

بررسی ویژگی‌های مکانیک شکست بتن‌های الیافی پرمقاومت با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی با دو هندسه متفاوت

علیرضا علی‌اکبری

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
پوریا حاجی کریمی*

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
سینا فلاح حسینی

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

فریدون مقدس‌نژاد

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

چکیده

کاربرد الیاف به منظور جبران نقطه ضعف بتن در مقابله با تنش‌های کششی امری مرسوم و متداول است. در این پژوهش الیاف پلی‌پروپیلن با روکش پلی‌الفین به منظور تقویت مقاومت کششی بتن‌های پرمقاومت استفاده شده است. الیاف به کار گرفته شده به صورت ساده و شبکه‌ای با سه طول ۱۹، ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر بوده که در سه درصد حجمی مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت کششی و مدول الاستیسیته و همچنین ویژگی‌های شکست نمونه‌های تیر شیاردار و دیسک نیم‌استوانه شیاردار به بتن اضافه گردیده‌اند. اضافه کردن الیاف باعث افزایش مقاومت کشش دونیم‌شدگی، کاهش مدول الاستیسیته و افزایش انرژی شکست و طول مشخصه تا ۹۰ برابر شده است. همچنین امکان پذیری استفاده از نمونه‌های دیسک نیم‌استوانه به‌عنوان جایگزین نمونه‌های تیر شیاردار در آزمایش خمش سه نقطه‌ای از طریق آزمون فرضیه مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که نتایج به دست آمده از نمونه تیر و دیسک نیم‌استوانه در سطح اطمینان ۹۰٪ تفاوت معناداری نداشته و می‌توان از نمونه‌های دیسک نیم‌استوانه با حجم و وزنی به میزان ۲۰ برابر کمتر از نمونه‌های تیر به منظور محاسبه مولفه‌های شکست استفاده نمود. همچنین روابط تجربی جهت تبدیل نتایج تیر و دیسک نیم‌استوانه به یکدیگر با استفاده از برازش داده‌ها به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: بتن ایافی، الیاف پلی‌پروپیلن، مکانیک شکست، دیسک نیم‌استوانه شیاردار، تیر شیاردار.

۱- مقدمه

از مکانیک شکست راه حلی مناسب برای درک بهتر نحوه شکل گیری و انتشار ترک است [۹]. بتن ها به دلیل مواردی از قبیل شرایط عمل آوری، روش تولید، تخلخل، نسبت آب به سیمان، وجود افزودنی، حداکثر اندازه سنگدانه و غیره دارای ویژگی های متفاوتی هستند و به همین دلیل میزان بار وارده و زمان مورد نیاز برای گسترش ترک در آن ها متفاوت است [۱۰].

مشخصه های مختلفی در قالب مکانیک شکست قابل بررسی است. از جمله مهم ترین آن ها می توان به انرژی شکست و طول مشخصه که در این پژوهش مورد بحث واقع شده است اشاره نمود. به منظور محاسبه انرژی شکست نمونه های بتنی می توان از آزمایش های مختلفی از قبیل بارگذاری سه نقطه ای (3PBT)، بارگذاری چهار نقطه ای (4PBT)، کشش تک محوره (UTT)، کشش فشرده (CTT)، کشش فشرده اصلاح شده (MCTT)، تقسیم قوه (WST) و غیره اشاره نمود. در روش آزمایش خمش سه نقطه ای که نسبت به روش های آزمایشگاهی دیگر متداول تر است، معمولاً برای بتن از نمونه های تیر شیاردار و برای مخلوط آسفالتی از نمونه های دیسک نیم استوانه (SCB)^۲ شیاردار استفاده می شود [۱۱]. نمونه های SCB به شکل نیم استوانه در ادبیات فنی مربوط به آزمایش خمش سه نقطه ای نمونه های آسفالتی جهت بررسی مدهای مختلف شکست و شبیه سازی گسترش ترک مخلوط های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲، ۱۳].

سیفونتس^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۳ در نتیجه بررسی تأثیر ویژگی های هندسی و مقاومت الیاف پلی پروپیلن بر رفتار شکست بتن های با مقاومت کم، متوسط و بالا دریافتند که افزایش الیاف تأثیر قابل ملاحظه ای در ویژگی های مکانیکی بتن نداشته ولی تأثیر قابل توجهی در رفتار شکست و شکل پذیری به خصوص در بتن با مقاومت کم دارد. همچنین باریک ترین الیاف با بیش ترین طول بهترین نتیجه را حاصل کرده است در حالی که در بتن با مقاومت بالا بهترین نتیجه با استفاده از الیاف ضخیم و مقاوم تر حاصل شده است [۱۴]. در مطالعه ژانگ^۴ و لی^۵ در سال ۲۰۱۳ گزارش شده است که با افزودن الیاف پلی پروپیلن از صفر تا ۰/۱۲ درصد، مشخصه های مکانیک شکست بتن از قبیل انرژی شکست، میزان

بتن در گروه مواد شبه شکننده دسته بندی می شود. در این نوع مواد، ترک خوردگی مسئله ای متداول است. پیش از بارگذاری به دلیل از دست رفتن رطوبت بتن، ریز ترک هایی ایجاد می شوند. این ریز ترک ها می توانند به یکدیگر پیوسته و ترک های بزرگتری را ایجاد نمایند. هنگامی که این ترک ها به حالت بحرانی خود (که در آن مقاومت کششی و تنش کششی وارده برابر می شوند) برسند به سرعت گسترش می یابند [۱، ۲].

به منظور جبران ضعف بتن در برابر ترک خوردگی از میلگرد و الیاف به عنوان اجزاء مقاوم در برابر کشش در ساختار بتن استفاده می شود. از این طریق مشخصه های مکانیکی بتن شامل مقاومت کششی و انرژی شکست بهبود می یابد. الیاف پلی پروپیلن از جمله الیاف شیمیایی نسل جدید بوده که به صورت ناپیوسته برای تولید بتن مسلح استفاده می شود. از مزایای این الیاف می توان به ضد زنگ بودن، قیمت ارزان، کاربرد آسان و ایمن، در دسترس بودن، سازگاری با ترکیبات بتن و وزن مولکولی بالا اشاره نمود [۳].

استفاده از الیاف پلی پروپیلن در بتن باعث جذب انرژی پس از ترک خوردگی، کاهش نفوذ آب در بتن، بهبود مقاومت ذوب و یخبندان، مقاومت سایشی، مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ضربه می شود [۳]. در مطالعه مستوفی نژاد و همکاران بهترین شکل پذیری در بتن پر مقاومت در نمونه حاوی ۱/۵٪ الیاف پلی پروپیلن حاصل شده است [۴]. با افزودن الیاف، میزان حفره های هوای داخل بتن افزایش می یابد و تراکم مخلوط دچار مشکل می شود. در نتیجه، با افزایش حجم این الیاف کارایی بتن کاهش می یابد [۵]. این کاهش کارایی می تواند با اضافه شدن افزودنی های کاهش دهنده آب جبران گردد [۶]. همچنین در مطالعات گنسل^۱ و همکاران مشاهده شده است که با افزایش الیاف، مقاومت کششی غیرمستقیم بتن افزایش یافته است و الیاف با تحمل نیروی کششی مانع از انتشار ترک شده است [۷].

