

## بررسی تأثیر درصد حجمی، طول و شکل هندسی الیاف پلی الفین بر مشخصات مکانیکی و ویژگی های شکست بتن های پر مقاومت

سینا فلاح حسینی

دانشکده مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

پوریا حاجی کریمی \*

دانشکده مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

### چکیده

با توجه به پیشرفت مهندسی عمران در دهه های اخیر استفاده از بتن های پر مقاومت در ساخت سازه های خاص به امری رایج تبدیل شده است. یکی از ضعف های عمده بتن کم بودن مقاومت کششی و متعاقب آن ترک خوردگی و شکست بتن می باشد. امروزه با هدف بهره برداری بیشتر و رفع این نقطه ضعف علاوه بر تسلیح بتن با فولاد انواع گسترده ای از الیاف شامل الیاف پلیمری، فلزی و حتی معدنی و طبیعی ارابه مورد استفاده قرار گرفته اند. در این تحقیق اثر طول، شکل هندسی و درصد حجمی الیاف پلی الفین بر مشخصات مکانیکی و ویژگی های شکست بتن پر مقاومت مورد بررسی قرار گرفته است. الیاف به کار گرفته شده به صورت ساده و شبکه ای با سه طول ۱۹، ۳۰ و ۵۰ میلی متر بوده که در سه درصد حجمی مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد برای بررسی ویژگی های مکانیکی نمونه های فشاری، کششی، مدول الاستیسیته، تیر خمشی و همچنین ویژگی های شکست نمونه های تیر بدون شیار و تیر شیاردار به بتن اضافه گردیده اند. نتایج نشان می دهد که افزایش طول الیاف تأثیر مثبت بر ویژگی های مکانیکی و شکست بتن دارد، همچنین افزایش حجم باعث افزایش مدت زمان مقاومت نمونه در برابر بارگذاری خمشی می شود و نمونه های الیاف ساده مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه های الیاف شبکه ای دارد ولی انرژی شکست نمونه های الیاف شبکه ای به مراتب بیشتر از نمونه های الیاف ساده می باشد.

واژه های کلیدی: بتن پر مقاومت، الیاف پلی الفین، طول الیاف، شکست، تیر شیاردار.

\* نویسنده مسئول: pouria.hajikarimi@gmail.com

## ۱- مقدمه

آزمایش نبوده و مهم‌ترین تفاوت مربوط به تنش بیشینه می‌باشد [۹].

سیفوننتس و همکاران در سال ۲۰۱۳ پژوهشی در خصوص ویژگی‌های هندسی و تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار شکست بتن-های با مقاومت کم، متوسط و بالا انجام دادند. با توجه به کم بودن تغییر شکل در بتن‌های پرمقاومت؛ این نوع بتن رفتار تردتری نسبت به بتن‌های معمولی داشته و این موضوع باعث افزایش سطح تنش در ترک می‌شود. ایشان نتیجه گرفتند که نوع و خصوصیات الیاف باید با توجه به مقاومت بتن انتخاب شده و با آن در ارتباط باشد. در این تحقیق پارامترهای شکست و شکل‌پذیری بتن با استفاده از آزمایش سه‌نقطه‌ای خمش روی تیر بتنی تعیین شده است [۱۰].

در سال ۲۰۱۶ ارسال پژوهشی را پیرامون تأثیرات الیاف بازالت و شیشه خرد شده بر انرژی شکست و ویژگی‌های مکانیکی بتن‌های الیافی معمولی (با مدنظر قراردادن بازشدگی دهانه) بررسی کرد. به این منظور آزمایش سه‌نقطه‌ای خمش روی نمونه‌های تیر شیاردار مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد که اضافه کردن الیاف بر انرژی شکست تأثیر قابل توجهی داشته ولی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی ندارد [۱۱].

در این تحقیق تأثیر اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن با روکش پلی-الفین بر ویژگی‌های مکانیکی و شکست بتن پرمقاومت مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس یک دسته‌بندی متعارف بتن‌های با مقاومت فشاری بیشتر از ۴۰ مگاپاسکال به عنوان بتن پرمقاومت در نظر گرفته می‌شوند [۱۲]. این تأثیر از سه منظر شکل هندسی، درصد حجمی و طول الیاف و با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت دو نیم‌شدگی (کشش برزیلی)، مدول الاستیسیته و آزمایش سه‌نقطه‌ای خمش روی تیرهای شیاردار اجرا شده است. الیاف با دو شکل ساده و شبکه‌ای در درصدهای حجمی مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و با طول‌های مختلف ۱۹، ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر به بتن پرمقاومت مورد استفاده در این پژوهش اضافه شده و پارامترهای مورد نظر در قالب یک برنامه آزمایشگاهی منسجم اندازه‌گیری شده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

## ۲-۱- مصالح مورد استفاده و طرح اختلاط

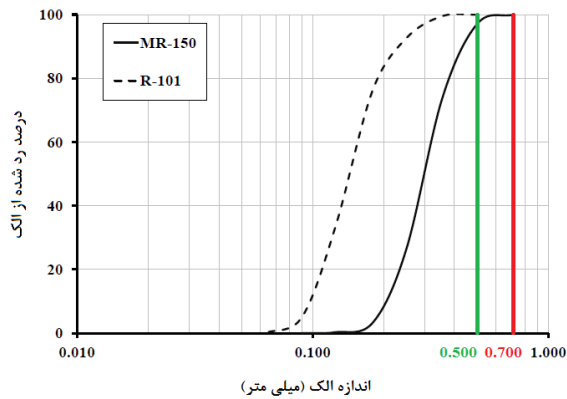
سیمان مورد استفاده در این پژوهش سیمان تپ دو خمسه می‌باشد. فوق روان‌کننده مورد استفاده از برند ژیکاپلاس بوده که فرمول

علیرغم کلیه ویژگی‌های منحصر به فرد بتن نظیر مقاومت فشاری مطلوب، عمر طولانی، قابلیت شکل‌پذیری و کارپذیری مناسب و... این ماده ساختمانی دارای یک نقطه ضعف مهم در خصوص مقاومت کششی (کشش مستقیم یا کشش ناشی از خمش) می‌باشد. به منظور جبران این نقیصه دو راهکار وجود دارد: ۱) طراحی سازه به شکلی که بار کششی در آن ایجاد نشود نظیر سدهای دوقوسی و ۲) استفاده از عناصر مسلح‌کننده نظیر میلگردهای فولادی، میلگردهای FRP، الیاف فلزی، الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف شیشه و...

