



کد مقاله: ۲-۱۲۴

## بررسی رفتار تیرهای مقاوم سازی شده با CFRP در محل اتصال تیر به ستون

حبیب اکبرزاده بنگر<sup>۱</sup>، سعید قاسمی<sup>۲</sup>، محمد حسین طاهری<sup>۳</sup>

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه مازندران، بابلسر، [h.akbarzadeh@umz.ac.ir](mailto:h.akbarzadeh@umz.ac.ir)

۲ و ۳- کارشناس ارشد عمران-سازه

### چکیده

سازه‌های بتنی ممکن است به دلایل مختلفی دچار آسیب شده و نیاز به مقاوم سازی داشته باشند. روش‌های متعددی جهت مقاوم سازی سازه های بتنی وجود دارد که استفاده از مواد پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) جهت مقاوم سازی سازه‌های بتن مسلح مناسب می‌باشد. بنابراین تحقیقات گسترده‌ای بصورت آزمایشگاهی و تئوری بر روی مقاوم سازی اعضا بتن مسلح مانند تیر، ستون، دال، دیوار و اتصال انجام گرفته است. در ساختمانهای بتن مسلح، معمولاً اتصالات تیر و ستون بصورت صلب بوده، لذا لنگر منفی حداکثر در تیرها، در بر ستون اتفاق می‌افتد. جهت مهار FRP در این قسمت از تیر، FRP روی ستون ادامه داده می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مطالعات محدودی در این زمینه انجام گرفته است. لذا در این مطالعه با ساخت ۴ نمونه بتن مسلح بصورت تیر صلیبی شکل (T) و مقاوم سازی تیر در محل اتصال به ستون به بررسی رفتار آنها پرداخته شده است. یک نمونه بعنوان شاهد و سه نمونه دیگر با یک، دو و سه لایه با CFRP در وجه کششی تیر مقاوم سازی و جهت مهار به طول ۴۰ سانتی متر در ستون ادامه پیدا کرده و دورپیچ شده اند. همه نمونه ها تحت بار استاتیکی فزاینده بر روی ستون قرار گرفته‌اند. نتایج بررسی آزمایش نشان داده است که همه نمونه‌های تقویت شده بلافاصله بعد از جاری شدن میلگرد، CFRP روی تیر یا دورپیچ در محل اتصال دچار پارگی شده اند. لذا مقاوم‌سازی کردن تیر در محل اتصال و مهار آن با شیوه ذکر شده ظرفیت باربری نهایی نمونه‌ها را آنچنان افزایش نداده است.

کلمات کلیدی: تیر، بتن مسلح، CFRP، اتصال، مهار

### ۱- مقدمه

سازه های بتنی ممکن است به دلایل مختلفی دچار آسیب شده و نیاز به مرمت، تقویت و یا بهسازی داشته باشند. این آسیبها از دو بعد ماده و سازه مطرح میباشند. آسیب ماده در سازه‌های بتنی در مواردی همچون خوردگی فولاد و یا فساد و خرابی بتن مطرح میشود که با استفاده از روشهای مخصوص به خود و مواد تعمیراتی مانند انواع دوغاب و ... قابل ترمیم میباشند. آسیب سازه ای یک سازه بتنی در موارد متعددی مانند دقیق محاسبه نکردن نیرو زلزله در زمان طراحی سازه، تغییر کاربری و عدم رعایت ضوابط اجرایی ... مطرح میباشد. روشهای متعددی جهت مرمت و ترمیم سازه های بتنی وجود دارد که مواد پلیمری مسلح شده با کربن و شیشه (CFRP & GFRP) دو ماده مناسب برای مقاوم سازی سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. مواد FRP در شکلهای الیاف (Fiber)، الیاف بافته شده (Sheet) و ورق پیش ساخته (Plate) در مقاوم‌سازی بکار می‌روند [۱]. در سالهای اخیر، مقاوم سازی سازه ها با استفاده از FRP بدلیل راحتی نصب آنها، وزن کم در

مقابل افزایش مقاومتی که به سازه می دهند و عدم تغییر ظاهری سازه پس از مقاوم سازی، توسعه و گسترش روز افزونی یافته است. بنابراین تحقیقات گسترده‌ای بصورت آزمایشگاهی و تئوری بر روی مقاوم سازی اعضا بتن مسلح مانند تیر، ستون، دال، دیوار و اتصال... انجام گرفته است [۱-۳]. استفاده از FRP در مقاوم سازی خمشی یا برشی، بهبود شکل پذیری (مانند دور پیچ کردن ستون) و ... در اعضا بتن مسلح قابل کاربرد می باشد. همچنین آئین نامه های مختلف دنیا بر اساس تحقیقات انجام شده توصیه و مقرراتی را در مورد استفاده از FRP در مقاوم سازی سازه بتنی پیشنهاد داده‌اند [۴]. اکثر مطالعات خمشی بر روی تیر دهانه ساده یعنی با تکیه گاه ساده انجام گرفته که لنگر خمشی مثبت در وسط تیر حداکثر می باشد. FRP بر وجه کششی آنها جهت افزایش ظرفیت خمشی استفاده شده است، لذا طول کافی برای مهار FRP وجود دارد [۱، ۵ و ۶].

مقاوم سازی منطقه ممان منفی در تیرها به دو دسته تقسیم میشود؛ دسته اول تیرهای سراسری مانند پلها که ممان منفی در محل تکیه گاه می باشد، برای مقاوم سازی در منطقه ممان منفی جهت افزایش ظرفیت خمشی امکان ادامه دادن FRP در دو طرف تکیه گاه وجود دارد لذا طول مهار تیرها تامین می شود [۷]. دسته دوم در ساختمانهای بتن مسلح قاب خمشی، معمولا اتصالات تیر و ستون بصورت صلب می باشد. با توجه به این مطلب که لنگر در ناحیه اتصال، منفی است و بزرگترین مقدار لنگر در محل اتصال رخ میدهد، بنابراین نمیتوان FRP را که برای مقاوم سازی بر روی تیر چسبانده می شوند، در محل اتصال و یا قبل از آن قطع کرد بلکه باید FRP را به نحو مناسبی در محل اتصال مهار کرد. مشکل مقاوم سازی تیرها در این قسمت، مهار FRP در محل اتصال می باشد. همچنین برای مقاوم سازی طولی ستون در بر اتصال همین مشکل وجود دارد. یکی از راه حل های پیشنهادی با اجراء آسان، ادامه FRP از روی تیر در ممان منفی به روی ستون بصورت L شکل می باشد. مطالعات در این زمینه بصورت آزمایشگاهی که این روش را تایید کند، محدود می باشد [۸-۱۰]. Cerino و همکاران چند نمونه بصورت T شکل که شرایط هندسی مقاوم سازی طولی ستون در محل اتصال با پی و مقاوم سازی برشی در محل آویز تیر را شبیه سازی می کند را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این نمونه ها، چند روش مهار FRP طولی در محل زاویه ۹۰ درجه را آزمایش کردند. قابل ذکر است که در تمام نمونه ها، نیروی کشش در FRP بصورت مستقیم اعمال شده است [۸]. نتایج بررسی روی مطالعات گذشته نشان می دهد که مطالعه آزمایشگاهی روی مقاوم سازی خمشی در محل ممان منفی تیرها در بر اتصال به ستون انجام نگرفته است تا میزان کارایی مهار پیشنهادی L شکل در محل حداکثر لنگر بررسی گردد؛ بنابراین در این تحقیق به این موضوع پرداخته شده است.

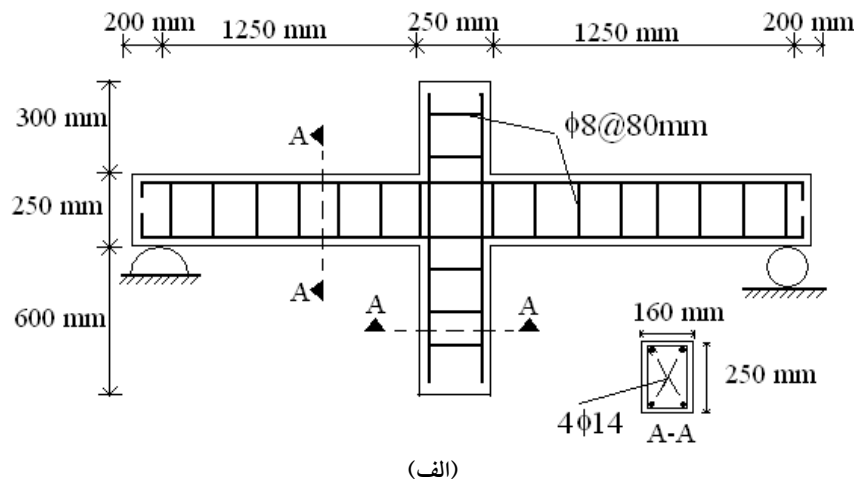
## ۲- برنامه آزمایشها

### ۲-۱ نمونه های آزمایش

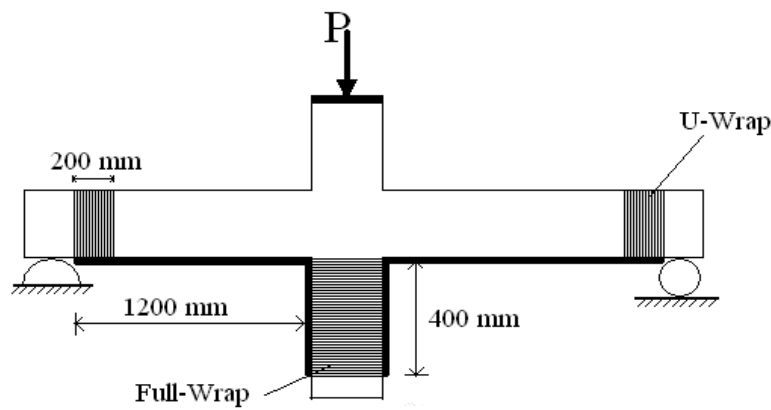
با توجه به برنامه ریزی انجام شده، ۴ نمونه بتن مسلح بصورت تیر صلیبی شکل (+) با مقیاس بزرگ ساخته شده است. طول تیر از هر طرف ستون ۱۴۵۰ میلی متر و مقطع تیر ۲۵۰×۱۶۰ میلی متر و طول بالای ستون از بر تیر ۳۰۰ میلی متر و طول پائین ستون از بر تیر ۶۰۰ میلی متر می باشد. ابعاد مقطع ستون ۲۵۰×۱۶۰ میلی متر می باشد. برای میلگرد طولی تیر از چهار عدد میله گرد  $\phi 14$  (دوتا بالا و دو تا پایین) استفاده شده است، همچنین از میلگرد  $\phi 8$  در هر ۸۰ میلی متر جهت خاموت استفاده شده است. همچنین در ستونها از چهار میله گرد طولی  $\phi 14$  استفاده شده است که توسط میله گردهای عرضی  $\phi 8$  با فاصله ۸۰ میلی متر مسلح شده اند. شکل ۱-الف نمایی از شبکه آرماتوربندی نمونه را نشان می دهد. مقاومت فشاری نمونه ها پس از اعمال ضریب تعدیل مکعبی به استوانه ای (۰/۸۵)، ۲۰ مگا پاسکال بدست آمد. تنش تسلیم فولاد طولی ۴۰۰ مگا پاسکال و فولاد عرضی ۳۰۰ مگا پاسکال می باشد.

## ۲-۲ برنامه مقاومسازی نمونه‌ها

نمونه‌ها جهت بررسی رفتار تیرهایی که از یک طرف به ستون برخورد می‌کنند و ممان در آنجا حداکثر می‌باشد و با CFRP مقاومسازی می‌شود، برنامه ریزی شده‌اند. مراحل نصب FRP به نمونه شامل آماده‌سازی سطح بتن و نصب CFRP و سپس GFRP می‌باشد. ابتدا سطح ضعیف بتن توسط سنگ فرز برداشته شده و جهت پیوستگی بیشتر بین FRP و سطح بتن، بعد از صاف کردن سطح بتن توسط دستگاه سنگ فرز شیارهای طولی ایجاد شده است. برای مقاومسازی از چسب Sikadur 330 و CFRP به ضخامت ۰/۱۱ میلی‌متر با مقاومت کششی ۳۹۰۰ مگا پاسکال محصول شرکت Sika و GFRP به ضخامت ۰/۳۱ میلی‌متر و با مقاومت کششی ۲۳۰۰ مگا پاسکال محصول شرکت Sika استفاده شده است. یک عدد نمونه غیر مقاومسازی بعنوان نمونه کنترل (شاهد) انتخاب شده و سه نمونه باقیمانده مقاومسازی گردیدند. نمونه CB بعنوان نمونه کنترل می‌باشد. همانطوریکه در جدول ۱ نشان داده شده، پارامتر متغیر در نمونه‌های مقاومسازی شده، تعداد لایه CFRP می‌باشد. این تیرها به اختصار با BSn نامگذاری شده است. B مخفف Beam، S مخفف Strengthening و n نشان دهنده تعداد لایه‌های طولی CFRP برای مقاومسازی خمشی می‌باشد. نحوه مقاومسازی تیرها در شکل ۱-ب نشان داده شده است. در نمونه‌های مقاومسازی شده، لایه طولی CFRP در انتها تیر با استفاده از ورق GFRP به شکل U مهار می‌شود. جهت مهار CFRP در بر ستون که لنگر حداکثر می‌باشد، CFRP در روی ستون به طول ۴۰۰ متر ادامه داده شده و سپس با استفاده از GFRP به عرض ۴۰۰ میلی‌متر دور پیچ می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱: الف-جزئیات آرماتور بندی ب-جزئیات مقاومسازی و نحوه بارگذاری نمونه

جدول ۱: جزئیات مقاوم سازی نمونه‌ها

Beam no.	Longitudinal CFRP				Anchorage		
	FRP Width (mm)	No. of Layers	CFRP length in Beam(m)	CFRP length in column(mm)	On column		End of Beam
					Type of Wrap	No. of Layers	
CB	160	-	1.2	-	-		-
BS1		1		400	Full-Wrap	1	U-Wrap
BS2		2		400	Full-Wrap	2	U-Wrap
BS3		3		400	Full-Wrap	4	U-Wrap

### ۳- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش

همه تیرها تحت بارهای متمرکز بر روی ستون در وسط دهانه قرار گرفتند. در هر گام بارگذاری ضمن قرائت و ثبت داده‌ها، حس‌گرهای الکتریکی شامل نیروی وارده و تغییر شکل زیر ستون بکمک دستگاه ثبت داده‌ها، گسترش ترکها روی تیر ترسیم می‌شد و اندازه بزرگترین ترک با ترک سنج چشمی قرائت گردید. هر اتفاق و مشاهدات لازم برای تیر در هنگام بارگذاری ثبت می‌گردید. نتایج آزمایش تیرها در ترمهای نوع شکست تیر، بار - خیز و بار عرض ترک در ادامه بحث خواهد شد.

#### ۳-۱- نوع شکست تیرها

با توجه به اینکه هر تیر در مقاوم‌سازی با هم اختلاف دارد، لذا نوع شکست آنها با هم فرق دارد، بنابراین در ادامه نحوه شکست تیرها توضیح داده شده است.

#### ۳-۱-۱ تیر CB

بار جاری شدن میلگرد کششی تیر در محل اتصال KN ۳۸/۸۰ می‌باشد. با رسیدن بار به KN ۲۰/۴۳، بتن فشاری تیر در محل اتصال خرد شد. در این لحظه تیر تغییر شکل زیادی را تحمل کرد. در لحظه خرابی، ترکها در محل اتصال از طرف پائین بطرف بالا به سمت بتن فشاری گسترش پیدا کرد. عرض ترکها بعد از جاری شدن فولاد کششی شدت افزایش پیدا کرد. شکل ۲ نمائی از لحظه خرابی این تیر را نشان می‌دهد.



شکل ۲: خرابی و گسترش ترک در تیر کنترل (CB)

### ۳-۱-۲ تیر BS1

میلگرد کششی تیر در محل اتصال این تیر تحت بار  $39/33 \text{ KN}$  جاری شد. با رسیدن بار به  $67/00 \text{ KN}$  و افزایش تنش در CFRP طولی در تیر باعث افزایش تنش GFRP در دور پیچ شده، تحت این بار پاره شدند، بعد از آن بار افت کرد. سپس بارگذاری ادامه پیدا کرد تا اینکه در بار  $43/00 \text{ KN}$  تیر در تار فشاری در محل اتصال دچار خرابی گردید. بخاطر پارگی زود هنگام دور پیچ، مقاومت خمشی تیر آنچنان نسبت به تیر شاهد افزایش نیافت. مقایسه دامنه ترک خوردگی این تیر با تیر کنترل نتیجه می شود که در تیر مقاوم سازی شده، عرض ترک نسبت به تیر شاهد کاهش پیدا کرده است. شکل ۳ خرابی تیر BS1 را نشان می دهد.

### ۳-۱-۳ تیر BS2

میلگرد کششی در محل اتصال تیر به ستون تحت بار  $42/66 \text{ KN}$  جاری شد. بخاطر زیاد شدن عرض ترک بعد از جاری شدن فولاد کششی و با رسیدن بار به  $47/00 \text{ KN}$ ، در محدوده کوچکی از CFRP طولی تیر در نزدیک ستون، جداشدگی (debonding) اتفاق افتد که در نتیجه آن نیروی CFRP به دورپیچ منتقل می شود. نیروی انتقالی به دورپیچ باعث افزایش تنش در آن می گردد که نتیجه آن پارگی دورپیچ می باشد. بعد از این CFRP روی تیر کارایی خود را از دست داده و بار افت می کند. سپس با بارگذاری مجدد تا  $42/00 \text{ KN}$  که بتن فشاری تیر در محل نزدیک به اتصال تیر به ستون خرد می گردد. شکل ۴ خرابی تیر BS2 را نشان می دهد.



شکل ۳: خرابی تیر BS1 در اثر پارگی GFRP دور پیچ



شکل ۴: خرابی تیر BS2 در اثر جداسدگی CFRP از روی تیر و پارگی GFRP دور پیچ

### BS3 تیر ۳-۱-۴

میلگرد کششی در محل اتصال این تیر تحت بار  $42/00$  KN جاری شد. بخاطر زیاد شدن عرض ترک بعد از جاری شدن فولاد کششی و با رسیدن بار به  $46/66$  KN تنش برشی در چسب نزدیک ترک افزایش می یابد که حاصل آن جدا شدگی CFRP تیر از بتن در نزدیکی محل اتصال می باشد. در نتیجه آن نیروی زیادی از طرف CFRP تیر به GFRP دور پیچ وارد می شود. افزایش نیروی وارده به دور پیچ باعث پارگی همزمان دور پیچ و CFRP طولی تیر در محل برخورد دور پیچ می گردد. علیرغم استفاده از چند لایه FRP برای دور پیچ و سه لایه FRP طولی در تیر، پارگی هم در دور پیچ و هم در CFRP طولی تحت باری همانند تیر BS2 اتفاق افتاد. بعد از آن بار افت کرد، سپس مجددا بارگذاری ادامه پیدا کرد تا اینکه تحت بار  $42/00$  KN خرابی در تیر بصورت خرد شدن بتن فشاری تیر در نزدیکی محل اتصال اتفاق افتاد. شکل ۵ خرابی تیر BS3 را نشان می دهد.



(الف)



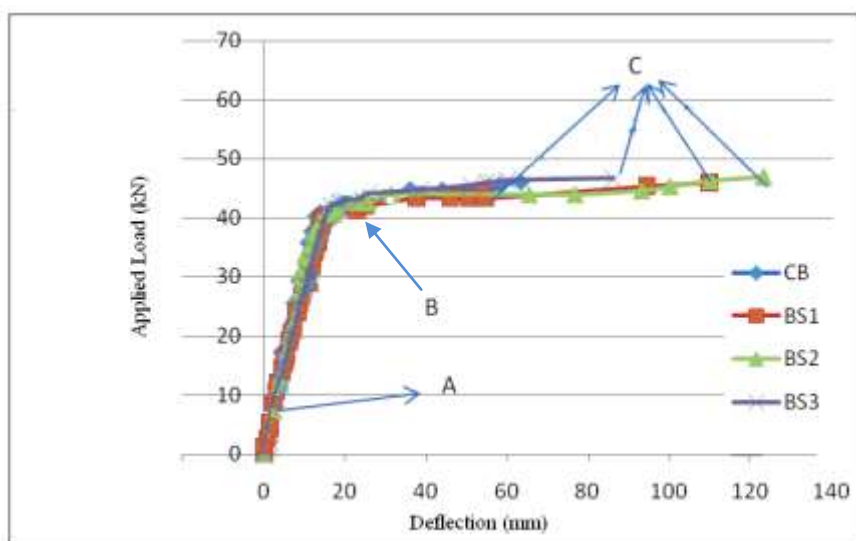
(ب)

شکل ۵: خرابی تیر BS3 الف- جدا شدگی CFRP از بتن ب- پارگی در FRP طولی تیر و دور پیچ

### ۲-۳ نمودار بار-خیز

شکل ۶ نمودار بار-خیز نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد. نمودار تقریباً به سه خط با شیب ثابت توسط سه نقطه A, B و C تقسیم شده است. نقطه A، بار ترک خوردگی، نقطه B، بار جاری شدن فولاد کششی، نقطه C، بار نهایی تیر را بیان می‌کند. افزایش تعداد لایه های CFRP در تیرهای BS1, BS2 و BS3 آنچنان ظرفیت تیر را افزایش نمی‌دهد. همه تیرها قبل از جاری شدن و بعد از جاری شدن دارای سختی همانند تیر کنترل می‌باشد، فقط در تیر BS3 بخاطر افزایش تعداد لایه های دور پیچ مقدار سختی بعد از نقطه جاری شدن فولاد کششی بیشتر از تیرهای دیگر شده است. تیر BS3 حدود ۸ درصد نسبت به تیر کنترل افزایش ظرفیت باربری داشته است. لازم به ذکر است که تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که FRP بیشتر در حالت نهایی تاثیر دارد نه در حالت خدمت. با افزایش تعداد لایه ها بار جاری شدن به مقدار جزئی افزایش می‌یابد که این نشانگر این مطلب است که تا قبل از پاره شدن دور پیچ ها، CFRP در رفتار تیر اثر دارد یعنی مهار CFRP طولی در ستون انجام می‌گیرد. دلیل آنرا می‌توان اینطور بیان کرد که بعد از جاری شدن فولاد کششی و زیاد شدن نیرو در CFRP طولی، تنش در دور پیچ افزایش می‌یابد که در نتیجه آن باعث پارگی دور پیچ یا CFRP طولی می‌گردد؛ با پاره شدن دور پیچ، CFRP طول مهار خود را از دست می‌دهد (در جایی که ممان حداکثر است) لذا بعد از جاری شدن فولاد کششی ظرفیت تیر آنچنان افزایش نمی‌یابد.

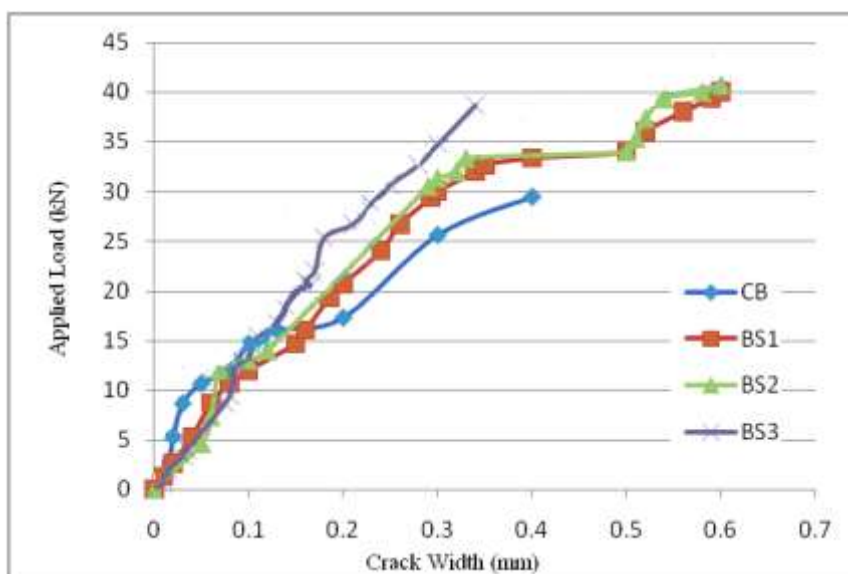




شکل ۶: نمودار بار خمیز تیر های آزمایش شده

### ۳-۳ نمودار بار - ترک

شکل ۷ نمودار بار حداکثر عرض ترک خمشی را در محدوده خدمت نشان می دهد همانطوریکه این شکل ها نشان می دهند، مقاوم سازی کردن تیر ها با CFRP باعث کاهش عرض ترک در بار ثابت شده است. کم شدن عرض ترک نشان دهنده این است که تا قبل از اینکه تنش ها در CFRP طولی باعث پارگی دورپیچ گردد، عملکرد CFRP طولی در مقاومسازی مناسب است.



شکل ۷: نمودار بار-حداکثر عرض ترک خمشی در محدوده خدمت

### ۴-نتیجه گیری

در این پایان نامه عملکرد نوعی مهار متداول که بعضی آئین نامه ها برای مهار FRP در محل اتصال تیر به ستون پیشنهاد داده اند، بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر استخراج شده است:  
 ۱-مقاوم سازی کردن نمونه ها با CFRP باعث کاهش عرض ترک در بار ثابت در محدوده خدمت شده است.



۲- علیرغم افزایش تعداد لایه های CFRP در تیرهای BS1، BS2، و BS3 آنچنان ظرفیت باربری تیر افزایش نمی یابد. همه تیر ها قبل از جاری شدن و بعد از جاری شدن دارای سختی همانند تیر کنترل می باشند و فقط در تیر BS3 با افزایش تعداد لایه ها دور پیچ مقدار سختی بعد از نقطه جاری شدن فولاد کششی به مقدار جزئی بیشتر از تیر های دیگر شده است.

بنابراین براساس نتایج این تحقیق، این نوع از مهار برای FRP جهت مقاوم سازی تیر در محل اتصال عملکرد مناسبی ندارد.

## مراجع

- [1] Teng, J. G., Chen, J.F., Smith, S. T. and Lam, L.; "FRP Strengthened RC Structures"; Wiley, New York, (2002).
- [2] Foret, G. and Limam, O.; "Experimental and numerical analysis of RC two-way slabs strengthened with NSM CFRP rods"; *Construction and Building Materials*, 22, (2008) 2025-2030.
- [3] Lignola, G. P., Prota, A., Manfredi, G. and Cosenza, E.; "Experimental performance of RC hollow columns confined with CFRP"; *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 11, No.1 (2007) 42-49.
- [4] ACI; "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" American Concrete Institute, ACI 440.2R-08, Farmington Hills, Michigan, (2008).
- [5] Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.; "RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study"; *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 117, No.11 (1991) 417-433.
- [6] Toutanji, H., Zhao, L. and Anselm, E.; "Verifications of Design Equations of Beams Externally Strengthened with FRP Composites"; *Journal of Composites for Construction*, ASCE, May/June, (2006) 254-264.
- [7] Akbarzadeh, H. and Maghsoudi, A. A.; "Experimental and Analytical Investigation of Reinforced High Strength Concrete Continuous Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer"; *Materials and Design*, 31, (2010) 1130-1147.
- [8] Ceroni, F., Pecce, M., Matthys, S., and Taerwe, L.; "Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets"; *Composites: Part B*, 39, (2008) 429-441.
- [9] Nagy-Gyorgy, T., Mosoarca, M., Stoian, V., Gergely, J. and Dan D.; "Retrofit of reinforced concrete shear walls with CFRP composites"; *In: Proceedings of fib Symposium "Keep concrete Attractive"*, Budapest, Hungary, (2005) 897-902.
- [10] Prota, A., Manfredi, G., Balsamo, A., Nanni, A. and Cosenza E.; "Innovative Technique for Seismic Upgrade of RC Square Columns"; *In: Proceedings of FRPRCS7*, (2005).