

تأثیر میکروسیلیس بر رفتار دراز مدت بتن خودمتراکم

منیره سنگی^۱، بهرام نوائی نیا^{۲*} و مرتضی حسینعلی بیگی^۳
^۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

از آنجا که بتن خودمتراکم در دهه گذشته به طور وسیعی در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار گرفته، لزوم شناخت رفتار آن به خصوص تغییر شکل‌های وابسته به زمان نظیر خزش و جمع‌شدگی اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این تحقیق با تهیه سه طرح اختلاط با مقاومت‌های فشاری مکعبی ۳۰، ۳۵ و ۴۵ مگاپاسکال به ترتیب با ۳، ۵ و ۸ درصد میکروسیلیس و ساخت ۲۱ نمونه بتن خودمتراکم برای هر طرح و در مجموع ۶۳ نمونه، اثر میکروسیلیس بر کرنش‌های وابسته به زمان شامل خزش و جمع‌شدگی و نیز خصوصیات مکانیکی نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول ارتجاعی بتن خودمتراکم (SCC) مورد بررسی قرار گرفت. با ثبت و اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها در بازه‌های زمانی مختلف به مدت ۲۵۰ روز و مقایسه آن‌ها برای سه طرح اختلاط مختلف مشخص گردید که کرنش ناشی از خزش و جمع‌شدگی در نمونه‌های بتنی با درصد کمتر میکروسیلیس، بیشتر می‌باشد. همچنین نتایج حاصل بیانگر آن است که استفاده از میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری، کششی و مدول ارتجاعی بتن خودمتراکم تأثیرگذار بوده و با افزایش مقدار آن خواص مکانیکی این بتن بهبود می‌یابد.

واژگان کلیدی: بتن خودمتراکم (SCC)، میکروسیلیس، خزش و جمع‌شدگی.

۱- مقدمه

میکروسیلیس به تنهایی می‌تواند شرایط مورد نیاز بتن خودمتراکم را در فاز تازه تأمین نماید.

Selvamong و Ravikumar [۲] تأثیر انواع متفاوت افزودنی‌ها را به صورت منفرد و توأم بر روی کارایی بتن خودمتراکم تازه مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که اثر ترکیبی افزودنی‌ها نظیر خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی نسبت به حالت منفرد استفاده از هر یک باعث بهبود کارایی بتن می‌گردد. Turk و همکاران [۳] با افزایش ۵٪ وزنی میکروسیلیس تا ۲۰٪ در نمونه‌های ساخته شده از بتن خودمتراکم و بررسی مقاومت آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد میکروسیلیس، پارامترهای مقاومتی و مدول ارتجاعی بتن مذکور به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. Atan و Awang [۴] اثر خاکستر پوسته برنج و Domone [۵] و Felekoglu [۶] تأثیر نسبت آب به سیمان را بر روی مقاومت کوتاه مدت بتن خودمتراکم مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این بعضی محققین رفتار بتن‌های خودمتراکم سبک و مقاومت بالا را تحت تأثیر افزودنی‌های مختلف به صورت تجربی بررسی کردند [۷ و ۸].

رابطه بین تنش و تغییر شکل بتن در حالت کلی و نیز بتن خودمتراکم تابعی از زمان می‌باشد. دو نوع از مهمترین تغییر شکل‌های وابسته به زمان بتن، خزش و جمع‌شدگی

بتن خودمتراکم (SCC) از مصالح نسبتاً نو پا در عرصه ساخت و ساز می‌باشد که بدون نیاز به تراکم یا ویبره و صرفاً تحت اثر وزن خود در میان انبوه اجزای سازه‌ای که عمدتاً شامل آرماتورهای فشاری، کششی و برشی می‌باشد جریان می‌یابد. مهم‌ترین ویژگی این نوع بتن کارایی بسیار بالا یا روانی و چسبندگی قابل توجه آن می‌باشد که سبب تمایز این نوع بتن گردیده و باعث کاربرد بسیار وسیع آن در انواع مختلف سازه‌ها شده است. از آنجایی که بتن خودمتراکم مصالح نسبتاً جدیدی می‌باشد پژوهش‌ها و تحقیقات در خصوص ویژگی رفتاری آن از جنبه‌های مختلف همچنان مطرح می‌باشند.

استفاده از مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی، سرباره آهن‌گذاری، دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج به دلیل کمک به کاهش مصرف سیمان و بهبود خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری و دوام بتن در چند دهه اخیر افزایش چشمگیری یافته است. عمده پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با این نوع بتن بیشتر مربوط به رفتار کوتاه مدت آن می‌باشد. فرشادفر و همکاران [۱] اثر پوزولان‌ها از جمله میکروسیلیس را بر روی بتن خودمتراکم تازه بررسی کرده و نتیجه گرفتند که استفاده از

شکل‌های طولانی مدت و سایر خواص این بتن ضروری به نظر می‌رسد.

در این تحقیق با تهیه سه طرح اختلاط و ساخت ۲۱ نمونه برای هر طرح اختلاط، اثر درصدهای مختلف میکروسلیس بر خزش و جمع‌شدگی بتن خودتراکم به مدت ۲۵۰ روز و نیز خصوصیات مکانیکی آن شامل مقاومت‌های فشاری، کششی و مدول ارتجاعی به طور تجربی تا سن ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

سنگ‌دانه

سنگ‌دانه مورد استفاده در این طرح آزمایشگاهی از معادن شهرستان آمل به دلیل کیفیت مناسب آن تهیه شده است. ماسه مصرفی از نوع رودخانه‌ای با ارزش ماسه‌ای ۹۵ درصد و مدول نرمی ۳/۱ و شن مصرفی شن شکسته با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر و وزن مخصوص ظاهری اشباع با سطح خشک 2700 kg/m^3 می‌باشد. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در ناحیه مورد قبول استاندارد ASTM [۱۳ و ۱۴] قرار دارد. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها

سنگ‌دانه	حداکثر قطر سنگ‌دانه	چگالی نسبی	جذب آب (درصد)	مدول نرمی
شن	۱۲/۵ mm	۲/۷	۱/۷۳	-
ماسه	-	۲/۶	۲/۵۷	۳/۱

سیمان

سیمان به کار رفته در این تحقیق سیمان پرتلند نوع II محصول کارخانه سیمان نکا با وزن مخصوص 3150 kg/m^3 است که مشخصات مربوط به ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی این سیمان به ترتیب مطابق جداول (۲) و (۳) می‌باشد [۱۵].

