

## تأثیر مساحت سطح مقطع الیاف ماکرو بر میزان جذب انرژی در بتن

روح اله رستمی نجف آبادی \*

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان

محمد ذره بینی

دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان

خالد سنگین آبادی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه کردستان

داود مستوفی نژاد

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

حسین فشندی

استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

از جمله بارزترین ویژگی‌های بتن الیافی، میزان جذب انرژی است. در تحقیق حاضر الیاف ماکرو با مساحت سطح مقطع متفاوت، با تغییر در کشش و میزان تغذیه در مرحله ذوب ریزی تولید گردید. با توجه به متفاوت بودن سطح مخصوص الیاف تولیدی و تغییر در میزان چسبندگی به ماتریس بتنی، رفتار الیاف بر میزان جذب انرژی در بتن‌های تولیدی مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر الیاف بر رفتار بتن تحت بار، سطح زیر نمودار بار- جابه‌جایی، استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که با کاهش مساحت سطح مقطع الیاف، میزان جذب انرژی به شدت افزایش می‌یابد. مقدار افزایش در کم‌ترین حالت بیش از ۶ برابر میزان جذب انرژی نمونه‌ی شاهد می‌باشد. این در حالی است که در بتن حاوی الیاف با کم‌ترین مساحت سطح مقطع، بیش از ۱۴ برابر نسبت به نمونه‌ی شاهد، افزایش در جذب انرژی مشاهده می‌شود. علت این امر افزایش سطح تماس الیاف با دیگر مصالح بتن به دلیل بیش‌تر شدن تعداد الیاف می‌باشد. این افزایش به معنای شکل‌پذیری بیش‌تر بتن در زمان‌های بعد از ترک اولیه و قبل از شکست نهایی است. به عبارت دیگر نمونه‌ها قبل از فروپاشی، میزان بار بیش‌تری را در گذر زمان تحمل نموده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی، الیاف ماکرو، مساحت سطح مقطع، میزان جذب انرژی.

\* نویسنده مسئول: rohallah.rostami@tx.iut.ac.ir

## ۱- مقدمه

در ساخت بتن‌های خاص از قبیل بتن با مقاومت بالا، بتن سبک، بتن با کارایی بالا و ترکیبات مهندسی شده سیمانی<sup>۲</sup> نیز از الیاف استفاده شده است [۱۲-۱۰].

از جمله بارزترین خصوصیات بتن الیافی، میزان جذب انرژی توسط این نوع بتن است. با افزایش طول الیاف، استفاده از درصد حجمی بیش‌تر الیاف و یا به کارگیری الیاف با میزان چسبندگی بیش‌تر به ماتریس سیمانی، میزان جذب انرژی با افزایش روبرو شده است [۱ و ۱۳]. در تحقیقات صورت گرفته بهبود دیگر خصوصیات بتن از جمله مقاومت در برابر ایجاد و انتشار ترک، مقاومت در برابر ضربه، رفتار در حین شکست، مقاومت در برابر چرخه یخ و ذوب و دوام، به طور مستقیم یا غیرمستقیم به میزان جذب انرژی وابسته بوده است [۱۳].

تحقیقات نشان می‌دهد تعیین میزان جذب انرژی به ویژه در سازه‌های در معرض بارهای دینامیکی از جمله فشار، کشش و ضربه، امری ضروری است. با انجام این کار امکان مقایسه دقیق مابین عملکرد بتن معمولی و بتن الیافی به خوبی فراهم می‌گردد.

## ۲- بیان موضوع و اهمیت تحقیق

چسبندگی الیاف به ماتریس بتنی از عوامل بسیار مهم در تعیین خصوصیات مکانیکی بتن تولیدی می‌باشد. به همین منظور تولید کنندگان الیاف همواره جهت اصلاح سطح الیاف در راستای ایجاد چسبندگی بیش‌تر الیاف با ماتریس بتنی تلاش نموده‌اند. از جمله روش‌های افزایش استحکام پیوند که در این تحقیق مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است، بالا بردن میزان تماس الیاف با ماتریس به وسیله افزایش سطح مخصوص الیاف می‌باشد. کاهش مساحت سطح مقطع عرضی الیاف در درصد حجمی ثابت، موجب افزایش تعداد الیاف می‌شود. در نتیجه تماس الیاف با بتن بیش‌تر شده و در نهایت میزان مقاومت بتن در برابر جذب انرژی افزایش می‌یابد.

در تحقیق حاضر الیاف ماکرو با مساحت سطح مقطع متفاوت با تغییر در کشش و میزان تغذیه در مرحله ذوب رسی تولید گردید. با توجه به متفاوت بودن سطح مخصوص الیاف تولیدی و تغییر در میزان چسبندگی الیاف به ماتریس بتنی، رفتار الیاف بر میزان جذب

استفاده از بتن به عنوان پرکاربردترین مصالح صنعت ساخت و ساز بسیار رایج شده است. این ماده ساختمانی با وجود مزایای بسیار، دارای معایبی نیز می‌باشد. از جمله مهم‌ترین معایب، می‌توان به مقاومت کششی پایین بتن اشاره نمود، که موجب ترک خوردگی و گسیختگی زود هنگام سازه بتنی می‌گردد. به منظور برطرف نمودن این مشکل به طور مرسوم از میلگردهای فولادی در داخل بتن استفاده می‌شود.

بتن مسلح شده با الیاف، یا بتن الیافی<sup>۱</sup> به دلیل خصوصیات الیاف در تسلیح کامپوزیت‌ها و از جمله بتن، مورد توجه گسترده مهندسين عمران واقع شده است. امروزه استفاده از الیاف پلیمری با هدف جلوگیری از انتشار ترک، افزایش مقاومت کششی و بالا بردن میزان جذب انرژی در بتن بسیار متداول شده است.

در پژوهش‌های تاریخی مشخص شده که الیافی از قبیل موی بز، موی گوساله و موی دم اسب در ملات‌های گچی و ساروجی استفاده شده است. پیشینان از قطعات کوتاه ساقه‌ی گیاهان خشک به همراه آب و خاک، جهت ساخت دیوار استفاده می‌نموده‌اند. استفاده از این اقلام با هدف تقویت آجرهای خشتی و ملات و جلوگیری از ترک خوردگی به واسطه‌ی خارج شدن رطوبت صورت می‌گرفته است [۱]. ملات کاه گل نمونه‌ی بارز از این نوع مسلح سازی است، که در آن کاه عامل مسلح کننده می‌باشد.

