

Flexural Strengthening of Continuous RC Beams Using HPFRCC Precast Laminates

Alireza Bitaraf¹, Ali Kheyroddin^{2*}, Mohammad-Kazem sharbatdar³

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

In this study, the use of precast laminates, made of high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC), was investigated for strengthening of continuous reinforced concrete (RC) beams. HPFRCCs are characterized by their high tensile strength and remarkable durability properties. To find the effect of strengthening, eight continuous (two-bay) RC beams were tested under monotonic load in the middle of spans; two of which were the control specimens and six of which were strengthened specimens. The HPFRCC laminates were prefabricated with 25 mm thickness and bonded to the tensile surface of beams using epoxy and mechanical anchorage. The longitudinal bars were added to laminates in four specimens to survey their effect on strengthened beams. Comparison of results declared that the load carrying capacity was increased up to 59 % in strengthened beams. Ductility index of the strengthened beams was acceptable, and also up to 35 % growth in energy-absorption capacity was observed. Applying laminates to the tensile surface delayed crack propagation and decreased the midspan deflection. Also, stiffness of specimens in the cracked concrete stage was increased up to 78 % that led to decrease the service deflection. It is concluded that the use of HPFRCC laminates, especially in case of applying longitudinal bars, is an efficient method to enhance the flexural capacity of continuous RC beams.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 July 2019

Revise Date: 05 September 2019

Accept Date: 02 October 2019

Keywords:

HPFRCC;
RC continuous beam;
Strengthening;
Load-bearing capacity;
Ductility;
Energy-absorption;
Precast laminate

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.194981.1909

*Corresponding author: Ali Kheyroddin
Email address: kheyroddin@semnan.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی مقاومت‌سازی خمشی تیرهای سراسری بتن آرمه با لمینیت

پیش‌ساخته کامپوزیت الیافی توانمند

علیرضا بیطرف^۱، علی خیرالدین^{۲*}، محمد کاظم شربتدار^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

هدف از این مطالعه آزمایشگاهی، بررسی تاثیر استفاده از لمینیت پیش‌ساخته کامپوزیت الیافی توانمند در مقاومت‌سازی تیرهای سراسری، بر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی این تیرها است. همچنین تاثیر کاشت میلگرد در لمینیت پیش‌ساخته بر بهبود رفتار خمشی این تیرها بررسی شده است. کامپوزیت الیافی توانمند، یک کامپوزیت پایه‌سیمانی با مشخصات مکانیکی قابل توجه و دوام بالا است. به منظور بررسی تاثیر لمینیت‌های کامپوزیتی الیافی بر رفتار خمشی تیرها، هشت نمونه تیر بتن آرمه دو دهانه در دو گروه چهارتایی با مقادیر مختلف آرماتور فشاری ساخته و در هر گروه یک نمونه به عنوان نمونه مرجع، بدون مقاومت‌سازی بارگذاری شد. یکی از نمونه‌های هر گروه با لمینیت کامپوزیتی در ناحیه کششی وسط دهانه‌ها و تکیه‌گاه میانی و دو نمونه دیگر با لمینیت حاوی آرماتور طولی در همان نواحی مقاومت‌سازی شدند. آزمایشات نشان داد که ظرفیت باربری نمونه‌های مقاومت‌سازی شده بین ۳۳ تا ۵۹ درصد، ظرفیت استهلاک انرژی آنها بین ۱۶ تا ۳۵ درصد و سختی اولیه آنها تا دو برابر نمونه‌های مرجع افزایش یافت. شکل‌پذیری نمونه‌های مقاومت‌سازی شده با لمینیت فاقد آرماتور، ۲۳ درصد نسبت به نمونه‌های مرجع کاهش یافت. اما وجود آرماتور در لمینیت باعث افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌های مقاومت‌سازی شده با لمینیت فاقد آرماتور شد. نتایج این بررسی، مؤید مفید بودن استفاده از لمینیت‌های پیش‌ساخته کامپوزیتی در بهبود رفتار خمشی تیرهای سراسری بتن آرمه است. همچنین کاشت میلگرد در لمینیت، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، مانع از کاهش قابل توجه شکل‌پذیری نمونه مقاومت‌سازی شده می‌شود.

کلمات کلیدی: کامپوزیت الیافی توانمند، الیاف فولادی، تیر سراسری بتن مسلح، مقاومت‌سازی، ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، استهلاک انرژی، لمینیت پیش‌ساخته

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2019.194981.1909	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.194981.1909	۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۳۹۸/۰۷/۱۰	۱۳۹۸/۰۷/۱۰	۱۳۹۸/۰۶/۱۴	۱۳۹۸/۰۵/۰۲
علی خیرالدین kheyroddin@semnan.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

به منظور بهبود عملکرد سازه‌های ساختمان‌های موجود و نیز تامین الزامات آیین‌نامه‌های جدید در آنها، بسیاری از ساختمان‌ها نیاز به مقاوم‌سازی و بهسازی دارند. متدهای مختلفی توسط محققین برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتن‌آرمه ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از ورق‌ها و پروفیل‌های فولادی [۱، ۲]، استفاده از الیاف پلیمری (FRP) [۳، ۴] و استفاده از ژاکت بتنی و بتن‌آرمه [۵، ۶] را برشمرد.

استفاده از ورق‌ها و پروفیل‌های فولادی، علیرغم مزایای زیادی که دارد، مشکلاتی از جمله احتمال رخ دادن مود برشی، بدلیل مقاومت زیاد فولاد، مشکل در نصب به دلیل وزن بالای قطعات و خوردگی فولاد ایجاد می‌کند. لمینیت‌های FRP نیز بدلیل ایجاد خرابی ترد ناشی از تفاوت زیاد مقاومت کششی و سختی آنها با بتن موجود، کارایی مناسبی ندارد [۷]. استفاده از ژاکت بتنی یا بتن‌آرمه نیز، علاوه بر زمان‌بر بودن و اخلاص طولانی مدت در استفاده از سازه موجود [۸] ضخامت المان سازه‌ای را بطور قابل توجهی افزایش می‌دهد. از این رو نیاز به توسعه تکنیک‌ها و مواد جدید در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه، محققین را به سمت استفاده از کامپوزیت‌های الیافی توانمند پایه‌سیمانی^۱ (HPFRCC) هدایت کرده است. کامپوزیت الیافی توانمند، یک کامپوزیت پایه سیمانی با مشخصات مکانیکی قابل توجه نظیر مقاومت فشاری و انرژی شکست بالا در مقایسه با بتن معمولی می‌باشد [۹-۱۱]. وجود الیاف فولادی در این کامپوزیت منجر به کاهش تردی و افزایش مقاومت و شکل‌پذیری در تنش‌های کششی می‌شود [۱۲-۱۴]. در ساخت این کامپوزیت از مواد در دسترس شامل سیمان پرتلند، میکروسیلیس، متاکائولین، کاهنده شدید آب، ماسه ریزدانه و الیاف فولادی استفاده می‌شود. استفاده از عیار بالای مواد سیمانی، نسبت آب به سیمان کم (کمتر از 0.2) و استفاده از ریزدانه با سایز کمتر از ۱ میلی‌متر، مخلوطی با تراکم بالا و نفوذپذیری کم ایجاد می‌کند [۱۵، ۱۶]. این مزیت‌های کامپوزیت الیافی به همراه امکان ساخت آن به صورت لمینیت پیش‌ساخته نازک، آن را به گزینه مناسبی برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتن‌آرمه تبدیل کرده است.

به همین دلیل در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی پیرامون استفاده از کامپوزیت الیافی توانمند در مقاوم‌سازی تیرهای بتن‌آرمه با دو تکنیک درجا [۱۷-۱۹] و پیش‌ساخته [۲۰، ۲۱] ارائه شده است. محققین در خصوص پارامترهای مختلفی نظیر تاثیر ضخامت لایه لمینیت [۲۲]، نحوه اتصال لایه لمینیت به تیر (باچسب [۷] یا با پیچ [۲۳])، تاثیر مدفون کردن آرماتور طولی در لایه مقاوم‌سازی [۲۴]، محل استفاده از کامپوزیت (سطح کششی [۱۹، ۲۰]، سطح فشاری [۸، ۲۲] یا وجوه کناری تیر [۷، ۱۸])، تحت پروتکل‌های مختلف بارگذاری (مونوتونیک [۲۲] و رفت‌وبرگشتی [۲۰، ۲۴]) به بررسی پرداخته‌اند. مطالعات محققین نشان داده است که کاربرد کامپوزیت الیافی توانمند به عنوان ماده مقاوم‌سازی، یک روش موثر برای افزایش مقاومت و بهبود سایر مشخصات سازه‌ای تیرها است [۲۵، ۲۶] اما شکل‌پذیری تیر را کاهش می‌دهد [۷].

عموم مطالعات انجام شده در خصوص مقاوم‌سازی تیرهای بتن‌آرمه معطوف به تیرهای یک دهانه یا تیرهای کانتیلور می‌باشد و مطالعات کمی در خصوص مقاوم‌سازی تیرهای سراسری انجام شده است. از معدود مطالعاتی که در خصوص مقاوم‌سازی تیرهای سراسری انجام شده است، می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد: Naaman و همکاران در سال ۱۹۹۶ با بررسی ۱۸ تیر دو دهانه ساخته شده با بتن الیافی، خصوصیات خمشی این تیرها را بررسی کردند. در این مطالعه، روابطی برای محاسبه ظرفیت دوران پلاستیک، طول مفصل پلاستیک و ضریب شکل‌پذیری این تیرها ارائه شد [۲۷]. Akbarzadeh و Maghsoudi در سال ۲۰۱۰ در دو تحقیق به بررسی تاثیر مقاوم‌سازی تیرهای بتن‌آرمه دو دهانه با استفاده از لمینیت CFRP در نواحی کششی پرداختند. مطالعه ایشان نشان داد که استفاده از ورق CFRP اگرچه ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد، اما شکل‌پذیری را به شدت کاهش می‌دهد [۲۸] و از سویی، مهار انتهای لمینیت تا حدی باعث بهبود بازتوزیع گشتاور می‌شود [۲۹]. Rahman در سال ۲۰۱۳ به بررسی مقاوم‌سازی تیرهای دو دهانه T شکل [۳۰]، Samaaneh در سال ۲۰۱۶ به بررسی مقاوم‌سازی تیرهای دو دهانه کامپوزیتی [۳۱] و Hamed در سال ۲۰۱۹ به بررسی مقاوم‌سازی تیرهای دو دهانه مستطیلی [۳۲] با ورق CFRP پرداختند. از تحقیقات داخلی نیز می‌توان به تحقیق مستوفی‌نژاد و فرحبد در سال ۱۳۸۴ در خصوص عوامل

