

خواص مهندسی و دوام بتن خود تراکم حاوی ذرات نانو سیلیس با رویکرد دستیابی به درصدهای بهینه الیاف

علی صدرممتازی

دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

رضا کهنی خشکبیجاری

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشکده فنی دانشگاه گیلان

امید لطفی عمران *

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشکده فنی دانشگاه گیلان

چکیده

تحقیقات گذشته نشان داده است که استفاده از الیاف در بتن سبب افزایش مقاومت سایشی، خمشی و کششی می‌گردد. از یکسو بتن خود تراکم (SCC)، بتنی بسیار سیال و مخلوطی بسیار همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی را مرتفع نموده و بدون نیاز به هیچگونه لرزاننده داخلی و خارجی تحت اثر وزن خود، متراکم می‌شود. این ویژگی کمک شایانی به اجرای اعضای سازه‌ای با تراکم زیاد آرماتور می‌نماید. از سوی دیگر فناوری نانو در سالیان اخیر موجب تحولات شگرفی در دانش بشری گردیده و نانو ذرات که نتیجه‌ای از فناوری نانواند به عنوان یک پوزولان مصنوعی بسیار فعال در تکنولوژی بتن توانسته‌اند با کاربرد در ساخت مصالح پایه سیمانی ساختار آنها را تحت تاثیر قرار داده و بهبود بخشند. لذا استفاده از بتنی که خصوصیات بتن خود تراکم و الیافی را با هم داشته و ریز ساختار ماتریس آن تقویت شده باشد کمک شایانی به ساخت سازه‌هایی با عملکرد بالا و با دوام می‌نماید. در این تحقیق آزمایشگاهی به بررسی اثر توأم نانوسیلیس و الیاف‌های مختلف (فلزی، پلی پروپیلن، شیشه) بر خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی، خمشی، انرژی پذیری (طاق) و مدول الاستیسیته) و رئولوژی (L-BOX، جریان اسلامپ،) و دوام (شامل نفوذ یون کلر (RCPT) و جذب آب) بتن خود تراکم پرداخته میشود، و نیز از آزمایش طیف سنجی تفرق اشعه ایکس (XRD) استفاده شده است. بدین منظور ۴۰ طرح اختلاط شامل ۴ سری A و B و C و D که به ترتیب حاوی ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی سیمان، نانو سیلیس که به صورت جایگزین با سیمان مورد استفاده قرار گرفتند. هر سری از این مجموعه شامل ۳ نوع الیاف (فلزی: ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۵ درصد حجمی و پلی پروپیلن: ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد حجمی و شیشه: ۰/۱۵ و ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی) مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفتند. بررسی نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که حضور توأم درصد بهینه الیاف (فلزی ۰/۳، پلی پروپیلن ۰/۲ و شیشه ۰/۲ درصد حجمی) و نانوسیلیس (۴ درصد وزنی سیمان) موجب بهبودی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن خود تراکم می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: الیاف، بتن خود تراکم، ذرات نانو، خصوصیات مکانیکی، دوام.

* نویسنده مسئول: o.lotfiomran@yahoo.com

۱- مقدمه

ریزترکها و ترکها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می‌شود. مهمترین مشخصه بتن الیافی خاصیت جذب انرژی، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ضربه است؛ به همین دلیل امروزه این بتن نقش بسیار جدی در پیشرفت تکنولوژی بتن ایفا کرده و به عنوان یک ماده جدید و اقتصادی در مسائل ساختمانی محسوب شده است [۶]. خاصیت جذب انرژی و طاقت بتن می‌تواند به نحو مطلوبی خطر شکست سازه‌های بتنی به خصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزه‌ای قرار می‌گیرند را کاهش دهد. برای روشن شدن شکل‌پذیری بتن الیافی توجه شود که کرنش شکست یک ماتریس ترد (نظیر سیمان پرتلند) به مراتب از کرنش شکست یک فایبر محکم (نظیر فولاد، شیشه، پلی‌پروپیلن) کمتر است (کمتر از ۱/۵۰). در نتیجه وقتی که سیمان مسلح به الیاف تحت بار قرار گیرد ماتریس بسیار زودتر از شکست الیاف، ترک خواهد خورد با ترک‌خوردگی ماتریس، یکی از سه نوع شکست زیر ممکن است برای جسم کامپوزیت اتفاق بیافتد:

الف) ممکن است جسم کامپوزیت بلافاصله پس از ترک‌خوردگی ماتریس بشکند، نظیر حالتی که از فایبرها پلیمری با درصد حجم کم استفاده شده باشد.

ب) ممکن است جسم کامپوزیت تحت بارهای کمتر به تحمل بار و تغییر شکل ادامه دهد، نظیر حالتی که از فایبرهای فولادی با حجم کم تا متوسط استفاده شده باشد. در این حالت مقاومت پس از ترک‌خوردگی ابتدا با بیرون کشیده شدن فایبرها از سطح ترک تأمین شده و سپس با تغییر شکل آنها ادامه می‌یابد.

ج) ممکن است پس از ترک‌خوردگی ماتریس، جسم کامپوزیت تنشهای کششی و تغییر شکل‌های بیشتری را تحمل می‌کند، نظیر حالتی که از فایبرهای کربن به مقدار متوسط تا زیاد استفاده شده باشد. دقت شود که این حالت فقط در صورتی اتفاق می‌افتد که مقاومت چسبندگی (مقاومت بیرون کشیدگی^۱) فایبر در لحظه اولین ترک بیش از بار موجود در لحظه اولین ترک باشد، زیرا در لحظه ترک‌خوردگی تمام بار به ناگهان به فایبر منتقل می‌شود. حال با افزایش بار روی جسم کامپوزیت، فایبر تنش اضافی را از طریق چسبندگی به ناحیه تماس، به ماتریس بتن منتقل می‌کند. واضح است که از بین حالت فوق‌الذکر، بتن الیافی در وضعیت (الف) فاقد

بتن خود تراکم اولین بار برای دست‌یابی به ساختار بتن پایدار در سال ۱۹۸۸ مطرح گردید و مطالعات اولیه پیرامون کارایی بتن خود تراکم، توسط ozawa (۱۹۸۹) و okamura (۱۹۹۳) در دانشگاه توکیو انجام گرفت [۱، ۲، ۳] طبق نظریه‌ای، بتن خود تراکم بتنی است که دارای سیالیتی باشد که تراکم، بدون نیاز به انرژی خارجی انجام شود و علاوه بر آن در حین و پس از تمام بتن‌ریزی بصورت یکپارچه باقی بماند و به راحتی در خلال آرماتورهای متراکم حرکت کند [۴]. اجرای سریع‌تر ساختمان‌ها، کاهش نیروی انسانی به دلیل خود تراکمی بودن SCC، بهبود دوام به دلیل کاهش نفوذپذیری، آزادی عمل بیشتر در طراحی مقاطع از مزایای استفاده از بتن SCC می‌باشد. از طرفی بتن به عنوان ماده‌ای که ساختار اصلی بیشتر سازه‌ها از قبیل: پل، سد، روسازی فرودگاه و اسکلت سازه‌ها و ... را تشکیل می‌دهد، از نظر خواص دارای معایبی نیز می‌باشد که نظر محققان و مهندسان را به خود جلب کرده است. که از مهمترین معایب آن مقاومت کششی کم آن است که به همین دلیل دارای شکل‌پذیری کم و تردی زیاد می‌باشد. برای رفع این عیب از تسلیح بتن توسط میلگردهای فولادی استفاده می‌شود. این میلگردها به صورت متمرکز در بتن قرار می‌گیرند و تا حد خیلی زیاد ضعف مقاومت کششی بتن را جبران می‌کند. استفاده از میلگرد در همه جا امکان‌پذیر نبوده یا باعث هزینه‌های زیادی می‌شود مانند: پوسته کانال‌های آب، روسازی، فرودگاه‌ها و ... از این رو برای رفع این مشکل در چند دهه اخیر از رشته‌های الیاف که به صورت یکنواخت در حجم بتن پراکنده استفاده می‌شود که ایده آن به قرن‌ها قبل مانند استفاده از کاه یا موی دم اسب در خشتهای گلی برمی‌گردد.

انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ترک‌ها و ریزترک‌ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است. تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریز ترک‌ها می‌شوند و چنین ریز ترک‌هایی در سطح دانه‌های درشت متمرکز می‌شوند. با تأثیر بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریز ترک‌ها در جسم بتن منتشر می‌شود [۵]. استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی (FRC) به عنوان یک گام موثر در جلوگیری از انتشار

^۱ Pull out strength

درصد وزن سیمان در سری های مختلف بکار گرفته شد. در این تحقیق از فوق روان کننده (SP) نسل سوم بر پایه کربوکسیلیک اتر با نام تجاری GLENIUM_110P، استفاده شده است این ماده، کدر و ابری رنگ بوده و در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، وزن مخصوص آن ۱/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد.

