

# مقایسه‌ی رفتار خمشی و الگوی انتشار ترک تیرهای بتن مسلح معمولی و الیافی با کمینه و بیشینه‌ی آرمان‌ور کششی طولی

حمید حسن‌زاده (کارشناس ارشد)

محمدکاظم شربتدار\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۲ (۲۷-۱۵، صص. ۲۷-۱۵، پژوهشی)  
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۲۷-۱۵، پژوهشی

خصوصیات الیاف‌ها و میله‌گردهای طولی، تأثیر مثبتی در خصوصیات خمشی تیرهای بتن‌آرمه دارند. در نوشتار حاضر، تأثیر دو نسبت متفاوت آرمان‌ور طولی (کمینه و بیشینه) در خواص خمشی و نحوه‌ی گسترش ترک‌های الیافی به صورت آزمایشگاهی بررسی و نتایج آنها با تیرهای بتنی معمولی مقایسه شده‌اند. ۸ عدد تیر ساخته شدند، که تیرهای گروه اول، شامل ۲ تیر بتن معمولی مرجع و گروه‌های دوم تا چهارم، هم شامل ۶ تیر بتن الیافی مسلح شده با درصد حجمی الیاف فولادی برابر ۵/۰، ۱۰/۰ و ۱۵/۰ بودند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بار ترک‌خوردگی، مقاومت خمشی، شکل‌پذیری و جذب انرژی تیرهای بتن الیافی نسبت به تیرهای بتن معمولی مشابه خود بهبود یافته است. بیشترین نسبت شکل‌پذیری در میان نمونه‌های ساخته شده با آرمان‌ور کششی کمینه و ۱٪ الیاف با افزایش ۳۰٪ نسبت به نمونه‌ی مشابه غیرالیافی مشاهده شده است. ضمناً افزودن ۵/۰، ۱۰/۰ و ۱۵/۰ درصد الیاف فولادی به ترتیب باعث افزایش ۱۶، ۲۳ و ۲۹ درصد مقاومت خمشی نسبت به تیرهای بدون الیاف شده است.

واژگان کلیدی: الیاف فولادی، شکل‌پذیری، مقاومت خمشی، جذب انرژی، کمینه‌ی آرمان‌ور کششی.

hamidhasanzadeh3020@gmail.com  
msharbatdar@semnan.ac.ir

## ۱. مقدمه

وجود الیاف فولادی در اعضاء بتنی به عنوان بتن الیافی (SFRC) <sup>۱</sup> باعث بهبود مقاومت کششی، شکل‌پذیری، چقرمگی و مقاومت برشی و همچنین مقاومت خمشی می‌شود؛ که عملکرد بتن مسلح با الیاف به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف، توزیع و درصد الیاف، خصوصیات پیوند الیاف و بتن بستگی دارد و منجر به کاهش میله‌گرد طولی و خاموت می‌شود. <sup>[۱-۵]</sup> نسبت ابعادی الیاف در دو مقیاس میکرو و ماکرو در بهبود پیوند بین الیاف و ماتریس و مدهای شکست و خواص مکانیکی مؤثر هستند. <sup>[۶]</sup> همچنین الیاف‌ها در دو مقیاس میکرو و ماکرو می‌توانند نقش مکملی برای میله‌گرد برای کاربرد در سازه داشته باشند و در مدهای شکست و خواص مکانیکی و مقاومت خمشی بتن تأثیر بگذارند. <sup>[۷]</sup> استانداردهای متفاوتی، مانند: RILEM ۱۶۲-TDF و TC ۱۰ fib Model Code ۲۰۰۸-ACI ۵۴۴-۲۰۰۸ درباره‌ی بتن

محمود و همکاران (۲۰۱۸)، ۱۴ تیر بتنی را با بتن خودتراکم تحت بار یکنواخت آزمایش کردند. <sup>[۱۸]</sup> یو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۷) و نیز کلی و جاداو<sup>۴</sup> (۲۰۱۳)، عملکرد خمشی تیرهای بتنی مسلح به الیاف مرکب را مطالعه کردند و دریافتند که استفاده

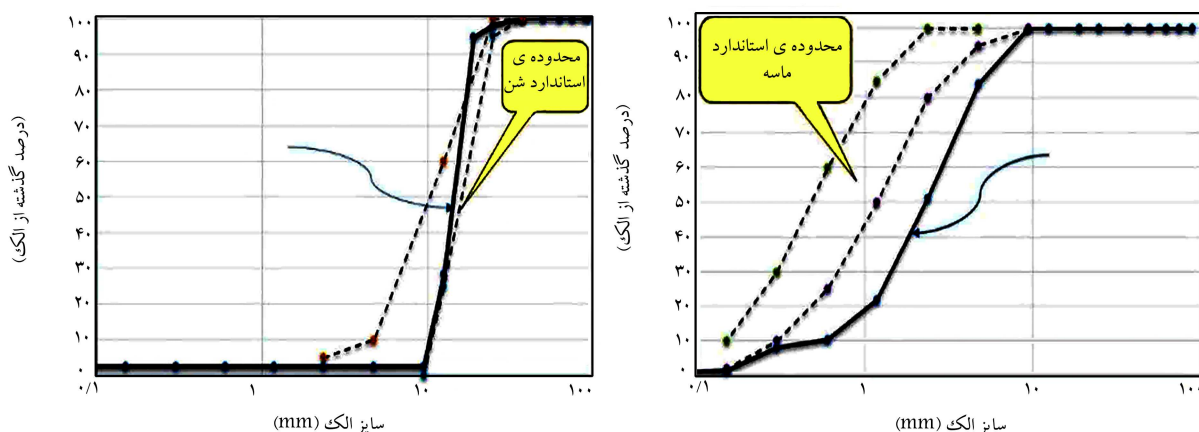
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۹/۱۰، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۲۰

DOI:10.24200/J30.2022.60932.3131

استناد به این مقاله:

حسن‌زاده، حمید و شربتدار، محمدکاظم، ۱۴۰۲. مقایسه‌ی رفتار خمشی و الگوی انتشار ترک تیرهای بتن مسلح معمولی و الیافی با کمینه و بیشینه‌ی آرمان‌ور کششی طولی. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۲۷-۱۵.



شکل ۱. منحنی دانه بندی شن و ماسه.

ماسه با بیشینه‌ی اندازه‌ی ۵ میلی‌متر با منحنی دانه‌بندی‌های نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شده است.

همچنین از سیمان پرتلند تیپ II ساخت کارخانه‌ی سیمان شاهرود مطابق با استاندارد ASTM C ۱۵۰ و آب مناسب شرب شهری برای ساخت بتن استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌های تیر، از دو نوع میلگرد قطر ۱۰ و ۱۶ میلی‌متر به عنوان میلگردهای خمشی و قطر ۸ میلی‌متر به عنوان خاموت، تولیدی شرکت فولاد خراسان (نیشابور)، استفاده و مشخصات مقاومت کششی آنها، که با دستگاه کشش یونیورسال اندازه‌گیری شده‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است. از الیاف فولادی مطابق مشخصات استاندارد ASTM A۸۲۰/A۸۲۰M با طول‌های کوتاه و گسسته با نسبت ابعاد (نسبت طول به قطر) از حدود ۲۰ به ۱۰۰، با مقاطع مختلف و معمولاً با درصد حجمی کمتر از ۲٪ در بتن استفاده شده است.

در پژوهش حاضر از الیاف فولادی دو انتها قلاب‌دار با طول ۵۰ و قطر ۸/۰ میلی‌متر و نسبت ظاهری ۶۰، با مقاومت کششی ۵۷۳-۱۱۴۰ مگاپاسکال و از دسته‌ی Crimped-End Wire و نوع I مطابق با استاندارد ASTM A۸۲۰ استفاده شده است.

از روش ACI-۲۱۱ نیز برای طرح اختلاط بتن معمولی و الیافی استفاده شده و تفاوت خاصی بین طرح اختلاط آنها مشاهده نشده است؛ با وجود این، باید برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت الیاف و جلوگیری از جداسازی یا پدیده‌ی گلوله‌یی شدن و ایجاد یک مخلوط کارا جهت ریختن، متراکم و پرداخت بتن به عمل آید. از طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۲ در نمونه‌های تیرهای ۴ گروه برای ۱ مترمکعب بتن و نیز از شن و ماسه‌ی خشک در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است.

## ۲.۲. مبانی طراحی و مشخصات نمونه‌ها

نمونه‌ی آزمایشگاهی تیرهای با و بدون الیاف فولادی با مقیاس یک دوم مطابق شکل ۲ با عرض b و ارتفاع کل h و ارتفاع مؤثر d برابر ۲۰۰، ۲۵۰ و ۲۵۰ میلی‌متر به طول کل ۲۳۰۰ و طول تکیه‌گاهی ۱۹۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته و ساخته شدند و تحت بارگذاری چهار نقطه‌یی قرار گرفتند و نیروهای متمرکز به فاصله‌ی ۶۶۰ میلی‌متر از یکدیگر و به صورت متقارن اعمال شدند. برای محاسبه‌ی مقادیر کمینه‌ی ( $\rho_{min}$ ) و بیشینه‌ی ( $\rho_{max}$ ) و سطح کل آرماتورهای طولی لازم برای

