

تأثیر استفاده از ژئولیت، میکروسیلیس و متاکائولن بر کارایی و مقاومت بتن خود متراکم

جمال احمدی*^۱، احمد بیگدلو^۲ و مهدی سلیمانی راد^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

^۲ مربی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

(دریافت: ۹۵/۴/۱۳، پذیرش: ۹۵/۱۱/۹، نشر آنلاین: ۹۵/۱۱/۱۰)

چکیده

بتن خود متراکم در دو دهه گذشته مخصوصاً در صنعت پیش ساخته به دلیل توانایی متراکم شدن بدون نیاز به ویبره استفاده فزاینده‌ای داشته است. امروزه استفاده از بتن خود متراکم در سازه‌های با میلگردگذاری پرازدحام می‌تواند راه‌حل مناسبی برای رفع مشکلات ناشی از تراکم مکانیکی باشد. برای جلوگیری از جداسازی و آب‌انداختگی بتن خود متراکم می‌توان از پرکننده‌ها یا افزودنی‌های نگهدارنده ویسکوزیته استفاده کرد. در این مطالعه تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف ژئولیت، متاکائولن و میکروسیلیس بر کارایی و خواص سخت شده بتن خود متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار از ۳۱ طرح اختلاط استفاده شده است. کارایی بتن خود متراکم با آزمایش‌های جریان اسلامپ، قیف ۷ و جعبه L، و نیز مشخصات سخت شده آن با مقاومت فشاری آزمایش شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ژئولیت، میکروسیلیس و متاکائولن در بتن خود متراکم در کنار استفاده از روان کننده مناسب، مشکلات ناپایداری از قبیل انسداد، جداسازی و آب‌انداختگی را کاهش می‌دهد. افزایش لزجت مخلوط‌ها در درصد‌های بالای مصرف در کنار قابلیت عبور و قابلیت جریان در محدوده‌های قابل قبول توصیه شده است. مقاومت فشاری اکثر بتن‌ها نیز نسبت به طرح شاهد افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ژئولیت، میکروسیلیس، متاکائولن، کارایی، مقاومت.

۱- مقدمه

می‌شود. به طور کلی کارایی مخلوط بتن توسط مقدار آب، مقدار سیمان، دانه‌بندی مصالح سنگی و دیگر ویژگی‌های فیزیکی آنها، افزودنی‌های معدنی و شیمیایی و سایر عوامل مؤثر کنترل می‌شود. تأثیر این عوامل بر روی کارایی بتن خود متراکم توسط آزمایش‌هایی از قبیل جریان اسلامپ، جعبه L شکل و غیره قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

به دلیل لرزاندن بتن معمولی تخلخل در ناحیه انتقال مرزی به دلیل انباشتگی سیال منفذی بیشتر است. این پدیده به علت عدم لرزاندن در بتن خود متراکم روی نمی‌دهد و از این رو می‌توان گفت که ناحیه انتقالی مرزی به ندرت با ماتریس توده سیمان تفاوت دارد (boel و De Schutter, ۲۰۰۳). همچنین استفاده از مواد پودری خصوصاً افزودنی‌های معدنی موجب بهبود ریزساختار و در نتیجه کاهش تخلخل بتن خود متراکم می‌شود. علاوه بر این، بتن خود متراکم مزایای دیگری نیز نسبت به بتن معمولی دارد. از این مزایا می‌توان به شکل پذیری بیشتر، حفظ شرایط اولیه (خواص

پیشرفت در تکنولوژی بتن منجر به توسعه نوع جدیدی از بتن به نام بتن خود متراکم (SCC) شده است. این نوع بتن بسیار روان بوده و می‌تواند با حفظ حالت همگنی قالب‌های با شکل پیچیده و آرماتوربندی زیاد را بدون نیاز به ویبره و یا سایر روش‌های تراکم پر کند (Zhu و همکاران، ۲۰۰۱). بتن خود متراکم شکل و ترکیب یکنواخت خود را در جریان حمل و بتن‌ریزی بدون وقوع جداسازی و آب‌انداختگی حفظ می‌نماید.

در بتن خود متراکم میزان مصرف مواد پودری بیشتر بوده و مصرف شن در آن محدود می‌شود. این عوامل در کنار استفاده زیاد از فوق‌روان کننده برای رسیدن به کارایی بالا و عدم استفاده از لرزاندنده‌های مکانیکی موجب متفاوت شدن این بتن با بتن معمولی شده است (El Mir و همکاران، ۲۰۱۵). کارایی به عنوان خاصیتی از بتن تازه که تعیین کننده میزان سهولت و یکنواختی مخلوط در حین اختلاط، ریختن، متراکم کردن و پرداخت سطح است تعریف

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۹۸-۹۱۲۳۵۷۴۸۶۲

فعالیت بسیار بالاست. مطالعات پژوهشگران حاکی از افزایش مقاومت بتن معمولی با افزودن متاکائولن به ویژه در روزهای اولیه عمل‌آوری است. پژوهشگران نشان داده‌اند در روزهای اولیه عمل‌آوری فعالیت بالای پوزولانی متاکائولن باعث افزایش سرعت کسب مقاومت فشاری و همچنین بهتر شدن وضعیت تخلخل خمیر سیمان نسبت به حالتی که در خمیر سیمان از دوده سیلیسی و یا خاکستر بادی استفاده شده است، می‌شود (Poon و همکاران، ۲۰۰۱).

۲- اهمیت تحقیق

با توجه به تأثیر مثبت مواد پوزولانی بر خواص بتن معمولی که به خوبی شناخته شده است، در سال‌های اخیر تحقیقاتی در مورد تأثیر این مواد بر خواص بتن خود متراکم نیز انجام شده است. با این وجود در مورد تأثیر بعضی از افزودنی‌های معدنی نظر قطعی وجود نداشته و نیاز به تحقیقات بیشتر است. از این رو در این مقاله تلاش گردیده تا با استفاده از زئولیت متاکائولن و میکروسیلیس کارایی و مقاومت بتن بهبود یافته و همچنین با تعیین درصد بهینه استفاده از این مواد مقدار مصرف سیمان کاهش پیدا کند.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح و آزمایش‌ها

در این مطالعات نوع سیمان مصرفی سیمان پرتلند تیپ ۲ می‌باشد. از زئولیت پودر شده، میکروسیلیس و متاکائولن به عنوان مواد افزودنی معدنی استفاده شده است. مشخصات سیمان و مواد افزودنی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سیمان و مواد افزودنی