استفاده از الیاف در بتن از حدود چهل سال قبل آغاز شده و مبحث جدیدی نیست و طی این سال‌ها استفاده و موارد کاربرد آن افزایش یافته است. کاربرد الیاف به طور فراگیر از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی در کشورهای صنعتی پیشرفته آغاز شد و در طی دهه‌های گذشته جنس و شکل الیاف و همچنین نحوه ساخت بتن الیافی به طور مستمر بهبود یافته است.

در یک طبقه‌بندی کلی الیاف به سه دسته فلزی، پلیمری و طبیعی تقسیم‌بندی می‌شوند [۱]. الیاف فولادی بیشترین کاربرد را در موارد سازه‌ای و غیرسازه‌ای دارا می‌باشند [۲]. الیاف پلی‌پروپیلن دسته دیگری از الیاف پرکاربرد در ساخت بتن الیافی است. این الیاف به دلیل ویژگی‌هایی از قبیل دوام بالا و کاهش انقباض بتن به طور گسترده در مسلح‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۳ و ۴]. در تحقیقات اخیر استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن با هندسه و طول‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۷]. تغییر در ویژگی‌های هندسی و طولی الیاف می‌تواند چسبندگی بین ماتریس بتن و الیاف مورد استفاده را تغییر داده و منجر به تغییر ساز و کار الیاف در بتن شود [۸].

رفتار شکست بتن همواره یکی از موضوعات مهم و مورد بحث در به کارگیری بتن جهت طراحی سازه‌ها بوده است. استفاده از الیاف اغلب با هدف افزایش انرژی شکست، افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری بتن مورد نظر بوده است. در سال ۲۰۱۲ بنکاردینو و همکاران پژوهشی را در خصوص کاربرد و مقایسه روش‌های مختلف آزمایش‌های مکانیک شکست و رفتار بعد از ترک بتن-های مسلح به الیاف فولادی انجام دادند. یکی از اهداف این تحقیق مقایسه روش‌های آزمایش سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای خمش بوده است. ایشان نتیجه گرفتند که تفاوت قابل توجهی بین این دو روش



شکل ۲- نمودار دانه بندی سنگدانه های سیلیسی مورد استفاده

جدول ۱- طرح اختلاط جهت ساخت یک مترمکعب بتن

وزن (کیلوگرم)	نام مصالح	
۸۸۰	سیمان	
۲۲۰	میکروسیلیس	
۲۴۰	ZS200	سنگدانه ها
۶۲۴	MR150	
۹۶	R101	
۶/۶	فوق روان کننده (۰/۶ درصد عیار بتن)	
۴/۵۵	۰/۵ درصد حجمی بتن	الیاف پلی پروپیلن
۹/۱	۱ درصد حجمی بتن	
۱۳/۶۵	۱/۵ درصد حجمی بتن	
۳۴۱	آب	

شیمیایی آن بر پایه پلی کربوکسیلات های اصلاح شده می باشد. این فوق روان کننده برای تولید بتن های خودتراکم و بتن های پرمقاومت مناسب بوده و در این پژوهش به میزان ۰/۶ درصد وزن سیمان به مخلوط بتن اضافه شده است. پودر میکروسیلیس استفاده شده در این پژوهش نیز محصول شرکت نامیکاران بوده و با هدف افزایش مقاومت بتن و کاهش مصرف سیمان به میزان ۲۰ درصد وزنی سیمان جایگزین گردیده است. الیاف استفاده شده در این تحقیق محصول شرکت نانوخ و گرانول سیرجان می باشد. این الیاف از جنس پلی پروپیلن و با روکش پلی الفین می باشد. الیاف مصرفی به دو شکل ساده و شبکه ای بوده که الیاف ساده با طول ۳۰ میلی متر و الیاف شبکه ای با طول های ۱۹، ۳۰ و ۵۰ میلی متر و در حجم های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد در طراحی آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفته اند. شکل ۱ الیاف ساده و شبکه ای در طول های مختلف را نشان داده است.



شکل ۱- الیاف ساده و شبکه ای با طول های مختلف

## ۲-۲- آماده سازی نمونه ها

با توجه به تعداد نمونه های مورد نیاز در این پژوهش، برای هر طرح اختلاط می بایست ۶۰ لیتر بتن ساخته شود. پیش از ریختن مصالح در داخل مخلوط کن، سطح داخلی آن به منظور جلوگیری از جذب آب مرطوب شده است. در مرحله اول سنگدانه MR150 و سپس یک سوم حجم الیاف مورد نظر، در مرحله دوم سنگدانه ZS200، در مرحله سوم یک سوم دیگر از الیاف مورد نظر، در مرحله چهارم میکروسیلیس (عبوری از الک نمره ۳۰)، در مرحله پنجم سیمان و نهایتاً در مرحله آخر الیاف باقیمانده اضافه شده است. به منظور پخش همگن الیاف در بتن، اختلاط مصالح به صورت خشک به مدت ۲ دقیقه ادامه یافته و سپس آب (بر اساس نسبت آب به سیمان ۰/۳۱) به همراه فوق روان کننده اضافه شده و

در پژوهش حاضر از سنگدانه های سیلیسی شرکت ایران کانسار واقع در شهرک صنعتی لیای قزوین استفاده شده است. قطر سنگدانه ها در سه اندازه مختلف بوده که شامل: سنگدانه MR150 (بزرگترین سنگدانه)، سپس سنگدانه R101 و سنگدانه ZS200 (کوچکترین سنگدانه) می باشد. شکل ۲ نمودار دانه بندی سنگدانه های MR150 و R101 را نشان می دهد. قطر سنگدانه ZS200 کمتر از ۷۰ میکرون می باشد. نسبت اختلاط سنگدانه ها با توجه به آزمایشات مکرر دانه بندی برای حصول بیشترین مقاومت بتن به دست آمده است. طرح اختلاط مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است. این جدول بر اساس مصالح مورد نیاز جهت ساخت یک مترمکعب بتن تنظیم گردیده است.