از الیاف مرکب، عملکرد خمشی تیر بتن مسلح به الیاف را بهبود می‌بخشد. [۱۹ و ۲۰] پاتیل و سنگل ۵ (۲۰۱۶)، تیرهای تحت هر دو عمل خمش و پیچش را بررسی کردند و دریافتند که الیاف فولادی باعث بهبود هر دو مقاومت شده است. [۲۱] ایوبی و شربتدار (۲۰۲۰)، هم مقاومت‌سازی تیرهای بتن مسلح آسیب‌دیده را با استفاده از HPFRCC بررسی کردند و دریافتند که نیروی نهایی نمونه‌ها بین ۲۷ تا ۹۵ درصد افزایش یافته است. [۲۲] تقی‌خانی و شربتدار (۱۳۹۸)، نیز در مطالعه‌ی خود دریافتند که افزودن الیاف‌های HPFRCC به اعضاء خمشی، منجر به کاهش خاموت‌های برشی در مقایسه با تیرهای با بتن معمولی می‌شود. [۲۳] همچنین از الیاف‌های اخیر می‌توان در بتن‌های ویژه مانند بتن کامپوزیتی الیافی توانمند (HPFRCC) در قاب‌های بتنی جدید و نیز در ساخت بتن‌های خاص مانند ECC برای مقاوم‌سازی در حالت‌های مختلف استفاده و اثرپذیری اضافه کردن الیاف‌ها در انواع بتن‌ها را مشاهده کرد. [۲۴ و ۲۵] تأثیر الیاف فولادی در گسترش ترک در تیرهای بتن مسلح بازمانده دارای وصله‌ی میلگرد نیز نشان داد که افزودن الیاف باعث کاهش ۴۰ درصدی طول وصله می‌شود. [۲۶] همچنین مقایسه‌ی تأثیر استفاده از دو نوع الیاف فولادی و PPS در تیرهای تحت بار چرخه‌یی نشان داد که بتن حاوی الیاف فولادی، مقادیر انرژی تلف شده‌ی تجمعی بیشتر و مقاومت بالاتری را نسبت به مقدار متناظر در بتن حاوی الیاف PPS نتیجه می‌دهد. [۲۷]

مطالعات پیشین نشان دادند که پارامترهای فراوانی در رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه مؤثر هستند، ولی نیاز به مطالعات جدیدی در خصوص بررسی تأثیر هم‌زمان درصد الیاف فولادی و مقادیر متفاوت درصد آرماتور طولی کششی در رفتار خمشی و نحوه‌ی ایجاد ترک‌ها در تیرهای الیافی است، که در نوشتار حاضر به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است.

## ۲. روش تحقیق آزمایشگاهی

### ۱.۲. مصالح و طرح اختلاط

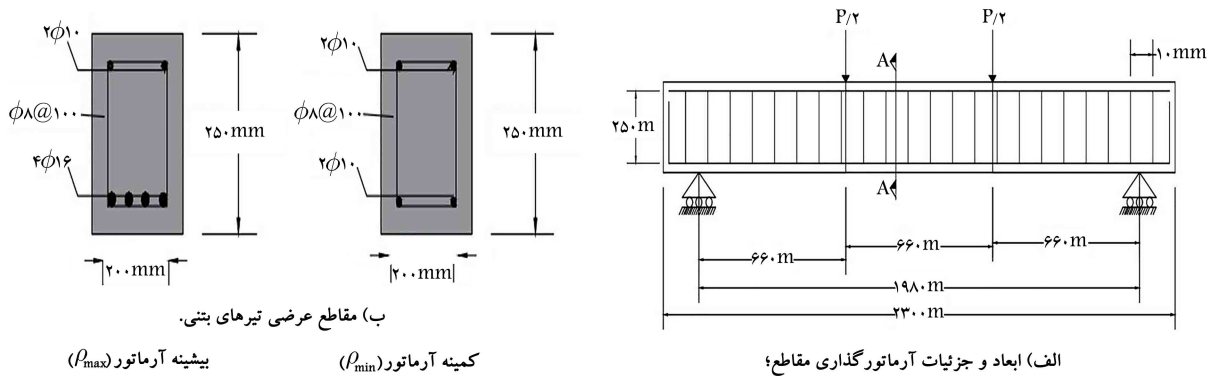
از شن به عنوان درشت‌دانه جهت افزایش مقاومت و از ماسه به عنوان ریزدانه جهت پرکردن فضای خالی بین درشت‌دانه‌ها در بتن با دانه‌بندی مناسب استفاده می‌شود، تا علاوه بر مقاومت و دوام به همراه کارایی لازم با هزینه‌ی تمام شده‌ی قابل قبول تأمین شود. لذا در پژوهش حاضر، از شن شکسته با اندازه‌ی بیشینه‌ی ۱۹/۵ و

جدول ۱. مشخصات مکانیکی میلگردهای استفاده شده.

بیشینه‌ی مقاومت $f_u$ (MPa)	کرنش شکست (%)	مقاومت تسلیم $f_y$ (MPa)	نمونه	قطر آرماتور (mm)
۵۶۶/۷۵	۷۴/۷۰	۴۱۹/۱۹	۱	۸
۵۶۸/۶۹	۳۹/۴۳	۴۰۹/۰۹	۲	
۵۶۷/۷۲	۵۷/۰۶	۴۱۴/۱۴	میانگین	
۶۶۳/۴۹	۵۹/۰۱	۴۲۲/۱۸	۱	۱۰
۶۶۲/۶۱	۶۰/۳۲	۴۲۲/۱۸	۲	
۶۶۳/۰۵	۵۹/۶۶	۴۲۲/۳۶	میانگین	
۶۳۹/۵۴	۳۷/۶۳	۴۹۸/۰۵	۱	۱۶
۶۳۶/۹۱	۳۸/۰۹	۴۹۷/۲۲	۲	
۶۳۸/۲۲	۳۷/۸۶	۴۹۷/۶۳	میانگین	

جدول ۲. طرح اختلاط در پژوهش حاضر.

سنگ دانه ( $kg/m^3$ )	سیمان ( $kg/m^3$ )	آب ( $kg/m^3$ )	درصد الیاف ( $v_f$ )	طرح اختلاط
شن	ماسه			NRC
۶۷۵	۱۱۰۰	۲۰۳	۰/۵	SFRC ۰/۵
			۱/۰	SFRC ۱/۰
			۱/۵	SFRC ۱/۵



شکل ۲. جزئیات تیرهای بتنی آزمایش شده (تمام ابعاد برحسب میلی متر).

شدند و در پایین تیر قرار گرفتند و برای نگهداری خاموت‌ها از ۲ عدد میلگرد قطر ۱۰ میلی‌متر در بالای تیر استفاده شده است. همچنین، بیشینه‌ی آرماتورهای طولی ( $\rho_{max}$ ) براساس درصد آرماتور طولی بالانس مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است:

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{bd} = \frac{\beta_1 \rho_{s1} f'_c}{f_y} \cdot \frac{600}{600 + f_y} = \frac{0.835 \times 0.85 \times 28 \times 600}{400 \times (600 + 400)} = 0.298 \quad (3)$$

در مورد خاموت‌ها نیز، آرماتورهای کمینه‌ی برشی طبق معادله‌ی ۴ محاسبه می‌شوند، اما مساحت خاموت‌های استفاده شده در این نمونه‌های آزمایشگاهی برابر ۱۵۷/۰۸ میلی‌متر مربع بوده است، که خاموت قطر ۸ میلی‌متر در فاصله‌های ۱۰۰ میلی‌متری

تیرهای بتنی از آیین‌نامه‌ی ۱۹-۳۱۸-ACI<sup>[۲۳]</sup> مطابق روابط ۱ و ۲ استفاده شده است: محاسبه‌ی کمینه‌ی آرماتورهای طولی ( $\rho_{min}$ ):

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} = 0.00331$$

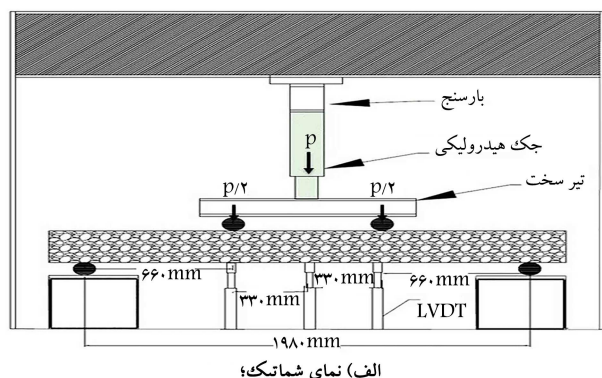
$$A_{s \min} = \rho_{min} bd = 139.02 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

$$A_{s \max} = \frac{0.85 f'_c b \beta_1 d}{f_y} \cdot \frac{0.003}{0.003 + 0.005} = 782.50 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

که در آن، ضریب  $\beta_1$  مطابق آیین‌نامه و با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال بتن برابر ۰/۸۳۵۷ می‌شود. لذا از ۲ میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان کمینه‌ی میلگرد طولی و ۴ میلگرد قطر ۱۶ میلی‌متر به عنوان بیشینه‌ی میلگرد طولی کششی محاسبه

جدول ۳. نامگذاری و مشخصات نمونه‌ها.

شماره	گروه	نام نمونه	شرح نمونه	مشخصات میلگردهای کششی
۱	۱	NRC-MIN	تیر بتن معمولی مسلح شده با کمینه‌ی میلگرد کششی	۲φ۱۰
۲	۱	NRC-MAX	تیر بتن معمولی مسلح شده با بیشینه‌ی میلگرد کششی	۴φ۱۶
۳	۲	SFRC <sup>۰</sup> /۵-MIN	تیر بتن معمولی مسلح شده با ۵/۰ درصد حجم الیاف فولادی با کمینه‌ی میلگرد کششی	۲φ۱۰
۴	۲	SFRC <sup>۰</sup> /۵-MAX	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۵/۰ درصد حجم با بیشینه‌ی میلگرد کششی	۴φ۱۶
۵	۳	SFRC <sup>۱</sup> /۰-MIN	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۱/۰ درصد حجم با کمینه‌ی میلگرد کششی	۲φ۱۰
۶	۳	SFRC <sup>۱</sup> /۰-MAX	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۱/۰ درصد حجم با بیشینه‌ی میلگرد کششی	۴φ۱۶
۷	۴	SFRC <sup>۱</sup> /۵-MIN	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۵/۱ درصد حجم با کمینه‌ی میلگرد کششی	۲φ۱۰
۸	۴	SFRC <sup>۱</sup> /۵-MAX	تیر بتن الیاف فولادی مسلح شده با ۵/۱ درصد حجم با بیشینه‌ی میلگرد کششی	۴φ۱۶



شکل ۳. نمای شماتیک و واقعی سیستم آزمایش.