چگالی (g/cm ³)	سیمان	زئولیت	میکروسیلیس	متاکائولن
۳/۱۵	۳/۱۵	۲/۲	۲/۲	۲/۶
نرمی (m ² /gr)	۳۰	۳۲	۲۵-۳۰	۲۵-۲۹
ترکیبات شیمیایی (%)				
CaO	۶۳/۲۰	۱/۶۸	۰/۴۳	۰/۲۰
SiO ₂	۲۱/۳۱	۶۷/۷۹	۹۱/۷۰	۵۲/۱۰
Al ₂ O ₃	۴/۶۱	۱۳/۶۶	۱/۱۵	۴۲/۸۰
Fe ₂ O ₃	۳/۶۰	۱/۴۴	۰/۵۵	۱/۶۰
MgO	۲/۴۰	۱/۲۰	۱/۴۰	۰/۲۱
SO ₃	۱/۹۷	۰/۵۰	۰/۲۴	۰/۰۰
K ₂ O	۰/۶۰	۱/۴۳	۲/۲۰	۰/۳۲
Na ₂ O	۰/۳۰	۲/۰۴	۱/۳۵	۰/۱۱
L. O. I	۲/۰۵	۱۰/۳۲	۱/۰۰	۰/۵۷

بتن تازه) در مدت زمان اجرا، قابلیت ساخت مقاطع با میلگردگذاری متراکم، بهبود کیفیت بتن اجرا شده به دلیل حذف فاکتورهای انسانی تراکم، کاهش سر و صدا و دستیابی به کیفیت مناسب سطح تمام شده بتن اشاره کرد (کوهدرق و شیردل، ۱۳۹۰). با این وجود در مقایسه با بتن معمولی، هزینه مصالح بتن خود متراکم بیشتر بوده و نیروی کار با مهارت بیشتر و کنترل کیفیت دقیق‌تر برای ساخت این نوع بتن لازم است.

با توجه به رشد روزافزون استفاده از بتن در اجرای سازه‌های مختلف، بحران انرژی و منابع طبیعی بیش از حد خودنمایی می‌کنند و همچنین اهمیت موضوع حفظ محیط زیست بشر نیز قابل چشم‌پوشی نیست. سیمان به عنوان یکی از اجزای تشکیل دهنده بتن که از یک سو انرژی زیادی برای تولید آن صرف شده و از سوی دیگر موجب تولید حدود هشت درصد گاز کربنیک در جهان می‌شود (Mehta, ۲۰۰۲)، توجه ویژه‌ای را به خود جلب می‌کند. جایگزینی بخشی از سیمان با مواد افزودنی صنعتی و همچنین مواد معدنی، راه‌حلی عملی در راستای توسعه پایدار است. استفاده از انواع پوزولان‌ها به عنوان مواد جایگزین سیمان در بتن علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و ذخیره کردن مقدار قابل توجهی انرژی در فرایند تولید سیمان و مشارکت در توسعه پایدار از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری دراز مدت و دوام بتن را بهبود می‌بخشند (رضانیانپور و همکاران، ۱۳۸۸). جایگزینی بخشی از سیمان با مواد افزودنی، راه‌حلی عملی در کاهش قیمت بتن خود متراکم می‌باشد، به خصوص اگر این افزودنی‌ها مواد جانبی صنایع باشند. گزارش شده که با جایگزینی تا ۵۰ درصد از سیمان پرتلند با مواد افزودنی معدنی، بتن خود متراکم با هزینه مقرون به صرفه قابل تولید خواهد بود (chan و Ji, ۱۹۹۹).

مواد افزودنی معدنی مانند خاکستر بادی، روباره کوره آهن‌گدازی و دوده سیلیس به طور موفقیت‌آمیزی در بتن خود متراکم استفاده شده است (Gesoglu و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از افزودنی‌های بسیار متداول خاکستر بادی است که فقط در برخی کشورها قابل تولید بوده و هزینه تهیه آن زیاد است. بنابراین یافتن افزودنی‌های معدنی ارزانتری که به طور محلی در دسترس باشند، ضروری است. یکی از این افزودنی‌های معدنی زئولیت می‌باشد که در ایران به وفور یافت شده و قیمت آن بسیار کمتر از خاکستر بادی و دوده سیلیس است. گزارش شده که فعالیت پوزولانی زئولیت مابین فعالیت پوزولانی دوده سیلیس و خاکستر بادی است (chan و Ji, ۱۹۹۹). تحقیقات روی خواص زئولیت بر بتن معمولی نشان می‌دهد که این ماده می‌تواند از آب‌انداختگی و جداسازی بتن تازه جلوگیری کند، نفوذپذیری بتن سخت شده را کاهش دهد و سبب افزایش مقاومت و پایایی بتن شود (peng و feng, ۲۰۰۵). از دیگر پوزولان‌ها متاکائولن است که یک ماده آلومیناسیلیکاتی با

برای ارزیابی رفتار رئولوژی مخلوطها از آزمایشهای جریان اسلامپ، جعبه L و قیف V شکل استفاده شد. همچنین آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن‌ها بر طبق استاندارد BS 1881-116 در سنین ۷ و ۲۸ روز انجام گرفت. نمونه‌های آزمایشگاهی مکعبی ۱۰ سانتی متری پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان آزمایش در حوضچه آب با دمای $20 \pm 2^\circ\text{C}$ غوطه‌ور شدند.

۲-۳- مخلوطهای آزمایش

مخلوطهای بتن در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۴ و با عیار سیمانی 450 kg/m^3 ساخته شدند. ترکیب مصالح سنگی در مخلوطها با استفاده از نواحی دانه‌بندی استاندارد ارائه شده در روش ملی طرح مخلوط بتن به صورت ۳۰ درصد شن ۵۵ درصد ماسه و ۱۵ درصد ریزدانه انتخاب شد. مواد افزودنی نیز در دو حالت جداگانه و ترکیب شده در طرحهای اختلاط مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات مخلوطهای حاوی یک نوع ماده افزودنی در جدول (۳) و مخلوطهای حاوی دو نوع ماده افزودنی در جدول (۴) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که طرحهای ارائه شده در این جداول نتیجه یک سری مطالعات آزمایشگاهی مقدماتی جهت تعیین محدوده درصدهای بهینه بوده است.

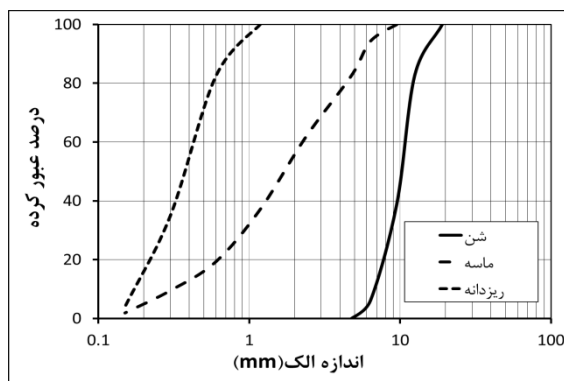
۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- جریان اسلامپ

نتایج این آزمایش که به صورت قطر پخش شدگی بتن آزموده می‌شود، بازگوکننده تنش تسلیم بتن تازه و معیاری برای ارزیابی قابلیت جریان و پرکردن بتن خود متراکم می‌باشد.

