

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از الیاف فولادی بر رفتار خمشی تیرهای بتنی پیش تنیده

پویا حسونند \*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی (ره)، بروجرد، ایران.

فریدون رضایی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

### چکیده

بتن استفاده شده در اعضای پیش تنیده دارای مقاومت بالاتری نسبت به بتن مصرفی در سازه‌های بتن آرمه معمولی است و بتن‌های با مقاومت بالاتر دارای رفتاری متفاوت نسبت به بتن‌های معمولی می‌باشند. با افزایش مقاومت، شکل پذیری بتن کمتر و حالت شکنندگی در آن بیشتر می‌شود. یک گام مهم در جهت غلبه بر این مشکل، استفاده از الیاف در طرح مخلوط بتن است. هدف از انجام این پژوهش، استفاده از الیاف در طرح مخلوط بتن مصرفی در ساخت نمونه‌های پیش تنیده و انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌ها، به منظور بررسی اثر الیاف مورد استفاده بر ظرفیت باربری و عملکرد سازه‌ای نمونه‌های پیش تنیده مورد مطالعه است. برای این منظور ۳ نمونه تیر بتنی به صورت پیش تنیده‌ی پیش کشیده با ابعاد مفروض در آزمایشگاه سازه ساخته شد. الیاف مورد استفاده از نوع الیاف فولادی با بدنه موج دار و دو انتها قلاب می‌باشد. نمونه‌ها جهت بررسی تحت آزمایش بارگذاری خمشی به روش چهارنقطه‌ای قرار گرفتند و شاخصهای ظرفیت باربری، جذب انرژی، سختی مؤثر، شکل پذیری و خیز وسط دهانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که اضافه نمودن الیاف فولادی به مخلوط بتن باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن گردید و با افزایش درصد حجمی این نوع الیاف، مقاومت‌های فشاری و کششی نیز افزایش پیدا کردند. همچنین شاخصهای مورد نظر جهت بررسی رفتار خمشی تیرهای مورد مطالعه با اضافه نمودن الیاف فولادی به مخلوط بتن افزایش می‌یابند و این افزایش با افزایش درصد حجمی الیاف استفاده شده در مخلوط بتن رابطه مستقیم دارد.

واژه‌های کلیدی: تیر بتنی، پیش تنیدگی، بتن الیافی، الیاف فولادی، رفتار خمشی، ظرفیت باربری.

\* نویسنده مسئول: pouya.hassanvand@abru.ac.ir

## ۱- مقدمه

استفاده از الیاف فولادی در تیرهای بتن مسلح و بررسی رفتار خمشی آنها در تحقیقات زیادی انجام شده است که نشان می‌دهد استفاده از الیاف فولادی بهبود در مقاومت نهایی خمش، رفتار شکست، رفتار ترک خوردگی و کرنش خمشی را به دنبال دارد [۱۲-۲۵].

با افزایش مقدار الیاف، مقدار انرژی شکست افزایش یافته و نتایج استفاده از الیاف مصنوعی در بتن نشان داد مقاومت ترک خوردگی و رفتار پس از ترک خوردگی به شدت وابسته به حجم الیاف است [۲۶-۳۶].

تأثیر استفاده از الیاف با مقاومت کم مانند پلی پروپیلن، نایلن، الیاف اکریلیک در مقایسه با الیاف با مقاومت بالا مانند کربن، پلی وینیل الکل، فولاد، آزیست، الیاف شیشه در طرح مخلوط بتن در یک مطالعه آزمایشگاهی توسط پاکروان و همکاران [۳۷] انجام شد که نتایج تحقیق نشان داد که الیاف با مقاومت کم در بهبود شکل پذیری و کاهش ترک خوردگی مؤثر هستند و الیاف با مقاومت بالا مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهند ولی رفتار شکننده ذاتی آنها باعث بهبود انعطاف پذیری نمی‌شود ضمن اینکه مشاهده شد که هندسه الیاف از جمله اندازه و طول و شکل بر خواص مخلوط بتن نه تنها در حالت سخت بلکه در حالت تازه تأثیر می‌گذارد و درصد حجمی الیاف ترکیبی و نسبت ترکیب، عامل مهمی هست که می‌تواند خواص فیزیکی و مکانیکی بتن مسلح را تعیین کند.

اصفهان‌ی و همکاران [۳۸] بر روی عملکرد سازه‌ای تیرهای بتن الیافی با الیاف فلزی قلاب دار و الیاف پلیمری ماکرو در سطوح مختلف خوردگی آرمان‌تور تحقیقاتی انجام دادند. دو نوع الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فلزی قلاب دار با درصدهای حجمی ۰ و ۰/۵ درصد در سه سطح خوردگی تقریبی ۰، ۷ و ۹ درصد مورد آزمایش قرار گرفتند. در نهایت تیرهای بتن آرمه با سطح مقطع  $140\text{mm} \times 200\text{mm}$  و طول  $1500\text{mm}$  تحت آزمایش بارگذاری خمشی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف در طرح مخلوط بتن مصرفی در ساخت تیر، شکل پذیری تیر را به طور چشم گیری افزایش می‌دهد و مقدار افزایش شکل پذیری در نمونه‌های حاوی الیاف پلیمری ماکرو نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فلزی قلاب دار، بیشتر بود.

مطالعاتی درباره اثر استفاده از الیاف در طرح مخلوط بتن در

بتن با تولید سالانه بیش از دو هزار و پانصد میلیون مترمکعب در سطح جهان به لحاظ مصرف مصالح سازه‌ای در رتبه‌ی نخست قرار دارد و این به دلیل ویژگی‌های مناسب رفتاری بتن بوده که از آن جمله می‌توان به مقاومت فشاری بالا، قالب پذیری آسان، مقاومت در برابر آتش در مقایسه با فولاد، تولید راحت و در نهایت به اقتصادی بودن آن اشاره نمود، اما بتن نیز دارای نقاط ضعفی است که از آن جمله می‌توان به تحمل کشش پائین، تردشکنی و عدم شکل پذیری ذاتی آن اشاره نمود. عناصر تسلیح کننده همچون میلگردهای طولی عملاً به اعضای بتنی در راستای عنصر تسلیح کننده مقاومت داده و بنابراین رفتار اورتوتروپیک در عنصر ایجاد می‌نمایند. ضعف مورد اشاره در اعضای پیش تنیده بتنی، به دلیل استفاده از بتن‌های با مقاومت بالا که باعث ایجاد شکل پذیری کمتر و حالت شکنندگی بیشتر در بتن می‌شود، بیشتر نمود پیدا می‌کند. یک گام مهم در جهت غلبه بر این مشکل، استفاده از الیاف در طرح مخلوط بتن مورد استفاده در تیرهای بتنی پیش تنیده است. الیاف رشته‌های نازکی با طول نسبتاً کوتاهی با جنس و اشکال مختلفی است که به صورت منفصل و تصادفی در حجم بتن پراکنده می‌شوند. به طور کلی هدف از کاربرد الیاف در بتن، افزایش میزان جذب انرژی بتن و کنترل گسترش ترک است [۲۹]. بتن مسلح به الیاف فولادی یکی از مناسب ترین روش‌ها برای کاهش شکنندگی و افزایش شکل پذیری بتن است. این بهبود عملکرد، اکثراً بعد از ترک خوردن بتن شکل می‌گیرد. زمانی که بتن ترک خورد، الیاف در محل ترک، نیرو را تحمل می‌کنند و باعث جذب انرژی می‌شوند [۳]. با توجه به کاربرد بالای بتن پیش تنیده به نظر می‌رسد بررسی این نوع المان بتنی با ایده استفاده از الیاف در طرح مخلوط بتن و بهبود رفتار آن با استفاده از الیاف کمک شایانی به صنعت ساخت و ساز داشته باشد.

امروزه تحقیقات گسترده‌ای درباره استفاده از فولاد، شیشه، سرامیک و الیاف مصنوعی جهت بهبود خصوصیات مکانیکی سازه‌های بتنی انجام شده است. برخی تحقیقات در خصوص استفاده از الیاف در بتن انجام شده و نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که خصوصیات مکانیکی در انواع بتن‌های الیافی بهبود یافته و باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی، سایشی و ضربه ای بتن شده است [۴-۱۱].

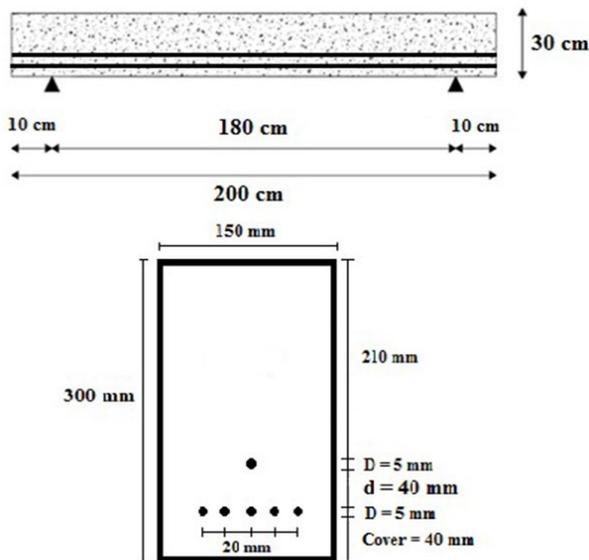
پیش‌تنیده ساخته شده با بتن الیافی مورد بررسی گرفت. در پایان نتایج آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار می‌گیرد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات هندسی و جزئیات نمونه‌های مورد مطالعه

در این پژوهش، تأثیر الیاف شامل الیاف فولادی از نوع بدنه موج‌دار و دو سر قلاب در رفتار تیر بتنی پیش‌تنیده مورد بررسی قرار گرفت. ۳ نمونه تیر بتنی به صورت پیش‌تنیده‌ی پیش‌کشیده ساخته شد. طول هر یک از تیرهای بتنی ۲۰۰۰ میلی‌متر و ابعاد مقطع عرضی با ارتفاع ۳۰۰ و عرض ۱۵۰ میلی‌متر است. شکل هندسی و ابعاد تیر بتنی مورد مطالعه در پژوهش در شکل ۱ نمایش داده شده است.

