

## ویژه نامه نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

### مکانیک شکست بتن الیاف مسلح: مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر جنس، هندسه و ترکیب الیاف مختلف

خالد سنگین آبادی<sup>۱</sup>، روح اله رستمی<sup>۲</sup>، نبرد حبیبی<sup>۳</sup>، داود مستوفی نژاد<sup>۴\*</sup>، محمد ذره بینی<sup>۵</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران  
 ۲- دانشجوی دکتری مهندسی نساجی، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
 ۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران  
 ۴- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران  
 ۵- دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

#### چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از الیاف پلیمری گسترش قابل توجهی در مسلح سازی بتن داشته است. نقش اصلی الیاف در رفتار پس از ترک خوردگی بتن بروز می نماید. بررسی دقیق رفتار ترک خوردگی مستلزم به کارگیری مفاهیم مکانیک شکست در فرآیند شکست و گسترش ترک تیرهای بتنی می باشد. به این منظور در این تحقیق ۱۴ نمونه‌ی بتنی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۴۰۰ میلی متر که در مرکز وجه کششی خود دارای شکافی به عمق ۳۵ میلی متر می باشند؛ تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. در این نمونه‌ها جنس، هندسه و درصد ترکیب الیاف مختلف، متغیر در نظر گرفته شد. نتایج نشان می دهد که الیاف ماکرو پلی پروپیلن با وجود افزایش مقاومت خمشی، تاثیر قابل توجهی بر افزایش شکل پذیری بتن ندارند. الیاف میکرو پلی استر و پلی پروپیلن عملکرد مناسب تری در حین ترک خوردگی بتن داشته و برای نمونه‌های حاوی این الیاف در هنگام آغاز ترک خوردگی افت ناگهانی قابل توجهی در باربری صورت نمی گیرد. هم چنین نتایج نمونه‌های مرکب حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن و میکرو پلی استر نشان داد که گرچه با افزایش درصد الیاف ماکرو مقاومت خمشی ترک خوردگی افزایش می یابد؛ اما شاخص‌های شکل پذیری با کاهش رو به رو می شوند. با در نظر گرفتن مجموع ویژگی ها، نمونه‌ی با نسبت الیاف ماکرو پلی پروپیلن به الیاف میکرو پلی استر ۳ به ۲ بهترین عملکرد را خواهد داشت.

کلمات کلیدی: مکانیک شکست، بتن الیاف مسلح، پلی پروپیلن، پلی استر، شکل پذیری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2018.127799.1533					
http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2018.127799.1533	۱۳۹۷/۰۶/۳۰	۱۳۹۷/۰۴/۲۶	۱۳۹۷/۰۴/۲۶	۱۳۹۷/۰۴/۱۸	۱۳۹۷/۰۱/۳۱
*نویسنده مسئول: داود مستوفی نژاد			پست الکترونیکی: dmostofi@cc.iut.ac.ir		

## Fracture mechanics of fiber reinforced concrete: Experimental study of composition, geometry and hybridization of fibers

Khaled Sanginabadi<sup>1</sup>, Rohallah Rostami<sup>2</sup>, Nabard Habibi<sup>3</sup>, Davood Mostofinejad<sup>4\*</sup>, Mohammad Zarrebini<sup>5</sup>

1- PhD candidate in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- PhD candidate in Textile Engineering, Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

4- Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

5- Associate Professor, Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

### ABSTRACT

Using of polymeric fibers for reinforced concrete structures has significantly developed in recent years. Polymeric fibers start their contribution in the behavior of concrete members after cracking. In order to a careful investigation into post-cracking behavior need to apply fracture mechanic concept (growth of cracks) in reinforced concrete members. For this purpose, in this research 14 concrete prisms (100×100×400 mm in dimensions) with 35 mm notch depth (at the center of tensile side) for four-point flexural strength test were fabricated. Fiber composition, geometry and hybridization percent were varied in these samples. Derived outputs illustrated that macro polypropylene (PP) fiber has no significant effect on concrete ductility, whereas it leads to increase the flexural strength. But micro polyester (PET) and PP fibers have more effective performance during forming cracks in concrete members. PET and PP fibers have a more suitable function during concrete cracking and the samples containing these fibers have no significant drop in their bearing while the cracking is started. In addition, samples reinforced with PP and PET fibers indicated that by increase in macro fibers, the flexural strength were increased where as ductility indices decreased. In general, samples reinforced with %60 of PP macro fibers and %40 PET micro fibers have the best performance.

### ARTICLE INFO

Received: 20/04/2018

Revised: 09/07/2018

Accepted: 17/08/2018

### Keywords:

Fracture Mechanics

FRC

Polypropylene

Polyester

Ductility

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce. 2018.127799.1533

\*Corresponding author: Davood Mostofinejad.

Email address: dmostofi@cc.iut.ac.ir

## ۱- مقدمه

مزایای سازه‌های بتن آرمه نسبت به دیگر سازه‌ها، سبب شده که امروزه بتن به یکی از پر کاربردترین مصالح ساخت و ساز تبدیل شود. بتن در کنار مقاومت فشاری مناسب، شکل پذیری، مقاومت کششی و خمشی کمی دارد. به این منظور در چند سال اخیر با اضافه کردن الیاف پلیمری به بتن و ساخت بتن‌های الیاف مسلح، تا حدود زیادی ضعف‌های مذکور بهبود یافته است. عمده مزیت الیاف و نقش آن‌ها در بهبود ضعف‌های بتن، به عملکرد این الیاف در هنگام ترک خوردگی بتن مربوط می‌باشد. الیاف در بتن الیاف مسلح به صورت تصادفی و در جهت‌های مختلف توزیع می‌گردند؛ از این رو می‌توانند با ایجاد پل بین دو لبه‌ی ترک، در نواحی و جهت‌های مختلف مانع از ایجاد و رشد ترک شوند [۱].

ترک‌های بتن از نظر مقیاسی در دو مقیاس میکرو و ماکرو طبقه بندی می‌شوند. گسترش و به هم پیوستن ترک‌های میکرو، ترک‌های ماکرو را شکل می‌دهند. از این رو بهتر است الیاف نیز در دو مقیاس مختلف در بتن مورد استفاده قرار گیرند. الیاف در دو رده‌ی الیاف میکرو با طول کم‌تر از ۳۰ میلی‌متر و الیاف ماکرو با طول بیش از ۳۰ میلی‌متر (و کم‌تر از ۷۶ میلی‌متر) طبقه بندی می‌شوند. الیاف میکرو نقش کنترل ترک را بر عهده داشته و به دلیل خصوصیات مکانیکی پایین نسبت به الیاف ماکرو، نقش تعیین‌کننده‌ای را در بهبود خصوصیات کششی و خمشی بتن ندارند. الیاف ماکرو به دلیل دارا بودن خصوصیات مکانیکی مناسب، علاوه بر کنترل ماکرو ترک‌ها، موجب تسلیح و ارتقای خصوصیات مکانیکی بتن نیز می‌شوند [۲].