### ۲-۳-۳- روش‌های انجام آزمایش

#### ۲-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS1881-116 [۱۳] روی نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر انجام شده است. سرعت بارگذاری بر اساس این استاندارد ۳ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۳-۲- آزمایش مدول الاستیسیته

آزمایش تعیین مدول الاستیسیته مطابق استاندارد ASTM C469 [۱۴] روی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۸ روزه با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر انجام شده است. سرعت بارگذاری معادل ۰/۰۰۰۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۳-۳- آزمایش تعیین مقاومت دونیم‌شدگی (کشش

##### برزیلی)

آزمایش تعیین مقاومت دونیم‌شدگی بر اساس استاندارد ASTM C496 [۱۵] روی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۸ روزه با ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر انجام شده است. سرعت بارگذاری بر اساس این آیین‌نامه ۶۸۰ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۳-۴- آزمایش تعیین مقاومت خمشی

در این پژوهش دو روش متفاوت جهت اندازه‌گیری مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از آزمایش سه‌نقطه‌ای خمش نمونه‌های مستطیلی بدون شیار و آزمایش سه‌نقطه‌ای خمش نمونه‌های مستطیلی شیاردار. در ادامه توضیح مختصری در خصوص نحوه انجام هر یک از این آزمایش‌ها ارائه شده است.

#### ۲-۳-۴-۱- آزمایش سه نقطه‌ای خمش نمونه مستطیلی

##### بدون شیار

در این تحقیق نمونه‌های منشوری با ابعاد ۷×۷×۲۸ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال ۲۵ تن شرکت سنتام تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای خمش قرار گرفته‌اند. در این آزمایش فاصله بین تکیه‌گاه‌ها ۲۰ سانتی‌متر و فاصله بین تکیه‌گاه تا لبه نمونه ۴ سانتی‌متر می‌باشد. سرعت بارگذاری نمونه‌ها نیز ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد.

اختلاط به مدت ۵ دقیقه در حالت تر ادامه می‌یابد. پس از پایان فرآیند اختلاط مصالح در مخلوط‌کن، بتن آماده شده در سه مرحله داخل قالب‌ها ریخته شده و در هر مرحله به مدت ۵ ثانیه توسط میز لرزان وایبره زده می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که افزایش حجم و طول الیاف موجب کاهش کارایی بتن و نیاز به انرژی بیشتر در فرآیند اختلاط می‌گردد. با توجه به درصد حجمی و طول الیاف مورد استفاده کدگذاری نمونه‌های بتنی ساخته شده به شکلی که در جدول ۲ نشان داده شده انجام گردیده است. به منظور ایجاد شیار در نمونه‌های با ابعاد ۵۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر از یک قطعه پلاستیکی که توسط لیزر برش داده شده و در شکل ۳ نشان داده شده استفاده گردیده است. ضخامت این قطعه ۴ میلی‌متر، ارتفاع آن ۱۱ سانتی‌متر و طول قطعه ۴ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۳- ساخت نمونه‌های منشوری شیاردار با استفاده از قطعه

پلاستیکی مخصوص

جدول ۲- اطلاعات نمونه‌های مورد استفاده در پژوهش

کد نمونه	حجم الیاف (درصد)	طول الیاف (میلی‌متر)	شکل الیاف
بدون استفاده از الیاف			
Control			
FR30-05*	۰/۵	۳۰	ساده
FR30-10*	۱		
FR30-15*	۱/۵		
FR19-05	۰/۵	۱۹	
FR19-10	۱		
FR19-15	۱/۵		
FR30-05	۰/۵	۳۰	شیکه‌ای
FR30-10	۱		
FR30-15	۱/۵		
FR50-05	۰/۵	۵۰	
FR50-10	۱		
FR50-15	۱/۵		

مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی نسبت به نمونه شاهد شده است ولی در رابطه با نمونه‌های FR50 این موضوع صادق نمی‌باشد که دلیل آن را می‌توان جمع‌شدگی و گلوله شدن الیاف با طول‌های بلندتر دانست. تحقیقات پیشین نیز موید افزایش مقاومت فشاری بتن در حجم‌های مشخص الیاف به دلیل فرم‌دهی الیاف به ترک‌ها و بروز پدیده پل زنی ترک‌ها می‌باشد. روند شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش درصد حجمی الیاف مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان بالا بودن حجم الیاف مصرفی و متعاقب آن برهم خوردگی ماتریس بتن و جمع‌شدگی الیاف دانست. همچنین مشاهده می‌شود که نرخ کاهش مقاومت فشاری در نمونه FR30\* به مراتب بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با الیاف شبکه‌ای می‌باشد زیرا در این نوع از الیاف تمایل به جمع‌شدگی بیشتر بوده و با توجه به اینکه به دلیل ماهیت عملکردی خود درگیری کمتری با بتن ایجاد می‌کند نمی‌تواند مانع از گسیختگی نمونه شود. در میان همه نمونه‌های آزمایش شده نمونه FR19-05 با افزایش ۹/۵ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد بیشترین تأثیر را بر این ویژگی بتن داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الیاف با طول و حجم کم‌تر بیشترین تأثیر را در خصوص افزایش مقاومت فشاری به همراه خواهند داشت. از سوی دیگر نمونه FR30\*-15 کاهش مقاومت فشاری ۳۵ درصدی نسبت به نمونه شاهد داشته که نشان‌دهنده تأثیر منفی استفاده از الیاف ساده در حجم‌های بالا بر مقاومت فشاری بتن است.

## ۲-۳-۴-۲- آزمایش سه نقطه‌ای خمش نمونه مستطیلی

### شکل شیاردار

در این تحقیق به منظور تعیین مقاومت خمشی و بررسی ویژگی‌های شکست نمونه‌های بتن موردنظر، نمونه‌های منشوری با ابعاد  $10 \times 10 \times 50$  سانتی‌متر و ارتفاع شیار ۴ سانتی‌متر (شکل ۴) با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال ۲۵ تن شرکت سنتام و بر اساس استاندارد RILEM TC-50 FMC [۱۶] تحت بارگذاری سه نقطه‌ای خمش قرار گرفته‌اند. سرعت بارگذاری نمونه‌ها ۰/۵ میلی-متر بر دقیقه می‌باشد. باید توجه داشت که در زمان انجام این آزمایش بازشدگی ترک از نقطه انتهای شیار ایجاد شده آغاز شده و آزمایش تا زمانی که نیرو به اندازه ۹۰ درصد نیروی پیشین افت کند ادامه می‌یابد.