مکانسیم خرابی بتن به دلیل عیب های ذاتی و ماهیت رفتاری آن دارای فرایندی نسبتاً پیچیده در تشکیل و گسترش ترک است [۸]. ترک ها در شرایط مختلف تشکیل شده و گسترش می یابند. استفاده

^۴Zhang
^۵Li

^۱ Gencil
^۲ Semi-Circle Bending (SCB)
^۳ Cifuentes

بازشدگی دهانه ترک، طول مؤثر ترک و غیره بهبود یافته است [۱۵]. بنکاردینو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۲ در پژوهشی به بررسی کاربرد و مقایسه روش‌های مختلف آزمایش‌های مکانیک شکست و رفتار بعد از ترک بتن‌های مسلح با الیاف فولادی با انتهای هلالی با عیار یک و دو درصد حجم بتن پرداخته‌اند. در این پژوهش، اضافه شدن الیاف فولادی با نسبت قطر به طول زیاد موجب بهبود رفتار بتن پر مقاومت بعد از نقطه بار بیشینه و افزایش بسیار زیاد

شکل پذیری شده است. همچنین نمونه‌های تیر بتنی در روش 4PBT مقاومت بیشتری نسبت به روش 3PBT نشان داده است. در نتیجه مقایسه نتایج این دو روش، تفاوت قابل توجهی در مشخصه‌های حاصل از آن‌ها دیده نشده است و مهم‌ترین تفاوت مربوط به تنش بیشینه است [۱۶]. مطالعات دیگری نیز بر مبنای مقایسه آزمایش‌های مکانیک شکست انجام شده است که به صورت مختصر در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- پژوهش‌های مقایسه‌ای آزمایش‌های مختلف مکانیک شکست

محقق	روش‌های استفاده شده	مشاهدات	دلایل تفاوت در مقادیر اندازه‌گیری شده
کورت ^۲ و همکاران [۱۸]	3PBT WST	- انرژی شکست در روش 3PBT تقریباً دو برابر روش WST به دست آمده است. - حداکثر نیرو در روش WST تقریباً ۴۰٪ بیشتر از روش 3PBT بوده است. داد.	دلیل تفاوت در نتایج دو آزمایش را می‌توان به اندازه نمونه، شکل و وزن متفاوت و همچنین وضعیت تنش متغیر در مجاورت ترک و ذخیره احتمالی انرژی الاستیک در طول آزمایش نسبت داد.
هولوسووا ^۳ و همکاران [۱۹]	MCTT WST	- میزان انرژی شکستگی به دست آمده در روش MCTT بیشتر از روش WST بوده است. - حداکثر بار در روش MCTT تقریباً دو برابر روش WST بوده است.	- مقادیر مختلف نتایج به دست آمده از دو روش می‌تواند ناشی از سیستم جابجایی باشد که در آن محدودیت محور بارگذاری مانع از چرخش قطعات منفرد نمی‌شود. - اثر کاهش وزن و کاهش تنش در انتهای نمونه مؤثر است.
هولوسووا و همکاران [۲۰]	3PTB (a*=0.33,0.50) MCTT (a=0.50) WST (a=0.2,0.050)	- بیشترین و کمترین انرژی شکست به ترتیب مربوط به روش MCTT و WST در طول شیار به قطر ۰/۵ بوده است. - نمونه‌های با طول شیار به قطر ۰/۲ و ۰/۵ در روش WST به ترتیب دارای حداکثر و حداقل مقدار بار بیشینه بوده‌اند.	بر اساس نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در این تحقیق، دلیل پایین بودن مقدار انرژی شکست نمونه‌های آزمایش شده با روش WST، افت شدید بخش انتهایی منحنی نیرو بر حسب بازشدگی دهانه ترک است.
ژائو ^۴ و همکاران [۲۱]	WST 3PBT	وابستگی انرژی شکست به ابعاد نمونه-های آزمایشگاهی در روش WST نسبت به 3PBT بیشتر بوده و با افزایش ابعاد افزایش می‌یابد.	اختلاف در تنش و توزیع کرنش در هندسه و شکل منطقه انتشار ترک در دو روش آزمایشگاهی استفاده شده عامل اصلی تفاوت در مقادیر به دست آمده از دو روش گزارش شده است.

* پارامتر a نسبت طول شیار به قطر نمونه را نشان می‌دهد

ZS200 (کوچکترین سنگدانه)، پودر میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان و افزایش دهنده مقاومت، الیاف پلی پروپیلن با روکش پلی الفین به منظور تقویت مقاومت کششی و افزودنی فوق روان کننده با وزن مخصوص ۱ تا ۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب و فاقد یون کلر استفاده شده است. الیاف پلی الفین به دو شکل ساده و شبکه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. الیاف ساده با طول ۳۰ میلیمتر و الیاف شبکه‌ای با سه طول ۱۹، ۳۰ و ۵۰ میلیمتر در سه درصد حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از انجام آزمایش‌های مکرر و آزمون و خطا با مینا قرار دادن مقاومت فشاری حداقل ۴۵ مگا پاسکال، در نهایت طرح اختلاط نشان داده شده در جدول ۲ به منظور ساخت ۱ مترمکعب مخلوط بتنی با مقاومت فشاری ۴۸ مگا پاسکال انتخاب شده است.

به منظور ساخت بتن ابتدا سنگدانه MR150 به همراه یک سوم الیاف، سپس سنگدانه ZS200 به همراه یک سوم دیگر الیاف، و پس از آن پودر میکروسیلیس عبوری از الک شماره ۳۰، سیمان و یک سوم باقیمانده الیاف وارد میکسر شده است. به منظور یک‌نواختی توزیع الیاف در مخلوط، مصالح خشک و الیاف به مدت ۲ دقیقه مخلوط شده‌اند. پس از آن روان کننده و آب (با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱) اضافه گشته و اختلاط به مدت ۵ دقیقه با دور تند ادامه یافته است تا مخلوط بتنی همگن حاصل شود.

جدول ۲- طرح اختلاط ساخت یک مترمکعب بتن الیافی

وزن (کیلوگرم)	نام مصالح
۸۸۰	سیمان
۲۲۰	میکرو سیلیس
۲۴۰	ZS200
۶۲۴	MR150 سنگدانه‌ها
۹۶	R101
۶/۶	فوق روان کننده (۰/۶ درصد عیار بتن)
۴/۵۵	۰/۵ درصد حجمی بتن
۹/۱	۱ درصد حجمی بتن
۱۳/۶۵	۱/۵ درصد حجمی بتن
۳۴۱	آب

تا کنون تأثیر الیاف بر رفتار مکانیکی و ویژگی‌های شکست بتن در تحقیقات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. در اغلب آن‌ها از الیاف فولادی در نمونه‌های بتن پرمقاومت استفاده شده است و کمتر به استفاده از الیاف پلی پروپیلن با روکش پلی الفین پرداخته شده است [۱۷]. نوآوری و تمایز این پژوهش به سه وجه اصلی زیر تقسیم می‌شود:

- نوع آزمایش‌های انجام گرفته
 - امکان سنجی استفاده از نمونه SCB به عنوان جایگزین نمونه تیر شیاردار
 - نوع الیاف استفاده شده
- وزن و حجم ۲۰ برابر کمتر نمونه SCB نسبت به نمونه تیر موجب راحتی بیشتر در جابجایی، کاهش هزینه ساخت نمونه، کاهش استهلاک دستگاه و کاهش فضای مورد نیاز برای نگهداری می‌شود. مزایای یاد شده نمونه SCB نسبت به تیر، یکی از دلایل تعریف این پژوهش است. در نتیجه، امکان سنجی استفاده از نمونه SCB به عنوان جایگزین نمونه تیر به عنوان یکی از اهداف و نوآوری‌های این پژوهش تعریف شده است. در این پژوهش از نمونه SCB به منظور بررسی رفتار شکست و گسترش ترک در مدهای مختلف شکست بتن الیافی استفاده شده است و نتایج آزمایش‌های مربوط به نمونه تیر شیاردار و SCB مقایسه شده است تا تأثیر هندسه نمونه مورد ارزیابی قرار گیرد. بدیهی است این مقایسه با توجه به مزیت نمونه دیسک نیم‌استوانه به دلیل حجم و وزن کمتر نمونه و صرف هزینه و زمان کمتر انجام آزمایش می‌تواند راهنمای مناسبی جهت انتخاب نوع نمونه آزمایش 3PBT در تحقیقات آتی باشد و امکان استفاده از نمونه SCB را به عنوان جایگزین نمونه تیر بررسی نماید. به این منظور در این پژوهش از الیاف پلی پروپیلن با روکش پلی الفین ساده و شبکه‌ای در بتن استفاده شده است. داده‌های این پژوهش در قالب یک برنامه آزمایشگاهی جمع آوری شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح و طرح اختلاط

در این پژوهش به منظور ساخت نمونه‌های بتنی از مصالح سیمان تیپ دو خمسه به عنوان چسباننده، سنگدانه سیلیسی در ۳ سایز MR150 (بزرگترین سنگدانه)، R101 (سنگدانه متوسط) و

۲-۲- آماده‌سازی نمونه

با توجه به طول الیاف و درصد حجمی استفاده شده از آن‌ها در ساخت نمونه‌ها، نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده طبق جدول ۳ نامگذاری شده‌اند. عدد اول پس از PE طول الیاف بر حسب میلی‌متر، عدد دوم درصد حجمی آن و حرف S نشان‌دهنده ساده بودن الیاف می‌باشد.