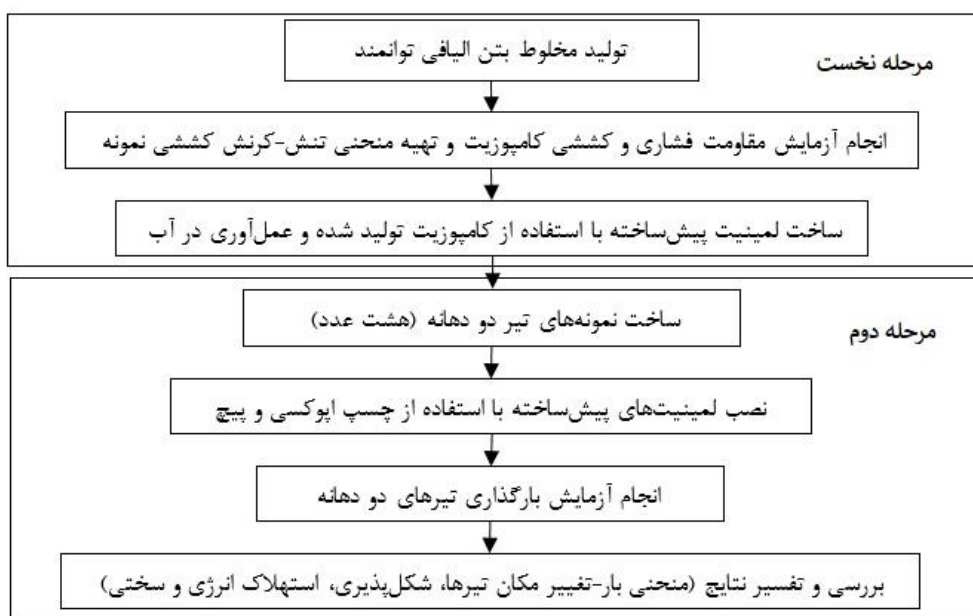
¹ High-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC)

موثر بر بازتوزیع گشتاور در تیرهای سراسری پل‌ها [۳۳]، تحقیق فرحید در سال ۱۳۸۹ در خصوص مدل‌سازی تیرهای دو دهانه و بررسی ظرفیت خمشی و بازتوزیع گشتاور در اثر مقاوم‌سازی با لایه CFRP [۳۴] و مطالعه احسانی در سال ۱۳۹۸ درباره تاثیر اجرای ناحیه کششی تیرهای بتن‌آرمه دو دهانه با لایه کامپوزیت الیافی بر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و جذب انرژی اشاره کرد [۳۵].

با توجه به اینکه مطالعات جامعی در خصوص مقاوم‌سازی تیرهای سراسری بتن‌آرمه با کامپوزیت‌های الیافی انجام نشده است، هدف از مطالعه حاضر بررسی آزمایشگاهی تاثیر مقاوم‌سازی تیرهای سراسری با لمینیت الیافی بر رفتار خمشی پلاستیک این تیرها می‌باشد. از آنجایی که تمرکز ترک در لمینیت باعث کاهش شکل‌پذیری تیر مقاوم‌شده می‌شود، در این بررسی، تاثیر کاشت میلگرد طولی در لمینیت پیش‌ساخته بر شکل‌پذیری تیرهای سراسری مورد توجه قرار گرفته است. برای بررسی تاثیر میزان فولاد فشاری بر رفتار نمونه مقاوم‌سازی شده، از دو گروه تیر با درصد‌های مختلف آرماتور استفاده شده است. به عبارتی، هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر افزودن لمینیت پیش‌ساخته کامپوزیت الیافی با و بدون آرماتور بر رفتار خمشی تیرهای دو دهانه بتن‌آرمه تحت بار متمرکز در وسط دهانه‌ها می‌باشد. به این منظور، مقاومت نهایی، سختی، شکل‌پذیری، استهلاک انرژی و مود خرابی تیرهای مقاوم‌سازی بررسی شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

این مطالعه شامل یک برنامه آزمایشگاهی دو مرحله‌ای است. در گام نخست بر مبنای تحقیقات پیشین، یک مخلوط کامپوزیت الیافی توانمند، با استفاده از میکروسیلیس، متاکائولن و الیاف فولادی طراحی و آزمایش شد و سپس با استفاده از کامپوزیت تولید شده، لمینیت‌های پیش‌ساخته تهیه شدند. در مرحله دوم تیرهای دودهانه بتن‌آرمه، ساخته و با این لمینیت‌ها مقاوم‌سازی شدند. گروهی از تیرها با لمینیت‌های مسلح شده با آرماتور طولی مقاوم‌سازی شده و گروهی دیگر با لمینیت‌های فاقد آرماتور طولی، مسلح شدند. برای اتصال لمینیت به تیر از چسب و پیچ استفاده شد. تیرهای مقاوم‌سازی شده تحت بارگذاری متمرکز افزایشی در وسط دهانه‌ها قرار گرفتند و رفتار سازه‌ای آنها با نمونه‌های مرجع تقویت نشده مقایسه شد. الگوریتم انجام پژوهش در شکل ۱ مشخص شده است.



شکل ۱: الگوریتم انجام پژوهش

۳- طرح اختلاط کامپوزیت الیافی توانمند

در ساخت کامپوزیت از مواد سیمانی شامل سیمان و مواد پوزولانی میکروسیلیس و متاکائولن استفاده شده است. سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند تیپ II تولید کارخانه سیمان شاهرود با وزن مخصوص 3.15 و نرمی بلین $3309 \text{ cm}^2/\text{g}$ می‌باشد. میکروسیلیس مورد

استفاده، محصول جانبی کارخانه فروسیلیس ایران، با وزن مخصوص 2.20 و نرمی بلین 140000 تا $200000 \text{ cm}^2/\text{g}$ می باشد. میکروسیلیس هم نقش پرکنندگی دارد و هم به دلیل فعالیت پزولانی، باعث افزایش مقاومت می شود. اما محققین نقش پرکنندگی آنرا مهم تر می دانند [۳۶]. وزن مخصوص متاکائولن 2.50 و نرمی بلین آن 22000 تا $25000 \text{ cm}^2/\text{g}$ می باشد. محققین دو نقش برای متاکائولن در بتن الیافی برمی شمردند. نقش نخست آن افزایش باند بین الیاف و ماتریس و نقش دوم همگن کردن پراکندگی الیاف در ماتریس است [۱۵، ۳۷-۳۹]. ترکیب شیمیایی مواد سیمانی مطابق جدول ۱ می باشد.

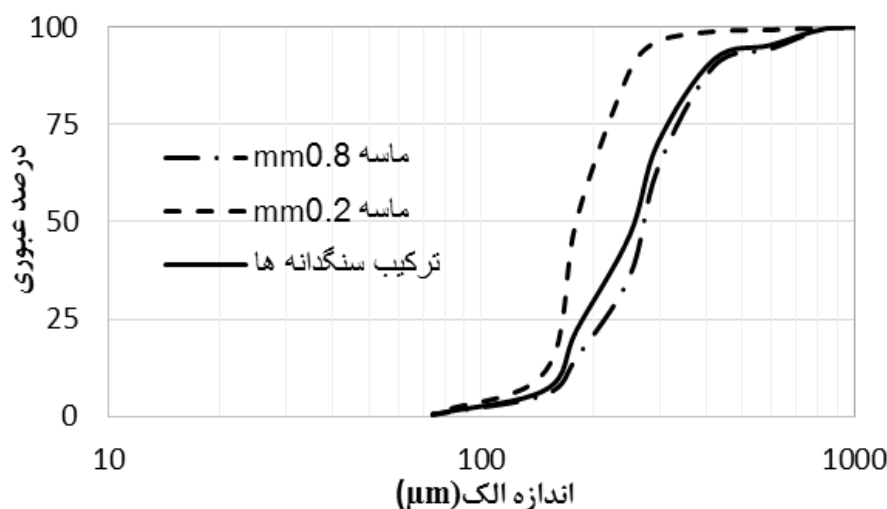
جدول ۱: ترکیب شیمیایی مواد سیمانی (درصد وزنی)

سایر مواد	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ماده سیمانی
5.48	1.52	63.36	3.96	4.48	21.20	سیمان
6.00	1.50	1.50	2.00	1.00	88.00	میکروسیلیس
0.98	0.03	0.09	0.9	45.00	53.00	متاکائولن

برای افزایش چگالی ویژه مخلوط از پودر بسیار نرم سیلیس استفاده شد. این ماده در مخلوط، یک ماده غیرفعال است و نقش پرکنندگی دارد [۴۰]. سنگدانه های مورد استفاده شامل دو سایز ماسه سیلیسی با حداکثر اندازه 0.2 و 0.8 میلیمتر می باشند که به ترتیب به نسبت ۲۰ و ۸۰ درصد با هم ترکیب شده اند. خواص مکانیکی سنگدانه ها مطابق جدول ۲ و منحنی دانه بندی آنها مطابق شکل ۲ است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی سنگدانه ها

حداکثر سایز (mm)	وزن مخصوص	مدول نرمی	جذب آب (%)
0.8	2.65	1.36	2.71
0.2	2.62	0.92	2.83



شکل ۲: منحنی دانه بندی سنگدانه ها

نسبت آب به مواد سیمانی در این کامپوزیت بسیار کم (حدود 0.18) می باشد. لذا به منظور تامین کارایی از فوق روان کننده کربوکسیلات اتری با نام Carboxal HF5000 محصول شرکت البرزشیمی آسیا استفاده شده است. ویژگی این نوع فوق روان کننده، طولانی بودن زنجیره جانبی در ترکیب شیمیایی آن نسبت به محصولات مشابه می باشد. طول زنجیره جانبی، کارایی مخلوط را کنترل می کند، در حالی که طول زنجیره اصلی، مدت ماندگاری تاثیر فوق روان کننده را کنترل می کند [۴۱]. مشخصات مکانیکی و ترکیب شیمیایی این فوق روان کننده مطابق جدول ۳ است.