می‌باشند که به ترتیب در اثر اعمال تنش و در اثر قرارگیری بتن در محیط با رطوبت نسبی کمتر از ۱۰۰٪ اتفاق می‌افتد. از آن جا که میزان این تغییر شکل‌ها در مقایسه با تغییر شکل‌های آنی معمولاً قابل توجه هستند، بنابراین پدیده‌های خزش و جمع‌شدگی ممکن است اثرات مهمی در رفتار سازه‌ها داشته و باید به روش مناسبی در فرآیند تحلیل و یا طراحی سازه مدل‌سازی شوند. بزرگی خزش و نرخ پیشرفت آن تحت تأثیر فاکتورهای زیادی هستند. بعضی از این فاکتورها ناشی از خواص مخلوط سیمان می‌باشند؛ در حالی که بعضی دیگر بستگی به شرایط بارگذاری و محیطی دارند. با توجه به این که یک فاکتور مهم تأثیرگذار بر خزش، میزان تنش اعمالی است؛ هنگامی که تنش اعمالی به بتن کمتر از حدوداً نیمی از مقاومت فشاری بتن باشد، کرنش ناشی از خزش تقریباً متناسب با میزان تنش بوده که در این صورت خزش خطی خوانده می‌شود. در سطوح بالاتر تنش، خزش با نرخ سریع‌تری افزایش یافته و تغییرات آن نسبت به تنش غیرخطی می‌شود. این رفتار غیرخطی خزش در سطوح بالای تنش را می‌توان به افزایش ریزترک‌ها نسبت داد [۹]. در سازه‌های بتنی، تنش‌های فشاری تحت بارهای سرویس به ندرت از نصف مقاومت فشاری بتن فراتر می‌روند و لذا اثرات خزش غیرخطی از اهمیت کمتری نسبت به خزش خطی برخوردار است [۹].

به دلیل هزینه‌های نسبتاً بالا و نیز زمان‌بر بودن بررسی رفتار طولانی مدت بتن‌های ویژه، تحقیقات زیادی در خصوص آن به ویژه برای بتن خودتراکم صورت نگرفته است. Bermejo و همکاران [۱۰] با تغییر نوع سیمان به بررسی رفتار دراز مدت SCC پرداخته و نتیجه گرفتند که تأثیر آن بر کرنش‌های خزش و جمع‌شدگی روند مشخص و معینی ندارد و این کرنش‌ها کاملاً به نوع سیمان مورد استفاده بستگی دارند. Heirman و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر پودر سنگ بر رفتار خزش و جمع‌شدگی SCC به صورت آزمایشگاهی پرداخته و نتیجه گرفتند که با افزایش درصد پودر سنگ، کرنش‌های ناشی از خزش و جمع‌شدگی در قیاس با بتن معمولی افزایش می‌یابد که نتیجتاً این امر اثر نامناسب‌تر سازه‌ای را به دنبال خواهد داشت.

از آن‌جا که بر اساس تحقیقات انجام شده [۱۲]، بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی، جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن بیشتری را تجربه می‌کند که می‌توان دلیل آن را به بالا بودن حجم خمیر سیمان برای رسیدن به روانی لازم جهت طبقه‌بندی تحت عنوان بتن خودتراکم نسبت داد، بررسی چگونگی تأثیر عوامل مختلف از جمله مواد افزودنی بر تغییر

۲-۲- طرح اختلاط

مخلوط‌های بتن خودمتراکم غالباً شامل مقدار فراوانی از مواد پودری می‌باشند تا ویسکوزیته و خاصیت روانی بتن تازه را حفظ کنند. از آنجایی که استفاده از مقدار زیاد سیمان منجر به افزایش هزینه گردیده و حرارت زیادی نیز تولید می‌نماید، معمولاً از دیگر مواد پودری مانند پودر سنگ آهک و خاکستر بادی در مخلوط بتن خودمتراکم استفاده می‌شود. در این تحقیق جهت بررسی خزش و جمع‌شدگی، سه نوع بتن خودتراکم با مقاومت‌های فشاری مکعبی ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (SCC 30)، ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (SCC 35) و ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (SCC 45) در نظر گرفته شده است. در سه نوع بتن مذکور فقط درصد میکروسیلیس تغییر داده شده تا بدین ترتیب اثر میکروسیلیس بر تغییر شکل‌های طولانی مدت بتن شامل خزش و جمع‌شدگی مورد بررسی قرارگیرد. میزان مصالح مصرفی در هر یک از اختلاطها مطابق جدول (۵) می‌باشد.