بتن الیافی، نوع مدرن این فناوری تاریخی است. الیاف خواه طبیعی و یا بشر ساخته، جانشین کاه و سیمان نیز جانشین گل شده است. در سال ۱۹۶۵ میلادی برای اولین بار، نتایج به کارگیری الیاف، به عنوان عامل مسلح کننده‌ی بتن، توسط گروهی از مهندسين در ساختمان ضد انفجار ارتش آمریکا ارایه گردید [۲].

تا کنون، تحقیقات وسیعی در راستای شناخت فناوری‌های نوین بتن انجام پذیرفته است. تحقیقات در راستای استفاده از الیاف به عنوان اجزاء مسلح کننده‌ی بتن، بخش قابل توجهی از این پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است [۸-۳]. الیاف در طیف متنوعی از محصولات سیمانی از جمله بتن، شاتکریت و ملات به کار گرفته شده‌اند. کاربرد الیاف در پانل‌های گچی و یا آسفالت [۹] نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱ - Fiber reinforced concrete (FRC)

۲ - Engineered cementitious composite (ECC)

الیاف در گذر زمان، تفاوت در کیفیت و خواص بتن تقویت شده امری اجتناب ناپذیر خواهد بود. لذا خواص متغیر این الیاف، امکان پیش بینی کارآیی بتن را با مشکل رو به رو خواهد نمود.

در گروه الیاف مصنوعی، پلی وینیل الکل، پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی استر، نایلون، اکریلیک و کربن در زمره‌ی رایج‌ترین الیاف مصنوعی جهت به کارگیری در سازه‌های بتن الیافی می‌باشند [۸-۳]. در این میان پلی پروپیلن از جمله پرکاربردترین الیاف مصرفی جهت تسلیح بتن می‌باشد. پلی پروپیلن یک پلیمر نرم بوده و در کاربردهای متنوعی از جمله: تولید الیاف، بسته بندی، صنایع اتومبیل سازی، تجهیزات پزشکی و آزمایشگاهی، ساخت لوله و قطعات مهندسی به کار می‌رود. از زمان ارائه‌ی این لیف به صنایع نساجی در سال ۱۹۵۰ میلادی، تولیدات مختلفی از جنس پلی پروپیلن با فراهم شدن بازارهای متنوع، رشد گسترده‌ای داشته است [۱۴].

خصوصیات الیاف پلی پروپیلن به شرح زیر است:

- چگالی  $(\frac{g}{cm^3})$ : ۰/۹۱
- استحکام  $(\frac{N}{tex})$ : ۰/۶۵
- ازدیاد طول تا حد پارگی (%): ۱۷
- مدول اولیه  $(\frac{N}{tex})$ : ۷/۱
- مقاومت در برابر تخریب ناشی از مواد شیمیایی، کپک‌ها، حشرات و تغییرات آب و هوا
- جذب رطوبت در حد صفر [۲۲].

مواد افزودنی متفاوتی در حین تولید پلی پروپیلن به آن اضافه می‌گردد که هر یک نقش مکملی را در تعیین خصوصیات نهایی بر عهده دارند. این مواد افزودنی برحسب نیاز و جهت ایجاد خصوصیات ویژه‌ی فیزیکی-مکانیکی به پلی پروپیلن اضافه می‌شوند. افزودنی‌های مورد استفاده عبارتند از: ضد اکسندها، غیر فعال کننده‌های فلزی، جاذب‌های نور فرابنفش، مواد لغزان کننده، مواد ضد الکتریسیته ساکن، پرکننده‌ها، سفید کننده‌ها، رنگدانه‌ها، روان کننده‌ها، دوده و مواد ضد آتش [۲۳].

### ۳-۲- الیاف از نظر ابعاد و شکل

الیاف از نظر ابعاد در یک تقسیم بندی به دو صورت الیاف میکرو و ماکرو در بتن به کار گرفته شده‌اند.

انرژی در بتن‌های تولیدی مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا نمودار بار-جابجایی برای همه نمونه‌ها استخراج، سطح زیر منحنی محاسبه و نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

### ۳- الیاف مسلح کننده‌ی بتن

الیاف محصولاتی با ویژگی‌هایی هم چون انعطاف پذیری، ظرافت و نسبت بالای طول به قطر می‌باشند. سطح ویژه و یا نسبت سطح به حجم زیاد، سبب در نظر گرفتن این تولیدات پایه‌ای صنایع نساجی به عنوان مواد دارای استحکام بسیار زیاد شده است. الیاف عموماً از مولکول‌های بزرگ و زنجیرمانندی با نام ماکرو مولکول یا پلیمر تشکیل شده‌اند، الیاف ساختار آلی یا غیر آلی دارند. این مولکول‌ها قادر هستند تا کنار هم قرار گرفته و تشکیل نواحی کریستالی بدهند. آرایش یافتگی، عامل مهمی در تعیین میزان مفید بودن الیاف در کاربردهای ویژه و خاص و از جمله استفاده در کامپوزیت‌ها می‌باشد [۱۴ و ۱۵].

### ۳-۱- الیاف از نظر جنس

الیاف از نظر جنس به طور کلی به دو دسته‌ی عمده الیاف طبیعی و الیاف بشر ساخته تقسیم بندی می‌شوند. الیاف طبیعی در طبیعت به صورت لیف یافت می‌شوند، حال آن که الیاف بشر ساخته در طبیعت به صورت لیف وجود ندارند.

الیاف طبیعی می‌توانند پایه گیاهی، حیوانی و یا معدنی داشته باشند. الیاف بشر ساخته خود به دو گروه الیاف مصنوعی و بازیافته تقسیم می‌شوند. الیاف بازیافته از منابع طبیعی گرفته شده‌اند، لیکن در ساختار آن‌ها برخی اصلاحات و یا تغییرات اعمال شده است [۱۶]. تنوع الیاف طبیعی به کار گرفته شده در بتن، بسته به منطقه‌ی جغرافیایی مورد استفاده، بسیار زیاد است. از جمله الیاف طبیعی مورد استفاده جهت تسلیح بتن می‌توان به الیاف کنف، جوت، بازالت، آزبست، سیسال، نارگیل، خرما، نیشکر، موز، باگاس، بامبو، آکوآرا، علف فیل، خیزران و تراشه‌های چوبی اشاره نمود [۲۱-۱۷]. در این میان، استفاده از الیاف فولادی و شیشه‌ای سهم گسترده‌ای از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. لازم به ذکر است به علت متغیر بودن خواص الیاف طبیعی و زیست تخریب پذیر بودن<sup>۱</sup> این

<sup>۱</sup> - Bio-degradable

الیاف ماکرو دارای استحکام و مدول بالاتری نسبت به الیاف معمولی و یا الیاف میکرو مشابه می‌باشند. استفاده از الیاف ماکرو به صورت مخلوط با یک یا چند نوع الیاف میکرو یا ماکروی دیگر از دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی آغاز گردید [۱]. رفتار کلی بتن با استفاده از ترکیبی از الیاف میکرو و ماکرو، بسیار بهبود می‌یابد [۲۷-۳۰].