جدول ۳: مشخصات مکانیکی و ترکیب شیمیایی فوق‌روان‌کننده

شکل ظاهری	غلظت	PH	چگالی	Na ₂ O	Cl
مایع سفید	40%	5~7	1.1g/cm ³	<0.5%	<0.1%

در ساخت کامپوزیت از الیاف فولادی با قلاب انتهایی به طول ۳۰ و قطر ۰/۶ میلی‌متر استفاده شد. قلاب انتهایی با تقویت باند بین الیاف و ماتریس، تاثیر الیاف را در مقاومت کششی کامپوزیت افزایش می‌دهد [۴۲]. مشخصات الیاف مورد استفاده مطابق جدول ۴ است.

جدول ۴: مشخصات الیاف فولادی

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	نسبت ابعادی	چگالی (g/cm ³)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
فولادی با قلاب انتهایی	۳۰	۰/۶	۵۰	۷/۸۵	۱۱۰۰	۲۰۰

برای تعیین مقدار بهینه اجزای مخلوط با استفاده از طرح اختلاط پیشنهادی Wille و Naaman که در آن از سیمان و میکروسیلیس به عنوان مواد سیمانی استفاده شده است [۱۳] و با انجام یک بررسی جامع آزمایشگاهی و تحلیل آماری و سپس بهینه‌سازی ریاضی، یک ملات با مواد سیمانی سه بخشی (سیمان، میکروسیلیس و متاکائولن) با درصدهای حجمی 87.9%، 8% و 4.1% و الیاف فولادی به مقدار 2.75% حجم مخلوط انتخاب شد که اجزای آن در جدول ۵ مشخص شده است.

جدول ۵: طرح اختلاط کامپوزیت الیافی

اجزای مخلوط	وزن در یک کیلوگرم مخلوط
سیمان	۹۳۱
میکروسیلیس	۵۹
متاکائولن	۳۴
ماسه سیلیسی (≥0.2mm) ^a	۱۹۴
ماسه سیلیسی (≥0.8mm) ^a	۷۷۷
پودر سیلیس ^a	۲۰۵
آب ^b	۱۸۴
فوق‌روان‌کننده ^c	۴/۳
الیاف فولادی	۲۱۶

a وزن اشباع با سطح خشک، b شامل آب موجود در فوق‌روان‌کننده، c وزن خشک

اجزای مخلوط بصورت زیر در یک مخلوط‌کن آزمایشگاهی مخلوط شدند: در ابتدا سنگدانه‌ها، پودر میکروسیلیس و متاکائولن بصورت خشک به مدت پنج دقیقه مخلوط شدند. سپس سیمان و پودر سیلیس اضافه شده و مجدداً به مدت پنج دقیقه مخلوط شدند. سپس آب لازم (شامل آب لازم برای اشباع و آب آزاد) طی مدت یک دقیقه به مخلوط اضافه شده و در ادامه با افزودن فوق‌روان‌کننده، مجموعه مواد به مدت پنج دقیقه دیگر ترکیب شدند. در پایان پس از افزودن الیاف، پنج دقیقه دیگر نیز مواد ترکیب شدند. قابل اشاره است که آب موجود در فوق‌روان‌کننده نیز به عنوان قسمتی از آب آزاد در نظر گرفته شد.

پس از آماده‌سازی کامپوزیت، سه نمونه مکعبی 100*100*100mm و سه نمونه کششی تهیه شد. سطح مقطع نمونه کششی 25*25mm [۴۳] و قالب آن از پلکسی‌گلس تهیه شد. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت نگهداری در محیط آزمایشگاه در زیر کاور پلاستیکی، از قالب خارج و به مدت ۲۷ روز در آب با دمای ۲۳ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند و سپس مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و نمودار بار-جابجایی نمونه‌های کششی تعیین شد. مقاومت فشاری مطابق استاندارد BS [۴۴] و با استفاده از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰ تن تعیین شد. همچنین منحنی بار-تغییرشکل نمونه کششی، مطابق روش پیشنهادی Wille و Naaman با دستگاه یونیورسال با ظرفیت ۶۰

تن اندازه گیری شد [۴۳]. برای نگهداری نمونه های کششی، دو فک از فولاد MO40 ساخته و به دستگاه یونیورسال اضافه شد. در شکل ۳ نمونه کششی، قالب پلکسی گلس و فک مشخص شده است.

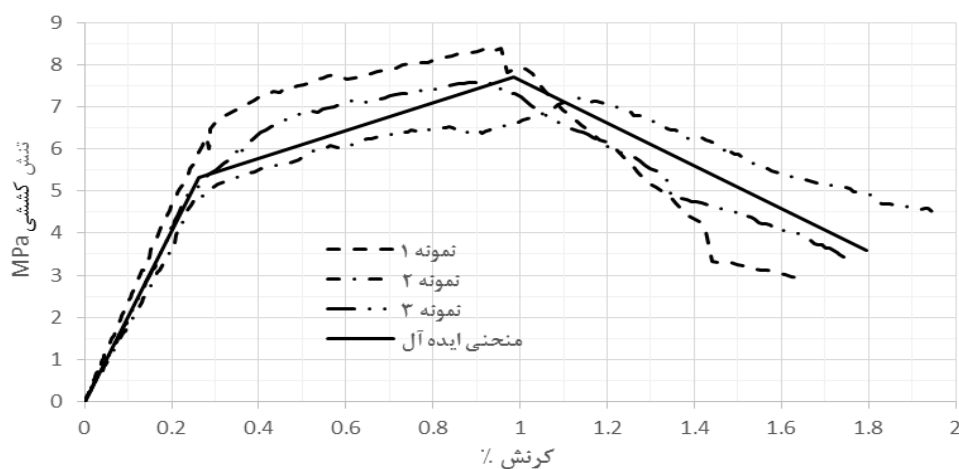


شکل ۳: نمونه کششی، قالب و فک

میانگین مقاومت فشاری نمونه ها و مشخصات اصلی منحنی بار-تغییر شکل در کشش در جدول ۶ نشان داده شده است. همچنین منحنی بار-تغییر شکل کششی نمونه ها در شکل ۴ مشخص شده است. تنش و کرنش ترک خوردگی و تنش و کرنش پست کرکینگ از میانگین مقادیر سه نمونه کششی بدست آمده است.

جدول ۶: مشخصات مکانیکی کامپوزیت الیافی

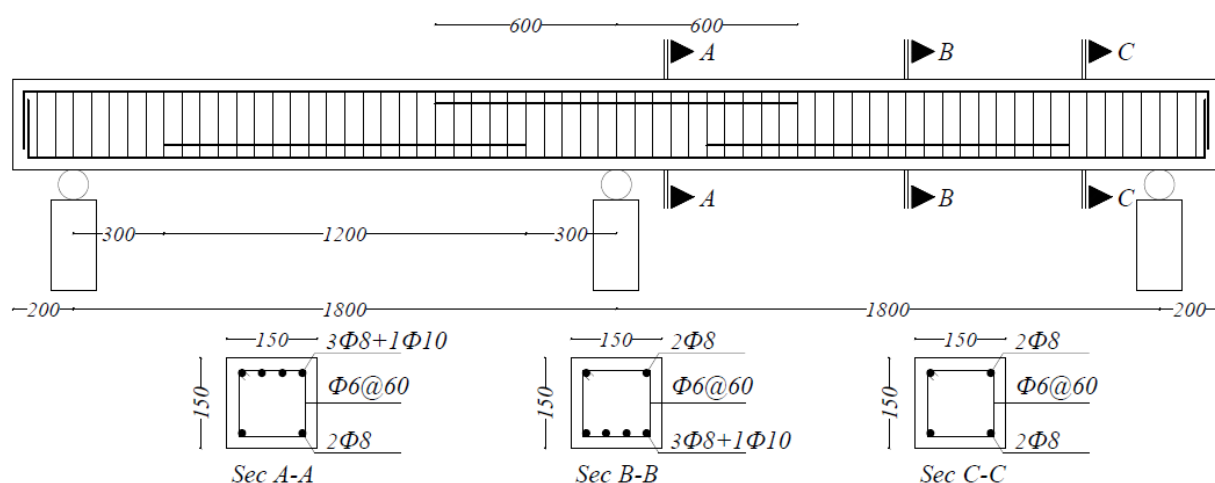
90.4	مقاومت فشاری MPa
5.33	تنش ترک خوردگی MPa
0.26	کرنش ترک خوردگی %
7.72	تنش پست کرکینگ MPa
0.98	کرنش پست کرکینگ %