عملکرد الیاف در هنگام ترک خوردگی بتن به عوامل متعددی وابسته می‌باشد. از جمله‌ی این عوامل جنس الیاف، طول و سطح مقطع الیاف، جهت گیری الیاف و چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمانی هستند. در تحقیقات متعدد و به کمک روش‌ها و آزمون‌های مختلفی اثر این عوامل مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. با توجه به مطرح شدن مکانیزم ترک خوردگی، روش‌های بر پایه‌ی مفاهیم علم مکانیک شکست می‌توانند مفید واقع شوند. در این راستا تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی بسیاری بر پایه‌ی مفاهیم مکانیک شکست انجام شده است [۲].

هوان و همکاران در سال ۲۰۰۷، به بررسی رفتار شکست اعضای بتن مسلح توسط الیاف مصنوعی پرداختند. در این تحقیق ابتدا شکل بهینه‌ی الیاف مورد بررسی قرار گرفته و سپس به صورت تئوری و آزمایشگاهی به بررسی مقاومت ترک خوردگی و رفتار پس از ترک خوردگی بتن‌های الیاف مسلح پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که منحنی‌های بار-باز شدگی دهانه‌ی ترک (CMOD) و جا به جایی (CMOD) حاصل از مدل این محققین بسیار به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است [۳].

در سال ۲۰۱۰ بنکارادینو و همکاران، در تحقیقی آزمایشگاهی مشخصات شکست بتن الیاف مسلح را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از الیاف پلی پرویلن به طول ۱۹ میلی‌متر و الیاف فولادی به طول ۵۰ میلی‌متر استفاده شد. نتایج نشان داد که انرژی شکست وابسته به میزان الیاف مصرفی می‌باشد. به گونه‌ای که با افزایش میزان الیاف انرژی شکست افزایش یافته، که این افزایش برای بتن‌های مسلح به الیاف فولادی بیش‌تر می‌باشد [۴].

در سال ۲۰۱۲ کایانو و همکاران، رفتار شکست تیرهای بتنی مسلح به مخلوط الیاف میکرو و ماکرو فولادی را بررسی کردند. در حالی که نتایج نشان داد مقاومت ترک خوردگی و رفتار پس از ترک خوردگی به شدت وابسته به حجم الیاف است؛ اما میزان ترکیب الیاف میکرو و ماکرو تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت ترکی خوردگی و شکل پذیری پس از ترک خوردگی ندارد [۵].

آلبرتی و همکاران در سال ۲۰۱۶، با انجام تحقیقی گسترده مکانیک شکست بتن مسلح به الیاف پلی الفین را با بررسی مشخصات بتن، جهت بتن ریزی، طول الیاف و اندازه‌ی نمونه‌ها انجام دادند. به عنوان نمونه نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از الیافی با طول بزرگ‌تر، به علت جهت گیری و توزیع مناسب‌تر، تا حدود زیادی اثر بیرون کشیدگی الیاف را جبران نموده است، اما طول الیاف تاثیر قابل توجهی بر مقاومت پسماند ندارد و تنها مقداری CMOD را کاهش می‌دهد [۶].

<sup>1</sup> Crack Mouth Opening Displacement

با وجود انجام تحقیقات گسترده، به علت عدم قطعیت نتایج و پارامترهای متعددی که در رفتار شکست بتن تاثیر گذار هستند، انجام تحقیقات بیش تر لازم به نظر می‌رسد. از این رو در تحقیق حاضر مطالعه‌ی آزمایشگاهی مکانیک شکست تیرهای بتن مسلح به الیاف انجام گردید. پارامترهای مورد بررسی جنس الیاف، هندسه‌ی الیاف و ترکیب الیاف با جنس‌ها و هندسه‌های مختلف می‌باشد. برای نمونه‌های مورد آزمایش منحنی‌های بار-جا به جایی، بار- $CMOD$  و بار-باز شدگی نوک ترک<sup>۲</sup> (CTOD) استخراج گردید. به کمک این منحنی‌ها پارامترهای مرتبط با رفتار شکست محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور دست یابی به میدان جا به جایی‌ها از روش سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) که مبتنی بر پردازش تصویر دیجیتال است، استفاده گردید. روش PIV برای اندازه گیری جا به جایی‌ها در تحقیقات مکانیک سیالات و مکانیک خاک به کار برده می‌شود. حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۲ با انجام صحت سنجی‌های لازم برای اولین بار از این روش در تحقیقات سازه‌ای استفاده کردند [۷].

جهت بررسی رفتار پس از ترک خوردگی بتن مسلح به الیاف، نمونه‌های استاندارد، چیدمان انجام آزمایش و شرایط استاندارد خاصی تعریف می‌گردد. این شرایط استاندارد توسط آیین نامه‌های ملی و بین المللی مختلفی پیشنهاد می‌گردد. از جمله‌ی مهم‌ترین این آیین نامه‌ها می‌توان به UNI 11039-2 [۸] و EN 14651 [۹] اشاره نمود. در استانداردهای مذکور آزمایش خمش سه نقطه‌ای و یا چهار نقطه‌ای برای تیری دارای شکاف در وجه کششی معرفی شده است. به همین منظور در این تحقیق نیز با استناد به آیین نامه‌های فوق از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای با شکاف در وجه کششی استفاده گردید.

## ۲- مراحل آزمایشگاهی

### ۲-۱ مشخصات نمونه‌ها و طرح اختلاط بتن

به منظور بررسی مقایسه‌ی تاثیر الیاف ماکرو پلی پروپیلن و میکرو پلی استر بر رفتار بتن مسلح شده به الیاف، ۷ طرح مختلف بتنی ساخته شد. هر طرح شامل دو نمونه‌ی استوانه‌ای و دو نمونه‌ی منشوری می‌باشد. نمونه‌های منشوری به ابعاد  $100 \times 100 \times 400$  میلی متر به منظور انجام تست خمش چهار نقطه‌ای و نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد  $150 \times 300$  میلی متر جهت تعیین مقاومت کششی برای هر طرح استخراج گردید. هم چنین مطابق شکل ۱-الف در مرکز وجه کششی نمونه‌های منشوری شکافی به عمق ۳۵ میلی متر ایجاد گردید.

