

مطالعه تجربی نقش الیاف فولادی در بهبود خواص مکانیکی بتن توانمند الیافی

مجتبی خزایی^۱، حسین خدارحمی^۲، مصطفی امینی مزرعه‌نو^۳، اسد قریشوندی^۱

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۶

چکیده

بتن‌های الیافی به‌طور گسترده‌ای برای بهبود خواص دینامیکی سازه‌های بتنی در برابر اثر انفجار، ضربه و نفوذ در پروژه‌های نظامی، پدافند غیرعامل و مقاوم‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزودن الیاف به بتن سبب افزایش چقرمگی^۴، شکل‌پذیری^۵، مقاومت خمشی و کششی بتن به خصوص در برابر بارهای ضربه‌ای و دینامیکی، کاهش پدیده‌های قلوه‌کن شدن بتن و کنترل انتشار ترک می‌شود. تحقیقات صورت‌گرفته در کشور بر روی بتن‌های حاوی الیاف فولادی، بیشتر با استفاده از الیاف وارداتی صورت پذیرفته است. در این پژوهش، الیاف فولادی تولید داخل کشور به‌منظور بررسی تأثیر آن‌ها در بهبود خواص مکانیکی بتن مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد که افزودن این نوع الیاف، در بهبود مقاومت فشاری، خمشی و کششی تأثیر قابل توجهی داشته است. بنابراین انتظار می‌رود با افزودن این نوع الیاف فولادی، مقاومت بتن در برابر بارگذاری‌های بسیار سریع نظیر بارهای ضربه‌ای و انفجار نیز افزایش چشمگیری داشته باشد. با طراحی و پیاده‌سازی یک نمونه از سامانه مذکور، از اطلاعات فوق استفاده، و از موقعیت مکانی و شرایط محیطی نیرو اطلاع حاصل شد و وضعیت سلامتی و عملکرد نیرو با موفقیت تحت نظارت قرار گرفت. از نتایج حاصل می‌توان در مدیریت، برنامه‌ریزی و سنجش عملکرد تیم‌های امدادی در مواقع آموزش، مانورها و عملیات نجات واقعی استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: الیاف فولادی، بتن توانمند الیافی، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، مقاومت فشاری

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه جامع امام حسین(ع) mojtaba151@yahoo.com - نویسنده مسئول

۲- دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۳- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۱- مقدمه

بتن، یکی از پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی است که مقاومت زیادی در برابر آتش‌سوزی داشته و از میزان جذب انرژی بالایی برخوردار است. ضعف عمده بتن، تخریب‌پذیری زیاد در برابر بارهای شدید استاتیکی، دینامیکی، ضربه و انفجار به دلیل عدم تحمل نیروهای کششی زیاد است. برای رفع این اشکال و بهینه ساختن کاربری بتن در برابر بارهای شدید، راهکارهای متعددی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به کامپوزیت‌های اصلاح‌شده بتنی اشاره نمود [۵]. از زمان‌های کهن، الیاف‌ها برای مسلح کردن مصالح ترد مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند و پارامترهای مختلف مصالح از جمله مقاومت کششی، مقاومت فشاری، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، دوام، خستگی، مقاومت در برابر ضربه و سایش، جمع‌شدگی، انبساط، ویژگی‌های حرارتی و مقاومت در برابر آتش‌سوزی توسط الیاف بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته‌اند. انواع مختلفی از الیاف به صورت آزمایشگاهی و صنعتی موجود می‌باشند و به طور کلی الیاف، به دو نوع مصنوعی و طبیعی دسته‌بندی می‌شوند [۲-۴].

متداول‌ترین نوع بتن الیافی، بتن مسلح به الیاف فولادی است که به طور ویژه کاربردهای سازه‌ای آن مورد توجه می‌باشد. نظر به اینکه این نوع بتن از مصالح کامپوزیتی به‌شمار می‌آید، خواص آن وابسته به مشخصات الیاف (درصد حجمی، مقاومت، نسبت طول به قطر، مدول الاستیسیته و پارامتر چسبندگی الیاف)، مشخصات بتن (مقاومت، نوع مصالح) و مشخصات سطح مشترک الیاف و بتن می‌باشد. به دلیل طبیعت تدریجی بودن بیرون کشیدگی الیاف از بتن، بعد از ترک خوردن ماتریس، الیاف در بهبود شکل‌پذیری بتن نقش مؤثری داشته و میزان این شکل‌پذیری متأثر از نوع و درصد حجمی الیاف خواهد بود. الیاف فولادی در بهبود شکل‌پذیری بتن تحت اثر انواع بارگذاری‌ها مؤثر است و لیکن تأثیر آن در افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی، برشی و خمشی متفاوت است [۱۰ و ۱۱]. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد بتن‌های الیافی توانمند می‌توان از این نوع بتن به‌عنوان یک مصالح مناسب، جهت ساخت انواع مختلف سازه‌های دفاعی و امن استفاده کرد. به عبارت دیگر، این نوع مصالح می‌تواند کاربرد زیادی در مباحث پدافند غیرعامل (به‌منظور احداث سازه‌ای مستحکم جهت تأمین جانی نیروی انسانی، حفظ تجهیزات و کاهش خسارات) داشته باشد.