الیاف پلی پروپیلن در شکل‌های مختلف مانند الیاف بریده شده، مونوفیلامنت، مولتی فیلامنت، الیاف فیبریله شده و الیاف تیپ در بتن به کار می‌روند. شکل ۳، حالت‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در بتن را نشان داده است.



شکل ۳- الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در بتن با هندسه‌های مختلف

**۳-۳- الیاف از نظر هندسه (سطح مقطع عرضی و طولی)**  
به واسطه‌ی ذات الیاف طبیعی، سطح مقطع طولی و عرضی این الیاف دارای هندسه ثابت نمی‌باشد و بر حسب نوع لیف و منبع تهیه‌ی آن متفاوت است. لیکن الیاف مصنوعی از هندسه‌ی دلخواه برخوردار می‌باشند. این الیاف معمولاً استوانه‌ای و سطح مقطع عرضی آن‌ها عموماً دایره‌ای شکل است. البته با توجه به روش تولید الیاف مصنوعی می‌توان سطح مقطع آن‌ها را تغییر داد. الیاف ماکرو پلیمری با شکل سطح مقطع طولی متفاوت و به صورت‌های زیر در بتن به کار گرفته شده است:

۱. صاف
۲. فرو موج دار
۳. دارای قلاب در انتها
۴. ضخیم در انتها

بر حسب استاندارد ASTM C7508 [۲۴] الیاف با قطر کوچک-تر از ۰/۳ میلی متر و یا ظرافت پایین تر از ۵۸۰ دنیر<sup>۱</sup> میکرو محسوب می‌شوند. طول متداول الیاف میکرو مصرفی در بتن معمولاً برابر ۵، ۶، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۱۸ میلی متر است. در موارد خاص این الیاف در طول‌های ۲۰، ۲۴، ۲۸ و ۳۰ میلی متر نیز استفاده شده است. در شکل ۱ الیاف میکرو نشان داده شده است.



شکل ۱- الیاف میکرو

بر حسب تعریف ACI 544-1R [۲۵] طول الیاف ماکرو کوچک‌تر از ۷۶ میلی متر و قطر آن‌ها کوچک‌تر از یک میلی متر می‌باشد. معمولاً طول الیاف ماکرو در محدوده‌ی ۶۰ - ۳۰ میلی متر است. الیاف ماکرو تجاری در طول‌های ۲۵، ۳۰، ۳۲، ۳۸، ۴۰، ۴۸، ۵۰، ۵۴ و ۶۰ میلی متر در دسترس می‌باشند. در شکل ۲ الیاف ماکرو نشان داده شده است.



شکل ۲- الیاف ماکرو

از نازکی لیف میکرو می‌توان دریافت که تأثیر آن بر روی خصوصیات بتن، در مقیاس ریز ساختار و کنترل ریز ترک‌ها، می‌باشد. بیش‌ترین کاربرد الیاف کوتاه و نازک در کنترل ترک‌های ناشی از جمع شدگی پلاستیک می‌باشد. الیاف ماکرو جهت موارد مصرف خاص، تولید و مهندسی می‌شوند. این الیاف در مواردی که استحکام، سختی، مقاومت حرارتی و یا مقاومت شیمیایی بالایی مورد نظر باشد، استفاده می‌شوند [۲۶].

<sup>۱</sup> دنیر: وزن ۹۰۰۰ متر از لیف بر حسب گرم

جدول ۱- خصوصیات الیاف تولیدی

طول (mm)	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	دمای ذوب (°C)
۴۸	۲۰۰-۳۰۰	۳-۵	۰/۹۲	۱۴۰-۱۷۰

با تغییر در میزان تغذیه و نسبت کشش، الیاف با قطر و مساحت سطح مقطع متفاوت تولید گردید و جهت اختصار به صورت MF1<sup>۱</sup> تا MF6 نام گذاری گردید. بتن تولیدی توسط این الیاف به صورت اختصاری MFRC1<sup>۲</sup> تا MFRC6 نامیده شد. مساحت سطح مقطع الیاف در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۵ نمونه‌ای از الیاف تولید شده را نشان داده است.

جدول ۲- مساحت سطح مقطع الیاف تولیدی بر حسب mm<sup>2</sup>

MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6
۱	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۲	۰/۱



شکل ۵- نمونه‌ای از الیاف تولیدی

میزان مصرف الیاف ماکرو علاوه بر این که مشابه حالت استفاده از الیاف میکرو به صورت درصد حجمی بیان شده، بر حسب شاخص کیلو گرم بر متر مکعب نیز ذکر گردیده است. این شاخص به طور کلی در محدوده ۲۰-۰/۵ کیلوگرم بر متر مکعب بیان شده است. در این تحقیق از الیاف با طول ۴۸ میلی متر و به میزان ۵ کیلوگرم بر متر مکعب، معادل ۰/۵۵ درصد حجم الیاف به حجم بتن استفاده گردید.

۵. سینوسی

۶. دارای انتهای سینوسی

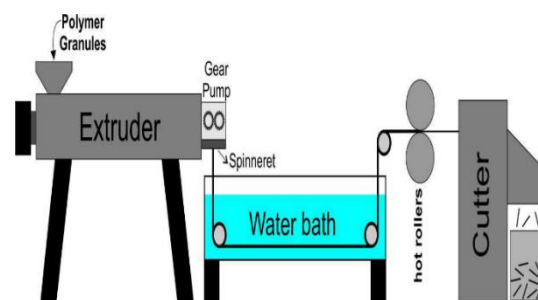
۷. تاب دار [۳۱].

هر نوع از این الیاف با سطح مقطع طولی متفاوت، می‌تواند دارای شکل سطحی: ۱- بدون آج و یا ۲- آج دار باشد. آج دار بودن، می‌تواند در یک طرف و یا دو طرف نمونه وجود داشته باشد. میزان شدت یا تراکم، شکل یا الگو و عمق آج‌ها نیز می‌تواند متفاوت باشد.