طرح اختلاط برای همه‌ی نمونه‌ها با استفاده از آیین نامه‌ی ACI-211 [۱۰] انجام شده است. نسبت‌های طرح اختلاط بتن شامل ۳۷۹ کیلو گرم بر متر مکعب سیمان تیپ ۱ ویژه، ۷۵۷ کیلو گرم بر متر مکعب درشت دانه، ۹۱۷ کیلو گرم بر متر مکعب ریز دانه و ۲۲۰ کیلو گرم بر متر مکعب آب می‌باشد. بزرگ‌ترین بعد درشت دانه  $9/5$  میلی متر و بزرگ‌ترین بعد ریز دانه  $4/75$  میلی متر است. بعد از اتمام اختلاط، بتن در قالب‌های فلزی منشوری و استوانه‌ای ریخته شد. پس از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در شرایط استاندارد در داخل آزمایشگاه عمل آوری گردید. بعد از اتمام عمل آوری، به منظور عملکرد مناسب روش PIV بر سطحی از نمونه‌ها که تحت خمش خالص قرار دارد (یک سوم میانی) به کمک پنج رنگ سفید، آبی، قرمز، سبز و سیاه بافت رنگی مناسب ایجاد گردید.

### ۲-۲ مشخصات الیاف

الیاف مورد استفاده از جنس پلی پروپیلن و پلی استر و به میزان ثابت ۶ کیلو گرم بر متر مکعب انتخاب گردید. در مقیاس میکرو الیاف پلی استر و پلی پروپیلن به طول ۱۸ میلی متر و در دنیر ۱۲ تهیه گردید. الیاف ماکرو نیز از جنس پلی پروپیلن و در طول ۳۳ میلی متر انتخاب گردید. خصوصیات الیاف به کار رفته طبق استاندارد ASTM D 3822 [۱۱] اندازه گیری شده و در جدول ۱ ارائه گردیده است.

<sup>2</sup> Crack Tip Opening Displacement

جدول ۱: خصوصیات مکانیکی الیاف

جنس	طول (mm)	قطر ( $\mu\text{m}$ )	چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ )	استحکام (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
پلی استر	۱۸	۳۵	۱/۳۴	۲۰۰-۳۰۰	۱/۵ - ۳
پلی پروپیلن	۱۸	۳۵	۰/۹۳	۲۵۰-۳۵۰	۲ - ۳/۵
پلی پروپیلن	۳۳	۱۰۰۰	۰/۹۳	۲۵۰-۳۵۰	۲ - ۳/۵

### ۲-۳ مشخصات و طبقه بندی نمونه‌ها

نمونه‌ها در دو سری کلی ساخته شد. سری اول فقط شامل الیافی از یک جنس و طول، و سری دوم به صورت ترکیبی از الیافی با دو جنس و طول مختلف می‌باشد. نام گذاری سری اول به صورت X-Y-n می‌باشد. اگر الیاف میکرو باشد، X به صورت micro، و اگر ماکرو باشد به صورت macro است. Y نیز جنس الیاف را نشان می‌دهد که اگر پلی استر باشد PET و اگر پلی پروپیلن باشد PP است. n نیز شماره تکرار آزمایش می‌باشد (۱ یا ۲).

سری دوم از نمونه‌ها به صورت ترکیبی از دو نوع الیاف ساخته شد. نام گذاری این نمونه‌ها به صورت blend-x-y-n نوشته شد. X بیانگر درصد الیاف ماکرو پلی پروپیلن از کل الیاف به کار رفته و Y بیان گر درصد الیاف میکرو پلی استر از کل الیاف می‌باشد. n نیز شماره تکرار آزمایش می‌باشد (۱ یا ۲). به طور مثل نمونه‌ی blend-80-20-1 بیانگر این است که این نمونه مرکب بوده و از کل الیاف ۸۰ درصد آن ماکرو پلی پروپیلن و ۲۰ درصد میکرو پلی استر است. هم چنین نمونه تکرار شماره‌ی ۱ می‌باشد.

### ۲-۴ دستگاه انجام آزمایش‌ها

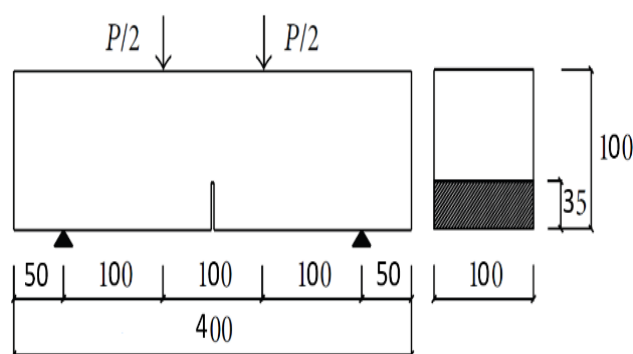
تست خمش چهار نقطه‌ای در دانشگاه صنعتی اصفهان و به کمک دستگاه تافنس ساخت شرکت ELE با ظرفیت ۵۰ کیلو نیوتن (شکل ۱) انجام گردید. در این تحقیق در کلیه‌ی نمونه‌ها بارگذاری منشور بتنی به صورت کنترل جا به جایی و با سرعت ۰/۳ میلی متر بر دقیقه انجام شد.

مقاومت کششی شکافتگی نمونه‌های بتنی با استفاده از تست برزلی اندازه گیری گردید. به این منظور نمونه‌ها داخل قاب مخصوص قرار گرفته و با استفاده از دستگاه جک فشاری ساخت شرکت ELE با ظرفیت ۲ هزار کیلو نیوتن تحت بارگذاری قرار گرفت.

برای عکس برداری متوالی از سطح نمونه‌ها در حین انجام تست و استفاده از تکنیک PIV، دوربین Nikon 5200 با رزولوشن ۲۴ مگاپیکسل مجهز به لنز Nikkor 18-135 mm مورد استفاده قرار گرفت.