ژوزف لامبوت^۱ در سال ۱۸۴۷ پیشنهاد کرد که با اضافه کردن الیاف پیوسته به شکل سیم به بتن، یک ماده ساختمانی جدیدی می‌توان تولید کرد که مقاومت‌های فشاری، کششی و برشی آن افزایش می‌یابد [۷]. در سال ۱۹۱۰ یک سری آزمایش‌ها برای تعیین مقاومت بتن با الیاف‌های کوتاه توسط پورتر^۲ انجام شد. او با اضافه کردن گل میخ^۳ به

بتن، مقاومت کششی و خردشدگی بتن را بهبود بخشید. در سال‌های بعد از ۱۹۱۰ ساخت عناصر کامپوزیت شامل سیمان و پنبه نسوز توسط لهتشلک^۴ توسعه یافت. در سال ۱۹۳۹، زیت کویک^۵ روشی برای بهبود رفتار بتن مسلح یافت. وی از الیاف‌های سیم آهنی به طول ۱۰۰ mm و قطر ۱ mm که به الیاف فولادی مورد استفاده در بتن امروزی بسیار شبیه بود استفاده کرد [۷]. در اوایل دهه ۱۹۶۰ اولین تلاش اصلی برای مسلح کردن بتن به وسیله جایگذاری الیاف فولادی توسط باستون^۶ و رامولدی^۷ صورت گرفت [۷].

از دهه ۱۹۶۰ تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه بتن مسلح به الیاف فولادی صورت گرفته است، کیورشی^۸ و همکارانش خواص بتن با مقاومت بالا را با افزودن الیاف فولادی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش الیاف فولادی، مقاومت کششی به صورت خطی افزایش می‌یابد و سرعت افزایش در هفت روز اول بیشتر است. وی همچنین آزمایشی را جهت مقایسه رفتار دال بتنی مسلح با استفاده از الیاف فولادی و پلی پروپیلن^۹ انجام داد. نتایج آزمایش‌های او نشان داد که افزایش ۱٪ حجمی الیاف فولادی بهترین تأثیر را در شکل‌پذیری دال‌ها دارد [۷ و ۸].

از مشخصات مهم بتن الیافی، خاصیت جذب انرژی، شکل‌پذیری و مقاومت آن در مقابل ضربه است. این خاصیت می‌تواند به نحو مطلوبی خطر شکست سازه‌های بتنی در برابر ضربه یا بارهای شدید دینامیکی (برخورد پرتابه و اثرات موج انفجار به خصوص در زمان وقوع زلزله) را کاهش دهد [۶].

یکی از مشکلات عمده در استفاده از الیاف در ابتدای کار، مسئله تجمع و گلوله شدن الیاف و کاهش کارایی بتن در مقادیر بالای استفاده بود. این مشکلات با اصلاحات در طرح اختلاط، ابداع الیاف با چسبندگی مکانیکی بیشتر (الیاف قلابدار) و در نتیجه، امکان کاهش مقدار الیاف مورد نیاز و همچنین گسترش استفاده از روان‌کننده‌ها و فوق روان‌کننده‌ها در بتن، تا حد زیادی حل شد [۱۲ و ۱۴]. در این مقاله، الیاف فولادی موجود در کشور (تولید صنایع مفتولی زنجان) با چهار درصد مختلف به بتن افزوده شده تا تأثیر افزودن این نوع الیاف بر خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، خمشی و کششی مورد بررسی قرار گیرد. لازم به توضیح است تست‌ها و کارهای انجام‌شده قبلی در این خصوص غالباً بر روی الیاف خارجی صورت گرفته ولی در این مقاله از الیاف تولید داخل کشور استفاده شده است که در صورت صنعتی شدن تولید بتن الیافی، موجب کاهش قیمت تولید و ایجاد انگیزه جهت استفاده

3- Nail

4- Lhatshelk

5- Zitkevic

6- Baston

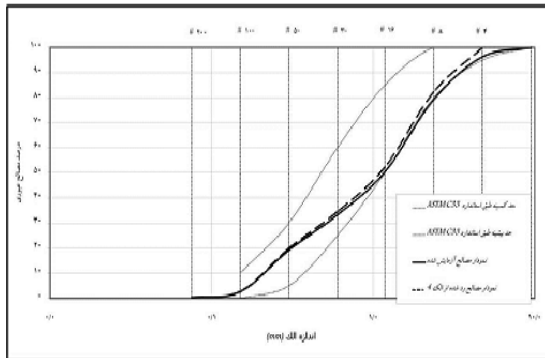
7- Ramualdi

8- Laqureshi

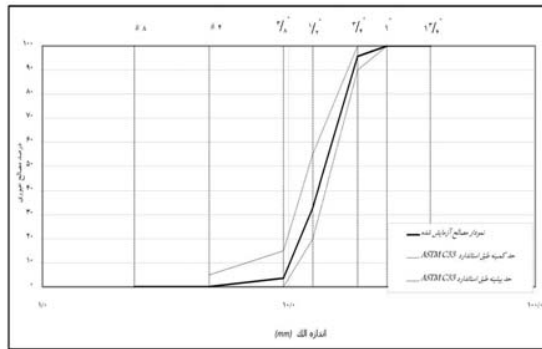
9- Polypropylene

1- Joseph Lambot

2- Porter



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی شن



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه



شکل ۳- نمونه‌های ساخته‌شده استوانه‌ای، منشوری و مکعبی

۲-۲- طرح اختلاط

مجموعاً برای ساخت نمونه‌های بتنی مورد نیاز برای آزمایش‌های مکانیکی، ۴ نوع بتن با طرح اختلاط‌های مختلف مورد استفاده قرار


بیشتر از این مصالح توسط مهندسان و طراحان قرار خواهد گرفت.