#### ۴- تجربیات و آزمایشات

##### ۴-۱- خصوصیات و میزان الیاف مصرفی

در این تحقیق الیاف پلی پروپیلن با انتخاب گرانول مناسب و به روش ذوب ریسی تولید گردید. ذوب ریسی متداول‌ترین روش تولید الیاف مصنوعی است. در گام نخست دانه‌های گرانولی از پلیمر جامد، در اکسترودر تحت دما و فشار به صورت مذاب درآمد. مذاب پلیمری با استفاده از پمپ‌های ریسنده‌گی، تحت نرخ و فشار ثابت، به رشته ساز تغذیه گردید. رشته‌های تک فیلامنتی خارج شده از روزنه- های رشته ساز، تحت تأثیر هوای سرد جامد شده و سپس به قسمت- های کشش دهنده، جهت تغییر ساختمان مولکولی و ایجاد خصوصیات مکانیکی دلخواه، هدایت شد. لازم است این فیلامنت‌ها کشیده شوند تا آرایش یافتگی مولکولی و حالت کریستالی شدن پیدا نمایند. این مرحله از جمله مراحل تعیین کننده‌ی خصوصیات مکانیکی الیاف به شمار می‌رود که با حساسیت فراوان صورت پذیرفت. در شکل ۴ دستگاه تولید الیاف نشان داده شده است.



شکل ۴- دستگاه تولید الیاف

پس از تولید الیاف، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف با استفاده از روش‌های استاندارد مورد اندازه گیری قرار گرفت. خصوصیات الیاف تولیدی در جدول ۱ نشان داده شده است.

<sup>2</sup> Macro fiber reinforced concrete

<sup>1</sup> Macro fiber

اضافه نمودن الیاف به بتن از جمله مهم ترین مراحل اختلاط می- باشد. این مرحله نقش به سزایی در حصول نتایج رضایت بخش از کاربرد بتن الیافی خواهد داشت. الیاف در صورت قرار گیری نامناسب در بتن رفتار مطلوب و مورد انتظار را نخواهند داشت. به همین دلیل روش های متفاوتی برای مخلوط کردن مصالح بتنی و الیاف، در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت بهترین روش به شرح زیر انتخاب گردید.

الیاف طی چهار مرحله به مصالح خشک شامل ریز دانه و درشت دانه اضافه شد و به مدت دو دقیقه اختلاط صورت گرفت. سپس سیمان اضافه شده و در انتها آب در طی دو مرحله اضافه گردید و به مدت سه دقیقه دیگر اختلاط ادامه یافت.

پس از اتمام اختلاط، از هر طرح دو نمونه ی منشوری به ابعاد  $100 \times 100 \times 350$  میلی متر، به منظور اندازه گیری مقاومت خمشی، محاسبه میزان جذب انرژی و شاخص های طاق ساخته شد.

#### ۳-۴- میزان جذب انرژی

توزیع گسترده الیاف در حجم بتن، امکان مهار نیروهای داخلی در راستاهای مختلف را فراهم می سازد. ایفای عملکرد سه بعدی الیاف در بتن، در مقایسه با عملکرد دو بعدی میلگردها و منسوجات مسلح کننده بتن از جمله ویژگی های بتن الیافی است. این ویژگی، عامل موثری در افزایش میزان جذب انرژی است.

از آن جا که الیاف در بتن الیافی بیش تر بر رفتار بعد از ترک تأثیر می گذارند. جهت بررسی تاثیر الیاف بر رفتار بتن تحت بار، سطح زیر نمودار بار- جابجایی، استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

میزان جذب انرژی بتن الیافی معمولاً با انجام آزمون طاق، اندازه گیری می گردد. روش های مختلفی برای اندازه گیری میزان طاق خمشی وجود دارد از جمله: روش خمش سه نقطه ای و روش خمش چهار نقطه ای [۳-۸]. روابطی که برای محاسبه ی تنش ناشی از خمش به کار می رود بر اساس خمش خالص می باشد، یعنی برش صفر است. در خمش سه نقطه ای تنها در زیر بار، وضعیت خمش خالص روی می دهد. این در حالی است که در خمش چهار نقطه ای یک سوم از طول دهانه یعنی بین دو بار، برش صفر و خمش خالص می باشد [۳۴ و ۳۵].

در تحقیق حاضر با به کار گیری الیاف با مشخصات فوق و با توجه به آب گریز بودن الیاف، کاهش قابل توجهی در میزان کارایی بتن مشاهده نشد، لذا از هیچ گونه ماده افزودنی از نوع روان ساز استفاده نگردید.

#### ۴-۲- مصالح مورد استفاده و طرح اختلاط

مصالح مصرفی ساخت بتن شامل سیمان، ماسه، شن و آب می باشد. در این تحقیق سیمان مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند تیپ یک، محصول کارخانه ی سیمان سپاهان، از نوع صادراتی و بدون سرباره، انتخاب گردید. هم چنین شن و ماسه از معادن اطراف شهر اصفهان تهیه گردید. دانه بندی شن منطبق با دانه بندی استاندارد ASTM-C33 [۳۲] می باشد. مشخصات ماسه نیز در آزمایشگاه و بر اساس همین استاندارد تعیین گردید.

مشخصات شن و ماسه مورد استفاده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳ - مشخصات شن و ماسه مصرفی

سنگ دانه	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	درصد رطوبت SSD (%)	قطر ماکزیمم (mm)	مدول نرمی	
				ریز دانه	درشت دانه
ریز دانه	۱۹۳۴	۰/۷۰	۴/۷۵	۳/۱۰	-
درشت دانه	۱۶۸۳	۰/۵۰	۹/۵۰	-	-

برای طرح اختلاط بتن الیافی، استاندارد مشخصی وجود ندارد، لیکن آیین نامه ACI 211 [۳۳]، از این مزیت برخوردار است که در مراحل پایانی طراحی، با ساخت یک نمونه ی آزمایشگاهی و انجام چند آزمایش ساده بر روی نمونه، نتایج مراحل قبلی را اصلاح کرده و به این ترتیب تاثیر خواص ویژه ی مصالح هر منطقه را به نحو مناسب، در نتایج طراحی دخالت می دهد.

در این تحقیق با استفاده از استاندارد مذکور، طرح مورد نظر نهایی گردید و تمامی نمونه ها بر اساس این طرح ساخته شد. به همین منظور جهت دست یابی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی حدود ۳۰ مگا پاسکال، ۳۷۹ کیلو گرم سیمان پرتلند تیپ ۱، ۷۶۱ کیلو گرم درشت دانه، ۹۴۰ کیلو گرم ریز دانه و ۲۰۳ کیلو گرم آب برای تهیه ی یک متر مکعب بتن در نظر گرفته شد.

منظور بررسی قسمت‌های مختلف نمودار بار-جابجایی تعریف شده است. اگر تغییر مکان تا نقطه‌ی شکست به اندازه‌ی  $\delta$  باشد، سطح زیر منحنی بار-جابجایی تا  $\delta$ ،  $5/5\delta$ ،  $3\delta$  و  $10/5\delta$  تقسیم بر سطح زیر نمودار بار-جابجایی تا نقطه‌ی شکست، به ترتیب با شاخص‌های  $I_5$ ،  $I_{10}$ ،  $I_{20}$  و  $I_{30}$  نشان داده می‌شود.

#### ۵- نتایج و بحث

در شکل ۷ نمودار بار-جابجایی نمونه بتن‌های الیافی MFRC1 تا MFRC3 به همراه بتن شاهد و در شکل ۸ نمودار بار-جابجایی نمونه بتن‌های الیافی MFRC4 تا MFRC6 به همراه بتن شاهد، نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۷ و ۸، اضافه شدن الیاف به بتن موجب افزایش قابل توجه میزان جذب انرژی یا سطح زیر منحنی نسبت به نمونه شاهد شده است.

شکل ۹ میزان جذب انرژی نمونه‌های مختلف مسلح شده را در مقایسه با یکدیگر و بتن شاهد نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، افزایش میزان جذب انرژی برای نمونه‌ی MFRC1، بیش از ۶ برابر نمونه‌ی شاهد می‌باشد. این در حالی است که برای نمونه‌ی MFRC6، بیش از ۱۴ برابر نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش جذب انرژی مشاهده می‌شود. این عدد برای نمونه‌ی MFRC2 در حدود ۷ برابر، برای نمونه‌های MFRC3 و MFRC4 در حدود ۹ برابر، و برای نمونه‌ی MFRC5، در حدود ۱۰ برابر می‌باشد. بنابراین تغییر سطح مقطع الیاف باعث تأثیر قابل توجه در میزان جذب انرژی شده است.

از آن جا که بیش‌ترین مساحت سطح مقطع الیاف مربوط به الیاف MF1 می‌باشد، به دلیل کاهش سطح تماس الیاف و ماتریس در بتن ساخته شده با این الیاف، کم‌ترین میزان جذب انرژی مشاهده شده است.

با کاهش مساحت سطح مقطع الیاف، میزان جذب انرژی با افزایش روبرو بوده است، به طوری که الیاف MF6 با کم‌ترین مساحت سطح مقطع، موجب بیش‌ترین میزان جذب انرژی در بتن شده‌اند. علت این امر افزایش سطح تماس الیاف با دیگر مصالح بتن به دلیل بیش‌تر شدن تعداد الیاف می‌باشد.

در این تحقیق جهت بررسی دقیق رفتار خمشی نمونه‌های بتن الیافی، آزمون طاق خمشی بر طبق استاندارد ASTM C1018 [۳۵] بر روی نمونه‌های منشوری انجام گرفت.

به همین منظور از دستگاه تافنس شرکت ELE (ساخت کشور انگلستان) با ظرفیت ۵۰ کیلو نیوتن استفاده گردید. فاصله‌ی محور تا محور تکیه‌گاه‌ها ۳۰۰ میلی متر و بارها به فاصله‌ی یک سوم طول دهانه از هر تکیه‌گاه اعمال گردید. مقادیر بار وارده بر تیر در هر لحظه با استفاده از یک بار سنج اندازه‌گیری و به دستگاه منتقل گردید. هم‌زمان مقادیر تغییر مکان وسط دهانه و جابجایی قائم تکیه‌گاه‌های سمت راست و چپ با استفاده از روش تصویر برداری دیجیتال استخراج گردید. در این روش از دوربین Nikon 5200 با رزولوشن ۲۴ مگاپیکسل مجهز به لنز Nikkor 18-135mm برای عکس برداری متوالی از نمونه‌ها استفاده گردید. دوربین در فاصله یک متری از سطح نمونه قرار گرفته و جهت حذف پارازیت‌های نوری دو پروژکتور با زاویه‌ی مورب و در طرفین قرار داده شد. به منظور ارزیابی میدان جا به جایی، در عکس مرجع ناحیه‌ی میانی پچ بندی و مقدار جا به جایی متناظر با هر عکس، از تفاضل جا به جایی و میانگین جا به جایی دو تکیه‌گاه نمونه‌ی بتنی محاسبه گردید.

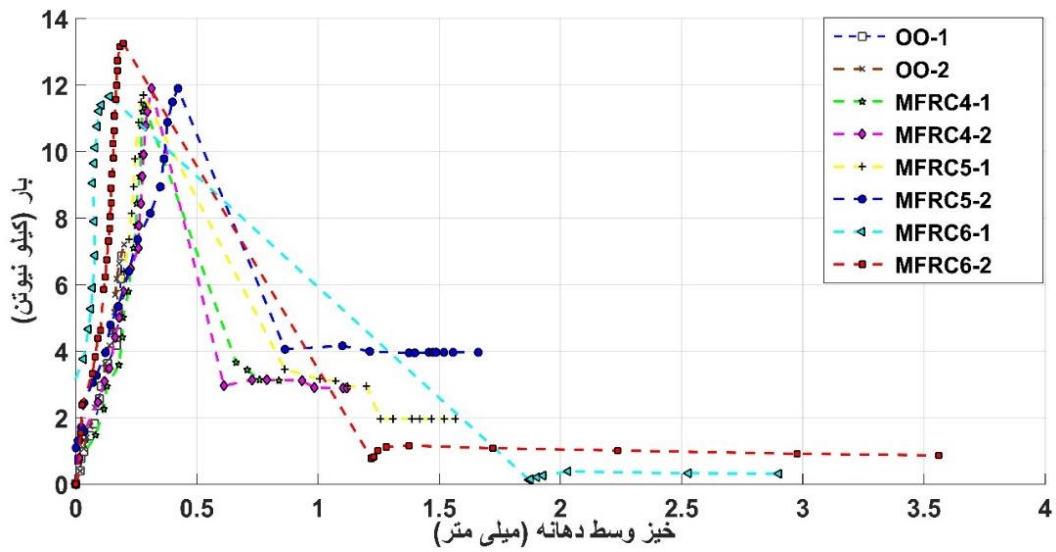
شکل ۶ دستگاه اندازه‌گیری طاق خمشی به همراه متعلقات تصویر برداری را نشان می‌دهد.



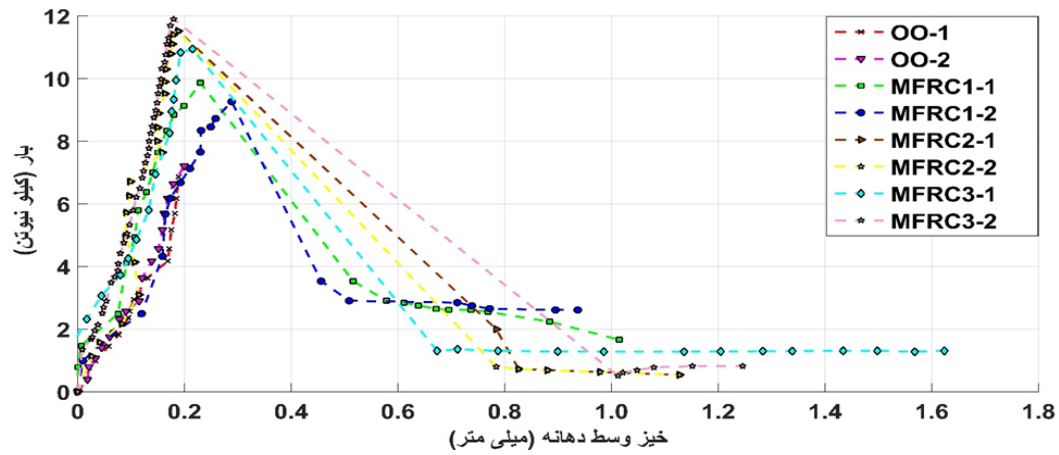
شکل ۶- دستگاه اندازه‌گیری خمشی چهار نقطه‌ای و متعلقات آن

#### ۴-۴- شاخص‌های طاق

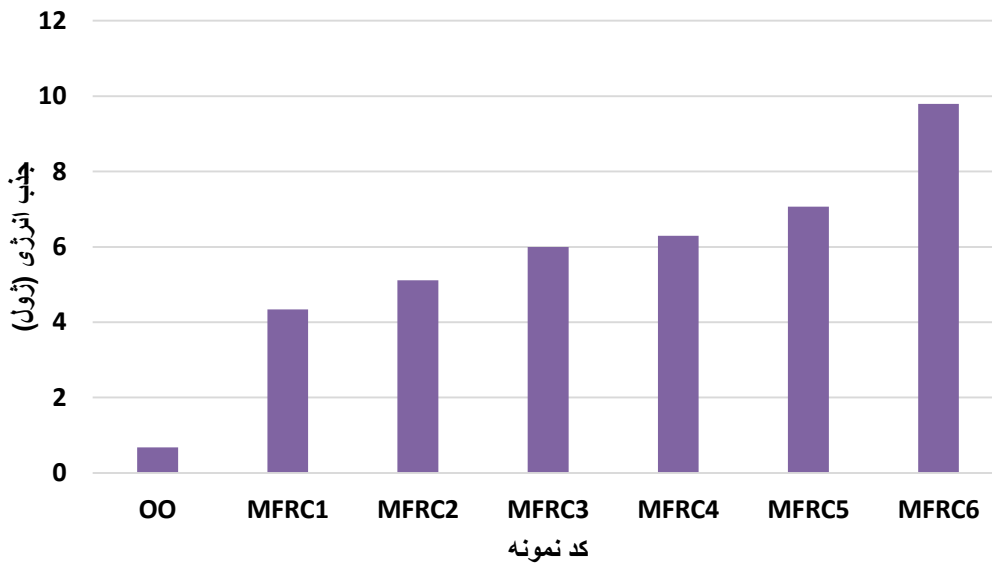
تعیین شاخص‌های طاق با انجام آزمون نمونه‌های منشوری تحت خمشی صورت می‌پذیرد. شاخص‌های طاق متنوعی به



شکل ۷- نمودار بار-جا به جایی نمونه‌های OO، MFRC1، MFRC2، MFRC3 و MFRC4



شکل ۸- نمودار بار-جا به جایی نمونه‌های OO، MFRC4، MFRC5 و MFRC6



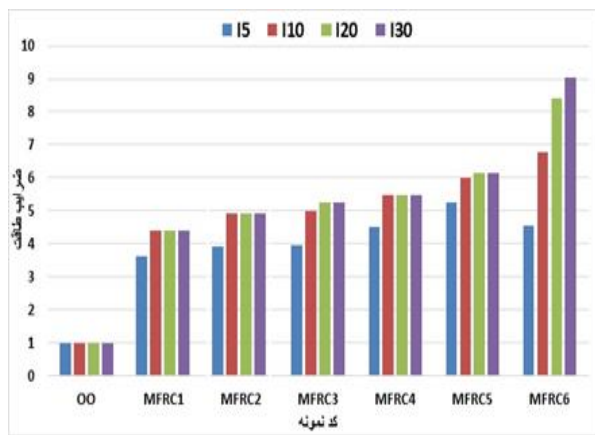
شکل ۹- میزان جذب انرژی



با توجه به شکل ۱۰، شکست ناگهانی بتن غیر مسلح در حین انجام آزمون خمش و بار پذیری نمونه بتن الیافی پس از اولین ترک را می‌توان مشاهده نمود. بتن غیر مسلح هنگامی که در معرض بارگذاری بیشینه قرار گیرد، با ترک خوردن به دو تکه تقسیم می‌شود و نمی‌تواند بار یا تغییر شکل بیش‌تری را تحمل کند. در مقابل بتن مسلح به الیاف، ترک می‌خورد، اما دو تکه نمی‌شود و می‌تواند در مقابل بار، تا یک تغییر شکل نسبتاً زیاد مقاومت کند.

مبدل شدن حالت تردی بتن به حالت شکل پذیر از مزایای بسیار مهم استفاده از الیاف در ساخت بتن است. نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که قابلیت انعطاف پذیری بتن الیافی سبب عدم بروز پدیده گسیختگی ناگهانی در این نوع بتن می‌گردد. در بتن الیافی پراکنده شدن سه بعدی الیاف، سبب ایجاد اتصالاتی در راستاهای مختلف شده و بنابراین رشته‌های الیاف به طور فعال با تشکیل ریز ترک‌ها، در محدود کردن عرض ترک‌ها وارد عمل می‌شوند.

