

# مطالعات آزمایشگاهی اثر ورق‌های CFRP بر مقاومت

## برشی تیرهای عمیق دوسر گیردار

ابوالفضل عربزاده<sup>۱\*</sup>، هاشم‌مهان‌پور<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

arabzade@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۴/۱۶

**چکیده** - تحقیقات انجام شده درباره‌ی ترمیم و تقویت تیرهای بتنی عمیق [به‌عنوان اعضای سازه‌ای] بسیار اندک است. در این مقاله به ارزیابی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح در دو حالت ترمیم و تقویت‌شده با الیاف پلیمری مرکب پرداخته شده است. برای رسیدن به اهداف پژوهش ۶ نمونه تیر عمیق بتنی در سه گروه دوتایی با آرمان‌رگرذاری و بتن یکسان و نسبت دهانه برشی به عمق ۲، ساخته شده است. در هر گروه یک نمونه به‌عنوان شاهد (بدون تقویت) در نظر گرفته شده که پس از بارگذاری و شکست کامل، به وسیله‌ی الیاف پلیمری مرکب کربن (CFRP)<sup>۱</sup> ترمیم یافته و تحت بارگذاری مجدد قرار گرفته است. نمونه دوم از هر گروه، از ابتدا مطابق با الگوی تیر ترمیم یافته، تقویت و سپس بارگذاری شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از افزایش بار در تیرهای ترمیم‌یافته و تقویت‌شده است. به‌طور کلی ورق‌های CFRP تک‌جهته به‌صورت نواری<sup>۲</sup> و روی وجوه کناری<sup>۳</sup> با زاویه ۴۵° (SS45) [به دلیل توزیع ۱۰۰٪ الیاف، عمود بر راستای ترک‌های برشی]، بهترین شیوه تقویت در سه گروه مذکور بوده و تا حدود ۶۱٪ باربری تیر را افزایش داده است؛ و در صورتی که برای ترمیم تیرهایی که در اثر بارگذاری اولیه دچار شکست شده‌اند استفاده شود، ضمن بازیافت تیر، ظرفیت برشی را نیز نسبت به نمونه شاهد تا حدود ۷٪ افزایش می‌دهد.

**کلیدواژگان:** بتن مسلح، تیر عمیق، تقویت برشی، ترمیم برشی، CFRP.

### ۱- مقدمه

بتن مسلح موجود، بیشتر بر اساس آیین‌نامه‌های قدیمی طراحی شده و بیشتر آنها الزامات آیین‌نامه‌های جدید زلزله را ارضا نمی‌کنند. همچنین ضعف‌های اجرایی ساختمان‌ها را آسیب‌پذیر کرده است. از این‌رو ضرورت تقویت این ساختمان‌ها به‌خصوص برای مقابله با نیروهای جانبی، و با روش‌های مقاوم‌سازی قابل اعتماد، آسان، سریع و اقتصادی احساس می‌شود. به همین دلیل استفاده از ورق‌های FRP

نگاهی به خسارت‌های ناشی از زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که درصد بالایی از ساختمان‌های بتن مسلح که تاکنون در کشور ساخته شده در برابر زلزله مقاوم نیستند و یا مقاومت کافی و قابل قبولی ندارند، زیرا سازه‌های

1- Carbon Fiber Reinforced Polymer

2- Strip (S)

3- Side (S)

به دست می‌آید. آزمایش‌های انجام شده به وسیله‌ی ژانگ<sup>۴</sup> و همکارانش [۸] در راستای به دست آوردن بهترین حالت برای افزایش مقاومت برشی تیرهای عمیق انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که وقتی نوارهای FRP به صورت افقی در جای تیر استفاده می‌شوند هیچ‌گونه اثری بر مقاومت برشی تیر ندارند؛ فقط وقتی نوارها به صورت قائم و بزرگ‌تر از  $0/2$  ارتفاع تیر استفاده شده‌اند، مؤثر بوده‌اند. تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده درباره‌ی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت‌شده با ورق‌های CFRP کافی نبوده و تحقیقی نیز در باره‌ی ترمیم و تقویت این تیرها با شرایط تکیه‌گاهی دوسرگیردار گزارش نشده است. بنابراین در این پژوهش به ارزیابی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح دوسرگیردار در دو حالت تقویت-شده و ترمیم‌شده با استفاده از ورق‌های CFRP پرداخته خواهد شد.

## ۲- آزمایش‌ها

با توجه به اهداف پژوهش، ۶ تیر عمیق بتن مسلح با ابعاد یکسان به طول ۸۰۰ mm، عمق ۴۰۰ mm و عرض ۵۰ mm (شکل ۱) ساخته شد که نحوه آرایش میلگردها مطابق جدول ۱ و بتن مصرفی مطابق جدول ۲ در هر یک از سه گروه فوق یکسان است. نسبت دهانه به عمق تیرها، برابر ۲ است. هر دو نمونه یکسان، پس از آرماتوربندی در قالب-های فلزی قرار داده شده و با رعایت کلیه اصول مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران بتن‌ریزی شدند [۲]. بنابراین سه گروه تیر بتنی به‌گونه‌ای تهیه شده که هر گروه شامل دو نمونه کاملاً یکسان باشند. برای ارزیابی مقاومت برشی نمونه‌های تقویت و ترمیم‌شده، از هر گروه یک تیر به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شده که این نمونه بدون

برای بهسازی لرزه‌ای در سال‌های اخیر بسیار گسترش یافته است. از دلایل مهم انتخاب این مصالح به‌عنوان تقویت-کننده، مقاومت کششی و گسیختگی بالای این مواد، و وزن کم آن (در حدود ۳٪ فولاد)، انعطاف‌پذیری این سیستم، و مقاومت و دوام بسیار خوب در برابر خوردگی، و سادگی و سرعت بالای اجرای آن است [۱].