۲- روش ساخت نمونه‌ها

برای ساخت بتن از سنگدانه‌های مرغوب موجود در شهرستان شهریار (متوساک) با حداکثر اندازه دانه ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۱) منحنی دانه‌بندی ماسه و شن نخودی ۹-۰ میلی‌متر و در شکل (۲) منحنی دانه‌بندی شن بادامی ۱۹-۹ میلی‌متر ارائه شده و با محدوده استاندارد مقایسه گردیده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دانه‌بندی شن و ماسه در محدوده نسبتاً مناسبی قرار دارد. حدوداً ۶۵ درصد مصالح سنگی استفاده‌شده در این تحقیق ماسه و ۳۵ درصد شن بوده است. سیمان مصرفی از نوع تیپ دو تهران بوده و در کلیه نمونه‌ها، تقریباً ۷/۵ درصد وزن مواد سیمانی با دوده سیلیس جایگزین شده است. دوده سیلیس مصرفی، محصول کارخانه سمنان می‌باشد که هرچند به‌کارگیری آن موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری بتن می‌شود، ولی بهره‌ی اصلی آن در کاهش نفوذپذیری و افزایش پایداری بتن است.

به‌منظور حصول روانی مورد نظر، از فوق روان‌ساز با پایه پلی‌کربوکسیلات (CP-WBK50) با برند LG در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. همچنین الیاف فولادی تولید داخل کشور (صنایع مفتول زنجان) به‌منظور بهبود خواص مکانیکی بتن اضافه گردید. در جدول (۱) مشخصات الیاف فولادی مصرفی ارائه شده است. همچنین در شکل (۳) شمای کلی از نمونه‌های استوانه‌ای، مکعبی و تیر منشوری ساخته‌شده جهت انجام آزمایش آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات الیاف فولادی با انتهای مهاری

شکل الیاف	نسبت طول به قطر (L/D)	طول (mm)	قطر (mm)
	۶۲/۵	۵۰	۰/۸

جدول ۲- مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در ساخت بتن

نوع مصالح	وزن مخصوص (gr/cm^3)	جذب آب (%)
ماسه و نخودی متوساک	۲/۵۴	۳/۰
شن بادامی متوساک	۲/۶	۱/۹۶

در ساخت بتن الیافی، مهم‌ترین مسئله، توزیع و پراکندگی یکنواخت الیاف در ماتریس بتن است. به همین دلیل روش‌های متفاوت برای اختلاط مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند. در نهایت، بهترین روش اختلاط به صورت زیر در نظر گرفته شد:

ابتدا مصالح سنگی شن و ماسه (دوبار شور) به مدت ۲ دقیقه به خوبی داخل میکسر مخلوط شده، سپس سیمان اضافه و مجدداً در میکسر به مدت ۲ دقیقه با هم مخلوط شد و سپس چهار پنجم آب به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ الی ۳ دقیقه مخلوط شد، برای اطمینان از پخش مناسب دوده سیلیس در مخلوط و نیز جلوگیری از کلوخه شدن آن، دوده سیلیس به همراه فوق روان‌ساز به یک پنجم باقیمانده آب اضافه شده و پس از مخلوط نمودن این سه جزء، ژل حاصل به مخلوط (داخل میکسر) اضافه گردید. الیاف فولادی پس از اضافه شدن آب و روان‌ساز و زمانی که بتن به کارایی نسبتاً مناسبی رسید، به صورت تصادفی و پاشیدن آن در مخلوط اضافه تا پخش الیاف به بهترین شکل ممکن صورت پذیرفته و از گلوله شدن الیاف در بتن جلوگیری شود.

۲-۴- نمونه‌گیری برای آزمایش

در این مطالعه در مجموع تعداد ۳۲ نمونه مختلف قالب‌گیری و برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. ساخت و عمل‌آوری کلیه نمونه‌های بتنی در آزمایشگاه بتن دانشگاه امام حسین(ع) انجام گرفت و نمونه‌ها برای هر یک از ۴ طرح اختلاط بکار رفته به صورت زیر انتخاب شدند.

الف- ۱۲ نمونه مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر برای تعیین مقاومت فشاری مکعبی (f'_c) در سن ۲۸ روز

ب- ۱۲ نمونه استوانه‌ای استاندارد 150×300 میلی‌متر برای آزمایش مقاومت کشش برزیلی در سن ۲۸ روز

ج- ۱۲ نمونه منشوری $100 \times 100 \times 500$ میلی‌متر برای آزمایش مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز

سپس نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد، مکعبی و منشوری قالب‌گیری شده و بر روی میز لرزان متراکم گردیدند. ۲۴ ساعت پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها از قالب خارج شده و در حوضچه آب به مدت ۲۸ روز مورد عمل‌آوری و نگهداری قرار گرفتند. هر گروه از نمونه‌ها ۲۴ ساعت قبل از آزمایش از حوضچه آب خارج و به محیط عادی آزمایشگاه منتقل گردید.

۳- روش انجام آزمایش‌ها

کلیه تست‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌ها اعم از تست فشاری، خمشی و برش برزیلی در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه تهران انجام گرفت.

گرفت. نسبت آب به مواد سیمانی در کلیه طرح‌ها $0/38$ در نظر گرفته شد. این نسبت در بسیاری از پروژه‌های عمرانی کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامتر متغیر در هر یک از این طرح‌ها، میزان الیاف فولادی مصرفی بوده و سایر پارامترها ثابت نگه داشته شده‌اند. در نمونه‌های $A15$ و $A10$ ، $A5A$ به ترتیب به اندازه $0/5$ ، 1 و $1/5$ درصد حجمی بتن، الیاف فولادی مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (۴) آزمایش اسلامپ برای دو نمونه شاهد و بتن الیافی با 1% الیاف آورده شده است. با افزایش 1% الیاف به بتن شاهد، اسلامپ به میزان 11 سانتیمتر کاهش یافته و در نتیجه، روانی و کارایی بتن مورد استفاده کاهش می‌یابد، که تا حدودی با استفاده از افزودنی‌ها (فوق روان‌کننده) این مشکل مرتفع می‌گردد.