(ب)



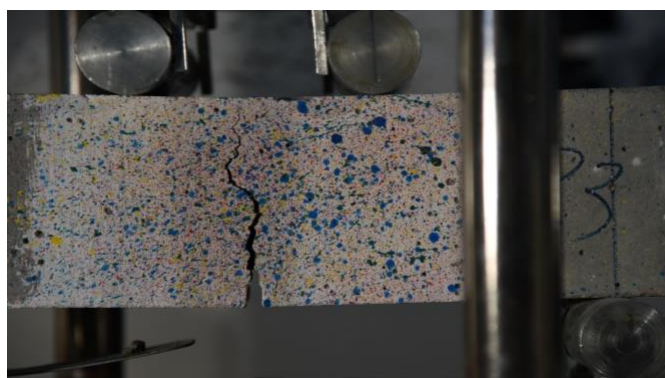
(الف)

شکل ۱: الف- ابعاد و چگونگی اعمال بار؛ ب- دستگاه انجام تست خمش چهار نقطه‌ای و متعلقات تصویر برداری

## ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش خمش و کشش برای تمامی نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. برای هر نمونه مقاومت کششی در روز آزمایش خمش اندازه گیری شده است. در شکل ۳ به منظور مقایسه‌ی مناسب نتایج، نمودار بار نهایی و مقاومت کششی آمده است. قابل مشاهده است که الیاف ماکرو تاثیر قابل توجهی بر مقاومت کششی و باربری نهایی تیر دارند. به گونه‌ای که نمونه‌ی macro-PP که تمام الیاف آن ماکرو می‌باشد؛ به ترتیب ۸۹ و ۹۹ درصد مقاومت کششی و باربری نهایی بیش‌تری نسبت به نمونه‌ی micro-PET دارد. این در حالی است که با افزایش درصد الیاف میکرو پلی استر نسبت به الیاف ماکرو پلی پروپیلن، مقاومت کششی و باربری نهایی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال نمونه‌ی blend-80-20 که ۸۰ درصد از کل الیاف آن، ماکرو پلی پروپیلن و ۲۰ آن میکرو پلی استر است نسبت به نمونه‌ی blend-20-80 (۸۰ درصد الیاف میکرو پلی استر، ۲۰ درصد الیاف ماکرو پلی پروپیلن) به ترتیب ۳۱ و ۲۲ درصد مقاومت کششی و باربری نهایی بیش‌تری دارد.

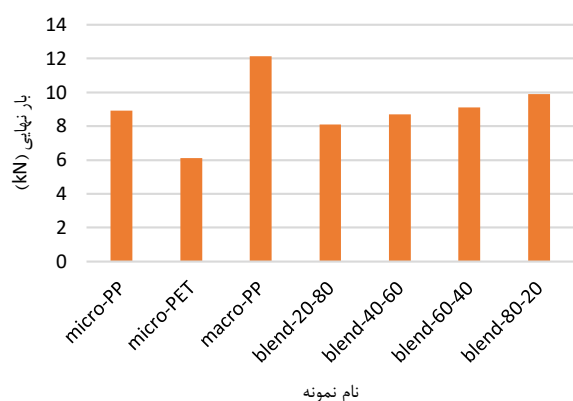
هم چنین مقایسه‌ی نمونه‌های micro-PP و micro-PET نشان می‌دهد که الیاف پلی پروپیلن عملکرد مناسب‌تری در رفتار کششی و خمشی بتن دارند. شکل ۴ گسیختگی نمونه را در لحظه‌ی نهایی نشان می‌دهد.



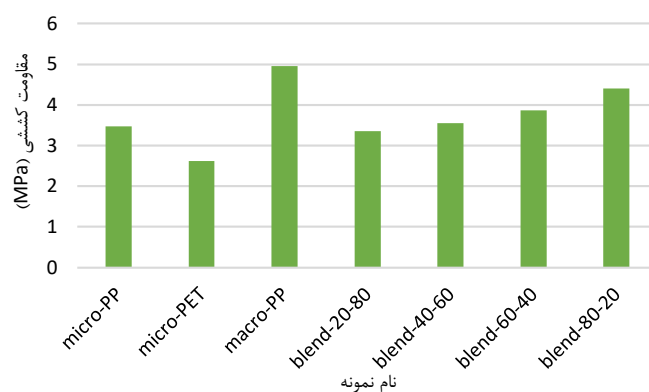
شکل ۲: گسیختگی نمونه در لحظه‌ی نهایی

جدول ۲: نتایج آزمایش مقاومت کششی و خمشی

نام نمونه	بار نهایی (kN)	متوسط بار نهایی (kN)	مقاومت کششی (MPa)	متوسط مقاومت کششی (MPa)
micro-PP-1	۰۹/۵۶	۰۸/۹۸	۰۳/۳۸	۰۳/۴۷
micro-PP-2	۰۸/۲۸		۰۳/۵۶	
micro-PET-1	۰۵/۳۹	۰۶/۱۰	۰۲/۷۵	۰۲/۶۲
micro-PET-2	۰۶/۸۱		۰۲/۴۹	
macro-PP-1	۱۱/۵۰	۱۲/۱۵	۰۴/۷۸	۰۴/۹۵
macro-PP-1	۱۲/۸۰		۰۵/۱۲	
blend-20-80-1	۰۸/۴۵	۰۸/۱۰	۰۳/۳۳	۰۳/۳۶
blend-20-80-2	۰۷/۴۵		۰۳/۳۹	
blend-40-60-1	۰۹/۴۴	۰۸/۷۱	۰۳/۶۵	۰۳/۵۵
blend-40-60-2	۰۷/۴۸		۰۳/۴۵	
blend-60-40-1	۰۸/۵۶	۰۹/۱۲	۰۳/۶۵	۰۳/۸۷
blend-60-40-2	۰۹/۶۸		۰۴/۱۰	
blend-80-20-1	۰۹/۶۳	۰۹/۹۰	۰۴/۱۵	۰۴/۴۰
blend-80-20-2	۱۰/۱۷		۰۴/۶۶	



(ب)



(الف)

