

## تأثیر الیاف کامپوزیتی کربن در افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح با بتن ضعیف

حمیدرضا غلامی، کارشناس ارشد عمران- مهندسی زلزله، آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساری، ساری  
حسین اعلائی، کارشناس ارشد عمران- مهندسی زلزله، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قائم‌شهر، قائم‌شهر

### چکیده

شوند. الیاف کامپوزیتی به صورت پوشش‌های بیرونی و به منظور افزایش مقاومت و بهسازی سازه‌های بتنی موجود از اواسط دهه ۱۹۸۰ تاکنون در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

امروزه تعداد طرح‌هایی که در ارتباط با سیستم پلیمرهای تقویت شده با الیاف در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفته، به طور چشمگیری افزایش یافته است؛ به طوری که طی ۱۰ سال گذشته از تعداد اندک به چندین هزار طرح در حال حاضر رسیده است. اعضای سازه‌های تقویت شده با الیاف کامپوزیتی به صورت پوشش‌های بیرونی عبارتند از تیرها، دالها، ستونها، دیوارها، اتصالات، دودکشها، طاقهای گنبدی شکل، تونلها، سیلوها، لوله‌ها و خراباها. الیاف کامپوزیتی در ابتدا به صورت دورپیچ و در راستای طولی برای تقویت ستونها به کار می‌رفت و با گذشت زمان به عنوان یکی از عناصر تقویت دیگر اعضای سازه‌ای ساختمان از جمله تیرها مطرح گردید. الیاف کامپوزیتی که به عنوان مواد تقویتی به کار می‌روند دارای خواصی مانند مقاومت بالا، وزن کم، نسبت مقاومت به وزن بالا، سرعت عملیات اجرا، مقاوم در برابر شرایط جوی و خوردگی، عدم نیاز به ماشین آلات و تجهیزات خاص می‌باشد. مواد کامپوزیتی از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ فایبر (الیاف) و رزین (ماده چسباننده). فایبرها که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در ماده کامپوزیتی محسوب می‌شوند. رزین اصولاً به عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند که فایبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد [۲].

محققین زیادی به بررسی جنبه‌های مختلف تقویت

در بسیاری از موارد از الیاف کامپوزیتی به منظور تقویت اعضای سازه بتنی استفاده می‌شود، اما اینکه بتن در چه سطحی از مقاومت باشد تا بتوان آن را با الیاف کامپوزیتی تقویت نمود، نیاز به مطالعه و تحقیق بیشتری دارد. در این تحقیق به بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح با بتن‌های ضعیف که به وسیله الیاف کامپوزیتی کربن تقویت شده‌اند، پرداخته شد. به این منظور ۲۸ نمونه تیر بتن مسلح با مقاومت‌های ۸ تا ۲۰ مگاپاسکال در آزمایشگاه ساخته شده و ۱۴ نمونه از آنها با یک لایه الیاف کامپوزیتی کربن<sup>۱</sup> مسلح گردیدند. سپس تمامی نمونه‌ها توسط نیروی متمرکز در وسط دهانه تحت اثر خمش قرار گرفتند. با بررسی نتایج به دست آمده می‌بینیم که الیاف کامپوزیتی در نمونه‌های با بتن رده پایین به دلیل جدادگی آنها از بتن و ترک‌های متعدد خمشی و خمشی- برشی به عرض تا ۲ میلیمتر، تأثیر چندانی در افزایش ظرفیت خمشی مقطع نداشته و در نمونه‌های با مقاومت بتن ۱۸ مگاپاسکال به بالا تأثیر بسیار خوبی را نشان می‌دهند.

**کلیدواژه‌ها:** ظرفیت خمشی، بتن مسلح، الیاف کامپوزیتی کربن، نوع شکست

### ۱- مقدمه

دورپیچ کردن با فولاد، افزایش سطح مقطع با بتن ریزی و اضافه کردن آرماتور، تزریق اپوکسی، بخیه زدن، پیش- تنیدگی خارجی و استفاده از الیاف کامپوزیتی از جمله روش‌هایی هستند که اعضای ساختمانی بسته به درجه مقاومت ساختمان در برابر زلزله، سطح خسارت محتمل، نوع اعضا و اتصالات آنها می‌توانند به وسیله آنها تعمیر و تقویت

