

# Experimental Investigation of the Behaviour of Concrete Beams Reinforced by GFRP Bars and Strengthened by CFRP and Steel Sheets Under Pure Bending Moment

*Babak Mansouri*

*PhD Student, Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran*

*Ashkan Torabi\**

*Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran  
Ashkan.torabi@miau.ac.ir*

*Arash Totonchi*

*Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran*

## **Abstract**

*One of the conventional retrofitting methods for reinforced concrete beams is flexural strengthening of beams with CFRP materials. In this study, a full scale reinforced concrete beam is constructed and evaluated under four-point flexural test. Afterward, the same beam is retrofitted in flexural region by monolayer of CFRP. These experimental tests are carried out to be the basis of verification for numerical specimens. At first, an unreinforced beam is subjected to four-point loading in the laboratory. Then, to strengthen the beam in the flexural zone, three similar beams are reinforced in the flexural zone using a layer of CFRP sheet, a layer of steel sheet and GFRP rebar. The reinforcement of the beams is placed in the middle region, and after loading, bending failure occurred in all the beams. The results show that the load strengthening of concrete beam do not increase capacity considerably, but prevent failure concentration in maximum bending region. The results also show that by performing local reinforcement in the flexural zone, in some beams, the first cracks occur outside the flexural region, while the final flexural failure occurs in the middle region of the beam.*

**Keywords:** *Retrofit, Reinforced Concrete beam, CFRP Sheet, GFRP bar, Steel Sheet*

# مطالعه ی رفتار آزمایشگاهی تیر بتن مسلح تقویت شده با میلگرد GFRP، ورق های CFRP و فولادی تحت خمشی خالص

دریافت مقاله: ۱۱-۲۸-۱۳۹۹

پذیرش مقاله: ۰۳-۰۴-۱۴۰۰

بابک منصوری

دانشجوی مقطع دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

اشکان ترابی\*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

*Ashkan.torabi@miau.ac.ir*

آرش توتونچی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

## چکیده

متداول ترین روش مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح، تقویت خمشی این تیرها با مصالح کامپوزیت می باشد. در مقاله حاضر چهار تیر با مقیاس واقعی به ابعاد  $4200 \times 250 \times 250$  میلیمتر ساخته شده است. ابتدا یک تیر تقویت نشده در آزمایشگاه تحت بارگذاری چهار نقطه ای قرار گرفت. سپس برای تقویت تیر در ناحیه ی خمشی، از سه تیر مشابه با استفاده از یک لایه ورق CFRP، یک لایه ورق فولادی و میلگرد GFRP در ناحیه ی خمشی تقویت و مقاوم سازی شد. تقویت تیرها در محدوده ی میانی صورت گرفته که بعد از بارگذاری در همه ی تیرها شکست خمشی اتفاق می افتد. نتایج نشان داد که تقویت تیر بتن مسلح به صورت موضعی در ناحیه ی خمشی تاثیر چندانی بر ظرفیت باربری تیر نداشته اما باعث خارج شدن خرابی از محدوده ی خمشی محض تیر می شود. همچنین نتایج نشان می دهد با انجام تقویت موضعی در ناحیه خمشی، در بعضی از تیرها پیدایش اولین ترک ها در خارج از محدوده خمشی اتفاق می افتد در حالیکه شکست خمشی نهایی در محدوده میانی تیر اتفاق می افتد.

واژگان کلیدی: مقاوم سازی، تیرهای بتنی مسلح، ورق CFRP، ورق فولادی و میلگرد GFRP

۱. مقدمه

در حال حاضر مطالعات گسترده ای بر روی پلیمرهای تقویت شده با شیت‌های FRP به صورت مقاوم سازی سازه‌ها به دو صورت داخلی و خارجی انجام شده است. [۲۰۱] مقاومت، تغییر شکل، جابجایی و چکش خواری در مقاوم سازی انواع سازه‌ها توسط الیاف FRP بررسی و گزارش شده است [۹-۳]. آقابزرگی و خالو در تحقیقی به بررسی عددی تاثیر میلگردهای فشاری GFRP بر مقاومت خمشی و شکل پذیری تیرهای بتنی مسلح پرداختند. نتایج نشان داد که منحنی‌های تغییرمکان-نیرو به دست آمده از تحلیل عددی مطابقت خوبی با منحنی‌های حاصل از آزمایشگاه داشته است. همچنین افزایش درصد میلگردهای فشاری GFRP، منجر به جذب انرژی بیشتر و در نهایت شکل پذیری بیشتر تیرهای بتنی GFRP شده است [۱۰]. شریفی و خجسته فر (۱۳۹۷) روشی جهت محاسبه مقاومت و خیز اجزاء خمشی بتن مسلح مقاوم شده با الیاف پلیمری ارائه دادند. نتایج حاصل از فرمول‌بندی این تحقیق در حالت نهایی هماهنگی و انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی نسبت به حالت تسلیم فولادهای کششی دارد و از آنجا که نتایج حالت نهایی بسیار مهم و مورد استفاده می‌باشند لذا نتایج این تحقیق می‌تواند به صورت محافظه کارانه جهت تعیین مقاومت و خیز اجزاء خمشی بتنی مقاوم شده با الیاف پلیمری مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. بادران و وارسته پور به ارائه روشی جهت جلوگیری از وقوع پدیده شکست زودرس در تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه مسلح با استفاده از الیاف کربن و شیش پرداختند. در این تحقیق تیرهای بتنی علاوه بر تقویت به روش کلاسیک (تقویت توسط الیاف فقط زیر تیر بصورت یکسره) با الیاف CFRP و همچنین تقویت به روش L شکل (تقویت توسط الیاف که قسمتی زیر تیر و ادامه آن بصورت اورلب در کناره‌های تیر) با الیاف CFRP و GFRP، تحت آزمایش خمش چهار نقطه ای قرار گرفتند که منجر به تعویق این پدیده در تیرهای تقویت شده به روش L شکل نسبت به روش کلاسیک شد [۱۲]. از این رو با توجه به اینکه الیاف FRP مقاومت کششی بسیار بالایی نسبت به آلیاژهای فولادی دارند، اتصال FRP به ناحیه کششی تیر بتنی سبب افزایش ظرفیت خمشی مقطع خواهد شد. عوامل متعددی مانند ابعاد مقطع تیر بتنی، مساحت و مشخصات مکانیکی میلگردهای موجود و FRP مورد استفاده و همچنین مقاومت بتن بکار برده شده، در میزان افزایش مقاومت خمشی سازه‌های بتنی با استفاده از سیستم‌های FRP موثر می‌باشند [۱۳].

کوک لئونگ<sup>۱</sup> و همکاران مطالعات آزمایشگاهی را برای بهبود مقاومت پیچشی تیرهای بتن مسلح بر روی ۱۱ عدد تیر به طول ۲۴۴۰ میلی‌متر عرض ۳۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر انجام دادند. در این مطالعات از هر دو نوع الیاف شیشه و کربن در یک لایه استفاده شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که چیدمان دور پیچ کامل تیر بهترین نتیجه را از نظر افزایش لنگر نهایی پیچشی و زاویه دوران از خود نشان می‌دهد و چیدمان الیاف با زاویه ۴۵ درجه این اطمینان را می‌دهد که از اثر بخشی الیاف بطور موثر استفاده شده است. [۱۴]. پانچا<sup>۲</sup> و همکاران مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار پیچشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP انجام دادند. این تیرها با چیدمان‌های مختلف مواد کامپوزیت تقویت شدند. تمام تیرهای تقویت شده با ورق‌های GFRP افزایش قابل توجهی در مقاومت پیچشی و لنگر پیچشی ترک خوردگی و دوران پیچشی را نشان می‌دادند، نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از ورق‌های GFRP افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت نهایی قبل و بعد از ترک خوردگی خواهد داشت [۱۵].

پودولسکی<sup>۳</sup> و همکاران مطالعات خود را بر مبنای آزمایشگاهی روی تعداد ۱۲ نمونه تیر بتن مسلح مقاوم سازی شده با مصالح کامپوزیتی از جنس کربن و شیشه با چهار آرایش مختلف چیدمان لایه‌ها بصورت یک و دولایه تقویت کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که آرایش نصب دور پیچ کامل بصورت یک و دو لایه FRP از جنس

<sup>1</sup> Kok leong

<sup>2</sup> Pancha

<sup>3</sup> Podoloski

کربن و شیشه بیشترین مقاومت پیچشی و خمشی را از خود نشان می دهد [۱۶]. جاریوال<sup>۱</sup> و همکاران مطالعات آزمایشگاهی بر روی ۵ عدد تیر بتن مسلح تقویت شده با الیاف CFRP و با موضوع تقویت پیچشی تیرهای بتن مسلح بوسیله الیاف و ورق های CFRP انجام دادند. نتایج نشان داد که تقویت با مصالح کامپوزیت باعث بهبود عملکرد کلیه تیرها شده است [۱۷].

نجف قلی پور و همکاران به بررسی عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح، با وصله های پوششی، تحت بارگذاری چرخه ای پرداختند. برای محاسبه طول اتصال پوششی دو روش استفاده کرده اند، روش طراحی مرسوم در استاندارد ACI318 برای بدست آوردن طول اورلپ، در معادله، ضریب ۱/۲۵ برای تنش تسلیم میلگرد و برای اصلاح طول همپوشانی در نظر گرفته شده است. برای این منظور ۹ تیر بتن مسلح در مقیاس واقعی با آرایش های مختلف، طراحی و ساخته اند. آزمایش های خمش چهار نقطه ای بر روی نمونه ها انجام شد تا عملکرد اورلپ تحت خمش خالص ارزیابی شود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نمونه با وصله پوششی مطابق با مقررات ACI 318-14، نمی تواند از بارگذاری چرخه ای، شکست خمشی را تحمل کند. با این حال، نمونه های با طول اتصال اصلاح شده قادر به تحمل بار سیکلی با شکل پذیری خمشی مناسب بودند [۱۸]. گارسیا<sup>۲</sup> و همکاران میزان چسبندگی را با استفاده از آزمایشات خمشی بر روی ۱۲ نمونه تیر RC بارگذاری شده در میانه تیر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که CFRP سبک باعث افزایش استحکام اتصال پیوند تا ۶۵٪ در مقایسه با نمونه های غیرقابل کنترل شد. این موضوع باعث ایجاد پراکندگی زیادی در نتایج و فشار بیش از حد فشار ایجاد شده در CFRP می شود. بیشتر مطالعات اخیر در مورد عملکرد اتصالات هم پوشانی موارد خاصی را در این زمینه بیان می کند. رفتار اتصالات هم پوشانی در اعضای ساخته شده با انواع خاصی از بتن مانند مقاومت بالا بتن، بتن مسلح با الیاف و بتن ساخته شده با سنگدانه های بازیافتی در زیر انواع خاص بارگیری مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹].

در سالهای اخیر محققین مختلف رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح را مورد بررسی و آزمایش قرار داده اند. چابکی و همکاران در سال ۲۰۱۸ رفتار خمشی تیر های مقاوم سازی شده با GFRP را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند [۲۰]. همچنین جهانگیری و همکاران خصوصیات مقاوم سازی کششی تیر ها را بررسی نمودند [۲۱]. در سال ۲۰۲۰ رضایی پزند و همکاران با استفاده از الگوریتم توده ذرات، تیر های بتن مسلح را بهینه سازی کردند [۲۲]. یکی از پارامترهای تاثیر گذار در مقاوم سازی تیرهای بتنی توجه به کرنش مواد پلیمری می باشد. در سال ۲۰۱۸ جهانگیری و همکاران کرنش مواد کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند [۲۳]. باقری و همکاران تحلیل لرزه ای قاب های بتن مسلح را مورد بررسی قرار دادند [۲۴]. همچنین کریم پور و همکاران بر روی خصوصیات مواد پلی پروپیلین و مستقات آنها مطالعه کردند [۲۵].

## ۲. روش پژوهش

سیستم تحت مطالعه تشکیل شده از چهار تیر بتن مسلح، شاهد و تقویت شده به طول ۴۲۰۰ میلیمتر و عرض و ارتفاع ۲۵۰ میلیمتر که بوسیله ی چهار میلگرد طولی با قطر ۱۲ میلیمتر و میلگردهای عرضی با قطر ۸ میلیمتر در فواصل ۸۰ میلیمتری نسبت به یکدیگر مسلح شده اند. شکل (۲۰۱). بتن مورد استفاده جهت ساخت این تیر از نوع C25 (مقاومت فشاری نمونه استوانه ای ۲۵ مگاپاسکال) می باشد. مشخصات تیرهای بتنی در جدول شماره ۱ می باشد. میزان ضخامت کاور بتن ۵۰ میلیمتر می باشد. تیر بتنی دارای دو تکیه گاه ساده و غلتکی در فاصله ی ۲۵۰ میلیمتری از ابتدا و انتهای تیر می باشند که در تمامی مدل ها مشابه یکدیگر قرار گرفته شده است. نمونه تقویت شده با ورق CFRP، ورق فولادی و میلگرد GFRP نیز دارای ابعاد و اندازه نمونه تیر بتنی شاهد با اضافه نمودن یک

<sup>1</sup> Jarival

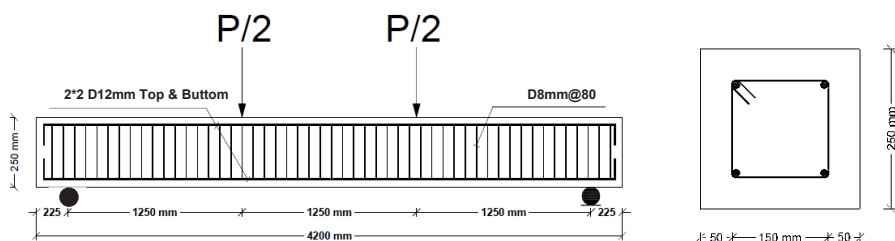
<sup>2</sup> Garsia

لایه ورق CFRP، یک لایه ورق فولادی و یک میلگرد GFRP جهت بهبود و کنترل ترک های خمشی در قسمت تحتانی و در محدوده میانی تیر به طول ۹۴۰mm قرار داده شده است.

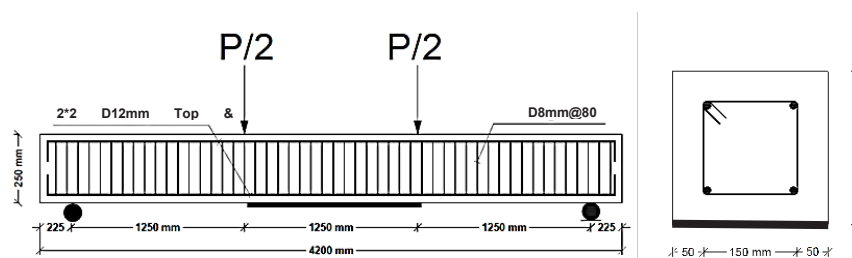
در این پژوهش سعی گردید تا از وقوع شکست خمشی زود هنگام ناشی از جداسازی پوشش (کاور بتن) در ناحیه کششی مقطع تیر یا شکست ناشی از ترک های میانی تیر به کمک روشهای تقویتی تا حدودی جلوگیری شود. تیر های بتن آرمه نیز بر اساس آیین نامه ACI318-19 طراحی شده اند [۲۶].

جدول ۱ مشخصات تیر های بتنی مورد آزمایش

ردیف	نام مدل	طول تیر (mm)	عرض تیر (mm)	ارتفاع (mm)	آرماتور طولی	آرماتور عرضی (mm)	محل مقاوم سازی	طول مقاوم سازی (mm)
1	تیر BS	۴۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	Up Ø12 Bottom Ø12	Ø ۸ @ ۸۰	-	-
2	تیرهای تقویت شده	۴۲۰۰	۲۵۰	۲۵۰	Up Ø12 Bottom Ø12	Ø ۸ @ ۸۰	تحتانی	۹۴۰



شکل ۱ شماتیک مدل آزمایشگاهی تیر بتن مسلح بدون تقویتی



شکل ۲ شماتیک مدل آزمایشگاهی تیر بتن مسلح تقویت شده با یک لایه ورق CFRP و میلگرد GFRP و ورق فولادی

## ۲-۱. بتن

نمونه های آزمون بتن جهت سنجش میزان مقاومت فشاری در سن ۷ و ۲۸ روز بصورت مکعبی ۱۵۰\*۱۵۰\*۱۵۰ میلیمتر می باشد. همچنین آزمون های سنجش مقاومت کششی بصورت استوانه ای در ابعاد ۱۵۰\*۳۰۰ میلیمتر در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش برزیلی قرار گرفتند. سایر مشخصه های بتن ساخته شده نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ طرح اختلاط و مقاومت بتن مورد استفاده جهت ساخت تیرهای آزمایشگاهی

شاخصه	سیمان	شن	ماسه	آب	روان کننده	w/c	sp/c	وزن مخصوص	وزن نمونه	اسلامپ	مقاومت فشاری	مقاومت کششی
واحد	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	lit/m <sup>3</sup>	lit/m <sup>3</sup>	%	%	kg/cm <sup>2</sup>	gr	mm	Mpa	Mpa
طرح مخلوط بتن	400	850	800	152	2	0/38	0/5	2530	7521	70	25/2	۳/۹

## ۲-۲. میلگرد

برای افزایش مقاومت کششی و خمشی تیر بتنی نیز با استفاده از شبکه میلگرد طولی و عرضی نیز مسلح گردیده است. میلگرد بکار رفته جهت تسلیح تیر بتنی نیز از نوع A-3 آجدار می باشد. سایر مشخصات فولاد مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ مشخصات فیزیکی میلگردهای مورد استفاده جهت ساخت تیرهای آزمایشگاهی

مشخصه	قطر	تنش تسلیم	مقاومت کششی	کرنش	مدول الاستیسیته
واحد	d	fy	fu	ε <sub>u</sub>	E
میلگرد طولی	mm	Mpa	Mpa		Gpa
	۱۲	472	۶۱۸	0.224	216
خاموت	۸	۳۱۸	۵۲۰	0.161	203

## ۲-۳. ورق CFRP

کامپوزیت CFRP از انواع نمونه های ورق های FRP هستند که الیاف آن از جنس کربن می باشد. این الیاف خاصیت ارتجاعی بالاتری نسبت به نمونه های دیگر را دارند. CFRP در مقابل پدیده خستگی مقاومت زیادی دارد و ضریب انبساط گرمایی خطی آن در دماهای بالا و پایین کم است که این خاصیت موجب پایداری آن در دماهای مختلف می شود. از دیگر خصوصیات CFRP نسبت بالای مقاومت کششی به وزن کم آن است. این کامپوزیت به شکل خارجی روی اعضای سازه ای چسبانده می شود [۱]. در مدل آزمایشگاهی تقویت شده با CFRP نیز جهت کنترل ترک های خمشی نیز، یک لایه ورق CFRP به طول ۱۲۴۰ میلیمتر در قسمت تحتانی و مرکز تیر نصب گردیده است. سایر مشخصات ورق CFRP مطابق جدول ۴ می باشد.

جدول ۴ مشخصات فیزیکی ورق CFRP مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی

مشخصه	ضخامت	مدول الاستیک	مدول برشی	مقاومت کششی	ضریب پواسون	تنش تسلیم	کرنش	وزن مخصوص
واحد	mm	Gpa	Mpa	Mpa		Mpa	ε <sub>u</sub>	kg/m <sup>2</sup>
ورق CFRP	0/17	230	3270	958	0/3	3900	0/015	0/225

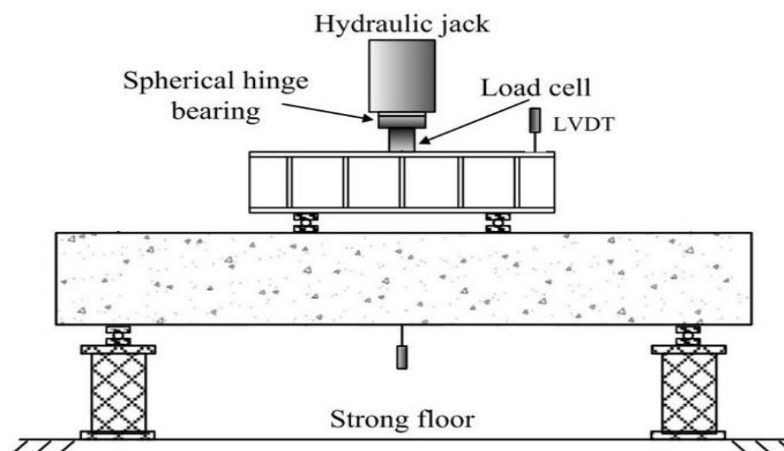
## ۲-۴. بارگذاری

جهت اندازه گیری میزان ظرفیت باربری و تغییر شکل های تیر بتن مسلح، بوسیله جک هیدرولیکی که در مرکز تیر و به وسیله رابط فولادی تقسیم شده و به دو نقطه ی تیر اعمال می گردد. در مجموع تیر بتن مسلح تحت خمش چهار نقطه ای قرار می گیرد. در این تحقیق از جک هیدرولیکی با قابلیت اعمال بار تا ۴۰۰ کیلونیوتن استفاده شده

است. به منظور اعمال بار در دو نقطه از اتصال دو پروفیل I شکل به یکدیگر به عنوان عامل انتقال بار از جک هیدرولیک به محدوده یک سوم میانی تیرهای بتنی استفاده شد. همچنین از دو مبدل تغییر شکل سنج در قسمت فوقانی و مرکز تیر استفاده گردیده است. این تغییر شکل سنج ها جهت کنترل تغییر شکل های تیر بتنی در ناحیه کششی و تارخشی به ترتیب در سطح هم تراز با میلگردهای کششی و در راستای اعمال بار در حین بارگذاری قرار گرفتند تا تاثیر نحوه تقویت تیرها بر رفتار و پارامترهای فوق الذکر بررسی شود. همچنین یک عدد لود سل<sup>۱</sup> ۱۵ تن به انتهای جک وصل شد که اندازه گیری مقدار بار اعمال شده توسط جک به نمونه را در هر لحظه اندازه گیری و با استفاده از دیتا لاگر<sup>۲</sup> جهت تحلیل و بررسی نتایج ثبت می گردید. تیر بتن مسلح فوق تحت بارگذاری مونوتونیک<sup>۳</sup> در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. در حین بارگذاری و در هر مرحله افزایش نیرو نیز میزان جابجایی و تغییرشکل های مرکز نمونه توسط تغییر مکان سنج لحاظ شده و به وسیله دستگاه مربوط این پردازش ثبت گردید. شکل (۳ و ۴)



شکل ۳ - نحوه ی بارگذاری تیر بتن مسلح در محیط آزمایشگاه قبل از بارگذاری



شکل ۴ مدل بارگذاری تیر بتن مسلح تحت خمش چهار نقطه ای

۲-۵. مدل آزمایشگاهی

<sup>۱</sup> Load cell

<sup>۲</sup> Data logger

<sup>۳</sup> Monotonic

## ۵-۲-۱ مراحل بارگذاری تیر بتن مسلح تقویت نشده BS

شکل ۵، نمودار بار- تغییر مکان حاصل از بارگذاری تیر بتنی تقویت نشده در آزمایشگاه می باشد. مراحل بارگذاری در نمونه تقویت نشده به شرح زیر می باشد.

الف) در مرحله اول، تیر مورد آزمایش توسط جک هیدرولیکی تحت بارگذاری به میزان حداکثر ۲۰۰ kg قرار گرفت. در این حالت به دلیل کم اثر بودن میزان بار وارده، رفتار تیر کاملاً خطی و ترک خوردگی در محدوده کششی تیر مشاهده نشد.

ب) در مرحله دوم، تیر مورد آزمایش توسط جک هیدرولیکی تحت بارگذاری به میزان حداکثر ۳۵۰ kg قرار گرفت. در این میزان بارگذاری مقطع هنوز ترک نخورده اما میزان تنش بوجود آمده در دورترین تارکشی، ناشی از خمش قرار گرفته است. بدلیل آنکه تنش کششی حداکثری فقط در قسمت بسیار محدودی از مقطع ایجاد شده است این امکان فراهم است که با افزایش میزان بار و به طبع آن افزایش تنش کششی در آن محدوده ترک های بوجود آمده بیشتر شود.

ج) در مرحله سوم، تیر مورد آزمایش توسط جک هیدرولیکی تحت بارگذاری به میزان حداکثر ۵۰۰ kg قرار گرفت. در حالی که بار وارده ۴۰۰ کیلوگرم به نمونه اعمال شد، ترک های اولیه در ناحیه کششی تیر بوجود آمد. لذا در این حالت حداکثر میزان تنش ممکن در مقطع کششی تیر ایجاد شده و مقطع کششی تیر به حد گسیختگی نزدیک و مقطع آن ترک خورد.

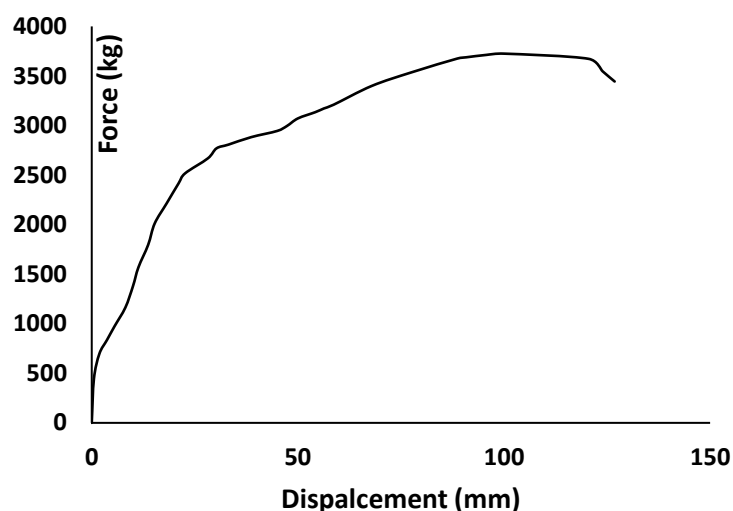
د) در مراحل بعدی و با اعمال بارهای بزرگتر، تعداد ترک ها در قسمت میانی تیرافزایش پیدا کرده است. افزایش ترک ها در منحنی بار-تغییر مکان، باعث ایجاد رفتار غیر خطی تیر گردیده و شیب منحنی این نمودار دائماً کاهش پیدا نموده، لذا می توان نتیجه گرفت که میزان سختی مقطع تیر در حال کاهش است. پس از بارگذاری تیر از ۹۰۰ تا ۱۵۰۰ kg، تعداد ترک ها افزایش نداشته و صرفاً عمق ترک ها بیشتر گردیده. در این حالت تقریباً تمام تنش های کششی بوجود آمده توسط میلگردهای فولادی مدفون در بتن تحمل گردیده است. همچنین در قسمت مقطع فشاری تیر، حداکثر تنش بوجود آمده ناشی از بارگذاری در دورترین محدوده فشاری به میزان ۱/۲ مقاومت فشاری بتن نرسیده که می توان نتیجه گرفت، در این محدوده نیز رفتار همچنان خطی می باشد. در چنین مواقعی که وضعیت بتن در قسمت کششی دارای ترک و قسمت فشاری دارای رفتار خطی می باشد نیز حالت الاستوپلاستیک رخ داده است.

ه) در گام بعدی با افزایش میزان بار وارده توسط جک هیدرولیکی و قرار دادن آن در آستانه ۱۵۰۰-۲۵۰۰ kg نیز، میزان تنش حداکثری در دورترین تار فشاری مقطع تیر بتنی از یک دوم مقاومت فشاری بتن بیشتر شده و این محدوده نیز وارد فاز غیر خطی می گردد. رفتار بتن دیگر خطی نیست.

ز) در بارگذاری بیش از ۲۵۰۰ kg منحنی بار - تغییر مکان معرف وضعیتی است که تحت آن میزان بار وارده و تغییر شکل خمشی تیر و کرنش فولاد در ناحیه ی کششی به حد تسلیم رسیده است. درحالی که بتن در ناحیه فشاری رفتار غیر خطی دارد در این حالت تار خنثی به شدت به سمت بالا حرکت می کند و در نهایت در بارگذاری ۳۵۷۲kg در دورترین تار فشاری بتن، تقریباً به کرنش بتن رسیده و بنابراین بتن مقاومت فشاری خود را از دست می دهد.

پس از بارگذاری، نتایج مطابق با جدول شماره ۵ نشان می دهد که تیر کنترل CB با میزان ظرفیت باربری ۳۵۷۲ کیلوگرم و نیز خیز حداکثری در مرکز دهانه به میزان ۱۲۷ میلیمتر دچار شکست گردید. همچنین تیر مقاوم سازی شده RF با یک لایه ورق CFRP به میزان ۶٪ دارای افزایش مقاومت فشاری و ۱۹٪ کاهش خیز نسبت به نمونه CB را کسب کرده است. این در حالی است که این ورق باعث گردیده تا ترک های خمشی ایجاد شده در این تیر کمتر از نمونه تیر کنترل باشد. شکل ۶ تیر بتن مسلح تقویت نشده بعد از بارگذاری را نشان می دهد.





شکل ۵، نمودار بار - تغییر مکان حاصل از بارگذاری تیر بتنی تقویت نشده



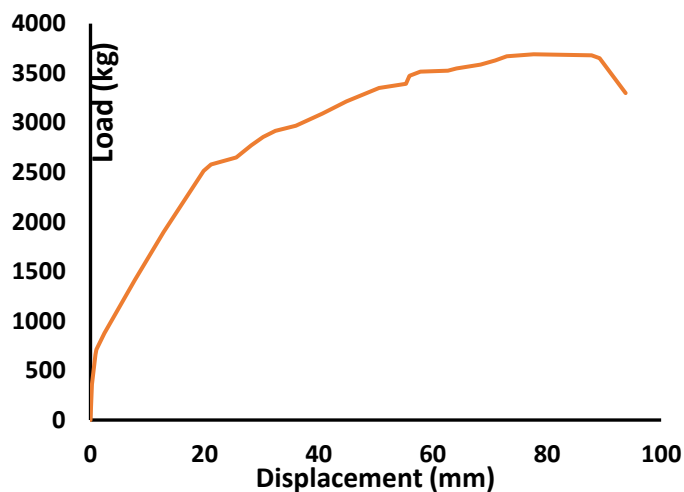
شکل ۶، تیر بتن مسلح تقویت نشده بعد از بارگذاری

#### ۵-۲-۲ مراحل بارگذاری تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق CFRP (BSCFRP)

شکل ۷، نمودار بار - تغییر مکان حاصل از بارگذاری تیر بتنی تقویت شده در آزمایشگاه می باشد. مراحل بارگذاری در نمونه تقویت شده به شرح زیر می باشد.

در شروع بارگذاری حدود ۱۵۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم توسط جک هیدرولیکی اعمال گردید در این حالت به دلیل کم بودن حداکثر تنش در منطقه کششی بتن در مقطع، ترک خوردگی ایجاد نشده و مقطع کاملاً به صورت الاستیک عمل می کرد. بارگذاری به صورت بار افزون تا نمایان شدن ترک هایی در خارج از محدوده خمشی در ۷۰۰ کیلوگرم ادامه یافت. در ادامه ی روند آزمایش ترک هایی در انتهای محدوده خمشی و خارج از قسمت تقویت شده در بار ۱۰۰۰ کیلوگرم مشاهده گردید و در بار ۱۶۰۰ کیلوگرم تقویت نمونه شروع به مقاومت کرده و صداهایی از ورق شنیده شد به نحوی که در این مرحله از بارگذاری محدوده میانی خمشی دچار ترک خوردگی گردید. با اضافه نمودن میزان بار در محدوده ۲۳۰۰ تا ۲۶۰۰ کیلوگرم بر روی نمونه ترک خوردگی در خارج از محدوده خمشی

مشاهده گردید و پس از وارد شدن به محدوده ۳۰۰۰ کیلوگرم گسترش ترک ها در محدوده خمش مشاهده شد. نهایتاً خرد شدگی سطح فوقانی تیر بتن مسلح و ترک سرتاسری در قسمت انتهایی ورق CFRP تحتانی تیر در بار ۳۶۰۰ کیلوگرم مشاهده و ثبت گردید. شکل ۹ و ۸ تیر بتن مسلح تقویت شده بعد از بارگذاری را نشان می دهد.



شکل ۷. نمودار بار - تغییر مکان تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق CFRP



شکل ۸. مقایسه تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق CFRP بعد از بارگذاری - RBI

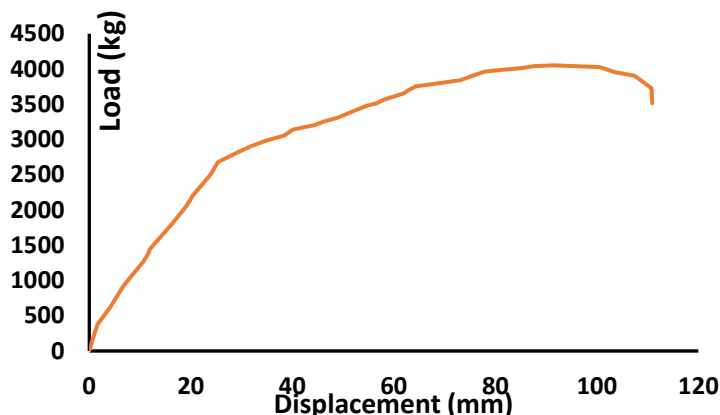


شکل ۹ - مکانیسم شکست در تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق CFRP

۳-۲-۵ مراحل بارگذاری تیر بتن مسلح تقویت شده با میلگرد GFRP (BSGFRP)

شکل ۱۰، نمودار بار - تغییر مکان حاصل از بارگذاری تیر بتنی تقویت شده با میلگرد GFRP در آزمایشگاه می‌باشد. مراحل بارگذاری در نمونه تقویت شده با میلگرد GFRP به شرح زیر می‌باشد. میلگرد شماره ۱۲ GFRP با مقاومت کششی ۱۰۰۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۶۰۰۰۰ مگاپاسکال با طول ۹۴۰ میلی‌متر و با نام تجاری FiReP مورد استفاده قرار گرفته است.

در شروع بارگذاری حدود ۱۵۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم توسط جک هیدرولیکی اعمال گردید در این حالت به دلیل کم بودن حداکثر تنش در منطقه کششی بتن در مقطع، ترک خوردگی ایجاد نشده و مقطع کاملاً به صورت الاستیک عمل می‌کرد. بارگذاری به صورت بار افزون تا نمایان شدن ترک‌هایی در محدوده خمشی و خارج از آن در ۴۰۰ کیلوگرم ادامه یافت. در ادامه ی روند آزمایش بارگذاری به صورت بار افزون تا قبل از محدوده ۲۲۰۰ کیلوگرم ادامه یافت که در نتیجه آن ترک‌ها تنها در خارج از محدوده تقویت ظاهر شده‌اند و پس آن با ادامه روند آزمایش و اضافه نمودن بار تا محدوده ۲۲۰۰ کیلوگرم ترک‌ها در داخل محدوده تقویت نیز ظاهر شده‌اند. با ادامه روند افزایش بار تا محدوده ۳۸۰۰ کیلوگرم همچنان ترک‌ها در محدوده تقویت و خارج آن قابل رویت بوده و نهایتاً خرد شدگی سطح فوقانی تیر بتن مسلح و ترک سرتاسری در قسمت انتهایی میلگرد GFRP تحتانی تیر در بار ۴۱۰۰ کیلوگرم مشاهده و ثبت گردید. شکل ۱۱ نحوه استقرار میلگرد GFRP و شکل ۱۲ و ۱۳ تیر بتن مسلح تقویت شده بعد از بارگذاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. نمودار بار - تغییر مکان تیر بتنی مسلح تقویت شده با میلگرد GFRP



شکل ۱۱. نحوه قرارگیری میلگرد GFRP در وسط تیر بتن مسلح



شکل ۱۲ تیر بتن مسلح تقویت شده با میلگرد GFRP بعد از بارگذاری



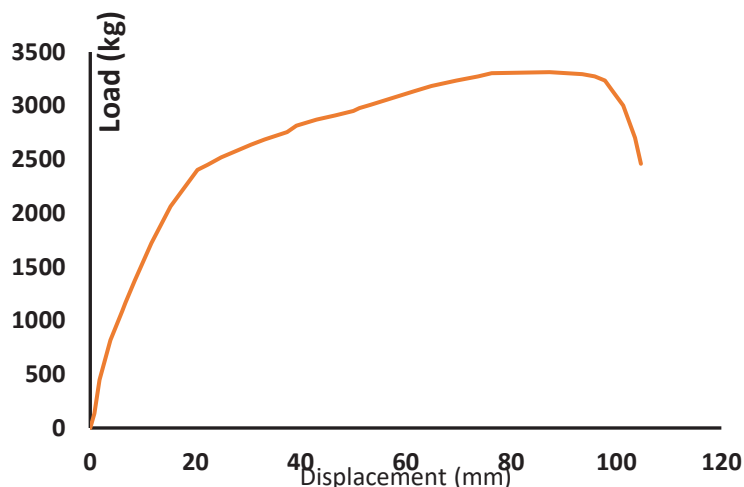
شکل ۱۳ مکانیسم شکست در تیر بتن مسلح تقویت شده با میلگرد GFRP

#### ۵-۲-۴ مراحل بارگذاری تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق فولادی (BSSSteel)

شکل ۱۴، نمودار بار- تغییر مکان حاصل از بارگذاری تیر بتنی تقویت شده با ورق فولادی در آزمایشگاه می باشد. مراحل بارگذاری در نمونه تقویت شده با ورق فولادی به شرح زیر می باشد. نوع ورق استفاده شده در این آزمایش از نوع فولادی به ابعاد  $۹۴۰ * ۳۰۰ * ۶$  میلی متر و  $۶$  رپ فولادی به ابعاد  $۱۷۰ * ۱۰۰ * ۶$  میلی متر مطابق شکل ۱۵ اجرا گردید. کلیه رپ های فولادی جهت اتصال به نمونه در محل سوراخ های تعبیه شده با قطر  $۲۰$  میلی متر سوراخ گردید. محل تقویت شده در میانه ی تیر و به طول  $۹۴$  سانتی متر می باشد.

همانطور که مشاهده می شود در شروع بارگذاری حدود  $۱۵۰$  تا  $۶۰۰$  کیلوگرم توسط جک هیدرولیکی اعمال گردید در این حالت به دلیل کم بودن حداکثر تنش در منطقه کششی بتن در مقطع، ترک خوردگی ایجاد نشده و مقطع

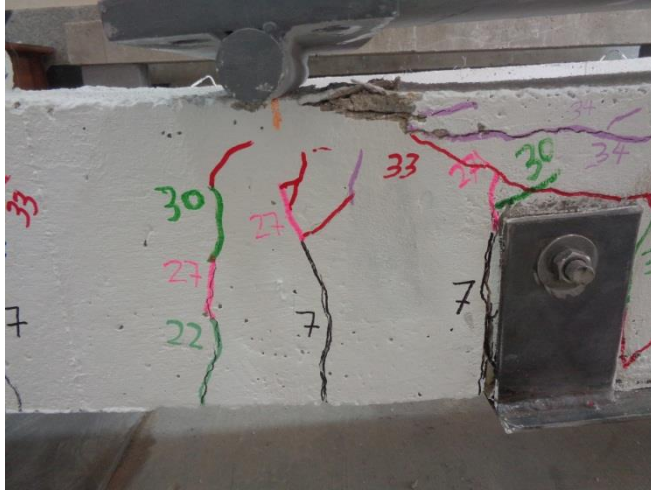
کاملاً به صورت الاستیک عمل می نمود. بارگذاری به صورت بار افزون تا نمایان شدن ترک هایی در خارج از محدوده خمشی و محدوده در ۷۰۰ کیلوگرم ادامه یافت. در ادامه ی روند آزمایش ترک هایی در انتهای محدوده خمشی و خارج از قسمت تقویت شده در بار ۱۸۰۰ کیلوگرم مشاهده گردید و اولین ترک ها در کنار رپ های ورق فولادی در بار ۲۷۰۰ کیلوگرم خارج از محدوده تقویت شده مشاهده گردید به نحوی که در این مرحله از بارگذاری محدوده میانی خمشی دچار ترک خوردگی نگردیده است. با اضافه نمودن میزان بار در محدوده ۲۷۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلوگرم بر روی نمونه ترک خوردگی در خارج از محدوده خمشی مشاهده گردید و پس از وارد شدن به محدوده ۳۰۰۰ کیلوگرم گسترش ترک ها در محدوده ورق فولادی مشاهده و اولین ترک در محدوده تقویت در ناحیه خمشی تیر بتن مسلح در بار ۳۰۰۰ کیلوگرم ثبت گردید. نهایتاً خرد شدگی سطح فوقانی تیر بتن مسلح و ترک سرتاسری در قسمت انتهایی ورق فولادی تحتانی تیر در خارج از محدوده تقویت شده (ناحیه خمشی) در بار ۳۴۰۰ کیلوگرم مشاهده و ثبت گردید.



شکل ۱۴. نمودار بار - تغییر مکان تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق فولادی



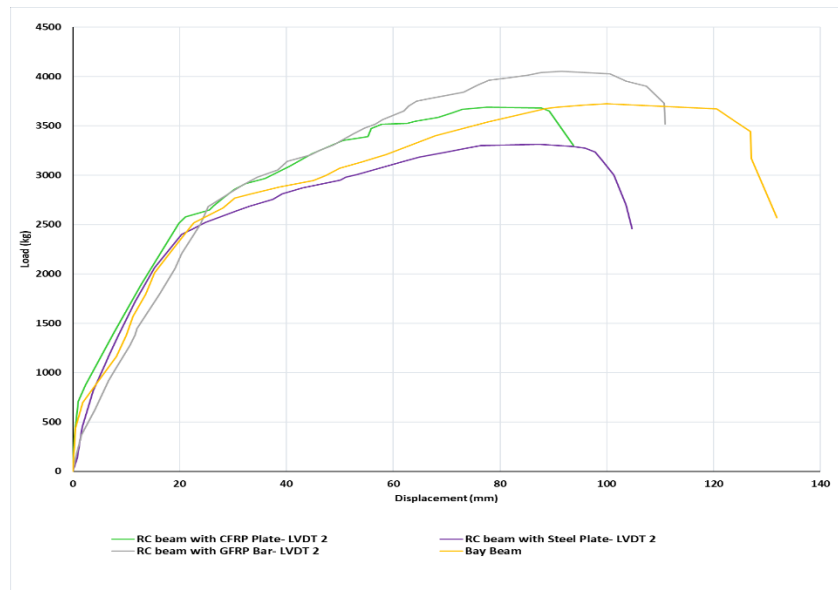
شکل ۱۵- نحوه بارگذاری تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق فولادی



شکل ۱۶. مکانیسم شکست در تیر بتن مسلح تقویت شده با ورق فولادی

### ۵-۵. مقایسه ی نمونه های BS، BSGFRP، BSCFRP، BS Steel

تنها تفاوت بین نمونه ی BS و نمونه های BSCFRP، BSGFRP، BS Steel در این است که نمونه ی BS بدون مقاوم سازی بوده در حالی که نمونه های دیگر به طول ۹۴۰ میلیمتر، قسمت تحتانی و وسط تیر به ترتیب با ورق CFRP، میلگرد GFRP و ورق فولادی مقاوم سازی شده است. نمودار بار- تغییر مکان نمونه های BS، BSCFRP، BSGFRP و BS Steel در شکل ۱۷ آمده است. حداکثر ظرفیت نیرو در تیرهای بتن مسلح فوق به ترتیب ۳۶۸۰، ۳۳۱۲ و ۴۰۵۱ کیلوگرم می باشد. جابجایی در وسط تیرها به ترتیب ۱۳۱/۸۴، ۹۳/۵۴، ۱۱۰/۹۱ و ۱۰۴/۷۰ میلی متر بوده است. کاهش جابجایی در وسط تیرهای مقاوم سازی شده نسبت به تیر مقاوم سازی نشده به علت ازدیاد سختی تیر در محدوده ی خمشی می باشد.



شکل ۱۷ نمودار بار- تغییر مکان نمونه های BS، BSCFRP، BSGFRP، BS Steel

با توجه به اینکه در این تحقیق فقط ۹۴۰ میلیمتر از محدوده ی خمشی مقاوم سازی گردید ظرفیت تیر بتن مسلح مقاوم سازی شده تقریباً مشابه تیر بتن مسلح مقاوم سازی نشده می باشد. این در حالی است که میبایست بر روی نحوه ی گسترش ترکها بررسی انجام گیرد. اولین ترکهای به وجود آمده در نمونه های BS، BSCFRP،

BSSSteel و BSGFRP در بارهای ۴، ۷، ۴۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم به وجود آمد. محل ترکهای اولیه ی به وجود آمده برای تیرهای فوق به ترتیب محدوده خمشی، خارج از محدوده خمشی، محدوده ی خمشی و در نهایت برای نمونه BSSSteel ناحیه ی خمشی و خارج از محدوده ی تقویت شده اتفاق افتاد.

اولین ترک به وجود آمده در محدوده خمشی و ناحیه تقویت شده نمونه ی BSCFRP به ترتیب در بارگذاری ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم و آخرین ترک در محدوده تقویتی، ۳۰۰۰ کیلوگرم ثبت گردید. گسترش ترک ها در خارج از محدوده ی تقویت تشکیل گردید به طوری که در بار ۳۶۸۰ کیلوگرم قسمت تحتانی تیر، در انتهای ناحیه ی تقویتی خمشی، تیر ترک خورده و همچنین نقطه ای از قسمت فوقانی تیر در محدوده ی خمشی و خارج از ناحیه ی تقویتی، خرد شدگی بتن به وجود آمد. طول ترک خوردگی در این نمونه در محدوده ی تقویت شده تقریباً ۵۰ درصد ارتفاع تیر می باشد.

در نمونه ی BSGFRP گسترش ترکها در محدوده ی خمشی اتفاق افتاد. ولی در بار ۴۰۵۱ کیلوگرم قسمت تحتانی تیر، در انتهای ناحیه ی تقویتی خمشی، تیر ترک خورده و همچنین نقطه ای از قسمت فوقانی تیر در محدوده ی خمشی و خارج از ناحیه ی تقویتی، خرد شدگی بتن به وجود آمد. طول ترکها در محدوده تقویت شده تقریباً ۸۰ درصد ارتفاع تیر می باشد.

اولین ترک به وجود آمده در محدوده خمشی و ناحیه تقویت شده نمونه ی BSSSteel به ترتیب در بارگذاری ۷۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم و آخرین ترک در محدوده تقویتی، ۳۳۰۰ کیلوگرم ثبت گردید. گسترش ترک ها در خارج از محدوده ی تقویت تشکیل گردید به طوری که در بار ۳۳۱۲ کیلوگرم قسمت تحتانی تیر، در انتهای ناحیه ی تقویتی خمشی، تیر ترک خورده و همچنین نقطه ای از قسمت فوقانی تیر در محدوده ی خمشی و خارج از ناحیه ی تقویتی، خرد شدگی بتن به وجود آمد. طول ترک خوردگی در این نمونه در محدوده ی تقویت شده تقریباً ۴۰ درصد ارتفاع تیر می باشد.

با توجه به ترک خوردگی بسیار کم در ناحیه ی خمشی نمونه ی BSSSteel نسبت به نمونه های BSCFRP و BSGFRP و همچنین با توجه به اینکه محل شکست هر سه نمونه در خارج از محدوده ی تقویت بوده و با در نظر گرفتن مسایل اجرایی و اقتصادی، طرح مقاوم سازی در این روش *over Design* تلقی می شود. جدول شماره ۵ نتایج ظرفیت باربری و جابجایی وسط تیر های بتن مسلح تقویت شده و تقویت نشده را نشان می دهد.

جدول ۵ نتایج میزان ظرفیت باربری و خیز میانی و طول مقاوم سازی های بکاربرده شده در تیر های بتن مسلح آزمایشگاهی

نام تیر	بار وارده	جابجایی	طول	محل نصب
	Kg	mm	mm	
BS	3537	131/84	-	-
BSCFRP	3680	93/54	۹۴۰	تحتانی میانی
BSGFRP	4051	110/91	۹۴۰	تحتانی میانی
BSSTEEL	3312	104/70	۹۴۰	تحتانی میانی

## ۶. بحث و نتیجه گیری

بعد از اعمال بارگذاری بر روی تیرهای بتن مسلح تقویت شده و تقویت نشده مشاهده شد که ظرفیت باربری تیرهای BSCFRP، BSGFRP و BSSSteel نسبت به تیر BS تفاوت چندانی ندارد. این در حالی است که نوع شکست در همه ی تیرها، خمشی می باشد. همچنین محل پدید آمدن اولین ترکها در تیرهای بتن مسلح تحت بارگذاری خمشی محض، متفاوت است. به طوری که در بارگذاری ۴۰۰ کیلوگرم اولین ترک در ناحیه ی خمشی

تیر BS، در بارگذاری ۷۰۰ کیلوگرم اولین ترک در خارج از محدوده خمشی تیر BSCFRP، در بارگذاری ۴۰۰ کیلوگرم اولین ترک در محدوده ی خمش و خارج از محدوده ی خمش تیر BSGFRP و در بارگذاری ۷۰۰ کیلوگرم در انتهای ناحیه تقویت شده و خارج از محدوده خمشی اولین ترک ها در تیر BSSSteel مشاهده شد. با افزایش تنش فشاری در تیرهای بتن مسلح، تیر در ناحیه فوقانی، دچار خرد شدگی می شود. در تیرهای تقویت شده به علت جذب انرژی بیشتر این تخریب شدید تر رخ می دهد. نکته ی قابل توجه در تیرهای تقویت شده، دور شدن ترکها از ناحیه ی خمشی نسبت به تیر بتن مسلح تقویت نشده است. بهترین و ساده ترین روش برای دور کردن ترکها، استفاده از ورق CFRP در مقایسه با ورق فولادی و میلگرد GFRP می باشد. همچنین پیشنهاد می گردد تیرهایی که دارای ضعف موضعی هستند با مصالح تقویتی مقاوم سازی گردند بدون اینکه افزایش باربری ایجاد شود. همچنین با انجام تقویت موضعی در ناحیه خمشی، در بعضی از تیرها پیدایش اولین ترک ها در خارج از محدوده خمشی اتفاق می افتد در حالیکه شکست خمشی نهایی در محدوده میانی تیر اتفاق می افتد.

## ۷. تشکر و قدردانی

نهایت قدردانی از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت برای آزمایش نمونه های آزمایشگاهی و شرکت ساوانا بتن، شرکت تیر ستون پارس، که همکاری لازم جهت این تحقیق داشته اند.

## ۶. مراجع

- [1] ACI Committee 440. (2017). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures: ACI 440.2 R-17*. American Concrete Institute.
- [2] American Concrete Institute. Committee 440. (2006). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars: ACI 440.1 R-06*. American Concrete Institute.
- [3] Saliha H, Bennetta C, Matamorosb A. (2021). *Evaluation of novel combined CFRP-steel retrofit for repairing distortion-induced fatigue*, *Journal of Constructional Steel Research*, 182: 106642.
- [4] Eslamia A, Shayeghb H R, Moghavema A, Ronaghc H R. (2019). *Experimental and analytical investigations of a novel end anchorage for CFRP flexural retrofits*, *Composites Part B: Engineering*, 176: 107309.
- [5] Hassan H. F., Medhloom M. T. K., Ahmed A. S., & Al-Dahlaki M. H. (2020). *Flexural performance of concrete beams reinforced by gfrp bars and strengthened by cfrp sheets*. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00417.
- [6] Ali, H, Assih J, Li A. (2021). *Flexural capacity of continuous reinforced concrete beams strengthened or repaired by CFRP/GFRP sheets*, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 104:102759.
- [7] Elbana A, Junaid M T. (2020). *Determination of flexural capacity for GFRP-reinforced concrete beams retrofitted using external CFRP sheet*, *Structures*, 27: 1384-1395.
- [8] Benmokrane B, Masmoudi R. (1996). *Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars*. *Struct J.*; 93: 46-55.
- [9] M'Bazaa I, Missihoun M, Labossiere P. (1996). *Strengthening of reinforced concrete beams with CFRP sheets*. *First International Conference on Composites in Infrastructure National Science Foundation National Science Foundation*.
- [10] Aghabozorgi, P., Khaloo, A. (2020). *Numerical investigation of the effects of compression GFRP reinforcement on the flexural strength and ductility of reinforced concrete beams*. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1), 31-45. (In Persian)
- [11] Sharifi, Y., khojastefar, E. (2018). *A method to assess capacity and deflection of flexural reinforced concrete members retrofitted with FRP*. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 3(2), 77-88. (In Persian)



- [12] Baderan, M., Varaste Poor, H. (2016). An experimental method to prevent fast fracture phenomenon in bending of carbon and glass reinforced concrete beams. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 1(2), 73-82. (In Persian)
- [13] Talebzadeh, M., Rostamian, M. (2018). Modeling of reinforced beams with FRP sheet and its validation with laboratory results. *Civil and Architecture Conference, Tabriz, Iran.* (In Persian)
- [14] Kok S Leong. (2017). *Effect Of Beam Size & FRP Thickness On Interfacial Shear Stress Concentration & Failure Mode In FRP Strengthened Beam"* MS Thesis, Singapor.
- [15] Pancha S., Norris T, Saadatmanesh H, Ehsani M. (2016). *Improving The Serviceability of Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets.* *Federal Highway.*
- [16] Podoloski S., Taqieddin ZN. (2018). *Elasto-Plastic and Damage Modeling of Reinforced Concrete Ph.D. Dissertation, Dept. Civil & Environmental Engineering, Louisiana State Univ. Baton Rouge LA.*
- [17] Jarival M., Obaidat YT, Heyden S, Dahlblom O. (2018). *The Effect of CFRP and CFRP/ Concrete Interface Models When Modeling Retrofitted RC Beams With FEM"* *Journal Of Composite Structures.*
- [18] Najafgholipour, S.M. Dehghan, M. Khani, A. Heidari (2018). *The performance of lap splices in RC beams under inelastic reversed cyclic loading.* *Structures* 24 July. 2018. 07.011.
- [19] Garsia G., Heyden S, Dahlblom O. (2019). *The Effect of CFRP and CFRP/Concrete Interface Models When Modeling Retrofitted RC Beams with Fem"* *Journal of Composite Structures.*
- [20] Chaboki, H. R., Ghalehnovi, M., Karimipour, A., & De Brito, J. (2018). *Experimental study on the flexural behavior and ductility ratio of steel fibers coarse recycled aggregate concrete beams.* *Construction and Building Materials*, 186, 400-422.
- [21] Jahangir, H., & Esfahani, M. R. (2020). *Experimental analysis on tensile strengthening properties of steel and glass fiber reinforced inorganic matrix composites.* *Scientia Iranica.*
- [22] Rezaiee Pajand, M., Rezaiee-Pajand, A., Karimipour, A., & Abad, J. M. N. (2020). *A particle swarm optimization algorithm to suggest formulas for the behaviour of the recycled material reinforced concrete beams.* *Int. J. Optim. Civil Eng*, 10(3), 451-479.
- [23] Jahangir, H., Esfahani, M.R., (2017). *Strain of Newly – Developed Composites Relationship in Flexural Tests (In Persian)"* *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2018; 5(Special Issue 3): 92-107.
- [24] Bagheri, M., Chahkandi, A., and Jahangir, H. (2019). *Seismic Reliability Analysis of RC Frames Rehabilitated by Glass Fiber-Reinforced Polymers.* *International Journal of Civil Engineering.*
- [25] Karimipour, A., & Ghalehnovi, M. (2021). *Comparison of the effect of the steel and polypropylene fibres on the flexural behaviour of recycled aggregate concrete beams.* *Structures*, 29, 129-146.
- [26] ACI 318-19. *Building Code Requirements for Structural Concrete.* Reported by ACI Committee 318.