جدول (۱) - مشخصات فیزیکی نانو سیلیس

حالت رنگ	pH	نقطه ذوب و جوش °C	وزن مخصوص gr/cm ³	ویسکوزیته mPa.s
مایع شیری	۹-۱۱	۱۰۰-۰	۱/۰۵-۱/۴۰۰	<۵۰

الیاف های مصرفی شامل سه نوع پلی پروپیلن، فولادی و شیشه می باشد که ویژگی های آنها را می توان در جدول (۲) مشاهده کرد.

جدول ۲- ویژگی های فیزیکی و مکانیکی الیاف های مصرفی

الیاف	شکل	مقاومت کششی (kg/cm ²)	طول (mm)	قطر (mm)	نسبت منظر
P.P	صاف	۴۵۰۰	۱۲	۰/۱	۱۲۰
ST	قلابدار	۲۱۰۰۰	۳۶	۰/۷	۵۰
Glass	صاف	۱۴۰۰۰	۱۲	۰/۰۲	۶۰۰

شن مصرفی با حداکثر ابعاد ۱۲/۵ میلیمتر و منحنی دانه بندی آن در محدوده استاندارد ASTM بوده و ماسه مصرف شده زیر الک ۴/۷۵ میلیمتر انتخاب شد که دارای هم ارز ماسه ای به میزان ۷۶ درصد بوده است و از سیمان پرتلند تیپ ۲ و پودر سنگ با وزن مخصوص ۲/۶ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شده است.

۳- طرح اختلاط

در این تحقیق، ۴۰ طرح اختلاط شامل ۴ سری A, B, C, D به ترتیب با ۰، ۲، ۴، ۶ درصد وزنی سیمان، نانو سیلیس که به صورت جایگزین با سیمان استفاده شده است و هر سری شامل ۳ نوع الیاف (فلزی: ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، درصد حجمی، پلی پروپیلن: ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، درصد حجمی و شیشه: ۲/۱۵، ۰/۰، ۰/۳، درصد حجمی) مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. در تمام ۴۰ طرح اختلاط که در جدول (۳) آمده است، به غیر از نوع و مقدار الیاف و میزان نانو

شکل پذیری بوده و بیشترین شکل پذیری برای بتن الیافی در شرایط (ج) حاصل می شود. حال برای رسیدن به حالت شکل پذیر بتن الیافی (حالت ج) نیاز است که به تقویت ناحیه تماس الیاف و ماتریس بتن پردازیم.

ناحیه تماس که به اسامی مختلفی مانند لایه مرزی یا منطقه انتقالی نامیده می شود، ناحیه مرزی بین خمیر سیمان و سطح سنگ دانه یا الیاف و یا میلگرد پدید می آید که نقش مهمی در نفوذ پذیری، دوام و مقاومت بتن دارد. ناحیه تماس دارای میکرو ساختاری متفاوت با خمیر سیمان بوده و دارای تخلخل و ریز ترک های بیشتری است. ضخامت ناحیه تماس، تابع نوع الیاف، نوع سیمان، نوع پوزولان مصرفی، نسبت آب به سیمان و سن بتن می باشد. در این بررسی آزمایشگاهی برای تقویت ناحیه تماس از نانو سیلیس به عنوان پوزولان مصنوعی بسیار فعال که از محصولات فناوری نانو است استفاده شده است. در سال های اخیر، با ورود فناوری نانو دیدگاه های جدید در زمینه فناوری بتن ایجاد شده است که از جمله آن ها می توان به بهبود دانس و درک فیزیکی و شیمیایی واکنش و ریز ساختار بتن و نیز بهبود کیفیت بتن های موجود و روش های اجرایی مرتبط با آن با استفاده از مواد جدید در مقیاس نانو یا همان نانو ذرات اشاره کرد. طبق تعریف، نانو ذره به ذره ای اطلاق می شود که حداقل یکی از ابعاد آن کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. با توجه به ریز ساختار سیمان هیدراته شده و وجود حفراتی در ابعاد نانو در آن، استفاده از نانو ذرات می تواند در پر کردن تخلخل های بسیار ریز خمیر سیمان و افزایش مقاومت و به خصوص دوام بتن مؤثر باشد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط Qing [۷]، Collepari [۸] و Li [۹] این مسأله را تأیید می کند. بنابراین وجود نانو سیلیس می تواند استحکام فشاری خمیر سخت شده سیمان و استحکام پیوندی سنگدانه با خمیر و همچنین الیاف با خمیر سیمان را افزایش داده و ساختار ناحیه انتقال را به طور مؤثری بهبود ببخشد.

۲- مصالح مصرفی

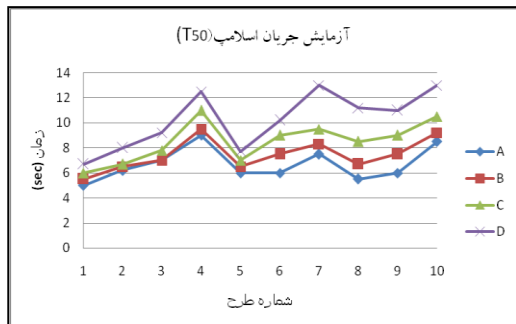
نانو سیلیس مصرفی در این تحقیق نانو سیلیس آمورف کلونیدی محلول در آب با غلظت ۵۰ درصد است. نانو سیلیس مذکور دارای بیش از ۹۹ درصد سیلیس آمورف بوده که در جدول (۱) خصوصیات فیزیکی این نانو سیلیس آمده است، که با ۲، ۴، ۶

سیلیس، تمامی اجزای تشکیل دهنده بتن ثابت در نظر گرفته شد. نسبت آب به مصالح سیمانی (W/B^1) برابر است با ۰/۳۹ و طرح شماره A1 که بدون الیاف و نانو سیلیس است به عنوان طرح شاهد در نظر گرفته شد. (V_f (%)) موجود در جدول (۳) همان درصد حجمی الیاف یعنی وزنی آن آب و ۵۰٪ آن نانو سیلیس می باشد).

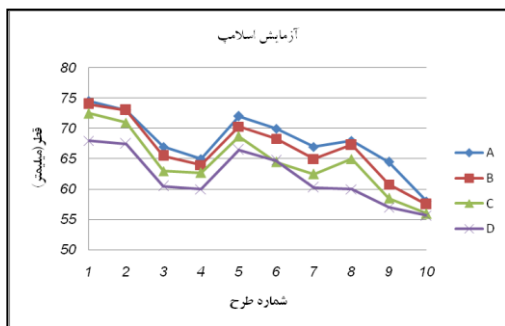
جدول ۳- طرح اختلاط بتن (بر حسب kg/m^3)

MIX No.	Series	Nano Silica (%)	Fiber V_f (%)	Gravel	Sand	Lime stone powder	Cement	Nano Silica	Water	SP	
1	A	0	-	722	826	288.9	413.1	0	162	7	
2			St	0.2	722	826	288.9	413.1	0	162	7
3				0.3	722	826	288.9	413.1	0	162	7
4				0.5	722	826	288.9	413.1	0	162	7
5			P.P	0.1	722	826	288.9	413.1	0	162	7
6				0.15	722	826	288.9	413.1	0	162	7
7			Glass	0.2	722	826	288.9	413.1	0	162	7
8				0.15	722	826	288.9	413.1	0	162	7
9				0.2	722	826	288.9	413.1	0	162	7
10				0.3	722	826	288.9	413.1	0	162	7
1	B	2	-	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7	
2			St	0.2	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7
3				0.3	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7
4				0.5	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7
5			P.P	0.1	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7
6				0.15	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7
7			Glass	0.2	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7
8				0.15	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7
9				0.2	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7
10				0.3	722	826	288.9	396.6	16.5	153.7	7
1	C	4	-	722	826	288.9	380	33	145.5	7	
2			St	0.2	722	826	288.9	380	33	145.5	7
3				0.3	722	826	288.9	380	33	145.5	7
4				0.5	722	826	288.9	380	33	145.5	7
5			P.P	0.1	722	826	288.9	380	33	145.5	7
6				0.15	722	826	288.9	380	33	145.5	7
7			Glass	0.2	722	826	288.9	380	33	145.5	7
8				0.15	722	826	288.9	380	33	145.5	7
9				0.2	722	826	288.9	380	33	145.5	7
10				0.3	722	826	288.9	380	33	145.5	7
1	D	6	-	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7	
2			St	0.2	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7
3				0.3	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7
4				0.5	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7
5			P.P	0.1	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7
6				0.15	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7
7			Glass	0.2	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7
8				0.15	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7
9				0.2	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7
10				0.3	722	826	288.9	363.5	49.6	137.2	7

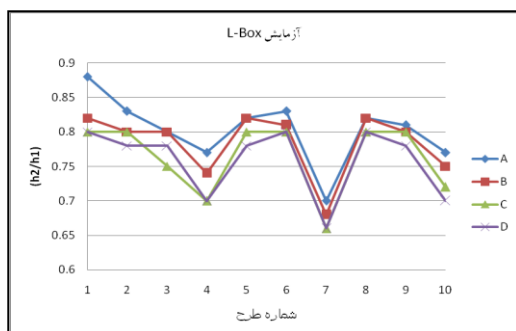
مجموع سیمان و نانو سیلیس: B¹



شکل ۱- آزمایش جریان اسلامپ (T50)



شکل ۲- آزمایش اسلامپ



شکل ۳- آزمایش L-BOX

۶- آزمایشات بتن سخت شده

۶-۱- آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد (B.S1881:Part116) انجام پذیرفت. در آزمایشات انجام شده شرایط عمل آوری و پارامترهای آزمایش و پارامترهای ساخت یکسان بوده اند که نتایج آن در جدول (۴) و شکل (۵) ارائه شده است. جهت تعیین مدول ارتجاعی بتن از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر (ASTM-C496) استفاده گردید که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است.