## ۲- نمونه‌های مدلسازی شده

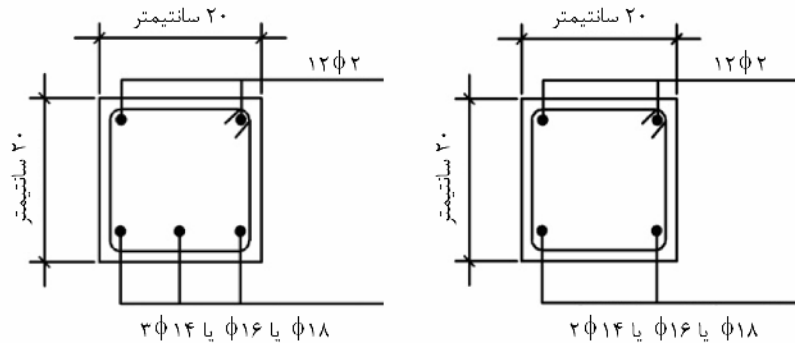
در این تحقیق، ۲۸ نمونه تیر بتنی در رده‌های بتن بین ۸ تا ۲۰ مگاپاسکال همگی به طول ۲ متر و به ابعاد مقطع ۲۰×۲۰ سانتیمتر مورد مدلسازی قرار گرفتند. دو عدد میلگرد به قطر ۱۲ میلیمتر در بالای مقطع و تعدادی میلگرد با تنش تسلیم ۳۰۰ مگاپاسکال مطابق جدول (۱) در پایین مقطع قرار گرفتند.

پس از سپری شدن دوره نگهداری، ۵۰ درصد نمونه‌ها توسط یک لایه الیاف کامپوزیتی کربن با مدول الاستیسیته ۲۴۰ گیگاپاسکال، کرنش حد نهایی ۰/۰۱۵۵، ضریب کاهش مقاومت ۰/۸۰۷۵ و ضخامت ۰/۱۱۷ میلیمتر در ناحیه کششی تقویت شدند. برای نصب الیاف کامپوزیتی روی نمونه‌ها از روش چسباندن تر استفاده شد [۲]. برای این کار سطح بتن کاملاً صاف و پرداخت شد تا هیچ‌گونه زائده‌ای روی آن نباشد و گوشه‌های ناصاف از بین برود. پس از شستشوی سطوح بتن با آب و خشک شدن، ترکیبی از دو رزین با نسبت‌های مشخص تهیه گردید. سطح بتن کاملاً آغشته به رزین شده و سپس لایه الیاف در سرتاسر ناحیه کششی تیرهای ۲ متری چسبانده شد و مراقبت لازم تا گیرش کامل به عمل آمد. مقطع نمونه تیرهای ساخته شده در آزمایشگاه و نمای تیرها پس از تقویت در شکل (۱) نشان داده شده است.

اعضای سازه‌ای با الیاف کامپوزیتی پرداخته‌اند که به عنوان مثال سادات‌منش و احسانی [۳]، شریف و همکاران [۴] و نوریس و همکاران [۵] به تقویت تیرهای بتن مسلح تحت برش و خمش با لایه‌های الیاف کامپوزیتی پرداختند. پک و همکاران [۶] به تحقیق روی سازه‌های بتنی مسلح شده با الیاف کامپوزیتی در بتن‌های با مقاومت کمتر از ۴۱ مگاپاسکال پرداختند. کونسزا و همکاران [۷] بتن‌های با مقاومت ۷۰ مگاپاسکال را با الیاف کامپوزیتی مسلح نمودند و تری‌آلت و همکاران [۸] رفتار بتن‌های با مقاومت ۱۰۰ مگاپاسکال مسلح شده با الیاف را تحت خمش مورد بررسی قرار دادند. ژای و همکاران [۹] شکستی مرکب از جداسدگی پوشش میلگرد و جداسدگی انتهای ورق را در تیرها مشاهده نمود. سرونو و همکاران [۱۰] به بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با لمینیت تحت اثر بارگذاری سیکلیک، آیسو و همکاران [۱۱] به بررسی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با میلگردهای کامپوزیتی و چیت‌سازان و همکاران [۱۲] به بررسی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با الیاف کامپوزیتی شیشه پرداختند. اما با این وجود تاکنون هیچ‌گونه تحقیقی در ارتباط با تیرهای با مقاومت پایین انجام نشده است که در این مقاله به بررسی آن پرداخته می‌شود.

جدول (۱): مشخصات نمونه‌های مدلسازی شده.

شماره نمونه	مقاومت بتن مگاپاسکال	تعداد و قطر میلگرد کششی	تقویت کامپوزیت
۱	۸	T۲ ۱۴	
۲	۸	T۲ ۱۴	
۳	۸	T۲ ۱۴	
۴	۸	T۲ ۱۴	
۵	۱۰	T۲ ۱۴	
۶	۱۰	T۲ ۱۴	
۷	۱۰	T۲ ۱۴	
۸	۱۰	T۲ ۱۴	
۹	۱۲	T۳ ۱۴	
۱۰	۱۲	T۳ ۱۴	
۱۱	۱۲	T۳ ۱۴	
۱۲	۱۲	T۳ ۱۴	
۱۳	۱۴	T۳ ۱۴	
۱۴	۱۴	T۳ ۱۴	
۱۵	۱۴	T۳ ۱۴	
۱۶	۱۴	T۳ ۱۴	
۱۷	۱۶	T۳ ۱۶	
۱۸	۱۶	T۳ ۱۶	
۱۹	۱۶	T۳ ۱۶	
۲۰	۱۶	T۳ ۱۶	
۲۱	۱۸	T۳ ۱۶	
۲۲	۱۸	T۳ ۱۶	
۲۳	۱۸	T۳ ۱۶	
۲۴	۱۸	T۳ ۱۶	
۲۵	۲۰	T۳ ۱۸	
۲۶	۲۰	T۳ ۱۸	
۲۷	۲۰	T۳ ۱۸	
۲۸	۲۰	T۳ ۱۸	