یک عضو مهم که در شکل‌گیری سازه‌های بتنی نقش مهمی دارد، تیراست. تیرهای بتن مسلح، با نسبت دهانه به ارتفاع (عمق) کمتر از ۴ به تیرهای عمیق معروف است [۲]. این تیرها ممکن است به دلایل گفته‌شده نیاز به ترمیم و تقویت داشته باشند.

درزی [۳] و رهایی و زمردیان [۴] روی تیرهای معمولی با استفاده از FRP یکسری آزمایش‌ها انجام دادند، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از پارگی ورق FRP در خمش و جداشدگی در برش بوده است. و به‌طور کلی FRP باعث افزایش بار از حدود ۱۵ تا ۲۶٪ شده است. آزمایش‌هایی هم به‌وسیله‌ی سولیمانوی<sup>۱</sup> و همکاران [۵] روی تیر معمولی انجام شده که نتایج حاکی از مؤثر بودن ورق FRP در خمش و برش بوده است. همچنین نانی<sup>۲</sup> [۶] نیز یک سری تحقیقات روی ۲۷ نمونه تیر معمولی انجام داده است که نتایج آن بیانگر افزایش مقاومت بر اثر استفاده از ورق FRP و بهبود شکل‌پذیری نمونه‌ها است. یکی از کارهای گزارش‌شده روی تیرهای عمیق مقاوم‌شده با FRP، تحقیقات ایسلام<sup>۳</sup> و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۴ است. آن‌ها ۵ نمونه تیر عمیق مقاوم‌شده به‌وسیله FRP را آزمایش کردند. نتایج حاکی از آن است که وقتی ترک‌های قطری اصلی به‌وسیله ورق FRP به هم دوخته می‌شوند بهترین نتیجه حاصل می‌شود و افزایش باری در حدود ۴۳٪

1- Sulaimanui

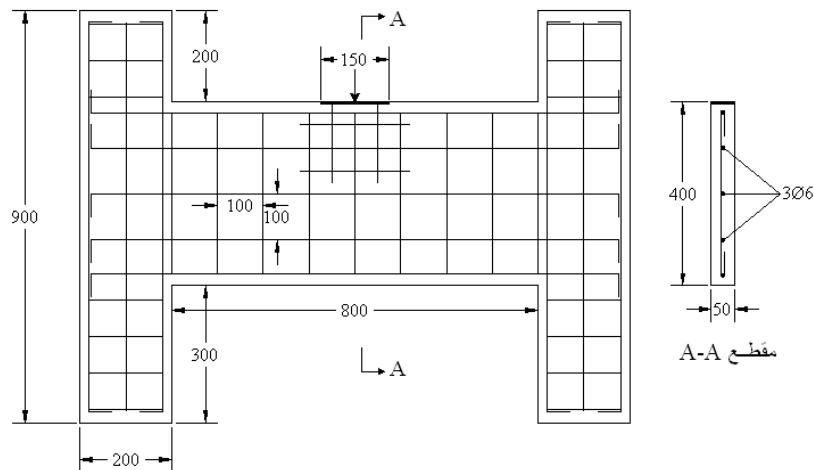
2- Nanni

3-Islam

4- Zhang

گرفته و مقاومت نهایی، تغییر مکان قائم وسط نمونه‌ها و همچنین نحوه شکست آن‌ها با نمونه شاهد و نمونه ترمیم- یافته مقایسه شده است.

تقویت تحت اعمال بار قرار گرفته و سپس نمونه‌های مذکور ترمیم یافته و دوباره تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. نمونه دوم از هر گروه، از همان ابتدا به‌وسیله‌ی ورق‌های FRP تقویت‌شده و سپس تحت اعمال بار قرار



شکل (۱) نحوه آرماتوربندی و ابعاد تیرها (تمام ابعاد به mm هستند)

