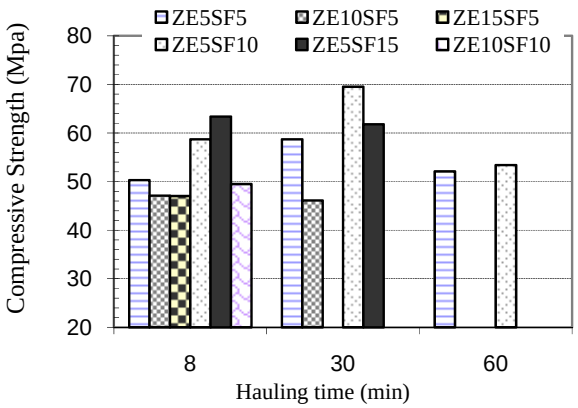
همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در اغلب نمونه‌ها صرفنظر از وجود و یا عدم وجود پرکننده با افزایش زمان انتقال تا ۳۰ دقیقه مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. افزایش میزان مقاومت فشاری بتن با گذشت زمان انتقال در ۳۰ دقیقه را می‌توان به کاهش تبخیر آب آزاد موجود در مخلوط مرتبط دانست. با تبخیر آب آزاد موجود در بتن با گذشت زمان انتقال نسبت آب به سیمان کاهش می‌یابد که باعث افزایش مقاومت بتن می‌گردد. دلیل دوم را نیز می‌توان در افزایش خردشدگی دانه‌های سیمان و کنده‌شدن محصولات هیدراتاسیون از سطح دانه‌های سیمانی و در نتیجه افزایش ریزی دانه‌های سیمان جستجو نمود. نتایج مطالعه Kırca



شکل ۱۷- مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس با زمان انتقال



شکل ۱۸- تغییرات مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی زئولیت با زمان انتقال



شکل ۱۹- تغییرات مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت با زمان انتقال

و همکاران [۳۸] بر روی تأثیر طولانی کردن زمان اختلاط بتن[1] در دو ردهٔ مقاومتی ۲۵ و ۳۵ MPa نشان می‌دهد که در هر دو نوع بتن مقاومت فشاری با گذشت زمان اختلاط افزایش می‌یابد.

[1] Prolonged mixing

دلایل فوق در آن مطالعه نیز برای افزایش مقاومت فشاری اشاره شده است. همچنین کاهش هوای محبوس در بتن نیز می‌تواند از عوامل افزایش مقاومت بتن با گذشت زمان انتقال باشد. در مطالعه‌ای توسط Erdogdu تأثیر حفظ اسلامپ توسط فوق‌روان‌کننده بر کاهش اسلامپ و مقاومت فشاری بتن در زمان های مختلف انتقال مورد مطالعه قرار داد [۳۹]. نتایج نشان دادند که به علت کاهش میزان هوای محبوس در بتن (به میزان ۱ درصد)، وزن مخصوص افزایش می‌یابد که خود این موضوع تا حدودی می‌تواند دلیلی بر افزایش ۱۵ درصدی مقاومت فشاری باشد.

با افزایش میزان زمان انتقال تا ۶۰ دقیقه به علت کاهش روانی بتن و به دنبال آن میزان تراکم، مقاومت فشاری در اغلب نمونه‌ها روندی کاهشی می‌یابد. بااین‌حال، نگاهی دقیق‌تر به نتایج نشان می‌دهد که تا جریان اسلامپ ۵۵۰ میلی‌متر مقاومت بتن با گذشت زمان انتقال کاهش نیافته است. این امر به طور غیر مستقیم می‌تواند نشانه تراکم مطلوب بتن خودتراکم تحت اثر وزن خویش در جریان اسلامپ بالای ۵۵۰ میلیمتر باشد که حد پایین ردهٔ اول بتن خودتراکم جریان اسلامپ در EFNARC است. [۲].