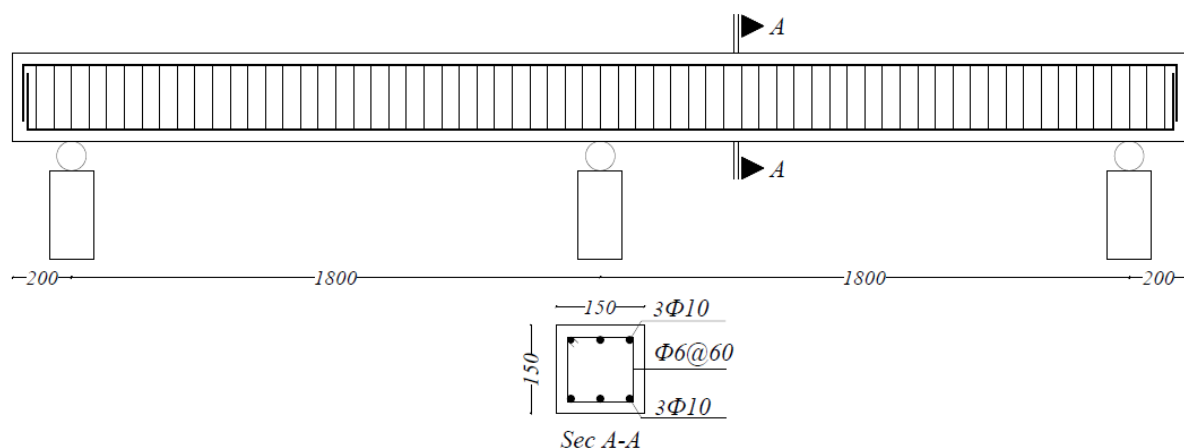
شکل ۴: منحنی تنش-کرنش نمونه کششی

۴- مشخصات تیرهای بتن آرمه

هشت تیر دو دهانه بتن آرمه با ابعاد یکسان در دو گروه چهارتایی ساخته و پس از مقاوم سازی با لمینیت کامپوزیتی، مطابق برنامه آزمایشگاهی بارگذاری و تست شدند. طول کلی تیرها ۴۰۰ سانتی متر، طول آزاد دهانه ها ۱۸۰ سانتی متر و ارتفاع و عرض تیرها ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته شد (شکل ۵). برای ساخت بتن تیرها از سنگدانه با حداکثر سایز ۶ میلی متر استفاده شد. برای تعیین مقاومت فشاری بتن از نمونه های مکعبی $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ استفاده شد. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها ۳۱ مگاپاسکال بدست آمد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، در گروه اول از $2\phi 8$ به عنوان آرماتور سراسری در پایین و بالای تیر استفاده شده است و از $1\phi 8 + 1\phi 10$ به عنوان آرماتور اضافی در نواحی کششی تیر استفاده شده است ($\rho = 1.13\%$, $\rho' = 0.49\%$)، اما در تیرهای گروه دوم، از $3\phi 10$ بعنوان آرماتور سراسری هم در بالا و هم در پایین تیر استفاده شده است ($\rho = \rho' = 1.16\%$). برای اطمینان از اینکه خرابی تیرهای تقویت شده، توسط تسلیم خمشی کنترل شود، مقاومت برشی تیرها به اندازه چهار برابر مقاومت برشی متناظر با ظرفیت خمشی محاسباتی تیر در نظر گرفته شد. به این منظور آرماتور $\phi 6$ در هر ۶ سانتی متر در سراسر تیر تامین شد. با انجام تست کشش، تنش تسلیم و تنش نهایی آرماتورهای طولی به ترتیب ۳۷۳ و ۵۶۵ مگاپاسکال و تنش تسلیم و تنش نهایی خاموت به ترتیب ۳۵۶ و ۵۴۳ مگاپاسکال بدست آمد.



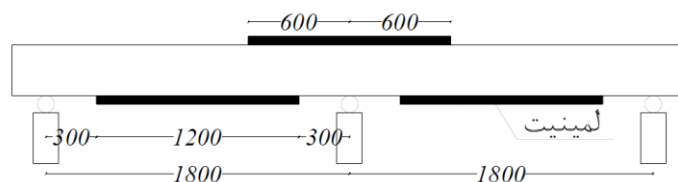
تیر مرجع یک



تیر مرجع دو

شکل ۵: جزئیات تیرهای مرجع

در هر گروه، یک تیر بدون مقاوم سازی بارگذاری و تست شد (نمونه مرجع). در سه تیر دیگر، نواحی کششی شامل زیر تیر در وسط دهانه ها و بالای تیر در محل تکیه گاه میانی با لمینیت تقویت شده و سپس بارگذاری شدند. در یکی از تیرها لمینیت ها با $1\phi 8$ و در یکی دیگر از تیرها لمینیت ها با $1\phi 10$ مسلح شدند و در یک تیر از لمینیت های مسلح نشده استفاده شد (شکل ۶). مشخصات تیرها در جدول ۷ ارائه شده است.



شکل ۶: جزئیات مقاوم سازی نمونه ها

جدول ۷: مشخصات نمونه ها

نام نمونه	مشخصات لمینیت مقاوم سازی	توضیحات
CB1	-	نمونه مرجع یک، بدون تقویت
CB1-L	لمینیت کامپوزیت الیافی بدون آرماتور	تقویت مرجع یک با لمینیت بدون آرماتور
CB1-L-b8	لمینیت کامپوزیت الیافی با آرماتور ۸	تقویت مرجع یک با لمینیت دارای آرماتور نمره ۸
CB1-L-b10	لمینیت کامپوزیت الیافی با آرماتور ۱۰	تقویت مرجع یک با لمینیت دارای آرماتور نمره ۱۰
CB2	-	نمونه مرجع دو، بدون تقویت
CB2-L	لمینیت کامپوزیت الیافی بدون آرماتور	تقویت مرجع دو با لمینیت بدون آرماتور
CB2-L-b8	لمینیت کامپوزیت الیافی با آرماتور ۸	تقویت مرجع دو با لمینیت دارای آرماتور نمره ۸
CB2-L-b10	لمینیت کامپوزیت الیافی با آرماتور ۱۰	تقویت مرجع دو با لمینیت دارای آرماتور نمره ۱۰

۵- آماده سازی لمینیت های کامپوزیتی و مقاوم سازی نمونه ها

لمینیت های کامپوزیتی با طول ۱۲۰ سانتی متر، عرض ۱۵ سانتی متر و ضخامت ۲۵ میلیمتر، ساخته و عمل آوری شدند. گروهی از لمینیت ها با $1\phi 8$ و گروهی دیگر با $1\phi 10$ مسلح شدند و گروهی از لمینیت ها نیز بدون آرماتور سراسری تهیه شدند. لمینیت ها پس از ۲۴ ساعت نگهداری در محیط آزمایشگاه، از قالب خارج شدند و به مدت ۲۷ روز در آب عمل آوری شدند (شکل ۷).



لمینیت آماده نصب

عمل آوری در آب

نگهداری در زیر کاور

قالب ریزی

شکل ۷: ساخت و عمل آوری لمینیت ها

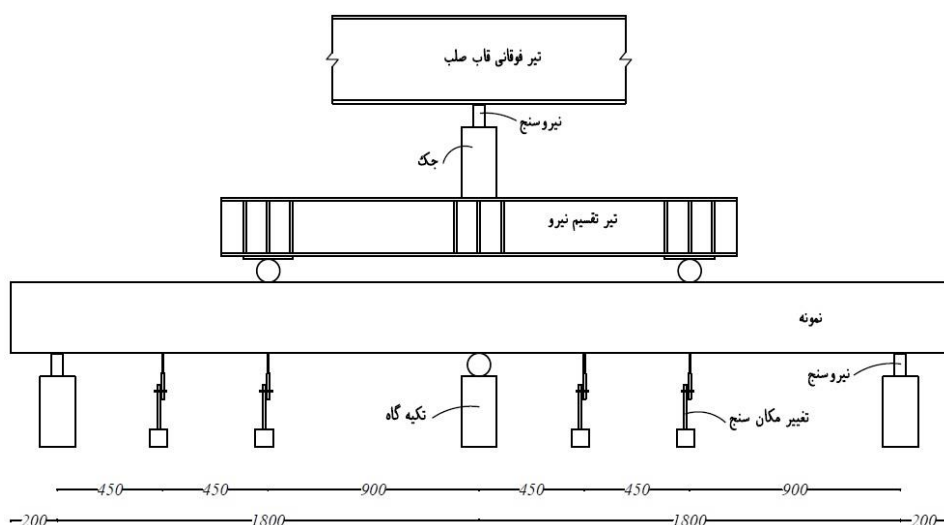
برای اتصال لمینیت‌ها به تیرها ابتدا در سطح تیرها شیارهایی با فاصله ۵۰ میلی‌متر و عمق ۳ میلی‌متر ایجاد شد، پس از تمیز کردن سطح تیر با استفاده از یک لایه ۳ میلی‌متری از چسب Sikadur 31 محصول شرکت Sika، لمینیت‌ها به سطح تیر متصل شدند و با گیره تحت فشار قرار گرفتند تا طی ۳ روز، عمل‌آوری چسب تکمیل گردد. مقاومت فشاری و برشی چسب به ترتیب ۴۸ و ۲۱ مگاپاسکال می‌باشد. به منظور جلوگیری از جداسازی لمینیت از تیر و حفظ مشخصات مکانیکی آنها در طی فرایند آزمایش، با استفاده از پیچ‌های پر مقاومت فولادی با قطر اسمی ۱۰ میلی‌متر در هر ۲۰ سانتی‌متر و چسب اپوکسی، لمینیت به تیر مهار شد [۲۳]. عمق نفوذ پیچ در تیر ۷ سانتی‌متر بود و در انتهای آن از واشر به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر و مهره استفاده شد. قطر سوراخ ۱۲ میلی‌متر بود و قبل از نصب پیچ‌ها، داخل سوراخ‌ها با فشار هوا تمیز و چسب اپوکسی به آن تزریق شد (شکل ۸). برای اطمینان از عدم جداسازی انتهای لمینیت از تیر، در انتهای لمینیت از دو پیچ استفاده شد.



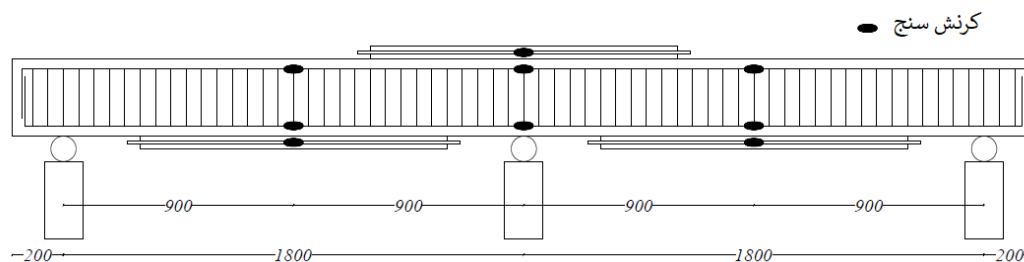
شکل ۸: نصب لمینیت‌ها روی تیرها

۶- چیدمان آزمایش

همه نمونه‌ها تحت بار متمرکز افزایشی در وسط هر دو دهانه تا مرحله گسیختگی آزمایش شدند. بار وارده توسط یک نیروسنج اندازه‌گیری شد (شکل ۹). واکنش تکیه‌گاه‌های کناری با استفاده از دو نیروسنج اندازه‌گیری شد تا از تقسیم مساوی بار به دو دهانه اطمینان حاصل شود. با استفاده از تغییر مکان سنج، جابجایی قائم وسط دهانه‌ها و جابجایی تیر در فاصله $1/4$ دهانه از تکیه‌گاه‌ها اندازه‌گیری شد. با استفاده از کرنش سنج، کرنش آرماتورهای کششی و فشاری در وسط دهانه تیرها و در محل تکیه‌گاه میانی اندازه‌گیری شد (شکل ۱۰).