قرار گرفتند، که از آرمان‌تورهای کمینه بیشتر بوده است؛ لذا شکست برشی در این تیرها رخ نخواهد داد و رفتار خمشی حاکم خواهد بود.

$$A_{vmin} = 0.35 \frac{bs}{f_y} = 0.35 \times \frac{200 \times 100}{490} = 14.28 \text{ mm}^2 < A_v = 157.08 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

در نوشتار حاضر، ۸ تیر بتنی در ۴ گروه طراحی و ساخته شدند، که گروه یک به عنوان بتن معمولی مسلح شده (مرجع) و سه گروه دیگر، بتن الیافی فولادی با درصد‌های حجمی ۵/۰، ۱/۰ و ۱/۵٪ در نظر گرفته شدند. هر گروه شامل دو نمونه تیر بتن مسلح شده با کمینه‌ی میلگردهای کششی (۲φ۱۰) و بیشینه‌ی میلگردهای کششی (۴φ۱۶) بودند.

نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده‌اند، که نمونه‌های بتن معمولی به صورت NRC و بتن الیافی فولادی به صورت SFRC با استفاده از علامت‌گذاری NRC-A و SFRCB-A نام‌گذاری شده‌اند، که «A» معرف کمینه (MIN) و بیشینه‌ی (MAX) مقدار فولاد کششی، «B» مقدار الیاف فولادی (درصد حجم بتن در مترمکعب) است. به عنوان مثال، نمونه‌ی NRC-MIN یک تیر مسلح شده با کمینه‌ی مقدار فولاد کششی ( $\rho_{min}$ ) از بتن معمولی و SFRC<sup>۱</sup>/۰-MAX یک تیر مسلح شده‌ی بتن الیافی با بیشینه‌ی مقدار فولاد کششی ( $\rho_{max}$ ) از بتن الیافی با حجم ۱/۰٪ در هر مترمکعب است.

در ساخت بتن الیافی، الیاف به آرامی و طی چندین مرحله به مخلوط اضافه شدند تا از پدیده‌ی گلوله‌یی شدن الیاف جلوگیری شود. ابتدا ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها به مدت ۲ دقیقه با هم مخلوط شدند، سپس یک سوم وزنی آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه، اختلاط ادامه یافته است. در ادامه، سیمان و یک سوم الیاف فولادی به ترکیب اضافه شده و اختلاط به مدت ۱ دقیقه ادامه یافته است. در پایان، بقیه‌ی آب و الیاف به ترکیب اضافه و به مدت ۲ دقیقه اختلاط ادامه داده شده است. در حین بتن‌ریزی، به منظور بررسی تأثیر درصد‌های متفاوت الیاف جهت تعیین مقاومت فشاری بتن، چهار نمونه‌ی استوانه‌یی به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر از هر طرح اختلاط تهیه شده است، که نمونه‌ها یک روز پس از ساخت، قالب‌برداری شدند و بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری، تحت آزمایش مقاومت فشاری طبق آیین‌نامه‌ی ASTM C۳۳ قرار گرفتند.

نتایج نشان داد که متوسط مقاومت فشاری استوانه‌یی ( $f'_c$ ) برای بتن‌های معمولی و بتن‌های الیافی با ۵/۰، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف به ترتیب برابر ۲۸/۱۵، ۳۴/۰۵ و ۴۲/۱۲ مگاپاسکال بوده و الیاف فولادی منجر به افزایش ۱۹ تا ۵۰ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی شاهد شده‌اند.

### ۳.۲. تجهیزات آزمایشگاهی و چیدمان آزمایش نمونه‌ها

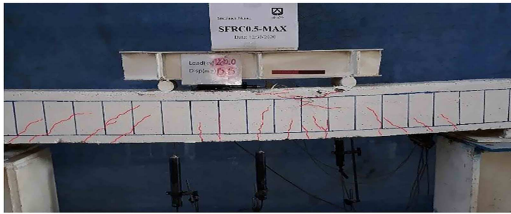
برای اندازه‌گیری متغیرهای مورد نظر در حین آزمایش، از ابزارها و تجهیزات خاصی، مانند: کرنش‌سنج‌ها، تغییرمکان‌سنج برای اندازه‌گیری تغییرمکان‌ها، نیروسنج برای اندازه‌گیری میزان بار، جک و پمپ برای اعمال بار استفاده شده‌اند. از کرنش‌سنج‌های نوع FAL۵-۱۱ به طول ۵ میلی‌متر ساخت شرکت TML ژاپن برای اندازه‌گیری کرنش طولی بر روی میلگردهای فولادی با دقت لازم و با چسب‌های مخصوص در وسط میلگردهای کششی و فشاری نصب و در برابر رطوبت بتن و ضربه محافظت شدند. سه عدد تغییرمکان‌سنج برای اندازه‌گیری تغییرمکان در وسط دهانه و دو نقطه‌ی دیگر تیرها و نیروسنج نوع ۵۰۰ کیلو نیوتنی هم برای اندازه‌گیری بار قائم وارده قرار گرفتند. اطلاعات لازم در حین آزمایش توسط دستگاه مرتبط ثبت شد. سپس، نمونه‌ها تحت خمش چهار نقطه‌یی استاتیکی مطابق سیستم آزمایشگاهی شکل ۳ آزمایش شدند.



ب) تیر NRC-MAX



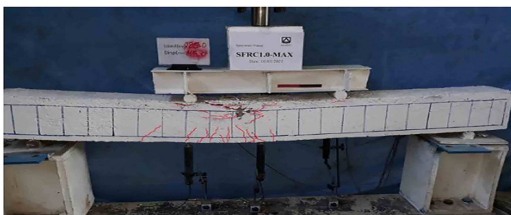
الف) تیر NRC-MIN



د) تیر SFRC 0.5-MAX



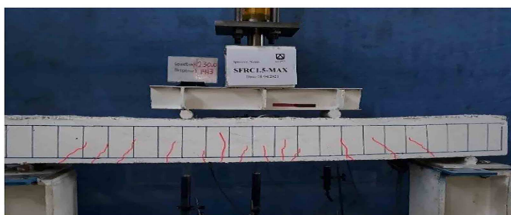
ج) تیر SFRC 0.5-MIN



و) تیر SFRC 1.0-MAX



ه) تیر SFRC 1.0-MIN



ح) تیر SFRC 1.5-MAX



ز) تیر SFRC 1.5-MIN

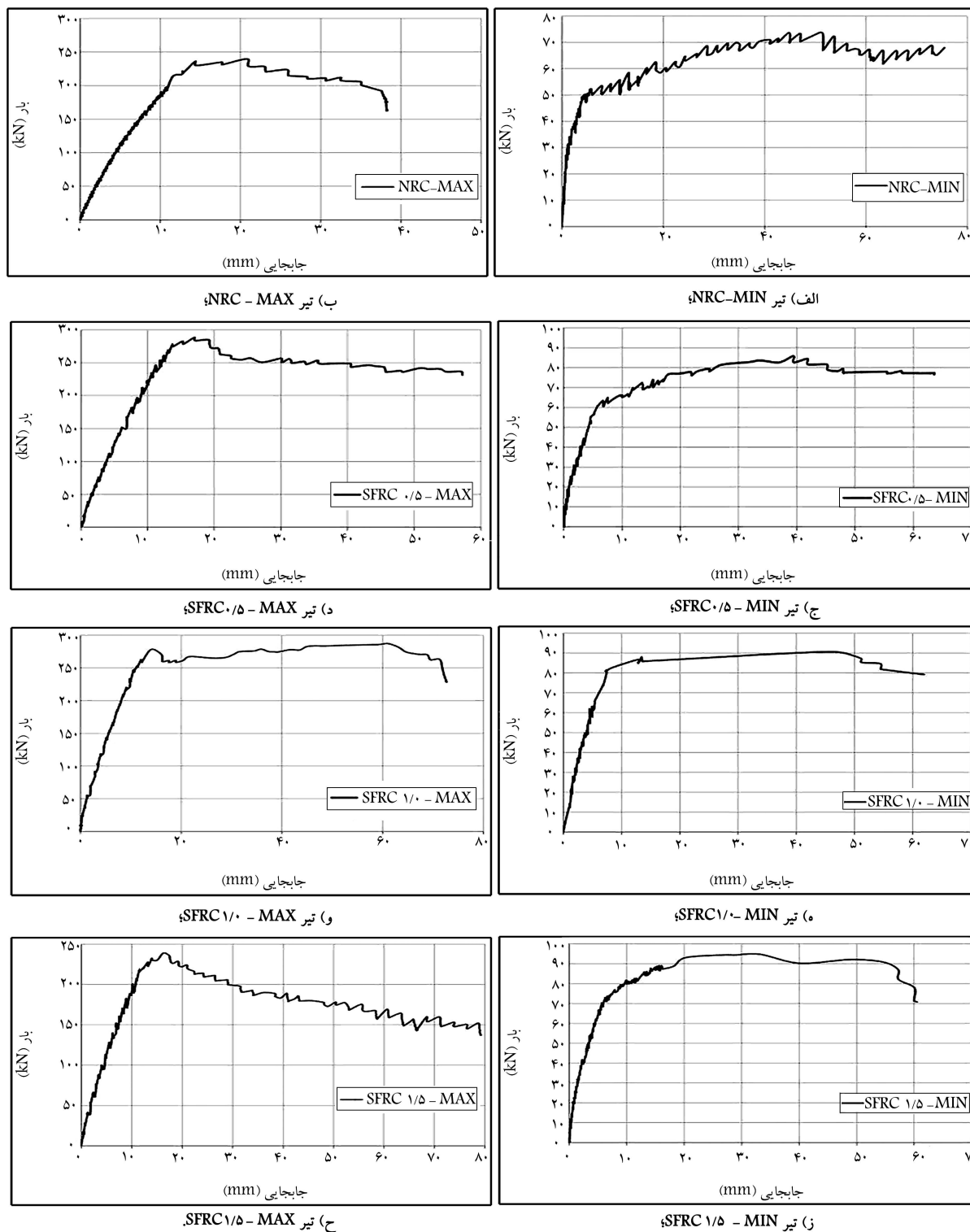
شکل ۴. مراحل بارگذاری و ترک خوردگی تیرها تا لحظه شکست نهایی.