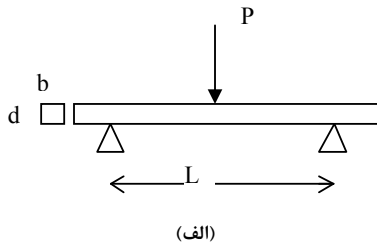
(الف)



(ب)

شکل ۴- (الف) اسلامپ ۱۵ برای نمونه شاهد و

(ب) اسلامپ ۳ برای نمونه A10



شکل ۶- آزمایش خمش بر روی نمونه تیر منشوری
(الف) نمای شماتیک تست خمش، (ب) تست خمش بر روی نمونه شاهد،
(ج) تست خمش بر روی نمونه الیافی

۳-۳- آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم شدن

در این روش آزمایش، با اعمال نیروی فشاری قطری بر روی نمونه استوانه‌ای بتن که به صورت افقی بین دو صفحه دستگاه آزمایش قرار گرفته، مقاومت کششی به روش دو نیم کردن تعیین می‌گردد. این آزمایش که اغلب به عنوان آزمایش برزلی شناخته می‌شود، به طور غیرمستقیم، مقاومت کششی بتن را با اعمال بار خطی در طول نمونه استوانه‌ای شکل اندازه‌گیری می‌کند [۱۳]. این آزمایش با جک بتن شکن به ظرفیت ۲۰۰ تن و سرعت بارگذاری ۲۵ کیلوگرم بر ثانیه انجام گردیده و مقاومت کششی برزلی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (شکل ۷).

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری به عنوان متداول ترین آزمایشی که بر روی بتن انجام می‌پذیرد، می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای کنترل کیفیت بتن، نسبت‌های اختلاط آن، روش مخلوط کردن و ریختن بتن، ارزیابی اثرات مواد افزودنی و مواد مشابه دیگر بر روی بتن، استفاده شود. آزمایش‌های مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد EN-12390 بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر به کمک جک بتن شکن به ظرفیت ۲۰۰ تن (ساخت شرکت JADEVER) و با نرخ بارگذاری ۲۵ کیلوگرم بر ثانیه صورت گرفته است. در این روش آزمایش، بار محوری فشاری با نرخ مشخص به نمونه‌ها اعمال شده تا گسیخته شدن نمونه اتفاق بیفتد (شکل ۵). مقاومت فشاری بتن از تقسیم حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه بر سطح مقطع واقعی آن به دست می‌آید [۱۳].



شکل ۵- آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه مکعبی

۳-۲- آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش تعیین مقاومت خمشی (اولین ترک) بتن مطابق استاندارد ASTM C78 بر روی نمونه‌های منشوری به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متری توسط جک خمشی (ساخت شرکت AZMON TEST) به ظرفیت ۵۰۰ تن و نرخ بارگذاری ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه انجام گرفته است. در این روش، نمونه منشوری به طور افقی زیر جک روی دو تکیه‌گاه قرار می‌گیرد و بار در یک نقطه به وسط دهانه اعمال می‌شود تا نمونه گسیخته شود. مقاومت خمشی با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید (شکل ۶).

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

در رابطه فوق، R مقاومت خمشی، P حداکثر بار در هنگام گسیختگی، L طول دهانه یا طول تکیه‌گاه، b عرض نمونه و d ارتفاع مقطع نمونه می‌باشد [۱۳]. لازم به توضیح است که فاصله دو تکیه‌گاه $L=30$ cm می‌باشد.

۴-۱- مقاومت فشاری

در جدول (۳) نتایج کامل آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ارائه شده است، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار الیاف تا ۱ درصد، مقاومت فشاری افزایش پیدا می‌کند. اما با افزایش الیاف به ۱/۵ درصد حجمی بتن، مقاومت کاهش یافته است (شکل ۸). به نظر می‌رسد به علت عدم حصول تراکم کافی به علت حجم زیاد الیاف و ایجاد خلل و فرج، مقاومت با کاهش مواجه شده که براساس آزمایش‌های بتن (اسلامپ)، این نتیجه تا حدی قابل پیش‌بینی بوده است. بنابراین به نظر می‌رسد درصد بهینه استفاده از الیاف برای رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر برای مخلوط مورد استفاده در حدود ۱ درصد می‌باشد. افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی، مقاومت فشاری بتن را تا ۴۹ درصد افزایش داده است. شایان ذکر است در طرح‌های A5 و A10 نمونه شماره ۲ به علت اختلاف با دو نمونه دیگر در محاسبه میانگین مقاومت لحاظ نشده و حذف گردیده است. لازم به ذکر است که افزودن الیاف به مخلوط‌های بتنی به منظور افزایش سایر خواص بتن از جمله شکل‌پذیری آن بوده است و افزایش مقاومت فشاری در درجه اول اهمیت قرار ندارد.

$$T = 2P / (\pi.L.d) \tag{2}$$

که در آن، T مقاومت کششی دو نیم شدن (مگاپاسکال)، P حداکثر بار اعمال شده، L طول نمونه و d قطر نمونه است [۱].



