Archive of SID

تحقیقات بتن
سال هفتم، شمارهٔ اوّل
بهار و تابستان ۹۳
ص ۱۱۱- ۹۹
تاریخ دریافت: ۹۳/۳/ ۲۰
تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۹

ارزیابی خواص مهندسی بتن خودتراکم توانمند حاوی سیمان آمیخته

ملک‌محمد رنجبر *
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان
رحمت مدندوست
دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان
فاطمه قانع
کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان
سروش عیسی‌پور
کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان
مهدی کریمی
کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

چکیده

در این مطالعه با جای‌گزینی بخشی از سیمان با پوزولان‌های خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج، میکروسیلیس و نانوسیلیس در بتن خودتراکم توانمند و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی (به روش برزیلی)، مقاومت خمشی، سرعت امواج اولتراسونیک و جذب آب، خواص مهندسی بتن خودتراکم بررسی شده است. علاوه بر خواص بتن سخت شده، آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم شامل آزمایش‌های جریان اسلامپ، قیف V و جعبه L انجام شده است. این پژوهش شامل هفت طرح اختلاط به شرح زیر است :
بتن خودتراکم توانمند شاهد، نمونه‌های حاوی ۵، ۷ و ۱۰ درصد میکروسیلیس، نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج و نمونه حاوی مخلوط میکروسیلیس و نانوسیلیس با درصدهای به ترتیب ۱۰ و ۲/۷. نسبت آب به مواد سیمانی در این طرح اختلاط‌ها ۰/۳ می‌باشد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که ترکیب سیمان با پوزولان‌های مذکور باعث بهبود خواص مهندسی بتن خودتراکم از جمله مقاومت فشاری پس از سن ۹۰ روزگی می‌شود.

واژگان کلیدی: **بتن خودتراکم توانمند ، خواص مهندسی ، میکروسیلیس ، نانوسیلیس ، خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج.**

* نویسنده مسئول : RANJBAR86@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

بتن توانمند یک ماده شگفت‌آور نبوده و هم‌چنین شامل موادی به‌غیر از مواد تشکیل‌دهنده سایر بتن‌ها نمی‌باشد، بلکه بتن توانمند توسعه‌ای بر بتن‌های معمولی می‌باشد. بر طبق آیین‌نامهٔ ACI، بتن توانمند بتنی است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن به ۴۱ مگاپاسکال و بالاتر از آن برسد. بتن توانمند به معنی بتن با خواص پایایی و دوام بالا است. این دو خاصیت اگرچه الزاماً توأمان نمی‌باشند اما رابطه‌ای همسو دارند، زیرا مقاومت زیاد نیازمند افزایش تراکم و کاهش فضای متخلخل است و تنها راه دست‌یابی به این امر، به‌کارگیری پرکننده‌های با ریزترین اندازه است. این نیاز را می‌توان با مصرف موادی نظیر میکروسیلیس که فضاهای ذرات بین سیمان و هم‌چنین بین ذرات سیمان و سنگ‌دانه را پر می‌کند مرتفع ساخت. ولیکن تأمین کارایی کافی مخلوط جهت پراکندگی مناسب مواد جامد به منظور دستیابی به یک بافت فشرده (یا متراکم) و همگن ضرورت دارد. این ضرورت با مصرف فوق‌روان‌کننده‌ها، به میزان قابل توجهی قابل تأمین است. فوق‌روان‌کننده باید با سیمان پرتلند مصرفی سازگاری داشته باشد. بتن خودتراکم یکی از انواع بسیار جالب بتن است که در بدو امر برای کاربرد در قطعات بتن آرمه پر آرماتور ابداع و ساخته شد. بتن خودتراکم نخست در سال ۱۹۸۶ توسط H.Okamura در ژاپن پیشنهاد شد و در سال ۱۹۸۸ این نوع بتن در کارگاه ساخته و نتایج قابل قبولی را از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن به دست داد[۱]. مقاله‌ای در مورد این نوع بتن توسط K.Ozawa و همکارانش در سال ۱۹۸۹ منتشر گردید [۲]. امروزه در کشورهای پیشرفته، بتن خودتراکم در زمره بتن‌های متداول و رایج محسوب می‌شود. وجود هوای ناخواسته ناشی از عدم تراکم کافی موجب ضعف مشخصات مکانیکی بتن می‌شود، به طوری‌که هر یک درصد هوا تقریباً پنج درصد افت مقاومت فشاری را به همراه دارد. استفاده از بتن خودتراکم اجازه می‌دهد در محل‌هایی که امکان تراکم کافی به دلیل آرماتور زیاد وجود ندارد یا دسترسی به محل بتن‌ریزی مشکل است، بتن‌ریزی بدون نیاز به تراکم انجام پذیرد و درصد هوای ناخواسته در بتن به حداقل برسد.

به دلیل قیمت بالای سیمان می‌توان به جای آن از مواد جای‌گزین استفاده نمود. استفاده از مواد جای‌گزین علاوه بر جنبه اقتصادی، باعث بهبود ویژگی‌های بتن مثل نفوذپذیری، دوام و پایایی بتن در مقابل مواد شیمیایی می‌گردد. از مهم‌ترین مواد جای‌گزین مورد استفاده در بتن خودتراکم، میکروسیلیس، خاکستر بادی، سرباره کوره آهن گدازی و خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج می‌باشند. پژوهش‌ها نشان داده است که استفاده از خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج به جای کسری از سیمان سبب کاهش تخلخل بتن، بهبود مقاومت و دوام بتن، بهبود مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها و نفوذ کلریدها، بهبود در جذب و کاهش در نفوذپذیری اکسیژن و هم‌چنین کاهش هزینه تمام شده می‌شود. این جایگزینی هم‌چنین سبب کاهش در خاصیت قلیایی بتن و مقدار آهک آزاد می‌شود که دلیل آن شکل‌گیری هیدرات‌های آلومینات کلسیم و سیلیکات‌کلسیم ذکر شده است [۳، ۱۳ و ۱۴]. اخیراً بهره‌گیری از ذرات با ابعاد نانو جهت ارتقای عملکرد مصالح و مواد در صنایع مختلف مورد توجه زیادی قرار گرفته است. نانوذرات مکمل سیمان نظیر نانوسیلیس می‌تواند به عنوان پرکننده سبب پر شدن فضاهای بین ذرات ژل سیلیکات‌کلسیم هیدراته شود. از طرفی با واکنش پوزولانی با هیدروکسیدکلسیم مقدار ژل سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته افزایش می‌یابد، در نتیجه سبب متراکم‌سازی بیشتر مخلوط و متعاقب آن بهبود ساختار میکروسکوپی سطح تماس، مقاومت و پایایی می‌شود. تحقیقات در تکنولوژی بتن برای رسیدن به بتنی با مقاومت و توانایی عبور بالا از شبکه آرماتور و نیز مقاومت در برابر جداشدگی منجر به توسعه نوع جدیدی از بتن به نام بتن خودتراکم توانمند[5] شده است. معیار کارایی خواص بتن تازه و سخت شده HPSCC در جدول ۱ آورده شده است. نتایج مطالعه انجام شده توسط Md. Safiuddin و همکاران نشان می‌دهد که استفاده از خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج در بتن خودتراکم توانمند باعث افزایش مقاومت فشاری بتن، افزایش سرعت عبور امواج مافوق صوت در نمونه‌ها، افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش جذب آب نمونه‌ها می‌شود [۳]. Jalal و همکاران نشان دادند که جایگزینی نانوسیلیس و میکروسیلیس به جای بخشی از سیمان مصرفی باعث بهبود خواص مکانیکی بتن خودتراکم توانمند می‌شود و هم‌چنین