جدول ۲- خواص فیزیکی سنگدانه‌ها

مشخصه	شن	ماسه	ریزدانه
چگالی اشباع با سطح خشک	۲/۶۲	۲/۵۴	۲/۵۴
ظرفیت جذب آب (%)	۲/۰	۲/۲	۲/۵



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های استفاده شده ترکیبی از ماسه ریزدانه رودخانه‌ای (عبوری از الک شماره ۱۶) به عنوان پرکننده، ماسه طبیعی رودخانه‌ای و شن شکسته با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی متر بوده است. جدول (۲) مشخصات سنگدانه‌های استفاده و شکل (۱) نمودار دانه‌بندی آنها را نشان می‌دهد.

مقدار افزودنی فوق‌روان‌کننده در هر یک از طرحهای اختلاط بر اساس دستیابی به کارایی قابل قبول و جلوگیری از پدیده جدایش سنگدانه‌ها و بر اساس آزمون و خطا در طرحهای اختلاط مقدماتی بدست آمده است. لازم به ذکر است که برای این منظور از یک فوق‌روان‌کننده بر پایه کربوکسیلاتی (با نام تجاری WRM-TPP) استفاده گردیده است.

جدول ۳- مشخصات مخلوطهای بررسی شده حاوی یک نوع ماده افزودنی

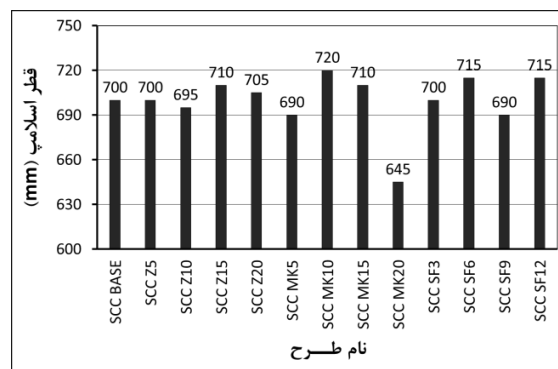
SP (%)	اجزای تشکیل دهنده (kg/m^3)						درصد جایگزینی مواد افزودنی			نام طرح		
	متاکائولن	میکروسیلیس	زنولیت	ریزدانه	ماسه	شن	آب	سیمان	زنولیت		میکروسیلیس	متاکائولن
۱/۰	-	-	-	۲۵۰	۹۳۹	۵۱۹	۱۹۸	۴۵۰	-	-	-	C(شاهد)
۱/۰	-	-	۲۲/۵	۲۴۹	۹۳۴	۵۱۶	۱۹۸	۴۲۸	-	-	۵	SCC Z5
۱/۰	-	-	۴۵	۲۴۷	۹۳۰	۵۱۴	۱۹۸	۴۰۵	-	-	۱۰	SCC Z10
۱/۲۵	-	-	۶۷/۵	۲۴۶	۹۲۶	۵۱۲	۱۹۸	۳۸۳	-	-	۱۵	SCC Z15
۱/۳	-	-	۹۰	۲۴۵	۹۲۱	۵۰۹	۱۹۸	۳۶۰	-	-	۲۰	SCC Z20
۰/۹	-	۱۳/۵	-	۲۴۹	۹۳۶	۵۱۷	۱۹۸	۴۳۷	-	۳	-	SCC SF3
۰/۹	-	۲۷	-	۲۴۸	۹۳۳	۵۱۶	۱۹۸	۴۲۳	-	۶	-	SCC SF6
۰/۹	-	۴۰/۵	-	۲۴۷	۹۳۰	۵۱۴	۱۹۸	۴۱۰	-	۹	-	SCC SF9
۱/۲	-	۵۴	-	۲۴۷	۹۲۷	۵۱۲	۱۹۸	۳۹۶	-	۱۲	-	SCC SF12
۰/۹	۲۲/۵	-	-	۲۴۹	۹۳۷	۵۱۸	۱۹۸	۴۲۸	۵	-	-	SCC MK5
۱/۰	۴۵	-	-	۲۴۹	۹۳۴	۵۱۶	۱۹۸	۴۰۵	۱۰	-	-	SCC MK10
۱/۰	۶۷/۵	-	-	۲۴۷	۹۳۲	۵۱۵	۱۹۸	۳۸۳	۱۵	-	-	SCC MK15
۱/۱	۹۰	-	-	۲۴۷	۹۳۰	۵۱۴	۱۹۸	۳۶۰	۲۰	-	-	SCC MK20