شکل ۶- آزمایش کشش برزیلی بر روی نمونه استوانه‌ای استاندارد

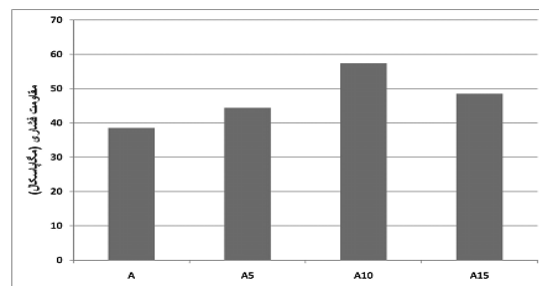
۴- تجزیه و تحلیل نتایج

جدول ۳- نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی

افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد (%)	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	بارگسیختگی (kN)	جرم مخصوص (kg/m ³)	جرم آزمونه (kg)	ارتفاع آزمونه (mm)	عرض آزمونه (mm)	طول آزمونه (mm)	ردیف	طرح اختلاط بتن
-	۳۸/۵	۳۸/۶	۸۹۶	۲۱۴۰	۷/۶۳۰	۱۵۰	۱۵۴	۱۵۱	۱	A
		۳۸/۹	۹۰۰	۲۱۹۰	۷/۷۸۰	۱۵۱	۱۵۳	۱۵۱	۲	
		۳۸	۸۶۹	۲۱۷۱	۷/۵۰۰	۱۵۰	۱۵۱	۱۵۲	۳	
۱۱	۴۲/۷	۴۳/۳	۹۹۱	۲۱۸۹	۷/۶۵۰	۱۵۲	۱۵۳	۱۵۰	۱	A5
		۴۷/۷	۱۰۹۳	۲۱۸۰	۷/۵۸۰	۱۵۱	۱۵۲	۱۵۱	۲	
		۴۲/۱	۹۶۰	۲۱۸۸	۷/۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۲	۳	
۴۹	۵۷/۳۵	۵۶/۸	۱۲۹۸	۲۲۷۸	۷/۸۴۰	۱۴۷	۱۵۱	۱۵۲	۱	A10
		۴۵/۳	۱۰۴۳	۲۲۲۶	۷/۶۹	۱۵۱	۱۵۰	۱۵۴	۲	
		۵۷/۹	۱۳۲۳	۲۳۲۱	۷/۹۳	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۳	۳	
۲۶	۴۸/۴	۴۸/۶	۱۱۴۰	۲۲۶۰	۸/۰۸	۱۵۲	۱۵۳	۱۵۴	۱	A15
		۴۹/۹	۱۱۶۰	۲۲۱۸	۷/۹۳	۱۵۱	۱۵۴	۱۵۱	۲	
		۴۶/۸	۱۰۹۹	۲۲۷۹	۸/۱۲	۱۵۲	۱۵۲	۱۵۴	۳	

می‌گردد که با افزایش مقدار الیاف، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. با این حال از این نظر نمونه بدون الیاف (شاهد) استثناء می‌باشد. با افزودن ۰/۵ درصد الیاف به بتن کاهش ۱۰ درصدی مقاومت خمشی نمونه منشوری اتفاق می‌افتد و این اتفاق غیرقابل انتظار ممکن است در اثر ایجاد خلل و فرج به سبب افزودن الیاف به بتن رخ داده باشد به طوری که ضعف ناشی از ایجاد حفره بر مزیت افزایش الیاف غلبه کرده و در نتیجه، کاهش مقاومت ماتریس را دربر داشته است. افزودن ۱/۵ درصد حجمی الیاف، مقاومت خمشی را تا ۵۸ درصد افزایش داده است. مقایسه مقاومت خمشی ۴ طرح اختلاط در شکل (۱۰) انجام شده است.

در رفتار پس از شکست نمونه‌های الیافی و غیرالیافی تفاوت‌های اساسی وجود دارد. نمونه‌های بتن الیافی پس از وقوع اولین ترک خمشی، همچنان توانایی تحمل بار تا گسیختگی نهایی را دارند و این به معنی شکل‌پذیری زیاد بتن الیافی می‌باشد. اما نمونه‌های بتن غیر الیافی به محض رسیدن به مرحله وقوع اولین ترک، رفتار ترد داشته و به سرعت شکسته شده و جدا می‌شوند. شکل (۱۱) به صورت تصویری رفتار متفاوت بتن الیافی و غیر الیافی تحت خمش را نشان می‌دهد.



شکل ۸- مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش

در شکل (۹) دو مود شکست فشاری بتن معمولی و بتن الیافی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مود شکست نمونه شاهد (بدون الیاف) و نحوه شکست آن قابل پیش‌بینی بوده و گسیختگی آن مشابه گسیختگی‌های متداول در نمونه بدون الیاف می‌باشد. و لیکن در نمونه الیاف‌دار به دلیل وجود الیاف نمونه دچار خردشدگی نشده و فقط ترک‌هایی در آن مشاهده می‌گردد.

۴-۲- مقاومت خمشی

در جدول (۴) نتایج آزمایش مقاومت خمشی ارائه شده است. ملاحظه



(ب)

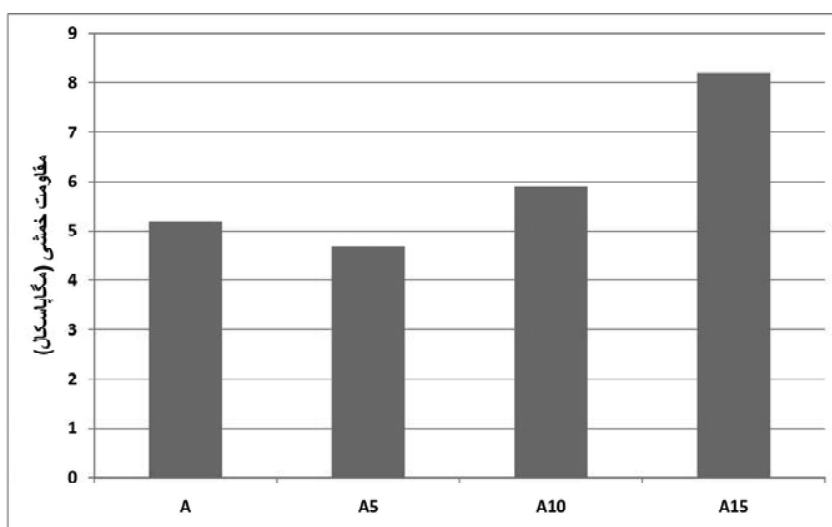


(الف)

شکل ۹- (الف) مود شکست نمونه مکعبی بدون الیاف و (ب) مود شکست نمونه مکعبی با ۱/۵٪ الیاف تحت آزمایش فشاری

جدول ۴- نتایج آزمایش تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های مشوری

افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد (%)	میانگین مقاومت خمشی (Mpa)	مقاومت خمشی (Mpa)	بارگسیختگی (KN)	جرم مخصوص (kg/m ³)	جرم آزمون (kg)	ارتفاع آزمون (mm)	عرض آزمون (mm)	طول آزمون (mm)	ردیف	طرح اختلاط بتن
-	۵۲	۵۲	۱۲۳۰	۲۲۰۱	۱۱/۴۵۰	۱۰۲	۱۰۲	۵۰۰	۱	A
		۵۱/۸	۱۲۱۵	۲۲۰۵	۱۱/۴۰۰	۱۰۱	۱۰۲	۵۰۱	۲	
		۵۲/۲	۱۲۴۱	۲۱۹۸	۱۱/۴۹۰	۱۰۰	۱۰۱	۵۰۲	۳	
-۱۰	۴۶/۷	۴۵	۱۱۳۰	۲۱۸۵	۱۱/۹۴۰	۱۰۴	۱۰۴	۵۰۴	۱	A5
		۴۵	۱۰۲۰	۲۲۱۱	۱۱/۱۹۰	۱۰۰	۱۰۱	۵۰۰	۲	
		۵۰	۱۲۱۰	۲۲۲۰	۱۱/۷۲۰	۱۰۳	۱۰۱	۵۰۴	۳	
۱۴	۵۹/۵	۶۵	۱۴۷۵	۲۲۵۵	۱۱/۴۸۰	۱۰۱	۱۰۰	۵۰۳	۱	A10
		۵۴	۱۲۵۰	۲۲۷۰	۱۱/۶۹۰	۱۰۱	۱۰۱	۵۰۳	۲	
		۵۹/۵	۱۳۶۰	۲۲۶۵	۱۱/۵۰۰	۱۰۱	۱۰۰	۵۰۲	۳	
۵۸	۸۲	۶۱	۱۲۵۰	۲۲۴۲	۱۰/۳۴۰	۱۰۰	۹۲	۵۰۰	۱	A15
		۸۰	۱۹۸۵	۲۲۶۳	۱۲/۳۷۰	۱۰۳	۱۰۵	۵۰۴	۲	
		۸۴	۱۸۹۵	۲۲۵۵	۱۱/۶۳۰	۱۰۰	۱۰۳	۵۰۳	۳	



شکل ۱۰- مقاومت خمشی نمونه‌های مورد آزمایش

آزمایش تعیین مقاومت کششی و خمشی بر روی نمونه‌های A و A5 این مسئله روشن می‌شود و این پدیده در هر دو آزمایش کشش برزیلی و خمشی رخ داده است. با افزایش مقدار الیاف (بیشتر از ۰/۵ درصد)، تاثیر مثبت الیاف بر این ضعف چیره شده و مقاومت‌ها نسبت به حالت شاهد افزایش می‌یابد. میزان الیاف در نتایج آزمایش‌های کششی و خمشی بیش از آزمایش مقاومت فشاری مؤثر می‌باشد. در آزمایش کششی برزیلی به روش دو نیم شدن، یک تنش فشاری عمودی و یک تنش کششی جانبی بر روی نمونه به وجود می‌آید. این تنش دوماحوره تأثیر معینی بر روی رفتار پس از ترک خوردگی نمونه دارد [۹]. تنش‌های فشاری که موازی هر یک از ترک‌ها ایجاد شده‌اند، باعث می‌شوند که الیاف فولادی پیش از بیرون کشیده شدن از ماتریس بتن الیافی، ترک‌ها را به یکدیگر اتصال داده و در نتیجه، نمونه مورد آزمایش بار بیشتری را تحمل کند و همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش ۱/۵ درصد الیاف، افزایش ۴۶ درصد مقاومت کششی را خواهیم داشت.

در شکل (۱۲) مودهای شکست کششی (برزیلی) در بتن شاهد (بدون الیاف) و بتن با ۰/۵ درصد الیاف با یکدیگر مقایسه شده است که نشان می‌دهد نمونه کششی با ۰/۵ درصد الیاف حالت انسجام خود را پس از تست حفظ کرده است ولی در نمونه بدون الیاف کاملاً جدایی دو نیمه آن مشهود است. همچنین در شکل (۱۳) نمودار میله‌ای مقاومت کششی نمونه‌ها با چهار طرح اختلاط مختلف بیان گردیده است.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های صورت‌گرفته، نتایج زیر قابل استنتاج می‌باشند:

۱. با افزودن الیاف، میزان کارایی بتن کم و بیش افت پیدا می‌کند. در صورت استفاده از ۱/۵ درصد حجمی الیاف، بتن دارای اسلامپ بسیار کمی بوده و کارپذیری آن پایین می‌باشد. با این حال ساخت بتن با این مقدار الیاف در عمل ممکن ولی توأم با مشکل می‌باشد.
۲. با افزایش مقدار الیاف تا ۱ درصد حجمی بتن، مقاومت فشاری بتن تا ۴۹ درصد افزایش پیدا می‌کند؛ اما با افزایش الیاف به ۱/۵ درصد حجمی بتن، به نظر می‌رسد به علت مشکلات حین بتن‌ریزی نظیر عدم حصول تراکم کافی، مقاومت فشاری نسبت به حالت ۱ درصد الیاف با کاهش مواجه می‌شود.
۳. با افزایش مقدار الیاف در بتن تا ۱/۵ درصد، مقاومت خمشی آن تا ۵۸ درصد مقدار اولیه افزایش می‌یابد.
۴. روند افزایش مقاومت کششی در بتن الیافی، مشابه آزمون خمش می‌باشد و با افزودن الیاف به میزان ۱/۵ درصد، مقاومت کششی بتن تا ۴۵ درصد افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

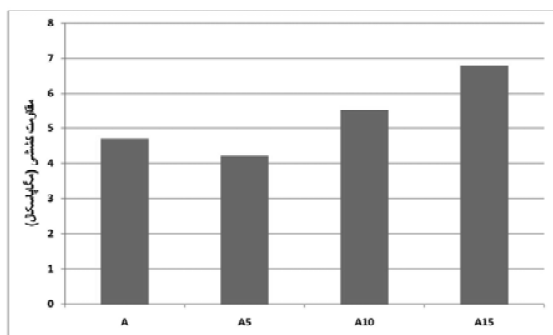
شکل ۱۱- مود شکست خمشی در الف) بتن غیرالیافی ب) بتن الیافی

۴-۳- مقاومت کششی (روش دو نیم کردن)

در جدول (۵) نتایج آزمایش کشش برزیلی ارائه شده است. در بتن‌های الیافی با افزایش مقدار الیاف، میزان مقاومت کششی افزایش می‌یابد. عامل اصلی در بهبود این خاصیت، استفاده از الیاف فولادی می‌باشد که باعث افزایش ظرفیت کششی بتن الیافی شده است. در واقع وجود الیاف فولادی در بتن، مانعی سخت در برابر تشکیل و گسترش ترک‌ها می‌باشد و مانند یک پل عمل می‌کند. روند افزایش یا کاهش مقاومت تقریباً مشابه آزمایش خمش می‌باشد. انتظار می‌رود با افزایش مقدار الیاف، میزان مقاومت کششی نیز افزایش یافته ولیکن همان‌طور که در آزمایش خمش نیز مشاهده گردید، با افزایش درصد کم الیاف (۰/۵ درصد) و کاهش کارایی بتن، مقاومت بدنه بتن مقداری (۹ درصد) کاهش می‌یابد که با توجه به ماهیت کششی بودن دو آزمایش برزیلی و خمشی (تنش کششی ناشی از خمش) در آزمایش خمشی ضعف ناشی از ایجاد تخلخل در اثر افزودن الیاف، بر تأثیر مثبت افزودن الیاف جهت تقویت کششی ماتریس فائق آمده و موجب کاهش مقاومت کششی گردیده است. با مقایسه نتایج

جدول ۵- نتایج آزمایش تعیین مقاومت کششی (برزیلی) نمونه‌های استوانه‌ای

طرح اختلاط بتن	ردیف	قطر آزمون (mm)	ارتفاع آزمون (mm)	سطح مقطع آزمون (mm ²)	جرم آزمون (kg)	جرم مخصوص (kg/m ³)	بار گسیختگی (kN)	مقاومت کششی (Mpa)	میانگین مقاومت فشاری (Mpa)	افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد (%)
A	۱	۱۵۲	۲۹۵	۱۸۲۱۷	۱۲/۳۰۰	۲۲۸۹	۳۳۸/۱	۴/۸	۴/۶	-
	۲	۱۵۲	۳۰۴	۱۸۱۳۶	۱۲/۲۷۰	۲۲۲۶	۲۳۶/۹	۳/۳		
	۳	۱۵۰	۲۹۹	۱۷۷۱۱	۱۲/۲۳۰	۲۳۰۹	۳۱۸/۴	۴/۵		
A5	۱	۱۵۲	۳۰۵	۱۸۲۱۲	۱۲/۴۲۰	۲۲۳۶	۳۲۸/۷	۴/۵	۴/۲	-۹
	۲	۱۴۶	۳۳۰	۱۶۶۳۸	۱۲/۰۰۰	۲۱۸۶	۲۹۹/۰	۴/۰		
	۳	۱۵۴	۳۰۳	۱۸۶۰۲	۱۲/۸۲۰	۲۲۷۵	۳۰۹/۶	۴/۲		
A10	۱	۱۵۳	۳۳۸	۱۸۴۳۳	۱۲/۸۷۰	۲۰۶۸	۴۳۱/۱	۵/۷	۵/۵	۲۰
	۲	۱۵۲	۳۳۳	۱۸۲۴۱	۱۲/۶۴۰	۲۰۸۰	۳۷۰/۴	۵/۷		
	۳	۱۵۴	۳۳۷	۱۸۵۵۳	۱۲/۷۵۰	۲۰۴۲	۳۶۸/۱	۵/۲		
A15	۱	۱۵۱	۳۰۳	۱۷۹۴۳	۱۲/۷۹۰	۲۳۵۳	۴۶۹/۷	۶/۵	۶/۷	۴۶
	۲	۱۵۱	۳۰۰	۱۷۸۹۱	۱۲/۰۱۰	۲۲۳۸	۳۷۱/۰	۵/۲		
	۳	۱۵۳	۳۰۲	۱۸۳۴۴	۱۲/۸۲۰	۲۳۱۴	۵۱۱/۰	۷/۰		



شکل ۱۲- نتایج آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش برزیلی در نمونه‌های A، A5، A10، A15

۵. افزودن الیاف فولادی یکی از مؤثرترین روش‌ها برای بهبود خاصیت ترد بودن بتن می‌باشد.
۶. با توجه به مجموع آزمایش‌های صورت گرفته بر روی بتن تازه و سخت شده به نظر می‌رسد استفاده از طرح A10 و A15 بهترین گزینه‌ها در برابر بارهای بسیار شدید نظیر ضربه و انفجار باشند. مسلماً در جایی که انتظار عملکرد بسیار مناسب در برابر بارهای شدید می‌رود، استفاده از طرح A15 قابل توجیه و عملی می‌باشد. عملکرد بهتر نمونه‌های A15 در این آزمایش‌ها قابل پیش‌بینی می‌باشد. با این حال اختلاف عملکرد بین نمونه‌های مختلف در کنار مسائل اقتصادی و اجرایی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.



شکل ۱۲- مود شکست نمونه بدون الیاف (تصویر بالایی) و الیاف‌دار (تصویر پایینی) تحت آزمایش کشش برزیلی

8. Quresh, L. A. et al, "Effect of mixing steel fibers and silica fume on properties of high strength concrete" Proceedings. Int Conference Concrete: Constructions sustainable option, Dundee. UK, (2008), pp 173-185.
9. Hadi, M. et al, "An investigation of steel and polypropylene fiber reinforced concrete slabs" Proceedings. Int Conference Concrete Constructions sustainable option, Dundee. UK (2008), pp 233-24.
10. Dramix, Bekaert, "Steel Fiber for Concrete Reinforcement", Technical Report, Zwevem, Belgium: Bekaert International Trade, (1987).
11. Bentur, Mindess, S. "Fiber Reinforced Cementitious Composites", Amsterdam: Elsevaer Applied Science, (1990).
12. Moens, J. E. C., "Steel Fiber Concrete Mix Proportioning", Pepar Persented at the American Concrete Institute, Annual covvention, philadelphi, March (1976).
13. American Concrete Institute (ACI)-544 Committee report on Fiber Reinforced Concrete, 1988 reviewed (1999).
14. Johnston, Colin D, "Steel Fiber Reinforced Mortar and Concrete: A Review of Mechanical Properties", SP-44, American Concrete Institute, Detroit, (1974), pp 27-142.

مراجع

۱. کیوانی، عبدالله؛ بتن مسلح به الیاف فولادی، انتشارات رودکی، (۱۳۶۹).
۲. باقری، علیرضا؛ پرهیزگار، طیبه؛ قدوسی، پرویز؛ طاهری، افشین و...؛ کاربرد الیاف در بتن و فراورده‌های سیمانی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تابستان، (۱۳۷۸).
۳. توانایی، حسین؛ الیاف بشرساخته، (۱۳۷۷).
۴. حسنی، ابوالفضل؛ محمد، سعید؛ تأثیر الیاف فولادی در کنترل ترک‌های کششی بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، بهار (۱۳۷۸).
۵. خالو، علیرضا؛ رفتار و کاربردهای بتن الیافی؛ مجموعه مقالات اولین کنفرانس تکنولوژی بتن الیافی؛ دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، ۴ اسفند (۱۳۷۸).
6. Antoine, E. N., (1985), "Fiber reinforced for concrete", Concrete international, March (1985), pp 21-25.
7. Beddar, M., "Development of steel fiber reinforced concrete from antiquity until the present day" Proceedings. Int Conference Concrete: Constructions sustainable option, Dundee, UK, (2008), pp 35-44.

Experimental Study of Steel Fibers in Improving Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete

M. Khazaei¹

H. Khodarahmi²

M. Amini Mazrae Nou³

A. Ghoreish Vandi¹

Abstract

Fiber reinforced concrete is widely used for improving the dynamic properties of concrete structures against blast effects, shock and penetration in passive defense, military and hardening projects. Adding fibers to concrete increases toughness, ductility, tensile and flexural strength of concrete especially against impact and dynamic loads and control the crack propagation and spalling of the concrete. Research conducted on steel fiber reinforced concrete has been done mostly using imported fiber. In this study, domestic steel fibers were tested to investigate their effect on mechanical properties of concrete. Test results showed that adding this type of fiber considerably improves the compressive, flexural and tensile strength of concrete. Consequently, it is expected that adding this type of steel fibers in concrete will dramatically increase its strength against very heavy loads such as impact and explosion.

Key Words: *Steel Fiber, Flexural Strength, Tensile Strength, Compressive Strength*

1- MS Candidate of Safe Structure, Faculty and Research Center of Passive Defense, Imam Hossein Comprehensive University (mojtaba151@yahoo.com) - Writer in Charge

2- Assistant and Academic Member, Imam Hossein Comprehensive University

3- Instructor and Academic Member, Imam Hossein Comprehensive University