۴- نحوه عمل آوری و نگهداری، نمونه‌ها

بعد از اتمام اختلاط، این نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداری می‌شدند و سپس از قالب در آورده شده و در حوضچه‌های آب در دمای بین ۲۲-۲۵ درجه سانتیگراد تا سن مورد نظر برای هر آزمایش نگهداری شدند. هر طرح اختلاط شامل ۹ نمونه مکعبی به ابعاد (۱۰×۱۰×۱۰) سانتیمتر و ۶ نمونه استوانه‌ای (۳۰×۱۵) سانتیمتر و ۳ نمونه تیر به ابعاد (۵۰×۱۰×۱۰) سانتیمتر و ۱ نمونه استوانه‌ای (۲۰×۱۰) سانتیمتر می‌باشد که در کل برای ۴۰ طرح اختلاط، ۷۶۰ نمونه ساخته شده است.

۵- بررسی خواص فیزیکی (رئولوژی) بتن خود تراکم تازه

در این تحقیق از طرح اختلاطی استفاده شد که با وجود استفاده از الیاف و نانو سیلیس در بتن، بتن خواص خودتراکمی SCC را داشته باشد، لذا برای سنجش کارایی بتن خودتراکم الیافی حاوی ذرات نانو سیلیس از پارامترهای سنجش بتن خودتراکم استفاده نمودیم. جهت بررسی خواص متفاوتی از قبیل قابلیت عبور و پایداری بتن خودتراکم در برابر جداسدگی از آزمایش L-BOX و جهت ارزیابی تغییرشکل پذیری یا روانی بتن خودتراکم از آزمایش اسلامپ استفاده گردید. آزمایش اسلامپ بتن خودتراکم مشابه با آزمایش صورت گرفته برای بتن معمولی است. با این تفاوت که در این آزمایش پس از جاری شدن بتن بر روی میز اسلامپ دو قطر عمود برهم اندازه گیری میشوند و میانگین آنها بیانگر روانی بتن مذکور میباشد. همچنین زمان رسیدن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر (بر حسب ثانیه) با توجه به علامت گذاری در داخل صفحه آزمایش اسلامپ ثبت می‌شود که بیانگر نرخ تغییر شکل با تعریف یک فاصله روانی است. با آزمایش L-BOX ارتفاع SCC تازه را پس از عبور از میان فواصل مشخص شده بین آرماتورهای فلزی و جریان در یک مسیر در نظر گرفته شده، اندازه گیری می‌گردد و با این مقدار که حداقل ۰/۸ می‌باشد، قدرت عبور و انسداد آن تخمین زده می‌شود. نتایج حاصل از خواص فیزیکی بتن خودتراکم تازه در شکل (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده است. مطابق آیین نامه اروپا جریان اسلامپ بتن خود تراکم باید در محدوده ۶۰-۷۵ سانتیمتر و زمان T₅₀ باید حداقل ۳ و حداکثر ۶ ثانیه باشد.

جدول ۴- خواص مکانیکی بتن سخت شده (۲۸ روزه)

MIX No.	Series	Nano Silica (%)	Fiber V _f (%)	Compressive strength (Mpa)	Splitting tensile strength (Mpa)	Flexural tensile strength (Mpa)	Toughness (N.mm)	Elastic modulus (Gpa)	RCPT (کلمب)	جذب آب (%)	
1	A	0	-	73	4	5.16	1190	38	1622	1.7	
2			St	0.2	74.3	5	6.02	20651	37.6	2200	2.4
3				0.3	81.5	5.2	6.58	22695	38.3	3062	2.47
4				0.5	78	5.8	7.08	31169	38.2	4232	2.5
5			P.P	0.1	71.7	4.2	5.82	3843	36	1948	2.5
6				0.15	69.3	4.6	6.24	5012	35.5	2270	2.62
7				0.2	66.6	4.6	6.6	5433	35.2	2785	2.88
8			Glass	0.15	82	4.5	5.52	2314	37.3	1162	0.8
9				0.2	78.5	5.6	8.1	3001	37	1202	1.1
10				0.3	76.8	5.3	7.8	2570	37.5	1615	1.22
1	B	2	-	75.2	4.3	5.52	-	38.7	-	-	
2			St	0.2	77.5	5.8	7.2	23748	38.7	-	-
3				0.3	82.7	7.1	7.53	27553	39	-	-
4				0.5	79.2	6.9	7.4	36468	38.8	-	-
5			P.P	0.1	73.6	4.4	6.1	4343	37	-	-
6				0.15	70.8	5	6.4	5357	36.7	-	-
7				0.2	68	5.4	7	6007	36.6	-	-
8			Glass	0.15	82.6	4.8	6.7	2503	40	-	-
9				0.2	80.5	5.7	8.3	3177	38.8	-	-
10				0.3	78.7	5.5	8.1	2693	37.6	-	-
1	C	4	-	86.1	5.4	7.2	-	41	978	1.35	
2			St	0.2	85.7	6.7	8.4	22505	41	1378	1.5
3				0.3	88	7.3	8.6	26785	41.3	1603	1.5
4				0.5	87.2	7.6	9.1	35105	41.3	2100	1.58
5			P.P	0.1	82.6	5.5	7.5	3980	38.1	1117	1.7
6				0.15	78.7	6.1	7.8	5309	37.8	1973	1.87
7				0.2	76.5	6.3	7.9	5911	37.7	2115	1.9
8			Glass	0.15	88.7	6.3	8.5	2470	41.5	877	0.6
9				0.2	84	7.2	9	3102	41	1012	0.6
10				0.3	83.6	7.1	8.7	2515	41	1072	0.68
1	D	6	-	85.4	5.4	7.17	-	40.9	-	-	
2			St	0.2	85.2	6.5	8.4	21078	40.7	-	-
3				0.3	86.7	7.2	8.5	21970	41.2	-	-
4				0.5	86.1	7.3	8.8	30556	41	-	-
5			P.P	0.1	79.6	5.4	7.1	3850	37.5	-	-
6				0.15	77	5.8	6.9	5112	37.5	-	-
7				0.2	72.3	6	7.2	5430	37.3	-	-
8			Glass	0.15	86.5	6	8.5	2270	40.7	-	-
9				0.2	83	6.8	8.4	2876	40.5	-	-
10				0.3	82.7	6.7	8.1	2482	40.5	-	-

خواص مهندسی و دوام بتن خود تراکم حاوی ذرات نانو سیلیس با ...

با سرعت ۰/۵ میلی متر بر دقیقه انجام شد و فاصله بین دو تکیه گاه مطابق شکل (۴) ۴۰ سانتی متر می باشد که نتایج آن در جدول (۴) و شکل های (۷) الی (۱۱) ارائه شده است.

۶-۴- تست نفوذ یون کلرید و جذب آب

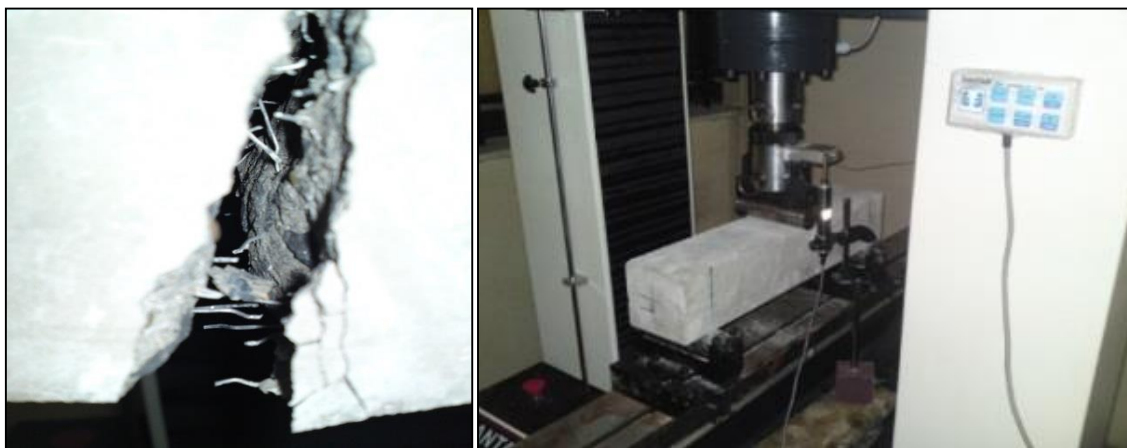
تست نفوذ یون کلرید به روش تسریع شده مطابق آئین نامه ASTM C1202-97 و تست جذب آب برای تمامی طرح ها طبق استاندارد ASTM C 642 در سن ۷۰ روز برای طرح های سری A و C انجام شد که نتایج آن در جدول (۴) و شکل (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است.

۶-۲- آزمایش مقاومت کششی

از این آزمایش بر طبق استاندارد ASTM-C496 برای تعیین مقاومت کششی بتن استفاده شد که نتایج آن در جدول (۴) و شکل های (۶) ارائه شده است.

۶-۳- آزمایش مقاومت خمشی و طاقت خمشی

در این آزمایش هدف تعیین مدول گسیختگی و طاقت خمشی بر اساس استانداردهای ASTM C78 و ASTM C1018-94b که بر روی نمونه های منشوری ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی متر توسط دستگاه (Universal) که مکانیزم آن کنترل تغییر مکان^۱ بوده و



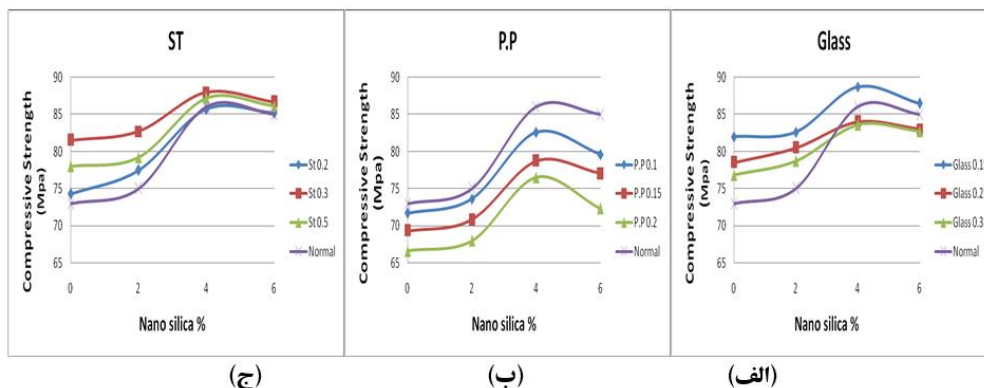
ب) محل شکست

شکل ۴- الف) دستگاه یونیورسال

الیاف (D1, C1, B1, A1) در سن ۷۰ روز استفاده شد. طیف های بدست آمده با طیف های مرجع موجود برای هیدروکسید کلسیم مقایسه شده، و پس از شناسایی پیک های مربوط به هیدروکسید کلسیم از روی شدت آن ها مقایسه نمونه ها پرداختیم.

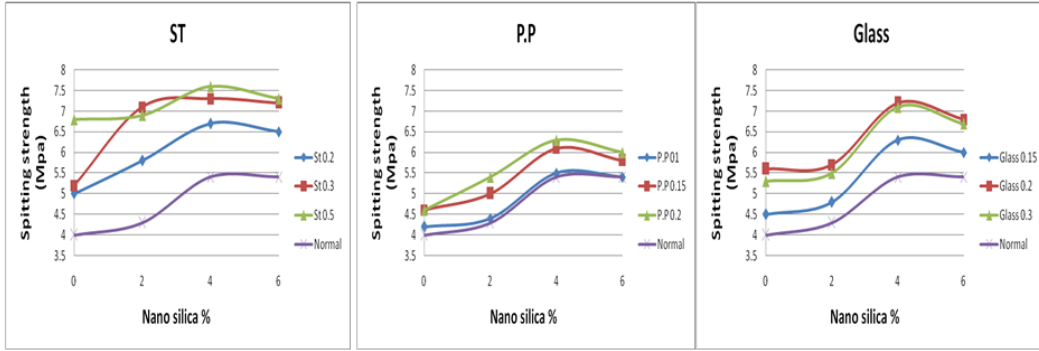
۶-۵- آزمایش طیف سنجی تفرق اشعه X

جهت دستیابی به معیاری مناسب جهت تخمین فعالیت پوزولانی نانو سیلیس، از آزمایش تفرق اشعه X بر روی پودر حاصل از آسیاب نمودن نمونه های خمیر سیمان در طرح اختلاط های فاقد

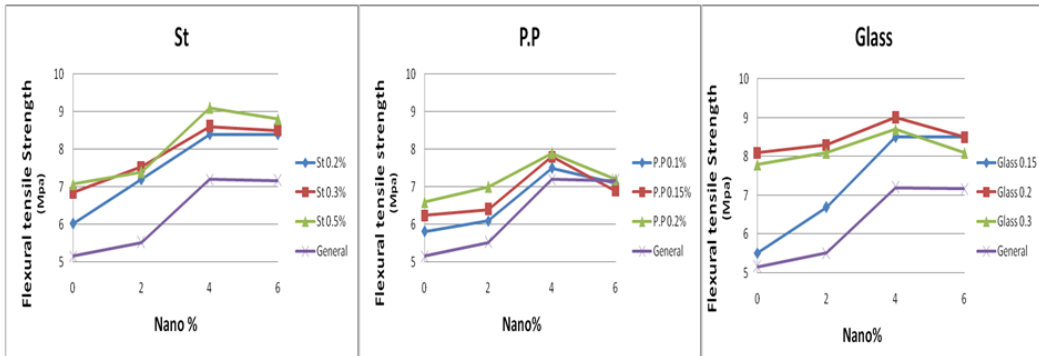


شکل ۵- مقاومت فشاری نمونه های حاوی الیاف (الف) الیاف Glass، (ب) الیاف P.P، (ج) الیاف ST

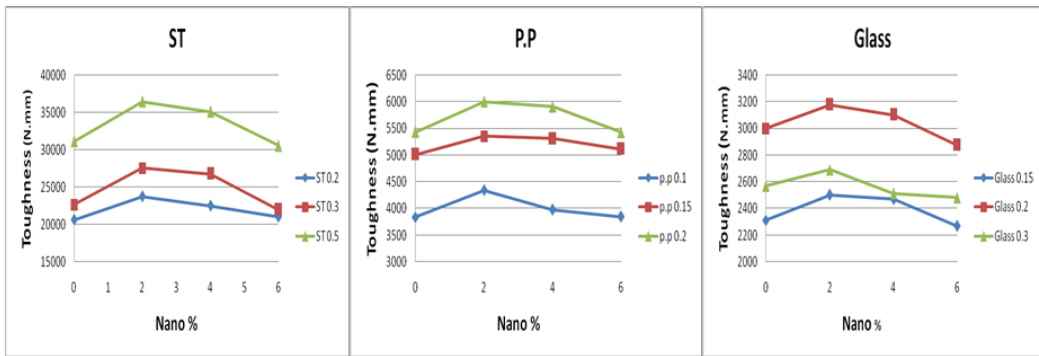
¹ Strain Control



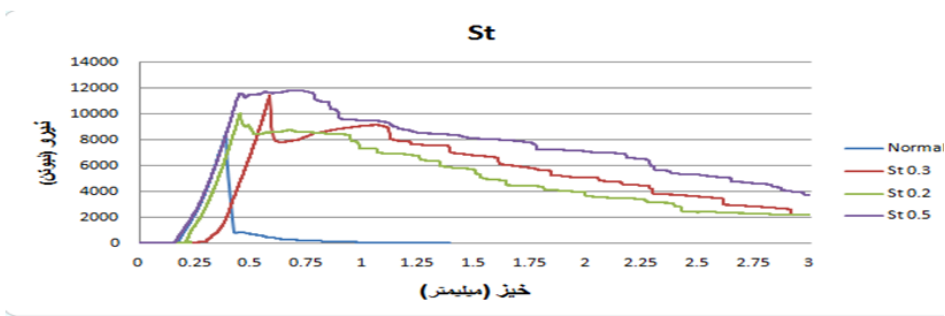
شکل ۶- مقاومت کششی نمونه های حاوی الیاف Glass، (ب) الیاف P.P، (ج) الیاف ST



شکل ۷- مقاومت خمشی نمونه های حاوی الیاف Glass، (ب) الیاف P.P، (ج) الیاف ST

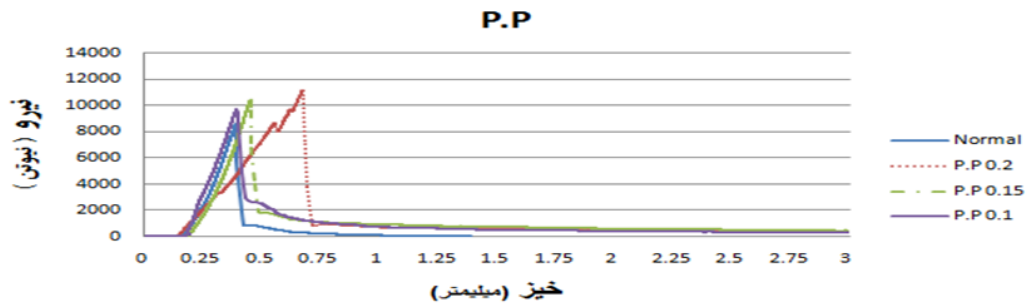


شکل ۸- طاقتم خمشی نمونه های حاوی الیاف Glass، (ب) الیاف P.P، (ج) الیاف ST

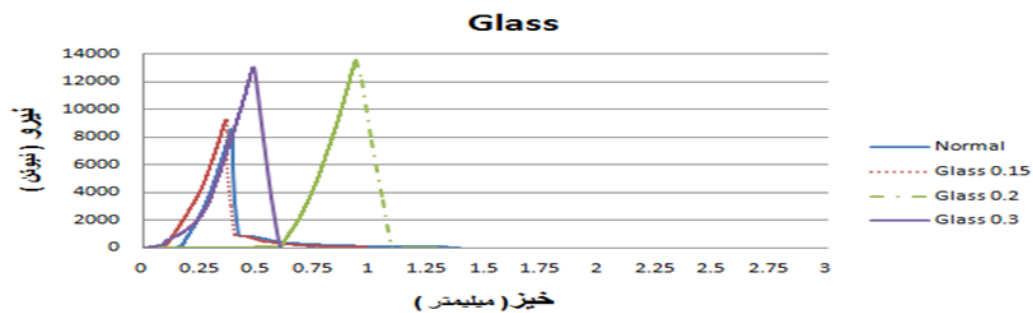


شکل ۹- منحنی (نیرو- تغییر مکان)، نمونه های حاوی درصد های مختلف الیاف فلزی

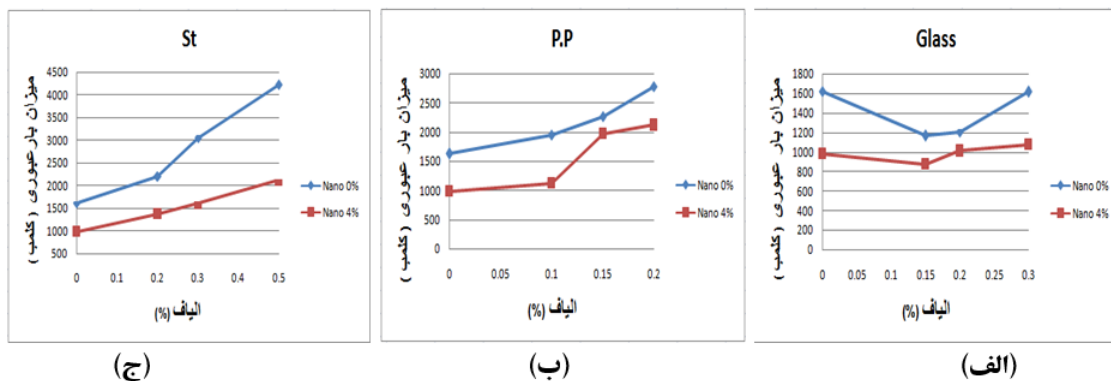
خواص مهندسی و دوام بتن خود تراکم حاوی ذرات نانو سیلیس با ...



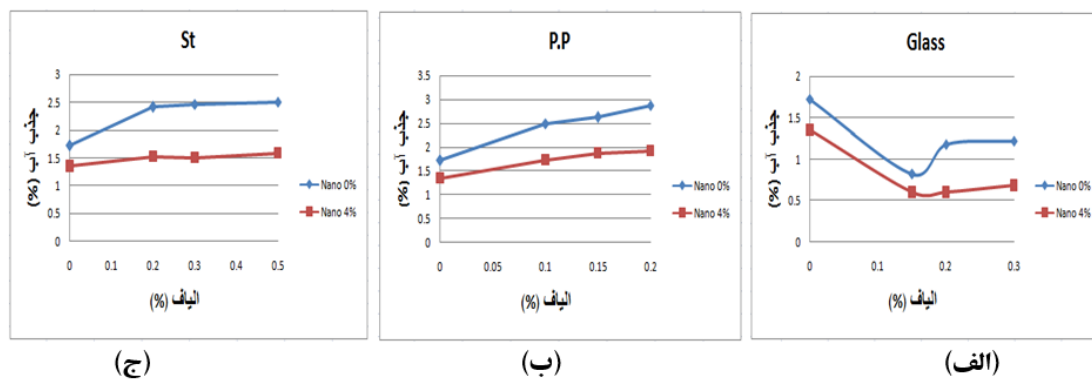
شکل ۱۰- منحنی (نیرو- تغییر مکان)، نمونه های حاوی درصد های مختلف الیاف پلی پروپیلن



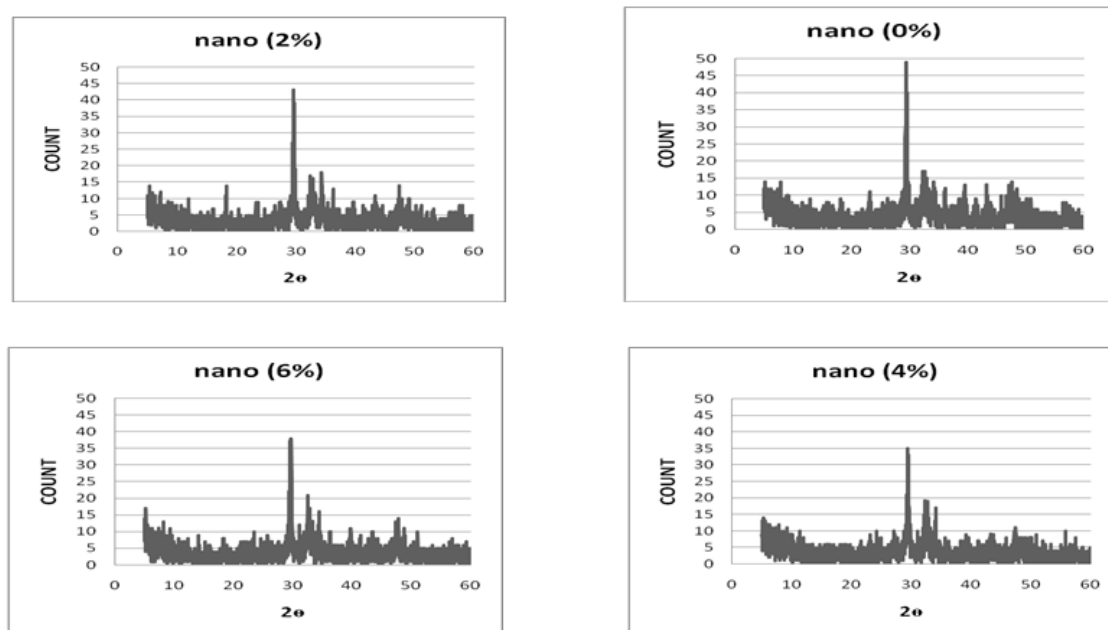
شکل ۱۱- منحنی (نیرو- تغییر مکان)، نمونه های حاوی درصد های مختلف الیاف شیشه



شکل ۱۲- منحنی تاثیر نانو سیلیس در آزمایش نفوذ یون کلر نمونه های حاوی الیاف (الف) الیاف Glass، (ب) الیاف P.P، (ج) الیاف ST



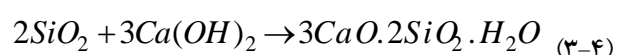
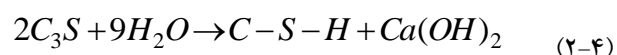
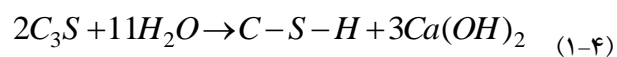
شکل ۱۳- منحنی نتایج تاثیر نانو سیلیس در آزمایش جذب آب نمونه های حاوی الیاف (الف) الیاف Glass، (ب) الیاف P.P، (ج) الیاف ST



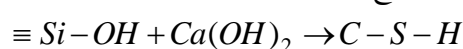
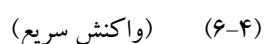
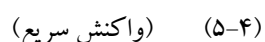
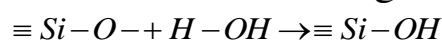
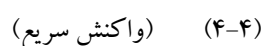
شکل ۱۴- نمودار تغییرات شدت (XRD)، خمیر سیمان نمونه حاوی ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد نانوسیلیس (D1)

۷- تحلیل و تفسیر نتایج آزمایشات خواص مکانیکی و دوام

پوزولانی (رابطه (۴-۳)) اندازه و مقدار کریستال‌های کلسیم هیدروکسید کاهش می‌یابد و ژل متراکم و پرمقاومت C-S-H که حاصل واکنش پوزولانی است، با پر کردن فضاهای خالی باعث افزایش چگالی ناحیه انتقالی می‌شود و در نتیجه مقاومت و دوام بتن افزایش می‌یابد.



در توضیح این واکنش‌پذیری سریع ذرات نانو سیلیس می‌توان گفت که برای نانوسیلیس با پیوندهای غیراشباع، فرآیند واکنش بین SiO_2 و $Ca(OH)_2$ به صورت زیر می‌باشد:



در نتیجه نانوذرات سیلیس واکنش سریع پوزولانی انجام می‌دهند.

۲- خاصیت ریز پرکنندگی [۱۳]: حدود ۷۰٪ از محصولات هیدراسیون ژل C-S-H است. قطر میانگین ذرات ژل C-S-H

ابتدا به بررسی تأثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری بتن شاهد (A1) می‌پردازیم. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۵) در طرح اختلاط‌های بتن‌های خود تراکم فاقد الیاف با افزایش (۲ تا ۴) درصد نانو سیلیس (درصد وزن سیمان) شاهد افزایش مقاومت فشاری به میزان ۲۰ درصد نسبت به نمونه شاهد هستیم و بعد از آن یعنی با افزایش ۶ درصد نانو سیلیس شاهد کاهش مقاومت فشاری هستیم که بهبود مقاومت فشاری در اثر افزایش نانو سیلیس تا ۴ درصد را می‌توان به مکانیزمی ۴ مرحله‌ای که سبب بهبود ریز ساختار و در نتیجه افزایش ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن می‌شود، اشاره نمود. در نتیجه این مکانیزم خواهیم داشت:

۱- واکنش پوزولانی [۱۰، ۱۱، ۱۲]: مقدار زیادی کریستال کلسیم هیدروکسید در طی واکنش سیمان و آب تولید می‌شود (روابط (۴-۱) و (۴-۲)). کریستال $Ca(OH)_2$ کریستالی شش گوشه است و در میان ناحیه انتقالی بین سنگدانه‌ها و ماتریس خمیر سیمان قرار دارد و این امر برای مقاومت‌های بتن مضر می‌باشد.

نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالای خود بسیار واکنش‌پذیر است، در نتیجه با $Ca(OH)_2$ به سرعت واکنش داده و ژل کلسیم - سیلیکات - هیدرات را تولید می‌کند، پس در این واکنش

به وجود می‌آیند که واکنش شیمیایی را تشدید می‌کنند. بنابراین نانو سیلیس انرژی سطحی زیادی دارد و اتم‌ها در سطح فعالیت بالایی قرار دارند که منجر به این می‌شود که اتم‌ها با اتم‌های دیگر بیرونی واکنش دهند و در نتیجه فعالیت پوزولانی نانو سیلیس در سنین پایین بسیار بالا رود.

حال به بررسی اثر الیاف و سپس اثر توام نانو سیلیس و الیاف بر مقاومت فشاری بتن شاهد (A1) می‌پردازیم:

با بررسی نتایج شکل (۵) می‌توان دریافت که با افزایش درصد الیاف فلزی تا درصد حجمی ۰/۳٪ با افزایش مقاومت فشاری و بعد از آن (در ۰/۵ درصد حجمی) با کاهش مقاومت فشاری مواجه هستیم. و در شکل (۵) شاهد روند نزولی مقاومت فشاری با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن می‌باشیم.

همچنین شکل‌های (۵) نشان می‌دهد که با افزایش الیاف به میزان ۰/۱۵ درصد حجمی مقاومت فشاری افزایش و بعد از آن مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. که در تمام طرح‌ها با افزایش درصد نانو سیلیس تا درصد بهینه ۴ درصد در بتن‌های خود تراکم حاوی الیاف، شاهد تقویت مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف هستیم. در طرح اختلاط‌های بتن خود تراکم حاوی الیاف، افزایش مقاومت فشاری ناشی از افزایش درصد الیاف را می‌توان به علت جای‌گیری مناسب الیاف‌ها و توزیع یکنواخت آنها در ماتریس سیمان یا به عبارتی میزان بهینه الیاف مورد نظر در بتن خود تراکم دانست. با توجه به نتایج حاصله از این تحقیق آزمایشگاهی در بتن‌های خود تراکم حاوی الیاف فلزی، مقدار ۰/۳ درصد حجمی، مقدار بهینه برای توزیع مناسب الیاف در بتن خود تراکم می‌باشد.

روند کاهش مقاومت فشاری در بتن خود تراکم ناشی از افزایش درصد حجمی الیاف را می‌توان به علت پدیده گلوله شدن (میل الیاف به متمرکز شدن در یک نقطه) الیاف دانست که اگر درصد افزایش الیاف از مقدار بهینه بیشتر شود شاهد توزیع غیر یکنواخت الیاف و به دنبال آن درگیری نامناسب الیاف با ماتریس سیمان می‌باشیم که این امر امکان تأثیر گذاری الیاف را در بهبود ساختار بتن کاهش می‌دهد.

منحنی‌های ارائه شده در شکل (۶) روند مطلوبی از تأثیر افزایش درصد الیاف بر مقاومت کششی را نشان می‌دهد، با افزایش درصد

تقریباً برابر ۱۰ نانومتر می‌باشد. ذرات نانو با خاصیت پرکنندگی خلل و فرج موجود در ژل C-S-H باعث ایجاد یک ماتریس خمیر چسبنده متراکم‌تر می‌شود.

۳- عملکردی چون هسته اتم [۱۴]: در ساختمان ژل C-S-H، ذرات نانو سیلیس می‌توانند مانند هسته عمل کرده و یک پیوند بسیار قوی با ذرات ژل C-S-H ایجاد کنند. بنابراین، پایداری محصولات هیدراسیون بهبود می‌یابد و انتظار می‌رود که ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن افزایش یابند.

۴- کنترل کریستال‌سازی [۱۱، ۱۰]: در صورتی که مقدار نانوذرات و فواصل بین آنها مناسب باشد، روند کریستال‌سازی کریستال‌ها مانند: $Ca(OH)_2$ در ناحیه انتقالی کاهش یافته و در نتیجه ماتریس خمیر سیمان یکنواخت‌تر و متراکم‌تر می‌گردد.

بنابراین در طرح اختلاط‌های فاقد الیاف (D1, C1, B1, A1) که به ترتیب حاوی ۰ و ۲ و ۴ و ۶ درصد نانو سیلیس هستند و با توجه به نتایج شکل (۵) با افزایش درصد نانو سیلیس تا ۴٪ شاهد رشد صعودی مقاومت فشاری تا حدود ۲۰٪ مقاومت بتن شاهد، هستیم. با مصرف بیشتر از ۴ درصد نانو سیلیس شاهد نه تنها افزایش مقاومت نیستیم بلکه با کاهش مواجه می‌شویم، و این کاهش را می‌توان به این علت دانست که: از یک طرف مکانیزم عملکرد نانو سیلیس در بتن همان‌طور که بیان شد سبب ایجاد ساختاری متراکم‌تر و خلل و فرج کمتر می‌شود، و از طرف دیگر نانوذرات با داشتن سطح ویژه بسیار بالای خود که وقتی مقدارشان از حد معینی (مقدار بهینه ۴ درصد در این پروژه) بیشتر شود می‌توانند با یک واکنش فیزیکی، به هم چسبیده و کلوخه‌های ناپایدار را ایجاد کنند. بنابراین می‌توان ۴ درصد نانو سیلیس را درصد بهینه دانست. که این روند در تمام سنین مشهود بوده و مقاومت در تمامی درصد‌های نانو سیلیس در سنین مختلف بالاتر از بتن شاهد بوده است. با توجه به روند کسب مقاومت فشاری که در شکل (۵) نشان داده شده است، سرعت کسب مقاومت نمونه‌های حاوی نانو سیلیس تا سن ۷ روز بیشترین مقدار بوده و با افزایش سن نمونه‌ها کاهش می‌یابد، بطوریکه در نمونه‌های حاوی ۴ درصد نانو سیلیس بیش از ۸۹ درصد مقاومت نهایی خود را تا سن ۷ روز کسب کرده‌اند. با کاهش اندازه ذرات و ریز تر کردن آن به ساختار نانو، درجات ناهمواری اتمی زیادی

1- Balling

تغییر مقاومت خمشی با افزایش درصد حجمی هر ۳ نوع الیاف فلزی، پلی پروپیلن و شیشه، صعودی است و میزان ماکزیمم این افزایش برای الیاف فلزی به ازای ۰/۵ درصد حجمی برابر ۷/۰۸ MPa و برای الیاف پلی پروپیلن به ازای ۰/۲ درصد حجمی برابر ۶/۶ MPa و برای الیاف شیشه به ازای ۰/۲ درصد حجمی برابر ۸/۱ MPa می باشد که میزان حداکثر درصد افزایش مقاومت خمشی این ۳ نوع الیاف (فلزی - P.P و شیشه) نسبت به بتن شاهد فاقد الیاف (A1) به ترتیب برابر است با: ۳۷ و ۲۸ و ۵۶ درصد می باشد.

همچنین با بررسی منحنی های ارائه شده در شکل (۷) از یک طرف با افزایش درصد نانوسیلیس ۲ تا ۶ درصد شاهد افزایش مقاومت خمشی نمونه های فاقد الیاف هستیم. البته این افزایش تا درصد بهینه نانوسیلیس (۴ درصد) روند صعودی داشته و پس از آن تقریباً ثابت باقی می ماند. که این روند نشان می دهد میزان ۴ درصد نانوسیلیس در مقاومت خمشی نیز بهینه می باشد.