[5] High Performance Self Compacting Concrete (HPSCC)

www.SID.ir

Archive of SID

استفاده از ترکیب نانوسیلیس و میکروسیلیس با یکدیگر در بتن نتایج بهتری نسبت به نانوسیلیس می‌دهد [۴].

هدف از این مطالعه بررسی خواص مهندسی بتن خودتراکم توانمند حاوی پوزولان‌های خاکستر پوسته شلتوک برنج، میکروسیلیس، نانوسیلیس می‌باشد. خواص مهندسی بتن سخت شده با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی (به روش برزیلی)[۶]، مقاومت خمشی[۷]، سرعت امواج اولتراسونیک و جذب آب بررسی و مقایسه شده است. هم‌چنین، آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم انجام شده آزمایش‌های جریان اسلامپ، قیف V و جعبه L را شامل می‌شود.

۲- مصالح و روش اختلاط

در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان هگمتان با وزن مخصوص $3/15\ gr/cm^3$ و سطح مخصوص $2900\ cm^2/gr$ استفاده شده است. میکروسیلیس[۸] مورد استفاده در این تحقیق، تولید کارخانه فروآلیاژ ازنا است که، وزن مخصوص آن $2/32 gr/cm^3$ و سطح مخصوص آن $35500\ cm^2/gr$ می‌باشد. نانوسیلیس[۹] مصرفی با نام تجاری " Vandnanosilica " محصول شرکت وندشیمی، به رنگ شیری، با قطر ذرات ۵۰ نانومتر، چگالی $1/3\ kg/lit$ و به صورت کلوئید با مقدار ماده جامد ۳۰ درصد می‌باشد. خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج[۱۰] با سوزاندن پوستهٔ شلتوک برنج به‌دست آمده از مزارع استان گیلان در کورهٔ الکتریکی پارک علم و فناوری گیلان تهیه و سپس آسیاب شده است. جهت تهیه خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج، ابتدا پوسته شلتوک در کوره آجری مجهز به دودکش سوزانده شده و در این مرحله خاکستر حاوی ۱ تا ۲ درصد کربن حاصل می‌شود. برای خروج کربن جزئی باقی‌مانده، خاکستر در کوره برقی با درجه حرارت ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت سوزانده شده و سپس توسط دستگاه آسیاب با گوی‌های سرامیکی آسیاب شده و مورد استفاده قرار گرفته است. رنگ خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج، سفید و دارای وزن مخصوص $2/09 gr/cm^3$ و سطح مخصوص آن نیز برابر $9868\ cm^2/gr$ می‌باشد. ترکیبات شیمیایی سیمان، میکروسیلیس و خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج در جدول ۲ آورده شده است. در همه اختلاط‌ها به منظور رسیدن به روانی دلخواه، از فوق‌روان‌کننده[۱۱] و کاهنده آب بر پایه کربوکسیلات اصلاح شده به نام " Glenium 51P " محصول شرکت " BASF " استفاده شده است. هم‌چنین در طرح اختلاط SCC Control از ماده قوام‌آور[۱۲] به نام "Glenium stream 2" محصول شرکت " BASF " بر پایه پلی‌ساکارید که مقدار ذرات جامد آن ۲۰ درصد و وزن مخصوص آن ۰/۹۵ می‌باشد، استفاده شده است.

از دو نوع شن رودخانه‌ای، با ماکزیمم اندازه دانه‌های ۱۹ و ۱۶ میلی‌متر، وزن مخصوص $2/7\ gr/cm^3$ و جذب آب ۱/۱ درصد و از ماسه رودخانه‌ای مصرفی در دو اندازه ۳-۰ و ۶-۳ میلی‌متر استفاده شده است. ماکزیمم اندازه دانه‌های آن ۴/۷۵ میلی‌متر، وزن مخصوص $2/75\ gr/cm^3$ و جذب آب ۱/۴ درصد، مدول نرمی ۱/۹۷ می باشد. هم‌چنین در این مطالعه از پودرسنگ به عنوان اصلاح‌کننده دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده است.

به منظور اختلاط بهتر مواد، ابتدا فوق‌روان‌کننده در آب حل شده و سپس نانوسیلیس به آن اضافه گردید و به مدت ۲ دقیقه با سرعت بالا مخلوط شدند. شن و ماسه در داخل میکسر ریخته شده و به مدت ۱ دقیقه به صورت خشک مخلوط می‌گردند. سپس سیمان و میکروسیلیس و یا خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج (اگر موجود باشد) به صورت خشک به میکسر اضافه شده و برای ۱ دقیقه دیگر نیز ترکیب می‌گردند[۵]. پس از آن، آب به آهستگی به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه مخلوط می‌گردند.

بتن حاصل در قالب‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری، به منظور تعیین مقاومت فشاری و میزان جذب آب و در قالب‌های منشوری با ابعاد ۲۸×۷×۷ سانتی‌متری برای تعیین مقاومت خمشی و در استوانه‌های ۱۵×۳۰ سانتی‌متری جهت تعیین مقاومت کششی ریخته شدند. قالب‌ها پس از ۲۴ ساعت باز شده و نمونه‌ها تا زمان آزمایش در آب با دمای 22 ± 2^oC نگهداری شدند. ویژگی‌های طرح‌های ساخته شده در جدول ۳ ارائه شده است.