### ۳. نتایج و مشاهدات اولیه ترکها

تحميل تغییرمکان‌های بیشتری متناسب با میزان آرماتور طولی و درصد الیاف به کار رفته را خواهند داشت و با شیب‌های متفاوت از ملایم تا تند و با باز شدن بیشتر ترک‌ها در ناحیه تقریباً میانی تیر، به نقطه‌ی شکست نهایی خود در تغییرمکان نهایی خواهند رسید. مقادیر تغییرمکان در لحظه‌ی ترک خوردگی  $\Delta_{cr}$  لحظه‌ی جاری شدن  $\Delta_y$  و تغییرمکان نهایی لحظه‌ی شکست  $\Delta_u$  نیز متناسب با همین نقاط به دست می‌آید و از روی منحنی قابل ثبت هستند. چنانچه در مقاطع بتن معمولی، میزان افت بار بیش از ۱۵٪ بار نهایی باشد، مقدار تغییرمکان نهایی  $\Delta_u$  متناظر با بار نهایی برابر با  $0.85 P_{max}$  در نظر گرفته می‌شود. مقادیر بارها و تغییرمکان‌ها در حالت‌های مختلف ترک خوردگی، جاری شدن، بیشینه و نهایی همه‌ی ۸ تیر به طور جداگانه محاسبه شده‌اند، که در بخش‌های بعدی ارائه و تحلیل شده‌اند. منحنی‌های بار - کرنش بیشینه‌ی کششی میلگردهای هر یک از تیرها در شکل ۶ مشاهده می‌شوند. با توجه به مقاومت کششی جاری شدن میلگردها، کرنش متناظر حالت جاری شدن برابر ۲۰۰۰ میکرون است، که بار متناظر آن برابر  $P_y$  از منحنی‌های بار - کرنش برای هر تیر به دست می‌آید؛ که برای مثال، بار جاری شدن در تیر مرجع با کمیته‌ی آرماتور طولی برابر ۵۳/۴۹ کیلو نیوتن بوده است.

ترک‌های ایجاد شده در ۸ نمونه، متناسب با مقادیر بار وارده در هر مرحله مشاهده و بر روی تیرها با رنگ متفاوت نشان داده شده‌اند. نهایتاً نیز وضعیت تیرهای ترک‌خورده در لحظه‌ی بار نهایی و شکست نهایی در شکل ۴ به تفکیک و منحنی‌های بار - تغییرمکان وسط دهانه‌ی هر یک از تیرها هم در شکل ۵ مشاهده می‌شوند. اولین ترک در تیر بعد از یک رفتار و شیب اولیه‌ی خطی و متناسب با بار ترک خوردگی  $P_{cr}$  مشاهده می‌شود و مقدار بار ترک خوردگی در لحظه‌ی است که شیب منحنی بار - تغییرمکان در مرحله‌ی اول تغییر می‌کند. بعد از آن، با افزایش تعداد و عرض ترک‌ها، رفتار خمشی تیر به صورت غیرخطی افزایش یافته کمتری در آمده و میزان کرنش کششی در میلگردهای تحتانی تیرها هم افزایش یافته است.

به محض رسیدن کرنش میلگردها به حد تسلیم و جاری شدن متناسب با نیروی جاری شدن  $P_y$  و تغییرمکان جاری شدن، شیب منحنی کاهش می‌یابد، ولی هنوز ظرفیت باربری در حال افزایش است؛ تا نهایتاً تیر به ظرفیت بیشینه‌ی خود برابر  $P_{max}$  در نقطه‌ی اوج منحنی خواهد رسید، ولی تیرها هنوز قابلیت

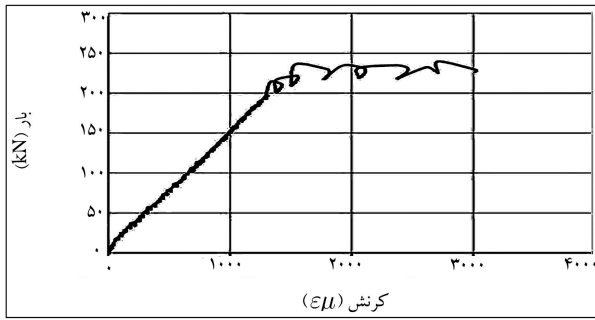


شکل ۵. منحنی نیرو - تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای آزمایش شده.

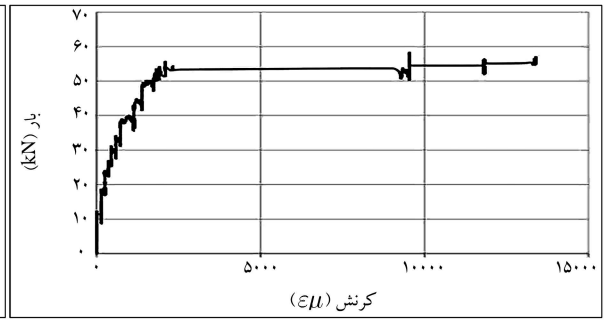
جاری شدن، بیشینه و نهایی ۴ تیر با کمینه‌ی آرماتور طولی به همراه درصد افزایش هر کدام نسبت به تیر مرجع بدون الیاف فولادی و با کمینه‌ی آرماتور طولی در جدول ۴ ارائه شده‌اند. مقایسه‌ی بین بارها و تغییرمکان ۴ تیر مذکور با کمینه‌ی آرماتور طولی در شکل ۸ مشاهده می‌شود. بررسی شکل‌های ۷ و ۸ و همچنین مقادیر ارائه شده در جدول ۴، نشان می‌دهد که اولین ترک در تیر مرجع با کمینه‌ی

#### ۴. تحلیل پارامترهای موثر بر رفتار خمشی نمونه‌ها

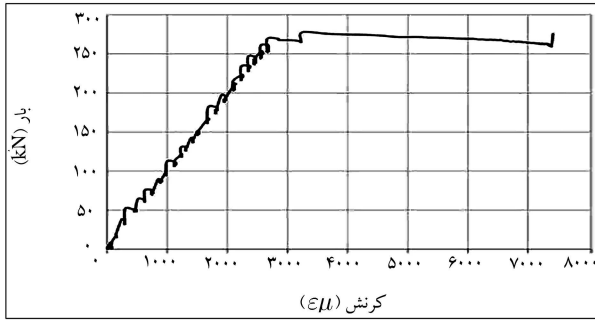
۱.۴. اثر درصد الیاف در نمونه‌های حاوی کمینه‌ی آرماتور ( $\rho_{min}$ )  
 منحنی‌های بار - تغییرمکان ۴ تیر که دارای کمینه‌ی آرماتور کششی طولی بودند، در شکل ۷ مشاهده می‌شود. مقادیر بارها و تغییرمکان‌ها در حالت‌های ترک‌خوردگی،



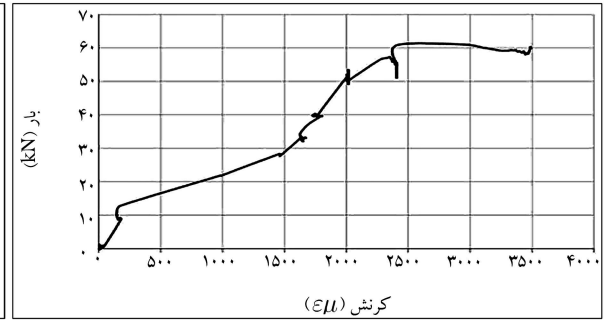
ب) NRC-MAX



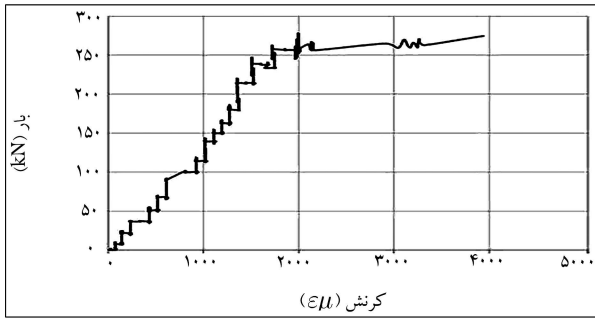
ف) NRC-MIN



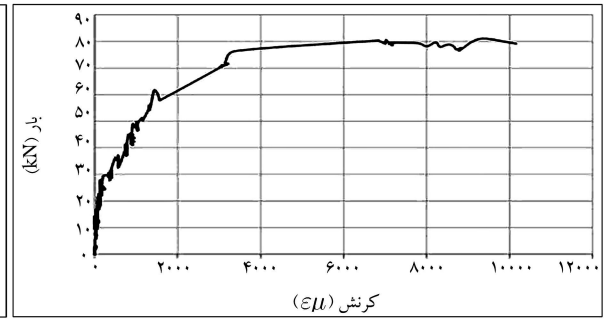
د) SFRC 0.5-MAX



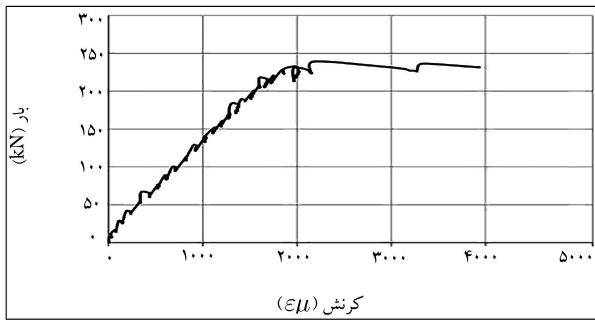
ج) SFRC 0.5-MIN



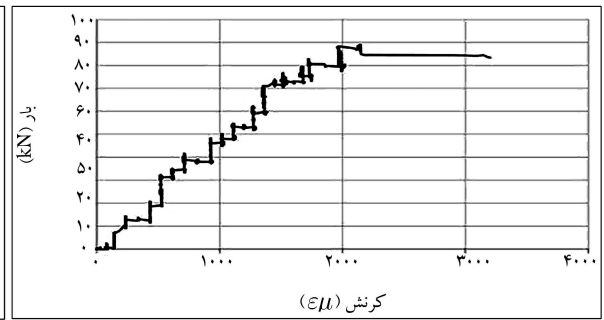
و) SFRC 1.0-MAX



ه) SFRC 1.0-MIN



ح) SFRC 1.5-MAX



ز) SFRC 1.5-MIN

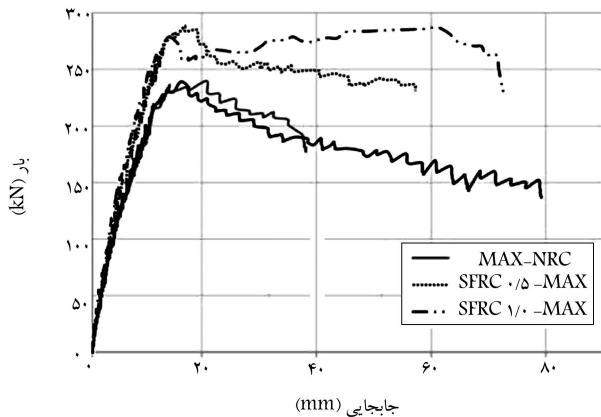
شکل ۶. منحنی نیرو- کرنش بیشینه‌ی کششی میلگردهای تیرهای آزمایش شده.