جدول ۴- مشخصات مخلوط‌های بررسی شده حاوی ترکیب دو نوع ماد افزودنی

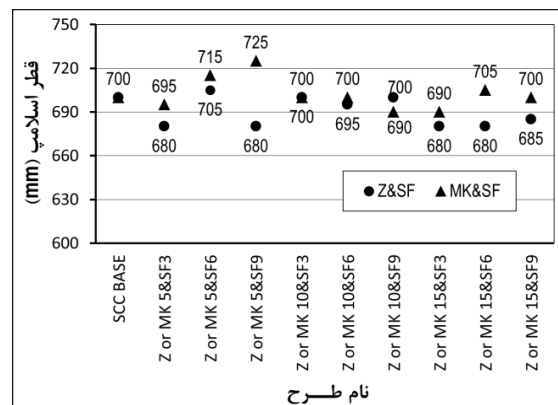
نام طرح	درصد جایگزینی مواد افزودنی			اجزای تشکیل دهنده (kg/m ³)						نام طرح	
	زئولیت	میکروسیلیس	متاکائولن	سیمان	آب	شن	ماسه	ریزدانه	زئولیت		میکروسیلیس
SCC Z5&SF3	۵	۳	-	۴۱۴	۱۹۸	۵۱۵	۹۳۱	۲۴۸	۲۲/۵	۱۳/۵	۱/۰
SCC Z5&SF6	۵	۶	-	۴۰۱	۱۹۸	۵۱۳	۹۲۹	۲۴۷	۲۲/۵	۲۷	۱/۰
SCC Z5&SF9	۵	۹	-	۳۸۷	۱۹۸	۵۱۲	۹۲۶	۲۴۶	۲۲/۵	۴۰/۵	۱/۰
SCC Z10&SF3	۱۰	۳	-	۳۹۲	۱۹۸	۵۱۲	۹۲۷	۲۴۷	۴۵	۱۳/۵	۱/۰
SCC Z10&SF6	۱۰	۶	-	۳۷۸	۱۹۸	۵۱۱	۹۲۴	۲۴۶	۴۵	۲۷	۱/۰
SCC Z10&SF9	۱۰	۹	-	۳۶۵	۱۹۸	۵۰۹	۹۲۲	۲۴۵	۴۵	۴۰/۵	۱/۱
SCC Z15&SF3	۱۵	۳	-	۳۶۹	۱۹۸	۵۱۰	۹۲۳	۲۴۶	۶۷/۵	۱۳/۵	۱/۱
SCC Z15&SF6	۱۵	۶	-	۳۵۶	۱۹۸	۵۰۸	۹۲۰	۲۴۵	۶۷/۵	۲۷	۱/۱
SCC Z15&SF9	۱۵	۹	-	۳۴۲	۱۹۸	۵۰۷	۹۱۷	۲۴۴	۶۷/۵	۴۰/۵	۱/۲
SCC MK5&SF3	-	۳	۵	۴۱۴	۱۹۸	۵۱۵	۹۳۱	۲۴۸	-	۱۳/۵	۲۲/۵
SCC MK5&SF6	-	۶	۵	۴۰۱	۱۹۸	۵۱۳	۹۲۹	۲۴۷	-	۲۷	۲۲/۵
SCC MK5&SF9	-	۹	۵	۳۸۷	۱۹۸	۵۱۲	۹۲۶	۲۴۶	-	۴۰/۵	۰/۹۵
SCC MK10&SF3	-	۳	۱۰	۳۹۲	۱۹۸	۵۱۲	۹۲۷	۲۴۷	-	۱۳/۵	۴۵
SCC MK10&SF6	-	۶	۱۰	۳۷۸	۱۹۸	۵۱۱	۹۲۴	۲۴۶	-	۲۷	۴۵
SCC MK10&SF9	-	۹	۱۰	۳۶۵	۱۹۸	۵۰۹	۹۲۲	۲۴۵	-	۴۰/۵	۴۵
SCC MK15&SF3	-	۳	۱۵	۳۶۹	۱۹۸	۵۱۰	۹۲۳	۲۴۶	-	۱۳/۵	۶۷/۵
SCC MK15&SF6	-	۶	۱۵	۳۵۶	۱۹۸	۵۰۸	۹۲۰	۲۴۵	-	۲۷	۶۷/۵
SCC MK15&SF9	-	۹	۱۵	۳۴۲	۱۹۸	۵۰۷	۹۱۷	۲۴۴	-	۴۰/۵	۶۷/۵

SP: Super plasticizer

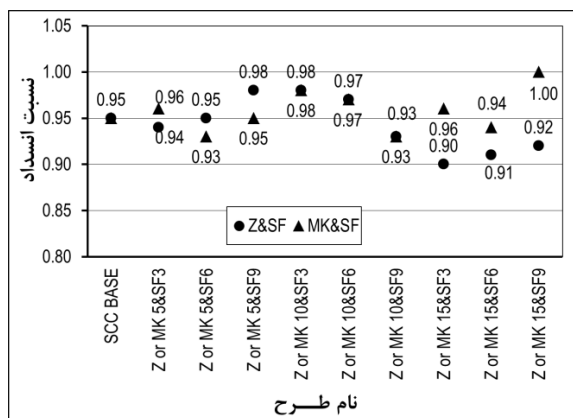
بر طبق راهنمای بتن خود متراکم اگر مقدار میانگین دو قطر کمتر از ۵۵۰ میلی‌متر باشد تنش تسلیم بتن زیاد بوده و کارپذیری آن کم است و اگر مقدار میانگین دو قطر از ۸۵۰ میلی‌متر بیشتر باشد تنش تسلیم کم بوده و احتمال جداسدگی وجود خواهد داشت (The European guidelines for SCC, ۲۰۰۵). نتایج این آزمایش در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود اسلامپ همه طرح‌های اختلاط در محدوده ۶۴۵ تا ۷۲۵ میلی‌متر قرار دارد که برای کارهای متداول بتن‌ریزی بسیار مناسب است. در هیچ یک از طرح‌ها جداسدگی و آب‌انداختگی مشاهده نشد و تمام طرح‌ها از قابلیت جریان خوبی برخوردار بودند که این امر ناشی از دانه‌بندی و مقدار آب به مواد سیمانی مناسب و فوق‌روان‌کننده کافی می‌باشد. در شکل (۳) مشاهده می‌شود که اسلامپ اکثر طرح‌های حاوی زئولیت و میکروسیلیس نسبت به طرح شاهد کمتر است علت این پدیده را می‌توان به نرمی بیشتر زئولیت و میکروسیلیس نسبت داد. لازم به ذکر است افزایش سطح ویژه مواد پوزولانی هر چند تأثیر کاهنده بر روی ویژگی‌های روانی بتن به دلیل ثابت بودن نسبت آب به سیمان دارد ولی به دلیل افزایش سرعت واکنش‌زایی با آب تا حدودی کندی سرعت آبیگری جبران می‌شود. همچنین این مواد با خاصیت پرکنندگی مناسب، پیوستگی و یکنواختی بین اجزای تشکیل دهنده بتن را افزایش داده و بنابراین باعث کاهش قطر پخش شدگی بتن در آزمایش جریان اسلامپ می‌شوند. همچنین متوسط جریان اسلامپ طرح‌های حاوی ترکیب متاکائولن و میکروسیلیس از متوسط



شکل ۲- نتایج آزمایش جریان اسلامپ در مخلوط‌های حاوی یک نوع ماده افزودنی



شکل ۳- نتایج آزمایش جریان اسلامپ در مخلوط‌های حاوی ترکیب دو نوع ماده افزودنی



شکل ۵- نتایج آزمایش جعبه L در مخلوط‌های حاوی ترکیب دو نوع ماده افزودنی

اگر زمان تخلیه بین ۹ تا ۲۵ ثانیه باشد لزجت بتن بالا رفته احتمال جداسازی کم می‌شود ولی سطح پرداخت نهایی ممکن است دچار مشکل شود (The European guidelines for SCC, ۲۰۰۵).