[6] Split Tensile Strength
[7] Flexural Strength
[8] Silica Fume (SF)
[9] Nano Silica (NS)
[10] Rice Husk Ash (RHA)
[11] Super Plasticizers (SP)
[12] Viscosity Modifying Admixture (VMA)

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. معیار کارایی خواص بتن تازه و سخت شده HPSCC [۴]

محدوده مجاز	خصوصیات	آزمایش‌ها
	خواص بتن خودتراکم توانمند	
(۸۵۰ – ۵۵۰) میلی‌متر	توانایی پرکنندگی	جریان اسلامپ
(۱۲ – ۶) ثانیه	توانایی پرکنندگی	قیف V
(۹ – ۲/۵) ثانیه	توانایی پرکنندگی	اریمت
(۱۰۰ – ۹۰)٪	توانایی عبور	جعبه پرکننده
۱/۰ – ۰/۸	توانایی عبور	جعبه L
میلی‌متر ۳۰ ≤	توانایی عبور	جعبه U
میلی‌متر ۵۰ ≤ (SF-JF)	توانایی عبور	حلقه J
میلی‌متر ۸ ≤	مقاومت در برابر جداشدگی	عمق نفوذ
٪۱۸ ≤	مقاومت در برابر جداشدگی	جداشدگی
	خواص بتن توانمند	
(۸ – ۴)٪	مقدار هوای بتن تازه	تعیین مقدار هوای مخلوط بتن تازه
مگا پاسکال ۲۰ <	مقاومت فشاری سنین اولیه	مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای
مگا پاسکال ۴۰ <		مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز
متر بر ثانیه ۴۵۷۵ ≤	شرایط یا کیفیت فیزیکی	سرعت امواج اولتراسونیک توسط پاندیت[۱۳]
(۱۵ – ۷)٪	نشان‌دهنده مقاومت و دوام	نفوذپذیری
(۶ – ۳)٪	جذب آب، نشان‌گر دوام	جذب آب
کیلواهم در سانتی‌متر (۱۰ – ۵) <	مقاومت الکتریکی در مقابل خوردگی	مقاومت الکتریکی
۰/۰۸ <	فاکتور دوام بعد از ۳۰۰ سیکل یخ‌زدگی و ذوب شدن	مقاومت در برابر سیکل ذوب و یخ‌زدگی

جدول ۲ . ترکیبات شیمیایی مصالح اولیه (درصد)

مصالح	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
سیمان	۲۱/۵۴	۴/۹۵	۳/۸۲	۶۳/۲۴	۱/۵۵	۲/۴۳	۱/۱۵
میکروسیلیس	۹۳/۸۶	۱/۳۲	۰/۸۷	۰/۴۹	۰/۹۷	۰/۱	-
خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج	۹۰/۹	۰/۸۳	۰/۶	۰/۸	۰/۵۶	-	-

[13] Pundit

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. نسبت‌های اختلاط (kg/m^3)

نام اختلاط	آب	w/c	سیمان	SF	NS	RHA	شن ۱۹ mm	شن ۱۶ mm	ماسه ۰-۳	ماسه ۳-۶	پودر سنگ	SP
SCC Control	۱۸۲	۰/۳	۵۵۰	-	-	-	۳۱۵	۳۱۵	۵۵۳	۲۳۷	۳۰۰	۸/۴
SCC5SF	۱۸۲	۰/۳	۵۲۲/۵	۲۷/۵	-	-	۳۱۴	۳۱۴	۵۵۰	۲۳۶	۲۹۹	۹/۱
SCC7SF	۱۸۲	۰/۳	۵۱۱/۵	۳۸/۵	-	-	۳۱۳	۳۱۳	۵۴۸	۲۳۶	۲۹۸	۱۰/۱
SCC10SF	۱۸۲	۰/۳	۴۹۵	۵۵	-	-	۳۱۲	۳۱۲	۵۴۸	۲۳۵	۲۹۷	۱۰/۶
SCCNF	۱۸۲	۰/۳	۴۸۰/۱۵	۵۵	۱۴/۸۵	-	۳۰۸	۳۰۸	۵۴۲	۲۳۳	۲۹۵	۱۰/۹
SCC5RHA	۱۸۲	۰/۳	۵۲۲/۵	-	-	۲۷/۵	۳۱۳	۳۱۳	۵۵۰	۲۳۵	۲۹۸	۱۳/۷
SCC10RHA	۱۸۲	۰/۳	۴۹۵	-	-	۵۵	۳۱۱	۳۱۱	۵۴۶	۲۳۳	۲۹۶	۱۶/۵

آزمایش جذب آب بر روی نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰ سانتی‌متر در سن ۹۰ روزه انجام شد. از هر اختلاط دو نمونه مکعبی ساخته و جذب آب نهایی براساس میانگین‌گیری از مقادیر جذب آب به‌دست آمده برای هر نمونه محاسبه شد. نمونه‌ها پس از ۹۰ روز نگهداری از آب خارج و پس از خشک کردن تدریجی در محیط آزمایشگاه، جهت تعیین وزن خشک در داخل آون با دمای ۵±۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها از آون خارج و توسط ترازوی دیجیتالی توزین شدند. پس از آن برای ۲۴ ساعت دیگر در آون قرار داده و سپس توزین شدند. این روند تا آن‌جا ادامه یافت که تفاضل دو توزین متوالی کمتر از ۵ درصد وزن خشک شود.

سپس آخرین توزین به‌عنوان وزن خشک نمونه یادداشت شد. در ادامه نمونه‌ها پس از خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه به داخل مخزن جهت جذب آب بازگردانیده و پس از ۴۸ ساعت از مخزن خارج و پس از خشک کردن رطوبت سطحی توسط حوله خشک و توزین شدند. سپس دوباره به مخزن آب بازگردانیده پس از ۲۴ ساعت دیگر، خارج و توزین شدند. این روند تا جایی که تفاضل مقادیر حاصل از دو توزین متوالی کمتر از ۵ درصد وزن نمونه سنگین‌تر شود، ادامه یافت. در پایان آزمایش، آخرین توزین به عنوان وزن اشباع یادداشت گردید و مقدار جذب آب محاسبه شد.

۳- نتایج آزمایش‌ها

۳ - ۱- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های بتن تازه

	قطر جریان اسلامپ (cm)	زمان تخلیه بتن از قیف V (s)	نسبت انسداد (h_2/h_1)
EFNARC [6]	۶۵ -۸۰	۹ -۲۵	۰/۸ -۱
SCC Control	۶۳	۱۲	۰/۸۹
SCC5SF	۶۵/۵	۱۶/۵	۰/۸۵
SCC7SF	۶۷	۱۶/۸	۰/۸۶
SCC10SF	۶۳	۲۱/۶	۰/۸۳
SCCNF	۶۴/۵	۲۲/۳	۰/۸۳
SCC5RHA	۶۶	۱۴/۱	۰/۸۵
SCC10RHA	۶۷	۱۷/۵	۰/۸۷

در این مطالعه، سه آزمایش متداول که در فاز خمیری بتن خودتراکم صورت می‌پذیرد (جریان اسلامپ، قیف V و جعبه L) انجام شده و نتایج در جدول ۴ آمده است. مقایسه نتایج به‌دست آمده در فاز خمیری بتن خودتراکم با مقادیر تعیین شده در EFNARC، از تأمین محدوده‌های مطلوب این آیین‌نامه حکایت دارد. نکته قابل ذکر در این آزمایش‌ها، کاهش روانی نمونه‌ها در اثر افزودن نانوسیلیس کلوئیدی می‌باشد. بنابراین با افزودن نانوسیلیس میزان فوق‌روان‌کننده افزایش می‌یابد. شکل ۱

www.SID.ir

Archive of SID

رابطهٔ میان جریان اسلامپ و زمان تخلیه از قیف V را نشان می‌دهد.

