



ارزیابی اثر الیاف‌های فولادی و شیشه‌ای بر خواص مکانیکی بتن

جلال اکبری^{۱*} و امیرحسین عابدی^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

akbari@malayeru.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر استفاده از الیاف مختلف برای بهبود مقاومت بتن به امری رایج در مهندسی عمران تبدیل شده است. تحقیقات نشان می‌دهد که به کارگیری انواع الیاف در بتن باعث افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی می‌شود. در تحقیق حاضر به بررسی بهبود مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن مسلح به الیاف فولادی و شیشه‌ای در دو نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴۵ و با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف الیاف پرداخته شده است. الیاف مصرفی به میزان صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد حجم بتن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش در هر نسبت آب به سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری از ۲۱ نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر، در آزمایش کششی از ۱۴ نمونه استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتیمتر و برای آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای از ۱۴ نمونه منشوری ۱۰×۱۰×۵۰ سانتیمتری ساخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۰/۳ تا ۰/۹ درصد الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نسبت به بتن معمولی می‌شود. در مقایسه با الیاف فولادی اضافه کردن ۰/۳ تا ۰/۶ درصد الیاف شیشه‌ای مقاومت فشاری را افزایش داده و استفاده بیشتر از این مقدار باعث افت مقاومت بتن می‌گردد.

کلمات کلیدی: الیاف فولادی، الیاف شیشه، بتن الیافی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی.

Effect of Steel and Glass Fibers on the Mechanical Properties of the Concrete

J. Akbari and A. Abedi

Abstract: To improve the strength of concrete, recently the use of different types of fiber is very common particularly in for civil engineering constructions. Most of the researches show that using the fibers will improve the compressive, tension and flexural strengths of concrete. The present work attempts to clarify the effect of different types of fiber on the mechanical strength of concrete. To achieve this aim, low amount of steel and glass fibers in mixes designed with two different rates of water to cement (W/C) ratios including 0.35 and 0.45 have been investigated. The steel and glass fibers have been used in concrete for 0, 0.30, 0.60 and 0.90 volume percent of concrete. For each ratio of water to cement: 21 cubic samples (10×10×10 cm) for compressive strength tests, 14 cylindrical samples (15×30 cm) for tensional tests and 14 prismatic samples (10×10×50 cm) for three-point flexural tests have been prepared. The laboratory results show that adding 0.30 to 0.90 percent steel fibers for concrete will increase the compressive, tension and flexural strengths in compare with normal concrete. Using the glass fibers between 0.30 to 0.60 percent by increasing the compressive strengths and by adding more fibers (more than 0.60 present), the compressive strengths will be decreased. In compare with normal concrete samples, by adding the glass fibers in the range of 0.30 to 0.90 percent of concrete volume, the tension and flexural strengths of reinforced concrete will be increased.

Keywords: Steel Fiber, Glass Fiber, Compressive Strength, Tension Strength and Flexural Strength.

۱ - مقدمه

و همکاران آزمایشی را جهت مقایسه رفتار دال بتنی مسلح با استفاده از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن انجام دادند که نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزایش ۱٪ حجمی الیاف فولادی بهترین تأثیر را در شکل‌پذیری دال‌ها دارد [۱۹].

تاکنون در زمینه اثر الیاف شیشه‌ای بر مقاومت بتن تحقیقات قابل‌توجهی صورت نگرفته است. شاید یکی از مهم‌ترین دلایل بحث هزینه اقتصادی این نوع الیاف می‌باشد. هدف این مقاله بررسی نقش و مقدار الیاف فولادی و شیشه‌ای در بهبود مشخصات مکانیکی بتن می‌باشد. در این تحقیق، بتن‌های سخت شده با مقاومت معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و مقاومت بالا با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ مدنظر قرار گرفته است. به‌منظور انجام آزمایش‌ها برای هر نسبت آب به سیمان، در آزمایش‌های مقاومت فشاری از ۲۱ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر، برای آزمایش‌های مقاومت کششی از ۱۲ نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر و در آزمایش‌های مقاومت خمشی از ۱۲ نمونه منشوری به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. فقط از الیاف فولادی و الیاف شیشه‌ای در این پژوهش استفاده شده و تنها ماده افزودنی در بتن‌ها، فوق روان‌کننده با پایه کربوکسیلات بوده است.

۳- روش انجام تحقیق

به‌منظور دستیابی به بتن‌های با مقاومت متوسط و بالا نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۳۵ انتخاب گردید. در هر نسبت آب به سیمان مذکور، هفت طرح که به ترتیب عبارت‌اند از: بتن معمولی، بتن حاوی ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد حجمی الیاف فولادی، بتن حاوی ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد حجمی الیاف شیشه‌ای در نظر گرفته شد. در این مقاله در تمامی طرح‌ها فقط تأثیر نسبت آب به سیمان، درصد الیاف مصرفی و جنس الیاف مصرفی بررسی شده است. در خصوص میزان مصرف الیاف فولادی از آنجاکه بر اساس نتایج قبلی اثربخشی الیاف با افزایش میزان الیاف افزایش می‌یابد و از طرفی ساخت طرح با مقادیر بیشتر از یک درصد احتمال پخش ناهمگن الیاف را در مخلوط‌کن فراهم می‌آورد، لذا مقدار مصرف زیر ۱ درصد در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها برای هر نسبت آب به سیمان،