نتایج آزمایش قیف V در شکل (۶) برای بتن‌های حاوی یک نوع ماده افزودنی و در شکل (۷) برای بتن‌های حاوی ترکیب دو نوع ماده افزودنی ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود زمان تخلیه همه مخلوط‌ها کمتر از ۸ ثانیه بوده و با افزایش درصد مصرف افزودنی‌ها کمتر نیز می‌شود. این کاهش در زمان که در مخلوط‌های حاوی زئولیت بیشتر به چشم می‌خورد ناشی از مصرف بیشتر فوق‌روان‌کننده به دلیل افزایش لزجت بتن‌های حاوی مواد افزودنی است. در شکل (۷) می‌توان ملاحظه کرد که با شروع جایگزینی مواد افزودنی، سرعت خروج بتن از قیف نسبت به طرح مبنا کاهش می‌یابد، هرچند در ادامه با مصرف بیشتر فوق‌روان‌کننده این کاهش تا حدی جبران می‌گردد. بنابراین این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که افزودنی‌ها خصوصاً زئولیت تأثیر بیشتری در افزایش لزجت بتن دارند و به همین منظور از فوق‌روان‌کننده بیشتری استفاده می‌شود. با این حال و با وجود این که زمان تخلیه در همه مخلوط‌ها کمتر از ۸ ثانیه می‌باشد در هیچ یک از طرح‌ها آب‌انداختگی و جداسازی مشاهده نشد گرچه طرح‌های حاوی میکروسیلیس حساسیت بیشتری داشتند به طوری که با افزایش مقدار کمی از فوق‌روان‌کننده آب‌انداختگی در مخلوط به چشم می‌خورد. لازم به ذکر است که در صورتی که از آب اضافی (افزایش نسبت آب به سیمان) برای جبران افت کارایی بتن به دلیل استفاده از پوزولان‌های با ضریب نرمی بالاتر از سیمان استفاده می‌شد علاوه بر افت قابل توجه مشخصات مکانیکی بتن، احتمالاً پدیده آب‌انداختگی و جداسازی در مخلوط‌های ساخته شده تشدید می‌یافت.

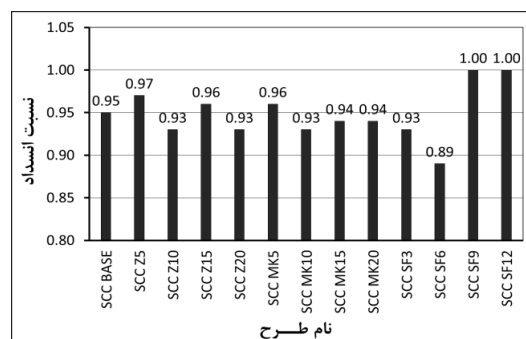
جریان اسلامپ طرح‌های حاوی ترکیب زئولیت و میکروسیلیس بیشتر بوده که بیانگر تأثیر مناسب متاکائولن و میکروسیلیس در تنش تسلیم پایین و قابلیت پراکندگی بهتر است.

۴-۲- جعبه L شکل

این آزمایش پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها را ارزیابی کرده و بیانگر قابلیت عبور بتن خود متراکم از فواصل تنگ میان میلگردها می‌باشد. نتایج این آزمایش در شکل‌های (۴) و (۵) آمده است. در حین آزمایش در هیچ کدام از طرح‌ها انسداد مشاهده نشد و همانگونه که در شکل‌ها مشخص است نسبت انسداد^۱ در همه مخلوط‌ها در محدوده ۰/۸ تا ۱/۰ به دست آمده است. نسبت انسداد از تقسیم ارتفاع بتن در بخش افقی به ارتفاع بتن در بخش عمودی جعبه L شکل به دست می‌آید. محدوده ۰/۸ تا ۱/۰ برای نسبت انسداد توصیه شده است و هر چه این نسبت به ۱/۰ نزدیک‌تر باشد بتن از قابلیت عبور خوبی برخوردار است (EFNARK, ۲۰۰۲). در شکل (۴) تأثیر بهتر زئولیت و متاکائولن بر رفتار بتن خود متراکم در آزمایش جعبه L شکل مشاهده می‌شود. در این حالت نسبت انسداد تمام مخلوط‌ها بیشتر از ۰/۹۳ بوده و بیانگر قابلیت عبور مناسب بتن‌ها می‌باشد. از نتایج شکل (۵) نیز می‌توان تأثیر استفاده هم‌زمان از دو نوع افزودنی در بتن خود متراکم را بر روی قابلیت عبور مثبت ارزیابی کرد.

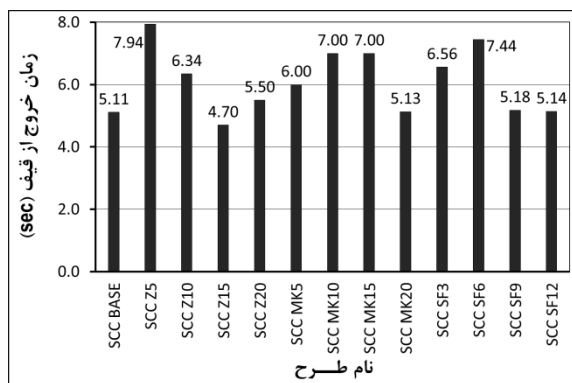
۴-۳- قیف V شکل

در این آزمایش مدت زمان خروج بتن از قیف V شکل استاندارد اندازه‌گیری شده، و به عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرکردن و لزجت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر زمان تخلیه کوچکتر یا مساوی ۸ ثانیه باشد بتن از لزجت کم، قابلیت پرکنندگی مناسب، توان خودترازی بالا و سطح پرداخت خوب برخوردار خواهد بود ولی احتمال جداسازی و آب‌انداختگی نیز وجود خواهد داشت.

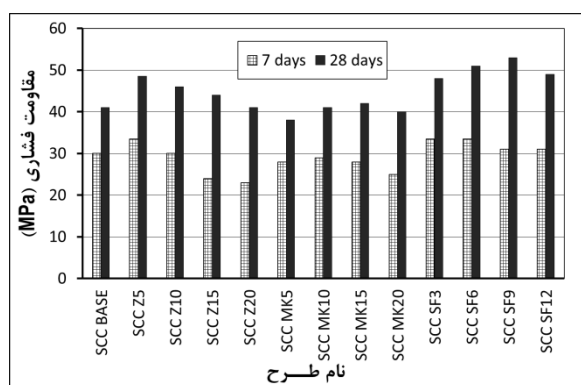


شکل ۴- نتایج آزمایش جعبه L در مخلوط‌های حاوی یک نوع ماده افزودنی

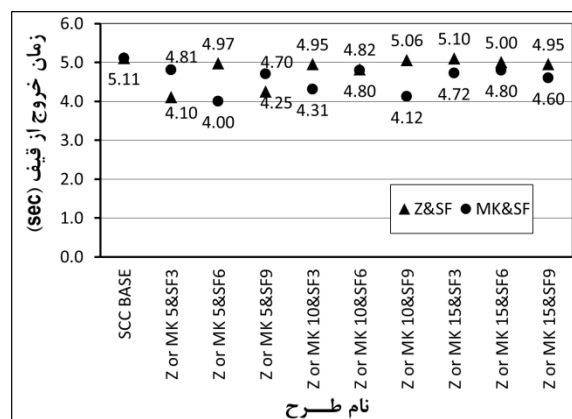
بهرتر و متراکم تر شدن ریز ساختار بتن علت این پدیده است. علت دیگر نیز درصد مواد سیلیسی موجود در این مواد و ضریب نرمی بالای آنهاست که از این منظر میکروسیلیس و ژئولیت برتری محسوسی نسبت به متاکائولن دارند. شکل (۹) تأثیر بهتر ترکیب ژئولیت و میکروسیلیس در مقاومت ۲۸ روزه را نسبت به ترکیب متاکائولن و میکروسیلیس به وضوح نشان می‌دهد. جایگزینی سیمان با ترکیب ۵ درصد ژئولیت و ۹ درصد میکروسیلیس بیشترین تأثیر را در مقاومت دارد به طوری که موجب افزایش ۲۷ درصدی آن نسبت به طرح شاهد شده است.