با این‌که ترکیب دودهٔ سیلیس و زئولیت در ساختار بتن خودتراکم باعث افت شدید جریان اسلامپ می‌گردد، اما بیشترین نرخ افزایش مقاومت فشاری با گذشت زمان انتقال در ترکیب ۵ درصد زئولیت با ۱۰ درصد دودهٔ سیلیس به میزان ۱۸ درصد اتفاق افتاده است. شاید بتوان علت این امر را در عملکرد بهتر دودهٔ سیلیس و زئولیت در نسبت‌های پایین‌تر آب به سیمان جستجو نمود. با تبخیر آب آزاد اختلاط به علت گذشت زمان انتقال، نسبت آب به سیمان مخلوط کاهش می‌یابد که می‌تواند سبب افزایش نرخ مقاومت گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر استفاده از دودهٔ سیلیس و زئولیت به‌صورت مجزا و ترکیبی بر خواص بتن تازه و سخت‌شده خودتراکم در مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر قابل استنباط می‌باشد.

۱. تمامی اختلاط‌های بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت دارای جریان اسلامپ در محدودهٔ ۶۶۵ تا ۷۱۰ میلی‌متر بودند که در ردهٔ دوم جریان اسلامپ بتن خودتراکم طبقه‌بندی می‌گردند. این نوع از بتن خودتراکم برای انواع کاربردهای معمول مهندسی مناسب می‌باشد. به‌علاوه، افزودن دودهٔ سیلیس و یا زئولیت باعث افزایش میزان مصرف کاهندهٔ شدید آب و یا به‌عبارتی کاهش جریان‌پذیری می‌گردد.

۲. افزایش میزان دودهٔ سیلیس و زئولیت در ساختار بتن خودتراکم سبب افزایش لزجت پلاستیک که با استفاده از زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل اندازه‌گیری می‌شود، می‌گردد. این امر باعث شده است که در این اختلاط‌ها از اصلاح کنندهٔ لزجت استفاده نشود. نتایج همچنین نشان دادند که می‌توان رابطهٔ مناسبی بین زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V برقرار نمود.

۳. عبورکنندگی اختلاط‌ها توسط نسبت انسداد جعبه L اندازه‌گیری شد که حداقل نسبت توصیه‌شده توسط EFNARC [۲] را رعایت می‌نماید. از طرفی، مقاومت در برابر جداشدگی دینامیکی و استاتیکی تمامی نمونه‌ها در حد مطلوب به‌دست آمده است.

۴. مقاومت فشاری بتن خودتراکم با افزودن دودهٔ سیلیس تا ۲۹ درصد و با افزودن زئولیت تا ۹ درصد افزایش یافته است. هرچند زئولیت در بلند مدت عملکرد مطلوب‌تری در افزایش مقاومت فشاری دارد، اما همچنان حضور ۲۰ درصد زئولیت در تمامی سنین (تا ۹۰ روزگی) باعث کاهش مقاومت فشاری می‌گردد. بیشترین میزان مقاومت فشاری، در ترکیب سه‌گانهٔ سیمان-۱۵ درصد دودهٔ سیلیس-۵ درصد زئولیت به‌دست آمده است که از تمامی ترکیبات دوگانهٔ سیمان-دودهٔ سیلیس و سیمان-زئولیت بالاتر است.

۵. روند مشابه با آنچه در مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت دیده شد، در مقاومت کششی (البته با سرعت کسب مقاومت کمتر) نیز

دیده شد. از طرفی رابطهٔ ارائه شده توسط CEB برای تخمین مقاومت کششی با استفاده از مقاومت فشاری مقادیر بالاتری از آنچه از مقاومت کششی بتن خودتراکم انتظار می‌رود را تخمین می زند.

۶. کیفیت بتن خودتراکم حاوی دودهٔ سیلیس و زئولیت بر مبنای جذب آب آن در ردهٔ خوب طبقه‌بندی می‌گردد. از طرفی جذب آب نمونه‌ها در تمامی سنین از بتن خودتراکم مبنا مطلوب‌تر می‌باشد.