بتن یک ماده ضعیف در کشش است که اغلب در مرحله سخت شدگی و جمع شدگی‌های ناشی از خشک شدن دچار ترک شده و این ترک‌ها معمولاً با گذشت زمان و با اعمال تنش به بتن، گسترش می‌یابند. سپس ترک‌هایی در سطح بتن دیده می‌شود که یک سطح بدمنظر و ناخوشایندی را به وجود می‌آورد. این ترک‌ها مجرای برای نفوذ نمک و آب به بتن می‌باشند که این پدیده باعث افزایش احتمال خوردگی میلگرد در بتن می‌شوند. اگر این نقطه‌ضعف بتن برطرف شود، از هزینه‌های تعمیر و نگهداری بتن کاسته شده و عمر مفید سازه‌ها افزایش می‌یابد. از جمله موادی که امروزه برای بهبود رفتار بتن استفاده می‌شود، به‌کارگیری الیاف در بتن می‌باشد. اگر افزودن الیاف به بتن به‌طور یکنواخت باشد، مقاومت بتن در برابر شکل‌گیری ترک‌های ناشی از جمع شدگی پلاستیک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، توزیع یکنواخت الیاف در بتن به ترک‌های ریز اجازه گسترش نمی‌دهد و ترک‌های بزرگ در آن شکل نمی‌گیرند. همچنین، الیاف در ماتریس سیمانی، سبب کاهش عرض ترک‌خوردگی و افزایش مقاومت‌های خمشی و کششی شده و طاقت شکست بتن افزایش می‌یابد. بتن تشکیل شده از الیاف فولادی تقویت شده (SFRC)، یک نوع کامپوزیت پیشرفته می‌باشد که ترکیبی از بتن معمولی با الیاف فولادی است که طول آن‌ها کمتر و قطرهای مختلفی دارند [۱]. بتن با الیاف فولادی تقویت شده یکی از مصالح مهمی است که باعث افزایش مقاومت کششی بتن ساده می‌شود [۲-۶]. مطالعات دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی نشان‌دهنده برتری عملکرد ساختار بتن SFRC در مقاومت‌های کششی، خمشی و برشی است [۷-۸]؛ بنابراین انتظار می‌رود که رشد افزایش تقاضا برای SFRC، عرضه این مواد کامپوزیت را برای ساخت‌وساز در بازار افزایش دهد. در حال حاضر بیشتر تحقیقات در زمینه اثر الیاف فولادی در بهبود مقاومت‌های کششی [۹-۱۲]، برشی [۱۳-۱۶] و خمشی [۱۷] معطوف شده‌اند. قریشی و همکاران خواص بتن با مقاومت بالا را با افزودن الیاف فولادی بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش الیاف فولادی مقاومت کششی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و این افزایش مقاومت در ۷ روز اول بیشتر است [۱۸]. هادی

ارزیابی اثر الیاف‌های فولادی و شیشه‌ای بر ...

مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌های فولادی و شیشه‌ای مورد استفاده در این مقاله در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در شکل ۲ مشخصات ظاهری الیاف شیشه‌ای و فولادی بکار گرفته شده در این پژوهش ارائه شده است.



شکل ۱: منحنی‌های دانه‌بندی مصالح سنگی بکار رفته در ساخت نمونه‌ها

جدول ۱: مشخصات الیاف فولادی و شیشه مورد استفاده در طرح

| نوع الیاف | L/D | طول (mm) | قطر (mm) | چگالی (gr/cm ³) | شکل | استاندارد |
|-----------|--------|----------|----------|-----------------------------|----------|-----------|
| فولادی | ۶۲/۵ | ۵۰ | ۰/۸ | ۲/۸۵ | قلاب‌دار | ASTM A820 |
| شیشه | ۶۳۱/۵۷ | ۱۲ | ۰/۰۱۹ | ۲/۶ | صاف | ASTM D790 |

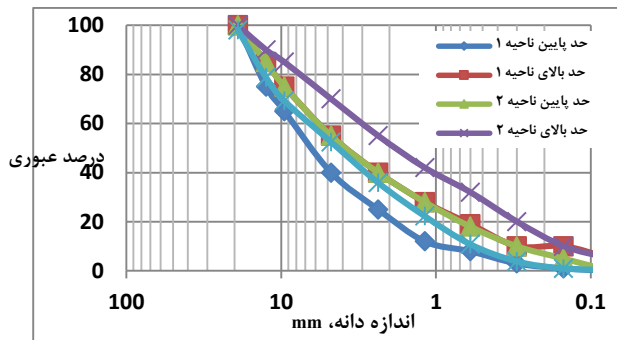
۳-۲- طرح اختلاط بتن و طرح‌های ساخته شده

در محاسبات طرح‌های اختلاط، از سیمان تپ دو با چگالی متوسط ذرات ۳/۱۲، ماسه با چگالی حجمی اشباع با سطح خشک ۲/۶۵ و ظرفیت جذب آب ۳/۷۸ درصد، شن نخودی با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر، چگالی حجمی اشباع با سطح خشک ۲/۶۹ و جذب آب ۱/۱۱ درصد و شن بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر، چگالی حجمی اشباع با سطح خشک ۲/۶۸ و جذب آب ۱/۰۱ درصد استفاده شده است. برای تعیین مقادیر اجزای بتن در ابتدا نیاز به مشخص کردن سهم هر یک از سنگ‌دانه‌های مصرفی (ماسه، شن نخودی و شن بادامی) می‌باشد. برای این منظور از روش سعی و خطا به نحوی استفاده شد که منحنی دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی انتخاب شده در ناحیه شماره یک محدوده‌های پیشنهادی طرح مخلوط ملی ایران (برای حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر) قرار گرفت (شکل‌های ۳ و ۴).

برای آزمایش مقاومت فشاری از ۳۶ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر، در آزمایش مقاومت کششی از ۱۲ نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر و آزمایش مقاومت خمشی از ۱۲ نمونه منشوری به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. فقط از الیاف فولادی و الیاف شیشه‌ای در این پژوهش استفاده شده است و تنها ماده افزودنی در بتن‌ها، فوق روان کننده با پایه کربوکسیلات بوده است. در تمامی طرح اختلاط‌ها و آزمایش‌ها از استانداردهای ASTM استفاده شده است. برای آزمایش مقاومت فشاری از استاندارد ASTM C-39، در مقاومت کششی از استاندارد ASTM C-496 و برای آزمایش مقاومت خمشی از استاندارد ASTM C-293 شده است.