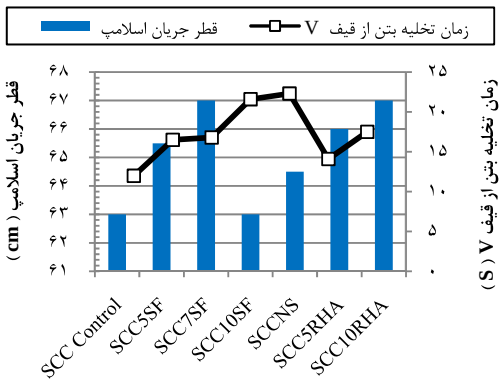
با جای‌گزینی میکروسیلیس به جای سیمان از ۵ تا ۷ درصد زمان تخلیه از قیف V و نیز جریان اسلامپ افزایش می‌یابند، اما با جایگزینی بیش از این مقدار میکروسیلیس جریان اسلامپ به یک‌باره کاهش می‌یابد. در مورد خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج نیز، با افزودن این پوزولان در بتن خودتراکم افزایش در جریان اسلامپ و قیف V مشاهده می‌شود. با افزایش جایگزینی پوزولان به جای سیمان در نمونه‌ها زمان تخلیه از قیف V افزایش یافته و نیاز به فوق‌روان‌کننده برای قرارگیری جریان اسلامپ و زمان خروج از قیف V در محدوده مجاز نیز افزایش می‌یابد. این مطلب را می‌توان در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده نمود.

۳ – ۲- نتایج آزمایش‌های بتن سخت‌شده

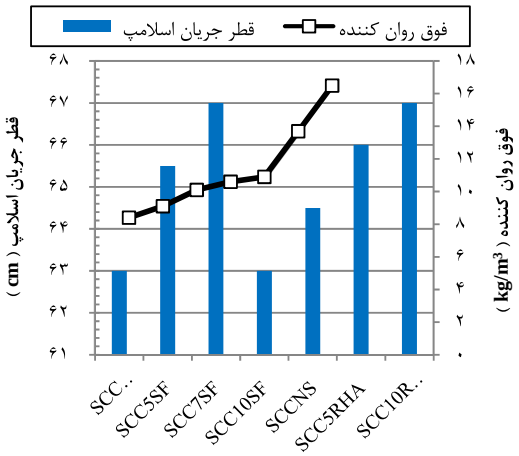
۳ – ۲ – ۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم توانمند در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده فعالیت پوزولانی قابل‌توجه در بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان‌های مختلف با گذشت زمان می‌باشد. سرعت رشد مقاومت فشاری در سنین اولیه بیشتر بوده و این افزایش مقاومت با گذشت زمان کاهش می‌یابد، بیشترین سرعت رشد مقاومت مربوط به نمونه حاوی ترکیب نانوسیلیس و میکروسیلیس می باشد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری و نمودار مذکور را به این صورت می‌توان تفسیر نمود که با افزودن میکروسیلیس به نمونه شاهد (SCC Control) ، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این ازدیاد مقاومت با جایگزینی ۷ درصد میکروسیلیس به‌جای سیمان به بیشترین مقدار خود می‌رسد و بعد از آن با جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس باز هم افزایش مقاومت را نسبت به نمونه شاهد مشاهده می‌کنیم، اما رشد مقاومت در این حالت نسبت به نمونه حاوی ۷ درصد کمتر شده است.

در مورد نمونه‌های حاوی پوزولان نانوسیلیس نیز افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد به‌دست آمده است و همان‌طوری‌که در شکل مشاهده می‌شود بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ای از بتن خودتراکم است که به جای بخشی از سیمان از نانوسیلیس استفاده شده است. افزودن میکروسیلیس و نانوسیلیس از همان سنین اولیه باعث افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد می‌شود، اما افزودن خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج باعث می‌شود که در سنین اولیه مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته اما از حدود سن ۶۰ تا ۷۰ روزگی به بعد مقاومت به طور چشمگیری افزایش یافته و این مقدار بیشتر از مقدار متناظر آن در نمونه شاهد می‌شود. مقایسه دو طرح اختلاط از دو مقدار مختلف خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج، بعد از سن ۹۰ روزگی، حاکی از نسبت بالاتر افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج نسبت به نمونه‌های حاوی ۵ درصد از این پوزولان بوده است. اگر طرح های اختلاط برحسب بیشترین مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزگی مرتب شود، نمونه‌های حاوی ترکیبی از نانوسیلیس و میکروسیلیس بالاترین مقاومت فشاری را دارا می‌باشند. بعد از آن نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و در آخر نمونه‌های حاوی خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج به‌ترتیب در این رده‌بندی مقاومت قرار می‌گیرند.



شکل ۱- رابطهٔ قطر جریان اسلامپ با زمان تخلیه از قیف V



شکل ۲- رابطه قطر جریان اسلامپ با مقدار فوق‌روان‌کننده

www.SID.ir

Archive of SID

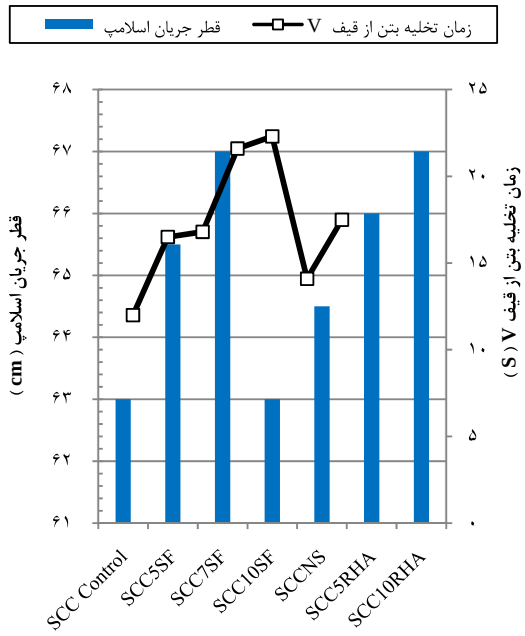
۳- ۲ – ۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی

نتایج آزمون مقاومت کششی نمونه‌های بتنی، در جدول ۶ آمده است. همان‌گونه که از نتایج جدول ۶ ملاحظه می‌گردد، رفتار کلی هر هفت نمونه بتن خودتراکم در مقاومت کششی تقریباً مشابه مقاومت فشاری بوده و با گذشت زمان مقاومت کششی آن‌ها افزایش می‌یابد. روند رشد مقاومت کششی نیز با زمان کاهش می‌یابد، لیکن این کاهش، نسبت به مقاومت فشاری بیشتر بوده است. در مورد تمامی نمونه‌ها مقاومت کششی در تمام سنین بیشتر از مقاومت کششی نمونه شاهد می‌باشد، به‌جز نمونه حاوی خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج که در سنین ۲۸ و ۴۲ روز دارای مقاومت کششی کمتری نسبت به نمونه شاهد است. از نتایج مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملاحظه می‌گردد که این دو مقاومت به یکدیگر وابسته بوده و با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد.

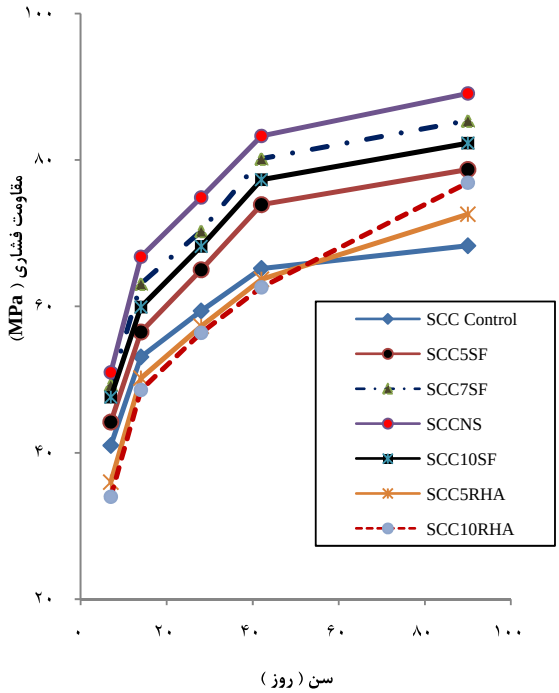
جدول ۶- نتایج آزمایش مقاومت کششی

نمونه	مقاومت کششی در سنین مختلف (MPa)		
	۲۸روز	۴۲روز	۹۰روز
SCC Control	۴/۶۷	۵/۰۲	۵/۱۹
SCC5SF	۵/۱۲	۵/۶۳	۵/۹۷
SCC7SF	۵/۶۶	۶/۳۱	۶/۶۵
SCC10SF	۵/۵۱	۶/۰۹	۶/۵
SCCNS	۵/۹۴	۶/۶۵	۶/۹۴
SCC5RHA	۴/۲۵	۴/۷۳	۵/۳۸
SCC10RHA	۴/۲	۴/۶۶	۵/۵۲

به‌طور کلی تمامی پارامترهایی که بر روی ساختار میکروسکوپی ماتریس خمیر سیمان و ناحیه انتقال مؤثر هستند، در رفتار باربری کششی قابل ملاحظه می‌باشند. ارتباط بین مقاومت کششی غیر مستقیم و مقاومت فشاری برای نمونه‌ها در مقابل محدوده پیشنهاد شده توسط CEB-FIP 1990 [۷] در شکل ۵ آمده است. نتایج نشان‌دهنده این است که روابط پیشنهادی CEB-FIP1990 برای مقاومت کششی با تقریب خوبی درمورد بتن‌های خودتراکم توانمند مورد مطالعه صادق بوده است.



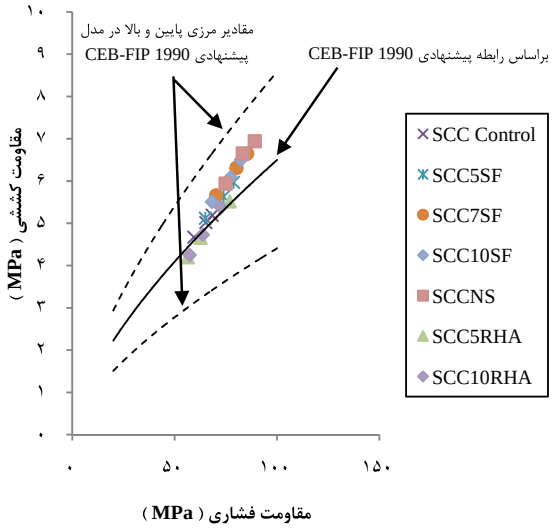
شکل ۳- رابطهٔ زمان خارج شدن بتن در قیف V با مقدار فوق‌روان‌کننده



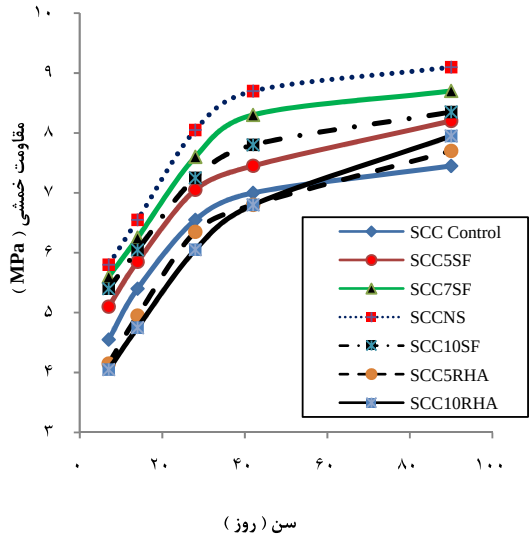
شکل ۴- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین مختلف

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵- تغییرات مقاومت کششی با مقاومت فشاری طبق رابطهٔ CEB-FIP 1990