۷. بررسی تغییرات جریان اسلامپ با گذشت زمان انتقال حاکی از افت شدید جریان در نمونه‌های حاوی زئولیت دارد بنحوی‌که بتن خودتراکم حاوی ۱۰ درصد زئولیت تنها قادر به حفظ جریان‌پذیری خویش تا ۳۰ دقیقه از زمان انتقال می‌باشد. البته ترکیب آن با دودهٔ سیلیس توانسته است تا حدودی این ضعف را برطرف نماید.

۸. مقاومت فشاری نمونه‌ها با گذشت زمان در اغلب موارد به علت کاهش نسبت آب به چسباننده افزایش یافته است. مگر در مواردی که جریان اسلامپ با گذشت زمان انتقال پایین تر از ۵۵۰ میلی‌متر می‌باشند. به نظر می‌رسد در این اختلاط‌ها به علت کاهش روانی، تراکم مطلوب به‌دست نمی‌آید. از طرفی بیشترین نرخ افزایش مقاومت فشاری در ترکیب دودهٔ سیلیس و زئولیت به‌دست آمده است.

٦- مراجع

[1].Okamura H, Ozawa K. Mix-design for self-compacting concrete. Concrete library of JSCE 25. 107-120, (1995).

[2]. The European guidelines for self-compacting concrete; specification production and use. EFNARC; May (2005).

[3].Zerbino R, Giaccio G, Isaia GC. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. Construction and Building Materials 25;371-378, (2011).

[4].Sahmaran M, Yaman I? , Tokyay M. Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash. Cement & Concrete Composites 31;99–106, (2009).

[5].Guneyisi E, Gesoglu M, Ozbay E. Evaluating and forecasting the initial and final setting times of self-compacting concretes containing mineral admixtures by neural network. Materials and Structures 42:469–84,(2009).

[6].Uysal M, Yilmaz K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. Cement & Concrete Composites 33;771–6, (2011).

[7].Sahmaran M, Christianto HA, Yaman IO. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. Cement and Concrete Composites 28;432–40, (2006).

[8].Guneyisi E, Gesoglu M, Ozbay E. Effects of marble powder and slag on the properties of self compacting mortars. Materials and Structures 42;813–26, (2009).

[9].Valipour M, Yekkalar M, Shekarchi M, Panahi S. Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments. Journal of Cleaner Production 65; 418-23, (2014).

[10].Ahmadi B, Shekarchi M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. Cement & Concrete Composites 32;134-41, (2010).

[11].Chan SYN, Ji X. Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes. Cement & Concrete Composites 21;293-300, (1999).

[12].Najimi M, Sobhani J, Ahmadi B, Shekarchi M. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. Construction and building materials 35:1023–33, (2012).

[13].Dousti A, Rashetnia R, Ahmadi B, Shekarchi M. Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite, Construction and Building Materials 49; 393–99, (2013).

[14].Khayat KH, Bickley J, Lessard M. Performance of self-consolidating concrete for casting basement and foundation walls. ACI Material Journal 97;374–80, (2000).

[15].Ghafoori N, Barfield M. Effects of hauling time on air-entrained self-consolidating concrete. ACI Material Journal 107;275–281, (2010).

[16].Feng NQ, Li GZ, Zang XW. High-strength and flowing concrete with a zeolite mineral admixture. Cem Concr Aggr 12:61–9, (1990).

[17].Barfield M, Ghafoori N. Air-entrained self-consolidating concrete: A study of admixture