به منظور ایجاد پیش‌تنیدگی در نمونه‌ها از کابل‌های پیش‌تنیدگی از نوع وایر (wire) استفاده شد. تعداد ۶ عدد وایر در مقطع تیرهای بتنی مطابق با آرایش نشان داده شده در شکل ۱ مورد استفاده قرار گرفت. پوشش بتن از روی وایر بنابر جدول ۳، ۱، ۵، ۲۰ آیین‌نامه ACI 318-19 [۴۳]، ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- ابعاد هندسی تیر مورد مطالعه و جزئیات مقطع آن

### ۲-۲- مشخصات مصالح مصرفی

سنگ‌دانه مصرفی در ساخت نمونه‌ها شامل درشت‌دانه (شن) و ریزدانه (ماسه) از معادن شرکت شن و ماسه نوید غرب واقع در منطقه تهران‌دشت شهرستان ساوجبلاغ می‌باشد. ریزدانه مورد

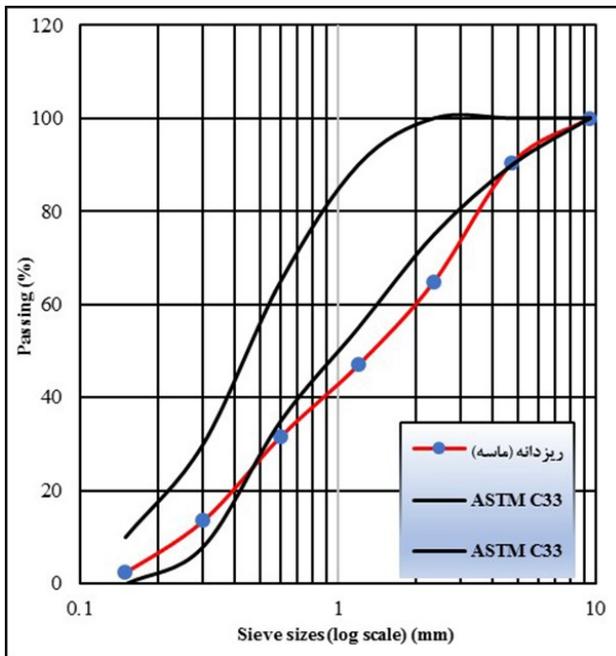
المان‌های بتنی پیش‌تنیده نیز صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به نتایج تحقیقات لاکاوات و جاب [۳۹ و ۴۰] اشاره کرد که نشان دادند استفاده از الیاف فولادی در طرح مخلوط المان‌های بتنی پیش‌تنیده باعث کاهش عرض دهانه و رشد ترک می‌شود و یا نتایج تحقیقات سوهاس و لاکاوات [۴۰ و ۴۱] نشان داد که استفاده از الیاف فولادی در تیرهای بتنی پیش‌تنیده حالت شکست را از حالت برشی (شکننده) به حالت برشی-خمشی (کمتر شکننده) تغییر می‌دهد و هم‌چنین ظرفیت جذب انرژی کرنشی در تیرهای دارای الیاف فولادی و مصنوعی ماکرو نسبت به تیرهای بدون الیاف افزایش چشمگیری خواهد داشت.

در بررسی رفتار برشی تیرهای بتنی پیش‌تنیده دارای الیاف ترکیبی که توسط لاکاوات و همکاران انجام شده مشخص شد که اضافه کردن درصد حجمی ۰/۵ درصد الیاف بهبود قابل توجهی در رفتار برشی ایجاد نکرد. با این حال، نتایج آزمایشگاهی و عددی تیرهای با درصد حجمی بالاتر شامل ۱ و ۱/۵ درصد به طور قابل توجهی رفتار پس از ترک خوردگی، شکل‌پذیری و مقاومت برشی نهایی تیرهای بتنی پیش‌تنیده دارای الیاف ماکرو سنتتیک (MSFRPC) را بهبود می‌بخشد [۴۲].

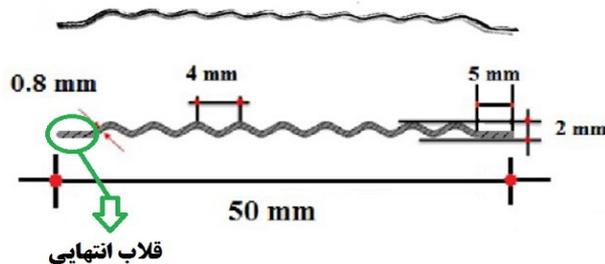
مطالعات خیلی کمی در خصوص بررسی و مقایسه اثرات الیاف فولادی در رفتار خمشی تیرهای بتنی پیش‌تنیده انجام شده است. هم‌چنین با توجه به بررسی‌های انجام شده در تحقیقات مشخص شد که مطالعات زیادی بر روی جنبه‌های مختلف بتن‌های الیافی و هم‌چنین اعضای بتنی پیش‌تنیده انجام شده و مطالعه خاصی در خصوص اعضای بتنی پیش‌تنیده ساخته شده با بتن الیافی انجام نشده است.

لذا در این تحقیق رفتار تیرهای بتنی پیش‌تنیده در مقیاس واقعی و با اضافه کردن الیاف فولادی به طرح مخلوط بتن آن مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های مقاومتی فشاری و کششی بر روی نمونه‌های کوچک بتن و آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای بر روی ۳ نمونه تیر انجام شد که شامل یک نمونه تیر به عنوان نمونه شاهد و بدون الیاف و دو نمونه تیر حاوی الیاف بوده و با درصدهای حجمی مختلف الیاف به صورت ۰/۵ و ۱ درصد استفاده شد. پس از انجام آزمایش بر روی نمونه‌های توصیف شده و ثبت نتایج و تغییرات، رفتار شکست و هم‌چنین شاخصهای انرژی جذب شده، حالت شکست، شکل‌پذیری و ظرفیت بار نهایی تیرهای بتنی

جرم مخصوص  $1040 \text{ kg/m}^3$  استفاده شد. مقدار مصرف فوق روان کننده، بنابر توصیه شرکت سازنده و مطابق استاندارد ASTM C494 [45]، ۱ درصد وزن سیمان در نظر گرفته شد. روش استفاده نیز بدین صورت بود که هم‌زمان با آب اختلاط به داخل میکسر بچینگ اضافه گردید.



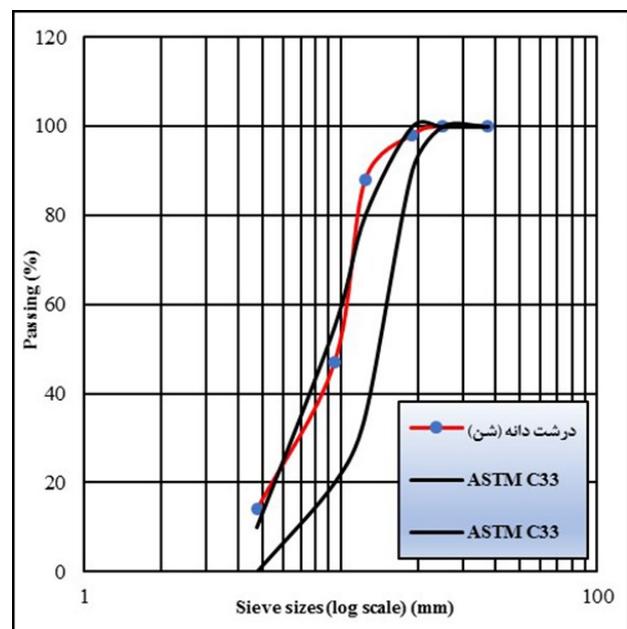
شکل ۳- نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در بتن



شکل ۴- شکل ظاهری الیاف فولادی از نوع بدنه موج دار و دو انتها قلاب

با توجه به روش ایجاد پیش‌تندگی در پژوهش حاضر که از نوع پیش کشیده است، از وایرهایی از رده ۲۵۰ و از نوع WA با قطر ۵ میلی‌متر و مطابق استاندارد آمریکایی ASTM A421 [46]،

استفاده در این پژوهش از نوع کوهی شکسته شسته شده با مدول نرمی ۲/۳۹ و ارزش ماسه‌ای ۸۵ درصد و وزن مخصوص  $\text{Kg/m}^3$  ۲۵۳۰ در محدوده زیر الک نمره ۴ (با قطر روزنه  $4/75$  میلی‌متر) می‌باشد. درشت‌دانه مورد استفاده در این پژوهش، شن شکسته کوهی عاری از ذرات غیرمجاز رس، لای و مواد زیان‌آور با حداکثر اندازه دانه‌های ۱۹ میلی‌متر و هم‌چنین وزن مخصوص  $\text{Kg/m}^3$  ۲۶۱۰ است. نمودار دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی در ساخت نمونه‌های مورد استفاده در پژوهش در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. نسبت ماسه به شن در تمامی مخلوط‌ها  $0/654$  ثابت در نظر گرفته شد.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی شن مورد استفاده در بتن

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲ آبیگ قزوین برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. وزن مخصوص آن بر اساس ASTM C18، برابر با  $3/12 \text{ gr/cm}^3$  تخمین زده شد.

الیاف مورد استفاده در بتن شامل الیاف فولادی از نوع بدنه موج دار و دو انتها قلاب و با درصد‌های حجمی مختلف می‌باشد. شکل هندسی و خواص الیاف به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۱ ارائه شده است.

آب مورد استفاده در ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها از آب شرب شهر اشتهارد در استان البرز بود. به‌منظور کنترل روانی بتن ساخته شده، از فوق روان کننده‌ای از نسل سوم بر پایه تکنولوژی پلی‌کربوکسیلات‌اتر با نام تجاری DEZOBUILD D-40 و

گرفت. اختلاط و ساخت بتن توسط دستگاه بچینگ پلانت این کارخانه انجام شد که با توجه به اندازه گیری دقیق وزن سیمان و ماسه و سنگ دانه و همین طور میزان آب توسط لوازم اندازه گیری دیجیتال دستگاه اختلاطی با دقت بسیار بالا بدست می آید که مهم ترین اصل در ساخت بتن می باشد.

جدول ۳- طرح اختلاط برای یک متر مکعب بتن به روش وزنی

نام نمونه/اجزاء	NC	SF-0.5	SF-1
شن ( $\text{Kg/m}^3$ )	۱۰۶۵	۱۰۴۵	۱۰۲۰
ماسه ( $\text{Kg/m}^3$ )	۷۱۰	۶۹۰	۶۷۵
سیمان ( $\text{Kg/m}^3$ )	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰
W/C	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۸
آب ( $\text{Lit/m}^3$ )	۱۷۱	۱۷۱	۱۷۱
الیاف ( $\text{Kg/m}^3$ )	-	۳۹/۲۵	۷۸/۵
فوق روان کننده ( $\text{Lit/m}^3$ )	۴/۵	۴/۵	۴/۵

در طول یکی از خطوط تولید کارخانه، روی سطح خط تولید قالب فلزی با ابعاد متناسب با ابعاد نمونه های مورد مطالعه و به طول تعداد نمونه های مورد نیاز قرار و قالب بندی مطابق شکل ۵ صورت گرفت. برای جداره های کناری از قالب هایی به طول ۲۰۰۰ میلی متر و عرض ۳۰۰ میلی متر و برای وجه زیرین از قالب هایی به طول ۲۰۰۰ میلی متر و عرض ۱۵۰ میلی متر استفاده شد. پس از قالب بندی، به منظور ممانعت از چسبیدن قالب به بتن پس از عمل-آوری، از روغن مخصوص قالب بندی در تمام سطوح داخلی قالب ها استفاده شد.

با توجه به نوع کابل و نوع پیش تنیدگی در تحقیق حاضر که به- ترتیب از نوع Wire و پیش تنیدگی از نوع پیش کشیدگی می باشد و همچنین آرایش آن ها در مقطع مطابق شکل ۱، Wire ها مطابق شکل ۶ و طبق آرایش در نظر گرفته شده قبل از بتن ریزی به وسیله اسپسیرهای مناسب در داخل قالب های فلزی جانمایی و قرار داده شدند و در دو انتها با روش مهار گوه ای، مهار و سپس به وسیله جک هیدرولیکی برقی مطابق شکل ۷ تا مقدار مجاز محاسبه شده از قبل ( $0.7 \text{ FPU}$  معادل حدود ۲۳۰۰ کیلوگرم در هر Wire) کشیده شدند. در هر Wire پس از کشیده شدن توسط جک همانطور که در شکل ۸ نیز مشهود است، حدود ۶۲ سانتی متر از دیاد طول ایجاد گردید.

استفاده شد. فولاد مصرفی در ساخت وایرها از نوع فولاد با مقاومت بالا با مقاومت کششی نهایی برابر  $1725 \text{ MPa}$  است. مشخصات وایر مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فنی الیاف فولادی مورد استفاده در پژوهش

مواد اولیه	فولاد کم کربن و نورد سرد
شکل ظاهری	تک رشته ای با دو سر نیمه قلاب و بدنه موجدار سینوسی
رنگ	خاکستری و مسی
وزن مخصوص	۷۸۵۰ کیلوگرم در مترمکعب
طول الیاف	۵۰ میلی متر
قطر هر عدد الیاف	۰/۸ میلی متر
مقاومت کششی	۷۰۰-۱۲۰۰ مگاپاسکال
درصد ازدیاد طول	کمتر از ۳ درصد
مدول الاستیسیته	۲۰۰ گیگاپاسکال
مقاومت خمشی	۱۸۰-۲۱۰ مگاپاسکال

جدول ۲- مشخصات کابل پیش تنیدگی مورد استفاده در پژوهش

قطر (mm)	۵
سطح مقطع ( $\text{mm}^2$ )	۱۹/۶
وزن واحد طول ( $\text{Kg/m}$ )	۰/۱۵۳۱
مدول ارتجاعی ( $\text{Kg/cm}^2$ )	۱۹۶۵۰۰۰
کمینه مقاومت نهایی ( $\text{Kg/cm}^2$ )	۱۷۲۵
کمینه افزایش طول	۳/۵٪ برای طول ۶۰ سانتی متر

### ۲-۳- طرح اختلاط بتن های مورد استفاده

با توجه به پیش تنیده بودن تیرهای بتنی مورد مطالعه در تحقیق و لزوم استفاده از بتنی با مقاومت بالای  $350 \text{ Kg/cm}^2$ ، لذا بتن مورد استفاده، بتنی با مقاومت بالاست و برای رسیدن به مقاومت هدف انتخاب شده، چندین طرح اختلاط برای بتن طراحی گردید و در نهایت طرح اختلاط نهایی برای ساخت بتن نمونه ها به روش وزنی مطابق جدول ۳ انتخاب گردید. نسبت آب به سیمان در تمامی نمونه ها ثابت و برابر ۰/۳۸ در نظر گرفته شد.

### ۲-۴- روش ساخت نمونه ها

ساخت تیرهای بتنی پیش تنیده مورد مطالعه در کارخانه بتن پیش تنیده ایران واقع در شهرک صنعتی اشتهارد استان البرز صورت



شکل ۷- کشیدن Wire ها به وسیله جک هیدرولیکی برقی



شکل ۸- طول ازدیاد یافته Wire ها پس از کشیدگی به وسیله جک هیدرولیکی برقی

به منظور عمل آوری تیرهای بتنی پیش تنیده مورد مطالعه، پس از بتن ریزی و بعد از گذشت زمان ۴۸ ساعته و برداشتن قالب‌های فلزی کناری، از روش عمل آوری با بخار استفاده شد. بدین صورت که پس از تولید تیرها مجموعه‌ای به نام لحاف بخار را مطابق تصاویر ارائه شده در شکل ۹ بر روی تیرها پهن می‌کنند که این سیستم مجهز به لاین‌های شبکه‌ای لوله‌های منفذدار بخار است که در این روند دما در بخار تولید شده به صورت پلکانی به دمای ۷۰ درجه می‌رسد که در این سیستم کلاً تیرها از پیش گرم شدن کم کم به دمای نهایی ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسند و تحت این دما زمان مشخصی را در زیر لحاف بخار می‌مانند و سپس مجدداً دما به صورت پلکانی نزول کرده و کم کم به سرد شدن نزدیک می‌شود. محصول عمل آوری شده به این روش در تمام طول تیر یکسان و یکنواخت بوده و خدشه‌ای به تعادل نیروهای کششی و برشی در تیر وارد نمی‌کند، در ضمن اینکه تیر بعد از اتمام زمان ۱۲ ساعت آماده بارگیری و بهره‌برداری می‌شود.



شکل ۵- قالب‌بندی با ابعاد متناسب با نمونه‌های مورد مطالعه

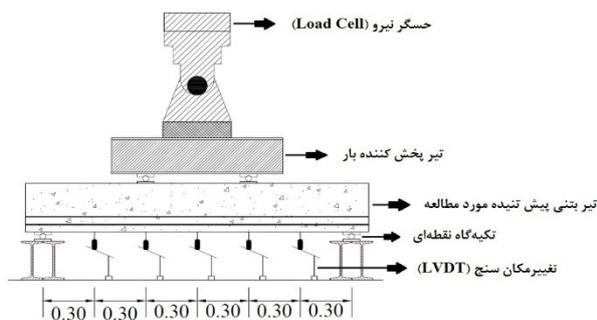


شکل ۶- جانمایی Wire ها در داخل قالب‌ها

شکل ۱۰ استفاده شد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود از بارگذاری چهارنقطه‌ای برای انجام آزمایش استفاده شده است. بار اعمال شده به تیر به صورت استاتیکی و توسط جک هیدرولیکی انجام شد. محل قرارگیری ۵ تغییر مکان سنج قرار گرفته در زیر تیر و فواصل بین آن‌ها به منظور ثبت میزان جابجایی نشان داده شده است. بارگذاری تا گسیختگی کامل نمونه‌ها ادامه یافت. ظرفیت جک مورد استفاده در این آزمایش ۵۰۰ کیلو نیوتن بود.

جدول ۴- دسته‌بندی و نام‌گذاری نمونه‌های مورد مطالعه

نام نمونه	ابعاد (mm)	نوع الیاف	درصد حجمی الیاف
NC		بدون الیاف	۰
SF-0.5	۲۰۰۰×۳۰۰×۱۵۰	الیاف فولادی	۰/۵٪
SF-1		الیاف فولادی	۱٪



شکل ۱۰- چیدمان آزمایش تیرها و نحوه قرارگیری LVDT ها و اتصال آن به نمونه

### ۳- تحلیل نتایج و بحث

#### ۳-۱- مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها

شاخصه‌های اصلی که در این مرحله مورد ارزیابی قرار گرفت، مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی بود. ۳ نوع بتن با طرح اختلاط مختلف توسط دستگاه بچینگ پلانت و هر کدام در یک مرحله جداگانه ساخته شده و در قالب‌ها ریخته شد. به منظور دستیابی به مقاومت فشاری دقیق بتن و حصول اطمینان از مقاومت‌های بتن ساخته شده در کارخانه از هر رده بتن سه نمونه مکعبی به ابعاد  $150 \times 150 \times 150$  میلیمتر ساخته شد و آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از یک دستگاه فشاری دیجیتال با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و با سرعت بارگذاری ۰/۶ مگاپاسکال بر ثانیه بر اساس استاندارد ملی ایران (ISIRI 1608-3) [۴۷] بر روی این نمونه‌ها انجام شد. جهت



شکل ۹- تصویری از عمل‌آوری نمونه‌ها با روش بخار

#### ۲-۵- تجهیزات آزمایشگاهی

ابزار دقیق مورد استفاده در پژوهش عبارت است از تغییر مکان سنج (LVDT) برای اندازه‌گیری جابجایی قائم در نقاط مختلف تیر، بارسنج برای اندازه‌گیری میزان بار و جک و پمپ هیدرولیکی برای اعمال بار می‌باشند.

#### ۲-۶- نام‌گذاری نمونه‌های مورد مطالعه

تیرهای مورد مطالعه در پژوهش شامل ۳ تیر که یک تیر به عنوان نمونه شاهد و دو تیر دیگر بصورت الیافی می‌باشند. نماد NC نشانگر Normal-Concrete یا نمونه‌های بتنی بدون الیاف می‌باشد. SF بیانگر نمونه‌های دارای الیاف فولادی می‌باشد. اعداد ۰/۵ و ۱ یعنی نمونه‌ها دارای نیم و یک درصد حجمی الیاف می‌باشند. دسته‌بندی و نام‌گذاری تیرهای مورد مطالعه بر اساس توضیحات فوق در جدول ۴ ارائه شده است.

#### ۲-۷- چیدمان آزمایشگاهی، ابزاربندی و نحوه بارگذاری نمونه

برای آزمایش تیرها از چیدمان آزمایشگاهی نشان داده شده در



شکل ۱۱- دستگاه جک بتن شکن جهت آزمایش مقاومت فشاری نمونه مکعبی بتنی

بررسی تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت کششی نیز سه نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۲×۳۰۵ میلی‌متر ساخته شد و بر اساس استاندارد ملی ایران (ISIRI 6047) [۴۸] مورد آزمایش قرار گرفت. برای عمل‌آوری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای همزمان با عمل‌آوری تیرهای بتنی با بخار، این نمونه‌ها نیز در زیر لحاف بخار مطابق شکل ۹ نگهداری و عمل‌آوری گردید. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایی از انجام آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش مقاومت کششی ارائه شده است و نتایج مقاومت فشاری و کششی حاصل نیز در جدول‌های ۵ و ۶ گزارش شده است.



شکل ۱۲- دستگاه جک بتن شکن جهت آزمایش مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای بتنی

جدول ۵- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی

نام نمونه	وزن نمونه (Kg)	چگالی (Kg/cm <sup>3</sup> )	سطح بارگیر (mm <sup>2</sup> )	مقاومت فشاری نمونه مکعبی اول (Mpa)	مقاومت فشاری نمونه مکعبی دوم (Mpa)	مقاومت فشاری نمونه مکعبی سوم (Mpa)	میانگین (Mpa)	مقاومت فشاری نمونه استوانه معادل (Mpa)	درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد (%)
NC	۷/۹۶۳	۲۳۵۹	۲۲۵۵۰	۳۷/۱۰	۳۶/۶۵	۳۵	۳۶/۲۵	۳۱/۲	—
SF-0.5	۸/۰۸۸	۲۳۹۶	۲۲۵۰۰	۳۷/۸۰	۳۹/۵۰	۳۹/۲۵	۳۸/۸۵	۳۳/۹	۸/۶
SF-1	۸/۱۳۴	۲۴۱۰	۲۲۵۰۰	۴۱/۸۰	۳۸/۹۰	۴۱/۲۵	۴۰/۶۵	۳۵/۷	۱۴/۴

جدول ۶- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی

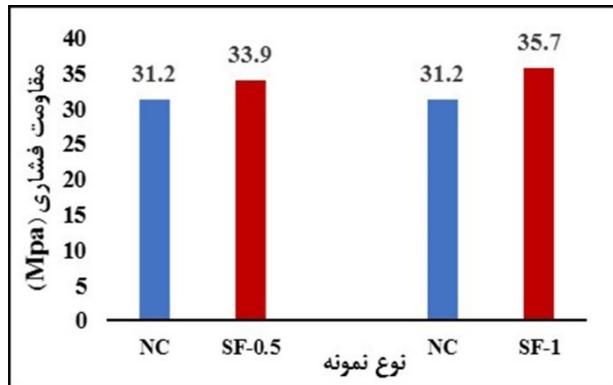
نام نمونه	وزن نمونه (Kg)	چگالی (Kg/cm <sup>3</sup> )	P: حداکثر بار اعمال شده به نمونه (N)	T: مقاومت کششی نمونه (MPa)	درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد (%)
NC	۱۳/۱۰۰	۲۳۶۷	۲۸۴۰۰۰	۳/۹	—
SF-0.5	۱۳/۱۸۰	۲۳۸۱	۳۰۸۰۰۰	۴/۲۳	۸/۸
SF-1	۱۳/۱۸۸	۲۳۸۳	۳۲۲۰۰۰	۴/۴۲	۱۳/۴

انسجام ترکیب شده و از طریق پل زدن الیاف نسبت به یکدیگر و نسبت به خمیر سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. نتایج تحقیق آقای قربانی و همکاران [۴۹] نیز نشان داد که اضافه نمودن الیاف فولادی به میزان ۰/۵ و ۱ درصد حجمی بتن به مخلوط بتن، باعث افزایش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۱۸ و ۲۳ درصد می‌شود. افزایش مقاومت فشاری ناشی از اضافه نمودن الیاف فولادی به طرح مخلوط بتن در نتایج سایر تحقیقات [۴]، [۴۹] و [۵۰] نیز ارائه شده است.

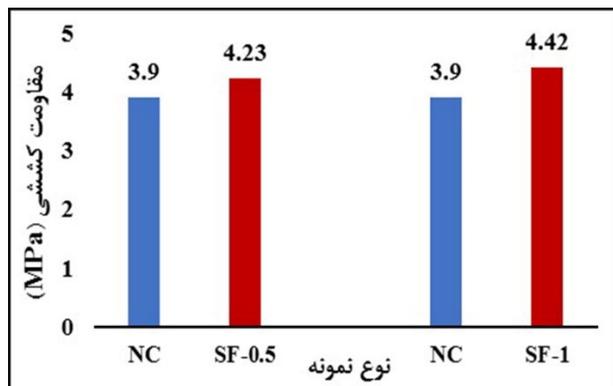
آزمایش مقاومت کششی به روش دونیم شدن، بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با مشخصات مفروض و در سن ۲۸ روزه نمونه انجام شده است.

بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه شاهد و بدون الیاف (NC)، ۳/۹ مگاپاسکال می‌باشد و نمونه‌های دارای الیاف فولادی به دلیل پیوستگی و ممانعت از رشد ترک در بتن ناشی از اثر پل زدن الیاف، دارای مقاومت کششی بیشتری در مقایسه با نمونه بدون الیاف می‌باشند به طوری افزودن ۰/۵ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن باعث افزایش ۸/۸ درصدی مقاومت کششی شد و با اضافه نمودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی به مخلوط بتن، مقاومت کششی به میزان ۱۳/۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرد. مکانیسم شکست بتن‌های مسلح شده به الیاف فولادی از الگوی ترک نسبتاً مشابهی پیروی می‌کردند که با ایجاد یک ترک مرکزی اصلی شروع و با ایجاد ترک‌های ثانویه در لبه‌های نمونه گسترش می‌یابد. آنچه که به هنگام افزایش مقاومت کششی در نتیجه استفاده از الیاف فولادی اتفاق می‌افتد را می‌توان بدین صورت تشریح کرد که الیاف به هنگام شکافته شدن در بین بخش‌های شکافته شده از ماتریس، از طریق انتقال تنش‌ها از ماتریس به الیاف، کرنش کششی بزرگتری را تحمل می‌کنند و در نتیجه افزایش در مقاومت کششی مشاهده می‌شود. در یک مطالعه مشابه و صورت گرفته توسط آقای صحرانی مقدم و همکاران [۵۱] نیز مشخص گردید که اضافه نمودن الیاف فولادی به میزان ۰/۵ و ۱ درصد حجمی بتن به مخلوط بتن، افزایش ۴۵ و ۸۱ درصدی را در مقاومت کششی بتن ایجاد می‌نماید. افزایش مقاومت کششی ناشی از اضافه نمودن الیاف فولادی به طرح مخلوط بتن نیز در نتایج تحقیقات [۷]، [۵۲] و [۵۳] ارائه شده است.

نمودارهای مقایسه‌ای تأثیر اضافه نمودن الیاف با درصد‌های حجمی مختلف به مخلوط بتن بر مقاومت فشاری و کششی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.



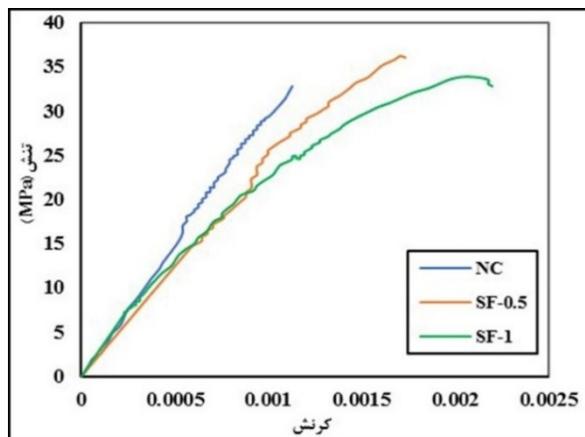
شکل ۱۳- نمودار مقایسه‌ای تأثیر الیاف فولادی با درصد‌های حجمی مختلف بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن



شکل ۱۴- نمودار مقایسه‌ای تأثیر الیاف فولادی با درصد‌های حجمی مختلف بر نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول‌های ۵ و ۶ و مشاهده نمودارهای مقایسه‌ای می‌توان دریافت که مقاومت فشاری نمونه شاهد و بدون الیاف (NC)، ۳۱/۲ مگاپاسکال بدست آمد. همچنین با توجه به نتایج مشخص گردید که استفاده از ۰/۵ درصد حجمی الیاف فولادی در طرح مخلوط بتن بطور میانگین سبب افزایش ۸/۶ درصدی مقاومت فشاری شده است. این در حالی است که اضافه نمودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی به مخلوط بتن، مقاومت فشاری را به میزان ۱۴/۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داده است. بنابر نتایج بدست آمده، شاهد تأثیر مثبت الیاف فولادی بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی مورد بررسی می‌باشیم. افزایش مقاومت فشاری تحت تأثیر الیاف فولادی را می‌توان بدین صورت توجیه نمود که افزودن الیاف به ترکیب، موجب افزایش

حجمی مختلف بر میزان جذب انرژی و مدول الاستیسیته با نمونه استوانه بتنی شاهد (بدون الیاف) در شکل های ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است.

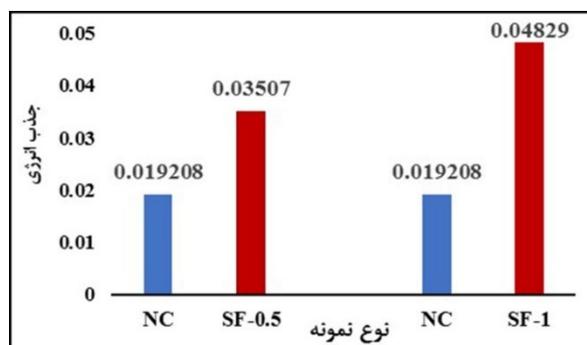


شکل ۱۶- نمودارهای تنش-کرنش بتن های مختلف مورد مطالعه

جدول ۷- خلاصه نتایج آزمایش فشار روی نمونه های استوانه ای طرح اختلاط های مختلف بتن

مدول الاستیسیته (GPa)	مساحت زیر نمودار تنش-کرنش (ظرفیت جذب انرژی)	نام نمونه
۲۹/۳	۰/۰۱۹۰۲۸	NC
۲۴/۹۶	۰/۰۳۵۰۷	SF-0.5
۲۶/۳	۰/۰۴۸۲۹	SF-1

نمودار میله ای جهت مقایسه و بررسی تأثیر الیاف با درصد های حجمی مختلف بر میزان جذب انرژی و مدول الاستیسیته با نمونه استوانه بتنی شاهد (بدون الیاف) در شکل های ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است.



شکل ۱۷- نمودار میله ای مقایسه ای تأثیر الیاف فولادی با درصد های حجمی مختلف بر جذب انرژی با نمونه استوانه ای بتنی شاهد (بدون الیاف)

### ۲-۳- نتایج آزمایش فشاری روی نمونه های استوانه ای و توزیع نمودار تنش-کرنش

برای انجام آزمایش فشاری بتن در آزمایشگاه بر اساس استاندارد ملی ایران (ISIRI 525) [۵۴]، مطابق شکل ۱۵ از دستگاه جک بتن شکن که از دو فک ثابت و متحرک با سطح سخت تشکیل شده است و نمونه مورد آزمایش در بین این دو فک قرار گرفته و سپس توسط دستگاه به آن نیرو اعمال می شود، استفاده شد. نمونه های مورد استفاده در این آزمایش به صورت استوانه و با مشخصات هندسی و وزنی مفروض بودند. سرعت اعمال بار بر نمونه برابر ۲۹۰ kPa/sec در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه های استوانه ای بصورت نمودارهای تنش-کرنش ارائه شده در شکل ۱۶ و جدول ۷ می باشد که از این نمودارها می توان مدول الاستیسیته و همچنین ظرفیت جذب انرژی (مساحت زیر نمودار تنش-کرنش) نمونه های مختلف بتن مورد استفاده در پژوهش را بدست آورد. مدول الاستیسیته بدست آمده از نمودار تنش-کرنش مدول الاستیسیته سکانتی می باشد استاندارد ملی ایران (ISIRI 525) [۵۴] برابر شیب خطی است که از مبدأ به نقطه ای از منحنی که نظیر ۴۰٪ تنش نهایی گسیختگی است، وصل می شود.



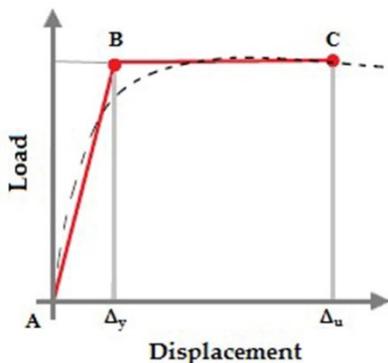
شکل ۱۵- تصویری از آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه های استوانه ای

نمودار میله ای جهت مقایسه و بررسی تأثیر الیاف با درصد های

### ۳-۳- نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای روی نمونه‌ها

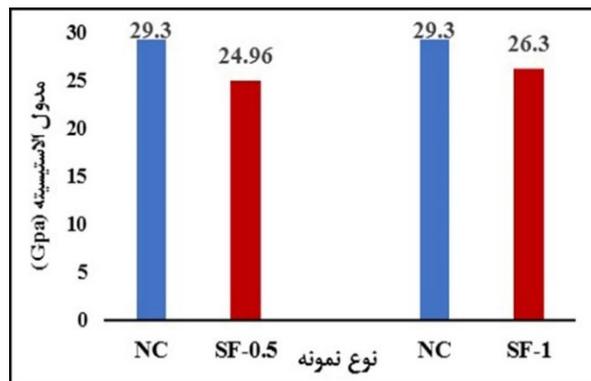
نمودارهای نیرو-تغییر مکان بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی برای هر تیر پیش تنیده برای بیان مشخصات رفتاری آن‌ها، بر اساس روش ارائه شده توسط پائولی و پرستلی ایده آل‌سازی و به منحنی دوخطی معادل تبدیل گردید. ایده آل‌سازی نمودار دوخطی معادل بر اساس این که سطح محصور بین بالا و پایین منحنی نیرو-تغییر مکان و نمودار دوخطی معادل با یکدیگر برابر باشد، صورت گرفت. با این کار در واقع مساحت زیر منحنی نیرو-تغییر مکان و نمودار دوخطی معادل با هم برابر می‌شود. همچنین سختی سازه بعد از تسلیم (شیب ثانویه منحنی دوخطی) صفر می‌باشد. با استفاده از این منحنی دوخطی معادل شده، مشخصات رفتاری تیرها شامل سختی مؤثر و شکل‌پذیری محاسبه شد. سختی مؤثر نمونه آزمایشگاهی برابر با سختی سکانت نقطه تسلیم نمونه در منحنی نیرو-تغییر مکان می‌باشد. به عبارت دیگر سختی مؤثر که طبق تعریف عبارت است از میزان مقاومت یک جسم در برابر تغییر مکان، برابر است با شیب خطی که مبدا را به نقطه ۷۵ درصد ماکزیمم نیرو در روی منحنی نیرو-تغییر مکان وصل می‌نماید [۵۵]. شکل‌پذیری  $\mu$  که طبق تعریف قابلیت تحمل تغییر شکل‌های فرا ارتجاعی در بخشی یا تمام طول المان سازه‌ای بدون افت قابل ملاحظه در مقاومت می‌باشد، طبق رابطه ۱ با محاسبه نسبت تغییر مکان نهایی  $\Delta_u$  به تغییر مکان تسلیم  $\Delta_y$  از نمودار دوخطی معادل شده بدست می‌آید.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$



شکل ۱۹- ایده آل‌سازی منحنی نیرو-تغییر مکان با یک نمودار دوخطی معادل

تغییر مکان نهایی و تغییر مکان تسلیم از روی نمودار دوخطی معادل بدست آمده است که همانطور که در شکل ۱۹ نشان داده شده

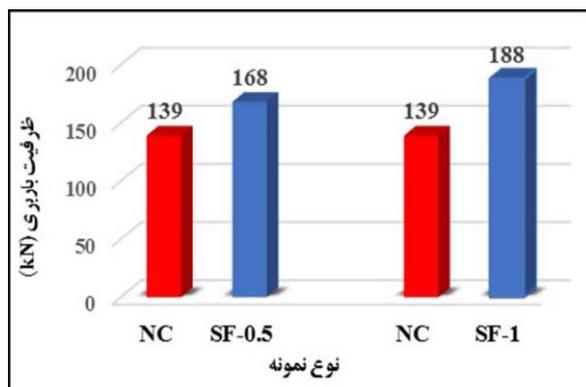


شکل ۱۸- نمودار میله‌ای مقایسه‌ای تأثیر الیاف فولادی با

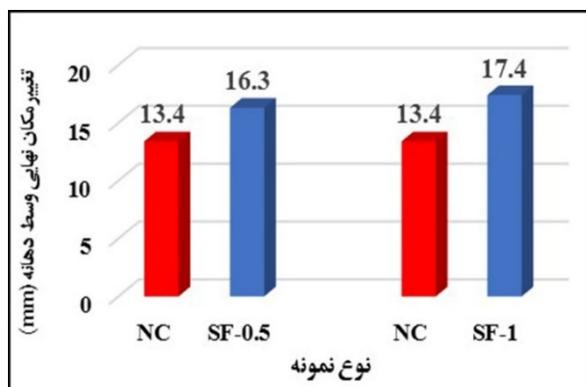
درصدهای حجمی مختلف بر مدول الاستیسیته با نمونه استوانه‌ای بتنی شاهد (بدون الیاف)

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷ و مشاهده نمودارهای مقایسه‌ای می‌توان دریافت که مساحت زیر نمودار تنش-کرنش که ظرفیت جذب انرژی را مشخص می‌کند، برای نمونه بدون الیاف (NC) برابر  $0.19028$  می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته سکانتی بدست آمده از نمودار تنش-کرنش برای این نمونه برابر  $29.3$  GPa می‌باشد. مساحت زیر نمودار تنش-کرنش نمونه SF-0.5 که برابر  $0.3507$  می‌باشد نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فولادی (بدنه موج‌دار و دو انتها قلاب) با درصد حجمی  $0.5$  درصد باعث زیاد شدن سطح زیر منحنی، نسبت به نمونه شاهد (NC) به میزان  $82.6$  درصد شده است که بیانگر افزایش طاقت و ظرفیت جذب انرژی می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته سکانتی بدست آمده از منحنی نمونه برابر  $24.96$  GPa می‌باشد که نسبت به نمونه شاهد (NC) به میزان  $14.6$  درصد کاهش یافته است. علت کاهش مدول الاستیسیته ممکن است بروز پدیده گلوله شدن الیاف باشد. مساحت زیر نمودار تنش-کرنش نمونه SF-1 که برابر  $0.4829$  می‌باشد نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فولادی (بدنه موج‌دار و دو انتها قلاب) با درصد حجمی  $1$  درصد باعث زیاد شدن سطح زیر منحنی، نسبت به نمونه شاهد (NC) به میزان  $151.4$  درصد شده است که بیانگر افزایش طاقت و ظرفیت جذب انرژی می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته سکانتی بدست آمده از منحنی نمونه برابر  $26.3$  GPa می‌باشد که نسبت به نمونه شاهد (NC) به میزان  $10.2$  درصد کاهش یافته است بنابراین با افزایش مقدار الیاف فولادی (بدنه موج‌دار و دو انتها قلاب) در بتن سرعت روند افزایش سطح زیر منحنی و کاهش مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد.

و ۱ درصد ساخته شدند تا تأثیر الیاف با دوز مختلف الیاف بر رفتار سازه‌ای تیرها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به شکل ۲۰ و نتایج ارائه شده در جدول ۸ می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الیاف فولادی از نوع بدنه موج‌دار و دو انتها قلاب با درصد حجمی ۰/۵ درصد، ظرفیت باربری تیر را ۲۱ درصد افزایش و افزایش درصد حجمی این نوع الیاف به مقدار ۱٪ این ظرفیت باربری را ۳۵ درصد افزایش می‌دهد. تغییر مکان نهایی وسط دهانه با اضافه شدن الیاف فولادی با درصدهای ۰/۵ و ۱ درصد به ترتیب ۲۱/۶ درصد و ۲۹/۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین ظرفیت جذب انرژی تیرها با اضافه شدن الیاف فولادی با درصدهای ۰/۵ و ۱ درصد به طرح مخلوط بتن به ترتیب ۵۶ درصد و ۱۱۷ درصد افزایش می‌یابد. نمودار میله‌ای جهت مقایسه و بررسی تأثیر الیاف با درصدهای حجمی مختلف بر ظرفیت باربری، جابجایی نهایی وسط دهانه و ظرفیت جذب انرژی نسبت به تیر شاهد (بدون الیاف) در شکل‌های ۲۲ تا ۲۴ ارائه شده است.



شکل ۲۲- نمودار میله‌ای مقایسه‌ای تأثیر الیاف با درصدهای حجمی مختلف بر ظرفیت باربری با تیر شاهد (بدون الیاف)

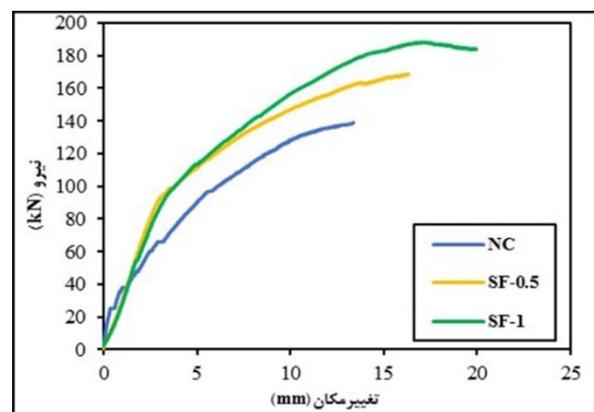


شکل ۲۳- نمودار میله‌ای مقایسه‌ای تأثیر الیاف با درصدهای حجمی مختلف بر تغییر مکان نهایی وسط دهانه با تیر شاهد (بدون الیاف)

است، تغییر مکان تسلیم، تغییر مکان متناظر با نقطه انتهای خط اول و ابتدای خط دوم در نمودار دوخطی معادل و تغییر مکان نهایی، تغییر مکان متناظر با نقطه انتهای خط دوم در نمودار دوخطی معادل است. همچنین با استفاده از نتایج ثبت شده توسط ۵ تغییر مکان سنج قرار گرفته زیر نمونه، برای هر تیر نیم‌رخ طولی خیز نهایی در یک بار ثابت به عنوان بار مرجع که در اینجا معادل ۹۰ درصد ظرفیت باربری در نظر گرفته شد، ترسیم گردید.

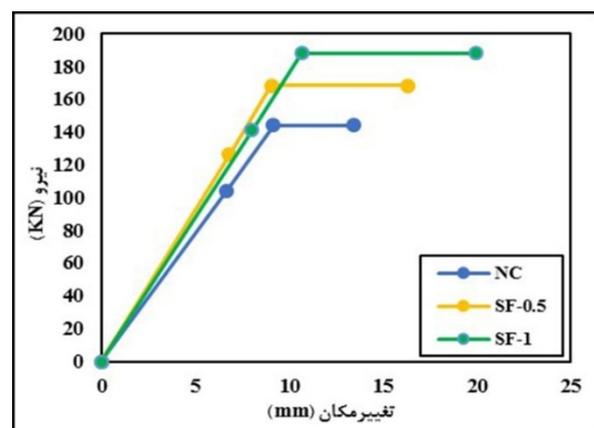
### ۳-۳-۱- نمودارهای نیرو-تغییر مکان

نمودارهای نیرو-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌ها در شکل ۲۰ و نمودارهای دوخطی معادل آن‌ها نیز در شکل ۲۱ جهت مقایسه ارائه شده است.



شکل ۲۰- نمودارهای نیرو-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های

مورد مطالعه



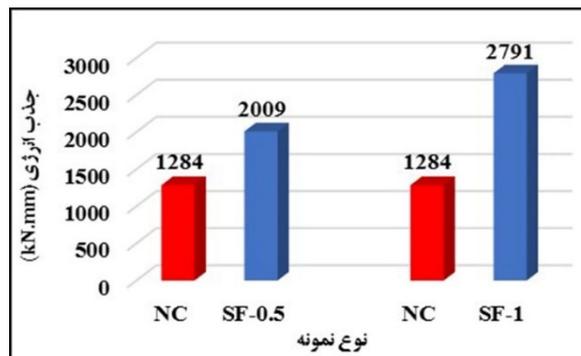
شکل ۲۱- نمودارهای دوخطی معادل منحنی‌های نیرو-تغییر مکان

نمونه‌های مورد مطالعه

تیرهای مورد مطالعه در پژوهش در دو نوع بدون الیاف و با الیاف فولادی (بدنه موج‌دار و دو انتها قلاب) با درصدهای حجمی ۰/۵

نتایج تحقیق Padmarajaiah و همکاران [۵۷] مشاهده گردید که افزودن الیاف فولادی با درصد حجمی ۰/۵ و ۱ درصد به طرح مخلوط بتن تیرهای بتنی پیش‌تنیده ظرفیت جذب انرژی این تیرها را به ترتیب ۲۵ و ۷۸ درصد افزایش می‌دهد.

با توجه به شکل ۲۱ و نتایج ارائه شده در جدول ۸ می‌توان نتیجه گرفت اضافه نمودن الیاف فولادی از نوع بدنه موج‌دار و دو انتها قلاب به مخلوط بتن با درصد حجمی ۰/۵ درصد، سختی مؤثر تیر را ۲۰ درصد افزایش و افزایش درصد حجمی این نوع الیاف به مقدار ۱٪ سختی مؤثر را ۱۳ درصد افزایش می‌دهد. همچنین شکل‌پذیری تیرها با اضافه شدن الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۰/۵ و ۱ درصد به ترتیب ۲۴ درصد و ۲۸ درصد افزایش می‌یابد. نمودار میله‌ای جهت مقایسه و بررسی تأثیر الیاف با درصدهای حجمی مختلف بر سختی مؤثر و شکل‌پذیری تیر شاهد (بدون الیاف) در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ ارائه شده است.

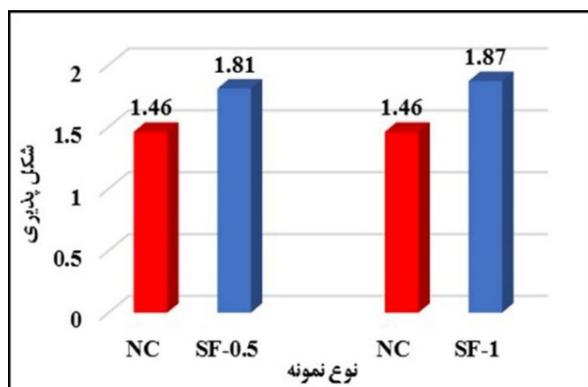


شکل ۲۴- نمودار میله‌ای مقایسه‌ای تأثیر الیاف با درصدهای حجمی مختلف بر جذب انرژی با تیر شاهد (بدون الیاف)

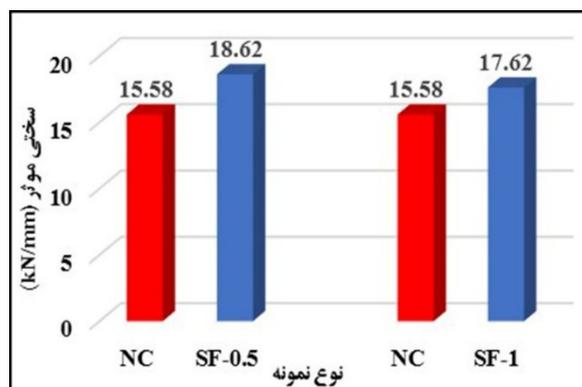
در مطالعه‌ای که توسط Elsharkawy و همکاران [۵۶] انجام شد، رفتار تیرهای پس‌کشیده با بتن الیافی بررسی گردید و مشخص شد که اضافه نمودن الیاف فولادی به میزان ۰/۵ و ۱ درصد حجمی به مخلوط بتن پیش‌تنیده، باعث افزایش به ترتیب ۱۵ و ۲۲ درصدی در شاخص ظرفیت باربری می‌شود. همچنین در

جدول ۸- خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده روی تیرهای پیش‌تنیده مورد مطالعه

نام تیر	بار ترک- خوردگی (kN) $P_{cr}$	دهانه متناسب با بار ترک- خوردگی (mm) $\Delta_{cr}$	بار نهایی (kN) $P_u$	متناسب با بار نهایی (mm) $\Delta_u$	نسبت بار ترک خوردگی به بار نهایی $P_u/P_{cr}$	شکل‌پذیری $\mu$	سختی مؤثر $K_{eff}$ (kN/mm)	جذب انرژی E (kN.mm)
NC	۸۹	۴/۹۷	۱۳۹	۱۳/۴	۰/۶۴	۱/۴۶	۱۵/۵۸	۱۲۸۴
SF-0.5	۱۰۵	۴/۳۹	۱۶۸	۱۶/۳	۰/۶۲۵	۱/۸۱	۱۸/۶۲	۲۰۰۹
SF-1	۱۱۵	۵/۲۲	۱۸۸	۱۷/۴	۰/۶۱۱	۱/۸۷	۱۷/۶۲	۲۷۹۱



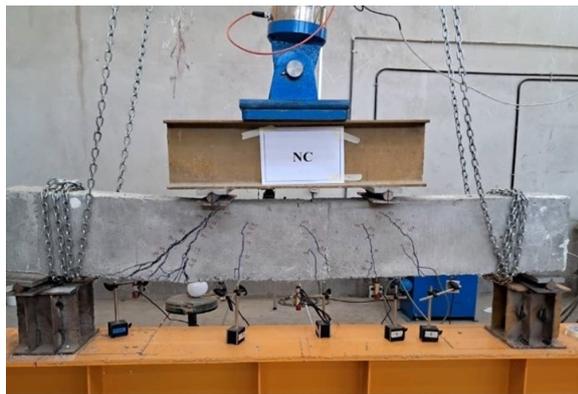
شکل ۲۶- نمودار میله‌ای مقایسه‌ای تأثیر الیاف با درصدهای حجمی مختلف بر شکل‌پذیری با تیر شاهد (بدون الیاف)



شکل ۲۵- نمودار میله‌ای مقایسه‌ای تأثیر الیاف با درصدهای حجمی مختلف بر سختی مؤثر با تیر شاهد (بدون الیاف)

شکل‌پذیری تیرهای بتنی پیش‌تنیده، تأیید گردید. نتایج مشابه در تحقیقات [۵۸]، [۵۹] و [۶۰] ناشی از اضافه نمودن الیاف فولادی به

صحت نتایج این قسمت با مقایسه با نتایج تحقیق Padmarajaiah و همکاران [۵۷] که افزایش ۱۸ و ۴۵ درصدی در شاخص



NC



الف - تیر NC



SF-0.5



ب - تیر SF-0.5



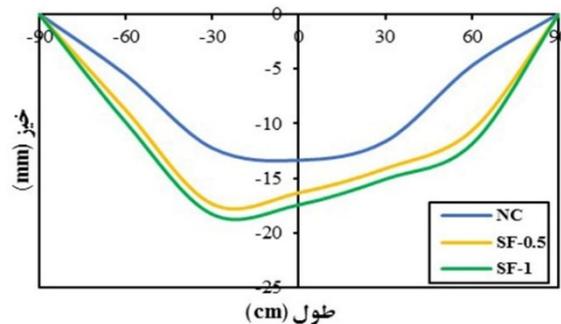
SF-1



ج - تیر SF-1

شکل ۲۸- نحوه شکست تیرها تحت نیروی خمشی

طرح مخلوط بتن در تیرهای بتنی پیش تنیده گزارش شده است. نمودارهای نیمرخ طولی خیز نمونه‌های مورد مطالعه جهت مقایسه در شکل ۲۷ ارائه شده است.



شکل ۲۷- نمودار نیمرخ‌های طولی خیز نمونه‌های مورد مطالعه

با توجه به نمودار مقایسه‌ای شکل ۲۷ و نتایج جدول ۸ می‌توان نتیجه گرفت که نمودار خیز تیرهای مورد مطالعه نسبت به وسط دهانه غیر متقارن می‌باشد. مقدار خیز در نیمه‌ای از تیر که دچار شکست نهایی می‌شود، نسبت به نیمه دیگر بیشتر می‌باشد. با توجه به اینکه گسیختگی در تیرهای بتنی حاوی بتن معمولی و بتن الیافی تقریباً به صورت مشابه و در مود خمشی-برشی اتفاق افتاد و خیز اتفاق افتاده در محل وقوع ترک اصلی منجر به شکست تیر در فاصله یک سوم ابتدایی یا انتهایی تیر (محدوده‌ی بانبروهای داخلی خمشی و برشی توامان) بیشتر که همین امر باعث نامتقارن بودن پروفیل خیز در طول تیر شد. لازم به ذکر است که افزودن الیاف از نوع فولادی باعث افزایش شکل پذیری تیر و در نتیجه افزایش خیز تیر می‌شوند.

### ۳-۴- مد شکست و الگوی ترک در تیرها

در شکل ۲۸ مد شکست و همچنین توزیع ترک‌ها در تیرها نشان داده شده است. مشاهدات حین آزمایش، حاکی از عرض کمتر ترکها در تیرهای مسلح شده به الیاف به دلیل دوختگی ترکها توسط الیاف‌ها بود. با توجه به وقوع گسیختگی تیرهای مورد مطالعه در سمت چپ تیر، رشد و توزیع ترک در این ناحیه بیشتر از سمت راست تیر می‌باشد. رشد ترک در محل شکست (سمت چپ تیرها) به معنی گسترش طول و عمق ترک در آن ناحیه می‌باشد. ضمناً تعداد ترک‌های ایجاد شده در تیرهای حاوی بتن الیافی نسبت به تیر بدون الیاف بیشتر است.

- اضافه نمودن الیاف فولادی از نوع بدنه موج دار و دو انتها قلاب به مخلوط بتن باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن گردید و با افزایش درصد حجمی این نوع الیاف، مقاومت‌های فشاری و کششی نیز افزایش پیدا کردند بنابراین بین مقاومت فشاری یا کششی در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی با میزان الیاف مورد استفاده رابطه مستقیم وجود دارد.

- مدول الاستیسیته بتن در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی کاهش می‌یابد و این میزان کاهش با میزان الیاف مورد استفاده در مخلوط بتن، رابطه مستقیم دارد.

- شاخصهای مورد نظر جهت بررسی تأثیر الیاف بر رفتار خمشی در تیرهای مورد مطالعه شامل ظرفیت باربری نهایی، تغییر مکان نهایی وسط دهانه، ظرفیت جذب انرژی، شکل پذیری و سختی مؤثر تیر بود که تأثیر الیاف بر هر کدام از این شاخصها به شرح ذیل می‌باشد:

- از نظر ظرفیت باربری نهایی، اضافه نمودن الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۰/۵ و ۱ درصد به مخلوط بتن ظرفیت باربری نهایی را به ترتیب به میزان ۲۱ درصد و ۳۵ درصد افزایش می‌دهد.
- از نظر مقدار خیز نهایی تیر، اضافه نمودن الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۰/۵ و ۱ درصد به مخلوط بتن، شکست ترد را کنترل و خیز نهایی تیر را به ترتیب به میزان ۲۲ درصد و ۳۰ درصد افزایش می‌دهد.
- از نظر میزان جذب انرژی، اضافه نمودن الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۰/۵ و ۱ درصد به مخلوط بتن، جذب انرژی تیر را به ترتیب به میزان ۵۶ درصد و ۱۱۷ درصد افزایش می‌دهد.
- از نظر میزان شکل پذیری، استفاده از الیاف فولادی شکل پذیری تیرها را افزایش داد. اضافه نمودن الیاف با درصدهای حجمی ۰/۵ و ۱ درصد به مخلوط بتن، شکل پذیری تیر را به ترتیب به میزان ۲۴ درصد و ۲۸ درصد افزایش می‌دهد.
- از نظر سختی مؤثر تیر، اضافه نمودن الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۰/۵ درصد و ۱ درصد، سختی مؤثر تیر را به ترتیب به میزان ۲۰ درصد و ۱۳ درصد افزایش

روند شروع ترک خوردگی در تیرها به این صورت بود که در باری معادل تقریباً ۰/۶۰ تا ۰/۶۵ ظرفیت باربری تیرها، اولین ترک به صورت خمشی در حوالی وسط دهانه از زیر تیر شروع و به سمت بالا گسترش پیدا کرد. شروع ترک خوردگی در تیرهای NC، SF-0.5 و SF-1 به ترتیب در بارهای ۸۹ کیلونیوتن، ۱۰۵ کیلونیوتن و ۱۱۵ کیلونیوتن اتفاق افتاد. با افزایش میزان بار وارده ترک‌های خمشی مشابه در اطراف ترک اولیه شروع به شکل گیری و رشد نمودند. ترک‌های خمشی ایجاد شده در نمونه‌ها صرفاً در ارتفاع ناحیه کششی امتداد یافتند و پس از رسیدن به ناحیه فشاری تیر بسته شدند. با افزایش بارگذاری ترک‌های برشی در نزدیکی تکیه گاه مشاهده گردید. اولین ترک‌های برشی در باری معادل تقریباً ۰/۷۰ تا ۰/۸۰ ظرفیت باربری تیرها از تار پایین نزدیک به تکیه گاه سمت چپ تیرها به سمت محل اعمال بار در راستای بست مورب فشاری رشد نمود. اولین ترک‌های برشی در تیرهای NC، SF-0.5 و SF-1 به ترتیب در بارهای ۹۸ کیلونیوتن، ۱۳۱ کیلونیوتن و ۱۴۴ کیلونیوتن اتفاق افتاد. عرض ترک‌ها رفته رفته بیشتر شد تا در نهایت و پس از رسیدن بار به ظرفیت باربری نهایی، باعث شکست تیرها در مود خمشی-برشی شد. بار شکست در تیرهای NC، SF-0.5 و SF-1 به ترتیب برابر ۱۳۹ کیلونیوتن، ۱۶۸ کیلونیوتن و ۱۸۸ کیلونیوتن ثبت گردید.

#### ۴- نتیجه گیری

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، تعداد ۳ عدد تیر بتنی پیش-تینیده با مشخصات ارائه شده که شامل یک تیر بتنی پیش تینیده بدون استفاده از الیاف در مخلوط بتن به عنوان نمونه شاهد و دو تیر بتنی پیش تینیده با الیاف فولادی و با دو درصد حجمی مختلف ساخته شد و سپس تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. هدف از انجام این پژوهش مطالعه رفتار خمشی این تیرها و نقش مسلح کردن بتن به الیاف در ظرفیت باربری آنها بود. بنابراین پس از انجام آزمایش شاخصهایی مانند ظرفیت باربری نهایی، بار ترک خوردگی، خیز وسط دهانه تیر، نحوه رشد ترک‌ها، میزان جذب انرژی تیرها، شکل پذیری و سختی مؤثر برای هر تیر تعیین و با هم مقایسه و تأثیر الیاف مشخص گردید. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، مهم ترین نتیجه‌های حاصل از این پژوهش به صورت زیر بیان می‌گردد:

Lightweight Concrete,” *Cement and Concrete Composite*, vol. 19, pp. 307-313, 1997.

[6] K. Marar, Ö. Eren, I. Yitmen, “Compression Specific Toughness of Normal Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (NSSFRC) and High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (HSSFRC),” *Materials Research*, vol. 14, pp. 239-247, 2011.

[7] P.S. Song, S. Hwang, “Mechanical Properties of High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 18, pp. 669-673, 2004.

[8] Ö. Eren, T. Çelik, “Effect of Silica Fume and Steel Fibers on Some Properties of High-Strength Concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 11, pp. 373-382, 1997.

[9] S. Yazici, G. Inan, V. Tabak, “Effect of Aspect Ratio and Volume Fraction of Steel Fiber on the Mechanical Properties of SFRC,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1250-1253, 2007.

[10] W. Tanoli, A. Naseer, F. Wahab, “Effect of Steel Fibers on Compressive and Tensile Strength of Concrete,” *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, vol. 3, pp. 393-397, 2014.

[11] A.T. Noamana, B.H. Abu Bakar, M.D. Hazizan, “Effect of curmb rubber aggregate on toughness and impact energy of steel fiber concrete,” PhD of engineering, Civil Eengineering, Universiti Sains Malaysia, 2016.

[12] R.N. Swamy, S.A. Al-Taan, “Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete,” *In Journal Proceedings*, vol. 78, no. 5, pp. 395-405, 1981.

[13] D.Y. Yoo, N. Banthia, J.M. Yang, Y.S. Yoon, “Size effect in normal- and high-strength amorphous metallic and steel fiber reinforced concrete beams,” *Construction Building and Materials*, vol. 121, pp. 676-685, 2016.

[14] A. Caggiano, M. Cremona, C. Faella, C. Lima, E. Martinelli, “Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers,” *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 832-840, 2012.

[15] A. Hosseini, D. Mostofinejad, M. Hajialiluebonab, “Displacement and strain field measurement in steel and RC beams using particle image velocimetry,” *Engineering Mechanics*, vol. 4, pp. 1-10, 2012.

[16] ACI Committee 544, “Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96- Reapproved 2009),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 66, 1996.

[17] R.B. Abdui-Ahad, O.Q. Aziz, “Flexural strength of reinforced concrete T-beams with steel fibers,” *Cement Concrete Composite*, vol. 21, no. 1,

می دهد.

- با ترسیم نمودار نیمرخ طولی خیز تیرها مشاهده گردید که اکثر این نمودارها نسبت به وسط دهانه غیرمقارن و خیز تیر در نیمه‌های که شکست نهایی در آن اتفاق می افتد نسبت به نیمه دیگر بیشتر است. همچنین مقدار خیز در نمونه‌های دارای الیاف نسبت به نمونه‌های بدون الیاف بیشتر است و این افزایش خیز با افزایش درصد حجمی الیاف استفاده شده در مخلوط بتن رابطه مستقیم دارد.

- نحوه شروع ترک خوردگی و شکست نهایی در اکثر تیرها بدین صورت بود که اولین ترک در باری معادل  $0/65-0/60$  بار نهایی، به صورت خمشی در نزدیکی وسط دهانه و از زیر نمونه شروع و به سمت بالا گسترش پیدا می کرد. با افزایش میزان بار وارده ترک‌های برشی در نزدیکی تکیه گاه شروع به شکل گیری و رشد می کردند. ترک‌های خمشی ایجاد شده در نمونه در ارتفاع ناحیه کششی امتداد و پس از رسیدن به ناحیه فشاری تیر بسته می شدند. در نهایت در مقدار بار معادل ظرفیت باربری نهایی تیر شکست در مود خمشی-برشی در یکی از دو سمت تیر و نزدیک به تکیه گاه اتفاق می افتاد.

- با افزودن الیاف به بتن، نسبت بار ترک خوردگی به بار نهایی در تیرها کاهش یافت و شروع ترک خوردگی بتن در تیرهای با الیاف در مقدار بار بیشتری نسبت به حالت بدون الیاف اتفاق افتاد.

## ۵- مراجع

[1] DY. Yoo, YS. Yoon, N. Banthia, “Predicting the post-cracking behavior of normal-and high-strength steel fiber-reinforced concrete beams,” *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 477-48, 2015.

[2] C. Soranakom, B. Mobasher, “Closed-form solutions for flexural response of fiber-reinforced concrete beams,” *Journal of engineering mechanics*, vol. 133, no. 8, pp. 933-941, 2007.

[3] W. Lin, T. Yoda, N. Taniguchi, “Application of SFRC in steel-concrete composite beams subjected to hogging moment,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 101, pp. 175-183, 2014.

[4] F. Altun, T. Haktanir, K. Ari, “Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams,” *Construction Building and Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 654-661, 2007.

[5] J. Gao, W. Sun, K. Morino, “Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced, High Strength,

- [31] M. Alberti, A. Enfedaque, J. Gálvez, "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, 2016.
- [32] A. Hosseini, D. Mostofinejad, M. Hajialiluebonab, "Displacement and strain field measurement in steel and RC beams using particle image velocimetry," *Engineering Mechanics*, vol. 4, pp. 1-10, 2012.
- [33] UNI 11039-2, "Steel Fiber Reinforced Concrete - Part2: Test Method for Determination of First Crack Strength and Ductility Indexes," 2003.
- [34] EN 12390-3, "Testing Hardened Concrete—Part3: Compressive Strength of Test Specimens," 2009.
- [35] A. Meda, F. Minelli, G.A. Plizzari, "Flexural behavior of RC beams in fiber reinforced concrete," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, pp. 2930-2937, 2012.
- [36] M.N. Soutsos, T.T. Le, A.P. Lampropoulos, "Flexural performance of fiber reinforced concrete made with steel and synthetic fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 704-710, 2012.
- [37] H.R. Pakravan, M. Latifi, M. Jamshidi, "Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review," *Construction and building materials*, vol. 142, pp. 280-294, 2017.
- [38] E. Rahimi, J. Shafaei, M.R. Esfahani, "Experimental Evaluation of Structural Performance of FRC Beams with Hooked Metal and Macro Polymer Fibers at Different Levels of Reinforcement Corrosion," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 1275-1294, 2021.
- [39] T. Job, A. Ramaswamy, "Crack width in partially prestressed T-beams having steel fibers," *ACI structural journal*, vol. 103, no. 4, pp. 568, 2006.
- [40] C. Lakavath, S.S. Joshi, S.S. Prakash, "Investigation of the effect of steel fibers on the shear crack-opening and crack-slip behavior of prestressed concrete beams using digital image correlation," *Engineering Structures*, vol. 193, p.p. 28-42, 2019.
- [41] S.S. Joshi, N. Thammishetti, S.S. Prakash, "Efficiency of steel and macro-synthetic structural fibers on the flexure-shear behaviour of prestressed concrete beams," *Engineering Structures*, vol. 171, p.p. 47-55, 2018.
- [42] C. Lakavath, S.S. Prakash, S. Dirar, "Experimental and numerical studies on shear behaviour of macro-synthetic fibre reinforced prestressed concrete beams," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 654-661, 2007.
- [18] F. Altun, T. Haktanir, K. Ari, "Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 654-661, 2007.
- [19] A. Fatih, A. Bekir, "Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 38, no. 1, pp. 575-581, 2013.
- [20] S.P. Yap, U.J. Alengaram, K.H. Mo, M.Z. Jumaat, "Ductility behaviours of oil palm shell steel fibre-reinforced concrete beams under flexural loading," *European Journal Environment Civil Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 866-878, 2019.
- [21] R. Narayanan, I.Y.S. Darwish, "Use of steel fibers as shear reinforcement," *Structural Journal*, vol. 84, no. 3, pp. 1125-1132, 1987.
- [22] C. Qian, I. Parnaikuni, "Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending," *Cement Concrete Composite*, vol. 21, no. 1, pp. 73-81, 1999.
- [23] A. Jodeiri, R. Qaitlig, "Effect of Steel Fibre on Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beam," *Journal of Civil Engineering Research*, vol. 2, pp. 100-107, 2012.
- [24] A. Fatih, H. Tefaru, A. Kamura, "Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 654-661, 2005.
- [25] K. Marar, Ö. Eren, T. Celik, "Relationship between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete," *Materials Letters*, vol. 47, pp. 297-304, 2001.
- [26] M. Di Prisco, G. Plizzari, L. Vandewalle, "Fiber reinforced concrete: new design perspectives," *Materials and Structures*, vol. 42, no. 9, pp. 1261-1281, 2009.
- [27] V. Afroughsabet, "High-performance fiber-reinforced concrete: a review," *materials science*, vol. 51, pp. 6517-6551, 2016.
- [28] B.H. oh, J.C. Kim, Y.C. Choi, "Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, pp. 243-257, 2007.
- [29] F. Bencardino, L. Rizzuti, G. Spadea, R. Swamy, "Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties," *Composites Part B: Engineering*, vol. 41, pp. 17-24, 2010.
- [30] A. Caggiano, M. Cremona, C. Faella, C. Lima, E. Martinelli, "Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 832-840, 2012.

- post-tensioned fiber concrete beams,” HBRC Journal, vol. 9, no. 3, pp. 216-226, 2013.
- [57] S. K. Padmarajaiah, A. Ramaswamy, “Flexural strength predictions of steel fiber reinforced high-strength concrete in fully/partially prestressed beam specimens,” Cement and Concrete Composites, vol. 26, no. 4, pp. 275-290, 2004.
- [58] P.R. Tadepalli, H.B. Dhonde, Y.L. Mo, T.T. Hsu, “Shear strength of prestressed steel fiber concrete I-beams,” International Journal of Concrete Structures and Materials, vol. 9, pp. 267-281, 2015.
- [59] S. S. Joshi, N. Thammishetti, S. S. Prakash, “Efficiency of steel and macro-synthetic structural fibers on the flexure-shear behaviour of prestressed concrete beams,” Engineering Structures, vol. 171, pp. 47-55, 2018.
- [60] Z. Zheng, Y. Sun, X. Pan, C. Su, J. Kong, “The optimum steel fiber reinforcement for prestressed concrete containment under internal pressure,” Nuclear Engineering and Technology, vol. 54, no. 6, pp. 2156-2172, 2022.
- Building Materials, vol. 291, p. 123313, 2021.
- [43] ACI 318-19, “Building Code Requirements for Structural Concrete. Reported by ACI Committee 318,” ACI Standard, 2019.
- [44] ASTM Standard C150-07, “Standard Specification for Portland Cement,” ASTM, 2012.
- [45] ASTM Standard C494/C494M-17, “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete,” ASTM, 2020.
- [46] ASTM Standard A421/A421M-21, “Standard Specification for Stress-Relieved Steel Wire for Prestressed Concrete,” ASTM, 2021.
- [47] ISIRI 1608-3 Standard, “Compressive Strength of Test Specimens- Test Method,” ISIRI, 2015.
- [48] ISIRI 6047 Standard, “Determination of the splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens– Test method,” ISIRI, 2016.
- [49] A. Ghorbani, “Experimental and Analytical Investigation on The Effect of Steel Fibers on The Mechanical Properties and Performance of Fibrous Self-Compacting Concretes,” Journal of Concrete Structures and Materials, vol. 6, no. 2, pp. 115-131, 2021.
- [50] A. Duzgun Oguz, G. Rustem, C. Aydin Abdulkadir, “Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete,” Materials Letters, vol. 59, no. 27, pp. 3357-3363, 2005.
- [51] A. h. Sahraei Moghadam, A. r. Mirza Goltabar Roshan, “Rheological, mechanical, environmental, and economic comparison of the use of industrial and recycled steel fibers in self-compacting concrete,” Amirkabir Journal of Civil Engineering, vol. 55, no. 7, pp. 1487-1504, 2023.
- [52] M. Muhammad Ranjbar, S.H. Ghasemzadeh Mosavinejad, Sh. Charkhtab, M.E Zakeri, M. Arayeshgar, S. Easapour, “Investigation of effect of steel fibers on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete with Scoria,” Concrete Research, vol. 8, no. 1(13), pp. 41-54, 2016.
- [53] M. Rakhshani mehr, H. Bakhshi, “Effect of Steel Fibers and Concrete Strength on Mechanical specifications of Steel Fiber Reinforced Concrete,” Concrete Research, vol. 8, no. 1(13), pp. 101-112, 2016.
- [54] ISIRI 525 Standard, “static modulus of elasticity and Poisson’s ratio of concrete in compression- Test Method,” ISIRI, 2015.
- [55] T. Paulay, M.J.N. Priestly, “Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings,” vol. 768. New York: Wiley, 1992.
- [56] H. E. A. E. Elsharkawy, T. Elafandy, A. W. EL-Ghandour, A. A. Abdelrahman, “Behavior of

## **Experimental investigation of the effect of using steel fibers on the flexural behavior of prestressed concrete beams**

**Pouya Hassanvand\***

**Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran.**

**Freydoon Rezaie**

**Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.**

### **Abstract**

The concrete used in prestressed members has higher strength than the concrete used in conventional reinforced concrete structures, and high-strength concretes have somewhat different behavior compared to conventional concretes. As the strength increases, the ductility of the concrete decreases and its brittleness increases. An important step towards overcoming this problem is the use of fibers in the concrete mix design. The purpose of this research is to use fibers in the concrete mix design used in the construction of prestressed specimens and to conduct a series of experiments to investigate the effect of the fibers used on the load-bearing capacity and structural performance of the prestressed specimens under study. For this purpose, 3 concrete beam specimens were fabricated in a prestressed form with given dimensions in the structural laboratory. The fibers used are steel fibers with a corrugated body and hook ends. The specimens were subjected to a four-point bending loading test for examination and the parameters of load-bearing capacity, energy absorption, effective stiffness, ductility and mid-span deflection were investigated. The results show that adding steel fibers to the concrete mix increased the compressive and tensile strengths of concrete and by increasing the volume percentage of this type of fiber, the compressive and tensile strengths also increased. Also, the parameters considered for investigating the bending behavior of the studied beams increase by adding steel fibers to the concrete mixture, and this increase is directly related to the increase in the volume percentage of fibers used in the concrete mixture.

**Keywords:** Concrete beam, prestressing, fiber concrete, steel fibers, flexural behavior, load-bearing capacity.

---

\* Corresponding Author: pouya.hassanvand@abru.ac.ir