الیاف داشته است، که اثر افزایش یافته و مثبت افزودن الیاف فولادی در افزایش میزان باربری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی - SFRC 1/5MIN نسبت به سایر نمونه‌ها، تغییر مکان نهایی بیشتری داشته است، که باعث شکست کمتر و دیرتر نمونه شده و دارای شکل‌پذیری بیشتری هم بوده است.

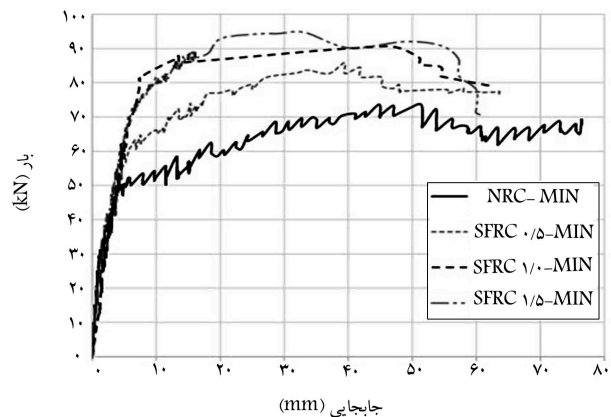
میلگرد طولی، در بار ۱۰ کیلونیوتن در مرکز تیر مشاهده شده است، ولی با افزایش درصد الیاف، مقدار اخیر تا بار ۲۵ کیلونیوتن و ۲/۵ برابر افزایش یافته است. همچنین بیشترین افزایش در بار جاری شدن هم در تیر با ۱/۵ الیاف بوده است، که برابر ۳۸٪ افزایش مشاهده می‌شود. ضمناً تیر با ۱/۵ الیاف در مقایسه با دیگر تیرها، بیشترین بار بیشینه تا ۲۹٪ افزایش را نسبت به تیر مرجع بدون

جدول ۴. نتایج بارها و تغییرمکان‌های تیرهای با کمینه‌ی آرماتور طولی.

$\Delta u$ (mm)	$\frac{P_{max}}{P_u(NRC-MIN)}$	$P_{max}$ (kN)	$\Delta y$ (mm)	$\frac{P_y}{P_y(NRC-MIN)}$	$P_y$ (kN)	$\Delta_{cr}$ (mm)	$P_{cr}$ (kN)	نام نمونه
۷۵/۴۵	۱/۰۰	۷۳/۶۶	۷/۸۲	۱/۰۰	۵۳/۴۹	۰/۰۴	۱۰	NRC-MIN
۶۳/۶	۱/۱۷	۸۵/۸۳	۵/۲۴	۱/۰۷	۵۷/۳۳	۰/۶۳	۱۲/۸۳	SFRC ۰/۵-MIN
۶۱/۹۹	۱/۲۴	۹۱	۴/۹۵	۱/۱۳	۶۰/۳۳	۱/۱۳	۱۳/۸۳	SFRC ۱/۰-MIN
۶۰/۵۱	۱/۲۹	۹۵	۵/۷۶	۱/۲۸	۶۸/۶۶	۱/۰۹	۲۵	SFRC ۱/۵-MIN



شکل ۹. مقایسه‌ی منحنی‌های نیرو- تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای با بیشینه‌ی آرماتور طولی.



شکل ۷. مقایسه‌ی منحنی‌های نیرو- تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای با کمینه‌ی آرماتور طولی.

#### ۲.۴. اثر درصد الیاف در نمونه‌های حاوی بیشینه‌ی آرماتور

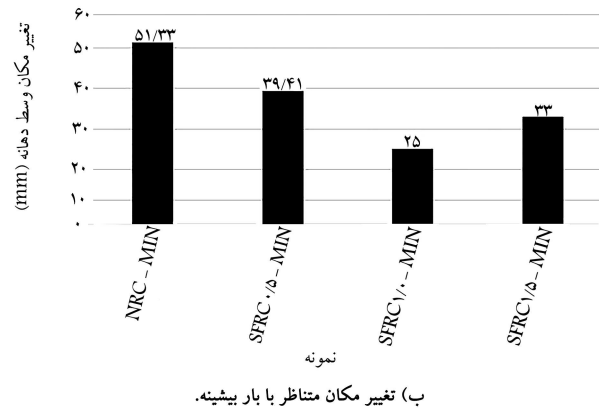
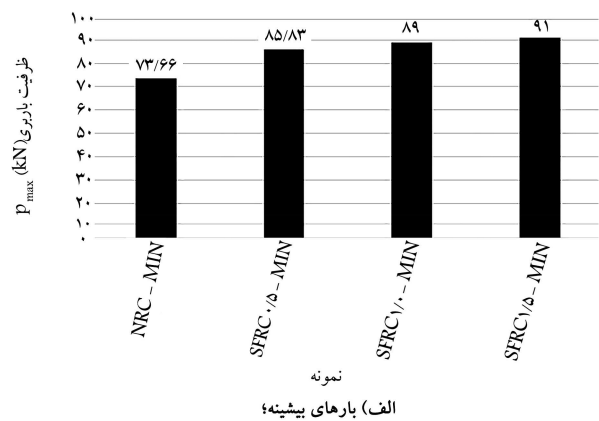
( $\rho_{max}$ )

منحنی‌های بار- تغییرمکان ۴ تیر معمولی و الیافی، که دارای بیشینه‌ی آرماتور کششی طولی بوده‌اند، در شکل ۹ مشاهده می‌شوند. همچنین مقادیر بارها و تغییرمکان‌ها در حالت‌های مختلف تیرهای مذکور هم به همراه درصد افزایش هر کدام نسبت به تیر مرجع بدون الیاف فولادی در جدول ۵ ارائه شده‌اند. ضمناً مقایسه‌ی بین بارها و تغییرمکان ۴ تیر ذکر شده با بیشینه‌ی آرماتور طولی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در تیرهای بتن آرمه‌ی ساخته شده با بیشینه‌ی آرماتور کششی، ظرفیت بیشینه‌ی تیرها با افزودن الیاف فولادی تا ۱٪ افزایش یافته است؛ ولی با افزودن الیاف فولادی ۱/۵٪، افزایشی محسوسی مشاهده نشده است، که به دلیل تراکم الیاف‌های زیاد است. بیشینه‌ی تغییرمکان وسط دهانه برای نمونه با ۱٪ الیاف برابر ۴۵ میلی‌متر بوده است، که علاوه بر بیشترین ظرفیت با رشد ۱۹٪ نسبت به نمونه‌ی مرجع، دارای بیشترین تغییرمکان با رشد بیش از ۲ برابر نسبت به نمونه‌ی مرجع بوده است.

#### ۳.۴. اثر میزان آرماتور طولی در رفتار خمشی تیرها

برای بررسی تأثیر درصد آرماتور طولی کمینه و بیشینه در رفتار تیرهای بتن آرمه‌ی معمولی، منحنی‌های بار- تغییرمکان ۴ تیر معمولی و الیافی، که دارای بیشینه‌ی آرماتور کششی طولی بودند، به تفکیک برای ۴ نوع بتن متفاوت (معمولی و بتن‌های الیافی با ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ درصد الیاف) در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند؛ که مطابق آنها، در تمامی نمودارهای مقایسه‌ی نیرو- تغییرمکان بین جفت نمونه‌های ساخته شده از کمینه و بیشینه‌ی آرماتور کششی، نمونه‌های ساخته شده با ( $\rho_{max}$ )، ظرفیت

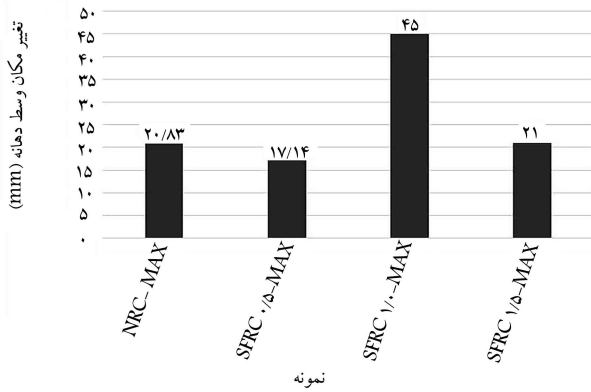


شکل ۸. مقایسه‌ی مقادیر نیرو و تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای با کمینه‌ی آرماتور طولی.

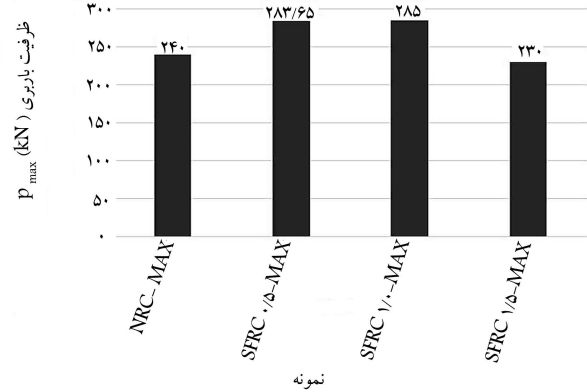


جدول ۵. نتایج بارها و تغییرمکان‌های تیرهای با بیشینه‌ی آرما تور طولی.