نتایج به دست آمده از تعیین شاخص‌های طاقت در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- شاخص‌های طاقت

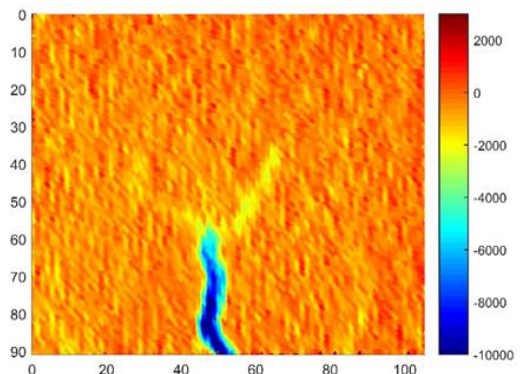
با توجه به شکل چنانچه شاخص‌های طاقت در همه نمونه‌ها در نظر گرفته شود، سه نتیجه کلی را می‌توان گزارش نمود:

- ۱- نمونه بتن غیر مسلح به دلیل رفتار ترد، دارای شاخص‌های طاقت برابر یک می‌باشد.
- ۲- شاخص‌های طاقت در هر نمونه یا با افزایش روبرو بوده است و یا به دلیل عدم تحمل بار بیش‌تر ثابت باقی مانده است.
- ۳- با توجه به رفتار کل نمونه‌ها، با کاهش مساحت سطح مقطع عرضی الیاف، شاخص‌های طاقت با روند افزایشی

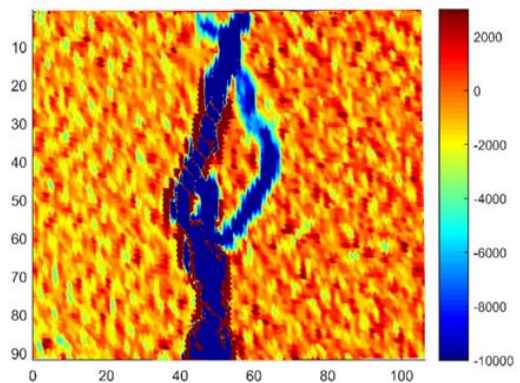
در این تحقیق با توجه به مشخصات مکانیکی الیاف و نتایج حاصله از رفتار بتن، قدرتمند بودن پیوند در فصل مشترک مابین الیاف و ماتریس، سبب مقاومت الیاف و پاره شدن آن‌ها در زمان طولانی‌تر و پس از گسترش ترک در بتن گردید. به عبارت دیگر تغییر در قدرت چسبندگی مابین الیاف و ماتریس بتنی، سبب مبدل شدن پدیده شکست الیاف از حالت بیرون کشی به حالت پارگی شده است.

الیاف با توجه به استحکام کششی مناسب، از تشکیل و پیشرفت ترک و یا به عبارت بهتر توسعه ترک خوردگی، ممانعت به عمل می‌آورند. همچنین الیاف با تشکیل پل مابین ترک‌ها و یا دوخت ترک، مانع از انتشار ترک خوردگی می‌شوند. به واسطه این اثر، طول و ضخامت ترک محدود می‌گردد.

شکل ۱۰ نحوه گسترش ترک در بتن غیر مسلح و بتن MFRC6 که به روش تصویر برداری دیجیتال به دست آمده است، را نشان می‌دهد. در این شکل محور قائم میکرو کرنش و محور افقی عرض بین دو بار متمرکز می‌باشد.



OO



MFRC

شکل ۱۰- نحوه گسترش ترک در بتن غیر مسلح (OO) و بتن (MFRC6) در حین باربری

مقطع، بیش از ۱۴ برابر نسبت به نمونه‌ی شاهد، افزایش جذب انرژی مشاهده می‌شود. نتایج در مجموع بیانگر افزایش ۹ برابری میزان جذب انرژی به طور میانگین می‌باشد.

۴- با توجه به نکات فوق، استحکام پیوند عامل مهمی در تعیین خصوصیات مکانیکی بتن مسلح شده با الیاف به شمار می‌رود. ترکیب الیاف و ماتریس بتنی، نیازمند انتخابی از روی آگاهی است تا بتوان با توجه به کاربرد مورد نظر از بتن، به استحکام پیوند مناسب دست یافت.

روبه‌رو شده است. این افزایش به معنای شکل پذیری بیش‌تر بتن در زمان‌های مختلف بعد از ترک اولیه و قبل از شکست نهایی می‌باشد. به عبارت دیگر نمونه‌ها قبل از فروپاشی، میزان بار بیش‌تری را در گذر زمان تحمل نموده‌اند. این افزایش باربری در طول زمان، در کاربری سازه بتنی با کاربرد جذب انرژی بالا، بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

## ۶- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین هدف از افزودن الیاف به بتن، افزایش جذب انرژی می‌باشد. هرچه سطح زیر نمودار بار-جابجایی یک تیر بزرگ‌تر باشد؛ میزان جذب انرژی آن نیز بیش‌تر خواهد بود. از آن جا که در بتن الیافی، الیاف بیش‌تر بر رفتار عضو بعد از ترک تاثیر می‌گذارند، در این تحقیق جهت بررسی این مساله نمودارهای بار-جابجایی برای همه نمونه‌ها استخراج و تحلیل گردید.

نتایج به طور خلاصه نشان می‌دهد:

۱- به طور کلی جذب بالای انرژی در بتن‌های الیافی ساخته شده، نشان می‌دهد که الیاف در بتن همانند پلی عمل کرده و از انتشار ترک جلوگیری می‌نمایند. بنابراین رشته‌های الیاف به طور فعال در محدود کردن عرض ترک وارد عمل شده و با تشکیل ریز ترک‌های زیاد، قابلیت بهره برداری بتن را افزایش می‌دهند. هرچه میزان چسبندگی الیاف به ماتریس بتنی بیش‌تر باشد، نقش الیاف در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن بیش‌تر خواهد بود.

۲- از جمله روش‌های افزایش استحکام پیوند مابین الیاف و ماتریس بتنی که در این تحقیق مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت، بالا بردن میزان تماس الیاف با ماتریس به وسیله افزایش سطح مخصوص الیاف می‌باشد. کاهش مساحت سطح مقطع عرضی الیاف از جمله مواردی است که در درصد حجمی ثابت، موجب افزایش تعداد الیاف می‌شود. در نتیجه تماس الیاف با بتن بیش‌تر شده و در نهایت میزان مقاومت بتن در برابر جذب انرژی افزایش می‌یابد.