جدول ۵- طرح اختلاط بتن‌ها

ترکیبات	SCC 30	SCC 35	SCC 45
سیمان (kg/m^3)	۲۸۰	۲۸۰	۲۸۰
شن (kg/m^3)	۶۴۷	۶۴۴	۶۳۸
ماسه (kg/m^3)	۹۷۱	۹۶۵	۹۵۷
آب (kg/m^3)	۱۶۷/۳	۱۷۱	۱۷۵/۴
میکروسیلیس (kg/m^3)	۸/۴	۱۴	۲۲/۴
پودر سنگ آهک (kg/m^3)	۲۷۰	۲۷۰	۲۷۰
فوق روان‌کننده (kg/m^3)	۶/۳۴	۶/۴۷	۶/۶۵
نسبت آب به مواد سیمانی	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸

۲-۳- روش آزمایش و عمل‌آوری

آزمایش L-Box [۱۶]: با استفاده از این آزمایش، خواص متفاوتی شامل قابلیت روانی، عبور و پایداری در برابر جداسازی مورد سنجش قرار می‌گیرد. در این آزمایش ارتفاع بتن خودمتراکم تازه را پس از عبور از میان فواصل مشخص شده بین آرماتورهای فلزی و جریان در یک مسیر مشخص، اندازه‌گیری کرده و با این مقدار قدرت عبور و انسداد آن برآورد می‌گردد.

آزمایش جریان اسلامپ [۱۶]: آزمایش اسلامپ بتن خود متراکم مشابه با آزمایش صورت گرفته برای بتن معمولی می‌باشد با این تفاوت که در این آزمایش پس از جاری شدن بتن دو قطر عمود بر هم اندازه‌گیری می‌شوند و میانگین آن‌ها بر حسب سانتی‌متر (D-final)، بیانگر روانی بتن مذکور می‌باشد. همچنین

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس

ترکیب شیمیایی (%)	میکروسیلیس	سیمان
SO ₃	۰/۱	۲/۵
Na ₂ O	۰/۳۱	۰/۴
K ₂ O	۰/۰۱	۰/۶
MgO	۰/۹۷	۱/۲
Fe ₂ O ₃	۰/۸۷	۳/۵
Al ₂ O ₃	۱/۳۲	۵
SiO ₂	۹۴/۶	۲۱/۵
CaO	۰/۴۹	۶۴

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی سیمان

مقدار مشخصه فیزیکی	مشخصات فیزیکی سیمان نکا
۱۰۰ دقیقه	زمان اولیه گیرش
۱۷۰-۲۰۰ دقیقه	زمان نهایی گیرش
۲۰۰ kg/cm^2	مقاومت ۳ روزه
۳۰۰ kg/cm^2	مقاومت ۷ روزه
۴۰۰ kg/cm^2	مقاومت ۲۸ روزه

میکروسیلیس

میکروسیلیس استفاده شده در این پژوهش، تولید کارخانجات فروسیلیس ایران با وزن مخصوص 2200 kg/m^3 و بلین $20/2 \text{ m}^2/\text{gr}$ می‌باشد که به صورت درصد‌های مختلفی از وزن سیمان و به صورت خشک به مخلوط بتن اضافه شده است. خواص شیمیایی میکروسیلیس در جدول (۲) ارائه شده است.

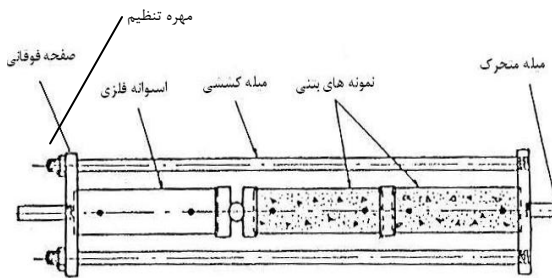
آب و مواد افزودنی

در ساخت مخلوط‌های بتنی از آب شرب شهری استفاده شده است. همچنین از آنجایی که پودر سنگ از خلل و فرج داخل بتن کاسته و باعث بهبود چسبندگی مخلوط بتن می‌گردد، در این تحقیق از پرکننده پودر سنگ آهک با وزن مخصوص $2/54 \text{ گرم بر سانتی‌متر مکعب}$ و برای رسیدن به خاصیت خود تراکمی مناسب فوق روان‌کننده سیکا-ویسکو کریت I به صورت درصدی از وزن سیمان و میکروسیلیس مصرفی و با ویژگی‌هایی مطابق جدول (۴) استفاده گردیده است.

جدول ۴- ویژگی‌های فوق روان‌کننده ویسکوکریت I

ساختار	اسیدهای کربوتسیلیک اصلاح شده در آب
ظاهر	مایع سبز و زرد رنگ
چگالی	$1/50 \text{ kg/lit}$
PH	$6 \pm 0/5$

میزان تنش اعمالی توسط مهره‌های تنظیم کننده، نشان داده شده در شکل (۲) ثابت نگه داشته شده و تغییرات کرنش ناشی از خزش نمونه‌ها نسبت به زمان ثبت گردید. مقدار تغییر شکل‌های ناشی از خزش نمونه‌های تحت اثر بار و جمع‌شدگی نمونه‌های موجود در محیط آزمایشگاه با استفاده از یک کرنش سنج با دقت اسمی ۸ میکرواسترین (معادل ۰/۰۰۰۱۶ میلیمتر) در چهار طرف مقطع استوانه‌های بتنی اندازه‌گیری و میانگین چهار مقدار قرائت شده به عنوان کرنش نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری در اولین روز قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه شروع شده و به مدت ۲۵۰ روز ادامه یافت.



شکل ۲- جزئیات دستگاه اندازه‌گیری خزش

۳- نتایج آزمایش و تفسیر

۳-۱- آزمایش‌های بتن خودمتراکم تازه

خصوصیات نمونه‌های مورد آزمایش در فاز بتن تازه در جدول (۶) ارائه شده است. از آنجا که نتایج حاصل از آزمایش‌های اسلامپ و L-Box در محدوده مجاز آیین‌نامه اروپا [۱۶] قرار دارند، تمامی طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق خصوصیات مورد نیاز جهت طبقه‌بندی به عنوان بتن خود متراکم را دارا می‌باشند.