شکل ۳: الف- مقاومت کششی؛ ب- بار نهایی

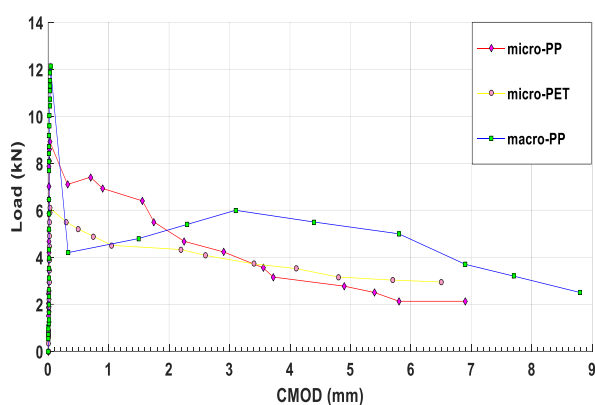
### ۳-۱ رفتار شکست بتن الیافی

جا به جایی وسط تیر و باز شدگی نوک و دهانه‌ی ترک میانی، از پارامترهای تأثیر گذار بر رفتار تیر بتنی الیاف مسلح می‌باشند. با ترسیم منحنی‌های بار-جا به جایی، بار-CTOD و بار-CMOD این تأثیرات مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور جهت ارزیابی دقیق کلیه‌ی جا به جایی‌ها و تغییر شکل‌ها از روش پردازش تصویر PIV استفاده گردید. جهت ارزیابی جا به جایی و تغییر شکل، در عکس مرجع یک سوم میانی تیر (ناحیه‌ی خمش خالص) پیچ بندی می‌شود. به منظور حذف حرکت احتمالی تیر بتنی و تغییر شکل‌های تکیه گاهی، یک پیچ بندی به ابعاد  $128 \times 128$  پیکسل بر روی کل یک سوم میانی تیر، و دو پیچ بندی به همین ابعاد در طرفین قسمت میانی تیر و بر روی تکیه گاه‌ها ایجاد گردید. از این طریق تمام جا به جایی‌ها یک سوم میانی تیر حاصل می‌گردد. از طرفی با توجه به ثبت بار در هر لحظه توسط بار سنج، رسم منحنی‌های مذکور ممکن می‌شود. برای تمام نمونه‌ها، این منحنی‌ها استخراج گردید. جهت تحلیل مناسب‌تر منحنی‌ها، برای هر نمونه منحنی میانگین تکرار اول و دوم رسم گردیده است.

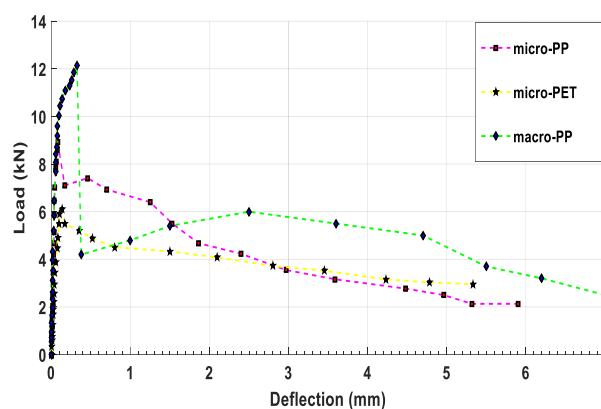
#### ۳-۱-۱ اثر جنس و هندسه‌ی الیاف

با توجه به شکل ۴ نمونه‌های حاوی الیاف میکرو پلی استر، میکرو پلی پروپیلن و ماکرو پلی پروپیلن رفتار و شکست متفاوتی دارند. شکل ۴-الف نشان می‌دهد که نمونه‌ی macro-PP پس از اولین ترک، بلافاصله دچار افت باربری محسوسی شده و باربری آن از بار حدود ۱۲ کیلو نیوتن به بار ۴ کیلو نیوتن کاهش می‌یابد. این در حالی است که نمونه‌های micro-PP و micro-PET با وجود باربری نهایی کم‌تر، پس از شکست و وقوع اولین ترک، افت ناگهانی قابل توجهی در باربری ندارند. در این نمونه‌ها پس از اولین ترک بار به آرامی کاهش می‌یابد. در لحظه‌ی نهایی باربری نمونه‌های macro-PP، micro-PP و micro-PET به هم نزدیک بوده (در حدود ۲ کیلو نیوتن) و جا به جایی نهایی وسط تیر به ترتیب ۰/۷، ۵/۹ و ۵/۴ میلی متر می‌باشد.

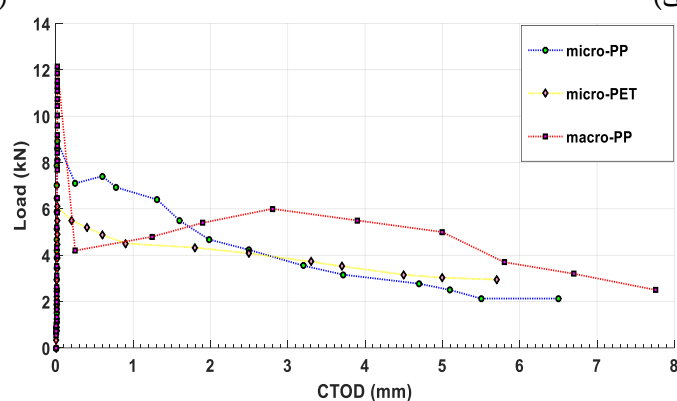
شکل ۴-ب بیانگر عملکرد بهتر نمونه‌ی micro-PET نسبت به نمونه‌های micro-PP و macro-PP می‌باشد. در لحظه‌ی نهایی برای این نمونه میزان CMOD برابر ۶/۵ میلی متر است. این در حالی است که این عدد برای نمونه‌های micro-PP و macro-PP به ترتیب برابر ۶/۹ و ۸/۸ میلی متر می‌باشد. هم چنین شکل ۴-ج نیز عملکرد بهتر نمونه‌ی micro-PET را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل میزان CTOD برای نمونه‌های micro-PET، micro-PP و macro-PP به ترتیب برابر ۵/۷، ۶/۵ و ۷/۸ میلی متر می‌باشد. بنابراین میزان CMOD و CTOD نمونه‌ی حاوی الیاف میکرو پلی استر به ترتیب ۲۶ و ۲۷ درصد نسبت به نمونه‌ی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن کم‌تر است. این عدد نسبت به نمونه‌ی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن به ترتیب ۵ و ۱۲ می‌باشد.



(ب)



(ف)



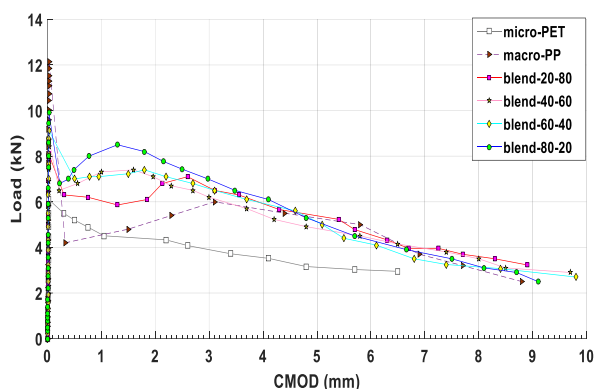
(ج)

شکل ۴: منحنی رفتار شکست برای نمونه‌های micro-PP، micro-PET و macro-PP: الف- منحنی بار-تغییر شکل؛ ب- منحنی بار-CMOD؛ ج- منحنی بار-CTOD