شکل (۱): مقطع و نمای تیرهای مدلسازی شده و تقویت شده.

۱۰۰ کیلوگرم روی مانیتور دستگاه قابل مشاهده بود. نتایج حاصل در گامهای مختلف بارگذاری روی فرمهای مربوطه ثبت شد تا اینکه قطعه به صورت فشاری یا نرم دچار شکست شد و دستگاه از حالت بارگذاری خارج شده و متوقف گردید. از ترکهای ایجاد شده در طول بارگذاری و نوع شکست حاصله و وضعیت الیاف کامپوزیتی در پایان بارگذاری تصاویری جهت تجزیه و تحلیل تهیه گردید. در حین آزمایش هر تیر مقدار نیرو و تغییرشکلها تا لحظه شکست ثبت گردید. با توجه به نزدیک بودن مقدار بار متمرکز و تغییرشکلها در لحظه شکست نمونه‌ها، جهت نتیجه‌گیری بهتر، از نتایج نزدیک به هم متوسط گرفته شد و در نتیجه، نمونه‌ها در چهار گروه تقسیم‌بندی شدند. رده‌های بین ۸ تا ۱۰ مگاپاسکال در گروه یک، رده‌های بین ۱۱ تا ۱۳ مگاپاسکال در گروه دو، رده‌های بین ۱۴ تا ۱۷ مگاپاسکال در گروه سه و رده‌های بین ۱۸ تا ۲۱ مگاپاسکال در گروه چهار قرار گرفتند و از متوسط نتایج حاصله در هر گروه در مقایسه‌ها استفاده شد. در جدول (۲)، متوسط نتایج نیرو و خیز لحظه شکست گروههای یک، دو، سه و چهار در حالت‌های بدون تقویت و در حالت تقویت شده با الیاف کامپوزیتی آمده است.

### ۳- رفتار نمونه‌های مدلسازی شده تحت خمش و مقایسه ظرفیت آنها

پس از تقویت تیرها با الیاف کامپوزیتی به فاصله یک هفته پس از آن تست خمشی نمونه‌ها در تابستان ۱۳۸۹ در آزمایشگاه ساختمان آموزشدهنده سما دانشگاه آزاد ساری انجام شد. برای این کار از جک خمشی با ظرفیت بارگذاری ۴۰ تن، نمایشگر نیرو با گامهای ۰/۱ تن، دهانه آزاد ۲ متر، ارتفاع فک ۲۲ سانتیمتر و با اجازه تغییرشکل خمشی ۷ سانتیمتر استفاده گردید. جهت انجام آزمایش تکیه‌گاههای دستگاه در فاصله ۹۰ سانتیمتر از هر طرف باز شده، به طوری که دهانه آزمایش ۱۸۰ سانتیمتر شد. جهت جلوگیری از لغزش نمونه‌ها روی نشیمن و فک اعمال‌کننده بار توسط قطعات پلاستیکی پوشش گردیده و نمونه‌های کدگذاری شده روی دستگاه قرار داده شدند. پس از استقرار نمونه‌ها و تنظیم و آماده شدن دستگاه و نصب ابزار لازم جهت ثبت خیز در زیر نمونه و مشخص نمودن سه گروه ناظر بر آزمایش با فرمهای از قبل تنظیم شده جهت ثبت نتایج بارگذاری و خیز تا لحظه شکست، آزمایش آغاز گردید. با تماس جک فشاری روی نمونه مقدار نیرو شروع به افزایش نمود. مقدار بار با گامهای

جدول (۲): متوسط نتایج نیرو-خیز گروههای یک تا چهار.