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های بتن خود متراکم تازه

عنوان آزمایش	کمیت اندازه گیری شده	SCC 30	SCC 35	SCC 45	حدود مجاز [۱۶]
جریان اسلامپ	T50 (sec)	۳/۵۱	۳/۷۲	۴	۳/۵-۶
	D-final (cm)	۷۱	۷۰	۷۴	۶۰-۷۵
L-Box	h_2/h_1	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۸۸	۰/۸-۱

زمان رسیدن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر برحسب ثانیه (T50) با توجه به علامت‌گذاری در داخل صفحه آزمایش اسلامپ ثبت می‌شود که بیانگر نرخ تغییر شکل با تعریف یک فاصله روانی است.

آزمایش مقاومت فشاری [۱۷]: جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر که در شرایط استاندارد (۲۰ درجه سیلسیوس و ۱۰۰ درصد رطوبت) عمل‌آوری شدند، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز استفاده گردیده است.

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم [۱۸] و مدول

ارتجاعی [۱۹]: جهت انجام این آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ASTM C469 و ASTM C496 از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و عمل‌آوری شده در رطوبت ۱۰۰٪ در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز استفاده گردید.

آزمایش خزش و جمع‌شدگی [۲۰]: برای اندازه‌گیری

کرنش‌های خزش و جمع‌شدگی، از نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۲۷۰ میلیمتر و قطر ۸۰ میلیمتر استفاده شد. از آنجا که برای نمونه‌های مورد مطالعه در کار حاضر خزش و جمع‌شدگی به طور هم‌زمان اتفاق می‌افتد، کرنش آنی به علاوه کرنش ناشی از خزش را به صورت اختلاف بین کرنش کل نمونه بارگذاری شده (شامل کرنش آنی، جمع‌شدگی و خزش) و کرنش جمع‌شدگی نمونه مشابهی که تحت بارگذاری قرار نگرفته و در همان شرایط محیطی و به همان مدت نگهداری شده باشد، می‌توان محاسبه کرد. این آزمایش در محیط آزمایشگاه و توسط دستگاه نشان داده شده در شکل (۱) انجام گرفت. سن بارگذاری نمونه‌ها در این آزمایش ۲۸ روز بوده و تنشی معادل ۲۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر آن‌ها اعمال گردید.



شکل ۱- دستگاه آزمایش خزش و نمونه‌های مربوطه

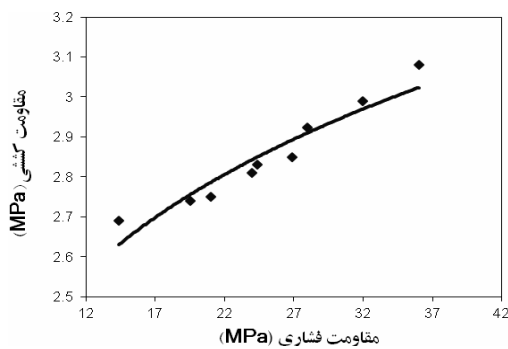
۳-۲- مقاومت فشاری

با بررسی مقاومت فشاری میانگین حاصل از شکست سه نمونه مکعبی برای هر طرح اختلاط (SCC 30، SCC 35 و SCC 45) در سن ۷، ۱۴ و ۲۸ روز که در شکل (۳) نشان داده شده است، مشخص می‌گردد که با استفاده از میکروسیلیس می‌توان به مقاومت‌های فشاری مطلوبی دست یافت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار میکروسیلیس مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل وجود ذرات بسیار ریز میکروسیلیس (با قطر حدود ۰/۱ میکرومتر) می‌باشد که با پخش شدن در ماتریس خمیر سیمان در لابه‌لای ذرات سیمان جای گرفته و تخلخل‌های موئینه را کاهش می‌دهد. از آنجایی که میکروسیلیس، ژل هیدروکسیدکلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان را به سیمان که ماده مقاومی است تبدیل می‌کند، استفاده از این پوزولان با درصد‌های ذکر شده به لحاظ معیار مقاومت فشاری مناسب می‌باشد.

در شکل (۴)، به کمک نتایج به دست آمده، ارتباط بین مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت فشاری نشان داده شده و بر اساس آن رابطه تجربی زیر با ضریب همبستگی $R^2 = 0.902$ به دست آمده است:

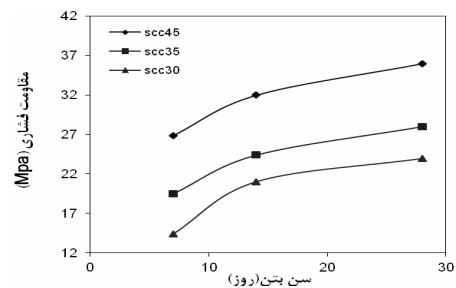
$$f_t = 1.7556f_c^{0.1517} \quad (1)$$

که در آن f_c و f_t به ترتیب مقاومت فشاری استوانه‌ای و مقاومت کششی غیرمستقیم بتن خودمتراکم هستند.



شکل ۴- رابطه بین مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم بتن خودمتراکم

با توجه به رابطه (۱) مشاهده می‌شود که بین مقاومت فشاری و کششی بتن خود متراکم، همانند بتن معمولی، رابطه نزدیکی برقرار بوده ولی هیچ تناسب مستقیمی وجود ندارد. نسبت‌های مقاومت کششی به فشاری (f_t/f_c) بتن خودمتراکم در جدول (۸) ارائه شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود بعد از عمل‌آوری ۲۸ روزه، مقاومت کششی با آهنگ کندتری نسبت به مقاومت فشاری افزایش یافته و این نسبت‌ها با افزایش سن عمل‌آوری کاهش می‌یابند، در حالی که برای بتن معمولی نسبت f_t/f_c در مقاومت‌های پایین بین ۱۱-۱۰ درصد، در مقاومت‌های متوسط بین ۹-۸ درصد و در مقاومت‌های بالا حدود ۷ درصد می‌باشد [۲۱]. به عبارت دیگر این نسبت برای بتن خود متراکم حاوی میکروسیلیس بیشتر از بتن معمولی می‌باشد که دلیل آن را می‌توان به کاهش اندازه و میزان بلورهای هیدروکسید کلسیم در ناحیه انتقال در نتیجه واکنش‌های شیمیایی ناشی از وجود پوزولان‌ها نسبت داد.