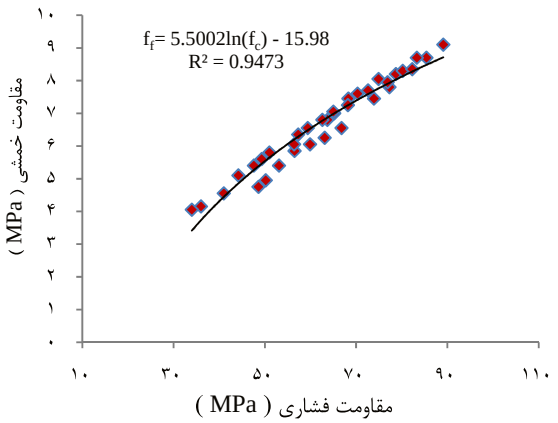


شکل ۶- تغییرات مقاومت خمشی در سنین مختلف

۳ – ۲ – ۳- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

شکل ۶، نمودار مقاومت خمشی نمونه‌های آزمایشی را در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌شود، همانند مقاومت فشاری، در این آزمایش نیز نمونه حاوی نانوسیلیس بیشترین مقاومت خمشی را دارا می‌باشد. به طوری که این افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد در سنین یاد شده به ترتیب ۲۷، ۲۴، ۲۲، ۲۰ و ۱۹ درصد می‌باشد. هم‌چنین با افزودن میکروسیلیس تا مقدار ۷٪ با افزایش مقاومت خمشی روبرو هستیم و پس از آن مقاومت کاهش یافته است. در این آزمایش نیز نمونه حاوی خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج تا سن ۴۲ روزگی نسبت به نمونه شاهد مقاومت کمتری را داشته و با افزایش سن نمونه‌ها مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در سن ۹۰ روزگی افزایش مقاومت نمونه حاوی ۱۰٪ خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج نسبت به نمونه شاهد به حدود ۱۳٪ می‌رسد. اما این مسأله را نمی‌توان نادیده گرفت که با افزایش مقاومت نمونه‌ها از میزان شکل‌پذیری آن‌ها کاسته می‌شود. چنین رفتاری در مورد بتن‌های با مقاومت بالا مشاهده شده است و اصولاً یکی از نقاط ضعف چنین بتن‌هایی رفتار تردتر و شکننده‌تر نسبت به بتن‌های معمولی می‌باشد.

با بررسی نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی ملاحظه می‌گردد که این دو وابسته به یکدیگر بوده و با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی نیز افزایش می‌یابد. رابطهٔ بین مقاومت خمشی و فشاری را می‌توان با استفاده از برازش منحنی و با تقریب مناسبی تعیین نمود و ضریب همبستگی را برای نقاط موردنظر محاسبه نمود. هر چه ضریب همبستگی به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشانه این است که ارتباط بین متغیرها (مقاومت فشاری و مقاومت خمشی) به منحنی نزدیک‌تر می‌باشد. در شکل ۷ رابطهٔ مقاومت خمشی با مقاومت فشاری کلیه نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۷- رابطهٔ کلی مقاومت خمشی با مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف

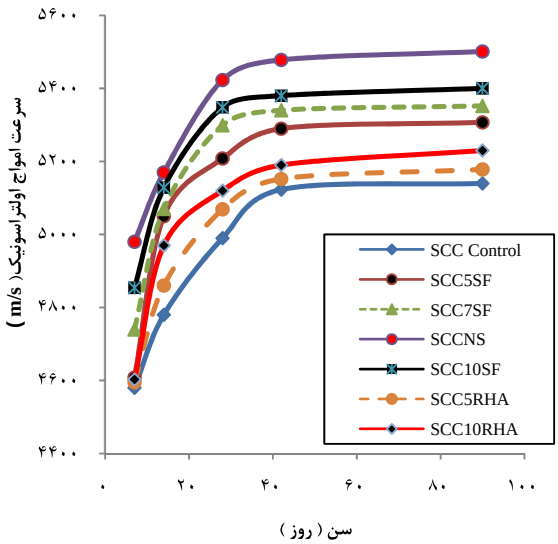
www.SID.ir

Archive of SID

۳ – ۲ – ٤- نتایج آزمایش اولتراسونیک

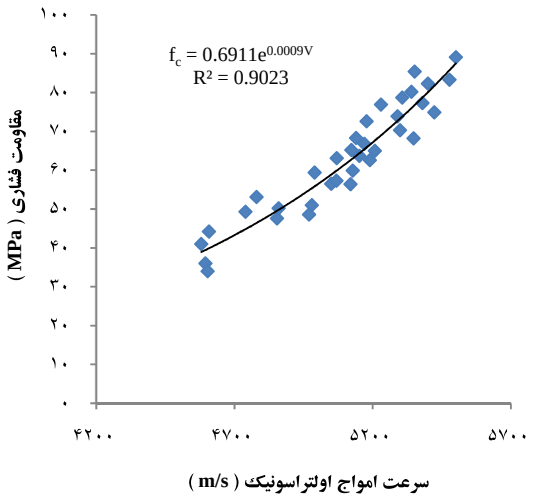
در این پژوهش با توجه به تجارب به‌دست آمده در خصوص پوزولان‌ها مبنی بر افزایش همگنی مخلوط بتنی با ایجاد چسبندگی بهتر بین اجزای مخلوط بتن و با توجه به ماهیت امواج اولتراسونیک، به‌طور کیفی به بررسی تغییرات سرعت امواج اولتراسونیک در لایه‌های مختلف در بتن‌های حاوی پوزولان در مقایسه با بتن کنترل پرداخته شده است.

با ارتباط دادن سرعت پالس با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، نمودار کالیبره تهیه می‌شود که در شرایط مشخص شده‌ای می‌توان مقاومت بتن را در محل تعیین نمود. برای مثال نوع سنگ‌دانه و مقدار آن و هم‌چنین میزان رطوبت، دما و حضور آرماتور بر روی رابطهٔ میان سرعت امواج و مقاومت، مؤثر می‌باشد و شاید بتوان در شرایط مشخص شده‌ای این دو پارامتر را به یکدیگر ارتباط داد. کلیه نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری تحت آزمایش اولتراسونیک قرار گرفتند. نتایج آزمایش اولتراسونیک نمونه‌های بتنی در نمودار شکل ۸ آمده است.