شکل ۹: چیدمان آزمایش



شکل ۱۰: موقعیت کرنش سنج‌ها

۷- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

برای بررسی نتایج آزمایشگاهی، در ابتدا الگوی ترک خوردگی و مودهای گسیختگی نمونه‌ها مقایسه شد. سپس با ترسیم منحنی بار-جابجایی نمونه‌ها، ظرفیت باربری نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با نمونه‌های مرجع مقایسه شد. در ادامه سختی، شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی تیرها بررسی و مقایسه شد. خلاصه نتایج بارگذاری نمونه‌ها در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸: نتایج آزمایش‌ها

نمونه	ترک خوردگی تکیه‌گاه		ترک خوردگی وسط دهانه		بار نهایی (kN)	تغییر مکان نهایی (mm)	شکل‌پذیری δ_u/δ_y	استهلاک انرژی kN.mm	سختی الاستیک kN/mm	
	δ_{cr} (mm)	P_{cr} (kN)	δ_{cr} (mm)	P_{cr} (kN)					قبل از ترک	بعد از ترک
CB1	0.24	13.7	0.29	15.4	83.0	64.2	8.1	4958	57	13
CB1-L	0.26	30.4	0.32	34.1	111.9	55.3	6.2(77%)	5794(117%)	117	22
CB1-L-b8	0.27	31.4	0.32	35.2	121.7	58.5	6.5(80%)	6320(127%)	116	9
CB1-L-b10	0.29	32.2	0.36	36.4	128.3	51.2	6.6(81%)	6134(124%)	111	16
CB2	0.24	14.3	0.28	16.0	89.5	72.4	10.3	5982	60	14
CB2-L	0.26	31.6	0.31	35.6	119.5	62.9	7.8(76%)	6914(116%)	122	25
CB2-L-b8	0.28	32.7	0.34	36.9	134.3	65.9	8.3(81%)	8091(135%)	117	16
CB2-L-b10	0.26	33.6	0.30	37.6	142.7	58.6	8.6(83%)	7533(126%)	124	19

۷-۱- الگوی ترک خوردگی و مود شکست تیرها

با توجه به یکسان بودن ظرفیت مقطع وسط دهانه و تکیه‌گاه میانی در هر نمونه، ظرفیت خمشی ظرفیت خمشی در وسط دهانه با ظرفیت خمشی تکیه‌گاه میانی برابر است. از آنجایی که با توجه به الگوی بارگذاری، گشتاور منفی در تکیه‌گاه میانی ۱/۲ برابر گشتاور مثبت در وسط دهانه است، در کلیه نمونه‌ها اولین ترک‌ها در مقطع فوقانی تکیه‌گاه میانی رخ داده و در ادامه در مقطع تحتانی تیرها در وسط دهانه ترک رخ داد. ترک‌ها بصورت قائم و از نوع ترک خمشی بوده و با افزایش میزان بار، ترک‌های عمودی و مورب خمشی افزایش یافته و طول ناحیه ترک‌خورده، هم در تکیه‌گاه میانی و هم در وسط دهانه افزایش یافت. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب الگوی ترک خوردگی تیر مرجع CB2، تیر تقویت شده با لمینیت فاقد آرماتور CB2-L و تیر تقویت شده با لمینیت دارای آرماتور CB2-L-b10 نشان داده شده است.



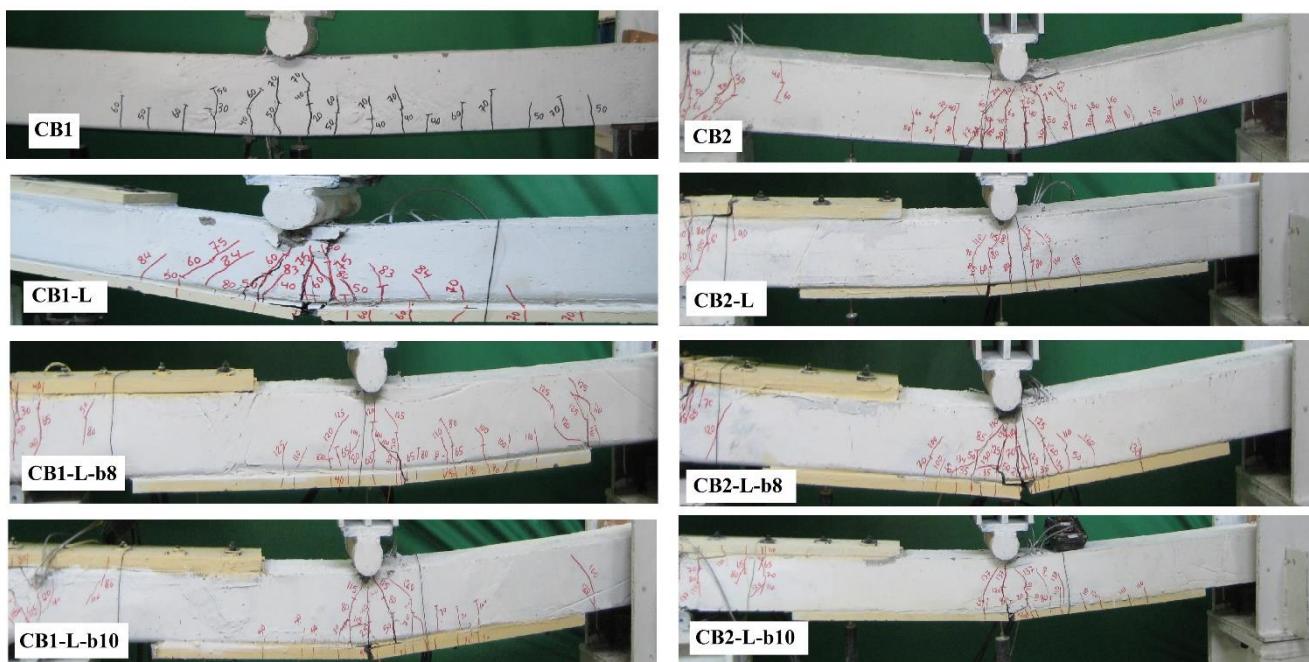
در بارگذاری نهایی CB2 شکل ۱۱: تیر



در بارگذاری نهایی CB2-L شکل ۱۲: تیر



در بارگذاری نهایی CB2-L-b10 شکل ۱۳: تیر



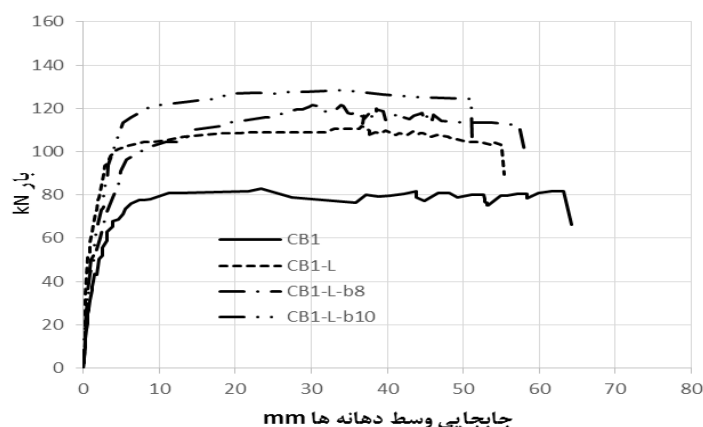
شکل ۱۴: ناحیه ترک خورده در وسط دهانه در بار پیک

انهدام تیرهای مرجع با گسترش ترک در ناحیه کششی و در نهایت خرد شدن بتن در ناحیه فشاری رخ داد. اما در نمونه‌های مقاوم شده با لمینیت فاقد آرماتور، وجود لمینیت کامپوزیتی باعث تمرکز ترک و کاهش ناحیه ترک خورده شد که با افزایش بار موجب دو تکه شدن لمینیت‌ها و کاهش ناگهانی مقاومت مقطع شد. این پدیده باعث شد که از ظرفیت بتن و آرماتور فشاری بطور کامل استفاده نشود. نکته قابل توجه اینکه استفاده از بولت در اتصال لمینیت به نمونه باعث جلوگیری از دی‌باندینگ و دی‌لمینیشن در ناحیه اتصال لمینیت با

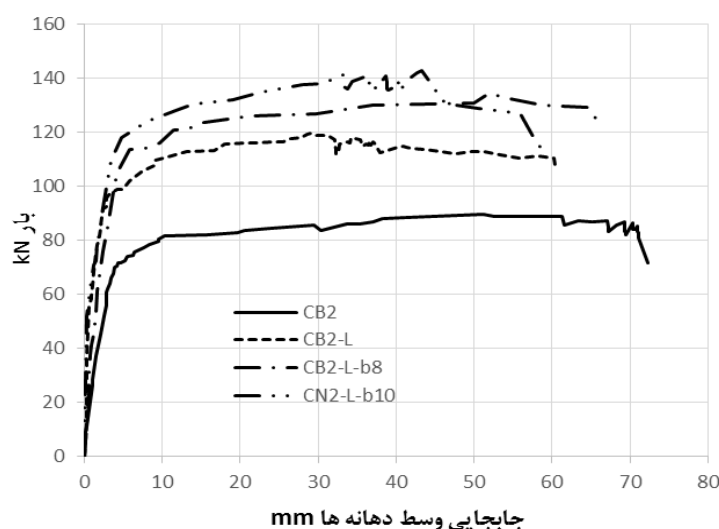
نمونه شد. آزمایشات اولیه و نیز مطالعات محققین دیگر نیز مؤید افزایش ظرفیت باربری در اثر استفاده از پیچ در اتصال لمینیت به تیر به دلیل اجتناب از این دو مود خرابی است [۸]. از سوی دیگر استفاده از آرماتور در لمینیت باعث شد که در نمونه‌های مقاوم شده با این نوع لمینیت، تمرکز ترک و دو تکه شدن لمینیت رخ نداده و مشابه نمونه‌های مرجع با گسترش ترک در ناحیه کششی و خرد شدن بتن فشاری منهدم شوند. طول ناحیه ترک خورده در این تیرها، بیشتر از تیرهای مقاوم شده با لمینیت فاقد آرماتور و تقریباً برابر با تیرهای مرجع بود. همانطور که در شکل ۱۴ به وضوح مشاهده می‌شود، طول ناحیه ترک خورده در وسط دهانه در نمونه‌های مقاوم شده با لمینیت فاقد آرماتور (CB2-L و CB1-L) در مقایسه با تیرهای مرجع به شدت کاهش یافته ولی در نمونه‌های مقاوم شده با لمینیت دارای آرماتور، این طول مجدداً افزایش یافته است.

۲-۷- منحنی بار-تغییر مکان

در ادامه برای بررسی کمی نتایج آزمایشگاهی، با ترسیم منحنی بار-جابجایی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶، رفتار نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با رفتار تیرهای مرجع مقایسه شد.