شکل ۶- نتایج آزمایش قیف ۷ در مخلوط‌های حاوی یک نوع ماده افزودنی



شکل ۸- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در مخلوط‌های حاوی یک نوع ماده افزودنی

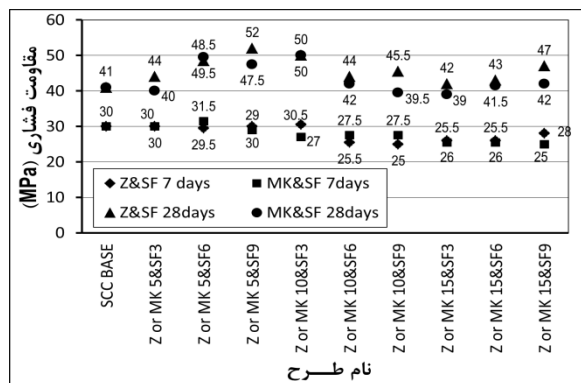


شکل ۷- نتایج آزمایش قیف ۷ در مخلوط‌های حاوی ترکیب دو نوع ماده افزودنی

در حالی که افزایش استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها به جای آب از بروز چنین مشکلی جلوگیری می‌نماید.

۴-۴- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های مورد مطالعه در شکل‌های (۸) و (۹) ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری ۷ روزه طرح‌های حاوی مواد افزودنی چه به صورت جداگانه و چه به صورت ترکیبی تفاوت چندانی با مقاومت نمونه شاهد ندارد و حتی در برخی موارد افت مقاومت نیز مشاهده می‌شود. علت این پدیده کندی واکنش‌زایی این مواد در سنین اولیه می‌باشد. در خصوص مقاومت فشاری ۲۸ روزه متاکائولن تأثیر چندانی در رشد مقاومت ندارد ولی ژئولیت و میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شوند به طوری که جایگزینی ۵ درصد از سیمان با ژئولیت موجب افزایش ۲۲ درصدی و جایگزینی ۹ درصد از سیمان با میکروسیلیس موجب افزایش ۲۹ درصدی مقاومت شده است. می‌توان گفت تشکیل ژل‌های ثانویه ناشی از واکنش $Ca(OH)_2$ (محصول فرعی واکنش سیمان با آب) با مواد سیلیسی موجود در مواد شبه سیمانی و در نتیجه



شکل ۹- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در مخلوط‌های حاوی ترکیب دو نوع ماده افزودنی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر مواد افزودنی ژئولیت، میکروسیلیس و متاکائولن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در مشخصات کارایی و مقاومت فشاری (به عنوان شاخصی از مشخصات مکانیکی) بتن خود متراکم پرداخته شده است. نتایج بررسی‌های انجام گرفته و همچنین آزمایش‌های صورت پذیرفته در قالب این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.

- Chan YN, Ji X, "Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes", *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21 (4), 293-300.
- El Mir A, Nehme SG, "Porosity of self-compacting concrete", *Procedia Engineering*, 2015, 123, 145-152.
- European Federation Dedicated to Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, (EFNARK), "Specification and guidelines for self-compacting concrete", February, 2002.
- Feng NQ, Peng GF, "Applications of natural zeolite to construction and building materials in china", *Construction and Building Materials*, 2005, 19, 579-584.
- Gesoğlu M, Güneysi E, Özbay 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*, 2009, 23 (5), 1847-1854.
- Mehta PK, "Greening of the concrete industry for sustainable development", *Concrete International*, July 2002, 23.
- Poon CS, Lam L, Kou S, Wong YL, Wong R, "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes", *Cement and Concrete Research*, 2001, 31 (9), 1301-1306.
- Prepared by a Project Group Comprising Five European Federations (BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARK), "The European guidelines for self-compacting concrete", May, 2005.
- Zhu W, Gibbs JC, Bartos PJM, "Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full scale structural elements", *Cement and Concrete Composites*, 2001, 23 (1), 57-64.

- (۱) استفاده از مواد افزودنی زئولیت، میکروسیلیس و متاکائولن در بتن خود متراکم در کنار استفاده از مقدار روان کننده مناسب، مشکلات ناپایداری شامل انسداد، جداسدگی و آب انداختگی را در طرح‌های اختلاط کاهش داده است.
- (۲) لزجت مخلوط‌ها (خصوصاً مخلوط‌های حاوی زئولیت) با افزایش مصرف مواد افزودنی افزایش یافته و این مشخصه در کنار قابلیت عبور و قابلیت جریان در محدوده‌های قابل قبول توصیه شده قرار دارد.
- (۳) بر مبنای نتایج به دست آمده، بتن‌های ساخته شده حاوی زئولیت یا میکروسیلیس کارپذیری بهتری نسبت به بتن‌های ساخته شده حاوی متاکائولن دارند. این تأثیر در درصد‌های بالای مصرف مواد افزودنی بیشتر مشاهده می‌شود.
- (۴) بتن‌های ساخته شده حاوی ترکیب مواد افزودنی متاکائولن و میکروسیلیس از منظر کارایی رفتار بهتری نسبت به بتن‌های ساخته شده حاوی ترکیب زئولیت و میکروسیلیس دارند ولی از لحاظ مقاومت ۲۸ روزه، مقاومت آنها کمتر است.
- (۵) مقاومت فشاری ۷ روزه اکثر طرح‌های حاوی زئولیت و متاکائولن از مقاومت نمونه شاهد کمتر و طرح‌های حاوی میکروسیلیس تقریباً مشابه با مقاومت نمونه شاهد است. متاکائولن تأثیر زیادی در مقاومت ۲۸ روزه ندارد ولی زئولیت و میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت ۲۸ روزه بتن خود متراکم می‌شوند. به عنوان مثال جایگزینی ۵ درصد از سیمان با زئولیت موجب افزایش ۲۲ درصدی و جایگزینی ۹٪ از سیمان با میکروسیلیس موجب افزایش ۲۹ درصدی مقاومت می‌شود.