[29].CEB-FIP. Diagnosis and assessment of concrete structures – ‘‘state of the art report’’. CEB Bull 192;83–5, (1989).
[30].Bouzoubaa N, Lachemi M. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash Preliminary results. Cement and Concrete Research 31; 413-20:(2001).
[31].Collepardi M. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. Cement and concrete composites 20,103–12, (1998).
[32]. Lowke D, Schiessl P. Effect of mixing energy on fresh properties of SCC. In: Proceedings of the fourth international RILEM symposium on self-compacting concrete and second north American conference on the design and use of self–consolidating concrete, Chicago, USA; (2005).
[33].Stieb M. Mechanische verfahrenstechnik 1. Berlin: Springer; (1995) [second issue].
[34]. Madandoust R, Ranjbar MM, Mousavi SY. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. Construction and Building Materials 25;3721–31, (2011).
[35].Madandoust R, Mousavi SY. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. Construction and building materials 35;752–60, (2012).
[36].Sonebi M. Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: modelling using factorial experimental plans. Cement and Concrete Research 34;1199–208, (2004).
[37].Boukendakdji O, Kenai S, Kadri EH, Rouis F. Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete. Construction and building materials 23;2593–8, (2009).
[38].Kırca O, Turanlı L, Erdogan TY. Effects of retempering on consistency and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing. Cement and Concrete Research 32;441–5, (2002).
[39].Erdogdu S. Effect of retempering with superplasticizer admixtures on slump loss and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing. Cement and Concrete Research 35:907–12, (2005).
sources. Construction and building materials 26;490–6, (2012) .
[18].Sahmaran M, ? zkan N, Keskin SB, Uzal B, Yaman I? , Erdem TK. Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts. Cement and Concrete Research 38:930–7, (2008).
[19].Hassan AAA, Lachemi M, Kh.M.A. Hossain. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. Cement & Concrete Composites 34;801–7, (2012).
[20].Heba A. Mohamed. Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. Ain Shams Engineering Journal 2;79–6, (2011).
[21].Felekoglu B, Turkel S, Baradan B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. Building and Environment 42; 1795–802, (2007).
[22].Gesoglu M, Guneyisi E, Ozbay E. 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;1847–54, (2009).
[23].Sabet FA, Libre NA, Shekarchi M. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. Construction and Building Materials 44;175–84, (2013).
[24].Valipour M, Pargar F, Shekarchi M, Khani S. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. Construction and Building Materials 41;879–88, (2013).
[25].Yazici H. The effect of silica fume and high-volume class C fly ash on the mechanical properties chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-consolidating concrete. J Construction and building materials 22;456–62, (2008).
[26].Domone PL. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. Cement and concrete composites 29;1–12, (1997).
[27].CEB-FIB model code 1990. Committee Euro-International du Beton. Thomas Telford, London, (1993).
[28].Parra C, Valcuende M, Gomez F. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. Construction and building materials 22;201–7, (2011).

Combined Effect of Silica Fume and Zeolite on The Fresh and Hardened Properties of Self-Compacted Concrete

M. M. Ranjbar*
Assistant Professor Department of Civil Engineering, University of Guilan
R. Madandoust
Associate Professor Department of Civil Engineering, University of Guilan
S.Y. Mousavi
Ph.D. student of Civil Engineering, University of Guilan
(Received: 2014/2/19- Accepted: 2014/6/1)

Abstract

The usages of different additions as a cement replacement in the production of self-compacted concrete (SSC) can lead to a lower material cost, lower environmental pollution, energy consumption and recycling by-product materials. Although, the inclusion of additions may enhance certain properties of SCC, the others may be worsening. To overcome this problem, the combined use of the additions has been recently recommended by researchers. In this respect, the main objective of the present study is to investigate the fresh and hardened properties of SCC made with binary and ternary cementitious blends of silica fume and zeolite. Fresh properties of SCC will be examined by slump flow, visual stability index, T_{50}, V-funnel, L-box and sieve segregation resistance tests. The hardened properties were tested for compressive strength (at different ages), splitting tensile strength, initial and final absorption. To simulate the real-world applications, slump flow and compressive strength changes with hauling time were also considered.

The fresh concrete test results revealed that by substituting optimum levels of silica fume and zeolite in SCC, satisfactory workability and rheological properties can be achieved. Silica fume inclusion enhanced both early ages and long-term strength of SCC with zeolite. Moreover, reduction in the slump flow retention of the SCC mixtures containing zeolite was compensated by using silica fume.

Keywords: Self-compacted concrete, Workability, Strength, Hauling time.

* Corresponding Author: mmranjbar@ymail.com