$\Delta u$ (mm)	$\frac{P_{max}}{P_{max}(NRC-MAX)}$	$P_{max}$ (kN)	$\Delta y$ (kN)	$\frac{P_y}{P_y(NRC-MAX)}$	$P_y$ (kN)	$\Delta_{cr}$ (mm)	$P_{cr}$ (kN)	نام نمونه
۳۵/۰۲	۱/۰۰	۲۴۰	۱۰/۲۲	۱/۰۰	۱۸۵	۱/۳۰	۳۵	NRC-Max
۴۵/۵۶	۱/۱۸	۲۸۳/۶۵	۱۱/۹۶	۱/۳۳	۲۴۵	۱/۵	۴۰	SFRC <sup>۰</sup> /۵-Max
۷۲/۰۸	۱/۱۹	۲۸۵	۱۲/۱۱	۱/۴۰	۲۵/۹۹	۱/۴۰	۵۰	SFRC <sup>۱/۰</sup> -Max
۳۱/۴۹	۰/۹۶	۲۳۰	۱۱/۵	۱/۱۵	۲۱۰	۲/۶	۶۵	SFRC <sup>۱/۵</sup> -Max

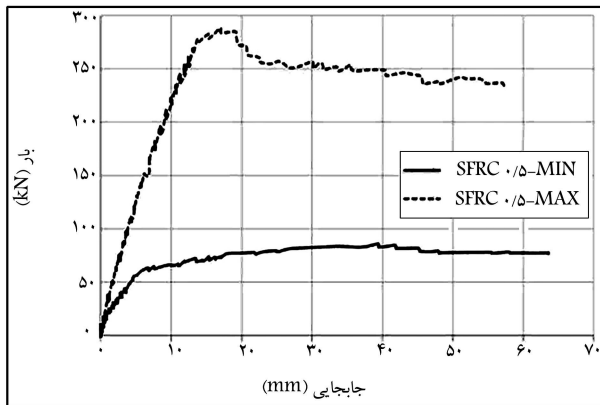


ب) تغییر مکان با بار بیشینه.

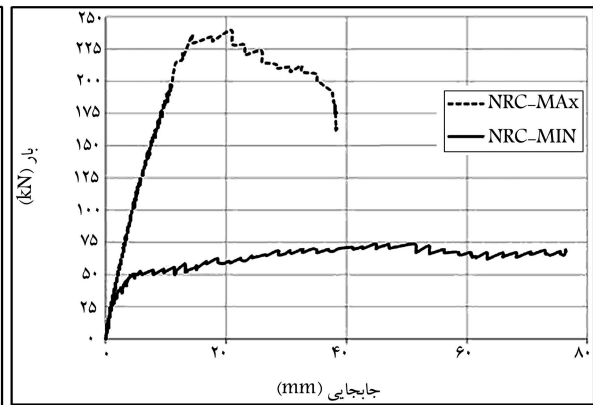


الف) بارهای بیشینه؛

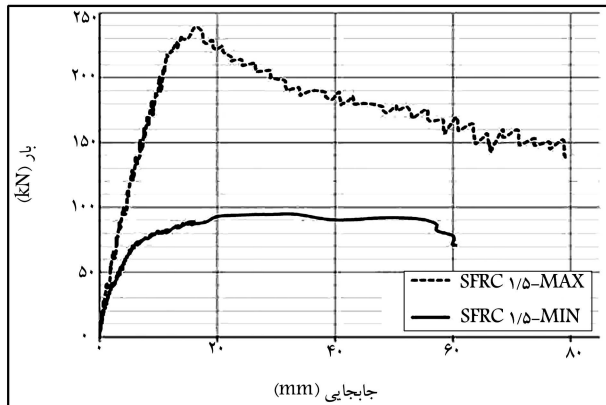
شکل ۱۰. مقایسه‌ی مقادیر نیرو و تغییرمکان وسط دهانه‌ی تیرهای با بیشینه‌ی آرما تور طولی.



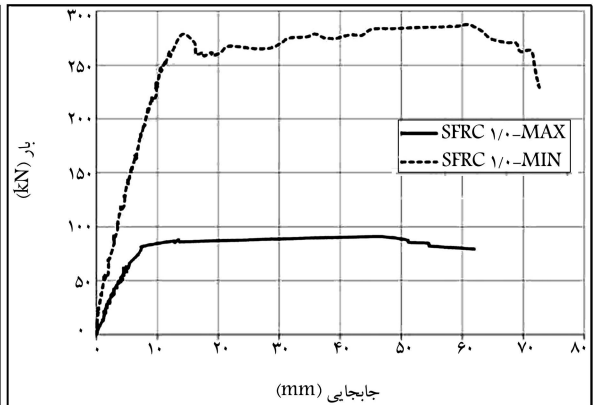
ب) بتن با ۰/۵ درصد الیاف؛



الف) بتن معمولی؛



د) بتن با ۱/۵ درصد الیاف.



ج) بتن با ۱ درصد الیاف؛

شکل ۱۱. مقایسه‌ی منحنی‌های نیرو - تغییرمکان تیرهای با کمینه و بیشینه‌ی آرما تور طولی در بتن‌های متفاوت.

جدول ۶. مقادیر شکل پذیری نمونه‌ی تیرهای آزمایش شده در بتن‌های مختلف.

الف) با کمیته‌ی آرماتور طولی				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(NRC-MIN)}$
NRC-MIN	۷/۸۲	۷۵/۴۵	۹/۶۵	۱/۰۰
SFRC <sup>۰</sup> /۵-MIN	۵/۲۴	۶۳/۶	۱۲/۱۴	۱/۲۶
SFRC <sup>۱</sup> /۰-MIN	۴/۹۵	۶۱/۹۹	۱۲/۵۲	۱/۳۰
SFRC <sup>۱</sup> /۵-MIN	۵/۷۶	۶۰/۵۱	۱۰/۵۱	۱/۰۹
ب) با بیشینه‌ی آرماتور طولی.				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(NRC-MAX)}$
NRC-MAX	۱۰/۲۲	۳۵/۰۲	۳/۴۳	۱/۰۰
SFRC <sup>۰</sup> /۵-MAX	۱۱/۹۶	۴۵/۵۶	۳/۸۱	۱/۱۲
SFRC <sup>۱</sup> /۰-MAX	۱۲/۱۱	۷۲/۰۸	۵/۹۵	۱/۷۴
SFRC <sup>۱</sup> /۵-MAX	۱۱/۵	۳۱/۴۹	۲/۷۴	۰/۷۸

جدول ۷. مقایسه‌ی مقادیر شکل پذیری نمونه‌ی تیرهای با کمیته و بیشینه‌ی آرماتور طولی.

الف) بتن معمولی				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(NRC-MIN)}$
NRC-MIN	۷/۸۲	۷۵/۴۵	۹/۶۵	۱/۰۰
NRC-MAX	۱۰/۲۲	۳۵/۰۲	۳/۴۳	۰/۳۶
ب) بتن با ۰/۵٪ الیاف				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(SFRC^{0.5}-MIN)}$
SFRC <sup>۰</sup> /۵-MIN	۵/۲۴	۶۳/۶	۱۲/۱۴	۱/۰۰
SFRC <sup>۰</sup> /۵-MAX	۱۱/۹۶	۴۵/۵۶	۳/۸۱	۰/۳۲
ج) بتن با ۱٪ الیاف				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(SFRC^{1.0}-MIN)}$
SFRC <sup>۱</sup> /۰-MIN	۴/۹۵	۶۱/۹۹	۱۲/۵۲	۱/۰۰
SFRC <sup>۱</sup> /۰-MAX	۱۲/۱۱	۷۲/۰۸	۵/۹۵	۰/۴۶
د) بتن با ۱/۵٪ الیاف				
نام نمونه	$\Delta_y (mm)$	$\Delta_u (mm)$	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{\mu}{\mu(SFRC^{1.5}-MIN)}$
SFRC <sup>۱</sup> /۵-MIN	۵/۷۶	۶۰/۵۱	۱۰/۵۱	۱/۰۰
SFRC <sup>۱</sup> /۵-MAX	۱۱/۵	۳۱/۴۹	۲/۷۴	۰/۲۶

الیاف به ترتیب ۳° و ۷۴ درصد بیش از نمونه‌های متناظر مرجع خود بوده‌اند. نمونه با کمیته‌ی آرماتور طولی ساخته شده با ۱/۵٪ الیاف هم افزایش حدود ۳۰ درصدی در ظرفیت نهایی و هم حدود ۱۰٪ افزایش در شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌ی مرجع خود داشته است؛ ولی نمونه با بیشینه‌ی آرماتور طولی ساخته شده با ۱/۵٪ الیاف هم کاهش ۴ درصدی در ظرفیت و هم کاهش ۲۲ درصدی در شکل‌پذیری داشته است، که نشان می‌دهد حجم زیاد الیاف برای تیرهایی که دارای آرماتور طولی نزدیک به بیشینه هستند، خیلی مفید و مؤثر نیست. مقایسه بین مقادیر شکل‌پذیری نمونه‌های ساخته شده با کمیته و بیشینه‌ی آرماتور کششی در بتن‌های مختلف به تفکیک در جدول ۷ ارائه و نسبت شکل‌پذیری نمونه با بیشینه‌ی نسبت به نمونه با کمیته‌ی آرماتور طولی در هر حالت محاسبه و نشان داده شده است. در همه‌ی موارد با افزایش میزان آرماتور طولی، مقدار شکل‌پذیری به طور قابل توجهی کاهش یافته است، که مقدار آن در بتن‌های معمولی و با الیاف ۰/۵٪ تا حدود ۶۵٪ و در حالت با الیاف ۱/۵٪ تا حدود ۷۴٪ بوده است و کمترین میزان کاهش در

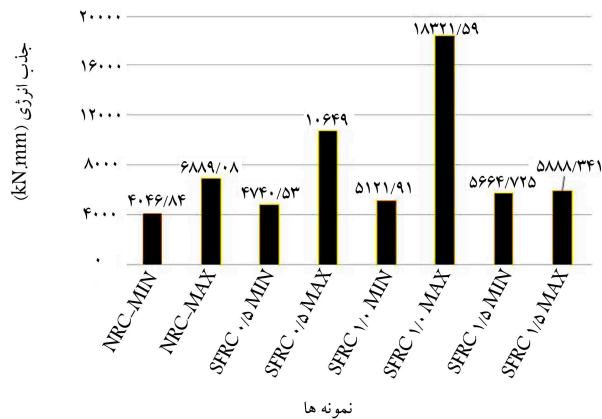
باربری بیشتری با سختی بالاتر و عموماً خیز نهایی بیشتری نسبت به نمونه با کمیته‌ی آرماتور طولی داشته‌اند.

#### ۴.۴. بررسی شکل‌پذیری نمونه‌ها

شکل‌پذیری خمشی به صورت نسبت تغییرمکان نهایی  $\Delta_u$  به تغییرمکان جاری شدن  $\Delta_y$  تعریف می‌شود، که هر دو مقدار برای ۸ تیر آزمایش شده در جدول ۶ محاسبه و ارائه شده‌اند. مقادیر شکل‌پذیری نمونه‌های ساخته شده با کمیته و بیشینه‌ی آرماتور کششی با بتن‌های مختلف نیز به تفکیک در جدول ۷ ارائه و نسبت شکل‌پذیری هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مرجع متناظر ساخته شده با بتن معمولی محاسبه و نشان داده شده است. نتایج و مقایسه‌ها در جدول ۶ (الف و ب) نشان می‌دهند که نمونه‌های ساخته شده با ۱٪ الیاف، بیشترین شکل‌پذیری را نسبت به نمونه‌های مرجع خود داشته‌اند؛ به طوری که درصد افزایش در نمونه‌های الیافی ۱٪ با کمیته و بیشینه‌ی

جدول ۸. مقایسه‌ی انرژی جذب شده در نمونه‌های مختلف.

الف) با کمیته‌ی آرماتور کششی		
نام نمونه	میزان انرژی جذب شده $\frac{w}{w(NRC-MIN)}$	W (kN.mm)
NRC-MIN	۱	۴۰۴۶/۸۴
SFRC <sup>۰</sup> /۵-MIN	۱/۱۷	۴۷۴۰/۵۳
SFRC <sup>۱</sup> /۰-MIN	۱/۲۷	۵۱۲۱/۹۱
SFRC <sup>۱</sup> /۵-MIN	۱/۴۰	۵۶۶۴/۷۲۵
ب) با بیشینه‌ی آرماتور کششی.		
نام نمونه	میزان انرژی جذب شده $\frac{w}{w(NRC-MAX)}$	W (kN.mm)
NRC-MAX	۱	۶۸۸۹/۰۸
SFRC <sup>۰</sup> /۵-MAX	۱/۵۵	۱۰۶۴۹
SFRC <sup>۱</sup> /۰-MAX	۲/۶۶	۱۸۳۲۱/۵۹
SFRC <sup>۱</sup> /۵-MAX	۰/۸۵	۵۸۸۸/۳۴۱



شکل ۱۲. مقایسه‌ی جذب انرژی تیرهای آزمایش شده (kN.mm).

تیرها با ۱٪ الیاف بوده است، که تا ۳۴٪ کاهش یافته است، که نشان می‌دهد به کارگیری ۱٪ الیاف، عملکرد بهتری داشته است.

#### ۵.۴. بررسی میزان جذب انرژی نمونه‌ها

میزان جذب انرژی هر نمونه برابر سطح زیر منحنی تا نقطه‌ی شکست در جابه‌جایی نهایی  $\Delta u$  نمونه است، که قدرت استهلاک انرژی توسط هر نمونه را نشان می‌دهد. مقادیر جذب انرژی ۸ نمونه از منحنی‌های بار-تغییرمکان هر نمونه محاسبه و در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین نسبت جذب انرژی نمونه‌های با کمیته و بیشینه‌ی آرماتور طولی به تفکیک نسبت به نمونه‌های مرجع خودشان محاسبه و در جدول ۸ ارائه شده‌اند.

مقادیر ارائه شده در جدول ۸ نشان می‌دهند که عموماً افزودن الیاف باعث افزایش میزان جذب انرژی تیرها شده و تیر با ۱/۵٪ الیاف، بیشترین مقدار جذب انرژی را در بین تیرهای با کمیته‌ی آرماتور طولی داشته و تا ۴۰٪ افزایش نسبت به تیر مرجع نشان داده است؛ در حالی که در بین تیرها با بیشینه‌ی آرماتور طولی، تیر

با ۱٪ الیاف، بیشترین جذب انرژی را داشته و افزایشی تا ۲/۶۶ برابر نسبت به تیر مرجع متناظر خود نشان داده و افزایش درصد الیاف تا ۱/۵٪، باعث کاهش ۱۵ درصدی جذب انرژی نسبت به تیر مرجع شده است.

#### ۵.۴. مقایسه‌ی ظرفیت خمشی تئوری و آزمایشگاهی نمونه‌ها

با مقایسه‌ی لنگر به دست آمده از آزمایش و لنگر تئوری محاسباتی از آیین‌نامه‌های طراحی، میزان درستی محاسبات و مباحث تئوری در مورد تیرهای بتنی الیافی بررسی شده است. لنگر آزمایشگاهی حاصل ضرب نصف نیروی اعمالی بیشینه در فاصله‌ی نیروی متمرکز تا تکیه‌گاه است.

مقادیر ظرفیت خمشی اسمی تئوری ( $M_n$ ) تیر بتن معمولی مطابق معادله‌ی ۵ و تیر بتن الیاف فولادی نمونه‌ها مطابق معادلات ۶ الی ۸ محاسبه و در جدول ۹ ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند:

$$M_n = A_{st} f_{sy} d \left( 1 - \frac{A_{st} f_{sy}}{\gamma_b b d f'_c} \right) \quad (5)$$

$$M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{\gamma} \right) + \rho_t \Delta (h + e - a) b (h - e) \sigma_t \quad (6)$$

$$e = \left[ \rho_t \rho_s + \varepsilon_t (fibers) \right] \frac{c}{\rho_t \rho_s} \quad (7)$$

$$\sigma_t = \rho_t \rho_s \gamma_b v_F \left( \frac{l}{d} \right) F_b \quad (8)$$

که در آنها،  $A_s$  و  $f_y$  به ترتیب سطح و مقاومت جاری شدن میلگرد طولی،  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن معمولی و  $\sigma_t$  مقاومت کششی بتن الیافی هستند.  $b$  و  $d$  به ترتیب عرض و ارتفاع مؤثر مقطع،  $a = \frac{A_{st} f_{sy}}{\rho_t \rho_s b d f'_c}$ ،  $c$  و  $h$  هم به ترتیب ارتفاع تار خشی و ارتفاع کل تیر هستند.  $F_b$  مشخصات بازده پیوند الیاف است، که از ۱ تا ۱/۲ بسته به الیاف متغیر است.  $v_F$  و  $l/d$  به ترتیب نسبت حجمی و ابعادی الیاف هستند. با توجه به جدول ۲، مشخصات فنی الیاف فولادی، نسبت ۱/d برابر ۶۰ و  $F_b$  برابر ۱ و مقدار کرنش الیاف  $\varepsilon_t (fibers)$  بسیار ناچیز است، که از آن صرف‌نظر شده و  $v_F$  به ترتیب ۱/۵ و ۱/۰/۵ برای بتن الیافی در نظر گرفته شده است. لذا مقدار  $\sigma_t$  برای بتن الیافی ۱/۵، ۱/۰ و ۱/۵ درصد به ترتیب ۰/۲۳، ۰/۴۷ و ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است.

با توجه به نتایج جدول ۹، مقادیر لنگر آزمایشگاهی همه‌ی نمونه‌ها نسبت به مقادیر تئوری بین ۵ تا ۱۲۹ درصد افزایش یافته و کمترین افزایش در تیر با بیشینه‌ی آرماتور طولی و ۱/۵٪ الیاف و بیشترین افزایش در تیر با کمیته‌ی آرماتور طولی و ۱/۵٪ الیاف بوده‌اند. ضمناً میزان افزایش در همه‌ی تیرها با کمیته‌ی آرماتور طولی خیلی بیشتر از همان تیرها با بیشینه‌ی آرماتور طولی بوده و اثرپذیری مناسب افزودن الیاف در تیرها با آرماتور طولی کمتر را نشان داده است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

با طراحی و ساخت ۸ نمونه‌ی تیر بتن‌آرمه‌ی معمولی و الیافی در دو حالت با کمیته و بیشینه‌ی آرماتور طولی و انجام آزمایش‌های مرتبط، این نتایج به دست آمده است:

- چگونگی انهدام نمونه‌های استوانه‌ی بتنی و SFRC نشان می‌دهد که وجود الیاف سبب یک‌پارچگی بیشتر نمونه‌ی SFRC شده و جداکردن بخش‌های تخریب شده‌ی نمونه به سادگی میسر نیست. نمونه‌ی بتنی به صورت دوکی شکل در آمده و کاهش طول آن به سادگی دیده نشده است؛ اما نمونه‌ی SFRC متورم شده و کاهش طول آن کاملاً قابل رؤیت بوده است.

جدول ۹. مقایسه‌ی مقادیر ظرفیت خمشی تئوری و آزمایشگاهی تیرهای بتن آرمه.

$\frac{M_{exp}}{M_{the}}$	$M_{exp}(kN.M)$	$M_{the}(kN.m)$	نام نمونه	ردیف
۱/۸۱	۲۴/۳۱	۱۳/۴۶	NRC-MIN	۱
۱/۲۰	۷۹/۲	۶۶/۱۰	NRC-MAX	۲
۲/۰۴	۲۸/۳۲	۱۳/۸۷	SFRC <sup>۰</sup> /۵-MIN	۳
۱/۳۴	۹۳/۶۰	۶۹/۸۵	SFRC <sup>۰</sup> /۵-MAX	۴
۲/۰۹	۲۹/۹۲	۱۴/۲۹	SFRC <sup>۱</sup> /۰-MIN	۵
۱/۲۷	۹۳/۵۵	۷۳/۴۴	SFRC <sup>۱</sup> /۰-MAX	۶
۲/۲۹	۳۱/۲۴	۱۳/۶۶	SFRC <sup>۱</sup> /۵-MIN	۷
۱/۰۵	۷۵/۹	۷۲/۲۶	SFRC <sup>۱</sup> /۵-MAX	۸

داشته‌اند، ولی تیر با ۱/۵٪ الیاف، کاهش ۴ درصدی نسبت به تیر مشابه بتن معمولی داشته است.

در بین نمونه‌ها با کمینه‌ی آرماتور کششی، نمونه‌ی با ۱٪ الیاف، بیشترین نسبت شکل‌پذیری و افزایشی تا ۳۰٪ نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف داشته است. شکل‌پذیری نمونه با بیشینه‌ی آرماتور کششی و ۱٪ الیاف نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف دارای رشد تا ۷۴٪ بوده است، ولی کاهش ۲۲ درصدی در نمونه با ۱/۵٪ الیاف مشاهده شده است.

گرچه هم درصد آرماتور کششی و هم درصد الیاف، تأثیر مثبتی در مقدار شکل‌پذیری تیرها داشته‌اند، ولی افزایش درصد آرماتورهای کششی باعث کاهش ضریب شکل‌پذیری شده است؛ به طوری که ضریب شکل‌پذیری نمونه‌ی SFRC<sup>۱</sup>/۰-MAX نسبت به نمونه‌ی SFRC<sup>۱</sup>/۰-MIN به میزان ۴۶٪ کاهش داشته است.

افزودن ۵/۰، ۱/۰ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی در تیرهای با کمینه‌ی آرماتور طولی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف به ترتیب انرژی مستهلک شده را به میزان ۱۷، ۲۷ و ۴۰ درصد افزایش داده است؛ در حالی که افزودن ۵/۰ و ۱/۰ درصد الیاف در تیرهای با بیشینه‌ی آرماتور طولی، افزایش ۵۵ و ۱۶۶ درصد داشته و افزودن ۱/۵٪ الیاف، کاهش ۱۵٪ را نشان داده است.

استفاده از الیاف در درصدهای ۵/۰، ۱/۰ و ۱/۵ در پژوهش حاضر به ترتیب منجر به افزایش ۳۲، ۶۴ و ۳۹ درصد مقاومت فشاری شده است، که افزایش کمتر در درصد بالای الیاف ناشی از تجمع الیاف و تشکیل حفره در بتن الیاف فولادی بوده است.

ترک‌خوردگی تمام نمونه‌های الیافی بیشتر از ترک‌خوردگی نمونه‌ی بدون الیاف متناظر بوده است. همچنین، فاصله‌ی بین ترک‌ها کاهش یافته و تعداد ترک بیش از نمونه‌های بدون الیاف متناظر بوده است.

در تیر بتن مسلح مرجع NRC، جاری شدن فولاد در طول کوتاه‌تر و در تیرهای با SFRC، جاری شدن فولاد در طول و سطح بزرگ‌تری اتفاق افتاده است، لذا از فولاد استفاده مؤثرتری به عمل می‌آید.

نیروی جاری شدن آرماتورهای کششی در تیرهای بتن الیافی با کمینه‌ی آرماتور کششی تا بیشینه‌ی ۲۸٪ افزایش یافته‌اند.

مقاومت خمشی تیرهای با کمینه‌ی آرماتور کششی ( $\rho_{min}$ ) حاوی ۵/۰، ۱/۰ و ۱/۵ درصد الیاف فولادی نسبت به تیرهای مشابه بتن معمولی به ترتیب ۱۶، ۲۳ و ۲۹ درصد افزایش داشته‌اند.

مقاومت خمشی تیرهای با بیشینه‌ی آرماتور کششی ( $\rho_{max}$ ) حاوی ۵/۰ و ۱/۰ درصد الیاف فولادی نسبت به تیرهای مشابه بتن معمولی تا ۱۸٪ افزایش

## پانویس‌ها

1. Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)
2. Faisal Mahmood
3. Yoo
4. Koli & Jadhav
5. Patil & Sangle

## منابع (References)

1. Winkler, A., Edvardsen, C. and Kasper, T. "Examples of bridge, tunnel lining and foundation design with

steel fibre reinforced concrete", *In Proceedings of FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop Fibre Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications* (2014).

2. ACI Committee 544, "State-of-the-art report on fiber reinforced concrete- ACI 544.1R-96 (reapproved 2002)", *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 6, pp. ACI544.1R-7 - ACI544.1R-23 (2008).
3. Lequesne, R., Setkit, M., Parra-Montesinos, G.J. and et al. "Seismic detailing and behavior of coupling beams with high-performance fibre reinforced concrete", *ACI Special Publication*, **SP-272**, pp. 189-204 (2010).
4. Mahalingam, M., Pulipakka, R., Rao, N. and et al. "Ductility behavior of fibre reinforced concrete beams

- strengthened with externally bonded glass fibre reinforced polymer laminates”, *American Journal of Applied Sciences*, **10**(1), pp. 107-111 (2013).
5. Shah, S.P. and Rangan, B.V. “Fiber reinforced concrete properties”, *ACI Journal*, **83**(4), pp. 624-628 (1986).
  6. Lee, S.C., Cho, J.Y. and Vecchio, F.J. “Simplified diverse embedment model for SFRC element in tension”, *ACI Materials Journal*, **110**(4), pp. 403-412 (2013).
  7. Fantilli, A.P., Mihashi, H. and Villini, P. “Multiple cracking and strain hardening in fiber-reinforced concrete under uniaxial tension”, *Cement and Concrete Research*, **39**(12), pp. 1217-1229 (2009).
  8. RILEM TC 162 – TDF 36 (Test and design methods for steel fibre reinforced concrete), pp. 560 – 567 (2003).
  9. “Fib Model Code 2010, Fib Model Code for Concrete Structures 2010”, *International Federation for Structural Concrete (fib)*, Berlin, Germany (2013). URL:<https://doi.org/10.1002/9783433604090>.
  10. “ACI 318-19”, Building code requirements for structural concrete and commentary, USA: *American Concrete Institute* (2019).
  11. “AS 3600:2018. concrete Sstructures”, *Standards Australia, Sydney, Australia: Australian Standard* (2018).
  12. Hemmati, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K. “Increasing the flexural capacity of RC beams using partially HPRCC layers”, *Comput. Concr.*, **16**(4), pp. 545-568 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2015.16.4.000>.
  13. Hemmati, A., Kheyroddin, A., Sharbatdar, M.K. and et al. “Ductile behavior of high-performance fiber reinforced cementitious composite (HPRCC) frames”, *Constr. Build. Mater.*, **115**, pp. 681-689 (2016). DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.04.078](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.078).
  14. Mousavi Esfahani, S.V. and Sharbatdar, M.K. “Substitution effects of conventional concrete with high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPRCC) in beams reinforced with GFRP bars”, *Case Stud. Constr. Mater.*, **13**, p. e00440 (2020).
  15. Ehsani, R., Sharbatdar, M.K. and Kheyroddin, A. “Ductility and moment redistribution capacity of two-span RC beams”, *Magazine of Civil Engineering*, **90**(6), pp. 104-118 (2019).
  16. Ghods, A. and Sharbatdar, M.K. “An investigation on the behavior of two fixed end beams cast with HPRCC composite”, *Case Stud. Constr. Mater.*, **13**, p. e00466 (2020).
  17. Faisal Mahmood, S.M., Agarwal, A., Foster, S.J. and et al. “Flexural performance of steel fibre reinforced concrete beams designed for moment redistribution”, *Engineering Structures*, **177**, pp. 695-706 (2018).
  18. Mahir Mahmod, H., Hanoon Ammar, N. and Haitham J. “Flexural behavior of self-compacting concrete beams strengthened with steel fiber reinforcement”, *Journal of Building Engineering*, **16**, pp. 228-237 (2018). <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.01.006>.
  19. Yoo, D.Y., Kim, S.W. and Park, J.J. “Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers”, *Construction and Building Materials*, **132**, pp. 219-229 (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11>.
  20. Koli, M.D. and Jadhav, H.S. “Flexural behavior of hybrid fiber reinforced concrete beams”, *Int. J. Struct. & Civil Engg. Res.*, **2**(3), pp. 210-218 (Aug 2013).
  21. Patil, S.P. and Sangle, K.K. “Tests of steel fibre reinforced concrete beams under predominant torsion”, *Journal of Building Engineering*, **6**, pp. 157-162 (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.02.004>.
  22. Sharbatdar, M.K. and Ayubi, J. “Flexural retrofitting of the damaged reinforced concrete beams by using HPRCC”, *Scientia Iranica A*, **27**(6), pp. 2680-2689 (2020).
  23. Taghikhani, A. and Sharbatdar, M.K. “Flexural behavior investigation of HPRCC cantilever RC beam with different stirrup configuration”, *Ferdousi Civil Eng Journal*, **31**(4), pp. 153-164 (In Persian) (1398/2019).
  24. Hemmati, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K. “Using HPRCC for increasing the capacity of a RC frame”, *Sharif Civil Engineering Journal*, **29**(3), pp. 97-106 (In Persian) (1392/2013).
  25. Tajari, A.R. and Sharbatdar, M.K. “Engineered cementitious composites effects on seismic strengthening of non-ductile RC frames with masonry infills”, *Sharif Civil Engineering Journal*, **37.2**(2), pp. 25-37 (In Persian) (1400/2021).
  26. Farrokhpour Tabrizi, M., Ghalehnovi, M. and Karimipour, A. “Ioteosfofextoracbw lsb”, *Sharif Civil Engineering Journal*, **36.2**(3.2), pp. 109-123 (In Persian) (1399/2020).
  27. Tavakoll, H.R. and Falahatbar, M. “Exeotfboscrofcbucl”, *Sharif Civil Engineering Journal*, **31.2**(1.4), pp. 125-133 (In Persian) (1394/2015).