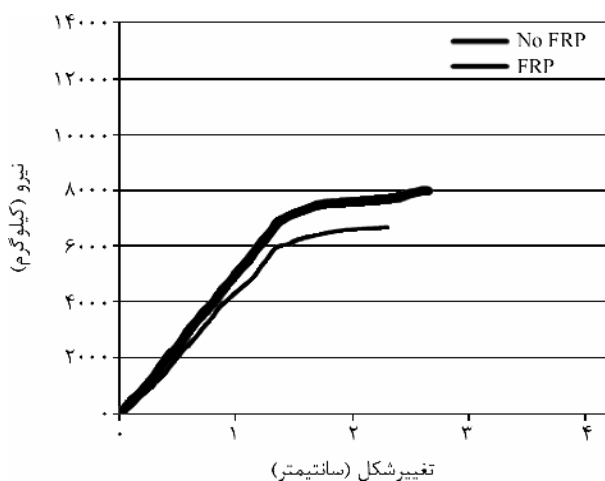
گروه یک بدون تقویت		گروه یک با تقویت		گروه دو بدون تقویت		گروه دو با تقویت		گروه سه بدون تقویت		گروه سه با تقویت		گروه چهار بدون تقویت		گروه چهار با تقویت	
نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵۰۰	۰/۰۵	۵۰۰	۰/۰۷	۵۰۰	۰/۱۲	۵۰۰	۰/۱۵	۵۰۰	۰/۱	۵۰۰	۰/۱۵	۵۰۰	۰/۰۵	۵۰۰	۰/۱
۱۰۰۰	۰/۰۹	۱۰۰۰	۰/۱۵	۱۰۰۰	۰/۲۳	۱۰۰۰	۰/۲۸	۱۰۰۰	۰/۲	۱۰۰۰	۰/۳	۱۵۰۰	۰/۱۷	۱۵۰۰	۰/۳
۱۵۰۰	۰/۱۳	۱۵۰۰	۰/۲	۱۵۰۰	۰/۳۳	۱۵۰۰	۰/۴	۱۵۰۰	۰/۲۷	۱۵۰۰	۰/۴۴	۲۰۰۰	۰/۲۵	۲۰۰۰	۰/۴