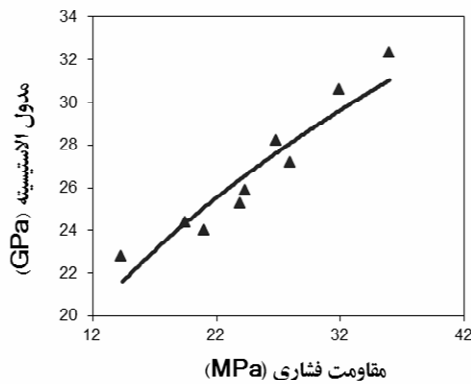
شکل ۳- مقاومت فشاری استوانه‌ای طرح اختلاط‌های مختلف بتن خودمتراکم

۳-۳- مقاومت کششی غیرمستقیم

جدول (۷) میانگین نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم به روش برزلی بر روی سه نمونه بتن در هر سن را نشان می‌دهد که در آن مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش مقدار میکروسیلیس افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به بهبود ناحیه انتقال بتن و کاهش تخلخل به دلیل استفاده از میکروسیلیس نسبت داد.

جدول ۷- مقاومت کششی غیرمستقیم بتن خودمتراکم

مقاومت کششی (MPa)			سن بتن (روز)
SCC 45	SCC 35	SCC 30	
۲/۸۵	۲/۷۴	۲/۶۹	۷
۲/۹۹	۲/۸۳	۲/۷۵	۱۴
۳/۱۵	۲/۹۶	۲/۸۱	۲۸



شکل ۵- رابطه بین مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی بتن خود متراکم

در بتن وجود ارتباط مستقیم بین مقاومت و مدول ارتجاعی از این حقیقت ناشی می‌شود که مقاومت و مدول ارتجاعی علاوه بر سایر عوامل، تحت تأثیر تخلخل مواد تشکیل دهنده‌ای آن قرار دارند؛ اگر چه این تأثیرات یکسان نیست [۲۱].

۳-۵- کرنش جمع‌شدگی و خزش

با اندازه‌گیری کرنش کل یک نمونه تحت بار و کرنش جمع‌شدگی نمونه دیگر در شرایط محیطی مشابه با نمونه اول، مجموع کرنش آنی و کرنش ناشی از خزش از تفاضل آن‌ها قابل محاسبه است. شکل (۶) کرنش جمع‌شدگی نمونه‌های مختلف در محیط طبیعی آزمایشگاه را نشان می‌دهد. نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز در محیطی با رطوبت نسبی ۱۰۰٪ نگهداری و پس از آن با قرار گرفتن نمونه‌ها در محیط طبیعی آزمایشگاه، اندازه‌گیری کرنش‌ها آغاز گردید. با توجه به این که در تعیین نسبت‌های مخلوط بتن، نمی‌توان عاملی را بدون تغییر دادن حداقل یک عامل دیگر تغییر داد، بدیهی است که با افزایش میزان میکروسیلیس و ثابت بودن نسبت آب به سیمان، مقدار آب اختلاط کاهش می‌یابد. این امر و دیگر عوامل پیشتر ذکر شده منجر به تولید خمیر سیمانی با مقاومت و مدول ارتجاعی بالاتر شده که فضای خالی کمتری برای حرکت داخلی آب و جابجایی لایه‌های ژل داشته در نتیجه تغییر شکل‌های ناشی از جمع‌شدگی کاهش می‌یابند. مقدار این کاهش در سن ۲۵۰ روز به ازای افزایش ۲ و ۳ درصد میکروسیلیس به ترتیب ۱۲ و ۱۰ درصد می‌باشد که در کل با افزایش مقاومت از ۳۰ MPa به ۴۵ MPa کرنش جمع‌شدگی تا حدود ۲۲ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۸- نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن خود متراکم

نسبت مقاومت کششی به فشاری			سن بتن (روز)
SCC 45	SCC 35	SCC 30	
۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۹	۷
۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۳	۱۴
۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۱۲	۲۸

۳-۴- مدول ارتجاعی

جدول (۹) نتایج آزمایش مدول ارتجاعی بر روی نمونه‌های بتنی ساخته شده در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله و با توجه به این که مدول ارتجاعی بتن تحت تأثیر مدول ارتجاعی اجزای تشکیل دهنده آن از جمله خمیر سیمان قرار دارد، با افزایش میکروسیلیس، که با کاهش تخلخل خمیر سیمان و افزایش مقاومت فشاری همراه است، مدول ارتجاعی نیز افزایش می‌یابد.

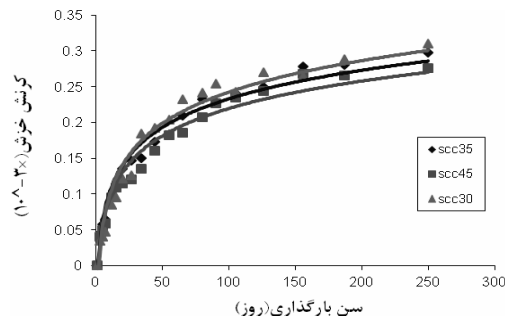
جدول ۹- مدول ارتجاعی بتن خودمتراکم

مدول ارتجاعی (GPa)			سن بتن (روز)
SCC 45	SCC 35	SCC 30	
۷	۲۲/۸	۲۴/۴	۲۸/۱۱
۱۴	۲۴	۲۵	۳۰/۹۵
۲۸	۲۵/۳	۲۷/۲	۳۳/۸

در شکل (۵) ارتباط بین مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری بر اساس نتایج جدول (۹) ارائه گردیده است که رابطه‌ی تجربی زیر با ضریب همبستگی $R^2 = 0.91$ را به دست می‌دهد:

$$E_c = 7.4831 f_c^{0.3972} \quad (2)$$

که در آن E_c مدول ارتجاعی بتن خود متراکم و f_c مقاومت فشاری استوانه‌ای آن می‌باشد. از آن جا که مشخصات ناحیه انتقال و وزن مخصوص، عوامل اصلی تعیین کننده خواص ارتجاعی بتن بوده و وزن مخصوص نیز با تخلخل نسبت عکس دارد، عوامل مؤثر بر کنترل تخلخل خمیر سیمان و ناحیه انتقال نظیر پوزولان‌ها تأثیر به سزایی بر مدول ارتجاعی خواهند داشت.