جدول (۱) نحوه آرماتورگذاری و مشخصات فولاد مصرفی در نمونه‌ها

میلگردهای جان				میلگردهای اصلی پائین			میلگردهای اصلی بالا		گروه	
$E_s$ kN/mm <sup>2</sup>	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	تعداد و نوع عمودی	تعداد و نوع افقی	$E_s$ kN/mm <sup>2</sup>	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	تعداد و نوع	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	تعداد و نوع		
۲۰۰	۳۱۲	۱۱Φ۶	۳Φ۶	۲۰۰	۳۲۰	۱Φ۱۸	۳۰۷	۱Φ۱۲	B1	۱
۲۰۰	۳۱۲	۱۱Φ۶	۳Φ۶	۲۰۰	۳۲۰	۱Φ۱۸	۳۰۷	۱Φ۱۲	B2	
۲۰۰	۳۱۲	۱۱Φ۶	۳Φ۶	۲۰۰	۳۱۵	۱Φ۱۶	۳۰۷	۱Φ۱۲	B3	۲
۲۰۰	۳۱۲	۱۱Φ۶	۳Φ۶	۲۰۰	۳۱۵	۱Φ۱۶	۳۰۷	۱Φ۱۲	B4	
۲۰۰	۳۱۲	۱۱Φ۶	۳Φ۶	۲۰۰	۳۱۵	۱Φ۱۶	۳۱۲	۱Φ۶	B5	۳
۲۰۰	۳۱۲	۱۱Φ۶	۳Φ۶	۲۰۰	۳۱۵	۱Φ۱۶	۳۱۲	۱Φ۶	B6	

جدول (۲) مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی در زمان آزمایش

گروه	مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای $f'_c$ (MPa)	مقاومت فشاری نمونه مکعبی $f_{cu}$ (MPa)	مقاومت کششی $f_t$ (MPa)
۱	۳۶	۴۰	۳/۲
۲	۳۳	۳۸	۳/۱
۳	۳۴	۳۹/۵	۳/۱

شکست نهایی تحت بارگذاری قرار گرفت و اطلاعات لازم ثبت شد. سپس به کمک فشار آب و کمپرسور هوا دانه‌های بتن خردشده از داخل ترک‌های موجود خارج شده و ورق‌های کربن پارچه‌ای دوجته بریده شده از قبل به ابعاد  $90 \times 66 \text{ cm}$  مطابق با شکل ۳ چسبانده شد. در این شیوه ترمیم، ورق‌های پارچه‌ای دوجته به روش دورپیچ WP0/90<sup>۵</sup> مطابق با جزئیات ارائه شده، دو طرف جان‌تیر چسبانده شده و بارگذاری شد. تیر تقویت‌یافته B4 نیز مشابه تیر B3 تقویت شده و بارگذاری شد.

**گروه ۳:** شامل تیرهای B5 و B6 است. ابتدا تیر B6 به‌عنوان تیر شاهد برای گروه ۳، تا شکست نهایی تحت بارگذاری قرار گرفته و اطلاعات به‌دست آمده ثبت شد. سپس مانند قبل ورق‌های کربن پارچه‌ای تک‌جته بریده شده به‌صورت نوارهایی به ابعاد  $10 \times 50 \text{ cm}$  مطابق با شکل ۴ به روش SS45 در دو طرف جان‌تیر چسبانده شد. تیر B5 نیز بدون هیچ‌گونه بارگذاری اولیه مشابه تیر B6 تقویت شد. لازم به ذکر است میزان ورق‌های پارچه‌ای کربن استفاده‌شده در هر سه گروه، یکسان و حدود  $5940 \text{ cm}^2$  است.

## ۵- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

نمونه‌ها در هر گروه با آرایش یکسان، میلگردگذاری و با مقاومت بتنی که در جدول ۵ لسیت شده، ساخته شده است. بارگذاری نمونه‌ها با جک ۵۰ تنی در وسط و از بالا صورت انجام شده است. با توجه به این‌که تشکیل ترک‌ها و رشد آن‌ها تقریباً مشابه هم بود، در این‌جا به تحلیل نتایج اولین گروه پرداخته شده و نتایج بقیه تیرها در جدول ۵ آمده است. شکل شکست نمونه‌ها نیز در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

— ورق‌های CFRP: در تقویت نمونه‌ها از دو نوع مختلف ورق‌های کربن پارچه‌ای مقاومت بالای تک‌جته<sup>۱</sup> و دوجته<sup>۲</sup> استفاده شده است (جدول ۳ و ۴).

## ۴- نحوه ترمیم و تقویت تیرها

در این پژوهش سه گروه نمونه بتنی با سه سیستم تقویتی متفاوت ترمیم و تقویت شده‌اند.

**گروه ۱:** شامل تیرهای B1 و B2 است. ابتدا تیر B2 که به‌عنوان نمونه شاهد (با توجه به یکسان بودن تیرهای B1 و B2) برای گروه ۱ در نظر گرفته شده تحت بارگذاری قرار گرفت و اطلاعاتی مانند بار نهایی، تغییر شکل وسط دهانه در بار نهایی و منحنی بار- تغییر مکان به‌وسیله‌ی دستگاه ثبت اطلاعات<sup>۳</sup> به‌دست آمد. سپس به کمک فشار آب و کمپرسور هوا، دانه‌های خرد شده بتن از داخل ترک‌های قطری اصلی خارج شد. ورق‌های کربن پارچه‌ای دوجته که از قبل به ابعاد  $45 \times 33 \text{ cm}$  بریده شده دو طرف جان‌تیر با زاویه قرارگیری الیاف در راستای ۴۵ و ۱۳۵ درجه با سیستم تقویت SP45/135<sup>۴</sup> [۹] مطابق با جزئیات ارائه‌شده در شکل ۲ چسبانده شده و تحت بارگذاری نقطه‌ای از بالا قرار گرفت. نتایج این نمونه با عنوان تیر ترمیم شده در ادامه آمده است.

تیر B1 نیز بدون هیچ‌گونه بارگذاری اولیه از ابتدا مشابه با تیر ترمیم‌یافته B2 با سیستم تقویتی SP45/135 تقویت شد و تحت بارگذاری مشابه قرار گرفت، نتایج به‌دست‌آمده با عنوان تیر تقویت‌شده گروه ۱ ذکر شده است.

**گروه ۲:** شامل تیرهای B3 و B4 است. ابتدا تیر B3 که به‌عنوان نمونه شاهد برای گروه ۲ محسوب خواهد شد تا

1- Uni Directional  
2- Bi Directinal  
3- Data Logger  
4-Side Plate

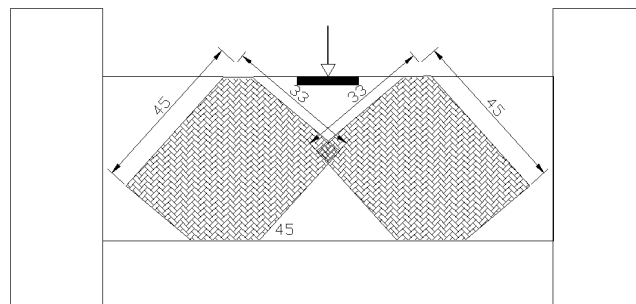
5-Wrap plate

جدول (۳) خواص مکانیکی چسب استفاده شده برای الیاف پارچه‌ای

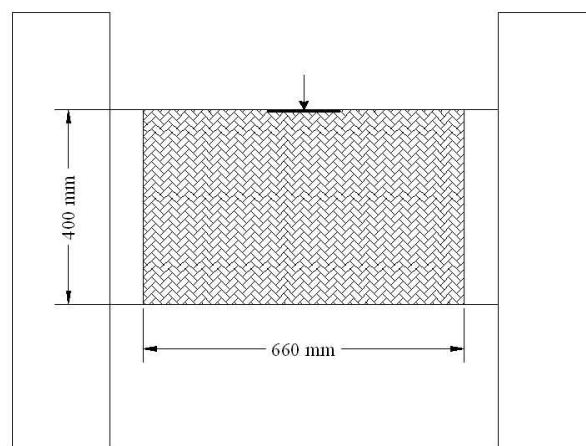
مقاومت چسبندگی (در مقابل نیروی برشی) (N/mm <sup>2</sup> )	مدول خمشی (N/mm <sup>2</sup> )	مدول کششی (N/mm <sup>2</sup> )	مقاومت کششی (N/mm <sup>2</sup> )	کرنش در هنگام شکست (%)
۵۸/۴	۳۸۰۰	۴۵۰۰	۳۰	۰/۹

جدول (۴) برخی از ویژگی‌های الیاف CFRP استفاده شده

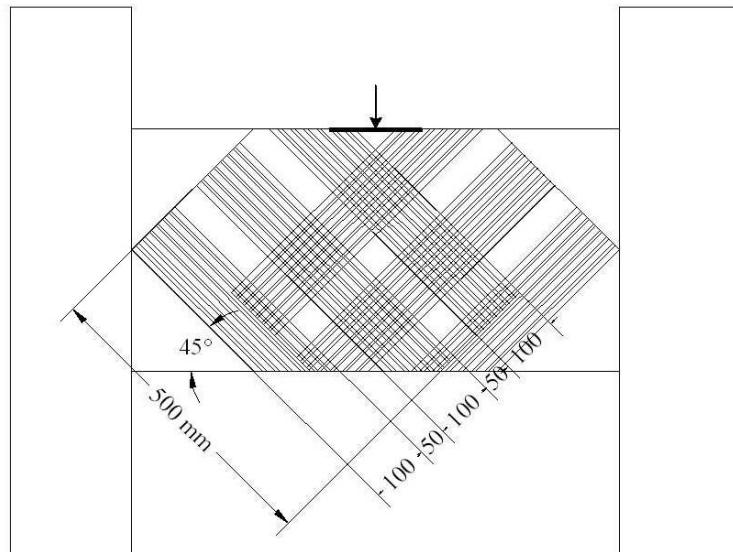
جهت قرار گیری الیاف	دوجته	تک جته
وزن فایبر	۱۵۰ g/cm <sup>2</sup> در هر جهت	۳۰۰ g/cm <sup>2</sup>
عرض ورقه	۳۰۰ mm	۱۰۰۰ mm
ضخامت	۰/۰۸۸۲ mm	۰/۱۷۶ mm
مقاومت کششی	۳۸۰۰ N/mm <sup>2</sup>	۳۸۰۰ N/mm <sup>2</sup>
مدول ارتجاعی	۲۴۰ kN/mm <sup>2</sup>	۲۴۰ kN/mm <sup>2</sup>
کرنش در هنگام شکست	%۱/۷	%۱/۷
وزن مخصوص	۱/۷ g/cm <sup>3</sup>	۱/۷ g/cm <sup>3</sup>
ضریب کاهش طراحی	۱/۲	۱/۲
نیروی کششی در هر ۱۰۰۰ پهنای	$(۳۸۰۰ \times ۸۸/۲) \div ۱/۲ = ۲۷۹/۳$ kN	$(۳۸۰۰ \times ۱۷۶) \div ۱/۲ = ۵۵۷/۳$ kN



شکل (۲) جزئیات و نحوه ترمیم و تقویت تیرهای گروه اول



شکل (۳) جزئیات و نحوه ترمیم و تقویت تیرهای گروه دوم



شکل (۴) جزئیات و نحوه‌ی ترمیم و تقویت تیرهای گروه سوم

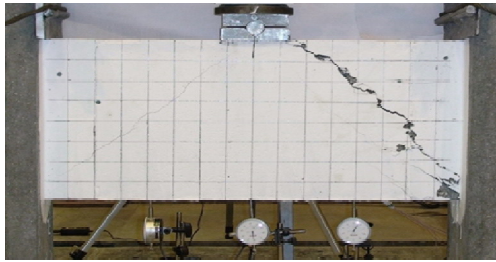
جدول (۵) نتایج مربوط به نمونه‌های تست‌شده

نمونه‌ها	بار اولین ترک‌های ریز (kN)	بار اولین ترک‌های قطری اصلی (kN)	مقاومت نهایی (kN)	نوع شکست	درصد افزایش بار نسبت به نمونه شاهد	تغییر مکان نهایی وسط تیر (mm)	درصد افزایش (+) یا کاهش (-) تغییر مکان وسط تیر نسبت به نمونه شاهد	مقاومت مکعبی بتن $f_{cu}$ (N/mm <sup>2</sup> )
گروه اول (SP45/135)	شاهد (B1)	۱۸۰	۲۱۰	۲۴۶	برشی	-	۳/۵	۴۰
	ترمیم‌شده (B1)	-	۲۵۰	۳۶۰	جدایی ورق‌ها+ برشی	۶	۳/۶	۴۰
	تقویت‌شده (B2)	-	ناگهانی	۳۸۱	پارگی ورق‌ها+ برشی	۵۵	۴/۲	۴۰
گروه دوم (WP)	شاهد (B3)	۱۳۲	۱۷۵	۲۰۵	-	۳	-	۳۸
	ترمیم‌شده (B3)	-	۱۸۱	۲۱۱	جدایی ورق‌ها+ برشی	۳	۲/۵	۳۸
	تقویت‌شده (B4)	-	-	۳۰۰	موضعی	۴۶	۲/۸	۳۸
گروه سوم (SS45)	شاهد (B5)	۱۶۳	۱۷۰	۱۹۲	برشی	-	۳/۵	۳۹/۵
	ترمیم‌شده (B5)	-	۱۸۰	۲۰۶	پارگی ورق‌ها+ برشی	۷	۳/۳	۳۹/۵
	تقویت‌شده (B6)	-	-	۳۰۹	پارگی ورق‌ها+ برشی	۶۱	۴/۱	۳۹/۵

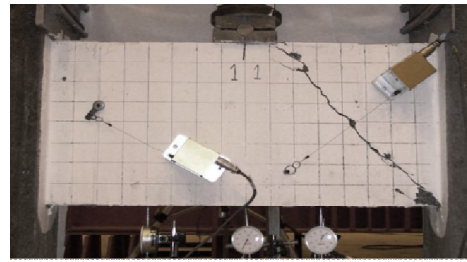
**گروه اول، نمونه شاهد B1:**

فشاری می‌شوند و کم‌کم از یک‌دیگر باز شده و با افزایش بارگذاری در بار نهایی ۲۴۶ kN، ناگهان تغییر مکان وسط، ۳/۵ mm شده و تیر به صورت کاملاً برشی شکسته شد. در حین بارگذاری هیچ‌گونه ترکی ناشی از خمش در ناحیه کششی پایین تیر دیده نشد.

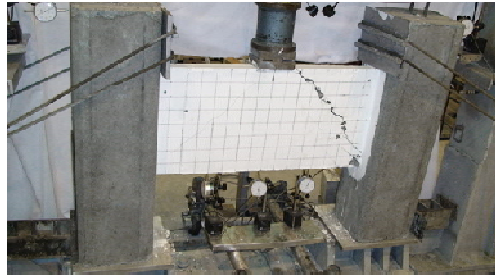
در بار ۱۸۰ kN اولین ترک‌ها در تیر به وجود آمد. این ترک‌ها بسیار ریز بوده و از ناحیه محل اعمال بار شروع و با زاویه ۴۵ درجه تا محل تکیه‌گاه در گوشه پایین تیر ادامه یافت (شکل ۵). با افزایش بار حدود ۸۰ الی ۹۰٪ بار نهایی، ترک‌های قطری اصلی به وجود آمده که باعث تشکیل هسته



B3- برشی

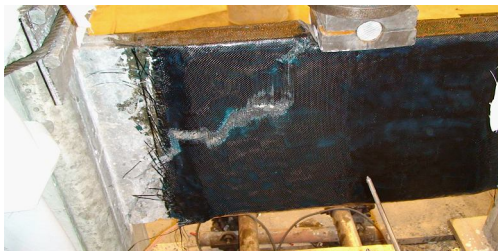


B1- برشی

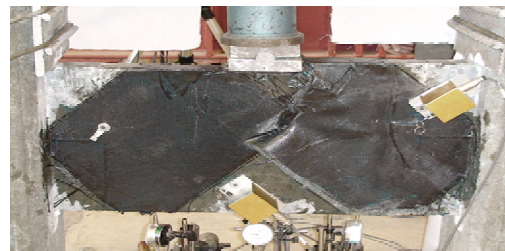


B5- برشی

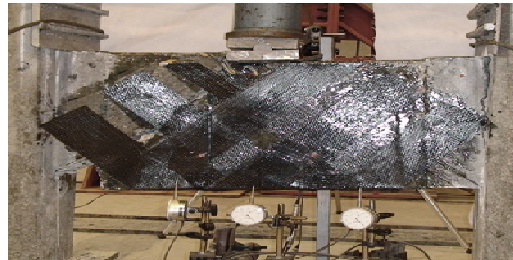
شکل (۵) شکست نمونه‌های شاهد



B3- برشی



B1- برشی



B5- برشی

شکل (۶) شکست نمونه‌های ترمیم‌یافته

پخت رزین اپوکسی و رسیدن به بیشینه‌ی مقاومت برشی چسب اپوکسی، نمونه دوباره تحت بارگذاری قرار گرفت. با افزایش بار، ترک قطری به‌صورت ناگهانی ایجاد شده و شکست برشی تیر، ناشی از جدایی ورق CFRP در راستای ترک قطری در بار  $260 \text{ kN}$  و تغییر مکان قائم وسط  $\text{mm}$

**ب: تیر ترمیم‌یافته B1:**

همان‌طور که گفته شد این نمونه بعد از شکست نمونه شاهد به‌وسیله ورق‌های کربن پارچه‌ای دوجبه‌ای، روی وجوه کناری با زاویه قرارگیری الیاف در راستای  $45^\circ$  و  $135^\circ$  درجه (SP45/135)، ترمیم شد. پس از گذشت ۷ روز برای

۴ اتفاق افتاده است (شکل ۶).

### ج: نمونه تقویت شده B2:

تیر B2 که جزئیات آرماتورگذاری و بتن‌ریزی آن مشابه با تیر B1 است مشابه با نمونه ترمیم‌یافته، از ابتدا (بدون بارگذاری و ایجاد ترک اولیه) تقویت شد و سپس تحت بارگذاری قرار گرفت. مود شکست تیر، شکست برشی ناشی از پارگی ورق CFRP در راستای ترک قطری اصلی است که در ۳۸۱ kN و مقدار تغییر مکان قائم وسط تیر ۴mm اتفاق افتاده است. هنگامی که الیاف شروع به پاره شدن می‌کنند، شکست به سرعت اتفاق می‌افتد.

### د: مقایسه منحنیهای بار-تغییر مکان نمونه‌های گروه اول

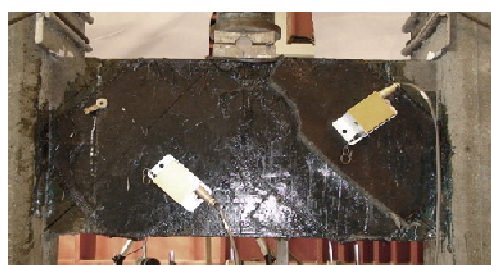
از شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که شیب منحنی‌های مربوط به تیر شاهد و ترمیم‌یافته در محدوده ارتجاعی و غیرارتجاعی تقریباً بر هم منطبق است. نمونه‌های شاهد، ترمیم‌شده و تقویت‌شده بعد از رسیدن به بار بیشینه دچار یک افت بار ناگهانی می‌شوند که در نمودارها نشان داده شده است. در این مرحله میلگردهای طولی و بتن فشاری

تحمل بار را بر عهده دارد تا این‌که این میلگردها جاری شده و نمونه‌ها کاملاً گسیخته می‌شوند.

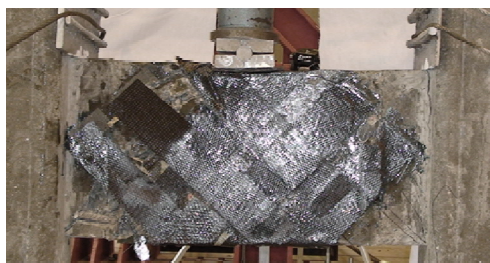
همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود در مقایسه با نمونه شاهد، نمونه تقویت‌شده افزایش باری حدود ۵۵٪ داشته و تغییر مکان وسط تیر نیز به میزان ۱۹٪ افزایش یافته است؛ همچنین میزان افزایش بار در نمونه ترمیم‌شده نسبت به نمونه شاهد ۶٪ و تغییر مکان وسط تیر نیز به میزان ۳٪ افزایش یافته است. موارد بالا بیانگر آن است که اگرچه عملیات تقویت نسبت به ترمیم، افزایش باربری در حدود ۵۵٪ و افزایش تغییر مکان در حدود ۱۹٪ داشته است، اما با توجه به آن‌که در تیر ترمیم‌یافته درصدی از مقاومت برشی بتن و فولاد تحت بار اولیه از بین رفته است، دست‌یابی به مقاومتی تقریباً در حدود مقاومت تیر اولیه (تیر بدون ترک خوردگی) به کمک عملیات ترمیم، امکان‌پذیر است و ترمیم تیرهای عمیق دوسرگیردار برای بهسازی و رسیدن به رفتار، مقاومت و سختی تیر قبل از ترک‌خوردگی، بسیار مطلوب و رضایت‌بخش بوده است.



B4- موضعی



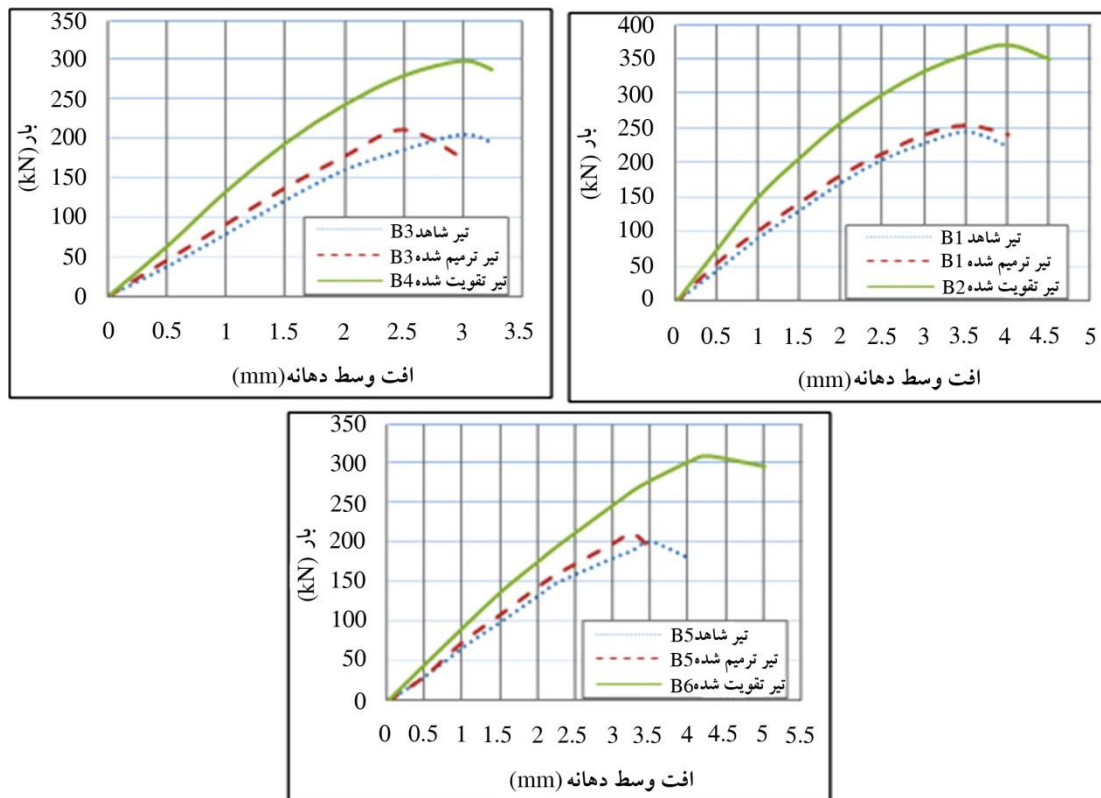
B2- برشی



B6- برشی

شکل (۷) شکست نمونه‌های تقویت شده





شکل (۸) مقایسه نمودار بار-تغییر مکان تیرها

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله به میزان تأثیر استفاده از ورق‌های CFRP در جان تیرهای عمیق برای افزایش ظرفیت برشی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که:

- ۱- شکست تیرهای شاهد با ترک قطری بین گوشه پایین تکیه‌گاه و ناحیه فشاری زیر محل بارگذاری رخ می‌دهد؛ پس از تقویت به سبب اثر محصورکنندگی ورق‌های CFRP، پخش و رشد ترک قطری بحرانی در مقایسه با تیر شاهد، با افزایش بار، کاهش یافته، به طوری که بر بارهای بزرگ‌تری برای نفوذ ترک قطری بحرانی به قسمت تحتانی تیر نیاز است و شکست تیرها، به صورت ناگهانی و با گسیخته شدن الیاف رخ می‌دهد. این امر سبب افزایش بار نهایی به میزان ۵۵٪ در گروه ۱ با سیستم تقویتی SP45/135، ۴۶٪ در گروه ۲ با سیستم تقویتی WP0/90 و ۶۱٪ در گروه ۳ با سیستم

تقویتی SS45 شده است.

۲- عملیات ترمیم تیرهای عمیق بتنی دوسرگیردار بسیار مطلوب بوده به طوری که ظرفیت برشی تیرهای ترمیم یافته را به میزان ۶٪ در گروه ۱، ۳٪ در گروه ۲ و ۷٪ در گروه ۳ نسبت به تیر شاهد افزایش داده است.

۳- افزایش باربری نمونه‌های ترمیم یافته نسبت به شاهد در همه گروه‌ها بیانگر این موضوع است که عملیات ترمیم در تیرهای دوسرگیردار تأثیر بسیار مطلوبی در رفتار و سختی آن‌ها می‌گذارد؛ در واقع می‌توان گفت که ترمیم تیر می‌تواند سختی کاهش یافته در حین مرحله پیش بارگذاری (قبل از ترمیم) را بازگرداند و رفتار تیر ترک خورده را بهبود بخشد و تقریباً به رفتار تیر قبل از ترک خوردگی تبدیل کند.

۴- تقویت به روش دورپیچی در گروه ۲ علاوه بر افزایش ظرفیت برشی، ظرفیت خمشی تیر را نیز افزایش

[۳] درزی رامندی، علی، «عملکرد تیرهای بتن مسلح تقویت شده از نظر خمشی و برشی و شکل‌پذیری با ورق‌های FRP»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

[۴] رهایی، علیرضا، زمردیان، آرش «ترمیم و تقویت سازه‌های بتن مسلح با الیاف پلیمری مرکب (FRP) دانش نگار»، انتشارات دانشگاه تفرش، چاپ اول، ۱۳۸۴.

[5] Sulaimanui A.L., Sharif G.J., Basunbul I.A., Baluch, M.H. Ghabel B.N. (1994) "Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding" ACI structural journal, Vol. 91, No.3, July-Aug. PP 458-468.

[6] Nanni, A. Khalifa, and Belarbi, B. "Shear performance of RC Members strengthened with externally bonded FRP wraps." Proc. 12<sup>th</sup> world conference on earthquake engineering Jan 30 Feb 04, 2000, Auckland, New Zealand, pp 305-315.

[7] Islam M.R. Mansur M.A. Maalej M. "Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems." Cement Concrete Composite. 2004, 27(3):413-20.

[8] Zhang Z, Hsu C, Moren J. Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using carbon fiber reinforced polymer laminates. ASCE J Compos Cons. 2004;8(5):403-14.

[۹] میرزایی، مهدی، ۱۳۸۷، «ارزیابی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت شده با ورق‌های FRP»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

[10] ACI Committee 440. 2R-02. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structure (ACI 440.2R-02). Farmington Hill, Michigan: American Concrete Institute; 2002. 45 pp.

داده و این امر باعث تغییر مود شکست برشی و خمشی به موضعی شده است. مود شکست برشی، رفتار این تیرها را تا زمانی که ظرفیت خمشی و برشی تخمینی آن‌ها بیشتر از ظرفیت برشی افزایش یافته‌شان باشد، کنترل می‌کند.

۵- استفاده از بیشینه ظرفیت الیاف زمانی امکان‌پذیر است که مود شکست خمشی و موضعی به دلیل کمبود آرماتورهای کششی و فشاری و ضعف بتن، زیر نقطه بارگذاری رخ ندهد. یکی از علل شکست زود هنگام تیر تقویت شده گروه ۲ و پاره‌نشدن الیاف، ضعف بتن زیر نقطه بارگذاری و بنابراین غالب شدن شکست موضعی در این نقطه است.

۶- با توجه به این که مقدار الیاف از لحاظ مساحت در همه نمونه‌ها برابر است، بهترین آرایش الیاف از لحاظ مقاومت نهایی در نمونه‌های تقویت یافته SS45 در گروه ۳ است. علت این امر توزیع ۱۰۰٪ الیاف تک‌جهته عمود بر امتداد ترک‌های برشی است؛ در حالی که در سایر گروه‌ها تنها ۵۰ درصد از الیاف (به دلیل دوجهته بودن) عمود بر امتداد ترک برشی است.

۷- در صورتی که CFRP به نحو مناسب در تقویت تیرهای عمیق بتنی دوسرگیردار استفاده شود، می‌تواند تا ۶۱٪ ظرفیت نهایی را افزایش دهد. این روش برای ترمیم تیرهایی که در اثر بارگذاری اولیه دچار شکست شده‌اند می‌تواند تا ۷٪ ظرفیت نهایی برشی را افزایش دهد.

## ۷- مراجع

[1] Teng, G. J. and Chen, j. F. and Lam, L., (2002) "FRP Strengthened RC Structural," Published by John Wiley and Sons Ltd.

[۲] «طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه» مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، ۱۳۸۴.

# The Experimental Study of the Effect of FRP Laminates on Shear Strength of RC Fixed Ended Deep Beams

A. Arabzade<sup>1\*</sup>, H. Mahanpoor<sup>2</sup>

1- Assistant Prof., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- MSc., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

arabzade@modares.ac.ir

## Abstract:

Very little researches has been performed about strengthening and repairing of deep beams. In this paper, shear strength of Reinforced Concrete (RC) deep beams in two cases of repair and strengthening with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) is evaluated. To achieve the objective of the research, six deep beams were constructed in three coupling groups with constant reinforcement arrangement and concrete strength and clear span-to-depth ratio of 2. In each group, one beam without strengthening was used as reference beam. This beam was loaded up to failure and then reinforced by CFRP and reloaded again. The other one was reinforced before loading, similar to the first one. The results indicated that repair and strengthening the beams would increase the ultimate load. In general, when one directional CFRP strip is attached to the face of the beams perpendicular to crack with the angle of 45° (SS45), the ultimate strength is increased by 7 and 61%, respectively. Therefore it can be concluded that SS45 system because of uniform distribution of CFRP perpendicular to the direction of shear cracks, could be the best method for repair and strengthening of tested fixed ended deep beams and in comparison with reference beam, if it used to repair the damaged beam, the ultimate load would increase up to 7 percent.

**Keywords:** Deep beams, Reinforced concrete, Shear, Flexural, FRP