شکل ۸- تغییرات سرعت امواج اولتراسونیک در سنین مختلف

براساس نمودار ارائه شده در شکل ۸ مشاهده می‌گردد که سرعت امواج اولتراسونیک در کلیه نمونه‌ها با افزایش سن بتن افزایش می‌یابد. ولی این افزایش در سنین بالاتر کمتر است. هم‌چنین مشاهده می‌گردد که با تغییرات کم در سرعت امواج اولتراسونیک، مقاومت فشاری به میزان زیادی افزایش می‌یابد. از این مطلب می‌توان نتیجه گرفت که در بتن خودتراکم توانمند که حتی در سنین اولیه نمونه‌ها از مقاومت بالاتری نسبت به بتن‌های معمولی برخوردارند، یافتن رابطه‌ای میان مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک بسیار مشکل‌تر از بتن معمولی است. به منظور مقایسه سرعت امواج اولتراسونیک در نمونه‌ها، رابطهٔ سرعت امواج اولتراسونیک با مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم به کمک برازش منحنی به شیوه حداقل مربعات در شکل ۹ ارائه شده است. بر این مبنا، روندی مشابه با آن‌چه که در مقاومت فشاری دیده شده است، در میزان سرعت عبور امواج نیز دیده می‌شود. بر طبق طبقه‌بندی پیشنهادی Whitehurst، کیفیت بتن بر مبنای سرعت عبور امواج در محدوده ۴۵۰۰ m/s و بیشتر، ۴۵۰۰ تا ۳۵۰۰ m/s، ۳۵۰۰ تا ۳۰۰۰ m/s، ۳۰۰۰ تا ۲۰۰۰ m/s و ۲۰۰۰ m/s و پایین‌تر به ترتیب به پنج رده عالی، خوب، مشکوک، ضعیف و خیلی ضعیف رده‌بندی شده است. بر این مبنا، نمونه‌های بتن خودتراکم آزمایش شده در رده عالی و یا خوب تقسیم‌بندی می‌شوند [۸].



شکل۹- رابطهٔ کلی سرعت امواج اولتراسونیک با مقاومت فشاری

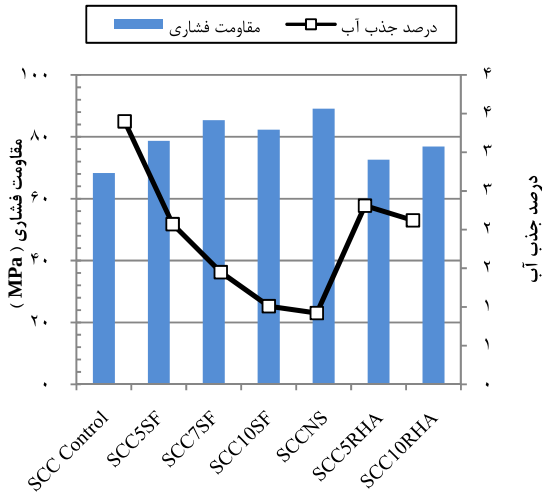
۳ – ۲ – ۵- نتایج آزمایش جذب آب

به منظور بررسی اثر پوزولان‌ها به‌خصوص نانوسیلیس بر عملکرد نفوذپذیری نمونه‌های ساخته شده، آزمایش جذب آب براساس دستورالعمل ASTM-C 642 در پایان دوره عمل‌آوری صورت پذیرفت. کیفیت بتن توسط CEB به سه رده ضعیف،

www.SID.ir

Archive of SID

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 و همان‌طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، تمام نمونه‌ها غیر از نمونه شاهد دارای جذب آب در رده کیفیت خوب هستند.



شکل ۱۰- نمودار مقاومت فشاری و جذب آب در سن ۹۰ روزگی

هم‌چنین از نتایج موجود در این جدول می‌توان دریافت، افزودن پوزولان به بتن SCC موجبات کاهش میزان جذب آب و نفوذپذیری و به تبع آن عملکرد بهتر و مطلوب‌تر بتن در مقابل هجوم عوامل مخرب بیرونی را فراهم می‌آورد، که البته نقش نانوسیلیس در کاهش نفوذپذیری به مراتب بیشتر از میکروسیلیس و خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج می‌باشد. عملکرد مطلوب نانوسیلیس در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی بتن خودتراکم را می توان به اثر پرکنندگی و واکنش پوزولانی این ماده نسبت داد. چرا که نانوذرات باتوجه به ابعاد بسیار ریز، اثر پرکنندگی قابل‌توجهی داشته و با پر کردن فضاهای خالی موجود در خمیر سیمان موجب افزایش تراکم و بهبود خواص مکانیکی می‌گردند. از طرف دیگر عمل هیدراتاسیون بین آب و سیمان منجر به تولید مقادیر زیادی کریستال‌های هیدروکسیدکلسیم، که فاقد هرگونه خاصیت سیمانی هستند، می‌شود. نانوسیلیس به علت فعالیت پوزولانی بسیار زیاد با این کریستال‌ها واکنش داده و تولید ژل سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته می‌نماید بدین ترتیب نانوسیلیس با کاهش کریستال‌های هیدروکسیدکلسیم بوجود آمده از عمل هیدراتاسیون و تشکیل ساختاری متراکم‌تر و همگن‌تر کمک شایانی به بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی بتن خودمتراکم می کند [۹]. با مشاهده شکل ۱۰ پی خواهیم برد که میزان جذب آب نمونه‌ها تقریباً به طور غیرمستقیم به مقاومت فشاری آن‌ها بستگی دارد. به طوری که در همه نمونه‌ها افزایش مقاومت فشاری با کاهش جذب آب آن‌ها همراه بوده و بالعکس.

عملکرد مطلوب نانوسیلیس در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی بتن خودتراکم را می‌توان به اثر پرکنندگی و واکنش پوزولانی این ماده نسبت داد. چرا که نانوذرات با توجه به ابعاد بسیار ریز، اثر پرکنندگی قابل توجهی داشته و با پرکردن فضاهای خالی موجود در خمیر سیمان موجب افزایش تراکم و بهبود خواص مکانیکی می‌گردند. از طرف دیگر، عمل هیدراتاسیون سیمان منجر به تولید مقادیر زیادی کریستال‌های هیدروکسیدکلسیم ($Ca(OH)_2$) که فاقد هرگونه خاصیت پوزولانی هستند، می‌شود. نانوسیلیس به علت فعالیت پوزولانی بسیار زیاد با این کریستال‌ها واکنش داده و تولید ژل سیلیکات‌کلسیم‌هیدراته (CSH) می‌نماید. بدین ترتیب نانوسیلیس با کاهش کریستال‌های هیدروکسیدکلسیم به‌وجودآمده از عمل هیدراتاسیون و تشکیل ساختاری متراکم‌تر و همگن‌تر، کمک شایانی به بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی بتن خودتراکم می‌کند.

٤ - نتیجه‌گیری

براساس بررسی‌های به‌عمل آمده در حین انجام آزمایش‌ها و نتایج آزمایشگاهی موارد زیر قابل استنتاج است:

۱) مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی پوزولان‌های مورد استفاده به غیر از نمونه‌های حاوی خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج که تا سن ۴۲ روزگی کمتر از نمونه شاهد است، در کلیه سنین بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. هم‌چنین بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه حاوی نانوسیلیس بوده و پس از آن نمونه حاوی ۷٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت فشاری را دارا می‌باشد. بنابراین استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس، نانوسیلیس و خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. اگرچه افزودن خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج در سنین اولیه

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش مقاومت را نشان می‌دهد، اما در سن ۹۰ روزگی نسبت به نمونه شاهد مقاومت فشاری بیشتری دارد.