شکل ۸- کرنش خزش طرح اختلاطهای مختلف

در سنین اولیه، این کرنشها به مقدار قابل توجهی افزایش یافته به طوری که شیب قسمت اولیه نمودارها تا سن حدود ۵۰ روز بسیار زیاد می‌باشد. پس از آن نرخ سرعت این افزایش کم گردیده و می‌توان پیش‌بینی نمود که در سنین بالاتر مقادیر آن‌ها به مقدار ثابتی نزدیک شود.

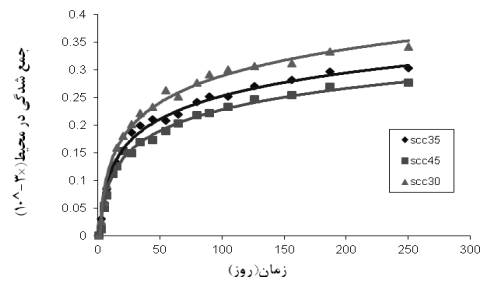
۴- نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایشات صورت گرفته بر روی سه طرح اختلاط بتن خودمتراکم و تعداد ۲۱ نمونه برای هر طرح و با اندازه‌گیری مقاومت‌های فشاری و کششی و مدول ارتجاعی تا سن ۲۸ روز و ثبت تغییر شکل‌های ناشی از خزش و جمع‌شدگی به مدت ۲۵۰ روز نتایج زیر حاصل می‌گردد.

(۱) با افزایش مقدار پوزولان میکروسیلیس، مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف افزایش می‌یابد.

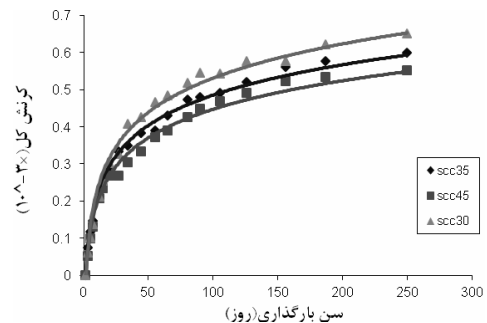
(۲) افزودن میکروسیلیس به ترکیب بتن خودمتراکم، خواص مکانیکی این نوع بتن را به دلیل کاهش تخلخل و کاهش محتوای هیدروکسید کلسیم خمیر سیمان بهبود بخشیده و به همین جهت مشاهده گردیده که با افزایش مقدار میکروسیلیس مدول ارتجاعی و مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

(۳) رابطه مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم نمونه‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری بتن خودمتراکم، مقاومت کششی آن نیز افزایش می‌یابد؛ لیکن نرخ سرعت این افزایش کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری همانند بتن معمولی، به میزان مقاومت فشاری وابسته بوده و هر چه مقاومت فشاری بیشتر می‌شود این نسبت کاهش می‌یابد.



شکل ۶- کرنش ناشی از جمع‌شدگی طرح‌های مختلف در شرایط محیطی

در شکل (۷) نیز کرنش کل نمونه‌های تحت بار بر حسب زمان بارگذاری ترسیم شده است. میزان بار اعمالی روی نمونه‌ها تا پایان آزمایش ثابت نگه داشته شده است.



شکل ۷- کرنش کل طرح اختلاطهای مختلف

شکل (۸) میزان کرنش خزش را در طول زمان بارگذاری برای هر سه طرح اختلاط نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله مشاهده می‌شود که مقدار خزش نمونه‌هایی با مقاومت فشاری بالاتر، کمتر از نمونه‌هایی است که مقاومت فشاری کمتری دارند به طوری که با افزایش میزان میکروسیلیس از ۳ به ۵ درصد و از ۵ به ۸ درصد مقدار خزش به ترتیب ۶ و ۷ درصد کاهش می‌یابد. این پدیده ناشی از آن است که خزش و نرخ پیشرفت آن تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله خواص مخلوط سیمان (سیمان و میکروسیلیس) و در نتیجه مقاومت بتن می‌باشند به طوری که کرنش‌های ناشی از خزش برای مقاومت‌های مختلف متفاوت بوده و با افزایش مقاومت، خزش در طول دوره بارگذاری کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) مشاهده می‌شود کلیه کرنش‌ها روند افزایش تقریباً مشابهی در طول زمان دارند.