شکل ۱۵: منحنی بار-جابجایی وسط دهانه نمونه‌های گروه یک



شکل ۱۶: منحنی بار-جابجایی وسط دهانه نمونه‌های گروه دو

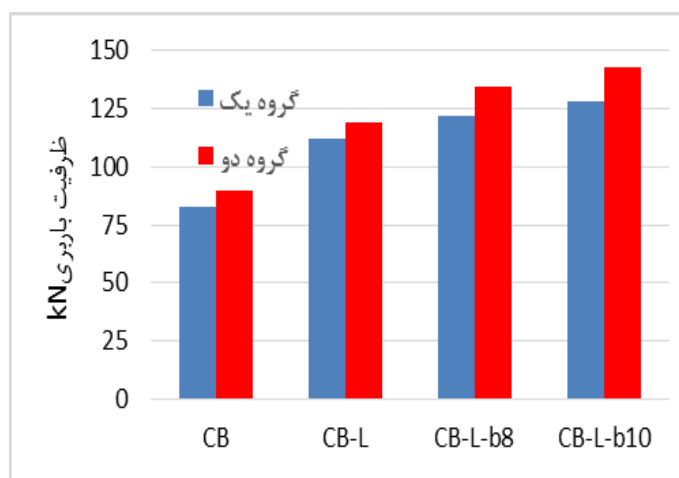
مطابق جدول ۸ و شکل‌های ۱۵ و ۱۶، با توجه به اینکه تنها تفاوت دو نمونه مرجع در میزان آرماتور فشاری آنها می‌باشد، منحنی بار-جابجایی نمونه‌های مرجع تا قبل از تسلیم آرماتور کششی در تکیه‌گاه‌میان تقریباً یکسان است. بگونه‌ای که بار تسلیم آرماتور کششی در

تکیه‌گاه میانی در نمونه CB2 تنها دو درصد از نمونه CB1 بیشتر است (آرماتورهای کششی در تکیه‌گاه میانی مرجع یک در بار 69kN و در مرجع دو در بار 71kN تسلیم شدند). اما با افزایش بارگذاری، بدلیل وجود آرماتور فشاری بیشتر در نمونه CB2، ظرفیت دورانی این نمونه بیشتر شده و بار نهایی آن ۷ درصد و تغییرشکل نهایی آن ۱۳ درصد بیشتر از نمونه CB1 شده است.

با مقایسه نمونه تقویت شده CB1-L با نمونه مرجع CB1، ملاحظه می‌شود که با توجه به مقاومت کششی بالای بتن موجود در لمینیت، ظرفیت ترک‌خوردگی تیر ۲۲۰ درصد افزایش یافته است. حال آنکه بار متناظر با تسلیم آرماتور کششی در تکیه‌گاه میانی (95.4kN)، ۳۷ درصد و بار نهایی ۳۵ درصد افزایش یافت. از سوی دیگر به دلیل شکسته شدن ناگهانی لمینیت و تبدیل تیر تقویت شده به تیر تقویت نشده، تغییرشکل نهایی ۱۴ درصد کاهش یافت. در تیر CB2-L نیز نتایج مشابهی حاصل شد. بار متناظر تسلیم آرماتور کششی در تکیه‌گاه میانی (95.5kN)، ۳۸ درصد و بار نهایی ۳۴ درصد افزایش یافت، ولی تغییر شکل نهایی ۱۳ درصد کاهش یافت. در این نمونه‌ها وجود لمینیت HPRCC باعث تمرکز ترک‌ها شد که با افزایش بار موجب دو تکه شدن لمینیت‌ها شد. این مساله باعث شد که از ظرفیت بتن و آرماتور فشاری بطور کامل استفاده نشود. به همین دلیل میزان رشد مقاومت نهایی هر دو نمونه CB1-L و CB2-L نسبت به نمونه‌های مرجع یکسان بدست آمد.

در ادامه به منظور بررسی امکان کاشت میلگرد در لمینیت پیش‌ساخته و تعیین میزان مشارکت آرماتور در رفتار لمینیت و تاثیر آن بر بار نهایی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، نمونه‌های CB1-L-b8 و CB1-L-b10 که در آنها تیر مرجع یک (CB1) با لمینیت‌های مسلح شده به ترتیب با آرماتور نمره ۸ و ۱۰ مقاوم‌سازی شده‌اند و نمونه‌های CB2-L-b8 و CB2-L-b10 که در آنها تیر مرجع دو (CB2) با لمینیت‌های مسلح شده به ترتیب با آرماتور نمره ۸ و ۱۰ مقاوم‌سازی شده‌اند، آزمایش شدند. نتایج این سری آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش آرماتور طولی به لمینیت در این نمونه‌ها، ظرفیت باربری افزایش بیشتری یافت. اضافه نمودن آرماتور نمره ۸ به لمینیت ظرفیت باربری نمونه CB1-L-b8 را نسبت به نمونه مقاوم‌سازی شده با لمینیت فاقد آرماتور، ۹ درصد و نسبت به نمونه مرجع ۴۷ درصد افزایش داد. همچنین اضافه نمودن آرماتور نمره ۱۰ به لمینیت ظرفیت باربری نمونه CB1-L-b10 را نسبت به نمونه مقاوم‌سازی شده با لمینیت فاقد آرماتور، ۱۶ درصد و نسبت به نمونه مرجع، ۵۵ درصد افزایش داد. در نمونه‌های گروه دو نیز به همین ترتیب، افزودن آرماتور نمره ۸ به لمینیت، ظرفیت باربری نمونه CB2-L-b8 را نسبت به نمونه مقاوم‌سازی شده با لمینیت فاقد آرماتور، ۱۹ درصد و نسبت به نمونه مرجع ۵۹ درصد افزایش داد.

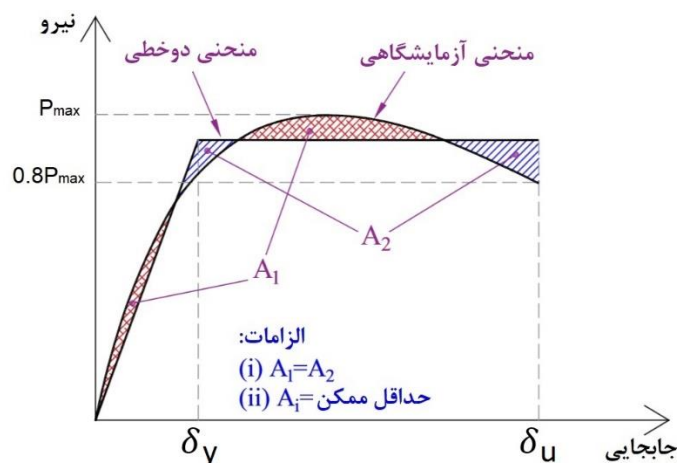
افزایش قابل توجه در ظرفیت باربری، نشان دهنده مناسب بودن لمینیت HPRCC برای کاشت میلگرد در آن و استفاده توأمان از ظرفیت کششی آرماتور و لمینیت است. وجود آرماتور در لمینیت در این گروه از آزمایشات، باعث جلوگیری از متمرکز شدن ترک‌ها و اجتناب از دو تکه شدن لمینیت‌ها می‌شود. با توجه به استفاده کامل از ظرفیت فشاری بتن و آرماتور فشاری، نمونه‌های گروه دو که در آنها آرماتور فشاری بیشتری وجود دارد، رشد بیشتری از خود نشان دادند. در شکل ۱۷ بار نهایی نمونه‌ها مقایسه شده است.



شکل ۱۷: مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌ها

۷-۳- نسبت شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی

از سازه‌های بتن‌آرمه انتظار می‌رود که پیش از انهدام، تغییرشکل‌های بزرگ پلاستیک را تحمل کنند. برای مقایسه ظرفیت تحمل تغییرشکل نمونه‌ها، نسبت شکل‌پذیری آنها (δ_u/δ_y) مقایسه شد. δ_y تغییر مکان متناظر با نقطه تسلیم آرماتور و δ_u تغییر مکان نهایی است. نقطه نهایی نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در آن نقطه، نسبت بار به بار پیک، ۲۰ درصد کاهش داشته باشد. برای تعیین شکل‌پذیری از روش پارک و پاولی برای ایده‌آل کردن منحنی بار-تغییر مکان و تعیین δ_y استفاده شد [۴۵]. در این روش δ_y مطابق شکل ۱۸ تعیین می‌شود. مقادیر شکل‌پذیری در جدول ۸ مشخص شده است.



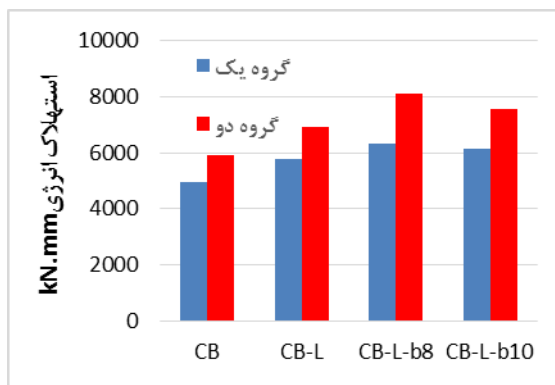
شکل ۱۸: روش دو خطی برای تعیین جابجایی متناظر با تسلیم [۴۵]

همانطور که انتظار می‌رود، نمونه‌های مرجع رفتار شکل‌پذیری از خود نشان دادند. نسبت شکل‌پذیری نمونه مرجع یک برابر با ۸/۱ و نسبت شکل‌پذیری نمونه مرجع دو برابر با ۱۰/۳ بدست آمد. شکل‌پذیری تیر مرجع دو، ۲۷ درصد بیشتر از مرجع یک است که به دلیل بیشتر بودن نسبت فولاد فشاری به فولاد کششی در آن، نسبت به نمونه مرجع یک است. بالا بودن ضرایب شکل‌پذیری تیرها نیز به دلیل دو دهانه بودن تیرها و وجود یک درجه نامعینی در نمونه‌ها است. محققین دیگر نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. این نسبت در مطالعه مقصودی و اکبرزاده برابر با ۱۰/۳۲ [۴۶، ۴۷] و در مطالعه Xu بر روی تیرهای دو دهانه T شکل برابر با ۹ بدست آمد [۴۸]. در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با لمینیت فاقد آرماتور، تمرکز ترک در لمینیت و دو تکه شدن آن بر رفتار عمومی سازه مقاوم شده، از جمله شکل‌پذیری تاثیر می‌گذارد. گسیخته شدن لمینیت، باعث حذف لمینیت از مقاومت در برابر نیرو و انهدام آن در تغییرشکل کوچک‌تر شد که منجر به کاهش بیش از ۲۳ درصدی شکل‌پذیری در هر دو گروه تیرها شد. Tanarslan در تحقیق مشابه روی تیرهای یک دهانه کاهش ۲۷ درصدی را برای شکل‌پذیری گزارش کرد [۸]. اما کاشت میلگرد در لمینیت‌ها باعث جلوگیری از تمرکز ترک در لمینیت شد که منجر به افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی شکل‌پذیری نسبت به نمونه مقاوم‌سازی شده با لمینیت فاقد آرماتور شد.