از طرف دیگر با بررسی این منحنی ها می توان دریافت که افزایش درصد نانوسیلیس روند افزایشی مقاومت خمشی کسب شده ناشی از افزایش درصد الیاف های مختلف را تقویت کرده و روند افزایشی آن را تشدید می کند به عنوان نمونه با افزایش ۴ درصد نانوسیلیس در طرح های حاوی ماکزیمم الیاف فلزی (۰/۳ درصد)، پلی پروپیلن (۰/۲ درصد) و شیشه (۰/۲ درصد) مقاومت خمشی به ترتیب ۷۶ و ۵۳ و ۷۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می یابد. مقایسه نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان داد که نانوسیلیس با اثر فیلری و پوزولانی خود موجب بهبود خواص ناحیه تماس خمیر سیمان با الیاف و سنگدانه ها می شود و چسبندگی ناحیه های تماس را افزایش می دهد.

نتایج مربوط به چقرمگی (ظرفیت جذب انرژی) طرح های مختلف در جدول (۴) و شکل (۸) آورده شده است. با بررسی نمودارهای مذکور می توان نتیجه گرفت با افزایش درصد الیاف ها، چقرمگی بتن بطور چشمگیری افزایش یافته است که در این میان الیاف های فلزی، ظرفیت جذب انرژی (چقرمگی) بتن های خود تراکم را ۲۰ تا ۳۰ برابر و الیاف های پلی پروپیلن حدوداً ۵ برابر و الیاف شیشه نیز حدوداً ۳ برابر می کند. که نشان از عملکرد بهتر الیاف فلزی در جذب انرژی (چقرمگی) بتن خود تراکم می باشد.

الیاف فلزی ۰ تا ۰/۵ درصد شاهد روند صعودی مقاومت کششی هستیم به طوری که در ۰/۵ درصد الیاف فلزی شاهد افزایش ۴۵ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد (A1) هستیم. این میزان افزایش با افزایش درصد نانوسیلیس تقویت شده به طوری که این افزایش در درصد بهینه نانوسیلیس (۴ درصد) به حداکثر خود رسیده به طوری که در طرح حاوی ۰/۵ درصد الیاف فلزی دارای درصد بهینه نانوسیلیس شاهد افزایش ۹۰ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد هستیم.

همچنین از شکل (۶) می توان روند افزایش مقاومت کششی را در اثر افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن مشاهده کرد به طوری که با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن تا ۰/۲ درصد حجمی مقاومت کششی تا ۱۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته و این افزایش ها با افزودن درصد نانوسیلیس تقویت شده تا اینکه در درصد بهینه نانوسیلیس (۴ درصد) به حداکثر خود یعنی افزایش ۵۷ درصدی نسبت به نمونه شاهد پیدا می کند.

با بررسی شکل (۶) همچنان مقاومت کششی با افزایش درصد الیاف شیشه زیاد شده به طوری که در حداکثر درصد الیاف شیشه (۰/۳ درصد) مقاومت کششی ۳۳ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته که این افزایش در تمام درصدهای الیاف شیشه با افزایش میزان نانوسیلیس تقویت شده و بیشترین تقویت در درصد بهینه نانوسیلیس بوده است به طوری که بیشترین مقدار مقاومت کششی نمونه حاوی الیاف شیشه (۰/۳ درصد الیاف) حاوی مقدار بهینه نانوسیلیس (۴ درصد)، ۷۷ درصد افزایش مقاومت کششی را نسبت به نمونه شاهد داشته است.

با بهره گیری از نانو تکنولوژی در این تحقیق نشان داده شده که می تواند راهکاری مناسب جهت بهبود هرچه بیشتر خواص مصالح سیمانی باشد به طوری که با افزایش تراکم مخلوط، سطح تماس بیشتری بین الیاف و خمیر سیمان فراهم شده لذا اصطکاک افزایش یافته و عملکرد الیاف بهبود می یابد. از طرف دیگر پوزولان ها با جلوگیری از آب روی در لایه تماس بین الیاف و خمیر سیمان از طریق پرکنندگی و کاهش میزان کریستال های هیدروکسید کلسیم در سطح تماس از ضخامت ناحیه انتقال (Transition Layer) می کاهد.

نتایج آزمایش مقاومت خمشی در جدول (۴) و شکل (۷) ارائه شده است. همان طور که در شکل های مذکور مشاهده می شود نرخ

آن که با هیدروکسید کلسیم (که دارای مقاومت پایین در مقابل حملات شیمیایی است) و تبدیل آن به سیلیکات کلسیم هیدراته متراکم می گردد که سبب بهبود ریز ساختار بتن خود تراکم شده و قابلیت نفوذ یون کلر آن را طبق استاندارد در رده خیلی کم (۱۰۰۰-۱۰۰) قرار می دهد.

به طور کلی با بررسی نتایج بدست آمده اثر کاهش نفوذ پذیری یون کلر برای بتن های حاوی الیافهای فلزی، پلی پروپیلن و شیشه به ازای جایگزینی ۴ درصد نانو سیلیس جایگزین سیمان، به ترتیب به طور میانگین برابر با: ۲۸ و ۲۰ درصد می باشد که این نتایج نشان می دهد که استفاده از نانو سیلیس می تواند وضعیت بتن خود تراکم الیافی را با توجه به معیارهای استاندارد ASTM1202 از بتن با نفوذ پذیری متوسط یا بالا به بتن با نفوذ پذیری کم یا خیلی کم برساند.

نتایج حاصل از آزمایش XRD و شدت پیک های هیدروکسید کلسیم موجود در آن ها، که در شکل (۱۴) ارائه شده، نشان دهنده این مطلب است که نانو سیلیس در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در ساختار خمیر سیمان موثر بوده است. این مطلب با مطالعه پیک حاصله در زاویه 2θ برابر ۳۴ درجه که پیک ماکزیم $Ca(OH)_2$ در ساختار خمیر سیمان می باشد مشخص است بصورتیکه شدت پیک از ۴۸ مرتبه در نمونه شاهد (A1) با استفاده از ۲، ۴ و ۶ درصد نانو سیلیس، در طرح های D1، C1، B1 به ترتیب به ۴۳، ۳۵، ۳۷ مرتبه کاهش یافته که نشان از کاهش میزان هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه بواسطه واکنش های پوزولانی نانو سیلیس می باشد.

۸- نتیجه گیری

- با توجه به نتایج آزمایشات بتن تازه خود تراکم، مشاهده گردید که استفاده از انواع الیاف، اثرات منفی بر خواص رئولوژی بتن خود تراکم تازه دارند و همچنین استفاده از نانو سیلیس، به علت دارا بودن واکنش پذیری بالا سبب کاهش کارایی و افزایش قوام و لزجت بتن خود تراکم می گردد.
- با در نظر گرفتن این حقیقت که الیافها به طور ذاتی تحت کشش و یا کشش ناشی از خمش، عملکرد قابل قبولی از خود نشان می دهند، نتایج آزمایش نیز مشخص می کند که با افزایش

همچنین با افزایش ۲ درصد نانو سیلیس، افزایش چقرمگی بتن در اثر افزایش درصد الیافها تشدید شده و با افزایش بیشتر از ۲ درصد (در سری های C و D) شاهد کاهش چقرمگی هستیم. و این کاهش می تواند به این علت باشد که الیافها در ماتریس های با مقاومت بالاتر به علت باند قوی بین ماتریس سیمان و الیاف، مقاومت بیرون کشیدگی بالایی پیدا کرده، و در نتیجه یک رفتار ترد در شکست را از خود نشان میدهد.

نتایج آزمایش جذب آب حاکی از تاثیر قابل ملاحظه نانو سیلیس در کاهش میزان درصد جذب آب نمونه ها نسبت به نمونه شاهد است. به طوری که با افزودن ۴ درصد نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان در طرح های سری (A) شاهد کاهش ۳۷، ۳۰، ۴۰ درصدی کاهش جذب آب به ترتیب برای طرح های حاوی الیافهای فولادی، پلی پروپیلن و شیشه می باشیم و این کاهش درصد جذب آب را می توان به علت کم شدن فضای خالی به دلیل تشکیل ژل سیلیکات هیدراته دانست.

در آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلراید سعی شده با برقراری پتانسیل بین دو سر نمونه، سرعت نفوذ یون کلراید را در نمونه افزایش دهند، در این آزمایش مجموع بار الکتریکی عبوری اندازه گیری شده در مدت ۶ ساعت ملاک درجه بندی بتن میباشد. که این آزمایش در سن ۷۰ روز برای طرح اختلاطهای سری A و C (حاوی ۰ و ۴ درصد نانو سیلیس) انجام شده و نتایج آن در شکل (۱۲) و جدول (۴) ارائه شده است. همانطور که از نمودار مشخص است با افزایش درصد الیاف فلزی و پلی پروپیلن، بار الکتریکی عبوری نسبت به نمونه شاهد (A1) افزایش یافته ولی در نمونه حاوی الیاف شیشه با افزایش درصد الیاف بار الکتریکی عبوری افزایش یافته ولی مقدار بار عبوری کمتر از بار عبوری نمونه شاهد می باشد.

با توجه به نمودارهای مذکور در می یابیم که استفاده از نانو سیلیس در کاهش بار عبوری از نمونه بسیار موثر بوده و مقدار آن از نمونه شاهد (A1) با عبور ۱۶۲۲ کلمب به ۹۷۸ کلمب برای نمونه ۴ درصد نانو سیلیس (C1) کاهش می یابد که حاکی از کاهش نزدیک به ۴۰ درصدی بار عبوری است و طبق استاندارد ASTM1202 نمونه شاهد که با قابلیت نفوذ کم می باشد با جایگزین کردن ۴ درصد نانو سیلیس، به علت واکنش پذیری بالای

از عملکرد بهتر الیاف فلزی در جذب انرژی (چقرمگی) بتن خود تراکم می‌باشد.

• با افزایش ۲ درصد نانوسیلیس، افزایش چقرمگی بتن در اثر افزایش درصد الیاف‌ها تشدید شده و با افزایش بیشتر از ۲ درصد شاهد کاهش چقرمگی هستیم.

• با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اظهار داشت که الیاف فلزی تأثیر چندانی بر مدول الاستیسیته بتن خود تراکم نداشته و الیاف شیشه و پلی پروپیلن تغییرات بسیار جزئی تقریباً متناسب با روند کسب مقاومت فشاری را دارند. ولی اثرپذیری مدول الاستیسیته نسبت به تغییرات درصد نانوسیلیس محسوس تر از تغییرات الیاف است.

• نتایج آزمایشات جذب آب و تسریع شده نفوذ یون کلر نشان می‌دهد که جایگزینی ۴ درصد نانوسیلیس بهینه می‌تواند وضعیت بتن خود تراکم الیافی را با توجه به معیارهای استاندارد ASTM1202 از بتن با نفوذ پذیری متوسط یا بالا به بتن با نفوذ پذیری کم یا خیلی کم برساند.

• نتایج حاصل از آزمایش XRD و شدت پیک های هیدروکسید کلسیم موجود در آن‌ها، نشان دهنده این مطلب است که نانو سیلیس در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در ساختار خمیر سیمان موثر بوده است بصورتیکه شدت پیک از ۴۸ مرتبه در نمونه شاهد (A1) با استفاده از ۲، ۴ و ۶ درصد نانوسیلیس، در طرح های D1, C1, B1 به ترتیب به ۴۳، ۳۵، ۳۷ مرتبه کاهش یافته که نشان از کاهش میزان هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه بواسطه واکنش‌های پوزولانی نانوسیلیس می‌باشد.

۹- مراجع

- [1] Ozawa K, Maekawa K, Okamura H. "Self-Compacting high performance concrete", Collected Papers (University of Tokyo: Department of Civil Engineering), 34, 1996, pp135-149.
- [2] Okamura H. "Self Compacting High-Performance Concrete", Concrete International, 1997, PP 50-54.
- [3] Okamura H, Ozawa K. "Self-Compactable high performance concrete in japan", International Workshop on High Performance Concrete, SP 169,

مقدار الیاف این مقاومت‌ها افزایش می‌یابند و به تبع آن شکل-پذیری بیشتری قبل از شکست در نمونه‌ها رخ می‌دهد. البته افزایش بیش از حد این الیاف‌ها باعث پدیده گلوله شدن الیاف می‌شوند. که در این حالت نه تنها حضور الیاف کمکی به شرایط مخلوط نمی‌کند بلکه باعث ایجاد فضاهای خالی بین مخلوط بتنی می‌شوند.

• خصوصیات مکانیکی اعم از مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی بتن‌های ساخته شده با افزایش درصد نانو سیلیس تا ۴ درصد، افزایش وبعد از آن تقریباً کاهش می‌یابند. که می‌توان در این بررسی آزمایشگاهی ۴ درصد نانو سیلیس را درصد بهینه دانست.

• در این بررسی آزمایشگاهی بتن‌های حاوی الیاف‌های مختلف خصوصیات مکانیکی متفاوتی را از خود نشان می‌دهند. بطوری که برای بتن‌های حاوی الیاف فلزی با افزایش درصد الیاف تا ۰/۳ درصد حجمی مقاومت فشاری افزایش سپس کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش درصد الیاف فلزی، مقاومت خمشی و کششی روند صعودی دارند. ولی در بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن با افزایش درصد الیاف، شاهد کاهش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت کششی و خمشی می‌باشیم.

• با بررسی نتایج حاصل از تست خمش، در طرح اختلاط‌های موجود، با افزایش درصد الیاف‌ها، بخصوص الیاف فولادی در بتن خود تراکم، شاهد افزایش چشم گیر مقاومت های خمشی و کششی و بدنبال آن افزایش شکل پذیری می‌باشیم و همچنین با افزایش درصد نانو سیلیس تا ۴ درصد وزن سیمان در این طرح‌ها، این افزایش، تقویت شده که میتوان به اثر فیلری و پوزولانی نانو سیلیس در تقویت ناحیه انتقال الیاف و ماتریس سیمان پی برد.

• نتایج مربوط به چقرمگی (ظرفیت جذب انرژی) طرح‌های مختلف در این تحقیق نشان داد با افزایش درصد الیاف‌ها، چقرمگی بتن بطور چشمگیری افزایش یافته است که در این میان الیاف‌های فلزی، ظرفیت جذب انرژی (چقرمگی) بتن های خودتراکم را ۲۰ تا ۳۰ برابر و الیاف‌های پلی پروپیلن حدوداً ۵ برابر و الیاف شیشه نیز حدوداً ۳ برابر می‌کند. که نشان

American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1994, pp 31-44.

[4] Ouchi M, Hibino M, Okamura H. "Effect of super plasticizer on self-compact ability of fresh concrete", TRR 1574, 1996, pp 37-40.

[5] Soroushian P. "Secondary reinforcement adding cellulose fibers", ACI, Concrete International, 1986, pp 28-38.

[6] Lin, Wei-ling. "Toughness behaviour of fiber reinforced concrete", Fiber Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International symposium, Sheffield, UK, 1992, pp 299-315.

[7] Qing Y, Zenan Z, Deyu K, Rongshen K. "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silicafume", Construction and Building Materials, 21, 2007, pp 539-545.

[8] Collepardi M, Ogoumah Olagot J, Troli R, Simonelli F, Collepardi S. "Combination of silica fume, Fly Ash and Amorphous Nano-Silica in Superplasticized High-Performance Concretes, Enco", Engineering Concrete, Ponzano Veneto, Italy, 2007.

[9] Li G. "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂", Cement and Concrete Research, 34, 2004, pp 1043-1049.

[10] Li H., Xiao H.G., Yuan J. and Ou J., "Microstructure of cement mortar with nano-particles", Composites: Part B, 35, 185-189, 2005.

[11] Ji T. "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂", Cement and Concrete Research, 35, 1943-1947, 2005.

[12] Li G. and Zhao X., "Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag", Cement and Concrete Composites, 25, 293-299, 2003.

[13] Qing Y, Zenan Z, Deyu K, Rongshen K. "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silicafume". Constr

Build Mater 2007;21:539-45.

[14] Bahadori Hadi, Hosseini Payam. "Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles (investigation on concrete properties)." J Civil Eng Manage 2012;18(3):416.

Mechanical and Durability Properties of Self Compacting Concrete containing Nano Silica Particles considering Optimum Percentages of Fibers

A. Sadr Momtazi

Associate Professor, Guilan University, Iran

R. Kohani Khoshkbijari

Ph.D. Candidate of Structural Engineering, Guilan University, Iran

O. Lotfi Omran*

Ph.D. Candidate of Structural Engineering, Guilan University, Iran

Abstract

Recent researches have shown that use fiber in concrete can increase the flexural, tensile, and abrasion resistance. On the other hand Self-Compacting Concrete is a high flowable homogenous concrete which can eliminate several common problems in normal concretes by means of its compaction under its own weight. The above properties of self compacting concrete facilitate the fabrication of concrete structural members with congested reinforcement.

On the other hand, in the past two decades application of nano-technology has significantly revolutionized human knowledge. Using nano silica particles as a product of pozzolanic reaction, can strongly improve the permeability of concrete. Thus concrete having the properties of both self compacting concrete and fiber reinforced concrete with strengthened micro matrices can improve the fabrication of durable structures with high performance level. In this research, the combined effect of nano-silica particles and fibers type (steel, polypropylene and glass) on mechanical properties (compressive, tensile and flexural strength, modulus of elasticity), rheological behavior (L-box, slump flow and T_{50}) and also the durability of Self-Compacting concrete were evaluated using water absorption and Rapid Chloride Penetration Test (RCPT). Furthermore, XRD test has been used.

For this purpose, forty mixtures in A, B, C and D series representing 0, 2, 4 and 6 percent of nano silica particles replacing cement content were cast. Each series involved three different fiber type and content. 0.2, 0.3 and 0.5% volume for steel fiber, 0.1, 0.15 and 0.2% of volume for polypropylene fiber and finally 0.15, 0.2 and 0.3% of volume for glass fiber. The results show that the combined usage of optimum percent of fiber and nano silica particles will improve the mechanical properties and durability of self-compacting concrete.

Keywords: Fiber, Self compacting concrete, Nano silica particles, Mechanical properties, Durability.

* Corresponding Author: o.lotfiomran@yahoo.com