۳- با کاهش مساحت سطح مقطع و افزایش سطح مخصوص الیاف، میزان تماس الیاف با مصالح بتنی افزایش می‌یابد، در نتیجه میزان جذب انرژی به شدت افزایش می‌یابد. مقدار افزایش در کم‌ترین حالت بیش از ۶ برابر میزان جذب انرژی نمونه‌ی شاهد می‌باشد. این در حالی است که در بتن حاوی الیاف با کم‌ترین مساحت سطح

## ۷- مراجع

- [1] Bentur, A., and Sidney, M., Fibre Reinforced Cementitious Composites, Taylor & Francis, 2007.
- [2] Goldfein, S., (1965) Fibrous reinforcement for Portland cement, Modern Plastics, 156-159.
- [3] Afroughsabet, V., Biolzi, L., and Ozbakkaloglu, T., "High-performance fiber-reinforced concrete: a review", Journal of Materials Science, 51(14), pp. 6517-6551, 2016.
- [4] Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., and Sivakugan, N., "Use of macro plastic fibres in concrete: a review", Construction and Building Materials, 93, pp.180-188, 2015.
- [5] Soltanzadeh, F., Barros, J. A. O., and Santos R. F. C., "High performance fiber reinforced concrete for the shear reinforcement: experimental and numerical research", Construction and Building Materials, 77, pp. 94-109, 2015.
- [6] Ardanuy, M., Claramunt, J., and Toledo, and Filho R. D., "Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research", Construction and Building Materials, 79, pp. 115-128, 2015.
- [7] Mechtcherine, V., "Towards a durability framework for structural elements and structures made of or strengthened with high-performance fibre-reinforced composites", Construction and Building Materials, 31, pp. 94-104, 2012.
- [8] Hassanpour, M., Shafiq, P., and Mahmud, H.B., "Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement: a review", Construction and Building Materials, 37, pp. 452-461, 2012.
- [9] Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., and Hejazi. S. M., "Fiber-reinforced asphalt-concrete - A review, Construction and Building Materials, 24, pp. 871-877, 2010.
- [10] Afroughsabet, V., and Ozbakkaloglu, T., "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers", Construction and Building Materials, 94, pp. 73-82, 2015.

- [26] Rana, S., Figueiro, R., *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*, Springer, 2016.
- [27] Sivakumar, A., and Santhanam, M., "A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete", *Cement and Concrete Composites*, 29(7), pp. 51–581, 2007.
- [28] Ahmed, S.F.U., Maalej, M., and Paramasivam, P., "Flexural responses of hybrid steel–polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash", *Construction and Building Materials*, 21(5), pp.1088–1097, 2007.
- [29] Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Sammour, M., and Sonebi, M., "Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres", *Construction and Building Materials*, 45, pp. 20–29, 2013.
- [30] Dawood, E.T., and Ramli, M., "High strength characteristics of cement mortar reinforced with hybrid fibres", *Construction and Building Materials*, 25(5), pp. 2240–2247, 2011.
- [31] Hwan, B., Cheol, K., and Cheol, Y., "Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers", *Engineering Fracture Mechanics*, 74, pp. 243–257, 2007.
- [32] ASTM C33 / C33M – 16, Standard Specification for Concrete Aggregates.
- [33] ACI 211.1-91, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
- [34] ASTM C 78 – 02, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).
- [35] ASTM C1018-97 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).
- [11] Li, J., Niu, J., Wan, C., Jin, B., and Yin, Y., "Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 118, pp. 27–35, 2016.
- [12] Wille, K., Naaman, A., El-Tawil, S., and Parra-Montesinos, G., "Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing", *Materials and Structures*, 45, PP. 309–324, 2012.
- [13] Colin, D., *Fiber-Reinforced Cements and Concretes*, Taylor & Francis, 2010.
- [14] Fourne, F., *Synthetic Fibers Machines and Equipment, Manufacture, Properties*, Hanser Publishers, 1999.
- [15] Walczak, Z. K., *Processes of Fiber Formation*, Elsevier, 2002.
- [16] Cook, J. G., *Handbook of Textile Fibres*, Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [17] Torkaman, J., Ashori A., and Momtazi, A.S., "Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks", *Construction and Building Materials*, 50, pp. 432–436, 2014.
- [18] Silva, F.D., Toledo, R.D., Melo, J.D., and Fairbairn, E.D.R., "Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites", *Construction and Building Materials*, 24(5), pp. 777–85, 2010.
- [19] Ali, M., and Chouw, N., "Experimental investigations on coconut-fibre rope tensile strength and pullout from coconut fibre reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, 41, pp. 681–690, 2013.
- [20] Aziz, F.N.A., Bida, S.M., Nasir, N.A.M., and Jaafar, M.S., "Mechanical properties of lightweight mortar modified with oil palm fruit fibre and tire crumb", *Construction and Building Materials*, 73, pp. 544–550, 2014.
- [21] Pacheco-Torgal, F., and Jalali, S., "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: a review", *Construction and Building Materials* 25(2), pp. 575–581, 2011.
- [22] McIntyre, J. E., *Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin*, Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [23] Ugbole, S. C. O., *Polyolefin fibres*, Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [24] ASTM D 7508/D7508M-10(2015), Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete.
- [25] ACI 544.1R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.

## The Effect of Cross-Sectional Area of Macro-Fibers on Energy Absorption Capacity of Concrete

**Rohallah Rostami\***

PhD Candidate, Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology  
Mohammad Zarrebini

Associate Professor, Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology  
Khaled Sanginabadi

PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Kurdistan University

Davood Mostofinejad

Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Hossein Fashandi

Assistant Professor, Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology

### Abstract:

Energy absorption capacity is the salient property of concrete. In this work the effect of cross-sectional area of melt spun polypropylene fibers together with that of fibers diameter on behavior of fiber reinforced concrete was investigated. Variation on fiber dimensions was achieved by varying fiber spinning draw ratio and speed of melt feeding pumps. Variations in fiber diameter affect fiber specific area which in turn influences the adhesion of the fibers to the matrix in FRC. In order to evaluate the FRC behavior, the area under load versus displacement was studied. It was found that energy absorption capacity excessively increases as the cross-sectional area of the fibers decreases. The increase in the energy absorption was at least 6 times of that of reference specimen. It is while in the concrete mix containing the fibers with the least cross-sectional area, the increase in the energy absorption was 14 times the corresponding value in the reference mix. This was concluded to be due to the increase in contact area between the finer fibers and the matrix due to increase in number of fibers for a given fiber volume fraction in the concrete. Results also showed that the increase in energy absorption capacity of the FRC leads to higher workability of the concrete after appearance of the initial crack and ultimate failure of the concrete. Finally it was observed that load bearing capacity of the samples prior to disintegration was high.

**Keywords:** Fiber reinforced concrete, macro fibers, cross-sectional area and energy absorption capacity.

---

\* Corresponding Author: rohallah.rostami@tx.iut.ac.ir