۶- مراجع

- رضانیانپور ع، میرولد س، و آرامون ا، "اثر انواع پوزولان‌های طبیعی بر دوام بتن در برابر حمله کلریدی"، اولین کنفرانس ملی بتن، تهران، ایران، ۱۵ مهر، ۱۳۸۸.
- کوهدرق م، شیردل م، "بررسی خواص بتن خود متراکم و مقایسه آن با بتن معمولی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی"، کنگره ملی بتن خود متراکم، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان، ایران، ۲۳-۲۲ اردیبهشت، ۱۳۹۰.
- مجموعه استانداردها و آیین‌نامه‌های ساختمانی ایران، "روش ملی طرح مخلوط بتن"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، شماره نشریه ض-۴۷۹، ۱۳۸۶.
- Boel V, De Schutter G, "Pore structure of SCC in comparison with traditional concrete", Sixth CANMET/ACI Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Ghent University, Belgium, 2003.
- BS 1881-116, "Method for determination of compressive strength of concrete cubes", British Standard, Testing Concrete, 1983.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Zeolite, Silica Fume and Metakaolin on Workability Behavior and Strength of Self-Compacting Concrete (SCC)

Jamal Ahmadi*, Ahmad Bigdelo, Mehdi Soleimanirad

Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 03 July 2016; Accepted: 28 January 2017

Keywords:

Zeolite, Metakaolin, Silica fume, Workability, Strength

1. Introduction

Progress in concrete technology has led to the advancement of a new type of concrete, which is known as self-consolidating concrete or self-compacting concrete (SCC). It is a highly flowing concrete that spreads through dense reinforcement, reaches every corner of the formwork, and is consolidated under its own weight without vibration or any other means of compaction. Nowadays SCC is becoming more popular and demandable worldwide due to its workability and efficiency (El Mir et al. 2015 and Khayat. 1999).

Self-compacting concrete (SCC) mixes always contain a powerful superplasticizer and often use a lot of filler materials and/or viscosity-modifying admixtures. The superplasticizer is necessary for producing a highly fluid concrete mix, while the filler materials or viscosity agents are required to maintain sufficient stability/cohesion of the mixture, hence reducing bleeding, segregation, and settlement (Elyamany et al., 2014).

The present work aims to study the effect of filler types on workability behavior and hardened properties of self-compacting concrete (SCC).

2. Experimental programs

2.1. Materials

Type II Portland cement produced from Zanjan cement plant, and Zeolite (Z), Silica Fume (SF) and Metakaolin (M) as filler types were used in this study. The coarse aggregate was a crushed limestone with a maximum particle size of 12.5 mm whereas the fine aggregate was a mix of natural sand and fine-grained sand as a powder. A polycarboxylate type superplasticizer was also used to get a workable fresh concrete.

2.2. Mix proportions and test procedure

Concrete mixtures with water/binder ratio of 0.44 and cement contents of 450 kg/m³ were considered in this study. After preliminary tests, the combination of aggregates was selected in the form of 30% gravel, 55% natural sand and 15% fine-grained sand (powder). Filler materials were also used in two separate and combined forms. By using different types of fillers and filler percentages, Thirty-one concrete mixes were cast and Table 1 shows the mixture proportions of these mixes.

Slump flow, V-funnel, and L-box were performed on fresh concrete. Hardened properties included cube compressive strength according to BS 1881- Part 116. 100 mm cubes were used for each mixture. Each result represented in this section is the average of three tested specimens.

* Corresponding Author

E-mail addresses: j_ahmadi@znu.ac.ir (Jamal Ahmadi), ahmad_bigdelo@gmail.com (Ahmad Bigdelo), msr_soleimani@yahoo.com (Mehdi Soleimani Rad).

3. Results and discussion

3.1. Fresh concrete

Slump flow was used to measure the flowability performance of SCC in unconfined conditions. The diameter of slump flow in range of 660-750 mm is suitable for many normal applications (e.g. walls, columns) [4]. V-funnel flow time was used to assess the viscosity of concrete. The time value obtained does not measure the viscosity of SCC but is related to it by describing the rate of flow. If the V-funnel time is less than or equal to 8 seconds, the SCC has good filling ability even with congested reinforcement. It is capable of self-leveling and generally has the best surface finish. However, it is more likely to suffer from bleeding and segregation. With increasing flow time between 8 to 25 seconds, it is more likely to exhibit thixotropic effects, which may be helpful in limiting the formwork pressure or improving segregation resistance. Negative effects may be experienced regarding surface finish (blow holes) and sensitivity to stoppages or delays between successive lifts (The European guidelines for SCC, 2005). L-box test describes the capacity of the fresh mix to flow through confined spaces and narrow openings such as areas of congested reinforcement without segregation, loss of uniformity or causing blocking. If the concrete flows as freely as water, at rest it will be horizontal, so blocking ratio =1. Therefore the nearer this test value, the 'blocking ratio', is to unity, the better the flow of the concrete. The EU research team suggested a minimum acceptable value of 0.8 (EFNARK, 2002).