## ادامه جدول (۲): ...

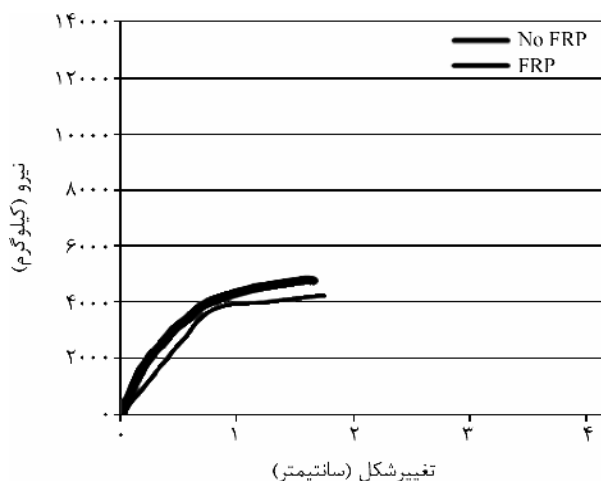
گروه چهار با تقویت		گروه چهار بدون تقویت		گروه سه با تقویت		گروه سه بدون تقویت		گروه دو با تقویت		گروه دو بدون تقویت		گروه یک با تقویت		گروه یک بدون تقویت	
نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز	نیرو	خیز
۲۰۰۰	۰/۱۸	۲۰۰۰	۰/۲۵	۲۰۰۰	۰/۴۲	۲۰۰۰	۰/۵	۲۰۰۰	۰/۳۵	۲۰۰۰	۰/۶۵	۲۵۰۰	۰/۳۵	۲۵۰۰	۰/۵
۲۵۰۰	۰/۲۲	۲۵۰۰	۰/۳	۲۵۰۰	۰/۵۲	۲۵۰۰	۰/۶	۲۵۰۰	۰/۴۵	۲۵۰۰	۰/۷	۳۰۰۰	۰/۴۵	۳۰۰۰	۰/۶
۳۰۰۰	۰/۲۶	۳۰۰۰	۰/۳۵	۳۰۰۰	۰/۶	۳۰۰۰	۰/۷	۳۰۰۰	۰/۵۵	۳۰۰۰	۰/۹۵	۳۵۰۰	۰/۶	۳۵۰۰	۰/۸
۳۵۰۰	۰/۲۹	۳۵۰۰	۰/۴	۳۵۰۰	۰/۷	۳۵۰۰	۰/۸	۳۵۰۰	۰/۶۵	۳۵۰۰	۱/۱۵	۴۰۰۰	۰/۷۵	۴۰۰۰	۱/۲
۴۰۰۰	۰/۳۳	۴۰۰۰	۰/۴۸	۴۰۰۰	۰/۸	۴۰۰۰	۰/۹	۴۰۰۰	۰/۷۵	۴۰۰۰	۱/۳۵	۴۵۰۰	۱/۱۵	۴۱۰۰	۱/۴
۴۵۰۰	۰/۳۷	۴۵۰۰	۰/۵۵	۴۵۰۰	۰/۹	۴۵۰۰	۱/۰۵	۴۵۰۰	۰/۸۵	۴۵۰۰	۱/۶۵	۴۷۰۰	۱/۵۵	۴۲۰۰	۱/۷
۵۰۰۰	۰/۴	۵۰۰۰	۰/۶	۵۰۰۰	۱	۵۰۰۰	۱/۱۷	۵۰۰۰	۱	۵۰۰۰	۱/۸۵	۴۷۰۰	۱/۶۵	۴۲۰۰	۱/۸
۵۵۰۰	۰/۴	۵۵۰۰	۰/۶۵	۵۵۰۰	۱/۱	۵۵۰۰	۱/۲۵	۵۵۰۰	۱/۱۵	۵۵۰۰	۲/۱۵				
۶۰۰۰	۰/۵	۶۰۰۰	۰/۷	۶۰۰۰	۱/۲	۶۰۰۰	۱/۳۶	۶۰۰۰	۱/۴	۵۶۰۰	۲/۴				
۶۵۰۰	۰/۵۵	۶۵۰۰	۰/۷۵	۶۵۰۰	۱/۳	۶۱۰۰	۱/۴۵	۶۵۰۰	۱	۵۷۰۰	۲/۶				
۷۰۰۰	۰/۶	۷۰۰۰	۰/۸	۷۰۰۰	۱/۴	۶۲۰۰	۱/۴۹	۶۶۰۰	۲/۲	۵۷۰۰	۲/۷				
۷۵۰۰	۰/۶۵	۷۵۰۰	۰/۸۵	۷۵۰۰	۱/۷	۶۳۰۰	۱/۵۵	۶۵۰۰	۲/۴						
۸۰۰۰	۰/۶۹	۸۰۰۰	۰/۹	۷۶۰۰	۱/۹	۶۴۰۰	۱/۷	۶۵۰۰	۲/۸						
۸۵۰۰	۰/۷۳	۸۵۰۰	۰/۹۷	۷۷۰۰	۲/۲	۶۵۰۰	۱/۸								
۹۰۰۰	۰/۷۷	۹۰۰۰	۱/۰۲	۷۸۰۰	۲/۴	۶۶۰۰	۱/۹۵								
۹۵۰۰	۰/۸	۹۵۰۰	۱/۱	۷۹۰۰	۲/۵	۶۷۰۰	۲/۳								
۱۰۰۰۰	۰/۸۵	۹۹۰۰	۱/۲۵	۸۰۰۰	۲/۶										
۱۰۵۰۰	۰/۹	۱۰۰۰۰	۱/۳۵	۸۰۰۰	۲/۶۵										
۱۱۰۰۰	۰/۹۵	۱۰۱۰۰	۱/۴۵												
۱۱۵۰۰	۱/۰۱	۱۰۲۰۰	۱/۵												
۱۲۰۰۰	۱/۰۵	۱۰۳۰۰	۱/۶												
۱۲۵۰۰	۱/۱۴	۱۰۳۰۰	۱/۷												
۱۳۰۰۰	۱/۲														
۱۳۲۰۰	۱/۲۵														
۱۳۲۰۰	۱/۳۵														
۱۳۳۰۰	۱/۴														
۱۳۴۰۰	۱/۴۵														
۱۳۵۰۰	۱/۵														
۱۳۶۰۰	۱/۵۵														
۱۳۷۰۰	۱/۶														

یک تا سه، نمونه‌های تقویت شده، در نقطه نهایی با جدا شدن الیاف دچار شکست شدند و در گروه چهار، الیاف عملکرد کششی خوب و بدون تسلیمی را تا نقطه انتهایی دارند. در جدول (۳)، نیروی لحظه شکست، خیز ماکزیمم و درصد افزایش ظرفیت مقطع در نمونه‌های تقویت شده آمده است.

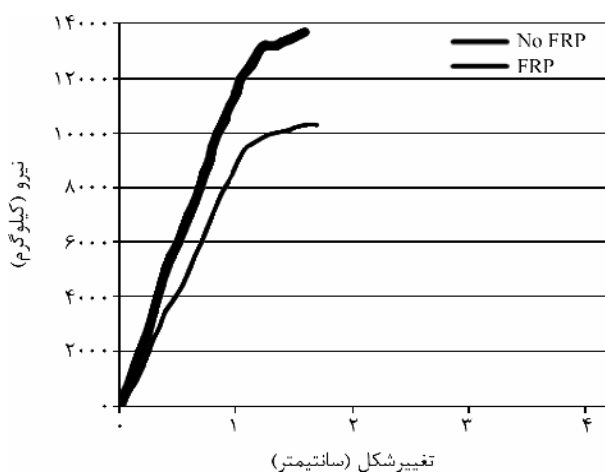
در شکل‌های (۲) تا (۵)، نمودار نیرو- تغییرشکل تمامی گروهها در حالت بدون تقویت و با تقویت ارائه شده است. با مشاهده نمودارهای فوق مشاهده می‌گردد که در کلیه گروهها نمودار نیرو- تغییرشکل تیرهای تقویت شده با الیاف کامپوزیتی مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد و در گروههای