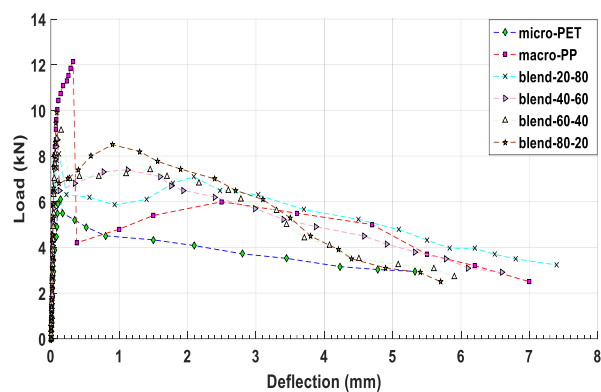
## ۳-۱-۲ اثر ترکیب الیاف

شکل ۵ جهت مقایسه‌ی رفتار شکست نمونه‌های با میزان متفاوتی از الیاف میکرو پلی استر و ماکرو پلی پروپیلن آمده است. بر اساس این شکل هرچه مقدار الیاف ماکرو افزایش می‌یابد (و الیاف میکرو کاهش)؛ شکست ناگهانی و افت محسوس باربری نمود بیش‌تری می‌یابد. به طوری که نمونه‌ی blend-20-80 (۲۰ درصد الیاف ماکرو و ۸۰ درصد الیاف میکرو) نسبت به نمونه‌ی blend-80-20 (۸۰ درصد الیاف ماکرو و ۲۰ درصد الیاف میکرو) ۴۲ درصد افت باربری کم‌تری دارد. روند مشابهی برای میزان نهایی CTOD مشاهده می‌شود. این در حالی است که با افزایش میزان الیاف میکرو پلی استر، مقدار نهایی CMOD روند کاهشی جزئی دارد. نمونه‌ی blend-60-40 (۶۰ درصد الیاف ماکرو پلی پروپیلن، ۴۰ درصد الیاف میکرو پلی استر) نسبت به نمونه‌ی micro-PET (۱۰۰ درصد الیاف میکرو پلی استر) ۵۹ درصد افزایش در مقدار CTOD را نشان می‌دهد. این عدد برای مقدار CMOD ۵۰ درصد می‌باشد.

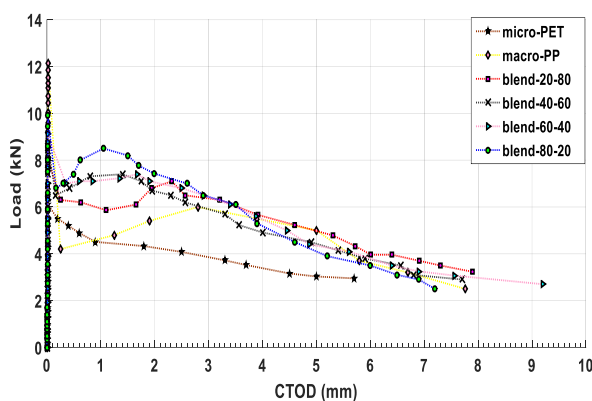




(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵: منحنی رفتار شکست برای نمونه‌های مرکب: الف- منحنی بار-تغییر شکل؛ ب- منحنی بار-CMOD؛ ج- منحنی بار-CTOD

### ۳-۲ پارامترهای شکست بتن الیافی

#### ۳-۲-۱ بر اساس UNI 11039-2 [۸]

نمودارهای بار-تغییر شکل و بار-CTOD محاسبه می‌گردد. به عنوان نخستین تعریف می‌توان به مقاومت اسمی ترک خوردگی اشاره نمود که مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$f_{if} = \frac{P_{If} \cdot l}{b(h - a_0)^2} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)،  $P_{If}$  بار متناظر ترک خوردگی (نیوتن)،  $b$  عرض نمونه (۱۰۰ میلی متر)،  $h$  ارتفاع نمونه (۱۰۰ میلی متر)،  $l$  طول نمونه (۳۰۰ میلی متر) و  $a_0$  ارتفاع شکاف (۳۵ میلی متر) می‌باشد. هم چنین برای بیان مقاومت متوسط ترک خوردگی برای CTOD در بازه‌ی آغاز ترک خوردگی ( $CTOD_0$ ) تا CTOD برابر  $0/6$  میلی متر ( $CTOD_{0.6}$ ) و نیز CTOD بین  $0/6$  تا ۳ میلی متر به ترتیب دو پارامتر به شکل روابط (۲) و (۳) تعریف می‌گردد.

$$f_{eq(0-0.6)} = \frac{1}{b(h - a_0)^2} \cdot \frac{U_1}{0.6} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$$f_{eq(0.6-3)} = \frac{1}{b(h-a_0)^2} \cdot \frac{U_2}{2.4} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

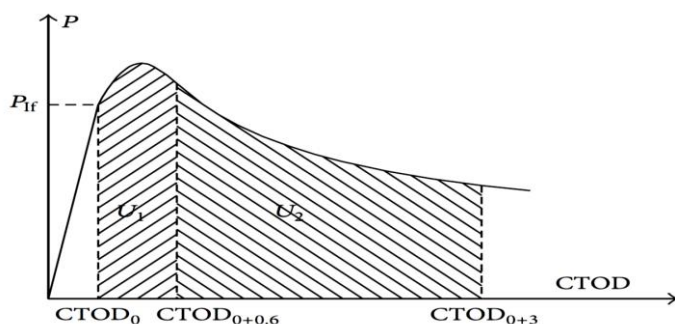
در این روابط تمام پارامترها مشابه رابطه‌ی (۱) تعریف می‌گردد. هم چنین پارامترهای  $U_1$  و  $U_2$  نیز مطابق شکل ۶ و روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌گردند. این آیین نامه جهت بیان میزان شکل پذیری شاخص‌های شکل پذیری  $D_0$  و  $D_1$  را ارائه می‌دهد (به ترتیب روابط (۶) و (۷)).