Table 1. Mixture proportions of concrete mixes

Mix name	Filler (%)			Constituent (kg/m ³)							SP* (%)	Test results			
	Z	SF	MK	Cement	Filler content			Water	Coarse agg	Sand		Powder	Diameter of slump flow (mm)	L-box blocking ratio	V-funnel flow time (s)
					Z	SF	MK								
SCC BASE	-	-	-	450	-	-	-	198	519	939	250	1.0	700	0.95	5.11
SCC Z5	5	-	-	428	22.5	-	-	198	516	934	249	1.0	700	0.97	7.94
SCC Z10	10	-	-	405	45	-	-	198	514	930	247	1.0	695	0.93	6.34
SCC Z15	15	-	-	383	67.5	-	-	198	512	926	246	1.25	710	0.96	4.70
SCC Z20	20	-	-	360	90	-	-	198	509	921	245	1.3	705	0.93	5.50
SCC SF3	-	3	-	437	-	13.5	-	198	517	936	249	0.9	690	0.96	6.00
SCC SF6	-	6	-	423	-	27	-	198	516	933	248	0.9	720	0.93	7.00
SCC SF9	-	9	-	410	-	40.5	-	198	514	930	247	0.9	710	0.94	7.00
SCC SF12	-	12	-	396	-	54	-	198	512	927	247	1.2	645	0.94	5.13
SCC MK5	-	-	5	428	-	-	22.5	198	518	937	249	0.9	700	0.93	6.56
SCC MK10	-	-	10	405	-	-	45	198	516	934	249	1.0	715	0.89	7.44
SCC MK15	-	-	15	383	-	-	67.5	198	515	932	247	1.0	690	1.00	5.18
SCC MK20	-	-	20	360	-	-	90	198	514	930	247	1.1	715	1.00	5.14
SCC Z5&SF3	5	3	-	414	22.5	13.5	-	198	515	931	248	1.0	680	0.95	5.11
SCC Z5&SF6	5	6	-	401	22.5	27	-	198	513	929	247	1.0	705	0.94	4.10
SCC Z5&SF9	5	9	-	387	22.5	40.5	-	198	512	926	246	1.0	680	0.95	4.97
SCC Z10&SF3	10	3	-	392	45	13.5	-	198	512	927	247	1.0	700	0.98	4.25
SCC Z10&SF6	10	6	-	378	45	27	-	198	511	924	246	1.0	695	0.98	4.95
SCC Z10&SF9	10	9	-	365	45	40.5	-	198	509	922	245	1.1	700	0.97	4.82
SCC Z15&SF3	10	3	-	369	67.5	13.5	-	198	510	923	246	1.1	680	0.93	5.06
SCC Z15&SF6	10	6	-	356	67.5	27	-	198	508	920	245	1.1	680	0.90	5.10
SCC Z15&SF9	10	9	-	342	67.5	40.5	-	198	507	917	244	1.2	685	0.91	5.00
SCC MK5&SF3	-	3	5	414	-	13.5	22.5	198	515	931	248	1.0	695	0.95	5.11
SCC MK5&SF6	-	6	5	401	-	27	22.5	198	513	929	247	1.0	715	0.96	4.81
SCC MK5&SF9	-	9	5	387	-	40.5	22.5	198	512	926	246	0.95	725	0.93	4.00
SCC MK10&SF3	-	3	10	392	-	13.5	45	198	512	927	247	1.0	700	0.95	4.70
SCC MK10&SF6	-	6	10	378	-	27	45	198	511	924	246	1.0	700	0.98	4.31
SCC MK10&SF9	-	9	10	365	-	40.5	45	198	509	922	245	1.0	690	0.97	4.80
SCC MK15&SF3	-	3	15	369	-	13.5	67.5	198	510	923	246	1.1	690	0.93	4.12
SCC MK15&SF6	-	6	15	356	-	27	67.5	198	508	920	245	1.1	705	0.96	4.72
SCC MK15&SF9	-	9	15	342	-	40.5	67.5	198	507	917	244	1.1	700	0.94	4.80

* Super plasticizer

Results of fresh concrete properties of all self-compacting concrete mixes are illustrated in Table 1. It is observed that the diameter of slump flow is between 645 and 725 mm which are very convenient for common applications. Blockage ratio is in the range of 0.8 to 1.0 and flow time is less than 8 seconds. Therefore, it can be concluded that all mixes satisfy the requirement of SCC limits. In addition, all mixtures had good viscosity, flowability, and passing ability at the time of testing, and the bleeding and segregation were not observed in any of them.

3.2. Compressive strength

Fig. 1 shows the variation in concrete compressive strength of SCC at the different ages of curing for different types of fillers. From this figure, generally one can obviously observe that there is no significant variation between between 7 days cube compressive strength of concretes containing fillers and that of base concrete. This trend is the same at 28 days between concretes containing metakaolin and the control concrete. However, the 28 days compressive strength of mixtures with silica or zeolite is greater than the control scheme (Fig. 1(a)). Moreover, the effect of zeolite and silica fume (two types of filler) in the concrete compressive strength at 28 days is better than the influence of metakaolin and silica fume (Fig. 1 (b)).

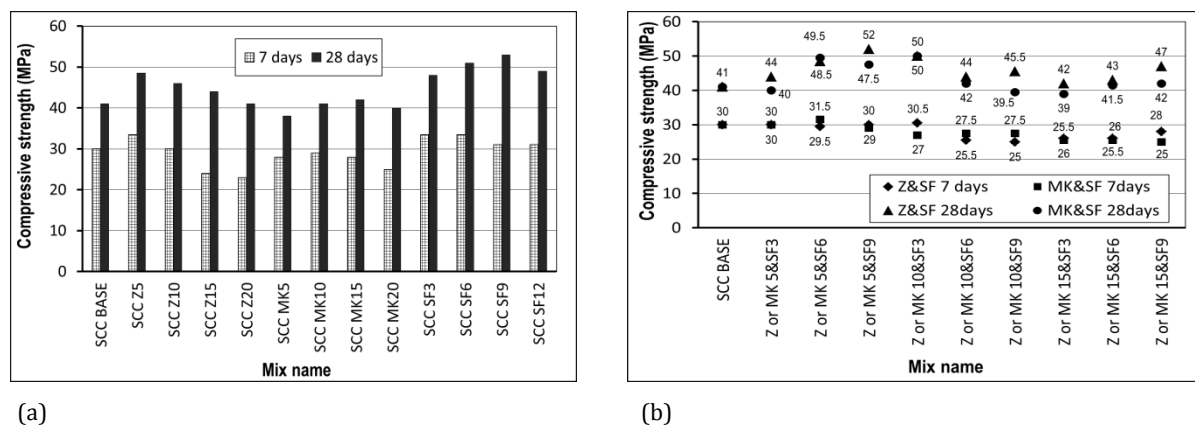


Fig. 1. Concrete compressive strength: (a) One type of filler in concrete, (b) Two types of filler in concrete

4. Conclusions

From the viewpoint of workability behavior, all mixtures containing one and two types of filler satisfy the requirement of SCC limits. In addition, they had good passing ability at the time of testing, and the bleeding and segregation were not observed in any of them. In concretes with two types of filler, the use of silica and metakaolin has better effect on the workability behavior than the use of silica and zeolite. From the viewpoint of mechanical properties, there is no significant variation between 7 days compressive strength of concretes containing fillers and that of base concrete. However, the 28 days compressive strength of mixtures containing silica or zeolite is greater than the control scheme. In concretes containing two types of filler, the combination of silica and zeolite has better effect on compressive strength than the combination of silica and metakaolin.

5. References

- El Mir A, Nehme SG, "Porosity of self-compacting concrete", *Procedia Engineering*, 2015, 123, 145-152.
- Elyamany HE, Abd Elmoaty M, Mohamed B, "Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self-compacting concrete and flow-able concrete", *Alexandria Engineering Journal*, 2014, 53, 295-307.
- European Federation Dedicated to Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, (EFNARK), "Specification and guidelines for self-compacting concrete", February, 2002.
- Khayat K, "Workability, testing and performance of self-consolidating concrete", *ACI Materials Journal*, 1999, 96(3), 346-353.