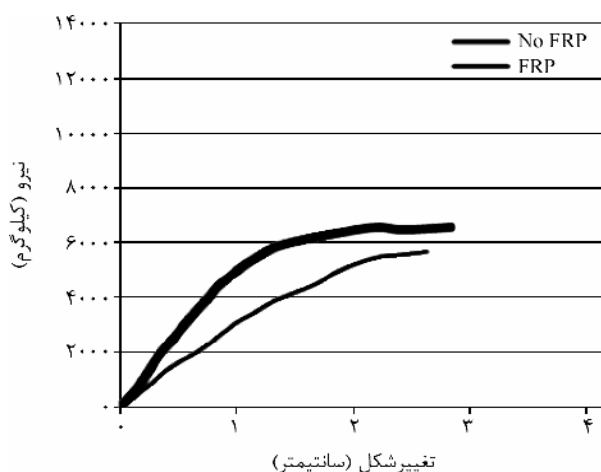
شکل (۴): نمودار نیرو- تغییر شکل گروه سه بتن‌های ۱۴ تا ۱۷ مگاپاسکال.



شکل (۲): نمودار نیرو- تغییر شکل گروه یک بتن‌های ۸ تا ۱۰ مگاپاسکال.



شکل (۵): نمودار نیرو- تغییر شکل گروه چهار بتن‌های ۱۸ تا ۲۱ مگاپاسکال.



شکل (۳): نمودار نیرو- تغییر شکل گروه دو بتن‌های ۱۱ تا ۱۳ مگاپاسکال.

جدول (۳): نیروی لحظه شکست، خیز ماکزیمم و درصد افزایش ظرفیت مقطع.

نام گروه	نوع نمونه	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	نیروی گسیختگی تیر (کیلوگرم)	درصد افزایش ظرفیت نمونه‌های تقویت شده	خیز ماکزیمم تیر (سانتیمتر)
گروه یک	بدون تقویت	۸-۱۰	۴۲۰۰	-	۱/۷۵
گروه یک	با تقویت	۸-۱۰	۴۷۰۰	٪۱۲	۱/۶۵
گروه دو	بدون تقویت	۱۱-۱۳	۵۷۰۰	-	۲/۷
گروه دو	با تقویت	۱۱-۱۳	۶۵۰۰	٪۱۴	۲/۸
گروه سه	بدون تقویت	۱۴-۱۷	۶۷۰۰	-	۲/۳
گروه سه	با تقویت	۱۴-۱۷	۸۰۰۰	٪۱۹	۲/۶۵
گروه چهار	بدون تقویت	۱۸-۲۱	۱۰۳۰۰	-	۱/۷
گروه چهار	با تقویت	۱۸-۲۱	۱۳۷۰۰	٪۳۳	۱/۶

با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌گردد که تأثیر الیاف در بالا بردن ظرفیت باربری تیرهای گروه یک و دو یعنی با مقاومت بتن بین ۸ تا ۱۳ مگاپاسکال بسیار پایین و در حدود ۱۳ درصد و در گروه سه با مقاومت بتن بین ۱۴ تا ۱۷ مگاپاسکال حدود ۱۹ درصد می‌باشد که بیانگر تأثیر کم الیاف در بالا بردن ظرفیت خمشی بتن این رده‌ها است. اما در بتن‌های گروه چهار با مقاومت ۱۸ مگاپاسکال به بالا در حدود ۳۳ درصد ظرفیت خمشی افزایش یافته است که

با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌گردد که تأثیر الیاف در بالا بردن ظرفیت باربری تیرهای گروه یک و دو یعنی با مقاومت بتن بین ۸ تا ۱۳ مگاپاسکال بسیار پایین و در حدود ۱۳ درصد و در گروه سه با مقاومت بتن بین ۱۴ تا ۱۷ مگاپاسکال حدود ۱۹ درصد می‌باشد که بیانگر تأثیر کم الیاف در بالا بردن ظرفیت خمشی بتن این رده‌ها است. اما در بتن‌های گروه چهار با مقاومت ۱۸ مگاپاسکال به بالا در حدود ۳۳ درصد ظرفیت خمشی افزایش یافته است که

جدول (۴): افزایش ظرفیت حاصل از نتایج آزمایشگاهی و نتایج تئوری.