۳-۱- مشخصات مصالح مصرفی و الیاف‌ها

از سیمان تپ دو کارخانه سیمان هگمتان همدان برای ساخت نمونه‌های بتنی استفاده شده است. در ساخت طرح مخلوط‌ها از آب شرب شهر همدان با میزان pH در حدود ۶/۵ و با غلظت یون کلرید حدود ۰/۰۱۳ درصد استفاده شده است. همچنین، برای تنظیم کارایی و ایجاد همگنی مناسب مخلوط‌ها، از نسل سوم فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی بانام تجاری LG استفاده شده است. محدوده مصرف این روان کننده ۰/۲ تا ۱/۵ درصد وزن سیمان می‌باشد. ماسه مورد استفاده از نوع شکسته بوده و آزمایش چگالی و جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C-128 انجام گردید که طبق نتایج آزمایش، چگالی ماسه ۲/۶۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و جذب آب آن ۳/۵۲ درصد به‌دست آمده است [۲۰]. شن مصرفی از نوع شکسته بوده و حداکثر اندازه اسمی شن‌های مصرفی ۱۹ میلی‌متر (شن بادامی) و ۱۲/۵ میلی‌متر (شن نخودی) بوده است. بر اساس آزمایش چگالی و جذب آب طبق استاندارد ASTM C-127 برای مصالح سنگی درشت‌دانه، چگالی شن نخودی و بادامی به ترتیب ۲/۶۹ و ۲/۶۸ گرم بر سانتیمتر مکعب و جذب آب آن‌ها ۱/۰۱ و ۰/۰۱ درصد به‌دست‌آمده است [۲۱]. در شکل ۱ منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی بکار رفته در ساخت نمونه‌ها ارائه شده است.



شکل ۴: محدوده‌های پیشنهادی طرح مخلوط ملی ایران برای حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر و منحنی دانه‌بندی ترکیب مصالح سنگی انتخاب شده

پس از تعیین مقادیر فوق، مقادیر مصالح مصرفی در هر یک از مخلوط‌ها مورد محاسبه قرار می‌گیرد. برای نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، مقدار ۱۴۰ کیلوگرم آب در هر مترمکعب بتن و ۴۰۰ کیلوگرم سیمان در هر مترمکعب بتن بکار رفته است. همچنین، برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، مقدار ۱۵۷/۵ کیلوگرم آب در هر مترمکعب بتن و ۳۵۰ کیلوگرم سیمان در هر مترمکعب بتن مصرف شده است. برای نام‌گذاری طرح‌های آزمایشگاهی کدگذاری طرح‌ها به صورت ذیل انجام شده است:

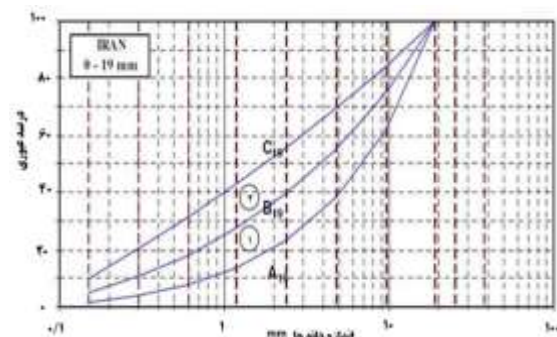
C مخفف Concrete معرف بتن، N مخفف Normal معرف بتن ساده بدون الیاف، F مخفف Fiber معرف الیاف، S مخفف Steel معرف بتن با الیاف فولادی و G مخفف Glass و معرف طرح‌های دارای الیاف شیشه است. است. طرح‌های آزمایشگاهی ساخته شده در این تحقیق بر اساس جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: جدول کدگذاری طرح‌های ساخته شده

| بتن معمولی بدون الیاف | CN |
|----------------------------|--------|
| بتن حاوی ۰/۳٪ الیاف فولادی | CSF0.3 |
| بتن حاوی ۰/۶٪ الیاف فولادی | CSF0.6 |
| بتن حاوی ۰/۹٪ الیاف فولادی | CSF0.9 |
| بتن حاوی ۰/۳٪ الیاف شیشه | CGF0.3 |
| بتن حاوی ۰/۶٪ الیاف شیشه | CGF0.6 |
| بتن حاوی ۰/۹٪ الیاف شیشه | CGF0.9 |



شکل ۲: الیاف فولادی (شکل الف) و الیاف شیشه (شکل ب) مورد استفاده در تحقیق



شکل ۳: محدوده‌های پیشنهادی طرح مخلوط ملی ایران، حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر

در طرح اختلاط نهایی سهم هر یک از مصالح سنگی در یک مترمکعب بتن به همراه چگالی متوسط به صورت شن بادامی ۲۹/۵ درصد، شن نخودی ۱۹ درصد و سهم ماسه ۵۱/۵ درصد می‌باشد. چگالی متوسط سنگ‌دانه‌ها در طرح اختلاط نهایی ۲/۶۷ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد.

به مدت پنج دقیقه دیگر برای به دست آمدن یک بتن با کارایی مناسب و اطمینان از پخش یکنواخت الیاف در بتن ادامه یافت. در تهیه نمونه‌های حاوی الیاف شیشه، مصالح به صورت اشباع با سطح خشک (SSD) مورد استفاده قرار گرفتند. قبل از ریختن مصالح به درون مخلوط‌کن، ابتدا جداره آن کمی مرطوب شد تا رطوبت سنگ‌دانه‌ها را تغییر ندهد.

ابتدا ماسه به همراه سیمان در مخلوط‌کن ریخته شد و به مدت دو دقیقه باهم مخلوط شدند. سپس نصف آب مصرفی به همراه مقداری از روان کننده به آن اضافه و عملیات مخلوط کردن به مدت دو دقیقه دیگر انجام گردید. در مرحله بعد، مصالح ریزدانه و درشت‌دانه به همراه الیاف شیشه، آب و فوق روان کننده اضافه و به مدت ۶ دقیقه دیگر اختلاط انجام شد. پس از آماده شدن مخلوط‌ها و تعیین کارایی آن‌ها، اقدام به تهیه نمونه‌های بتنی برای انجام آزمایش‌های مختلف شد. برای این منظور ابتدا سطوح داخلی قالب‌ها به وسیله روغن به اندازه کافی چرب شدند تا پس از سخت شدن بتن بتوان به راحتی آن‌ها را از قالب جدا کرد. سپس بتن در قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای در سه لایه ریخته شد و بعد از ریختن هر لایه توسط کوبه مخصوص به تعداد ۲۵ ضربه کوبیده شد تا به تراکم مناسب برسند.

همچنین مقادیر هر یک از مصالح مصرفی در مخلوط‌های بتنی به همراه کد اختصاص داده شده به آن‌ها در جدول ۳ برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴۵ ارائه شده است.

۳-۳- روش ساخت طرح‌ها و آماده‌سازی نمونه‌ها

در تهیه نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، مصالح به صورت اشباع با سطح خشک (SSD) مورد استفاده قرار گرفتند. قبل از ریختن مصالح به درون مخلوط‌کن، ابتدا جداره آن کمی مرطوب شد تا رطوبت سنگ‌دانه‌ها ثابت بماند. سپس، ماسه و سیمان، در مخلوط‌کن ریخته شد و به مدت یک دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. در ادامه در حدود نصف آب مصرفی به همراه فوق روان کننده موجود به مصالح اضافه گردید تا فوق روان کننده باعث اختلاط مناسب‌تر مواد با یکدیگر شود تا یک مخلوط همگن به دست آید و عمل مخلوط کردن به مدت دو دقیقه ادامه پیدا یافت.

بعد از این مدت سنگ‌دانه‌های درشت در صورت خشک بودن سطح آن‌ها با اسپری کردن، کمی مرطوب گردید و به مخلوط‌کن اضافه شد. سپس باقیمانده آب نیز به آرامی به مخلوط‌کن اضافه شد و عمل مخلوط کردن تا سه دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد تا بتنی باکیفیت و کارایی مناسب به دست آید. برای ساخت بتن‌های الیافی در پایان مراحل فوق، الیاف مورد استفاده در طرح‌ها به آرامی و از روی شبکه توری بالای مخلوط‌کن به بتن اضافه گردید و عمل اختلاط

جدول ۳: مقادیر طرح اختلاط مصالح بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴۵ (کیلوگرم در مترمکعب)

| نام طرح‌های ساخته شده | | | | | | | W/C | مصالح مصرفی |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------|----------------|
| CGF0.9 | CGF0.6 | CGF0.3 | CSF0.9 | CSF0.6 | CSF0.3 | CN | | |
| ۱۴۰ | ۱۴۰ | ۱۴۰ | ۱۴۰ | ۱۴۰ | ۱۴۰ | ۱۴۰ | ۰/۳۵ | آب |
| ۱۵۷/۵ | ۱۵۷/۵ | ۱۵۷/۵ | ۱۵۷/۵ | ۱۵۷/۵ | ۱۵۷/۵ | ۱۵۷/۵ | ۰/۴۵ | |
| ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۰/۳۵ | سیمان |
| ۳۵۰ | ۳۵۰ | ۳۵۰ | ۳۵۰ | ۳۵۰ | ۳۵۰ | ۳۵۰ | ۰/۴۵ | |
| ۹۷۹/۸ | ۹۷۹/۸ | ۹۷۹/۸ | ۹۷۹/۸ | ۹۷۹/۸ | ۹۷۹/۸ | ۹۷۹/۸ | ۰/۳۵ | ماسه |
| ۹۷۵/۳ | ۹۷۵/۳ | ۹۷۵/۳ | ۹۷۵/۳ | ۹۷۵/۳ | ۹۷۵/۳ | ۹۷۵/۳ | ۰/۴۵ | |
| ۳۶۱/۵ | ۳۶۱/۵ | ۳۶۱/۵ | ۳۶۱/۵ | ۳۶۱/۵ | ۳۶۱/۵ | ۳۶۱/۵ | ۰/۳۵ | شن نخودی |
| ۳۵۹/۸ | ۳۵۹/۸ | ۳۵۹/۸ | ۳۵۹/۸ | ۳۵۹/۸ | ۳۵۹/۸ | ۳۵۹/۸ | ۰/۴۵ | |
| ۵۶۱/۳ | ۵۶۱/۳ | ۵۶۱/۳ | ۵۶۱/۳ | ۵۶۱/۳ | ۵۶۱/۳ | ۵۶۱/۳ | ۰/۳۵ | شن بادامی |
| ۵۵۸/۷ | ۵۵۸/۷ | ۵۵۸/۷ | ۵۵۸/۷ | ۵۵۸/۷ | ۵۵۸/۷ | ۵۵۸/۷ | ۰/۴۵ | |
| ۲۳/۵ | ۲۳/۵ | ۲۳/۵ | ۲۳/۵ | ۲۳/۵ | ۲۳/۵ | ----- | ۰/۳۵ | الیاف |
| ۲۵/۲ | ۱۶/۸ | ۸/۴ | ۷۰/۶ | ۴۷/۱ | ۲۳/۵ | ----- | ۰/۴۵ | |
| ۲/۲۰ | ۱/۶۰ | ۱/۲۰ | ۲/۰۰ | ۱/۴۰ | ۰/۸۰ | ۰/۴۰ | ۰/۳۵ | فوق روان کننده |
| ۱/۲۳ | ۰/۸۸ | ۰/۷۰ | ۱/۰۵ | ۱/۰۵ | ۰/۵۳ | ۰/۳۵ | ۰/۴۵ | |



شکل ۵: آزمایش مقاومت کششی به روش دونیم شدن و شکل نهایی شکست کششی نمونه‌ها

لازم به ذکر است که بعد از عمل کوبیدن پس از هر لایه ریختن بتن، قالب‌ها به مدت چند ثانیه بر روی میز ویبره قرار گرفتند تا هوای اضافی از بتن خارج شود و تراکم بهتری صورت گیرد. در ادامه بعد از ریختن لایه سوم سطح نمونه‌ها با استفاده از خط‌کش صاف گردید و سپس تمامی قالب‌ها به اتاق نگهداری منتقل شدند و در زیر یک پوشش مرطوب به مدت 24 ± 2 ساعت قرار گرفتند. پس از گذشت زمان مذکور نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان آزمایش تحت عمل‌آوری قرار گرفتند.

۳-۴- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

مقاومت فشاری طرح‌های مخلوط در سنین ۷ و ۲۸ روزه مطابق با استاندارد تعیین گردید. بدین منظور در هر سن از سه نمونه مکعبی $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متری استفاده گردید تا میانگین آن‌ها به‌عنوان مقاومت فشاری هر طرح گزارش شود. نمونه‌ها پس از خارج شدن از قالب، در درون حوضچه آب با دمای حدود 23°C تا سن آزمایش عمل‌آوری شدند. برای تعیین مقاومت فشاری از جک ADR 2000 با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و با سرعت بارگذاری ۳ کیلو نیوتن بر ثانیه مطابق استاندارد BS188 استفاده شده است.

۳-۶- آزمایش تعیین مقاومت خمشی

آزمایش‌های خمشی مطابق با دستورالعمل ASTM C-293-08، برای نمونه‌های $100 \times 100 \times 500$ میلی‌متر، بتن‌های حاوی الیاف فولاد و شیشه در سن ۲۸ روز که عمل‌آوری مرطوب شده‌اند باید در اولین فرصت ممکن، پس از خارج کردن نمونه‌ها از مخزن آب انجام شود [۲۴]. برای انجام این آزمایش از دستگاه آزمون خمش سه‌نقطه‌ای GOTECH مدل Gt-TCS-2000 استفاده شده است. فاصله بین دو تکیه‌گاه برای شکست نمونه ۳۰۰ میلی‌متر و سرعت بارگذاری یک میلی‌متر بر دقیقه بوده است (شکل ۶). در تحقیقی مقاومت خمشی بتن معمولی در حدود $4/2$ مگا پاسکال گزارش شده است که با افزایش الیاف فولادی این مقاومت، $0/4$ تا $0/6$ مگا پاسکال افزایش پیدا می‌کند [۲۵]. این افزایش برای الیاف‌های ترکیبی در محدوده $0/2$ تا $0/25$ نیوتن بر میلی مترمربع برای مصرف $4/5$ تا $5/3$ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است [۲۵]. محاسبه

۳-۵- آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش دونیم شدن

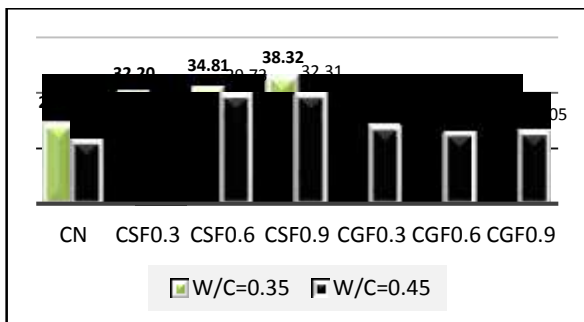
این آزمایش در سن ۲۸ روزه بتن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM-C496 انجام گرفت [۲۲]. برای انجام این آزمایش از دستگاه پرس هیدرولیکی ADR با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و سرعت بارگذاری $0/94$ کیلو نیوتن بر ثانیه استفاده شده است (شکل ۵). مقاومت کششی دونیم شدن نمونه‌ها از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$T = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

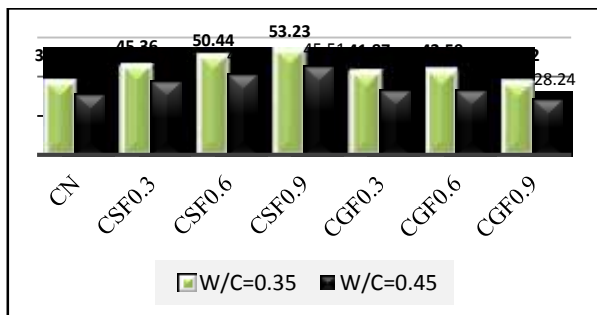
که در آن، T مقاومت کششی دونیم شدگی برحسب مگا پاسکال، P حداکثر بار اعمال شده برحسب نیوتن، L طول نمونه و D قطر نمونه هر دو برحسب میلی‌متر می‌باشد.

ارزیابی اثر الیاف‌های فولادی و شیشه‌ای بر ...

و ۰/۴۵ در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی افزایش مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد مشاهده می‌شود. بدین معنی که با افزودن الیاف فولادی تا ۰/۹ درصد حجم بتن، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در صورتی که در طرح‌های دارای الیاف شیشه با همین نسبت‌های آب به سیمان استفاده از الیاف تا ۰/۶ درصد سبب افزایش مقاومت و با بیشتر شدن الیاف از ۰/۶ درصد کاهش مقاومت دیده می‌شود که دلیل این امر را می‌توان پدیده گلوله شدن و پخش غیریکنواخت الیاف دانست.



شکل ۷: مقاومت‌های فشاری (مگا پاسکال) طرح‌ها در سن ۷ روزه برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴۵



شکل ۸: مقاومت‌های فشاری (مگا پاسکال) طرح‌ها در سن ۲۸ روزه برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴۵

همان‌گونه که مشاهده شد، طرح‌های حاوی الیاف دارای مقاومت بیشتری نسبت به طرح‌های بدون الیاف هستند. دلیل این افزایش مقاومت را می‌توان حضور الیاف فولادی و شیشه در بتن‌های الیافی دانست. لیکن در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی رشد افزایشی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف شیشه مشاهده می‌شود. در طرح‌هایی که درصد حجمی الیاف شیشه در محدوده ۰/۶ تا ۰/۹ درصد است با افت مقاومت فشاری مواجه هستیم. در ضمن میزان

مقاومت خمشی طبق استاندارد ASTM C-293 به صورت رابطه ۲ می‌باشد [۲۴-۲۵]:

$$f_r = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

که در آن، f_r مدول گسیختگی برحسب مگا پاسکال، P حداکثر بار اعمال شده توسط جک برحسب نیوتن، L طول دهانه برحسب میلی‌متر، b عرض متوسط دهانه در لحظه شکست و d عمق مؤثر نمونه در لحظه شکست هر دو برحسب میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۶: دستگاه آزمون خمش سه نقطه و نحوه شکست نمونه مورد آزمایش

۴- نتایج به دست آمده از تحقیق

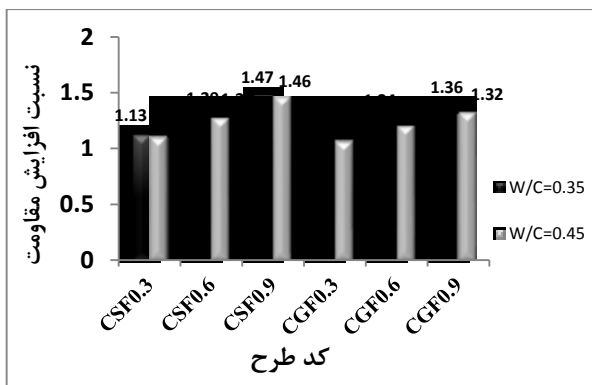
۴-۱- مقاومت فشاری

در اشکال ۷ و ۸ نتایج آزمایش‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سن ۲۸ روز که معیار اصلی بررسی مقاومت است، در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵

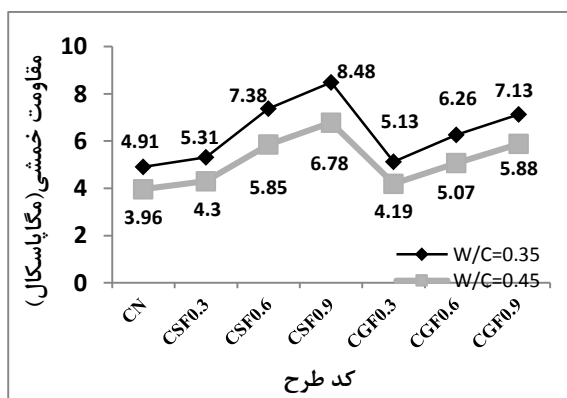
بیشتر است. برای بررسی افزایش مقاومت‌ها به‌طور مثال در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ این نتیجه حاصل شد که بیشترین افزایش مقاومت کششی در طرح‌های حاوی الیاف فولادی با ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف به ترتیب با نسبت‌های ۱/۱۳، ۱/۲۹ و ۱/۴۷ افزایش مقاومت مشاهده می‌شود که این افزایش نسبت به طرح‌های حاوی الیاف شیشه با ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف که به ترتیب با نسبت‌های ۱/۰۵، ۱/۲۴ و ۱/۳۶ افزایش مقاومت داشته‌اند، بیشتر است.

۴-۳- مقاومت خمشی

در شکل ۱۱ نتایج آزمایش هفت طرح مقاومت خمشی آورده شده است. در هر طرح سه نمونه تهیه شده و سپس میانگین سه نمونه به‌عنوان مقاومت خمشی که در سن ۲۸ روز انجام شده، به ترتیب نشان داده شده است.



شکل ۱۰: نسبت افزایش مقاومت کششی بتن الیافی نسبت به بتن بدون الیاف

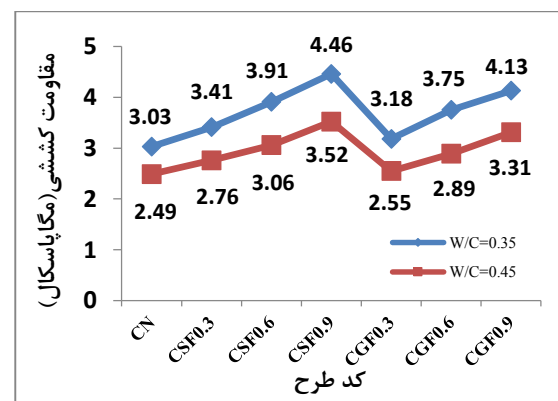


شکل ۱۱: مقایسه مقاومت خمشی طرح‌ها در سن ۲۸ روز

افزایش مقاومت فشاری هفت‌روزه نسبت به بتن شاهد در طرح‌های حاوی الیاف از میزان افزایش در سن ۲۸ روز بیشتر بوده است و این امر به معنای افزایش نرخ رشد مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی الیاف می‌باشد.

۴-۲- مقاومت کششی

در شکل ۹ نتایج آزمایش هفت طرح مقاومت کششی آورده شده است. در تحلیل نتایج آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن، اثرات عوامل نسبت آب به سیمان، افزودن الیاف مورد بررسی قرار گرفته است.

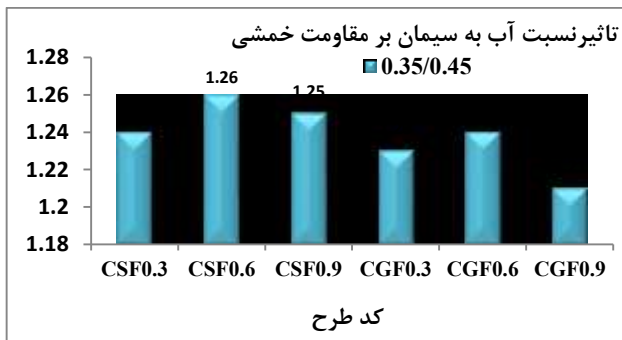


شکل ۹: مقایسه مقاومت کششی طرح‌ها در سن ۲۸ روز

همان‌طور که در شکل ۹ نمایش داده شده، در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴۵ با اضافه شدن الیاف فولادی و شیشه‌ای در محدوده ۰/۳ تا ۰/۹ درصد حجمی بتن، مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است. دلیل افزایش مقاومت بتن الیافی نسبت به بتن معمولی این مسئله است که بتن بدون الیاف دارای رفتار ترد و شکننده می‌باشد، درحالی‌که بتن مسلح به الیاف فولادی و شیشه‌ای رفتار شکنندگی بتن را به علت ممانعت از انتشار و تکثیر ترک به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. همچنین، در شکل ۱۰ نسبت افزایش مقاومت کششی بتن الیافی به بتن بدون الیاف در هر دو نسبت آب به سیمان ارائه شده است تا بتوان تأثیر افزودن الیاف به بتن را در افزایش مقاومت کششی بررسی نمود.