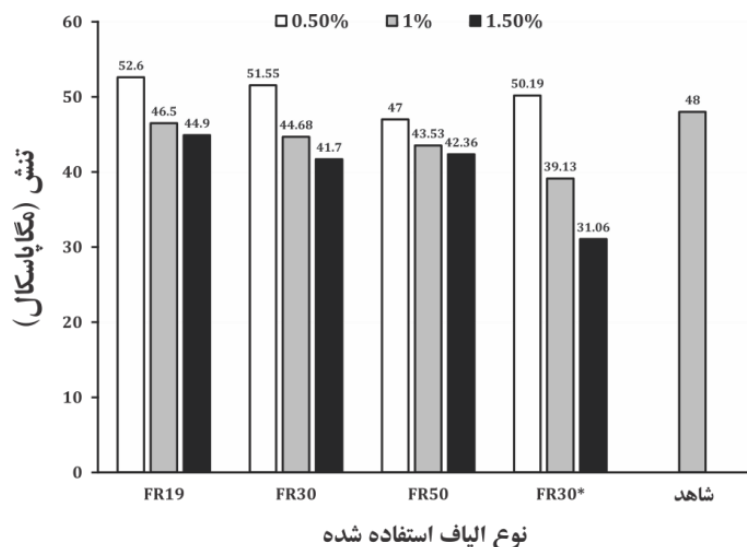


شکل ۴- آزمایش خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- مقاومت فشاری

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود اضافه کردن نیم درصد حجمی از الیاف مورد استفاده در این تحقیق موجب افزایش



شکل ۵- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با درصد‌های حجمی، طول‌ها و شکل هندسی متفاوت الیاف

### ۲-۳- مقاومت دونیم‌شدگی (کشش برزیلی)

تعداد بیشتر الیاف در طول‌های کمتر دلیل اصلی آن می‌باشد زیرا در صورت استفاده از الیاف با طول کم‌تر سطح بیشتری از آنها در ناحیه دونیم‌شدگی قرار خواهد گرفت. با افزایش تعداد الیاف موجود در صفحه شکست مقاومت کششی دونیم‌شدگی افزایش می‌یابد و نتایج به دست آمده نیز موید همین مطلب می‌باشد زیرا با افزایش درصد حجمی الیاف مقاومت کششی برزیلی افزایش پیدا کرده است. با توجه به شکل ۶ نمونه‌های FR30 از نظر مقاومت کششی رفتار بهتری نسبت به نمونه‌های FR30\* از خود نشان داده‌اند زیرا الیاف ساده لغزندگی بیشتر و اصطکاک کمتری نسبت به الیاف شبکه‌ای دارد، این در حالی است که الیاف شبکه‌ای با باز شدن شبکه‌ها موجب توزیع یکپارچه و افزایش اصطکاک می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الیاف با طول ۱۹ میلی‌متر انتخاب مناسبی جهت برآورده کردن معیار مقاومت کششی می‌باشد [۱۷].

مقاومت دونیم‌شدگی بتن توسط رابطه (۱) قابل محاسبه است. شکل ۶ مقاومت کششی نمونه‌های مختلف بتن الیافی به دست آمده از رابطه (۱) را نشان می‌دهد.

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

که در آن:

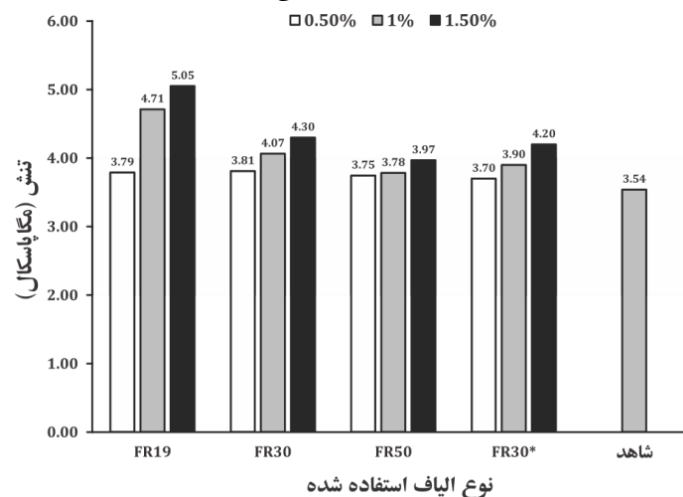
$T$ : مقاومت کششی دو نیم شدن (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)

$P$ : حداکثر بار اعمال شده (کیلوگرم)

$L$ : طول نمونه (سانتی‌متر)

$D$ : قطر نمونه (سانتی‌متر)

مشاهده می‌شود که بیشترین افزایش مقاومت کششی دونیم‌شدگی در نمونه‌های FR19 اتفاق افتاده است که پخش‌شدگی مناسب و



شکل ۶- مقاومت کششی نمونه‌های بتنی با درصد‌های حجمی، طول‌ها و شکل هندسی متفاوت الیاف

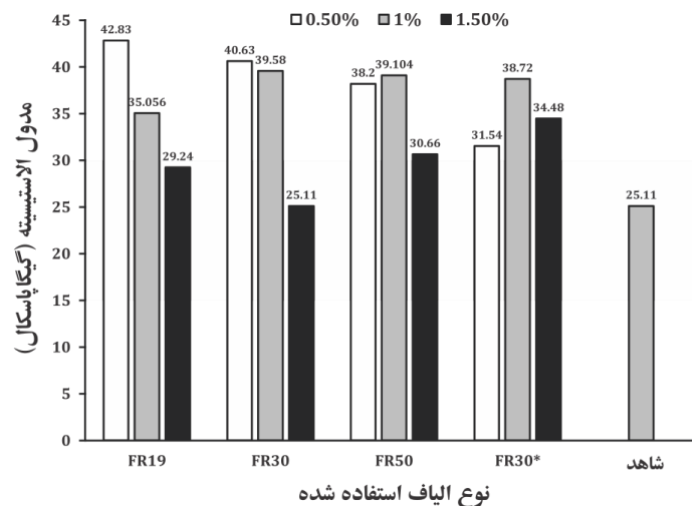
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود تفاوت بین مدول الاستیسیته نمونه شاهد با نمونه‌های بتن الیافی قابل توجه است و با افزایش درصد حجمی الیاف شبکه‌ای رفتار بتن در برابر نیروی فشاری تردتر می‌شود. با توجه به روند نشان داده شده در شکل ۷ افزایش حجم الیاف موجب کاهش مدول الاستیسیته و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های بتنی شده است. بیشترین میزان شکل‌پذیری برای نمونه FR30-15 گزارش شده ولی این موضوع برای نمونه FR30\* صدق نمی‌کند زیرا شکل این الیاف با الیاف شبکه‌ای متفاوت بوده و دارای سختی بیشتری می‌باشد. بنابراین مشخص می‌شود که استفاده از الیاف شبکه‌ای تأثیر مثبتی در امکان‌پذیری استفاده بیشتر از الیاف در ساخت بتن دارد.