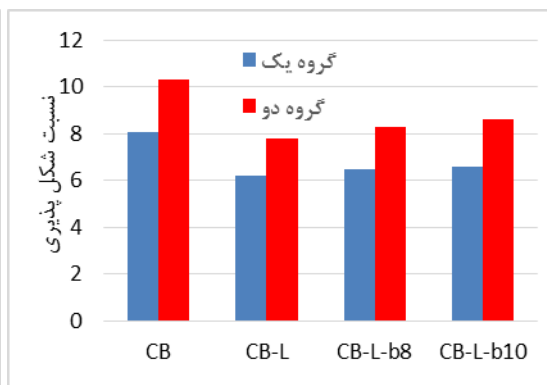
نکته حائز اهمیت این است که شکل‌پذیری نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، نسبت به مرجع کاهش زیادی از خود نشان نداد که در مقایسه با مقاوم‌سازی با CFRP یکی از برتری‌های این تکنیک به شمار می‌رود. آزمایشهای محققین نشان داده است که شکل‌پذیری نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP تا یک سوم نمونه‌های مرجع کاهش می‌یابد [۴۶، ۴۷].

برای بررسی توانایی سازه‌ها در تحمل تغییرشکل‌های بزرگ ناشی از زمین‌لرزه، علاوه بر ضریب شکل‌پذیری، ظرفیت استهلاک انرژی نمونه‌ها نیز باید بررسی شود. به این منظور سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان به عنوان ظرفیت استهلاک انرژی محاسبه و مقایسه شد که نتایج آن در جدول ۸ ثبت شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در هر دو نمونه مقاوم‌سازی شده با لمینیت فاقد آرماتور علیرغم کاهش شکل‌پذیری، ۲۰ درصد افزایش استهلاک انرژی ملاحظه می‌شود. همچنین در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با لمینیت دارای آرماتور ۲۳ تا ۳۴ درصد افزایش استهلاک انرژی نسبت به نمونه‌های مرجع، مشاهده می‌شود. مقایسه نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با آرماتور نمره ۱۰

نسبت به آرماتور نمره ۸ ملاحظه می‌شود که میزان استهلاک انرژی در حدود ۴ تا ۶ درصد کاهش یافته که این کاهش ناچیز، ناشی از کاهش تغییر شکل نهایی این نمونه‌ها می‌باشد. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹، به ترتیب نسبت شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی نمونه‌ها مقایسه شده است.



شکل ۲۰: مقایسه ظرفیت استهلاک انرژی نمونه‌ها



شکل ۱۹: مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌ها

۴-۷- سختی الاستیک

یکی دیگر از پارامترهای مهم در مقاوم‌سازی تیرها، کنترل تغییر شکل در محدوده سرویس است. به این منظور بررسی سختی اولیه (سختی تیرها پیش از ترک خوردگی) و سختی تیرها در مقطع ترک خورده (قبل از تسلیم آرماتور کششی) مفید می‌باشد. سختی اولیه نمونه‌ها برابر با شیب خطی است که مبدا مختصات را به نقطه متناظر با اولین ترک خوردگی در منحنی بار-تغییر مکان متصل می‌کند. علاوه بر تاخیر در ترک خوردگی نمونه‌ها در اثر افزودن لمینیت کامپوزیتی، سختی اولیه تیرها نیز بین ۹۵ تا ۱۰۵ درصد افزایش می‌یابد (جدول ۸) که ناشی از تاخیر در گسترش ترک خمشی است. این مساله باعث کاهش تغییر شکل تیر در مرحله سرویس می‌شود. در نمونه دارای لمینیت بدون آرماتور، متمرکز شدن ترک، سختی را افزایش داده است. مشاهدات محققین دیگر این مساله را تایید می‌کند [۷].

سختی ترک خورده تیر نیز معادل با شیب خط بین نقاط متناظر با ترک خوردگی و تسلیم آرماتور در تکیه‌گاه میانی در منحنی بار-تغییر مکان در نظر گرفته شد. هنگامی که تیر بتن‌آرمه ترک بخورد، سختی مقطع بطور ناگهانی کاهش می‌یابد و سختی باقی مانده تابع آرماتور کششی موجود است. معمولاً فرض می‌شود که ناحیه ترک خورده تحمل تنش کششی ندارد، لذا اگر لمینیت باعث جلوگیری از گسترش ترک شود، در مرحله ترک خورده، سختی بیشتری تامین می‌شود. به همین دلیل سختی تیرهای مقاوم سازی شده با لمینیت بدون آرماتور از سختی تیرهای مقاوم سازی شده با لمینیت دارای آرماتور بیشتر است چرا که آرماتور باعث گسترش ترک می‌شود. بنابراین در حالیکه در نمونه‌های دارای آرماتور، سختی نسبت به تیر مرجع ۶۹ تا ۷۹ درصد افزایش یافته است اما سختی این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های فاقد آرماتور کمتر است.

۵-۷- بررسی تاثیر فولاد فشاری بر رفتار خمشی نمونه‌ها

یکی از عوامل موثر بر قابلیت باز توزیع گشتاور در تیرهای سراسری، نسبت آرماتور فشاری موجود در تیر است [۴۹، ۵۰]. در نمونه‌های مورد بررسی، فولاد کششی در نمونه‌های گروه یک ($\rho = 1.13\%$) و گروه دو ($\rho = 1.16\%$) تقریباً برابر است. در حالی که مقدار فولاد فشاری در آنها متفاوت است. (در نمونه‌های گروه یک $\rho - \rho' = 0.64\%$ و در نمونه‌های گروه دو $\rho - \rho' = 0$) نمونه‌های هر دو گروه در گروه تیرهای کم فولاد طبقه‌بندی می‌شوند. ($\rho_p = 4.4\%$) و مقدار آرماتور فشاری در ظرفیت باربری آنها تاثیر چندانی ندارد. میانگین نسبت افزایش بار متناظر با تسلیم آرماتور کششی در تکیه‌گاه میانی و ظرفیت نهایی در نمونه‌های گروه دو نسبت به نمونه مشابه در گروه یک، به ترتیب ۴ و ۹ درصد بیشتر است که ناچیز می‌باشد. اما میانگین نسبت تغییر شکل‌های نهایی، ظرفیت جذب انرژی و نسبت

شکل پذیری نمونه‌های گروه دو نسبت به نمونه متناظر در گروه یک به ترتیب ۱۲، ۲۲ و ۳۴ درصد بیشتر است، که نشان دهنده تاثیر قابل توجه فولاد فشاری بر رفتار پلاستیک تیرهای دو دهانه است.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی پیرامون استفاده از لمینیت‌های پیش‌ساخته از بتن الیافی توانمند برای مقاوم‌سازی خمشی تیرهای بتن‌آرمه دو دهانه ارائه شد. به منظور بررسی تاثیر مسلح کردن لمینیت با آرماتور طولی بر رفتار تیرهای مقاوم‌سازی شده، گروهی از لمینیت‌ها با آرماتور طولی مسلح شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که:

- مقاوم‌سازی ناحیه کششی تیرهای سراسری با استفاده از لمینیت کامپوزیتی، باعث افزایش ظرفیت باربری تیرهای سراسری می‌شود. استفاده از آرماتور طولی مدفون در لمینیت الیافی، باعث افزایش تاثیر مقاوم‌سازی در ظرفیت باربری تیرهای سراسری می‌شود. در مطالعه حاضر، ظرفیت باربری تیرهای دو دهانه تا ۶۰ درصد افزایش یافت.
- استفاده از لمینیت کامپوزیتی در ناحیه کششی تیرهای سراسری، تسلیم آرماتور کششی را به تاخیر می‌اندازد. در این مطالعه، بار تسلیم آرماتور کششی در تکیه‌گاه میانی تا ۷۰ درصد افزایش یافت.
- در صورت استفاده از لمینیت الیافی فاقد آرماتور طولی برای مقاوم‌سازی تیرهای سراسری، تمرکز ترک در لمینیت باعث انهدام ناگهانی نمونه و کاهش ظرفیت تحمل تغییر شکل و کاهش شکل پذیری تیرهای سراسری می‌شود
- از سوی دیگر، افزودن آرماتور طولی به لمینیت مانع تمرکز ترک شده و با گسترش ناحیه ترک‌خورده، باعث افزایش شکل پذیری در نمونه‌های مقاوم شده می‌شود.
- افزایش سختی تیرها قبل از ترک خوردگی و نیز افزایش سختی قبل از تسلیم آرماتور کششی در اثر مقاوم‌سازی تیرهای سراسری با لمینیت الیافی، باعث کنترل تغییر شکل‌های سرویس می‌شود.
- علیرغم کاهش شکل پذیری در تیرهای سراسری مقاوم‌سازی شده با لمینیت الیافی، قابلیت جذب انرژی در این نمونه‌ها افزایش می‌یابد. افزودن آرماتور به لمینیت، قابلیت جذب انرژی را افزایش بیشتری می‌دهد.
- کاشت آرماتور در لمینیت، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی را در نمونه مقاوم‌سازی شده، نسبت به نمونه‌های مقاوم سازی شده با لمینیت فاقد آرماتور افزایش میدهد.
- مقایسه نتایج نشان می‌دهد که هرچه میزان آرماتور فشاری تیر دو دهانه بیشتر باشد، مقاوم‌سازی خمشی تاثیر بیشتری بر رفتار پلاستیک تیر مقاوم‌سازی شده می‌دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت فروسیلیس ایران سپاس‌گذاری نمایند.