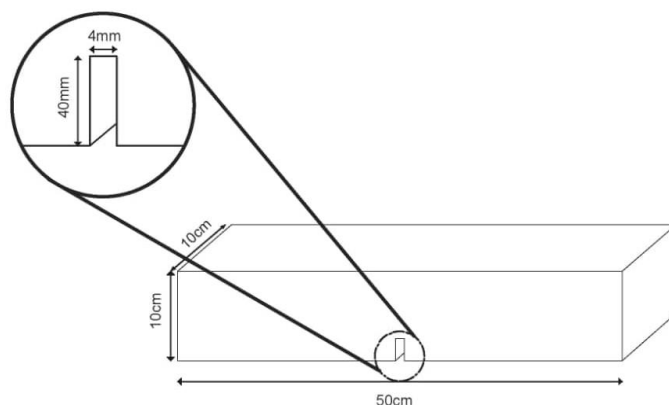
به منظور انجام آزمایش‌های مورد نظر در این پژوهش، برای هر درصد و طول الیاف نمونه‌های زیر ساخته شده است و کلیه نمونه‌های بتنی به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب تحت عمل‌آوری قرار گرفته‌اند:

- ۲ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر
- ۳ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر
- ۳ نمونه تیر منشوری شیاردار به ابعاد $۱۰ \times ۱۰ \times ۵۰$ سانتی‌متر با شیار به ارتفاع ۴۰ و ضخامت ۴ میلی‌متر (شکل ۱)
- یک نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر که به دلیل پدیده جمع‌شدگی الیاف، ابتدا و انتهای آن به میزان ۵ سانتی‌متر بریده و کنار گذاشته می‌شود و پس از آن در ارتفاع به ضخامت‌های $۲/۵$ سانتی‌متری برش داده می‌شود. دیسک‌های به دست آمده نصف شده و توسط دستگاه واترجت^۱ شیار به ارتفاع ۱۵ و ضخامت ۴ میلی‌متر در آن ایجاد می‌شود. شکل ۲ نحوه ساخت این نمونه‌ها را نشان داده است.

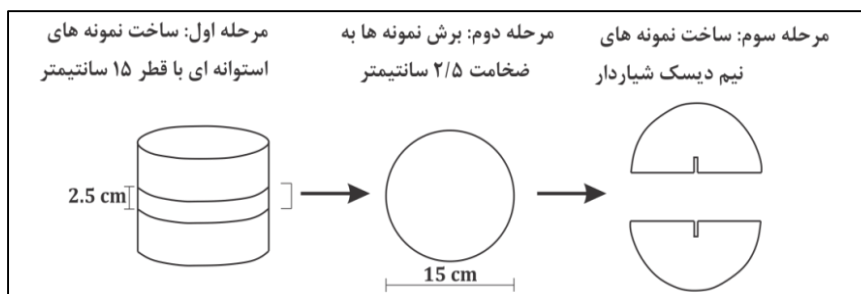
۳-۲- روش انجام آزمایش

۳-۲-۱- آزمایش تعیین مقاومت کشش دو نیم‌شدگی (آزمایش کشش برزیلی)

آزمایش تعیین مقاومت کشش دو نیم‌شدگی (کشش برزیلی) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای $۱۰ \times ۲۰ \times ۱۰۰$ میلی‌متر ۲۸ روزه و مطابق با استاندارد ASTM C496 [۲۲] انجام شده است. در این آزمایش نمونه استوانه‌ای به صورت افقی زیر جک فشاری دستگاه قرار گرفته و مطابق با استاندارد با سرعت ۶۸۰ کیلوگرم بر ثانیه بارگذاری می‌شود تا نیروی کششی از طریق اعمال نیروی فشاری بر نمونه وارد شود.

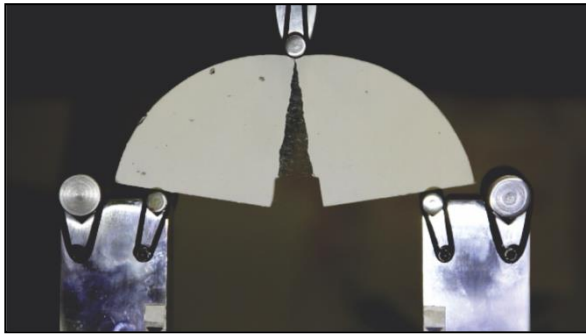


شکل ۱- نمونه تیر شیاردار بتنی با ابعاد $۱۰ \times ۱۰ \times ۵۰$ سانتی‌متر



شکل ۲- روش ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی دیسک نیم‌استوانه شیاردار جهت انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای

است، مطابق با استاندارد BS EN12697-44:2010 [۲۴] انجام شده است. نمونه مطابق شکل ۳ زیر جک دستگاه یونیورسال قرار گرفته، با سرعت ۰/۵ میلی متر بر دقیقه بارگذاری شده و در فرآیند بارگذاری تغییر شکل وسط دهانه ثبت گردیده است.



شکل ۳ - مجموعه آزمایش خمش سه نقطه‌ای دیسک نیم استوانه شیاردار پس از باز شدن ترک

۲-۳-۳-۲- آزمایش خمش سه نقطه‌ای تیر مستطیلی شیاردار

این آزمایش بر روی نمونه‌های مکعب مستطیل به ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی متر و شیاری به ضخامت ۴ و ارتفاع ۴۰ میلی متر، مطابق با استاندارد RILEM TC-50 FMC [۲۵] انجام شده است. نمونه مطابق شکل ۴ تحت بارگذاری با سرعت ۰/۵ میلی متر بر دقیقه قرار گرفته است.



شکل ۴ - مجموعه آزمایش خمش سه نقطه‌ای تیر مستطیلی شیاردار

۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌های ذکر شده در بخش دو ارائه شده و نتایج به دست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

جدول ۳- نامگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی

نامگذاری نمونه	حجم الیاف (درصد)	طول الیاف (میلی متر)	نوع الیاف
PEs30-0.5	۰/۵	-	پلی الفین ساده
PEs30-1.0	۱	۳۰	
PEs30-1.5	۱/۵		
PE19-0.5	۰/۵		
PE19-1.0	۱	۱۹	
PE19-1.5	۱/۵		
PE30-0.5	۰/۵		پلی الفین شبکه‌ای
PE30-1.0	۱	۳۰	
PE30-1.5	۱/۵		
PE50-0.5	۰/۵		
PE50-1.0	۱	۵۰	
PE50-1.5	۱/۵		

۲-۳-۲- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

آزمایش تعیین مدول الاستیسیته بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر ۲۸ روزه و مطابق با استاندارد ASTM C469 [۲۳] انجام شده است. در این آزمایش نمونه به صورت عمودی زیر جک قرار گرفته و بارگذاری با سرعت ۱/۲۵ میلی متر بر دقیقه انجام می‌شود.

۳-۳-۲- آزمایش تعیین مقاومت خمشی

به منظور تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی از آزمایش خمش سه نقطه‌ای و دو نوع نمونه دیسک نیم استوانه شیاردار و تیر مستطیلی شیاردار استفاده شده است.

۲-۳-۱- آزمایش خمش سه نقطه‌ای دیسک نیم استوانه شیاردار

این آزمایش بر روی نمونه‌های نیم استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ضخامت ۲/۵ سانتی متر که دارای شیاری به ضخامت ۴ و ارتفاع ۱۵ میلی متر

بیشترین مقدار مقاومت کشش برزیلی مربوط به نمونه PE19- 1.5 است.

۲-۳- مدول الاستیسیته

بر اساس استاندارد ASTM C469 مدول الاستیسیته برابر شیب نمودار نیرو-جابجایی عمودی در ۴۰ درصد بیشینه می‌باشد که از رابطه ۲ به دست می‌آید و نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2)$$

که در آن:

E = مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)

ε_1 : ۰/۰۰۰۰۵

ε_2 : کرنش در ۴۰ درصد نیرو نهایی

S_1 : تنش متناظر با کرنش ۰/۰۰۰۰۵ (مگاپاسکال)

S_2 : تنش متناظر با ۴۰ درصد بار نهایی (مگاپاسکال)

باتوجه به نتایج ارائه شده در شکل ۶، اضافه شدن الیاف تأثیر بسزایی در مقدار مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی دارد، به نحوی که با افزایش درصد حجمی در طول یکسان الیاف مدول الاستیسیته نمونه‌های بتن الیافی کاهش یافته است.

۱-۳- مقاومت کشش دونیم‌شدگی (کشش برزیلی)

نتایج ارائه شده برای مقاومت کشش دونیم‌شدگی (کشش برزیلی) حاصل از میانگین ۳ تکرار برای هر نوع نمونه است که از رابطه ۱ به دست می‌آید. نتایج به دست آمده در شکل ۵ نشان شده است.

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

که در آن:

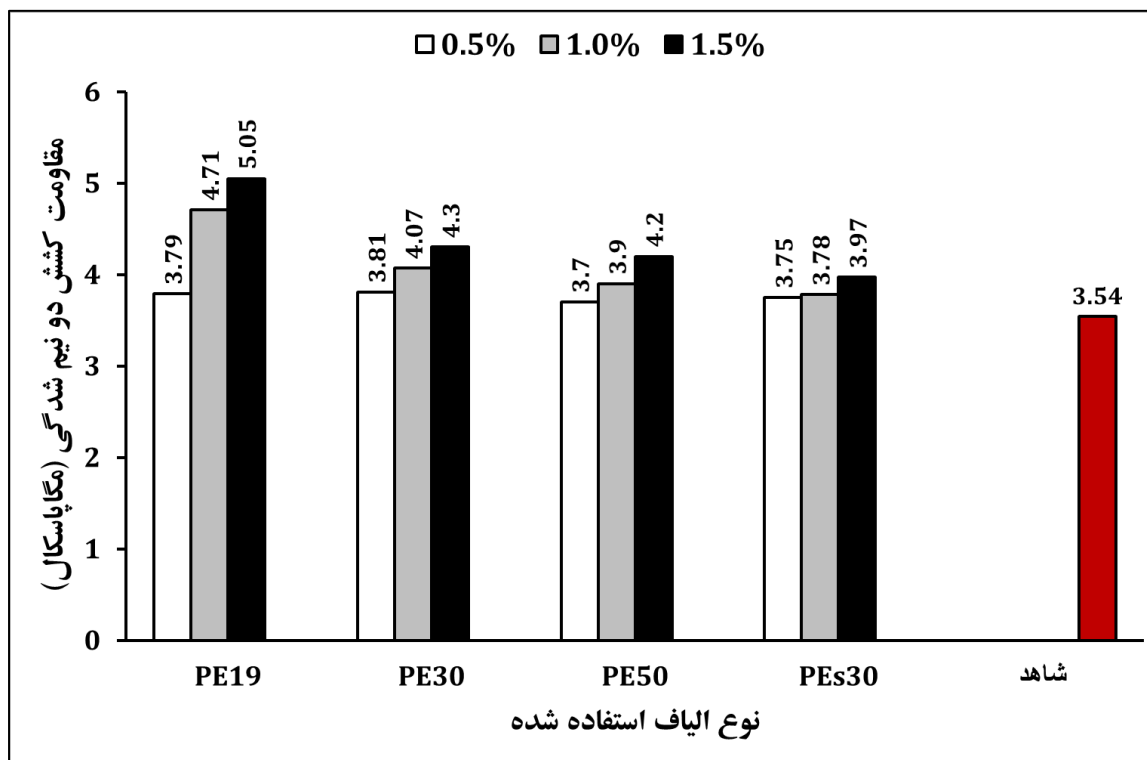
T : مقاومت کشش دونیم‌شدگی (کیلوگرم بر سانتیمترمربع)

P : حداکثر بار اعمالی (کیلوگرم)

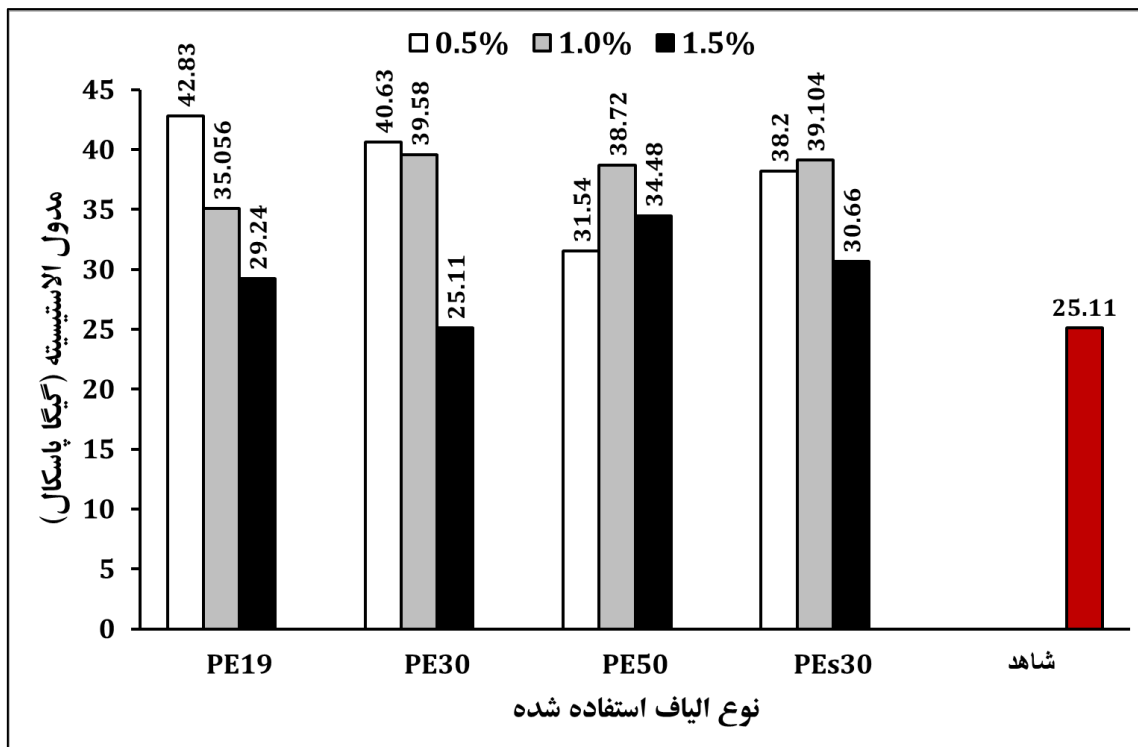
L : طول نمونه (سانتیمتر)

D : قطر نمونه (سانتیمتر)

همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، با اضافه شدن الیاف مقاومت کشش دونیم‌شدگی افزایش می‌یابد اما افزایش طول در درصد حجمی ثابت باعث کاهش آن شده است که دلیل آن تعداد کمتر الیاف استفاده شده است. در واقع با افزایش طول در درصد حجمی ثابت تعداد کم‌تری الیاف به مخلوط اضافه می‌شود. لذا می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که برای بالا بردن مقاومت کشش دونیم‌شدگی (کشش برزیلی) باید از الیاف با طول کوتاه‌تر و درصد حجمی بیشتر استفاده شود. شکل ۵ نشان می‌دهد که



شکل ۵- مقاومت کشش دونیم‌شدگی نمونه‌های آزمایشگاهی بتن الیافی



شکل ۶ - مدول الاستیسیته نمونه‌های آزمایشگاهی بتن الیافی

$$G_f = \frac{w_0 + mg \frac{s}{u} \delta_s}{B(w-a)} \quad (3)$$

که در آن:

G_f : انرژی شکست (N/mm)

w_0 : مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی عمودی (N.mm)

mg : وزن بین دو تکیه گاه (N)

s : فاصله بین دو تکیه گاه (m)

u : طول تیر (m)

δ_s : تغییر شکل تیر (mm)

B : عرض تیر (mm)

w : ارتفاع تیر (mm)

a : ارتفاع شیار (mm)

همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است با اضافه شدن الیاف، انرژی شکست نسبت به نمونه شاهد تا ۹۰ برابر افزایش یافته است. همچنین با افزایش درصد حجمی و طول الیاف، انرژی شکست برای هر دو نوع نمونه افزایش یافته است. با این وجود، افزایش درصد الیاف کارآمدتر از افزایش طول آن است. علت موثرتر بودن افزایش درصد نسبت به افزایش طول ایجاد شدن پراکندگی بیشتر در مخلوط

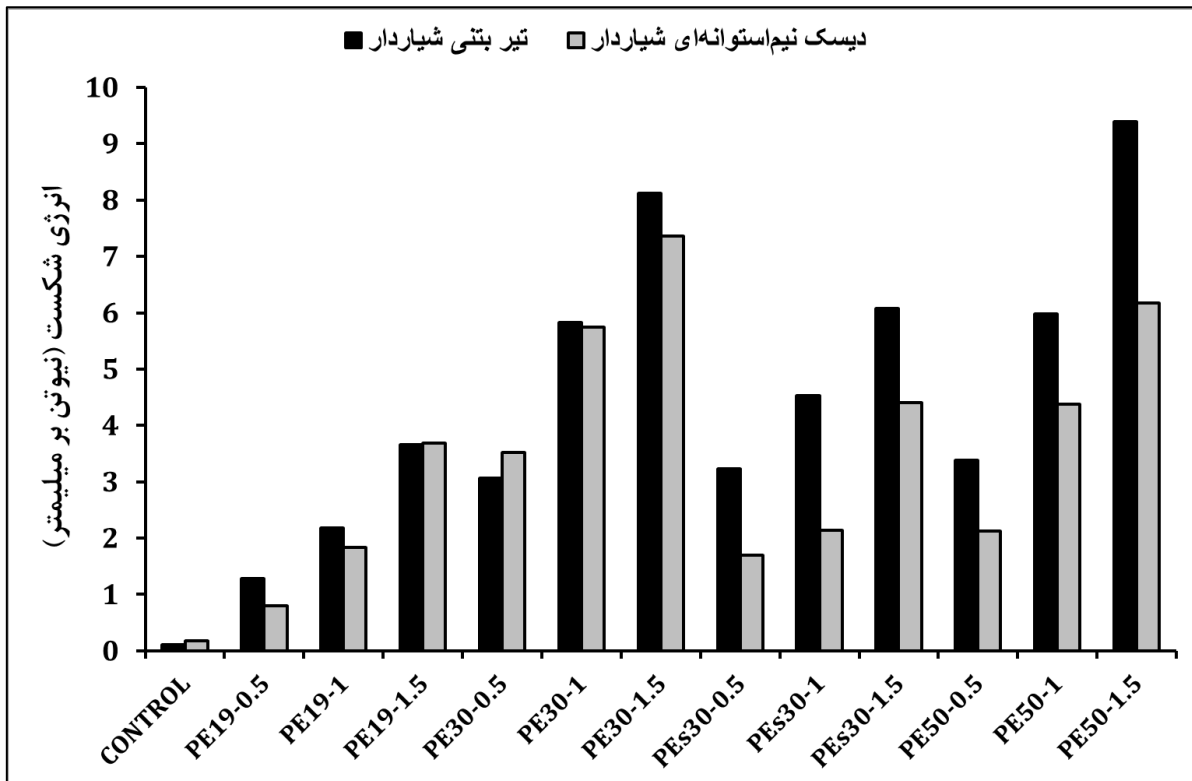
۳-۳-۳- مشخصه‌های شکست

برای به دست آوردن ویژگی‌های شکست دیسک نیم‌استوانه شیاردار از استاندارد RILEM TC162-TDF [۲۶] و برای تیر شیاردار از استاندارد RILEM TC50-FMC استفاده شده است. در هر دو استاندارد نتایج خروجی آزمایش خمش سه نقطه‌ای (نمودار نیرو - جابجایی) مبنای کار قرار گرفته است. با استفاده از نمودارهای نیرو - جابجایی پارامترهای شکست شامل انرژی شکست و طول مشخصه محاسبه گشته و در نهایت نتایج حاصله از دو نوع نمونه با یکدیگر مقایسه شده است.

۳-۳-۱- انرژی شکست

انرژی شکست مهم‌ترین مشخصه خصوصیات مکانیک شکست می‌باشد که میزان انرژی دریافت شده توسط نمونه و سپس مستهلک شدن آن را نشان می‌دهد. میزان دوام نمونه تحت بارگذاری کاملاً وابسته به انرژی شکست است و افزایش آن با افزایش مقاومت نمونه در برابر ترک خوردگی همراه است. انرژی شکست مطابق استاندارد RILEM 50FMC [۲۵] از رابطه ۳ محاسبه شده و نتایج آن برای تیر شیاردار و دیسک نیم‌استوانه شیاردار در شکل ۷ نشان داده شده است.

است که می‌تواند قسمت‌های بیشتری را تحت پوشش قرار دهد. به بیان دیگر افزایش تعداد الیاف در نمونه دلیل اصلی این اثر است. به طور مثال برای الیاف با طول ۱۹ میلی‌متر اگر درصد حجمی آن از ۰/۵ به ۱/۵ افزایش یابد انرژی شکست حدوداً ۴/۷ برابر می‌شود لیکن اگر در همان درصد حجمی طول الیاف را از ۱۹ به ۵۰ میلی‌متر تغییر دهیم انرژی شکست تنها ۲/۷ برابر خواهد شد.



شکل ۷- انرژی شکست نمونه‌های تیر بتنی و نمونه‌های دیسک نیم‌استوانه شیاردار برای کلیه نمونه‌های آزمایشگاهی

همان‌طور که از نتایج قابل مشاهده است، انرژی شکست نمونه شاهد در روش دیسک نیم‌استوانه ۱/۷۵ برابر روش تیر شیاردار است اما با اضافه شدن الیاف، در اغلب نمونه‌ها مقدار انرژی شکست تیر بیشتر شده است. در نمونه‌های دارای الیاف ۱۹ و ۳۰ میلی‌متر، مقادیر دو نمونه نزدیک است و الیاف در هر دو نمونه به خوبی عمل کرده است. اما با افزایش طول الیاف به ۵۰ میلی‌متر مقدار انرژی شکست تیر بسیار بیشتر شده است. این نتایج بیانگر عملکرد ضعیف نمونه SCB در ارزیابی رفتار نمونه‌های بتن حاوی الیاف با طول ۵۰ میلی‌متر است. علت این اختلاف را می‌توان محدودیت ابعادی نمونه دیسک نیم‌استوانه دانست که با افزایش طول الیاف به ۵۰ میلی‌متر، ساز و کار عملکرد الیاف در نمونه تغییر کرده است.

طول مشخصه تردی کاهش و شکل پذیری افزایش می‌یابد. علاوه بر انرژی شکست، پارامترهای دیگری از قبیل مقاومت کشش دو نیم‌شدگی و مدول الاستیسیته بر طول مشخصه تأثیر دارند. برای محاسبه طول مشخصه از رابطه ۴ استفاده می‌شود که نتایج آن برای هر دو نوع نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است [۲۷].

$$L_{ch} = \frac{EG_f}{f_{st}^2} \quad (4)$$

که در آن:

L_{ch} : طول مشخصه (mm)

E: مدول الاستیسیته (GPa)

G_f : انرژی شکست (N/mm)

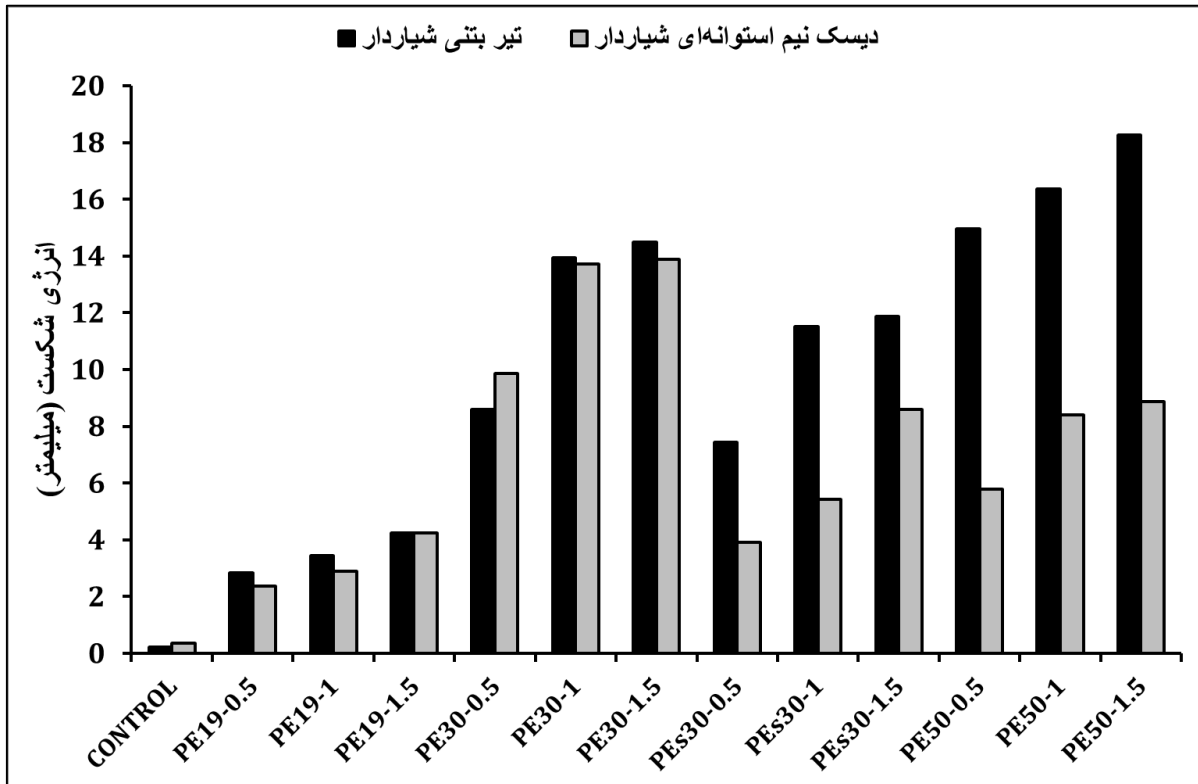
f_{st} : مقاومت کشش برزیلی (MPa)

با اضافه شدن الیاف، طول مشخصه برای هر دو نوع نمونه نسبت به نمونه شاهد خود افزایش چشم‌گیری داشته به نحوی که تا ۸۷ برابر افزایش

۳-۲- طول مشخصه

طول مشخصه یکی دیگر از مشخصه‌های مکانیک شکست ماده و عاملی مهم در تعیین شکل‌پذیری و تردی نمونه‌ها است. با افزایش

مشاهده شده است. افزایش طول الیاف از ۱۹ به ۵۰ میلی متر به ترتیب باعث افزایش ۴/۳ و ۳/۸ برابری طول مشخصه نمونه های تیر و SCB شده است. همانطور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، عملکرد دو نوع نمونه در طول الیاف ۱۹ و ۳۰ میلی متر نزدیک است. در نمونه های با طول الیاف ۵۰ میلی متر همانند انرژی شکست، محدودیت ابعادی نمونه SCB باعث عملکرد نامناسب الیاف و ایجاد اختلاف چشم گیر بین نتایج دو نوع نمونه شده است. در نتیجه، می توان روی نامناسب بودن نمونه SCB در بررسی عملکرد الیاف با طول بیش از ۳۰ میلی متر در بتن تأکید نمود.



شکل ۸- طول مشخصه نمونه های تیر بتنی و نمونه های دیسک نیم استوانه شیاردار برای کلیه نمونه های آزمایشگاهی

همچنین برای نگهداری در استخر آب و آزمایشگاه فضای بسیار کمتری اشغال خواهد کرد.

به منظور تعیین امکان استفاده از نمونه های دیسک نیم استوانه شیاردار به عنوان جایگزین نمونه های تیر شیاردار بتنی، نتایج حاصل از انرژی شکست و طول مشخصه دو نوع نمونه به کمک آزمون فرضیه^۱ مقایسه شده است. فرضیه های این آزمون به شرح رابطه ۵ می باشد. برای بررسی این فرضیه به دلیل عدم دسترسی به انحراف معیار مجموعه از آزمون t استفاده شده است که در آن t محاسباتی مطابق رابطه ۶ و t بحرانی از جداول مربوطه بدست آمده است. اگر t محاسباتی از t بحرانی بیشتر باشد فرضیه H_0 رد می شود و چنانچه کمتر باشد آنگاه در سطح اطمینان مربوطه نمی توان فرضیه H_0 را رد نمود.

۳-۴- مقایسه نتایج آزمون خمش تیر شیاردار و دیسک نیم صفحه شیاردار

با توجه به حجم و وزن کمتر نمونه های دیسک نیم استوانه شیاردار نسبت به تیر شیاردار، این نمونه می تواند از لحاظ اقتصادی و استهلاکی به صرفه تر باشد. با حجمی که برای ساخت سه نمونه تیر شیاردار مصرف می شود (با احتساب دورریز ۵ سانتی متر ابتدا و انتهای آن) می توان ۶۰ نمونه دیسک نیم استوانه ساخت که علاوه بر صرفه جویی در هزینه و مصالح امکان افزایش تکرار جهت دستیابی به نتایج دقیق تر را نیز فراهم می آورد. نمونه های تیر شیاردار حدود ۱۲ کیلوگرم وزن دارند که جابجایی آن ها بسیار دشوار است. در حالیکه وزن نمونه های دیسک نیم استوانه شیاردار حدود ۰/۵ کیلوگرم است و برای جابجایی مطلوبیت بیشتری دارد.

^۱ Hypothesis Testing

به این منظور به کمک داده‌های الیاف شبکه‌ای موجود، مدل‌های خطی و توانی برای مشخصه‌های مکانیک شکست ساخته شده که متغیر مستقل آن (X) نتایج تیر و متغیر وابسته آن (Y) نتایج آزمایش دیسک نیم‌استوانه است. شکل ۹ برآزش دو مدل را نشان داده است.

جدول ۴- مولفه‌های آزمون t

مشخصه شکست	t محاسباتی	درجه آزادی	سطح اطمینان	t بحرانی
انرژی شکست	۱/۳۵۸	۲۰/۹	٪۹۰	۱/۷۲۱
طول مشخصه	۱/۴۰۷	۲۱/۶	٪۹۰	۱/۷۱۹

با استفاده از داده‌های مربوط به نمونه‌های ساخته شده با الیاف ساده و بهره‌گیری از آزمون فرضیه اعتبارسنجی مدل انجام شده که نتایج آن به همراه مجموع مربعات خطاها در جدول ۵ قابل مشاهده است. نکته قابل توجه در مقایسه نتایج تیر و دیسک نیم‌استوانه این است که در طول الیاف ۱۹ میلی‌متر مشخصه‌های مکانیک شکست تیر و دیسک نیم‌استوانه بسیار نزدیک به یکدیگر بوده و با افزایش طول الیاف مصرفی، اختلاف آن‌ها افزایش یافته است که نشان از عملکرد بهتر نمونه‌های دیسک نیم‌استوانه شیاردار در طول الیاف کمتر و مختل شدن عملکرد آن در طول الیاف بیشتر است.

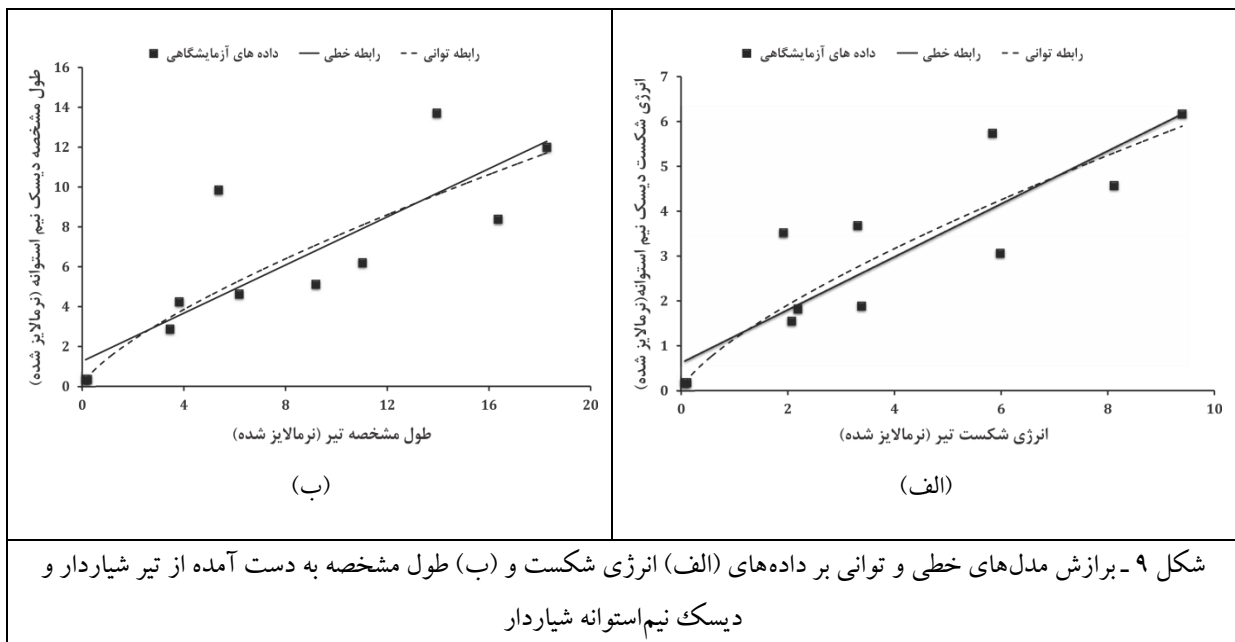
$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (5)$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

$$t_{cal} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (6)$$

برای استفاده از آزمون فرضیه ابتدا داده‌های انرژی شکست بر ۹/۳۹۳ و داده‌های طول مشخصه بر ۱۸/۲۷۲ که بزرگترین مقدار هر مشخصه هستند تقسیم شده تا تمامی داده‌ها نرمال شوند و در بازه صفر تا ۱ قرار گیرند. با توجه به جدول ۴ که نشان‌دهنده مولفه‌های آزمون t است، به دلیل کوچک‌تر بودن t محاسباتی نسبت به t بحرانی در سطح اطمینان ۹۰٪ نمی‌توان فرضیه H_0 را رد نمود پس انرژی شکست‌ها و طول مشخصه‌های بدست آمده از دو نوع نمونه با یکدیگر تفاوت معناداری نداشته و در نتیجه می‌توان از نمونه‌های دیسک نیم‌استوانه شیاردار به‌عنوان جایگزین تیر شیاردار استفاده نمود که از جمله مزایای آن کاهش هزینه، زمان کوتاه‌تر آزمایش، فضای اشغالی و حجم مصالح مصرفی کمتر و کاهش استهلاک اپراتور و دستگاه می‌باشد.

پس از مشخص شدن امکان استفاده از نمونه‌های دیسک نیم‌استوانه شیاردار به‌عنوان جایگزین تیر شیاردار می‌توان با استفاده از رگرسیون رابطه‌ای تجربی بین نتیجه این دو آزمایش در نظر گرفت تا در صورت نیاز نتایج دو آزمایش به یکدیگر قابل تبدیل باشند.



جدول ۵- رابطه خطی و توانی بین مشخصه‌های شکست نمونه‌های تیر شیاردار و دیسک نیم‌استوانه شیاردار

مشخصه مکانیک شکست	نوع مدل	مدل	مجموع مربعات خطاها	ارزیابی مدل در ۹۰٪ اطمینان
انرژی شکست	خطی	$y = 0.5903x + 0.63$	۰/۷۸۴۸	قابل قبول
	توانی	$y = 1.1535x^{0.7282}$	۰/۹۵۰۶	قابل قبول
طول مشخصه	خطی	$y = 0.6041x + 1.253$	۰/۷۲۴۲	قابل قبول
	توانی	$y = 1.3983x^{0.7314}$	۰/۹۵۱۵	قابل قبول

۴- نتیجه‌گیری

درصدهای پایین تر الیاف، مقادیر انرژی شکست دو نمونه تیر و دیسک نیم‌استوانه نزدیک به یکدیگر بوده است اما با افزایش طول الیاف از ۳۰ به ۵۰ میلی‌متر تفاوت نتایج این نمونه‌ها زیاد شده است. دلیل این پدیده محدودیت ابعادی نمونه SCB است که مانع از عملکرد مناسب الیاف با طول ۵۰ میلی‌متر شده است. در نتیجه، استفاده از نمونه دیسک نیم‌استوانه برای نمونه‌های حاوی الیاف با طول بیش از ۳۰ میلی‌متر توصیه نمی‌شود.

با اضافه شدن الیاف، طول مشخصه برای نمونه تیر و SCB نسبت به نمونه شاهد خود به ترتیب ۸۷ و ۳۸ برابر شده است که افزایش چشم‌گیری محسوب می‌شود. همانند انرژی شکست و به دلیل مشابه ناتوانی نمونه SCB در نمونه‌های حاوی الیاف با طول ۵۰ میلی‌متر در طول مشخصه نیز مشهود است. بهترین نتیجه برای نمونه تیر و SCB به ترتیب در نمونه‌های PE50-1.5 و PE30-1.5 حاصل شده است.

با استفاده از نظریه فرضیه و آزمون t در سطح اطمینان ۹۰٪ نمی‌توان گفت نتایج حاصل از دو نمونه تفاوت معناداری با یکدیگر دارند لذا می‌توان از نمونه‌های دیسک نیم‌استوانه به‌عنوان جایگزین تیر استفاده نمود و مانعی وجود نخواهد داشت. روابط تجربی‌ای برای تبدیل نتایج تیر و SCB به یکدیگر برآزش شده است. نتیجه اعتبارسنجی آن‌ها با استفاده از نتایج الیاف ساده نشان از معتبر بودن مدل‌های ارائه شده در سطح اطمینان ۹۰٪ دارد و می‌توان با استفاده از آن‌ها نتایج تیر و دیسک نیم‌استوانه را به یکدیگر تبدیل نمود.

۵- منابع

[1] Bazant, Z.P., Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. 2019: Routledge.

در این پژوهش تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن با روکش پلی‌الفین بر خواص مکانیک شکست بتن پر مقاومت با استفاده از دو نوع نمونه تیر شیاردار و نمونه SCB مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از نمونه SCB در مخلوط‌های آسفالتی امری رایج است. وزن کمتر، سهولت بیشتر در جابجایی، نگهداری و عمل‌آوری و کاهش هزینه‌ها از مزایای نمونه SCB نسبت به تیر محسوب می‌شود. در این پژوهش استفاده از نمونه‌های SCB به‌عنوان جایگزین نمونه‌های تیر امکان‌سنجی شده است. در این راستا نتایج بر پایه یک برنامه آزمایشگاهی متشکل از آزمایش‌های تعیین مقاومت کشش دو نیم‌شدگی، تعیین مدول الاستیسیته و خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه تیر و SCB جمع‌آوری شده است. پس از بررسی نتایج آزمایش‌ها، نتایج زیر حاصل شده است:

با اضافه شدن الیاف، مقاومت کشش دو نیم‌شدگی نمونه‌ها تا ۴۲٪ در نمونه PE19-1.5 افزایش یافته است. با این حال افزایش طول در درصد ثابت به دلیل کاهش یافتن تعداد الیاف، باعث کاهش مقاومت کشش دو نیم‌شدگی شده است. به منظور افزایش مقاومت کشش دو نیم‌شدگی بتن الیافی، افزایش درصد حجمی الیاف با طول کوتاه‌تر روشی کارآمدتر است.

با اضافه شدن الیاف موجب افزایش مدول الاستیسیته تا ۷۱٪ در نمونه PE19-0.5 شده است. با افزایش درصد الیاف در طول ثابت، مدول الاستیسیته کاهش یافته است و بیشترین تأثیر در نمونه با طول و درصد کمتر حاصل شده است.

با افزایش درصد حجمی و طول الیاف، انرژی شکست برای نمونه‌های تیر شیاردار بتنی و نمونه‌های دیسک نیم‌استوانه نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۹۰ و ۴۰ برابر شده است. در طول و

- Cantilever Beam (SCB) Fracture Specimen. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2020.
- [14] Cifuentes, H., et al., Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC. *Construction and Building Materials*, 2013. 45: p. 130-137.
- [15] Zhang, P. and Q. Li, Fracture Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Containing Fly Ash and Silica Fume. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013. 5(2): p. 665-670.
- [16] Bencardino, F., et al., Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 2013. 46: p. 31-38.
- [17] بهمنی، ه. و د. مستوفی نژاد، بررسی خواص مکانیکی بتن با عمل کرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف پلی پروپیلن و الیاف ماکروی مصنوعی (بارچپ). تحقیقات بتن، ۲۰۱۹، ۱۲(۴): 15-26 p.
- [18] Korte, S., et al., Static and fatigue fracture mechanics properties of self-compacting concrete using three-point bending tests and wedge-splitting tests. *Construction and Building Materials*, 2014. 57: p. 1-8.
- [19] Holušová, T., S. Seitzl, and A. Fernández-Canteli, Numerical support of experimental compact tension test on concrete cylindrical specimens. *Transactions of the VŠB-Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*, 2013. 13(2): p. 31-40.
- [20] Holušová, T., S. Seitzl, and A.F. Canteli. Comparison of fracture energy values obtained from 3PB, WST and CT test configurations. in *Advanced Materials Research*. 2014. Trans Tech Publ.
- [21] Zhao, Z., S.H. Kwon, and S.P. Shah, Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy. *Cement and Concrete Research*, 2008. 38(8-9): p. 1049-1060.
- [22] Standard, A., C496. (2017). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.
- [23] Standard, A., C469, 2014, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, DOI: 10.1520/C0469_C0469M-14.
- [2] Hearing, B.P., Fracture behavior of mortar-aggregate interfaces in concrete. 1997, Massachusetts Institute of Technology.
- [3] Madhavi, T.C., L.S. Raju, and D. Mathur, Polypropylene fiber reinforced concrete-a review. *International journal of emerging technology and advanced engineering*, 2014. 4(4): p. 114-118.
- [۴] حسامی، ا. و د. مستوفی نژاد، م. افتخار، بررسی خواص مکانیکی بتن فوق توانمند غیر مسلح و مسلح شده به الیاف فولادی، پلی پروپیلن و پلی وینیل الکل. تحقیقات بتن، ۲۰۱۹، ۱۲(۴): 5-18 p.
- [5] Patel, M.J. and S. Kulkarni, Effect of Polypropylene Fibre on The High Strength Concrete. *Journal of Information, Knowledge And Research in Civil Engineering*, 20 :۲)۲. ۱۲p. 127.
- [6] Thirumurugan, S. and A. Sivakumar, Compressive Strength Index of Crimped Polypropylene Fibres in High Strength Cementitious Matrix. *World Appl. Sci. J*, 2013. 24(6): p. 698-702.
- [7] Gencil, O., et al., Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. *Materials Research Innovations*, 2011. 15(3): p. 216-225.
- [8] Jenq, Y.-S. and S.P. Shah, Features of mechanics of quasi-brittle crack propagation in concrete, in *Current trends in concrete fracture research*. 1991, Springer. p. 103-120.
- [9] Guo, M., F. Grondin, and A. Loukili, Numerical analysis of the failure of recycled aggregate concrete by considering the random composition of old attached mortar. *Journal of Building Engineering*, 2020. 28: p. 101040.
- [10] Rama, J.S.K., et al., A Review on Studies of Fracture Parameters of Self-compacting Concrete, in *Advances in Structural Engineering*. 2015, Springer. p. 1705-1716.
- [11] Khalilpour, S., E. BaniAsad, and M. Dehestani, A review on concrete fracture energy and effective parameters. *Cement and Concrete Research*, 2019. 120: p. 294-321.
- [12] Ajdani, A., et al., Mixed mode fracture characterization of brittle and semi-brittle adhesives using the SCB specimen. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020 :p. 102629.
- [13] Saseendran, V., et al., Crack Length Correction and Root Rotation Angle in a Sandwich Single

[24] 12697-44, E., Bituminous Mixtures-Test Methods for Hot Mix Asphalt Part 44: crack Propagation by Semi-Circular Bending Test. 2010, European Committee for Standardization Brussels, Belgium..

[25] Recommendation, R.D., Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. Materials and structures, 1985. 18(106): p. 285-290.

[26] Vandewalle, L., et al., RILEM TC162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: Design of steel fibre reinforced concrete using the sigma-w-method: principles and applications. Materials and structures, 2002. 35(249): p. 262-278.

[27] Hillerborg, A., The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete. Materials and structures, 1985. 18(4): p. 291-296.

Investigation on the Fracture Mechanics Characteristics of High Strength Fiber Reinforced Concrete Using Laboratory Specimens with Two Different Geometries

Alireza Aliakbari

Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Pouria Hajikarimi *

Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Sina Fallah Hosseini

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

Fereidoon Moghadas Nejad

Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Abstract

In this research, the effect of polypropylene fibers with polyolefin coating and specimen geometry on the mechanical properties of high-strength concrete (HSC) had been investigated. In this regard, two types of polypropylene fibers (monofilament and fibrillated) with three different lengths of 19, 30, and 50 mm and volume percentages of 0.5, 1, and 1.5 were used to fabricate two types of specimens: beam and semi-circular bending (SCB). The results had been collected based on an experimental program on high-strength concrete consisting of the tensile strength test, determination of the modulus of elasticity, and three-point bending test on beam and semi-circular bending specimens. As a result of adding fibers to HSC, the tensile strength, elasticity modulus, fracture energy and characteristics length were increased up to 42%, 71%, 90 times, and 87 times, respectively. Furthermore, by using the theory of hypothesis, it is concluded that it is possible to use a semi-circular bending specimen as an alternative of a beam specimen. Finally, linear regression and power relations had been fitted on the data to convert the results of the beam and the semi-circular bending to each other.

Keywords: Fiber-reinforced Concrete, Polypropylene Fibers, Fracture Mechanics, Notched Semi-Circular Disk, Notched Beam.

* Corresponding Author: phajikarimi@aut.ac.ir