### ۳-۳- مدول الاستیسیته

بر اساس استاندارد ASTM C469 شیب نمودار نیرو-جابجایی عمودی در ۴۰ درصد بار بیشینه مدول الاستیسیته نامیده می‌شود. هر چه شیب نمودار قبل از بار بیشینه بیشتر باشد نشانگر رفتار تردشکن و شکل‌پذیری کمتر بتن الیافی می‌باشد. مدول الاستیسیته از طریق رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$E = \frac{s_2 - s_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2)$$

که در آن  $\varepsilon_1 = 0.000050$  و  $\varepsilon_2$  مربوط به زمانی است که بار به ۴۰ درصد مقدار بیشینه خود برسد. علاوه بر این  $E$  مدول الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال و  $s_1$  و  $s_2$  به ترتیب تنش متناظر با بار معادل ۴۰ درصد بار بیشینه و تنش متناظر با کرنش طولی ۰/۰۰۰۰۵ است.



شکل ۷- مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی با درصد‌های حجمی، طول‌ها و شکل هندسی متفاوت الیاف

در شکل ۸ مدول گسیختگی نمونه بتن شاهد و نمونه‌های بتن الیافی

که بر اساس رابطه (۳) محاسبه شده‌اند نشان داده شده است.

همانطور که در این شکل دیده می‌شود مقاومت خمشی نمونه‌ها با افزایش طول الیاف بیشتر می‌شود که دلیل آن گیرداری بهتر الیاف به دلیل افزایش نسبت طول به ضخامت آنها می‌باشد. این پدیده در

تحقیقات پیشین نیز گزارش گردیده است [۱۷]. همچنین با مقایسه FR30\* و FR30-10 مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی

الیاف ساده مقاومت خمشی بهتری داشته که دلیل آن را می‌توان

کم بودن ضخامت تارهای الیاف شبکه‌ای دانست در صورتی که الیاف ساده ضخامت بیشتری دارد. نمونه FR50-05 با افزایش

۵۷ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد بیشترین تأثیر را

در خصوص رفتار خمشی از خود نشان داده است.

### ۳-۴- مقاومت خمشی

#### ۳-۴-۱- تیر بدون شیار

با توجه به ماهیت آزمایش سه نقطه‌ای خمش و بر اساس تئوری مقدماتی خمش، مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی نمونه‌ها از طریق رابطه (۳) قابل محاسبه است.

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

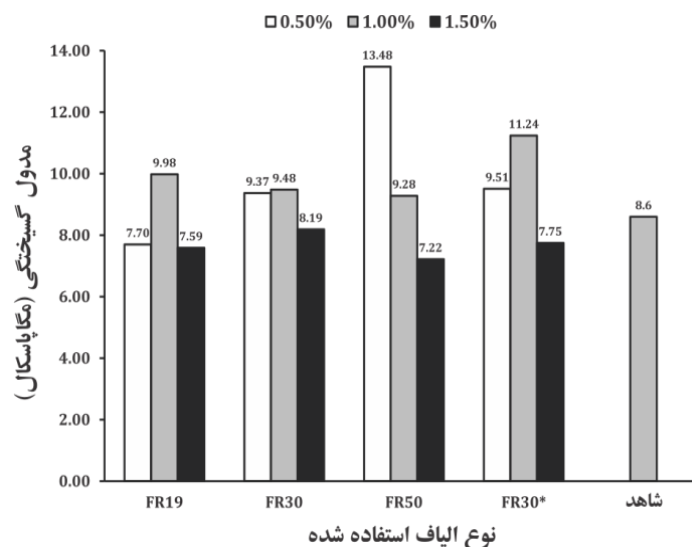
که در این رابطه:

$\sigma$ : تنش کششی ناشی از خمش (مگاپاسکال)

$P$ : بار متمرکز اعمال شده به نمونه در وسط دهانه تیر (نیوتن)

$L$ : فاصله بین تکیه‌گاه‌های ساده (میلی‌متر)

$b$  و  $d$ : به ترتیب عرض و ارتفاع نمونه (میلی‌متر)

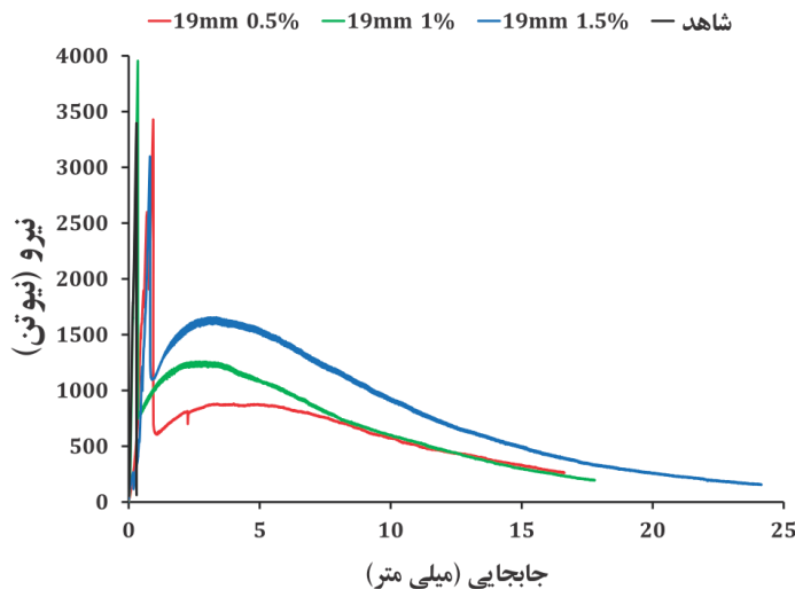


شکل ۸- مدول گسیختگی نمونه‌های بتنی با درصد‌های حجمی، طول‌ها و شکل هندسی متفاوت الیاف

### ۳-۴-۲- تیر شیاردار

نمودار و سایر نمودارهای مشابه نتایج زیر در خصوص نیروی بیشینه خمشی، انرژی شکست، طول مشخصه و ضریب شکنندگی به دست آمده و مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است.