$$U_1 = \int_0^{0.6} P(CTOD)d(CTOD) \text{ (kN mm)} \quad (4)$$

$$U_2 = \int_{0.6}^3 P(CTOD)d(CTOD) \text{ (kN mm)} \quad (5)$$

$$D_0 = \frac{f_{eq}(0-0.6)}{f_{If}} \quad (6)$$

$$D_1 = \frac{f_{eq}(0.6-3)}{f_{eq}(0-0.6)} \quad (7)$$



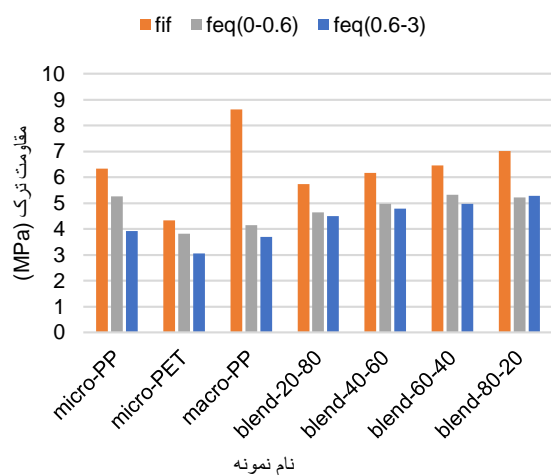
شکل ۶: منحنی بار-CTOD بر اساس UNI 11039-2 [۸]

متوسط پارامترهای مربوط به روابط ۱ تا ۷ برای تمام نمونه‌ها محاسبه شده و در شکل ۷ ارائه گردیده است. مطابق این شکل گرچه نمونه‌ی micro-PP دارای مقاومت ترک خوردگی بالاتری می‌باشد؛ اما جذب انرژی و فاکتورهای شکل پذیری قابل توجهی ندارد. این در حالی است که نمونه‌های مرکب (blend) از لحاظ فاکتورهای شکل پذیری و جذب انرژی عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های غیر مرکب دارند. با توجه به تمام پارامترهای مورد بحث و بر اساس شکل ۷، برآیند ویژگی‌های نمونه‌ی blend-60-40 از سایر نمونه‌ها مناسب‌تر می‌باشد.

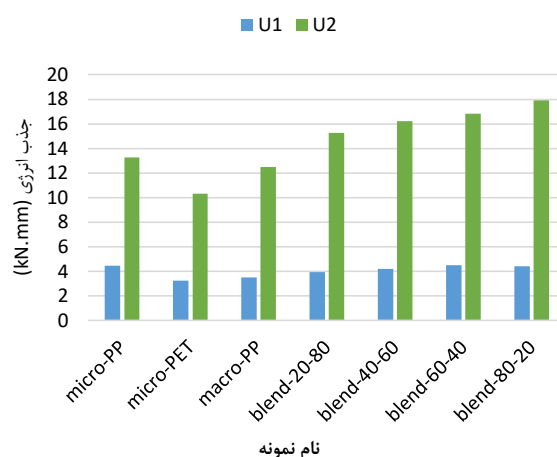
### ۳-۲-۲ بر اساس EN 14651 [۹]

EN 14651 [۹] جهت ارزیابی رفتار پس از ترک خوردگی تیرهای بتنی تحت آزمایش خمش شاخصه‌هایی را تعریف می‌کند. این پارامترها به کمک نمودارهای بار-تغییر شکل و بار-CMOD استخراج می‌گردد. به عنوان نخستین تعریف می‌توان به مقاومت حد تناسب اشاره نمود (رابطه‌ی (۸)).

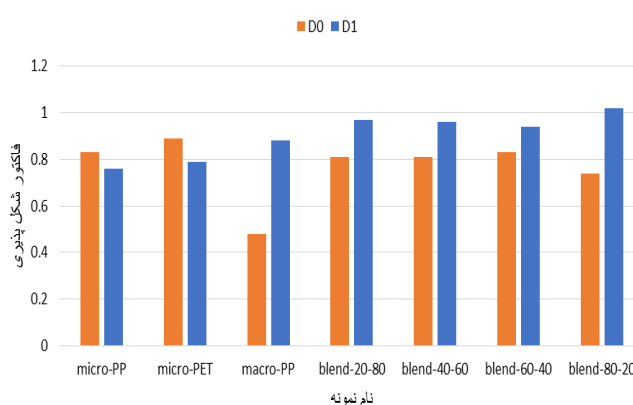
$$f_{ct,L}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \text{ (MPa)} \quad (8)$$



(ب)



(الف)

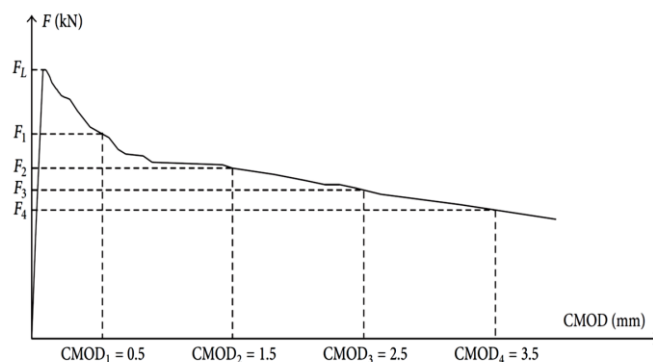


(ج)

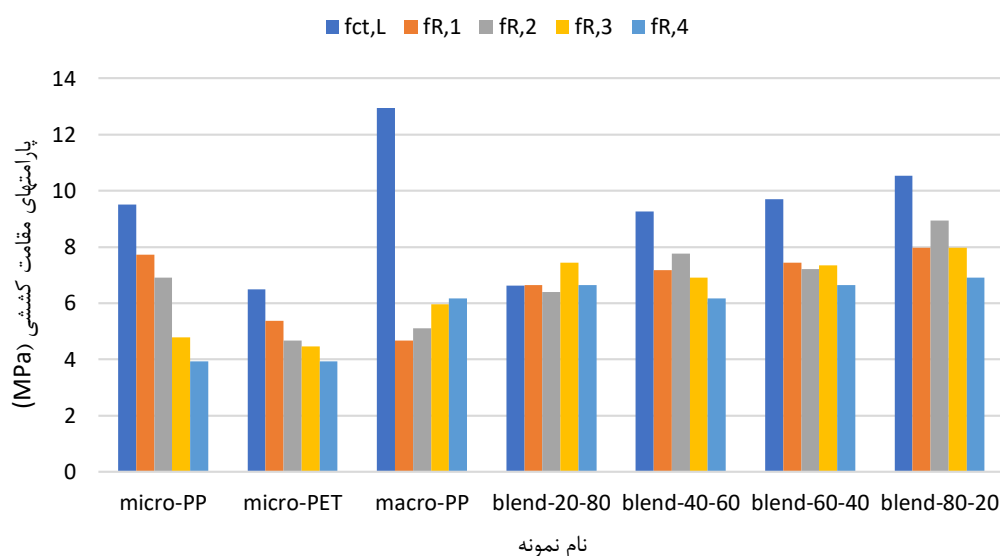
شکل ۷: پارامترهای شکست بر اساس UNI 11039-2 [۸]: الف- $f_{if}$ ،  $f_{eq}(0-0.6)$  و  $f_{eq}(0.6-3)$ ؛ ب-  $U_1$  و  $U_2$ ؛ ج-  $D_0$  و  $D_1$

در رابطه‌ی (۹)  $F_L$  حداکثر بار متناظر با CMOD برابر  $0.05$  میلی متر،  $b$  عرض نمونه (۱۰۰ میلی متر)،  $l$  طول نمونه (۳۰۰ میلی متر) و  $h_{sp}$  فاصله‌ی بین نوک شکاف تا بالای نمونه (۶۵ میلی متر) می‌باشد. هم چنین مقادیر مقاومت خمشی پسماند متناظر با CMOD برابر  $0.05$ ،  $0.1/5$ ،  $0.2/5$  و  $0.3/5$  میلی متر با اندیس‌های  $f_{R,1}$ ،  $f_{R,2}$ ،  $f_{R,3}$  و  $f_{R,4}$  نشان داده شده و از طریق رابطه‌ی (۹) محاسبه می‌شوند. تعریف پارامترهای رابطه‌ی (۹) مشابه رابطه‌ی (۸) بوده و تعیین  $F_{R,j}$  بر اساس شکل ۸ می‌باشد. مقاومت حد تناسب و اندیس‌های مذکور برای کلیه‌ی نمونه‌ها محاسبه و مقادیر متوسط آن در شکل ۹ آمده است.

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_{R,j} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}} \text{ (MPa)} \quad (9)$$



شکل ۸: منحنی بار-CMOD بر اساس EN 14651 [۹]



شکل ۹: پارامترهای شکست بر اساس EN 14651 [۹]

شکل ۹ نشان می‌دهد که نمونه‌ی macro-PP، مقاومت حد تناسب بسیار مناسبی نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. به طوری که مقاومت حد تناسب این نمونه نسبت به نمونه‌های micro-PET و blend-20-80 در حدود ۱۰۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. این در حالی است که در اندیس‌های تنش پسماند نمونه‌های blend-80-20 و blend-60-40 عملکرد بسیار مطلوب‌تری را نسبت به سایر نمونه‌ها به خصوص نمونه‌های micro-PET و macro-PP دارند. به طوری که اندیس  $f_{R,2}$  در نمونه‌ی blend-80-20 بیش از ۱۰۰ درصد نسبت به نمونه‌ی micro-PET افزایش دارد. شکل ۹ بیانگر این موضوع است که عملکرد شکل‌پذیری نمونه‌های مرکب (blend) نسبت به نمونه‌های غیر مرکب مناسب‌تر می‌باشد.

## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار شکست تیر الیاف مسلح به کمک مفاهیم مکانیک شکست ۱۴ نمونه‌ی منشوری ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای متغیر جنس، هندسه‌ی الیاف و نحوه‌ی ترکیب الیاف انتخاب گردید. خلاصه‌ی نتایج پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشد:

۱- نمونه‌های حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن از مقاومت ترک خوردگی و کششی بالاتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف میکرو پلی استر و پلی پروپیلن و یا ترکیب الیاف ماکرو و میکرو برخوردار هستند.

۲- بتن الیافی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن نسبت به بتن الیافی حاوی الیاف میکرو پلی استر عملکرد خمشی و کششی مناسب‌تری دارد.

۳- در بتن مسلح به الیاف ماکرو پلی پروپیلن با وجود باربری بالاتر نسبت به بتن‌های مسلح به الیاف میکرو پلی پروپیلن، پلی استر و یا ترکیب الیاف ماکرو و میکرو، پس از آغاز ترک خوردگی باربری دچار افت محسوس شده (تا ۶۷ درصد) و شکست ناگهانی روی داد. در حالی که سایر نمونه‌ها شکست به آرامی اتفاق افتاد و افت ناگهانی زیادی در باربری مشاهده نگردید.

۴- نمونه‌ای که تمام الیاف آن از الیاف میکرو پلی استر انتخاب گردید؛ عملکرد مناسب‌تری در باز شدگی دهانه و نوک ترک نسبت به نمونه‌های با الیاف ماکرو و میکرو پلی پروپیلن دارد. به طوری که میزان CMOD برای این نمونه به ترتیب نسبت به نمونه‌ی حاوی الیاف ماکرو و میکرو پلی پروپیلن، ۲۶ و ۵ درصد کاهش نشان داد. این عدد برای میزان CTOD به ترتیب ۲۷ و ۱۲ می‌باشد.

۵- از لحاظ فاکتورهای شکل پذیری نمونه‌ی حاوی ۶۰ درصد الیاف ماکرو پلی پروپیلن و ۴۰ درصد الیاف میکرو پلی استر و نمونه‌ی حاوی ۸۰ درصد الیاف ماکرو پلی پروپیلن و ۲۰ درصد الیاف میکرو پلی استر عملکرد بسیار مطلوب‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. نمونه‌های مذکور به عنوان بهترین درصد ترکیب از الیاف میکرو و ماکرو معرفی گردید.

## مراجع

- [1] di Prisco, M. Plizzari, G. Vandewalle, L. (2009). Fiber reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures*, 42(9), 1261–81.
- [2] Afroughsabet, V. (2016). High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *materials science*, Vol. 51, pp. 6517–6551.
- [3] Byung, H. Ji, C. Young, C. (2007). Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 243–257.
- [4] Bencardino, F. Rizzuti, L. Spadea, G. Swamy, R. (2010). Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, pp. 17–24.
- [5] Caggiano, A. Cremona, M. Faella, C. Lima, C. Martinelli, E. (2012). Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers. *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 832–840.
- [6] Alberti, M. Enfedaque, A. Gálvez, J. (2016). Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fiber length and specimen size. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 154, pp. 225–244.
- [7] Hosseini, A. Mostofinejad, D. Hajjalilue-bonab, M. (2012). Displacement and strain field measurement in steel and RC beams using particle image velocimetry. *Engineering Mechanics*, Vol. 4, pp. 1–10.
- [8] UNI 11039-2. 2003. *Steel Fiber Reinforced Concrete—Part2: Test Method for Determination of First Crack Strength and Ductility Indexes*.
- [9] EN 12390-3. 2009. *Testing Hardened Concrete—Part3: Compressive Strength of Test Specimens*.
- [10] ACI Committee 211. ACI 211.1-91. 2002. *Standard practice for selecting proportions for normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, Farmington Hills, MI, USA.
- [11] ASTM D 3822. 2014. *Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers*.