۲) نتایج استفاده از نانوسیلیس در بتن خودتراکم حاکی از افزایش مقاومت فشاری، خمشی، کششی و کاهش جذب آب به علت پرشدن بیشتر خلل‌وفرج داخل کریستال‌های مضر هیدروکسیدکلسیم به علت فعالیت پوزولانی بسیار بالای این ماده در مقایسه با دیگر نمونه‌ها (فاقد ذرات نانو) می‌باشد.

۳) مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی پوزولان‌های مورد استفاده به غیر از نمونه حاوی خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج که تا سن ۴۲ روزگی کمتر از نمونه شاهد است، در کلیه سنین بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد.

۴) استفاده از پوزولان در بتن خودتراکم سبب کاهش پدیده آب‌انداختن و یکنواختی بیشتر بتن خودتراکم می‌شود.

۵) پوزولان‌ها سبب کاهش روانی بتن خودتراکم می‌گردند و برای استفاده از آن‌ها، استفاده از فوق‌روان‌کننده جهت افزایش کارایی بتن خودتراکم لازم است. هم‌چنین خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج بیش از سایر پوزولان‌ها در کاهش روانی تأثیرگذار می‌باشد.

۶) سرعت امواج اولتراسونیک در بتن‌های خودتراکم توانمند حاوی پوزولان‌های مورد استفاده در این پژوهش و هم‌چنین در نمونه شاهد با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش یافته، اما میزان رشد افزایش سرعت، با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

۷) میزان جذب آب نمونه‌ها تقریباً به طور غیرمستقیم به مقاومت فشاری آن‌ها بستگی دارد. به‌طوری‌که در همه نمونه‌ها با افزایش مقاومت فشاری جذب آب نمونه‌ها کاهش یافته و بالعکس.

۸) براساس طبقه‌بندی CEB جهت بررسی کیفیت بتن بر مبنای جذب آب، بتن خودتراکم حاوی پوزولان‌های یاد شده در رده "خوب" قرار می‌گیرد که البته نقش نانوسیلیس در کاهش نفوذپذیری به مراتب بیشتر از میکروسیلیس و خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج می‌باشد.

۹) با جای‌گزین کردن پوزولان‌های میکروسیلیس و نانوسیلیس و خاکستر پوستهٔ شلتوک برنج به جای سیمان میزان لزجت بتن افزایش یافته و روانی بتن کاهش می‌یابد، بنابراین نیاز به فوق‌روان‌کننده افزایش می‌یابد.

۵ - مراجع

[1]. Okamura, Hajime, Self-compacting high-performance concrete, Concrete International, 19 (7), pp. 50-54, 1997.

[2]. Ozawa, K., Maekawa, K., and Okamura, H., Development of High Performance Concrete Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B) Vol. XLI, No.3, pp. 381-439, 1992.

[3]. Safiuddin ,Md., West, J.S., Soudki, K.A., Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash , Cement & Concrete Composites, 32,pp. 708–717,2010.

[4]. Jalal, Mustafa. Mansouri, Esmaeel. Sharifipour,Mohammad.Pouladkhan,Ali Reza., Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO2 micro and nanoparticles, Materials and Design 34, 389–400,2012.

[۵]. صدر ممتازی، علی. فصیحی، علی. تأثیر حضور نانوسیلیس، دوده سیلیس و الیاف پلی پروپیلن در بتن خودتراکم. دومین کنفرانس ملی بتن ایران. تهران ، ۱۳۸۹.

[6]. The European guidelines for self-compacting concrete, Specification production and use. EFNARC, 2005;

[7]. CEB-FIP, Diagnosis and assessment of concrete structures, State of the Art Report,CEB Bulletin 192, 83–5,1989.

[8]. Whitehurst, E.A., Soniscope tests concrete structures , Journal of the American Concrete Institute, 47, 443–444, 1951.

[9]. H. Kim, G. Tae, J. W. Jo, C. B. Park, Characteristics of cement mortar with nano-SiO_2 particles,Construction and Building Materials, 21, pp 1351-1355,2007.

[10]. Uysal, M. and Yilmaz, K., Effect of mineral admixtures on properties of self compacting concrete ,Cement & Concrete Composites, 33, 771–776, 2011.

[11]. A. A. Maghsoudi, Dahooei, Engineering properties of performance self compacting

www.SID.ir

Archive of SID

concrete, 7rd Int. Conference of civil Engineering, Tehran, Iran, 2006.

[12]. Sahmaran, M. Christianto, H.A. and Yaman, I.O., The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars,Cement & Concrete Composites, 28, 432– 440, 2006.

[13]. ? . Skarendahl and ? . Petersson, (Eds), Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art, RILEM report 23, RILEM Publications S.A.R.L, Bagneux, France, 2000.

[14]. Mahmud, H. B., Majuar, E., Zain, M. F. M., & Hamid, N. B. A. A... Mechanical properties and durability of high strength concrete containing rice husk ash. ACI Special Publication, 221, 2004.

[15]. Zhang, M. H., & Malhotra, V. M. High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. ACI Materials Journal, 93(6), 1996.

[۱۶]. قانع فشتالی، فاطمه. ارزیابی خواص مهندسی بتن خودتراکم توانمند حاوی سیمان آمیخته. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، ۱۳۹۱.

www.SID.ir

Archive of SID

Evaluation of Engineering Properties of High Performance Self Compacting Concrete Containing Blended Cement

M.M.Ranjbar*
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan
R.Madandoust
Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan
F.Ghaneh
M.Sc, Department of Civil Engineering, University of Guilan
S.Isapour
B.Sc, Department of Civil Engineering, University of Guilan
M.Karimi
M.Sc, Department of Civil Engineering, University of Guilan

(Received: 2014/6/10 - Accepted: 2015/4/29)

Abstract

In this research the engineering features of HPSCC were investigated with the substitution of some parts of cement with pozzolans such as rice hush ash, silica fume and nano-SiO_2. In HPSCC and implementing compressive strength, splitting tensile strength (Brazilian test), flexural strength, ultrasonic pulse velocity and water absorption. The tests of fresh HPSCC are also done including slump flow tests, V-funnel and L-box in addition to hardened concrete features. This research contains seven mixtures that the used pozzolans percentage in these mixtures are as bellow:

The results show that combining cement with mentioned pozzolans causes promotion of engineering features of self compacting concrete including compressive strength after 90 days .The substitution of rice husk ash for some parts of cement of course causes strength reduction at early ages in comparison to sample of control.

Keywords: High performance self compacting concrete, engineering properties, rice husk ash, silica fume, Nano silica.

* Corresponding author: RANJBAR86@yahoo.com

www.SID.ir