- [9] Dobrowolski Joseph A., "Concrete Construction Hand-book", Fourth Edition, 1998, pp 105-117.
- [10] Bermejo, N., Ester, B., Jaime, G. R., Manuel Fernandez, C., "Shrikage and Creep of Medium-Low Strength Self Compacting Concrete", the 3rd fib International Congress, 2010.
- [11] Heirman, G., Vandewalle, L., Van Gemert, D., Boel, V., Audenaert, K., De Schutter, G., Desmet, B. Vantomme, J., "Time-Dependent Deformations of Limestone Powder Type Self-Compacting Concrete", Journal of Engineering Structures, 2008, 30 (10), 2945-2956.
- [12] Collepardi, M., Borsoi, A., Collepardi, S., Troli, R., "Strength, Shrinkage and Creep of SCC and Flowing Concrete", the 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Addison, Illinois: Hanley-Wood, 2005, pp 911-920.
- [13] ASTM C 33, "Standard Specification for Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standards, 2008.
- [14] ASTM C 125, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standards, 2008.
- [۱۵] محمدپور نیکبین، ا.، "بررسی خواص مکانیکی بتن خودمتراکم حاوی سنگ‌دانه‌های سبک و معمولی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، تیر ۱۳۸۶.
- [16] The European Guideline for Self Compacting Concrete Specification, Production and Use, May, 2005.
- [17] BS 1881 Part 117, "Metod for Determination of Tensile Splitting Strength", 1993.
- [18] ASTM C 496, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", Annual Book of ASTM Standards, 2008.
- [19] ASTM C 469, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity", Annual Book of ASTM Standards, 2008.
- [20] ASTM C 512, "Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression", Annual Book of ASTM Standards, 2008.
- [۲۱] رضانیانپور، ع. ا.، قدوسی، پ.، گنجیان، ا.، "ریز ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ۱۳۸۸.
- [۴] کرنش خزش نمونه‌های ساخته شده با مقدار میکروسیلیس کمتر که مقاومت فشاری کمتری نیز دارند نسبت به سایر نمونه‌ها با میزان بالاتر میکروسیلیس، بیشتر می‌باشد.
- [۵] از آن‌جاکه ماهیت پدیده جمع‌شدگی و خزش یکسان و تحت تأثیر فاکتورهای مشابه قرار دارند، با افزایش مقدار میکروسیلیس در نمونه‌ها کرنش جمع‌شدگی نیز همانند خزش کاهش می‌یابد.
- ۵- مراجع**
- [۱] فرشادفر، ا.، بهفرنیا، ک.، مستوفی‌نژاد، د.، " بررسی اثر انواع پوزولان‌ها از جمله میکروسیلیس بر مشخصات بتن خود متراکم تازه"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، اردیبهشت، ۱۳۹۰.
- [2] Selvamony, C., Ravikumar, M. S., Kannan, S. U., Basil Gnanappa, S., "Investigation on Self-Compacted Self-Curing Concrete Using Limestone Powder and Clinkers", Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 5 (3), 1-6.
- [3] Turk, K., Turgut, P., Karatas, M., Benli, A., "Mechanical Properties of Self-compacting Concrete with Silica Fume/Fly Ash", the 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 27-30 September, 2010.
- [4] Atan, M. N., Awang, H., "Mechanical Properties of Self-Concrete Incorporating Raw Rice Husk Ash", European Journal of Scientific Research, 2011, 60, 166-176.
- [5] Domone, P. L., "A Review of the Hardened Mechanical Properties of Self Compacting Concrete" cem and Con Composites, 2007, 29 (1), 1-12.
- [6] Felekoglu, B., Turkel, S., Baradan, B., "Effect of Water/Cement Ratio on the Fresh and Hardened Properties of Self Compacting Concrete", Bulding and Environment, 2006, 42 (4), 1795-1802.
- [۷] مقصودی، ع. ا.، مقیمی، ر.، علمدار باغینی، آ.، " مقایسه تأثیر دوده سیلیس بر فاز خمیری و مقاومت فشاری ابر بتن خودمتراکم و بتن سبک خودمتراکم"، سومین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ایران، ۱۷ مهر، ۱۳۹۰.
- [8] Hubertova, M., Hela, R., "Effect of Metakaolin and Silica Fume on the Properties of Light Weight Self Consolidating Concrete", Special publication in ACI, April, 2007.

EXTENDED ABSTRACT

Influence of Silica Fume on the Long-Term Behavior of Self Compacting Concrete

Monireh Sangi, Bahram Navayi neya*, Morteza H. Beygi

Faculty of Civil Engineering, Babol University of Technology, Babol 4714871167, Iran

Received: 05 May 2012; **Accepted:** 30 September 2012

Keywords:

Self compacting concrete, Microsilica, Creep, Shrinkage

1. Introduction

Self compacting concrete (SCC) is an innovative concrete that does not require vibration for placing and compacting. This kind of concrete has been immensely used in the construction for the last decade and it is inevitable to be aware of its behavior, especially time depending deformations such as the creep and shrinkage. In concrete structures deformations due to the creep and shrinkage are several times larger than elastic deformations. Frequently, these deformations cause excessive cracking and deflections or possible failure with an inherent loss in serviceability, durability and long-time safety of concrete structures. Thus, there is an urgent need for a reliable method to predict creep and shrinkage, especially for self compacting concrete structures. In this research, three mix designs were prepared and 21 specimens were fabricated from each mix design. Then the effects of varying percentages of micro silica on the creep and shrinkage of during a period of 250 days, and also on its mechanical properties including compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity up to the age of 28 days were investigated.

2. Methodology

2.1. Materials

The sand used in this study is of river type with sand value of 95% and fineness modulus of 3.1. The gravel used was broken gravel with maximum grain size of 12.5 mm and superficial specific gravity of 2700 kg/m³. Also the micro silica used was with specific gravity of 2200 kg/m³. Ordinary drinking water was used in the mix designs and since limestone powder reduces the interstices between gravels and improves the adhesion of the paste; in this study stone powder was used as filler. Moreover, in order to reach the intended self-compaction, the superplasticizer Sika Viscocrete was applied as a percentage of cement and micro silica.

2.2. Testing method and curing

In this paper, three mix designs of self compacting concrete with compressive strength of 300 kg/m² (SCC 30), 350 kg/m² (SCC 35) and 450 kg/m² (SCC 45) were prepared. According to Table 1, in all three types of concrete, only the amount of micro silica was altered, so that its effects on long-term deformations of the concrete including the creep and shrinkage can be studied. Using L-Box test and Slump Flow [1], the properties of fresh SCC were evaluated and after curing the specimens, compressive strength test [2], indirect tensile strength test [3], elastic modulus of elasticity until the age of 28 days [4] and the creep and shrinkage test [5] during 250 days were conducted on the specimens.

* Corresponding Author

E-mail addresses: m_sangi@ymail.com (Monireh Sangi), navayi@nit.ac.ir (Bahram Navayi neya), m.beygi@nit.ac.ir (Morteza H. Beygi).

Table 1. Mix designs

SCC 45	SCC 35	SCC 30	Components
280	280	280	Cement (kg/m ³)
638	644	647	Gravel (kg/m ³)
957	965	971	Sand (kg/m ³)
175.4	171	167.3	Water (kg/m ³)
22.4	14	8.4	Microsilica (kg/m ³)
270	270	270	Limestone powder (kg/m ³)
6.65	6.47	6.34	Superplasticizer (kg/m ³)
0.58	0.58	0.58	Water-cement ratio

3. Results and discussion

Results from slump flow and L-Box tests are within the allowable range in the European Code [1]. The relation between compressive and tensile strength is presented in Fig. 1. As shown in this Figure compressive and tensile strength increase with a correlation factor of $R^2=0.902$ as the amount of micro silica is increased.

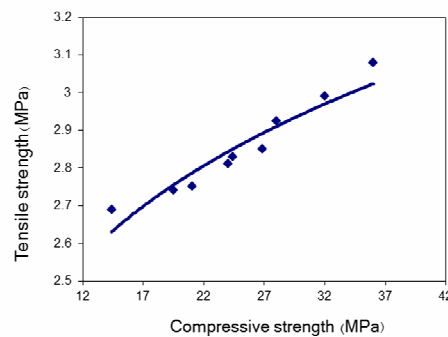


Fig. 1. The relation between compressive and tensile strength of SCC

According to the results and considering that elastic modulus of concrete is affected by the elastic modulus of its component, modulus of elasticity increases as micro silica and the compressive strength increase. This relation is illustrated in Fig. 2.

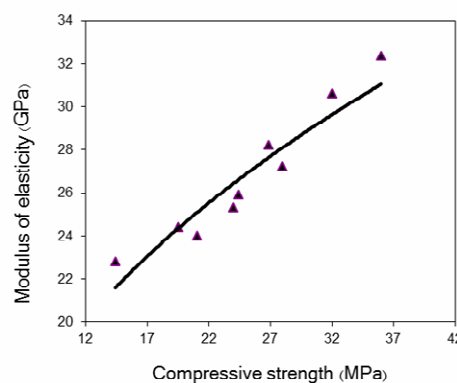


Fig. 2. The relation between compressive and modulus of elasticity of SCC

As it can be seen from Figs. 3-5, all strains have the same trend over the time. In early ages, the strains considerably rise and the slope of the initial segment of the curve, until 50 days, is very steep. Afterwards the increase rate is reduced at old ages nearly to a constant value.

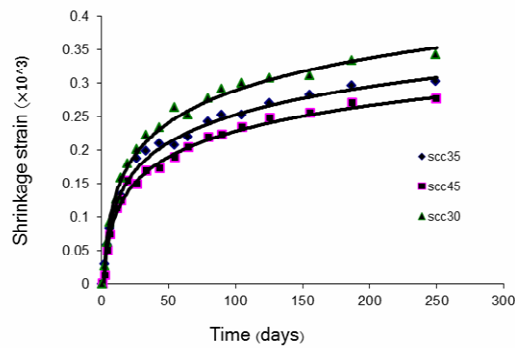


Fig. 3. Shrinkage strain of designs

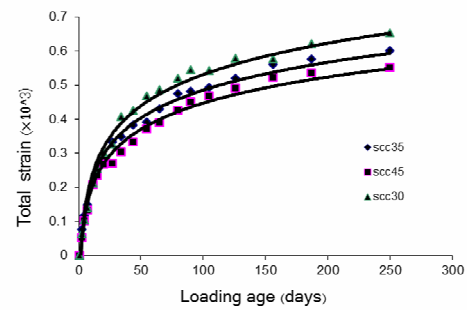


Fig. 4. Total strain of designs

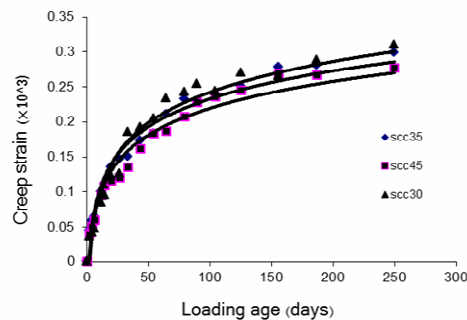


Fig. 5. Creep strain of designs

4. Conclusions

The addition of micro silica to SCC mixture improves its mechanical properties and as a consequence, the modulus of elasticity, compressive and tensile strength increase. The relation between indirect compressive and tensile strength of the tested specimens shows that as the compressive strength of SCC increases the tensile strength also increases though at a lower rate. Since the nature of shrinkage and creep is influenced by the same factors, the creep and shrinkage decrease in the specimens as the micro silica proportion is increased.

5. References

- [1] European Federation of Concrete Admixtures Associations (BIBM., CEMBUREAU., ERMCO., EFCA., EFNARC), "The European Guideline for Self Compacting Concrete Specification, Production and Use", May, 2005.
- [2] BS 1881 Part 117, "Method for Determination of Compressive Strength", UK, 1993.
- [3] ASTM C 496, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", Annual Book of ASTM Standards, USA, 2008.
- [4] ASTM C 469, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity", Annual Book of ASTM Standards, USA, 2008.
- [5] ASTM C 512, "Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression", Annual Book of ASTM Standards, USA, 2008.