گروه	افزایش ظرفیت در آزمایشگاه (درصد)	افزایش ظرفیت در محاسبات (درصد)
۱	۱۲	۶۹
۲	۱۴	۶۵
۳	۱۹	۴۳
۴	۳۳	۳۶

گروه سه این عدد به ۲۴ درصد رسیده و با بالا رفتن مقاومت بتن در گروه چهار این اختلاف به ۳ درصد رسیده که بسیار ناچیز است. این مقایسه نشان می‌دهد که استفاده از روابط تئوری در محاسبه تأثیر الیاف کامپوزیتی بر ظرفیت خمشی تیرهای ساخته شده با بتن ضعیف نتایج قابل قبولی نمی‌دهد.

### ۵- بررسی نوع شکست در تیرها

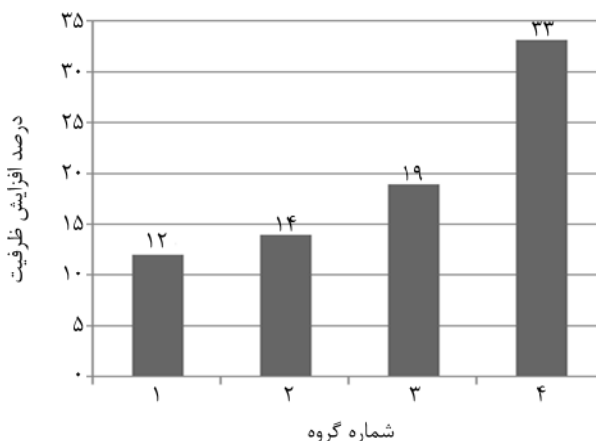
کرنش مثبت ثبت شده در ناحیه فشاری محل اعمال بار و مشاهدات عینی بیانگر نوع شکست تیرها می‌باشد. در جدول (۵)، کرنش متوسط بتن، نوع شکست و ترک در لحظه شکست تیرها آورده شده است.

مقادیر کرنش جدول فوق و مشاهدات عینی برای نمونه‌های بدون تقویت شکست نرم ناشی از تسلیم میلگرد و برای نمونه‌های تقویت شده با الیاف، شکست فشاری ناشی از تسلیم بتن را نشان می‌دهد. در مشاهدات آزمایشگاهی در نمونه‌های بدون تقویت ترکهای قائم خمشی و در نمونه‌های تقویت شده ترکهای خمشی-برشی مشاهده گردید. همچنین در بتن‌های رده پایین ترکهای ناشی از جداسدگی الیاف از سطح بتن وجود داشت که خود یکی از عوامل شکست مقطع و عدم تأثیر قابل-توجه تقویت در بالا بردن ظرفیت این رده‌ها بود. در اشکال (۷) تا (۹)، نمونه‌هایی از انواع ترکها و شکستها مشاهده می‌گردد.

جدول (۵): کرنش متوسط بتن، نوع شکست و ترک نمونه‌ها.

نام گروه	گروه یک بدون تقویت	گروه یک با تقویت	گروه دو بدون تقویت	گروه دو با تقویت	گروه سه بدون تقویت	گروه سه با تقویت	گروه چهار بدون تقویت	گروه چهار با تقویت
کرنش بتن	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳۴
نوع شکست	نرم	فشاری	نرم	فشاری	نرم	فشاری	نرم	فشاری
نوع ترک	خمشی	جداسدگی الیاف	خمشی	خمشی-برشی جداسدگی الیاف	خمشی	خمشی-برشی جداسدگی الیاف	خمشی	خمشی-برشی

بیانگر تأثیر مثبت و بهینه الیاف کامپوزیتی در تقویت تیرهای با این رده‌ها از بتن می‌باشد. در شکل (۶)، مشاهده می‌شود که با بالا رفتن مقاومت بتن، تأثیر الیاف در ظرفیت خمشی تیرها به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که مقایسه گروهها با یکدیگر شدت این افزایش را بهتر نشان می‌دهد.



شکل (۶): درصد افزایش ظرفیت خمشی تیر در گروههای یک تا چهار.

### ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج تئوری

پس از مدلسازی نمونه‌ها متوسط ظرفیت گروهها، بدون تقویت در حالت حد نهایی و در حالت تقویت شده بر اساس نشریه ۳۴۵ محاسبه شده و درصد افزایش ظرفیت در حالت تئوری به دست آمد. در جدول (۴)، درصد افزایش ظرفیت حاصل از نتایج آزمایشگاهی با نتایج تئوری مقایسه می‌شوند.

با مقایسه اعداد جدول (۴) مشاهده می‌شود که هرچه بر مقاومت بتن افزوده می‌شود نتایج آزمایشگاهی به نتایج تئوری نزدیک می‌شود، به طوری که در گروههای یک و دو با بتن‌های دارای مقاومت پایین اختلاف بین ۵۰ تا ۶۰ درصد بوده و در

ترکها از نوع خمشی و در نمونه‌های تقویت شده با الیاف کامپوزیتی ترکها از نوع خمشی - برشی می‌باشد.