بر اساس نتایج آزمایش مقاومت کششی همان‌طور که در ۱۰ نشان داده شده است، افزایش مقاومت کششی طرح‌های حاوی الیاف فولادی نسبت به طرح‌های دارای الیاف شیشه

درصد‌های مختلف و نوع الیاف را در هر دو نسبت آب به سیمان بر افزایش و یا کاهش مقاومت خمشی بررسی نمود. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که مقاومت خمشی بتن‌های الیافی نسبت به طرح شاهد افزایش پیدا کرده است. با انجام آزمایش خمش بر روی تمامی طرح‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که در طرح‌های بتن الیافی، طرح‌های حاوی ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی افزایش مقاومت قابل ملاحظه تری نسبت به دیگر طرح‌ها داشته‌اند. اولویت میزان اثربخشی ابتدا با افزودن الیاف فولادی و سپس با نسبت آب به سیمان می‌باشد. معمولاً با کاهش نسبت آب به سیمان یعنی با افزایش مقدار سیمان یا کاهش آب مصرفی مقاومت خمشی بتن افزایش پیدا می‌کند که در این بخش به تأثیر افزایش مقاومت خمشی با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۵ به ۰/۳۵ پرداخته می‌شود.



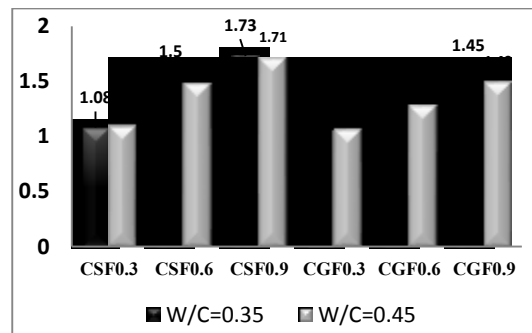
شکل ۱۳: نسبت تأثیر آب به سیمان در افزایش مقاومت خمشی

۱/۲۴ افزایش داشته است که نشان می‌دهد، با کاهش نسبت آب به سیمان به میزان ۰/۱، مقاومت خمشی بین ۱/۲۱ تا ۱/۲۶ افزایش پیدا می‌کند.

۴-۴- مقایسه رابطه مقاومت کششی با مقاومت فشاری

در ادبیات فنی و مقالات معمولاً برای ارزیابی مقاومت کششی بتن، آن را به صورت درصدی از مقاومت فشاری بیان می‌کنند. این درصد معمولاً عددی بین ۸ تا ۱۵ درصد گزارش می‌شود [۲۷]. در این تحقیق نسبت مقاومت کششی به فشاری ۲۸ روزه بتن معمولی و الیاف دار به صورت جدول شکل ۱۴ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ نمایش داده شده، با اضافه شدن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصدی الیاف فولادی و شیشه به بتن، مقاومت خمشی طرح‌ها افزایش یافته است. لیکن از نتایج مشخص می‌شود که در طرح‌هایی که نسبت آب به سیمان و درصد حجمی الیاف ثابت بوده و فقط نوع الیاف فولادی به الیاف شیشه تغییر پیدا کرده است، مقاومت خمشی کاهش یافته که این مسئله بیانگر عملکرد بهتر الیاف فولادی در افزایش مقاومت خمشی می‌باشد. همچنین نسبت افزایش مقاومت خمشی بتن الیافی به بتن بدون الیاف در هر دو نسبت آب به سیمان در شکل ۱۲ نشان داده شده است تا بتوان تأثیر افزودن الیاف به بتن را در افزایش مقاومت خمشی بررسی نمود.



شکل ۱۲: نسبت افزایش مقاومت خمشی بتن الیافی نسبت به بتن بدون الیاف

بر اساس نتایج آزمایش خمش، همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، مقاومت بتن‌های الیافی نسبت به بتن‌های معمولی مقایسه شده است تا بتوان تأثیر

نسبت مقاومت خمشی بتن‌های الیافی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ به ۰/۴۵ در شکل ۱۳ نشان داده شده است تا بتوان تأثیر مستقیم کاهش نسبت آب به سیمان را در افزایش و یا کاهش مقاومت خمشی بررسی نمود. با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۵ به ۰/۳۵، مقاومت خمشی افزایش پیدا می‌کند. در طرح‌های حاوی الیاف فولادی که حاوی ۰/۳ تا ۰/۹ درصد الیاف هستند، با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۵ به ۰/۳۵، مقاومت خمشی بین ۱/۲۴ تا ۱/۲۶ افزایش پیدا کرده و در طرح‌های حاوی الیاف شیشه حاوی ۰/۳ تا ۰/۹ درصد الیاف، با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۵ به ۰/۳۵، مقاومت خمشی بین ۱/۲۱ تا

تمامی مقاومت‌ها روند افزایش داشتند. نتایج به‌دست‌آمده از تمامی آزمایش‌های حاکی از آن است که در هر دو نسبت آب به سیمان با افزودن الیاف مقاومت خمشی نسبت به طرح شاهد افزایش پیدا کرده است.

● نکته قابل‌ذکر آن است که الیاف فولادی اثر بیشتری در افزایش مقاومت نسبت به الیاف شیشه دارند. اولویت میزان اثربخشی عوامل بر مقاومت خمشی ابتدا با افزودن الیاف و سپس با نسبت آب به سیمان می‌باشد.

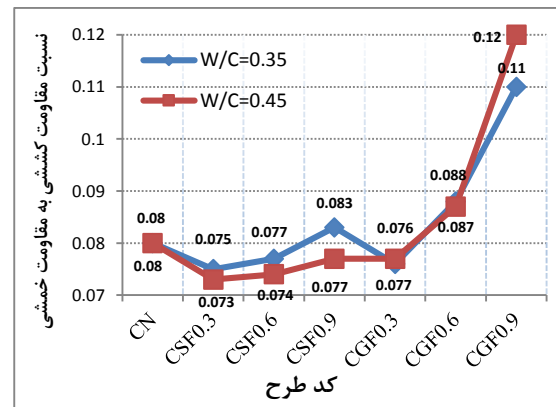
● حضور الیاف فولادی در بتن با ۰/۳ تا ۰/۹ درصد حجمی بتن، سبب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی می‌شود. الیاف شیشه فقط در محدوده ۰/۳ تا ۰/۶ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری و استفاده بیش از این مقدار سبب افت مقاومت فشاری می‌شود، اما با افزایش الیاف شیشه در محدوده ۰/۳ تا ۰/۹ درصد شاهد افزایش مقاومت و کششی و خمشی هستیم.

● درنهایت می‌توان اظهار داشت که حضور الیاف فولادی نسبت به الیاف شیشه، به‌صورت قابل‌توجهی ترد بودن بتن پر مقاومت را که مهم‌ترین نقص آن به شمار می‌آید برطرف می‌کند. با نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که با افزودن الیاف فولادی بجای الیاف شیشه، می‌توان مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را بهبود بخشید. ساخت بتن حاوی الیاف فولادی به دلیل نداشتن جذب آب و عدم پدیده گلوله شدن این الیاف نسبت به الیاف شیشه راحت‌تر است.

● همچنین استفاده از عدد ۸ درصد برای نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری در طراحی‌ها بجای عدد رایج ۱۰ درصد منطقی‌تر است.

مراجع

- [1] ACI committee 544, "Design consideration for steel fiber reinforced concrete (ACI 544.4R-88)". ACI Struct J; 85(5): P.563-80, 1988.
- [2] Bencardino F, Rizzuti L, Spadea G,



شکل ۱۴: نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌ها

همان‌طور که از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری در حد ۸ درصد می‌باشد. هرچند در بتن الیافی شیشه‌ای با ۰/۹ درصد الیاف این نسبت مقاومت به ۱۱ درصد رسیده است؛ بنابراین با توجه به مشاهده این آزمایش‌ها استفاده از حد پایین نسبت مقاومت منطقی است؛ یعنی استفاده از عدد رایج ۱۰ درصد برای نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری کمی دست بالا بوده و در بهترین حالت می‌توان به عدد ۸ درصد بسنده کرد

۵- نتیجه‌گیری و بحث

در مقاله حاضر، رفتار بتن‌های با رده مقاومتی معمولی و مقاومت بالا ارزیابی گردید. اثر عوامل کاهش نسبت آب به سیمان، افزودن الیاف بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بررسی گردید. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق می‌توان به نکات زیر اشاره نمود.

● می‌توان گفت که در هر دو نسبت آب به سیمان در بتن‌های حاوی الیاف فولادی با اضافه شدن الیاف در محدوده ۰/۳ تا ۰/۹ درصد مقاومت فشاری افزایش می‌کند اما در بتن دارای الیاف شیشه با اضافه کردن الیاف بیش از ۰/۶ درصد مقاومت فشاری کاهش پیدا می‌کند. تأثیر افزودن الیاف بر مقاومت کششی به صورتی بود که در هر دو نسبت آب به سیمان، با اضافه شدن الیاف فولاد و شیشه در محدوده ۰/۳ تا ۰/۹ درصد

- [14] Kwak YK, Eberhard MO, Kim JB. Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Struct J*; 99(4): 530-8, **2002**.
- [15] Ashour SA, Hassanain GS, Wafa FF. Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams. *ACI Struct J*; 89(2): 176-84, **1992**.
- [16] Lim TY, Paramsivam P, Lee SL. Shear and moment capacity of reinforced steel fiber concrete beams. *Mag Concr Res*; 39(140): 148-60, **1987**.
- [17] Chalioris CE. Analytical approach for the evaluation of minimum fiber factor required for steel fibrous concrete beams under combined shear and flexure. *Construct Build Mater*; 43(1): 317-36, **2013**.
- [18] Qureshi L A et al, "Effect of mixing steel fibers and silica fume on properties of high strength concrete", *Proceedings. Int Conference Concrete: Construction sustainable option, Dundee. UK*, PP 173-185, **2008**.
- [19] Hadi M et al, "An investigation of steel and polypropylene fiber reinforced concrete slabs", *Proceedings. Int Conference Concrete Constructions sustainable option, Dundee. UK*, PP 233-344, **2008**.
- [20] ASTM C128-12" Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate" **2012**.
- [21] ASTM C127-12" Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate" **2012**.
- [22] Nili. m, Afroughsabet.v, The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, Vol24, Issue 6, pp.927-933, **June 2010**.
- [23] ASTM C496-M11"Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens" **2011**.
- [24] ASTM C293 -08 "standard test method for Flexural strength of concrete (Using Simple Beam White Center-Point loading)" **2008**.
- [25] M.N.Soutsos, T.T.Le and A.P.Lampropoulos" Flexural Performance of fiber reinforced concrete made with steel and synthetic fibers" *Construction and Building Materials*, pp 704-710, **2012**.
- [3] Swamy RN. Implications of test methodology on post-cracking and fracture behavior of steel fiber Reinforced Concrete. *Compos Part B Eng*; 46:31-8, **2013**.
- [3] Kaikea A, Achoura D, Duplan F, Rizzuti L. Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete. *Mater Des*; 63: 493-9, **2014**.
- [4] Wille K, Tue N, Parra- Montesinos G. Fiber distribution and orientation in UHP-FRC beams and their effect on backward analysis. *Mater Struct*; 47(11): 1825-38, **2014**.
- [5] Yoo DY, Kang ST, Yoon YS. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. *Constr Build Mater*; 64: 67-81, **2014**.
- [6] Wille K, Parra-Montesinos GJ. Effect of beam size, casting method, and support conditions of flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Mater J*; 109(3): 379-88, **2012**.
- [7] Romualdi JP, Mandel JA. Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement. *ACI J Pro c*; 61(6): 657-71, **1964**.
- [8] Lim TY, Paramsivam P, Lee SL. Analytical model for tensile behavior of steel fiber concrete. *ACI Mater J*; 84(4): 286-98, **1987**.
- [9] Abrishami HH, Mitchell D. Influence of steel fibers on tension stiffening. *ACI Struct J*; 94(6): 769-76, **1997**.
- [10] Voo JYL, Foster SJ, "Variable engagement model for fiber reinforced concrete in tension", *UNICIV Report No.R-2003*, The University of New South Wales, Sydney, Australia, p.1-86, **2003**.
- [11] Ganesan N, Indira PV, Santhakumar A, Influence of steel fiber on tension stiffening and cracking of reinforced geopolymer concrete. *Mag Concr Res*; 66(6): 268-76, **2014**.
- [12] Adebar P, Mindess S, St- Pierre D, Olund B. Shear tests of fiber concrete beams without stirrups. *ACI Struct J*; 94(1): 68-76, **1997**.
- [13] Narayanan R, Darwish IYS. Use of steel fibers as shear reinforcement. *ACI Struct j*; 84(3): 216-27, **1987**.