مراجع

- [۱] Qin, Z. and Tian, Y. and Li, G. and Liu, L. (2019). Study on bending behaviors of severely pre-cracked RC beams strengthened by BFRP sheets and steel plates. *Construction and Building Materials*, 219, 131-143.
- [۲] Li, L. Z. and Wu, Z. L. and Yu, J. T. and Wang, X. and Zhang, J. X. and Lu, Z. D. (2018). Numerical simulation of the shear capacity of bolted side-plated RC beams. *Engineering Structures*, 171, 373-384.

- [۳] Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M. K. and Ashary, A. (2017). Experimental Evaluation of RC Damaged Frames Rehabilitated at Critical Zones with CFRP Composite layers. *Journal of Structural and Construction Engineering* - ,
- [۴] Mazloom, M. and Mehrvnd, M. and Savari Pour, A. (2018). Strengthening of Concrete Beams Using Glass Fiber Reinforced Polymers. *Journal of Structural and Construction Engineering* - ,
- [۵] Zhang, X. and Luo, Y. and Wang, L. and Zhang, J. and Wu, W. and Yang, C. (2018). Flexural strengthening of damaged RC T-beams using self-compacting concrete jacketing under different sustaining load. *Construction and Building Materials*, 172, 185-195.
- [۶] Alhadid, M. M. A. and Youssef, M. A. (2018). Assessment of the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with concrete jackets. *Engineering Structures*, 167.۱۲۰-۱۰۸ ,
- [۷] Alaei, F. J. and Karihaloo, B. L. (2003). Retrofitting of reinforced concrete beams with CARDIFRC. *Journal of Composites for Construction*, 7(3), 174-186.
- [۸] Tanarlan, H. M. (2017). Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates. *Engineering Structures*, 151, 337-348.
- [۹] Naaman, A. and Reinhardt, H. (2006). Proposed classification of HPRC composites based on their tensile response. *Materials and structures*, 39(5), 547-555.
- [۱۰] Eldin, H. K. S. and Mohamed, H. A. and Khater, M. and Ahmed, S. (2014). Mechanical Properties of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Engineering and Innovative Technology* 4(4), 4-10.
- [۱۱] Yoo, D.-Y. and Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 73, 267-280.
- [۱۲] Wille, K. and Naaman, A. (2010). Fracture energy of UHPFRC under direct tensile loading. In: *FraMCoS-7 International Conference*. Seoul: Korea Concrete institute, 65-72.
- [۱۳] Wille, K. and Naaman, A. E. and Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI Materials Journal* ۵۴-۴۶ (۱)۱۰۸ ,
- [۱۴] Pyo, S. and El-Tawil, S. and Naaman, A. E. (2016). Direct tensile behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) at high strain rates. *Cement and Concrete Research*, 88, 144-156.
- [۱۵] Jiang, G. and Rong, Z. and Sun, W. (2015). Effects of metakaolin on mechanical properties, pore structure and hydration heat of mortars at 0.17 w/b ratio. *Construction and Building Materials*, 93, 564-572.
- [۱۶] Alvarez, G. L. and Nazari, A. and Bagheri, A. and Sanjayan, J. G. and De Lange, C. (2017). Microstructure, electrical and mechanical properties of steel fibres reinforced cement mortars with partial metakaolin and limestone addition. *Construction and Building Materials*, 135, 8-20.
- [۱۷] Martinola, G. and Meda, A. and Plizzari, G. A. and Rinaldi, Z. (2010). Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 731-739.
- [۱۸] Ruano, G. and Isla, F. and Pedraza, R. I. and Sfer, D. and Luccioni, B. (2014). Shear retrofitting of reinforced concrete beams with steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 54, 646-658.
- [۱۹] Holschemacher, K. and Iqbal, S. and Ali, A. and Bier, T. A. (2017). Strengthening of RC Beams Using Lightweight Self-compacting Cementitious Composite. *Procedia Engineering*, 172, 369-376.

- [۲۰] Aldahdooh, M. A. A. and Muhamad Bunnori, N. and Megat Johari, M. A. and Jamrah, A. and Alnuaimi, A. (2016). Retrofitting of damaged reinforced concrete beams with a new green cementitious composites material. *Composite Structures*, 142, 27-34.
- [۲۱] Shafiq, N. and Ayub, T. and Khan, S. U. (2016). Investigating the performance of PVA and basalt fibre reinforced beams subjected to flexural action. *Composite Structures*, 153, 30-41.
- [۲۲] Safdar, M. and Matsumoto, T. and Kakuma, K. (2016). Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Composite Structures*, 157, 448-460.
- [۲۳] Tanarlan, H. M. and Alver, N. and Jahangiri, R. and Yalçınkaya, Ç. and Yazıcı, H. (2017). Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition. *Construction and Building Materials*, 155, 45-55.
- [۲۴] Khalil, A. E.-H. and Etman, E. and Atta, A. and Essam, M. (2017). Behavior of RC beams strengthened with strain hardening cementitious composites (SHCC) subjected to monotonic and repeated loads. *Engineering Structures*, 140, 151-163.
- [۲۵] Farhat, F. and Nicolaides, D. and Kanellopoulos, A. and Karihaloo, B. L. (2007). High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC)–Performance and application to retrofitting. *Engineering fracture mechanics*, 74(1), 151-167.
- [۲۶] Maringoni, S. and Meda, A. and Mostosi, S. and Riva, P. (2012). Strengthening of RC members by means of high performance concrete. *Special Publication*, 289, 1-13.
- [۲۷] Naaman, A. and Paramasivam, P. and Balazs, J. and Eibl, J. and Erdelyi, L. and Hassoun, N. and Krstulovic-Opara, N. and Li, V. C. and Lohrman, G. (19۹۶). Reinforced and prestressed concrete using HPRFRC matrices .
- [۲۸] Akbarzadeh, H. and Maghsoudi, A. A. (2010). Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer. *Materials & Design*, 31(3), 1130-1147.
- [۲۹] Bengar, H. A. and Maghsoudi, A. (2010). Experimental investigations and verification of debonding strain of RHSC continuous beams strengthened in flexure with externally bonded FRPs. *Materials and structures*, 43(6۸۳۷-۸۱۵) ,(
- [۳۰] Rahman, M. M. and Rahman, M. W. (2013). Simplified method of strengthening RC continuous T beam in the hogging zone using carbon fiber reinforced polymer laminate A numerical investigation. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 4(6), 174-183.
- [۳۱] Samaaneh, M. A. and Sharif, A. M. and Baluch, M. H. and Azad, A. K. (2016). Numerical investigation of continuous composite girders strengthened with CFRP. *Steel Composite Struct*, 21, 1307-1325.
- [۳۲] Hamed, A. A. A. and El-Kashif, K. F. O. and Salem, H. M. (2019). Flexural strengthening of preloaded reinforced concrete continuous beams: An experimental investigation. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 207-216.
- [۳۳] Mostofinejad, D. and Farahbod, F. (2005). Parametric Study on Moment Redistribution in Continuous Beams in Concrete Bridges and a Comparison Between Iranian Concrete Code and ACI 318-02. *Journal of Transportation Research*, 2(2), 109-118.
- [۳۴] Farahbod, F. (2010). Finite Element Analysis For Estimating The Moment Capacity And Moment Redistribution of Continuous RC Frames Strengthened with CFRP Sheets. *Concrete Research*, 3(1), 33-41.

- [۳۵]ehsani, r. and Sharbatdar, M. K. and Kheyroddin, A. Experimental Investigation on Flexural Behaviour and Ductility of Two-Span RC Beams Cast with High Performance Composites HPRCC. Journal, [online] available at: www.jsce.ir/article_79878.html [date accessed].
- [۳۶]Atiş, C. and Özcan, F. and Kılıç, A. and Karahan, O. and Bilim, C. and Severcan, M. (2005). Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. *Building and environment*, 40(12), 1678-1683.
- [۳۷]Banthia, N. and Yan, C. (1996). Bond-slip characteristics of steel fibers in high reactivity metakaolin (HRM) modified cement-based matrices. *Cement and Concrete Research*, 26(5), 657-662.
- [۳۸]Wang, J.-Y. and Banthia, N. and Zhang, M.-H. (2012). Effect of shrinkage reducing admixture on flexural behaviors of fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 443-450.
- [۳۹]Soulioti, D. V. and Barkoula, N. M. and Koutsianopoulos, F. and Charalambakis, N. and Matikas, T. E. (2013). The effect of fibre chemical treatment on the steel fibre/cementitious matrix interface. *Construction and Building Materials*, 40, 77-83.
- [۴۰]Müller, U. and Meng, B. and Kühne, H.-C. and Nemecek, J. and Fontana, P. and Fehling, E., editors. *Micro texture and mechanical properties of heat treated and autoclaved Ultra High Performance Concrete (UHPC)*. 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete; 2008.
- [۴۱]Zingg, A. and Winnefeld, F. and Holzer, L. and Pakusch, J. and Becker, S. and Figi, R. and Gauckler, L. (2009). Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C3A amounts. *Cement and Concrete Composites*, 31(3), 153-162.
- [۴۲]Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite structures*, 86(1), 3-9.
- [۴۳]Wille, K. and El-Tawil, S. and Naaman, A. (2014). Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*, 48, 53-66.
- [۴۴]BSI. (2014). BS 8500-2: Concrete-complementary British standard to BS EN 206-1. 2nd ed. London: British standards institution.
- [۴۵]Paulay, T. and Priestley, M. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings* .
- [۴۶]Maghsoudi, A. and Bengar, H. A. (2009). Moment redistribution and ductility of RHSC continuous beams strengthened with CFRP. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 33(1), 45-59.
- [۴۷]Maghsoudi, A. and Bengar, H. A. (2011). Acceptable lower bound of the ductility index and serviceability state of RC continuous beams strengthened with CFRP sheets. *Scientia Iranica*, 18(1), 36-44.
- [۴۸]Xu, Q. and Chen, L. and Han, C. and Harries, K. A. and Xu, Z. (2019). Experimental research on fire-damaged RC continuous T-beams subsequently strengthened with CFRP sheets. *Engineering Structures*, 183, 135-149.
- [۴۹]Kheyroddin, A. and Naderpour, H. (2007). Plastic hinge rotation capacity of reinforced concrete beams. *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, 5(1), 30-47.
- [۵۰]Sharifi, Y. and Maghsoudi, A. (2013). Ductility Performance of Heavily Steel Reinforced Concrete Flexural Members with High Strength Concrete. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 44(2), 37-46.