- در نمونه‌های تقویت شده، در بتن‌های تا رده ۱۷ مگاپاسکال ترکهای ناشی از جداسدگی الیاف کامپوزیتی از بتن نیز مشاهده می‌شود.

- الیاف کامپوزیتی در بتن‌های تا رده ۱۷ مگاپاسکال به دلیل پایین بودن مقاومت بتن و جداسدگی الیاف از بتن، تأثیر بسیار کمی در افزایش ظرفیت خمشی مقطع دارند.

- در نمونه‌های خمشی با بتن رده ۱۸ مگاپاسکال به بالا، الیاف کامپوزیتی با وادار کردن مقطع به استفاده حداکثر از بتن فشاری و پایین آوردن تار خنثی، شکست مقطع را به فشاری تبدیل کرده و ظرفیت آن را حدود ۳۳ درصد افزایش می‌دهند.

- شدت افزایش تأثیر الیاف کامپوزیتی در بالا بردن ظرفیت خمشی در گروههای مختلف نسبت به گروه قبل با افزایش مقاومت بتن، زیاد شده به طوری که در گروه چهار (رده ۱۸ به بالا)، ۷۴ درصد بیشتر از گروه سه تأثیر الیاف را مشاهده گردید، که بیانگر تأثیر بسیار خوب تقویت در بتن‌های بالاتر از این رده‌ها می‌باشد.

- استفاده از روابط تئوری در محاسبه تأثیر الیاف کامپوزیتی بر ظرفیت خمشی تیرهای ساخته شده با بتن ضعیف نتایج قابل قبولی نمی‌دهد و تنها برای بتن رده ۱۸ مگاپاسکال به بالا قابل استفاده است. این نتیجه می‌بایست در محاسبات مقاوم‌سازی مد نظر قرار گیرد.

- الیاف در مقدار خیز تأثیر چندانی ندارند.

## ۷- مراجع

۱. هاشمی، حمید (۱۳۸۳). مقاوم‌سازی ساختمانهای بتن مسلح به کمک FRP، کنفرانس بین‌المللی زلزله یادواره فاجعه بم.
۲. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۱۳۸۵). راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمانهای بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP، نشریه شماره ۳۴۵.
3. Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R. (1991). Fiber



شکل (۷): شکست نرم با ترک قائم در تیر بدون تقویت.



شکل (۸): شکست فشاری با ترک مورب در تیر با تقویت.



شکل (۹): شکست فشاری با ترک مورب و جداسدگی الیاف.

## ۶- نتیجه‌گیری

نتایج حاصله از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- نوع شکست در تیرهای بدون تقویت آزمایش شده در این تحقیق از نوع شکست نرم و در تیرهای تقویت شده از نوع شکست فشاری می‌باشد.

- در نمونه‌های بدون تقویت آزمایش شده در این تحقیق

- strength on flexural behavior of concrete beams, *Journal of Composites for Construction*, **2**(1).
9. Xie, M., Hoa, S.V., and Xiao, X.R. (1995). Bonding steel reinforced concrete with composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **14**, 949-963.
  10. Ceroni, F. (2010). Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials, *Construction and Building Materials*, **24**, 1547-59.
  11. Issa, M., Metwally, I., and Elzeiny, S. (2011). Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars, *Engineering Structures*, **33**, 1754-1763.
  12. Chitsazan, I., Kobraei, M., Jumaat, M., and Shafiq, P. (2010). An experimental study on the flexural behavior of FRP RC beams and a comparison of the ultimate moment capacity with ACI, *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, **1**(2), 27-42.
  4. Sharif, A., Sulamani, G.J., Basunbul, I.A., Baluch, M.H., and Ghaleb, BN. (1994). Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates, *ACI Structure*, **91**(2), 160-168.
  5. Norris, T., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M.R., (1997). Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets, *Journal of Structural Engineering*, *ASCE*, **23**(7), 903-911.
  6. Pecce, M., Manfredi, G., and Cosenza, E. (2000). Experimental response and code models of GFRP RC beams in bending, *Journal of Composites for Construction*, **4**, 182-190.
  7. Cosenza, E., Greco, C., Manfredi, G., and Pecce, M. (1997). Flexural behavior of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic (FRP) Bars. Proc., *3<sup>rd</sup> International RILEM Symp on Non Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete*, RILEM, Bagnaux, France, 463-470.
  8. The'riault, M. and Benmorkrane, B. (1998). Effects of FRP reinforcement ratio and concrete composite bar for reinforced concrete construction, *Journal of Composite Materials*, **25**, 188-203.

### ۸- پانویس

۱- CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers)