

بررسی و مقایسه تاثیر ایاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا در بهبود رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح

فریدون امیدی نسب^{۱*}، عباس اسکندری^۱، امیرحسین صحرایی مقدم^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

کلمات کلیدی:

ایاف فولادی

ایاف پلی‌پروپیلن

ایاف کورتا

رفتار خمشی

تیر بتن مسلح

شکل پذیری

خلاصه: مزایای سازه‌های بتن آرمه نسبت به دیگر سازه‌ها، سبب شده که امروزه بتن به یکی از پرکاربردترین مصالح ساخت و ساز تبدیل گردد. با این حال، رفتار ترد بتن تحت بارهای خمشی از نقاط ضعف آن محسوب می‌شود. بنابراین، تحقیق حاضر به بررسی تاثیر ایاف‌های مختلف بر رفتار خمشی تیرهای بزرگ مقیاس می‌پردازد. به این منظور، چهار نمونه تیر بتن مسلح با طول ۱۵۰، عرض ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر با جزئیات آرماتورگذاری یکسان ساخته شد. تیرها با استفاده از سه نوع ایاف شامل ایاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا به اندازه ۰/۵ درصد حجم بتن مسلح شدند. آزمایش مقاومت خمشی بر اساس استاندارد ASTM C78 بر روی تیرها انجام و پارامترهای مقاومت خمشی، جذب انرژی، شکل پذیری و کرنش میلگردها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تیرهای حاوی ایاف فولادی در مقایسه با تیرهای حاوی ایاف‌های پلی‌پروپیلن و کورتا از لحاظ پارامترهای مقاومت خمشی، جذب انرژی و ظرفیت میلگردهای کششی عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، نتایج نشان دهنده‌ی شکل‌پذیری مطلوب‌تر تیرهای مسلح شده به ایاف کورتا نسبت به تیرهای مسلح شده به ایاف پلی‌پروپیلن می‌باشد.

۱- مقدمه

این تحقیقات نشان می‌دهد که خصوصیات مکانیکی در انواع بتن‌های ایافی (بتن معمولی، بتن سبک و بتن مقاومت بالا) بهبود یافته و باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی، سایشی و ضربه‌ای بتن شده است [۸-۵]. استفاده از ایاف فولادی در تیرهای بتن مسلح و بررسی رفتار خمشی آن‌ها در تحقیقات زیادی انجام شده است که نشان می‌دهد استفاده از ایاف فولادی بهبود در مقاومت نهایی خمش، رفتار شکست، رفتار ترک خوردگی و کرنش خمشی را به دنبال دارد [۲۰-۹]. همچنین استفاده از ایاف پلیمری نظیر پلی‌پروپیلن در تیرهای بتن مسلح نیز باعث بهبود پارامترها و رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح می‌گردد [۲۵-۲۱]. افزایش مقدار ایاف موجب افزایش انرژی شکست بتن می‌شود. نتایج آزمایشات مربوط به استفاده از ایاف در بتن نشان می‌دهد که مقاومت ترک خوردگی و رفتار پس از ترک خوردگی به شدت وابسته به حجم ایاف است [۳۳-۲۶]. در تعداد کمی از مطالعات نیز در تیرهای بتن مسلح از ایاف فولادی و ایاف پلیمری استفاده شده و رفتار خمشی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات مشخص

بتن‌های حاوی سیمان، آب، سنگدانه، ایاف پراکنده یا یکنواخت، بتن ایافی نامیده می‌شود. این کامپوزیت با اضافه کردن یک نوع یا ترکیبی از ایاف به مخلوط بتن معمولی به دست می‌آید. استفاده از ایاف در سازه‌های بتنی در دهه ۱۹۷۰ به دلیل توانایی آن‌ها در تقویت خواص مکانیکی بتن آغاز شد. امروزه تحقیقات گسترده‌ای در مورد استفاده از فولادی، شیشه، سرامیک و ایاف مصنوعی جهت بهبود خصوصیات مکانیکی سازه‌های بتنی انجام شده می‌شود. ایاف به طور معمول در مقدار کافی برای بهبود عملکرد شکل‌پذیری با کنترل ترک خوردگی‌های ماکرو و میکرو در ماتریس بتن، افزایش مقاومت کششی و کاهش ماهیت شکننده ماتریس بتن با تقویت بسیار کم مقاومت فشاری اضافه می‌شوند. علاوه بر این، تکثیر و ایجاد ترک می‌تواند با استفاده از ایاف به طور قابل توجهی کاهش یابد [۴-۱].

برخی تحقیقات در خصوص استفاده از ایاف در بتن انجام شده و نتایج

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: omidinasab.f@lu.ac.ir



جدول ۱. نام‌گذاری تیرهای بتن مسلح

Table 1. Naming of reinforced concrete beams.

ردیف	توضیحات	الیاف (درصد استفاده)	نماد
۱	تیر بتن مسلح معمولی (نمونه مرجع)	-	RC
۲	تیر بتن مسلح تقویت شده با الیاف فولادی	فولادی (۰.۱)	SFRC
۳	تیر بتن مسلح تقویت شده با الیاف پلیمری پلی پروپیلن	پلیمری پلی پروپیلن (۰.۱)	PPFRC
۴	تیر بتن مسلح تقویت شده با الیاف پلیمری میکس کورتا پلند	پلیمری کورتا پلند (۰.۱)	KFRC

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- معرفی نمونه‌ها

در این تحقیق تیرهایی در مقیاس واقعی و با طول ۱۵۰، عرض ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ساخته شد. رفتار این تیرها تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بررسی شد. پارامترهای ثابت آزمایشگاهی این تحقیق شامل طرح اختلاط و ابعاد نمونه‌ها و پارامترهای متغیر شامل نوع الیاف مورد استفاده بود. در جدول ۱، نام‌گذاری نمونه‌های مورد بررسی نشان داده شده است. در شکل ۱ طرح و نحوه آرماتورگذاری تیرها نشان داده شده‌اند.

در نام‌گذاری انجام شده در جدول ۱، منظور از RC بتن مسلح، SF الیاف فولادی، PPF الیاف پلی پروپیلن، KF الیاف کورتا است. به عنوان نمونه نماد PPFRC به معنی تیر بتن مسلح حاوی الیاف پلی پروپیلن است. آرماتورگذاری تیرها برای همه نمونه‌ها یکسان و به صورت شکل ۱ می‌باشد. به عبارتی همه چهار تیر ساخته شده دارای آرماتورگذاری یکسانی در جهت طولی و عرضی هستند.

۲-۲- مصالح

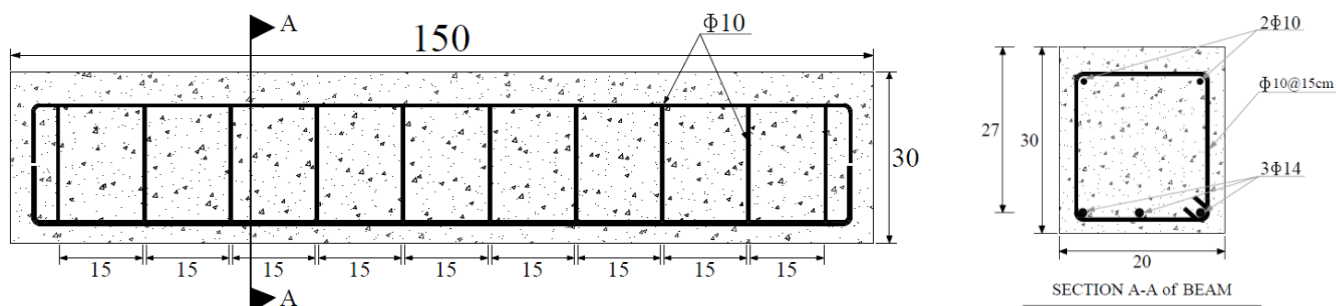
سیمان: در ساخت نمونه‌های این تحقیق از سیمان پرتلند نوع II با چگالی (3 gr/cm^3)، بر اساس استاندارد [۳۸] ASTM C150 استفاده شد. در جداول ۲ و ۳ به ترتیب، آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده است.
آب: در این تحقیق، آب شرب معمولی شهر خرم‌آباد (عاری از آلودگی‌های مضر) در ساخت نمونه‌ها استفاده شد.

شده که الیاف فولادی تاثیر بیشتری به نسبت سایر الیاف مصنوعی بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح داشته و باعث بهبود رفتار خمشی آن‌ها می‌گردد [۳۷-۳۴].

با جمع‌بندی مرور مطالعات، مشخص می‌گردد که تحقیقات انجام شده در خصوص بتن‌های الیافی در زمینه‌های زیر انجام شده است:

- خصوصیات مکانیکی بتن‌های غیرمسلح با الیاف‌های فولادی و مصنوعی.
- رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با الیاف فولادی.
- رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با الیاف مصنوعی.
- مقایسه رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن.

در برخی تحقیقات تاثیر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با الیاف فولادی و در برخی تحقیقات رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با الیاف مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات خیلی کمی در خصوص بررسی و مقایسه اثرات الیاف فولادی و الیاف مصنوعی در رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح انجام شده است. همچنین در بیشتر مطالعات انجام شده تمرکز اصلی بر ظرفیت خمشی، ترک خوردگی و نحوه شکست این تیرها بوده است. لذا در تحقیق حاضر از الیاف‌های فولادی و مصنوعی کورتا و پلی پروپیلن به صورت مجزا در مسلح نمودن تیرهای بتن مسلح استفاده شد. رفتار خمشی تیرهای ساخته شده تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای انجام بررسی شد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، شامل رفتار شکست، انرژی جذب شده، شکل‌پذیری و ظرفیت بار نهایی نمونه‌ها می‌باشند.



شکل ۱. نحوه آرماتورگذاری تیرها.

Fig. 1. Manner of beam reinforcement.

جدول ۲. آنالیز شیمیایی سیمان.

Table 2. Chemical analysis of cement.

L.O.I	Cl	CaO.f	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیب شیمیایی
۱/۰۵	---	۰/۷۵	---	---	۲/۱	۱/۷۵	۶۳/۲	۴/۴	۵/۱	۲۱/۵	(%)

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سیمان.

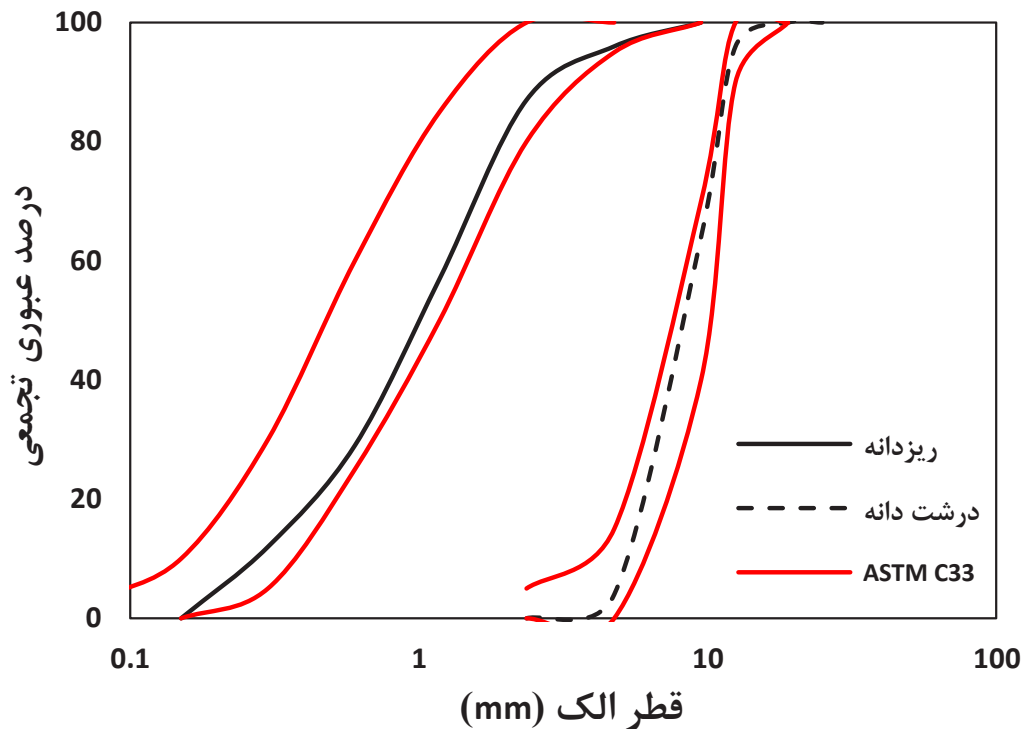
Table 3. Physical properties of cement.

وزن مخصوص (g/cm ³)	سطح مخصوص (g/cm ²)	انبساط طولی	زمان گیرش اولیه (min)	زمان گیرش نهایی (min)
۳/۱	۳۰۰۰	۰/۰۳	۱۳۰	۲۱۵

میلگرد: تمامی میلگردهای مورد استفاده جهت مسلح نمودن در تیرها از نوع AII و با شماره ۱۰ و ۱۴ می‌باشند. مشخصات مکانیکی میلگردهای مصرفی در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این مشخصات از آزمایش کشش مستقیم میلگرد توسط دستگاه یونیورسال، منطبق بر استاندارد [۴۰] ASTM A615 به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده، تنش تسلیم برای میلگردهای با قطر ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر به ترتیب ۳۶۹/۸ و ۲۹۳/۳ مگاپاسکال به دست آمد، در صورتی که تنش نهایی برای میلگردهای مذکور به ترتیب ۵۶۲ و ۵۱۹/۹ مگاپاسکال حاصل شد.

الیافها: در این تحقیق سه نوع الیاف شامل الیافهای فولادی، پلی‌پروپیلن و کورتا به جهت مسلح نمودن تیرهای بتنی به کار رفته است.

سنگدانه‌ها: درشت دانه مورد استفاده در این تحقیق، شن شکسته کوهی عاری از ذرات غیرمجاز رس، لای و مواد زیان‌آور می‌باشد که با درجه شکستگی ۱۰ میلی‌متر از معادن واقع در اطراف شهر خرم‌آباد تهیه و پس از غربال‌گری، با حداکثر اندازه اسمی دانه‌های ۱۰ میلی‌متر و با درصد شکستگی ۶۷ درصد استفاده گردید. ریزدانه مورد استفاده در این تحقیق، ماسه کوهی شکسته شسته شده با مدول نرمی ۲/۳۹ و ارزش ماسه‌ای ۸۵ درصد می‌باشد که از معادن اطراف شهر خرم‌آباد تهیه و پس از غربال مورد استفاده قرار گرفت. دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه بر اساس ضوابط مندرج در استاندارد [۳۹] ASTM C33 انجام شد. شکل ۲ نمودار دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی در ساخت تیرها را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها.

Fig. 2. Particle size distribution curves for aggregates.

در میکسر مخلوط شدند. سپس ۹۰٪ آب مورد نیاز به صورت تدریجی به مخلوط اضافه شد و بعد از آن فوق روان کننده با آب باقی‌مانده ترکیب و به بتن اضافه گردید. برای جلوگیری از مشکل گلوله شدن، الیاف‌های مصرفی در مرحله آخر و به صورت تدریجی به مخلوط بتن اضافه شدند. در جدول ۶ طرح اختلاط استفاده شده در نمونه‌ها نشان داده شده است.

۲-۴- ساخت نمونه‌ها

جهت بتن‌ریزی نمونه‌ها از قالب فلزی استفاده شده است. بدین منظور لازم است با روغن کاری قالب، از چسبندگی بتن به جداره قالب جلوگیری نموده و درزهای قالب را در صورت وجود، توسط بتونه کاری مسدود کرد. برای برش میلگردها از قیچی مخصوص استفاده و در خم کردن میلگردها مقادیر طول و قطر قالب (خم) محاسبه شد. از سیم مفتول برای بستن آرماتورها به هم استفاده گردیده است. در شکل ۴، نحوه بستن شبکه آرماتور و قالب فلزی و روغن کاری جداره‌ها و کف قالب مشاهده می‌شود.

الیاف فولادی مورد استفاده دارای شکل هندسی دو سر قلاب‌دار، طول ۵۰ و قطر ۰/۸ میلی‌متر بود. الیاف مصنوعی مورد استفاده در تحقیق شامل دو گروه الیاف پلیمری پلی‌پروپیلن (PP) و الیاف پلیمری کورتا می‌باشند. الیاف پلیمری پلی‌پروپیلن (به اختصار PP) از نوع الیاف میکروسینتتیک و به صورت رشته‌های کوچک خرد شده اصلاح شده نانویی است. الیاف کورتا با عملکرد سه بعدی خود در بتن یکی از انواع الیاف‌های ماکروسینتتیک است که متشکل از الیاف مرکب پلیمری سازه‌ای و غیرسازه‌ای به شکل تک‌رشته‌ای متشکل از ریزرشته‌های به هم چسبیده از جنس کولپلیمر و الیاف شبکه‌ای مش ماکرو و میکرو از جنس پلی‌الفین و پلی‌پروپیلن اصلاح شده نانویی است. مشخصات و شکل ظاهری الیاف‌ها به ترتیب در جدول ۵ و شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۳- طرح اختلاط

طرح اختلاط بتن در همه تیرها یکسان می‌باشد. مراحل ساخت بتن به گونه‌ای بود که ابتدا سنگدانه‌ها و سیمان به صورت خشک به مدت ۲ دقیقه

جدول ۴. مشخصات مکانیکی میلگردهای مصرفی.

Table 4. Mechanical specifications of the rebars used.

نوع آرماتور	قطر آرماتور (mm)	شماره نمونه	تنش تسلیم (f_y) (MPa)	کرنش شکست (%)	حداکثر تنش (f_u) (MPa)
A II	۱۰	۱	۳۸۲/۸	۲۳/۵	۵۷۶/۹
		۲	۳۵۴/۴	۲۳/۲	۵۵۵/۵
		۳	۳۷۲/۱	۲۳/۷	۵۵۳/۶
	میانگین	۳۶۹/۸	۲۳/۵	۵۶۲	
	۱۴	۱	۳۰۳/۷	۳۰/۵	۵۲۰/۱
		۲	۲۷۲/۴	۲۹/۳	۵۱۸/۵
۳		۳۰۳/۷	۲۸/۴	۵۲۱/۲	
میانگین	۲۹۳/۳	۲۹/۴	۵۱۹/۹		

جدول ۵. مشخصات الیافهای مصرفی.

Table 5. Specifications of the fibers used.

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	چگالی (ton/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
فولادی	۵۰	۰/۸	۷/۸۵	۲۰۰	۱۱۰۰
پلی پروپیلن	۱۲	-	۰/۹۱	۲/۷	۴۰۰
کورتا	۵۴	-	۰/۹۴	۳/۵	۴۷۵



(ج)



(ب)



(الف)

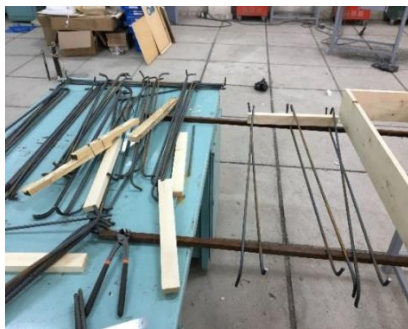
شکل ۳. تصویر الیافها: (الف) فولادی، (ب) کورتا و (ج) پلی پروپیلن.

Fig. 3. Pictures of fibers: (a) Steel, (b) Korta, and (c) Polypropylene.

جدول ۶. طرح‌های اختلاط برای یک متر مکعب بتن.

Table 6. Mix designs for one cubic meter of concrete.

الیاف		ماسه (kg)	شن (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	نسبت آب به سیمان (W/C)	فولاد (kg)
کورتا (kg)	پلی‌پروپیلن (kg)						
-	-	۸۸۹/۲۵	۸۳۰	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	RC
-	-	۳۹/۲۵	۸۸۹/۲۵	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	SFRC
-	۴/۵۵	-	۸۸۹/۲۵	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	PPFRC
۴/۷	-	-	۸۸۹/۲۵	۲۰۰/۷۵	۳۶۵	۰/۵۵	KFRC



شکل ۴. نحوه بستن شبکه آرماتور و قالب فلزی.

Fig. 4. Manner of installation of reinforcement mesh and metal mold.

اعمال بار می‌باشند. جهت اندازه‌گیری تغییر مکان (خیز) دهانه تیرها از تغییر مکان سنج به ظرفیت ۱۰ سانتی‌متر استفاده گردیده است. کرنش‌سنج‌های مورد استفاده از نوع YEFLA-5 و به طول ۵ میلی‌متر می‌باشند که صرفاً برای اندازه‌گیری کرنش میلگرد کاربرد دارند. کرنش‌سنج‌های مذکور ساخت شرکت TML ژاپن بودند.

مطابق شکل ۵، به منظور نصب کرنش‌سنج‌ها ابتدا با دستگاه فرز انگشتی سطح مورد نیاز برای نصب آن‌ها را مهیا کرده و سپس

۲-۵- تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده شامل کرنش‌سنج^۱ برای اندازه‌گیری^۱ کرنش‌ها، تغییر مکان‌سنج (LVDT) برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها، بارسنج^۲ برای اندازه‌گیری میزان بار و جک و پمپ هیدرولیکی برای

1. Strain Gauge

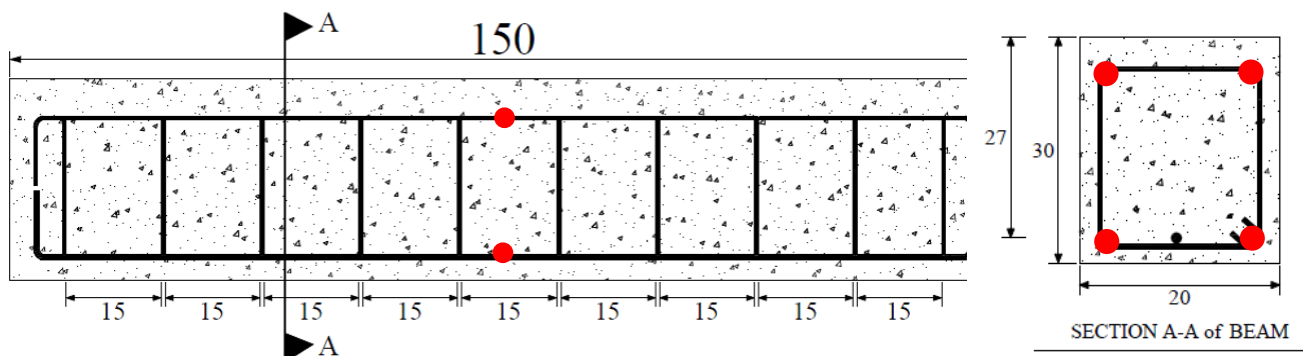
2. Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

3. Load Cell



شکل ۵. نحوه اتصال و عایق‌بندی کرنش‌سنج‌ها بر روی میلگرد.

Fig.5. Manner of installation and insulation of strain gauges on the rebar.



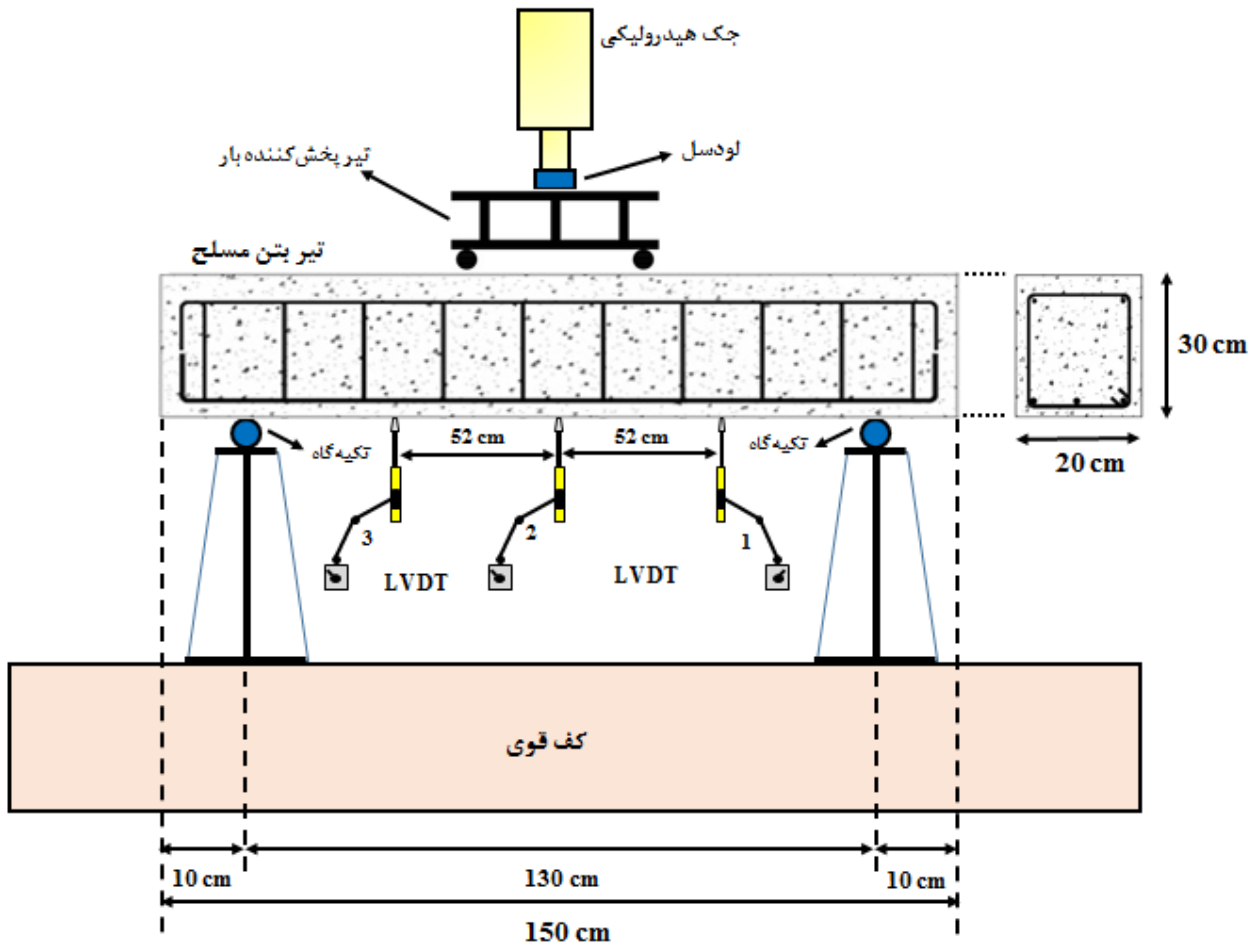
شکل ۶. موقعیت و محل‌های نصب کرنش‌سنج‌ها در مقطع و طول تیر.

Fig. 6. Position and installation locations of strain gauges in section and length of beam.

۲-۶- چیدمان آزمایش

برای آزمایش تیرها از چیدمان آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۷ بر اساس استاندارد [۴۱] ASTM C78 استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، از بارگذاری چهار نقطه‌ای برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. در این شکل محل قرارگیری سه تغییر مکان‌سنج و فواصل بین آن‌ها ارائه شده است.

کرنش‌سنج‌ها بر روی سطح صاف و صیقلی مهیا شده چسبانده شدند. در مرحله بعدی، سیم مخصوص لحیم شده به کرنش‌سنج را به اهم‌متر متصل و صحت درستی کار کرنش‌سنج بررسی شد. در شکل ۶ محل نصب کرنش‌سنج‌ها بر روی تیرها نشان داده شده است. جهت اعمال بار به نمونه‌ها از پمپ دستی هیدرولیکی و جک ۵۰ تنی هیدرولیکی استفاده شد.



شکل ۷. مشخصات آزمایش خمش چهار نقطه‌ای.

Fig. 7. Specifications of four-point flexural test.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- مقاومت فشاری

برای به دست آوردن مقاومت فشاری مشخصه هر نمونه (تیر)، از سه نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی (شکست) بتن با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه گردید.

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

$$f_r = 0.62 \lambda \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

بارگذاری استاتیکی توسط جک هیدرولیکی انجام شد. میزان جابجایی تیرها توسط تغییر مکان‌سنج‌ها که در زیر نمونه قرار داده شده‌اند، کنترل و ثبت شد. لازم به ذکر است که جک هیدرولیکی به بارسنج متصل شده و بار جک توسط آن به دستگاه ثبات داده‌ها ارسال و ثبت شد. در محل اتصال جک به بارسنج و بارسنج به تیر، از پوشش الیافی (نویزگیر) جهت کم کردن خطا و نویز داده‌ها در اتصال فلز به فلز استفاده گردیده است برای بررسی کرنش میلگردها با نصب کرنش‌سنج‌هایی در زیر محل بارگذاری همان‌طور که پیش‌تر ارائه گردید، کرنش‌های میلگرد فشاری و میلگردهای کششی به دستگاه ثبات داده‌ها ارسال شد.

پس از عمل‌آوری تیرها و نمونه‌های مقاومت‌سنجی مربوط به آن‌ها در شرایط مشابه، آزمایش بر روی تیرها و نمونه‌های مقاومت‌سنجی مربوط به آن‌ها انجام شد.



شکل ۸. جک فشاری ۲۰۰ تنی و نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش مقاومت فشاری.

Fig. 8. 200-ton compression jack and specimens before and after the compressive strength test.

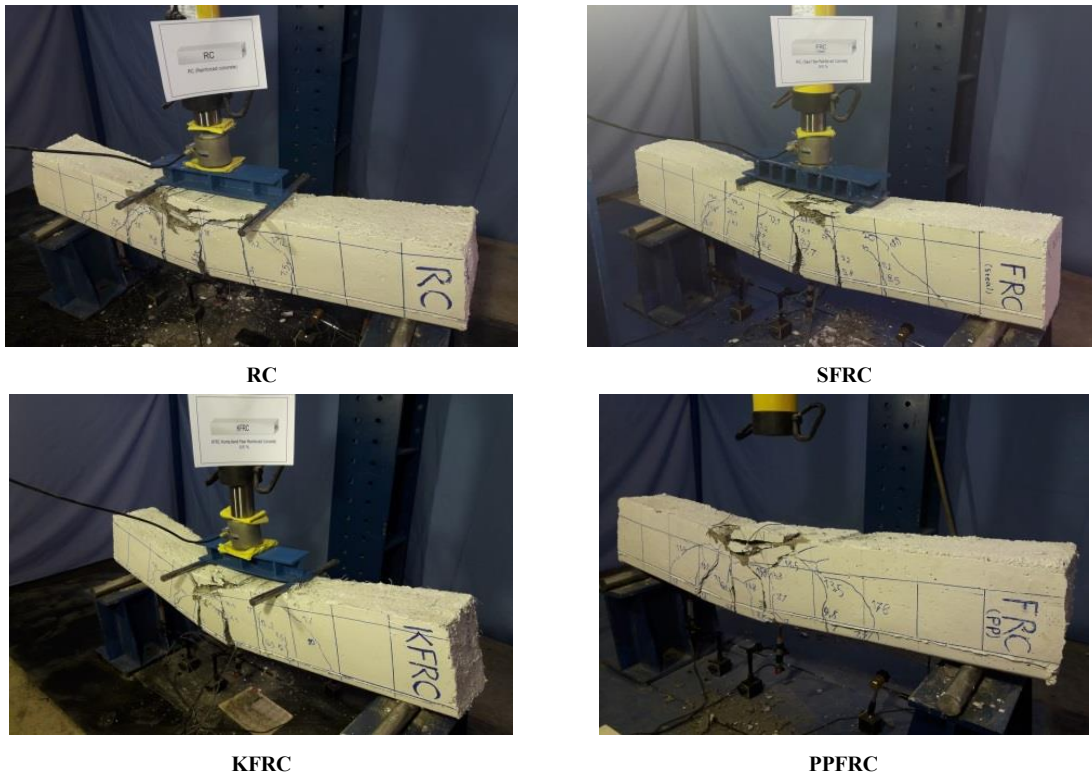
جدول ۷. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی.

Table 7. Results of compressive strength, modulus of elasticity, and modulus of rupture tests.

نمونه	مقاومت (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	مدول گسیختگی (f_r)	میانگین مقاومت (MPa)	معیار پذیرش ACI
RC	۳۲/۹۷	۲۷	۳/۵۶	۳۲/۸۱	۳۰ < ۳۲/۸۱
	۳۲/۶۵	۲۶/۹	۳/۵۴		
	۳۲/۸۱	۲۶/۹	۳/۵۵		
SFRC	۴۳/۸	۳۱/۱	۴/۱۰	۳۸/۳۸	۳۰ < ۳۸/۳۸
	۳۹/۷۶	۲۹/۶	۳/۹۱		
	۳۱/۵۸	۲۶/۴	۳/۴۸		
PPFRC	۳۲/۸۲	۲۶/۹	۳/۵۵	۳۳/۰۷	۳۰ < ۳۳/۰۷
	۳۳/۰۴	۲۷	۳/۵۶		
	۳۳/۳۵	۲۷/۱	۳/۵۸		
KFRC	۳۰/۴۵	۲۵/۹	۳/۴۲	۳۴/۵۵	۳۰ < ۳۴/۵۵
	۳۴/۶۴	۲۷/۷	۳/۶۵		
	۳۸/۵۸	۲۹/۲	۳/۸۵		

استفاده در آزمایش مقاومت فشاری و آزمون‌های مقاومت‌سنجی قبل و بعد از انجام این آزمایش نشان داده شده است. نتایج مربوط به پارامترهای مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی در جدول ۷ نشان داده شده است.

اطلاعات استخراج شده از آزمون مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مقاومت‌سنجی به همراه مدول الاستیسیته و مدول گسیختگی مربوط به هر نمونه و معیار پذیرش بتن (طبق ضوابط آیین‌نامه ۱۴-۳۱۸ ACI)، در جداول ۷ ارائه شده است. در شکل ۸، جک بتن‌شکن ۲۰۰ تنی مورد



شکل ۹. نحوه شکست تیرها تحت نیروی خمشی.

Fig. 9. Failure mode of beams under flexural load.

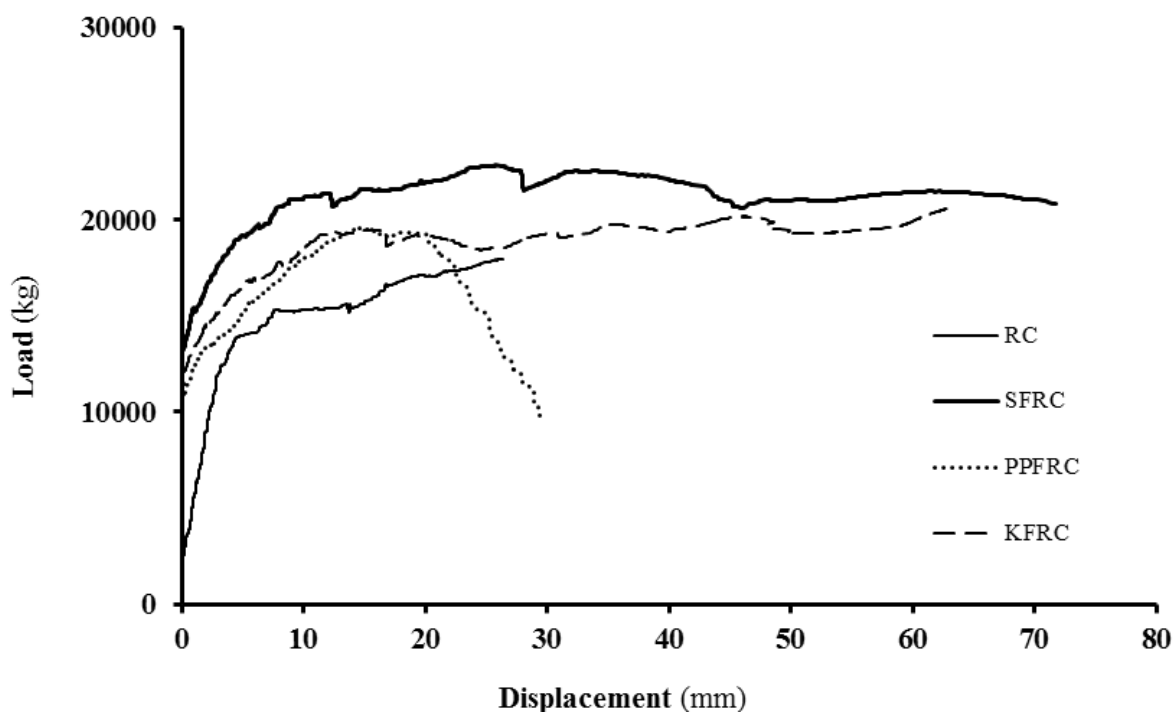
بار مشخص، تیر پس از ایجاد حالت گسیختگی مجدداً مقاومت نموده و بارگذاری بالاتری را بدون ایجاد حالت شکست ترد تحمل می‌نماید. این رفتار به دلیل سختی بالا و افزایش قابلیت بارپذیری و جذب انرژی و در نهایت افزایش شکل‌پذیری و کارایی این نمونه‌ها نسبت به نمونه مینا در هنگام اعمال بار می‌باشد.

۳-۳- انرژی جذب شده

انرژی جذب شده توسط تیرها از محاسبه‌ی مساحت زیر منحنی بار - تغییر مکان تا لحظه‌ی گسیختگی محاسبه گردید. میزان جذب انرژی تیرها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، نمونه SFRC بیشترین ظرفیت جذب انرژی را از خود نشان داده است. ظرفیت جذب انرژی نمونه‌ها به ترتیب از بیشترین مقدار به کمترین مقدار، مربوط به نمونه‌های SFRC، KFRC، PPFRC و نمونه RC می‌باشد. نمونه شاهد RC نیز کمترین میزان جذب انرژی را دارد.

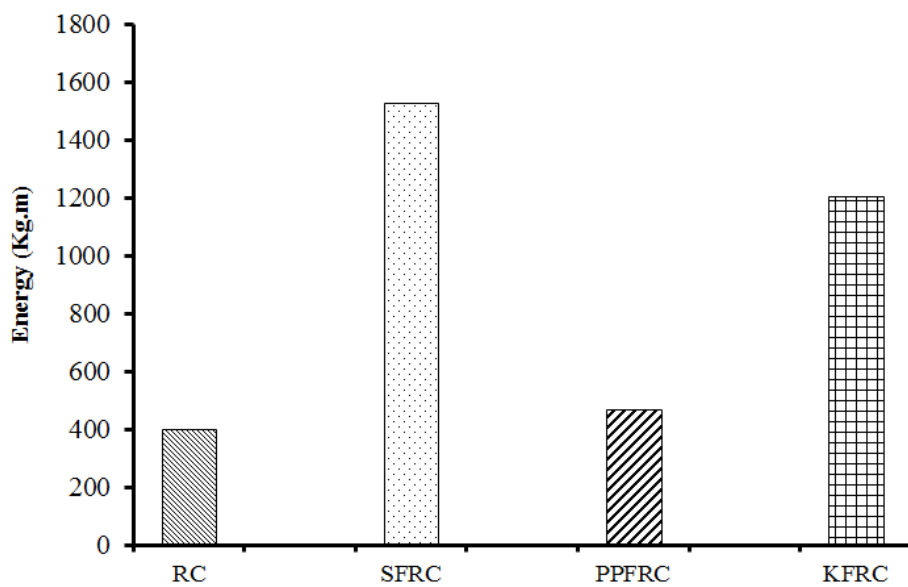
۳-۲- نمودارهای بار - خیز

در شکل ۹ چهار نمونه تیر ساخته شده تحت آزمایش مقاومت خمشی نشان داده شده است. در شکل ۱۰ نمودار بار - جابجایی تیرها ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، نمونه تقویت شده با الیاف فولادی (SFRC)، در رتبه اول از نقطه نظر ظرفیت باربری قرار دارد که این نمونه نسبت به نمونه‌های تقویت شده با الیاف پلیمری کورتا و الیاف پلیمری پلی‌پروپیلن از ظرفیت باربری (به ترتیب ۱۰ و ۱۳/۳ درصد) و خیز نهایی (به ترتیب ۱۴ و ۶۰ درصد) بیشتری برخوردار است. نمونه تقویت نشده مینا (RC)، نسبت به تمامی نمونه‌ها، ظرفیت باربری پایین‌تر و خیز نهایی شکست کمتری را ثبت نموده است. لازم به توضیح است که نمونه تقویت شده با الیاف فولادی نسبت به نمونه مینا، ۴۵ درصد ظرفیت باربری و ۶۷ درصد خیز بیشتری را ثبت نموده است. نکته قابل توجه وجود سیکل‌های افت و افزایش، به صورت متناوب در منحنی نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه مینا می‌باشد، که نشانگر این واقعیت است که در یک



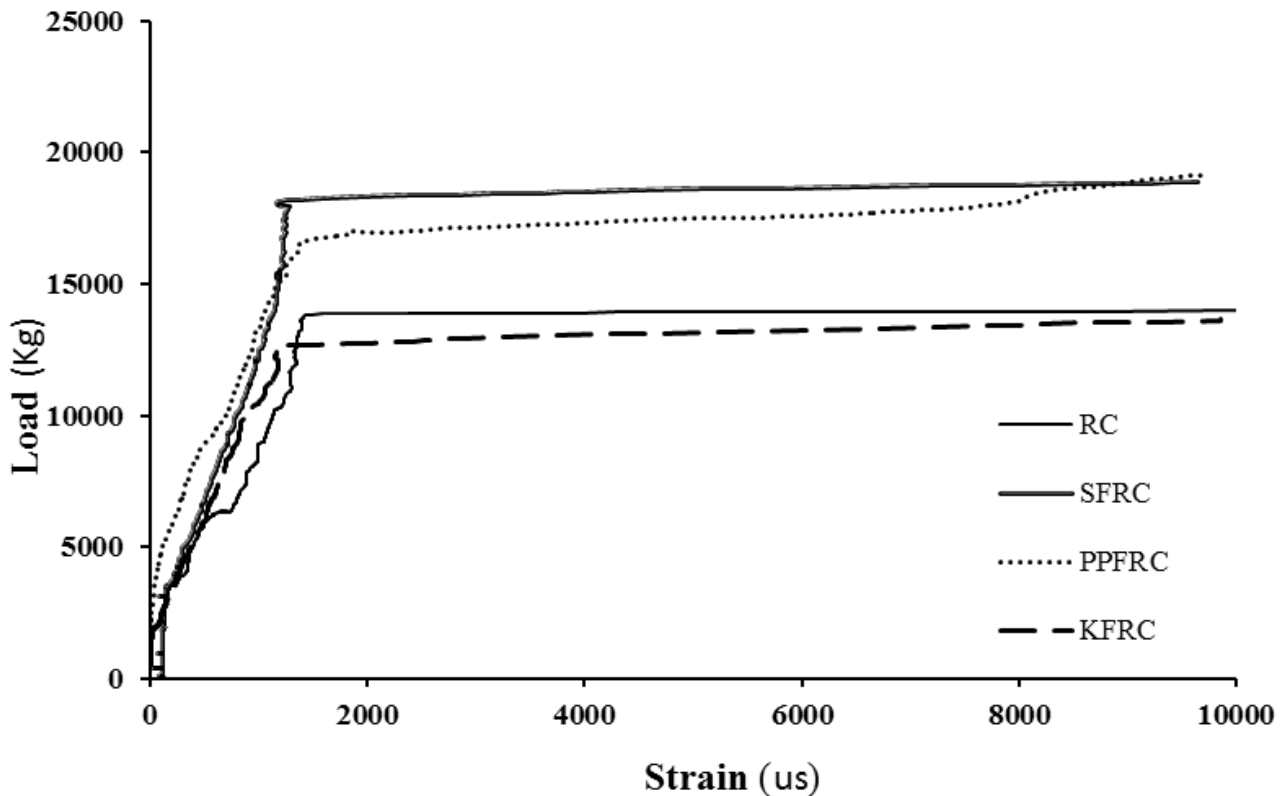
شکل ۱۰. نمودارهای بار - تغییر مکان وسط دهانه تیرها.

Fig. 10. Load-mid span displacement diagrams of beams.



شکل ۱۱. انرژی جذب شده تیرها.

Fig. 11. Energy absorption of beams.



شکل ۱۲. نمودارهای بار - کرنش میلگردهای کششی.

Fig. 12. Load-strain diagrams of tensile rebars.

نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلن می باشد. نمونه های حاوی الیاف کورتا خیلی سریع تر از نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن وارد ناحیه پلاستیک می شوند. همچنین نتایج نشان می دهد که نمونه های حاوی الیاف کورتا نسبت به نمونه مرجع (فاقد الیاف) سریع تر وارد حالت پلاستیک می شوند. این موضوع تاثیر منفی استفاده از الیاف کورتا در تیرهای بتن مسلح را در ورود به ناحیه پلاستیک میلگردهای کششی نشان می دهد.

۳-۵- مد شکست و الگوی ترک

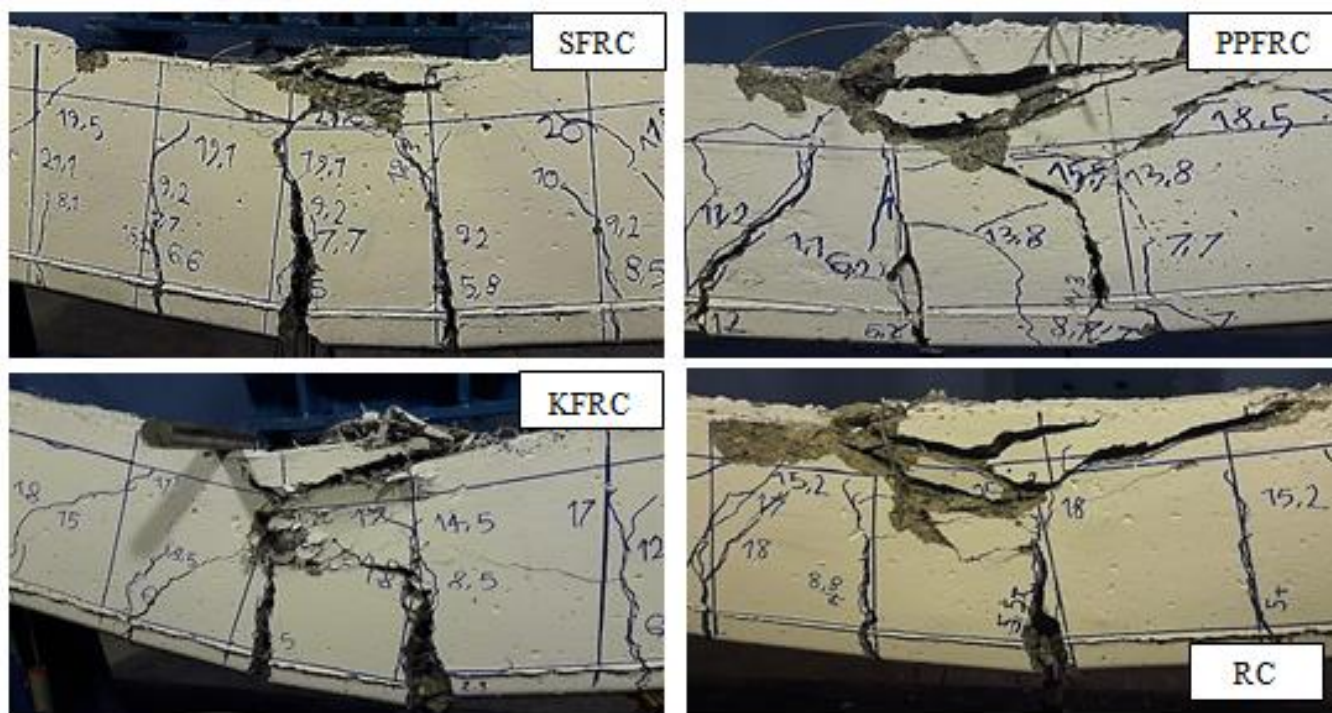
در شکل ۱۳ مد شکست و همچنین توزیع ترکها در تیرها نشان داده شده است همانطوری که در این شکل مشخص است، شکست همه نمونه ها به صورت مود شکست خمشی بوده، به طوری که در ابتدا میلگردهای کششی وارد ناحیه تسلیم و ناحیه پلاستیک شده و در ادامه میلگردهای ناحیه فشاری نیز تسلیم شده اند. مشاهدات حین آزمایش، حاکی از عرض کمتر ترکها در تیرهای مسلح شده به الیاف به دلیل دوختگی ترکها توسط الیافها بود.

۳-۴- نمودار بار - کرنش میلگردهای کششی

نمودارهای مربوط به بار - کرنش میلگردهای کششی تیرها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می گردد، میلگردهای نمونه SFRC در بار بیشتری نسبت به سایر نمونه ها وارد ناحیه پلاستیک می شوند. پس از نمونه مذکور به ترتیب میلگردهای نمونه PPFRC، نمونه RC و نمونه KFRC، وارد ناحیه پلاستیک می شوند.

از شکل ۱۲ این نکته قابل برداشت است که الیاف فولادی و الیاف پلیمری پلی پروپیلن، نیروی بیشتری برای جاری کردن میلگردهای ناحیه کششی (نسبت به سایر نمونه ها) ایجاد می کنند.

نکته قابل توجه دیگر آن است که نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن، از این نظر با نمونه های حاوی الیاف فولادی تقریباً برابری کرده و علت آن قابلیت انعطاف پذیری این الیاف می باشد. ویژگی مذکور موجب می گردد که میلگردهای موجود در تیرهای حاوی الیاف پلی پروپیلن دیرتر وارد ناحیه پلاستیک شوند. نکته دیگر اختلاف قابل توجه نمونه حاوی الیاف کورتا با



شکل ۱۳. مد شکست و الگوی ترک تیرها.

Fig. 13. Failure mode and pattern of crack of beams.

تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن و تیر مرجع قرار گرفتند. از مطلب بالا چنین استنباط می شود که بتن تقویت شده با الیاف، به دلیل ماهیت ذاتی خود یعنی سخت شوندگی کرنشی، دارای رفتاری شکل پذیر است که طی آزمایش های انجام شده در این تحقیق، این واقعیت به خوبی مشاهده گردید. ۵-میلگردهای کششی تیرهای با ظرفیت باربری بالاتر، حاوی الیاف فولادی، با تحمل بار بیشتری وارد مرحله پلاستیک شدند. در رتبه های بعدی به ترتیب تیرهای حاوی الیاف پلی پروپیلن، کورتا و تیر مرجع قرار گرفتند.

منابع

[1] J. Esfandiari, O. Heidari., Investigation on the behavior of concrete with optimum percentage of steel fiber, microsilica, fly ash and hybrid fiber under different loading pattern, Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE). DOI: 10.22065/jsce.2020.182908.1840. (In Persian)

[2] J. Esfandiari, R. Bayat, M. Tahamouli Roudsari,

۴- نتایج

این تحقیق به ارائه نتایج مربوط به بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی با طول ۱۵۰، عرض ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر و مسلح شده به ۰/۵ درصد حجمی الیاف های فولادی، پلی پروپیلن و کورتا می پردازد. این بررسی شامل پارامترهای مقاومت خمشی، جذب انرژی، شکل پذیری و کرنش میلگردها می باشد که خلاصه ای از نتایج مربوط به آن در زیر ارائه می گردد:

۱-افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری (تا ۱۰ مگاپاسکال)

می گردد.

۲-از نقطه نظر بار اولین ترک و بار نهایی، تیر تقویت شده با الیاف

فولادی نتیجه بهتری را نسبت به سایر تیرها ثبت نمود. در رتبه های بعدی به ترتیب تیرهای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن و کورتا قرار گرفتند.

۳-از نقطه نظر جذب انرژی، تیرهای تقویت شده با الیاف فولادی و کورتا بیشترین خیز نهایی و در نتیجه بیشترین جذب انرژی را نسبت به سایر تیرها از خود نشان دادند.

۴-تیرهای تقویت شده با الیاف فولادی و کورتا بیشترین شکل پذیری را نسبت به سایر تیرها تجربه کردند. در رتبه های بعدی به ترتیب تیرهای

- [11] 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*. 37 (2012) 832–840.
- [12] A. Hosseini, D. Mostofinejad, M. Hajjalilue-bonab., Displacement and strain field measurement in steel and RC beams using particle image velocimetry, *Engineering Mechanics*. 4 (2012) 1–10.
- [13] A.B. Abdui-Ahad, Q.Q. Aziz., Flexural strength of reinforced concrete T-beams with steel fibers, *Cement Concrete Composite*. 21(1) (1999) 263–268.
- [14] F. Altun, T. Haktanir, K. Ari., Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams, *Construction and Building Materials*. 21(1) (2007) 654–661.
- [15] F. Altun, B. Aktaş., Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete, *Construction and Building Materials*. 38(1) (2013) 575–581.
- [16] R. Narayanan, I.Y.S. Darwish., Use of steel fibers as shear reinforcement, *ACI Struct. J*. 84(3) (1987) 1125–1132.
- [17] C. Qian, I. Parnaikuni., Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending, *Cement Concrete Composite*. 21(1) (1999) 73–81.
- [18] A. Jodeiri, R. Qaitlig., Effect of Steel Fibre on Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beam, *Journal of Civil Engineering Research*. (2) (2012) 100-107.
- [19] A. Fatih, H. Tefaruk, A.Kamura., Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams, *Construction and Building Materials*. 21 (2005) 654–661.
- [20] K. Marar, Ö. Eren, T. Celik., Relationship Between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete, *Materials Letters*. 47 (2001) 297-304.
- [21] S. Arivalagan., Earthquake-Resistant Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beams, A. Shams., Engineering Properties Evaluation of Polypropylene Fibers Modified Asphalt Mixtures of Topeka Aggregation Based on Complex Procedure, *Caspian Journal Applied Science Research*. 3(1) (2014) 12-18
- [3] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, A. Dalvand., Experimental investigation of (FRSC) cementitious composite functionally graded slabs under projectile and drop weight impacts, *Construction and Building Materials*. 237 (2020) 117522.
- [4] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab., Assessment of hybrid FRSC cementitious composite with emphasis on flexural performance of functionally graded slabs, *Construction and Building Materials*. 250 (2020) 118904.
- [5] J. Esfandiari, K. Latifi., Numerical Study of Progressive Collapse in Reinforced Concrete Frames with FRP under Column Removal, *Advances in Concrete Construction*. 8(3) (2019) 165-172
- [6] S. Esfandiari, J. Esfandiari., Simulation of the behaviour of RC columns strengthen with CFRP under rapid loading, *Advances in Concrete Construction*. 4 (4) (2019) 319-332.
- [7] F. Omidinasab, A. Sahraei Moghadam., Effect of Purposive Distribution of Fibers to Prevent the Penetration of Bullet in Concrete Walls, *KSCE Journal of Civil Engineering*. 25(3) (2021) 843-853.
- [8] A. Sahraei Moghadam, F. Omidinasab, A. Dalvand., Flexural and impact performance of functionally graded reinforced cementitious composite (FGRCC) panels, *Structures*. 29 (2021) 1723–1733.
- [9] R.N. Swamy, S.A. Al-Taan., Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete, *ACI J. Proc*. 78 (5) (1981) 395–405.
- [10] 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*. 121 (2016) 676–685.

- [32] A. Meda, F. Minelli, G.A. Plizzari., Flexural behavior of RC beams in fiber reinforced concrete, *Composite B Engineering*. 43 (2012) 2930–2937.
- [33] 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*. 36 (2012) 704–710.
- [34] Y. Jun-Mo, M. Kyung-Hwan, Sh. Hyun-Oh, Y. Young-Soo., Effect of steel and synthetic fibers on flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars, *Composite: Part B*. 43 (2012) 1077–1086.
- [35] G. Campione, M.L. Mangiavillano., Fibrous reinforced concrete beams in flexure: experimental investigation: analytical modeling and design considerations, *Eng. Struct.* 30(1) (2008) 2970–2980.
- [36] K. Mohamed, A.A. Assem., An experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres, *Eng. Struct.* 145(1) (2017) 97–108.
- [37] M. Alhassan, R. Al-Rousan, A. Ababneh., Flexural behavior of lightweight concrete beams encompassing various dosages of macro synthetic fibers and steel ratios, *Construction Building and Materials*. 7 (2017) 280–293.
- [38] ASTM C150 / C150M-20, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [39] ASTM C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [40] ASTM A615 / A615M-20, Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [41] ASTM C78 / C78M-21, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- Journal of Engineering and Technolog. 2(1) (2012) 63-67.
- [22] M.T. Nahhas., Flexural behavior and ductility of reinforced lightweight concrete beams with polypropylene fiber, *J. Constr. Eng. Manag.* 1(1) (2013) 4–10.
- [23] R. Jeffery, A. Salah, A. David, R. Klaus-Alexander, R. Gregory., Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs-on-ground, *Mater. J.* 103(1) (2006) 3–10.
- [24] Z.D.F. Zhihong, D. Feldman., Synthetic fiber-reinforced concrete, *Progr. Polym. Sci.* 20 (1995) 185–210.
- [25] J.P. Won, D.H. Lim, C.G. Park., Bond behaviour and flexural performance of structural synthetic fibre-reinforced concrete, *Mag. Concr. Res.* 58(6) (2006) 401–410.
- [26] D. Prisco, M. Plizzari, G.L. Vandewalle., Fiber reinforced concrete: new design perspectives, *Materials and Structures*. 42(9) (2009) 1261–81.
- [27] V. Afroughsabet., High-performance fiber-reinforced concrete: a review, *materials science*. 51 (2016) 6517–6551.
- [28] H.J. Byung, C. Young., Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers, *Engineering Fracture Mechanics*. 74 (2007) 243–257.
- [29] F. Bencardino, L. Rizzuti, G. Spadea, R. Swamy., Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties, *Composites Part B: Engineering*. 41 (2010) 17–24.
- [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*. 37 (2012) 832–840.
- [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*. 154 (2016) 225–244.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Omidinasab, A. Eskandari, A. Sahraei Moghadam , Investigation and comparison of the influence of steel, polypropylene, and korta fibers in improving the flexural performance of reinforced concrete beams, Amirkabir J. Civil Eng., 54(7) (2022) 2779-2794.

DOI: [10.22060/ceej.2022.19457.7179](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19457.7179)