شکل ۹ یک نمونه نمودار نیرو - تغییر مکان مستخرج از نتایج آزمایش تیر شیاردار  $10 \times 10 \times 50$  را نشان داده است. بر اساس پارامترهای مختلف قابل اندازه گیری و محاسبه از طریق این

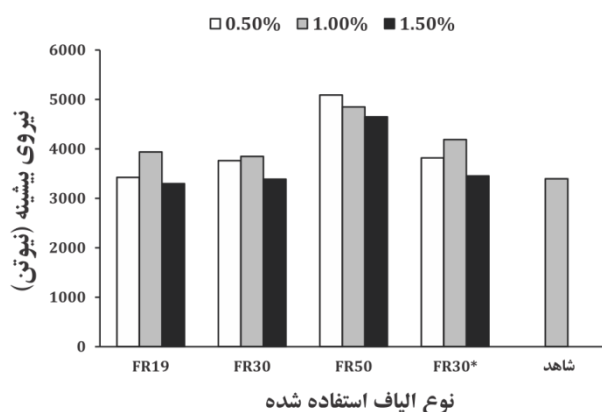


شکل ۹- نمودار نیرو - جابجایی نمونه شاهد و نمونه‌های بتنی ساخته شده با الیاف ۱۹ میلی‌متر در درصد‌های حجمی متفاوت

### ۳-۴-۲-۱- نیروی بیشینه خمشی

مقاومت خمشی مربوط به نمونه FR19-1.5 بوده که کاهش ۳ درصدی نسبت به نمونه شاهد داشته است.

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش طول الیاف مقدار بیشینه بار خمشی افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان از دیدار سطح ناحیه کششی و آرایش بهتر الیاف دانست. همچنین دیده می‌شود که در نمونه‌های حاوی الیاف با طول ۵۰ میلی‌متر، افزایش درصد حجمی الیاف موجب کاهش مقاومت خمشی شده که دلیل آن از دست رفتن آرایش مناسب الیاف در ساختار بتن می‌باشد. با مقایسه نمونه FR30 و FR30\* مشاهده می‌شود که الیاف ساده مقاومت خمشی بیشتری نسبت به الیاف شبکه‌ای تولید کرده که مهمترین دلیل آن کم شدن ضخامت الیاف شبکه‌ای در مقایسه با الیاف ساده می‌باشد. لازم به ذکر است که نتایج مربوط به تیر شیاردار همسو با نتایج مربوط به نمونه‌های مستطیلی با ابعاد  $7 \times 7 \times 28$  سانتی‌متر می‌باشد. در شکل ۱۰ بیشترین افزایش (۴۹/۸۸ درصد) در مقاومت خمشی مربوط به نمونه FR50-05 بوده و بعد از آن نمونه FR50-01 افزایش ۴۲/۸ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد را داشته است. از سوی دیگر کمترین مقدار



شکل ۱۰- نیروی بیشینه خمشی نمونه‌های بتنی شیاردار با درصد‌های حجمی، طول‌ها و شکل هندسی متفاوت الیاف

### ۳-۴-۲-۲- انرژی شکست

انرژی شکست مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی عمودی می‌باشد. پارامتر انرژی شکست مهمترین خصوصیت مکانیک شکست



که نمونه FR30 انرژی شکست بسیار بیشتری نسبت به نمونه FR30\* دارد و دلیل آن را می توان رشته ای و تار عنکبوتی شدن الیاف شبکه ای پس از اضافه کردن آن در مخلوط بیان کرد. با توجه به سرعت پایین بارگذاری تک تک رشته های الیاف تحت بارگذاری عمل کرده و باعث دوختن لبه های ترک شده است ولی در الیاف ساده تعداد الیافی که در برابر ترک مقاومت می کنند بسیار کم تر از الیاف شبکه ای است و این نکته - ای بسیار حائز اهمیت برای کاهش انرژی شکست این نوع الیاف می باشد.

### ۳-۴-۲-۳- طول مشخصه

پارامتر طول مشخصه به عنوان یک مشخصه مهم در تعیین تردی و شکل پذیری نمونه ها مطرح می باشد. رابطه (۵) شکل پذیری نمونه های بتنی را بیان می کند [۱۸].

$$L_{ch} = \frac{EG_f}{f_{st}^2} \quad (5)$$

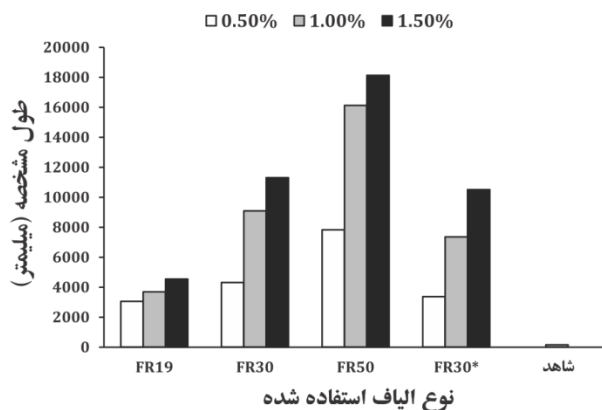
که در این رابطه:

$L_{ch}$ : طول مشخصه (میلی متر)

$G_f$ : انرژی شکست (نیوتن بر متر)

$f_{st}$ : مقاومت دو نیم شدگی برزیلی (مگاپاسکال)

$E$ : مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)



شکل ۱۲- طول مشخصه نمونه های بتنی شیاردار با درصد های حجمی، طول ها و شکل هندسی متفاوت الیاف

شکل ۱۲ طول مشخصه نمونه های بتنی شیاردار را نشان داده است. همانطور که روند صعودی شکل ۱۲ نشان می دهد با افزایش حجم و طول الیاف شکل پذیری بیشتر می شود، بیشترین شکل پذیری را

می باشد. میزان دوام نمونه تحت بارگذاری کاملا وابسته به انرژی شکست می باشد. همچنین می دانیم که افزایش انرژی شکست نشان از مقاومت نمونه در برابر پخش ترک می باشد. انرژی شکست از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$G_f = \frac{w_0 + mg \frac{s}{u} \delta_s}{B(w-a)} \quad (4)$$

که در آن:

$w_0$ : مساحت زیر نمودار نیرو - جابجایی (نیوتن بر متر)

$mg$ : وزن بین تکیه گاه تیر شیاردار (نیوتن)

$s$ : فاصله بین دو تکیه گاه تیر شیاردار (متر)

$u$ : طول تیر (متر)

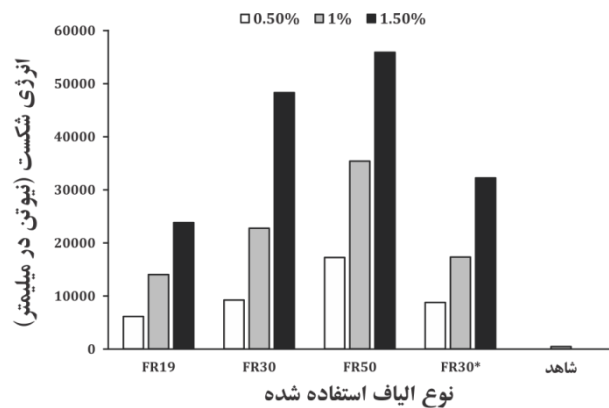
$\delta_s$ : تغییر شکل تیر (میلی متر)

$B$ : عرض تیر (متر)

$w$ : ارتفاع تیر (متر)

$a$ : ارتفاع شیار (متر)

همانطور که در شکل ۱۱ دیده می شود با افزایش حجم الیاف انرژی شکست نیز افزایش یافته است و دلیل آن همانطور که در بخش های قبل ذکر شد افزایش تعداد الیاف مقاومت کننده در برابر نیرو می باشد.



شکل ۱۱- انرژی شکست نمونه های بتنی شیاردار با درصد های حجمی، طول ها و شکل هندسی متفاوت الیاف

مهمترین نکته شکل ۱۱ افزایش انرژی شکست با افزایش طول الیاف می باشد که دلیل آن را می توان افزایش زمان کارکرد یک الیاف در کشش و طول گیرایی بیشتر دانست. دیده می شود

شکندگی آن کاهش پیدا می کند، بنابراین نمونه شکل پذیرتر می - شود و همین طور بالعکس با کاهش طول الیاف شکندگی بیشتر می شود. در این نمودار نمونه FR19-0.5 شکنده ترین نمونه می - باشد، همچنین این نمونه مطابق نتایج قبل دارای بیشترین مدول الاستیسیته و بالاترین مقاومت فشاری می باشد و این خود دلیل دیگری بر شکنده بودن آن می باشد. شکندگی نمونه FR19-0.5 درصد بیشتر از نمونه FR50-0.5 می باشد.

با مقایسه نمونه FR30 و FR30\* در می یابیم که نمونه های حاوی الیاف ساده درجه شکندگی و تردی بیشتری نسبت به الیاف شبکه ای دارند و نمونه FR30\*-0.5 یک و نیم برابر تردتر از نمونه FR30-0.5 می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر درصد حجمی، طول ها و دو نوع مختلف شکل هندسی الیاف پلی الفین (ساده و شبکه ای) بر ویژگی های مکانیکی و پارامترهای شکست بتن پر مقاومت مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از آزمایش های متعارف مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته برای بررسی خواص مکانیکی بتن و نیز آزمایش خمش سه نقطه ای روی نمونه های منشوری (۱۰×۱۰×۵ سانتی متر) و اندازه گیری نمودار نیرو - جابجایی برای بررسی خواص شکست بتن نتایج زیر قابل ارائه می باشد.

۱- اضافه کردن نیم درصد حجمی الیاف به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری می شود. علاوه بر این اضافه کردن این مقدار الیاف موجب افزایش مدول الاستیسیته نیز می شود که ارتباط مستقیم با مقاومت فشاری دارد. اضافه کردن الیاف با درصدهای بیشتر (۱ و ۱/۵ درصد حجمی بتن) اگر چه همچنان موجب افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نسبت به نمونه شاهد می شود ولی نرخ افزایش مقاومت فشاری و مدول بر حسب درصد الیاف را کاهش می دهد. همچنین با توجه به نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته الیاف شبکه ای عملکرد بهتری در مقایسه با الیاف ساده در آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته دارند.

۲- اضافه کردن الیاف موجب افزایش مقاومت کششی برزیلی می شود و با افزایش حجم الیاف؛ مقاومت کششی نیز افزایش می یابد. بیشترین مقاومت کششی در طول الیاف ۱۹ میلی متر رخ می دهد و الیاف شبکه - ای بیشتر از الیاف ساده موجب افزایش مقاومت کششی می شود.

نمونه FR50-1.5 و کم ترین شکل پذیری را نمونه FR19-0.5 دارد زیرا نمونه FR50-1.5 دارای بیشترین انرژی شکست و کم ترین مقاومت کششی برزیلی می باشد و نمونه FR19-0.5 دارای کم ترین انرژی شکست و بیشترین مقاومت کششی برزیلی می باشد. نمونه FR50-1.5 افزایش ۴ برابری در شکل پذیری نسبت به نمونه FR30-1.5 دارد که گویای تأثیر بسیار زیاد طول الیاف بر شکل پذیری می باشد. نکته حائز اهمیت در این شکل اختلاف بین شکل پذیری در نمونه های FR30 و FR30\* می باشد که دلیل آن را می توان بالا بودن انرژی شکست و بالا بودن مدول الاستیسیته نمونه های FR30 دانست که منجر به افزایش شکل پذیری شده است. شکل پذیری نمونه FR30-1.5 ۸ درصد بیشتر از نمونه FR30\*-1.5 می باشد.

#### ۳-۲-۴- ضریب شکندگی

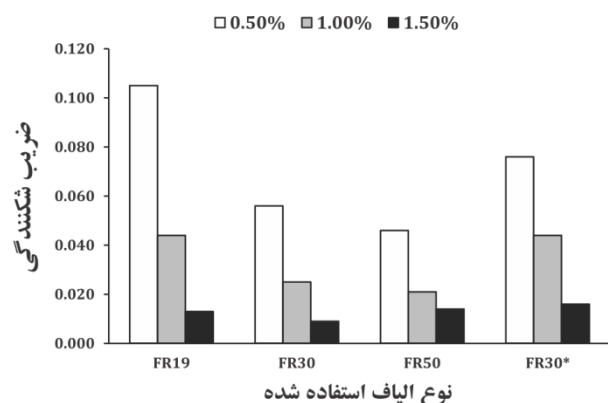
ضریب شکندگی مساحت زیر نمودار بار بیشینه خمشی تقسیم بر مساحت زیر نمودار کل نمونه را بررسی می کند و هدف آن بررسی تردی یا شکندگی نمونه ها می باشد. رابطه (۶) ضریب شکندگی را نشان می دهد [۱۹]

$$FI = \frac{G_f}{G} \quad (6)$$

FI: ضریب شکندگی

G<sub>f</sub>: انرژی شکست تا بیشینه نیروی خمشی (نیوتن بر متر)

G: انرژی شکست کل (نیوتن بر متر)



شکل ۱۳- ضریب شکندگی نمونه های بتنی شیاردار با درصدهای حجمی، طول ها و شکل هندسی متفاوت الیاف

شکل ۱۳ ضریب شکندگی نمونه های بتنی را نشان داده است. از روند شکل ۱۳ مشاهده می شود که با افزایش طول نمونه ضریب

Magazine of Concrete Research, 64(5): 457-70.

[8] Singh, S., Shukla, A., and Brown, R. (2004). Pullout behaviour of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cement and Concrete Research*, 34(10): 1919-25.

[9] Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., and Narayan Swamy, R. (2012). Implications of test methodology on post-cracking and fracture behavior of steel fiber reinforced concrete, *Composite Part B*, 46: 31-38.

[10] Cifuentes, H., Garcia, F., Maeso, O. and Medina, F. (2013). Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behavior of low, normal and high strength FRC, *Construction and Building Materials*, 45: 130-137.

[11] Emin Arsalan, M. (2016). Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement, *Construction and Building Materials*, 114: 383-391.

[12] Razvi, S. R., and Saatcioglu, M. (1994). Strength and deformability of confined high strength concrete columns. *ACI Structural Journal*, 678-687.

[13] BS 1881-116. (1983). Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes.

[14] ASTM C469. (2014). Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression.

[15] ASTM C496. (2017). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.

[16] RILEM TC-50 FMC. (1994). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams.

[17] Roohollah, B., Abdol-Hossein, S. and Masoud, L. (2011). Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete, *Textile Research Journal*, 82(1): 88-96.

[18] Hillerborg, A. (1985). Theoretical basis of method to determine fracture energy  $G_f$  of concrete. *Materials and Structures*, 18: 291-6.

[19] Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Lambros, J., El-Khatib, A., Singhvi, P., and Doll, B. (2016). Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters. *Construction and Building Materials*, 115: 390-401.

۳- اضافه کردن الیاف موجب افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی گردیده است. برای الیاف با طول ۵۰ میلی‌متر بیشترین مقاومت خمشی در درصد حجمی ۰/۵ و برای الیاف با طول ۳۰ میلی‌متر بیشترین مقاومت خمشی در درصد حجمی ۱ به دست آمده است. برای الیاف ۳۰ میلی‌متر ساده بیشترین مقاومت خمشی در درصد حجمی ۱ حاصل شده است.

۴- افزایش طول الیاف موجب افزایش انرژی شکست، جابجایی عمودی، نیروی بیشینه، شکل‌پذیری و مقاومت خمشی شده و کاهش طول الیاف موجب افزایش شکنندگی می‌شود.

۵- سختی شکست ارتباط مستقیم با نیروی بیشینه خمشی دارد. در الیاف ۱۹ میلی‌متری و ۳۰ میلی‌متری بیشترین سختی در حجم ۱ درصد و در الیاف ۵۰ میلی‌متری در حجم ۰/۵ درصد اتفاق می‌افتد. همچنین در الیاف ۳۰ میلی‌متری ساده بیشترین سختی نمونه‌های بتنی الیافی در درصد حجمی معادل ۱ درصد به دست می‌آید.

#### ۵- مراجع

[1]. Arisoy, B., and Wu, H. C. (2008). Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA. *Construction and Building Materials*, 22: 635-45.

[2] Mehta, P.K., and Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 3rd ed. McGraw-Hill, New York.

[3] Aly, T., Sanjayan, J. G., and Collins, F. (2008). Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. *Materials and Structures*, 41(10): 1741-53.

[4] Wuan, J. Y., Banthia, N. and Zhang, M. H. (2012). Effect of shrinkage reducing admixture on flexural behaviours of fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 34(4): 443-50.

[5] Silva, F. A., Mobasher, B., Soranakom, C., and Filho, R. D. T. (2011). Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviours of sisal fiber cement based composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(8): 814-23.

[6] Bilodeau, A., Kodur, V. K. R., and Hoff, G. C. (2004). Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. *Cement and Concrete Composites*, 26(2): 163-74.

[7] Cifuentes, H., Leiva, C., Medina, F., and Fernandez-Pereira, C. (2012). Effects of fibres and rice husk ash on properties of heated HSC.

## Investigation on the Effect of Volume, Length and Shape of Polyolefin Fibers on Mechanical Characteristics and Fracture Properties of High-Strength Concrete

Pouria Hajikarimi \*

Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Sina Fallah Hosseini

M.Sc of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

### Abstract

Regarding to advancement of civil engineering in recent decades, using high-strength concrete is so prevalent for constructing special projects. One of the main shortcomings of concrete is its tensile strength which causes cracking and brittle behavior. Today, to enhance concrete's performance and overcome this lack, a wide range of fibers including polymeric, steel, mineral and natural are used as well as classical solution for improving tensile strength of concrete: using steel bars. In this study, the effect of volume, length and shape of polyolefin fibers on mechanical characteristics and fracture properties of high-strength concrete is investigated. Three different fiber's length of 19, 30 and 50 mm are used at three different volume percentages of 0.5, 1 and 1.5 with two simple and reticular shapes. Conventional experimental tests of compressive strength, tensile strength, bending strength and modulus of elasticity are implemented to determine mechanical characteristics as well as U-notched prismatic beam to evaluate fracture properties. The results have shown that increasing the length of fiber enhances mechanical and fracture properties of concrete. Also, increasing the fibers' volume causes an increasing the resistance time of concrete specimens against bending load. The simple-shape fiber shows higher bending strength in comparison with reticular fibers but fracture energy of reticular fibers is so greater than simple-shape fibers.

**Keywords:** high-strength concrete, polyolefin fiber, fiber length, fracture, notched beam.

---

\* Corresponding Author: pouria.hajikarimi@gmail.com