

## تقویت خمشی تیرهای بتن سبک T شکل با استفاده از ورقهای GFRP

محمود میری<sup>۱</sup>، مرتضی حسینعلی بیگی<sup>۲</sup>، امیر قدس<sup>۳</sup>

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه سیستان و بلوچستان

### خلاصه

به منظور بررسی تاثیر تقویت تیرهای T شکل ساخته شده با بتن سبک سازه‌ای با استفاده از ورقهای GFRP تعداد ۹ عدد نمونه آزمایشگاهی طراحی و مورد آزمایش قرار گرفته اند. نمونه‌های آزمایشگاهی با توجه به شرایط و میلگردهای به کار رفته در آنها به سه گروه A، B و C تقسیم شدند. در تمامی تیرها از دو میلگرد نمره ۱۲ به عنوان آرماتور فشاری استفاده شده است. در گروه A طراحی به صورتی انجام گرفت که تیرها دارای ضعف خمشی میانگین و در گروه B بیشینه باشند و در گروه C کمینه باشند. در هر گروه یک تیر شاهد و دو تیر شامل تقویت می باشد که در تعداد لایه های FRP با هم متفاوتند. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته مشاهده شد، در تقویت خمشی تیرها ۸۱ درصد و ۱۱۶ درصد در گروه A و ۵۶ درصد و ۱۶۶ درصد در گروه B و ۶۷ درصد و ۱۰۰ درصد در گروه C افزایش ظرفیت داشته ایم در حالیکه نوع شکستها اکثرا برشی بوده اند.

کلمات کلیدی: GFRP، تقویت تیرهای T، مقاوم سازی

### ۱. مقدمه

به دلایل مختلفی چون خرابی‌های ناشی از عوامل محیطی نظیر خوردگی و یا وزش بادهای بسیار شدید، تضعیف اعضاء در اثر اهمال در نگهداری صحیح، خسارات ناشی از زلزله و یا جنگ، تغییر در کاربری، تقاضا جهت افزایش زیربنا و یا تعداد طبقات موجود و تغییر پارامترهای مورد استفاده در روند طراحی‌ها، ممکن است سازه‌های بتن آرمه فاقد مقاومت و شکل‌پذیری لازم در مقابل بارهای اعمالی تشخیص داده شوند. جهت برطرف کردن معایب استفاده از ورقه‌های فولادی در تقویت اعضاء بتن مسلح استفاده از ورقه‌های مسلح پلیمری (FRP) که دارای مزایای چند در مقایسه با روش استفاده از ورقه‌های فولادی می‌باشند از اواسط دهه ۱۹۸۰ معمول گردید. محققان بسیاری از جمله ((السلیمانی، چاجس، تالجنسن، هات جین سون، گویش و... در دانشگاهها و مراکز علمی دنیا در زمینه تقویت خمشی و برشی بوسیله ورقهای FRP تحقیقات زیادی را انجام دادند. این ورقه‌های پلیمری برخلاف ورقه‌های فولادی تحت اثر عوامل خوردنده واقع نشده و در مقابل اثرات زیانبار ناشی از اسیدها، الکلها و نمکها و مواد خوردنده موجود در محیط مقاوم بوده و همچنین حرارت‌های نسبتاً بالا را بخوبی تحمل می‌کنند [۱]. در نتیجه این فاکتورهای مناسب استفاده از این ورقه‌ها نیازمند در نظر گرفتن تمهیدات خاصی قبل از الصاق بوده و نگهداری آنها نیز بعد از اجراء و نصب در مقایسه با ورق‌های فولادی بسیار راحت تر است.

### ۲. برنامه آزمایشگاهی:

<sup>۱</sup> استادیار دانشگاه سیستان و بلوچستان

<sup>۲</sup> استادیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه سیستان و بلوچستان



در این تحقیق تعداد ۹ تیر T شکل بتن سبک با طول کلی ۲۰۰۰mm که بر روی تکیه گاه‌هایی با دهانه ۱۸۰۰mm مورد بارگذاری و آزمایش قرار گرفتند ساخته شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی در سه گروه A، B و C و هر گروه شامل سه تیر می‌باشد. برای آزمایشهای هر گروه یک تیر بصورت تقویت نشده می‌باشد و دو تیر دیگر را بسته به نوع ضعف موجود در تیر تقویت گردیده است.

## ۲-۱- خواص مصالح مصرفی:

آرماتور داخلی از نوع آجدار و از تیپ A۲ می‌باشد نتایج آزمایشات روی میلگردهای مصرفی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱): نتایج آزمایشات کششی میلگردها

ردیف	قطر میلگرد mm	سطح مقطع $cm^2$	تنش در جاری شدن $kg/cm^2$	تنش حد گسیختگی $kg/cm^2$	درصد ازدیاد طول	مدول الاستیسیته $kg/cm^2$
۱	۱۰	۰/۷۸۵	۳۶۵۰	۵۶۰۰	۱۵	۲۰۳۹۰۰۰
۲	۱۲	۱/۱۳	۳۸۰۰	۵۶۰۰	۱۵	۲۰۳۹۰۰۰
۳	۱۶	۲/۰۱	۳۸۰۰	۵۶۰۰	۱۵	۲۰۳۹۰۰۰

برای تهیه بتن مورد نیاز آزمایش طرح اختلاط زیر مورد استفاده قرار گرفت.

جدول (۲): طرح اختلاط

مصالح	سیمان	آب	میکروسلیس	ماسه	لیکا	فوق روان کننده	نسبت آب به سیمان	مجموع
وزن مصالح ( $kg/m^3$ )	۴۵۰	۱۸۴/۵	۴۵	۸۳۳/۶۳	۲۷۷/۸۸	۹	۰/۴۱	۱۸۰۰

ورقهای GFRP یک جهته با تنش تسلیم ۱۷۰۰Mpa و مدول الاستیسیته ۷Gpa استفاده شده است

## ۲-۲- سیستم بارگذاری، معرفی نمونه ها

سیستم بارگذاری از یک قاب فلزی صلب قابل فرض برای نصب جک استفاده شده است. در این تحقیق تیرها به صورت تیر ساده مورد آزمایش قرار می‌گیرند و بار در یک سوم دهانه متقارن اعمال می‌شود.

در این تحقیق تعداد ۹ تیر T شکل بتن سبک با طول کلی ۲۰۰۰mm که بر روی تکیه گاه‌هایی با دهانه ۱۸۰۰mm مورد بارگذاری و آزمایش قرار گرفتند ساخته شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی در سه گروه A، B و C و هر گروه شامل سه تیر می‌باشد. برای آزمایشهای هر گروه یک تیر بصورت تقویت نشده می‌باشد و دو تیر دیگر را بسته به نوع ضعف موجود در تیر تقویت گردیده است. که این گروهها در ادامه تشریح می‌گردند. تیرها در زمان آزمایش دارای طول عمر تقریباً برابر می‌باشند. حداقل عمر برای تقویت ۲۱ روز می‌باشد که در این تحقیق عمر تیرها در موقع تقویت حدوداً ۱۰۰ روز می‌باشد. مقاومت فشاری بتن مصرفی در همه تیرها برای  $f_c = 30 \frac{kg}{cm^2}$  طرح شده است

## ۲-۳-۱- تیرهای گروه A



مربوط به تیرهایی است که از لحاظ خمشی دارای ضعف می باشند. در این گروه از تیرها از دو میلگرد آجدار نمره ۱۴ به عنوان آرماتور کششی و دو میلگرد آجدار نمره ۸ به عنوان آرماتور فشاری استفاده شده است و برای آرماتورهای برشی از میلگرد آجدار نمره ۸ بصورت مستطیلی به فاصله محور تا محور ۸۰ میلیمتر در ۲/۳ کناری و ۱۰۰ میلیمتر در ۱/۳ میانی استفاده شده است. انتخاب آرماتور فوق برای تیرهای گروه A بدین خاطر بود که تیرها در برش بسیار قوی بوده و ضعفشان در خمش باشد تا با تقویت خمشی تیر به نتایج مطلوب دست یافت. مشخصات مربوط به تیرهای گروه A در شکل (۱) آمده است.

## ۲-۳-۲- تیرهای گروه B

مربوط به تیرهایی می باشد که دارای ضعف خمشی بیشتر می باشند. در این گروه از تیرها از یک میلگرد آجدار نمره ۱۴ به عنوان آرماتور کششی و از دو میلگرد آجدار نمره ۸ به عنوان آرماتور فشاری استفاده شده است. و برای آرماتورهای برشی از میلگرد آجدار نمره ۸ بصورت مستطیلی به فاصله محور تا محور ۸۰ میلیمتر در ۲/۳ کناری و ۱۰۰ میلیمتر در ۱/۳ میانی استفاده شده است. مشخصات مربوط به تیرهای گروه B در شکل (۲) نشان داده شده است.

## ۲-۳-۳- تیرهای گروه C

مربوط به تیرهایی می باشد که از لحاظ خمشی دارای ضعف کمتری می باشند. در این گروه از تیرها از سه میلگرد نمره ۱۴ آجدار به عنوان آرماتور کششی و دو میلگرد آجدار نمره ۸ به عنوان آرماتور فشاری استفاده شده است. و برای آرماتورهای برشی از میلگرد آجدار نمره ۸ بصورت مستطیلی به فاصله محور تا محور ۸۰ میلیمتر در ۲/۳ کناری و ۱۰۰ میلیمتر در ۱/۳ میانی استفاده شده است. مشخصات مربوط به تیرهای گروه C در شکل (۳-۳) آورده شده است.

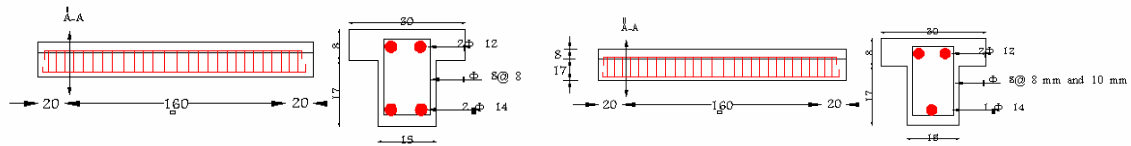
## ۲-۴-۲- نحوه تقویت تیرها

### ۲-۴-۱- تقویت تیر گروه A

تیرهای گروه A شامل تیر  $A_1$  و  $A_2$  و  $A_3$  می باشد که مشخصات آنها یکی می باشد. در این تحقیق تیر  $A_1$  به عنوان تیر مرجع و بر روی تیر  $A_1$  و  $A_2$  عمل تقویت را انجام می دهیم. برای تقویت تیرای  $A_2$  و  $A_3$  از ورقهای GFRP یک جهت با تنش تسلیم  $1700\text{Mpa}$  و مدول الاستیسیته  $17000\text{Mpa}$  استفاده شده است. عرض ورق تقویتی  $16\text{cm}$  و طول آن  $160\text{cm}$  می باشد. ضخامت خالص این ورق  $0.3$  میلی متر می باشد و چگونگی تقویت در شکل (۴) نشان داده شده است.

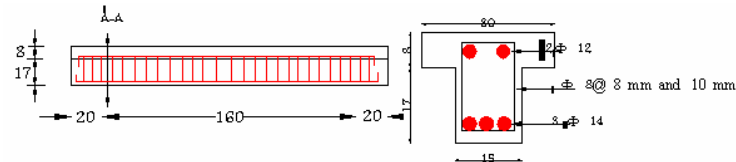
### ۲-۴-۲- تقویت تیر گروه B

تیرهای گروه B شامل تیر  $B_1$  و  $B_2$  و  $B_3$  می باشد که مشخصات آنها یکی می باشد. در این تحقیق تیر  $B_1$  به عنوان تیر مرجع و بر روی تیر  $B_2$  و  $B_3$  عمل تقویت را انجام می دهیم، مشخصات ورق همانند قبل می باشد و در  $B_2$  یک لایه تقویت و در  $B_3$  سه لایه تقویت انجام می دهیم. چگونگی تقویت در شکل (۵) نشان داده شده است.

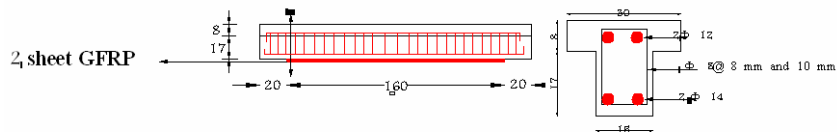
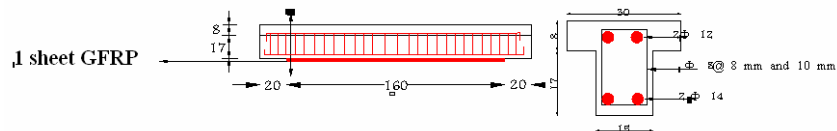


شکل (۱): مشخصات مربوط به تیرهای گروه B

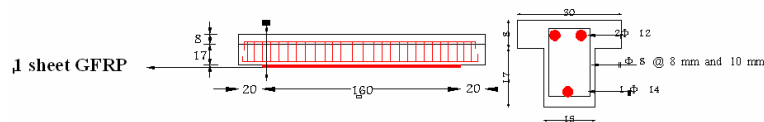
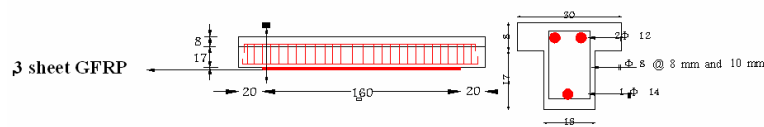
شکل (۲): مشخصات مربوط به تیرهای گروه A



شکل (۳): مشخصات مربوط به تیرهای گروه C



شکل (۴): نحوه تقویت تیر  $A_1$  و  $A_2$



شکل (۵): نحوه تقویت تیر  $B_2$  و  $B_3$

۲-۴-۳- تقویت تیر گروه C

تیرهای گروه C شامل تیر  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_3$  می باشد که مشخصات آنها یکی می باشد. در این تحقیق تیر  $C_1$  به عنوان تیر مرجع و بر روی تیر  $C_2$  و  $C_3$  عمل تقویت را انجام می دهیم. مشخصات ورق همانند قبل می باشد و دز  $C_2$  یک لایه تقویت و در  $C_3$  دو لایه تقویت انجام می دهیم. چگونگی تقویت همانند شکل (۴) می باشد

## ۲-۵- محاسبه بار نهایی با استفاده از روابط

این روش بوسیله Hayder A. Rasheeda\*, Shariq Pervaiz [۲] ارائه شده است و مقاطع مختلف با حالت‌های مختلف را در نظر گرفته اند. لازم به ذکر است FRP مورد استفاده در این تحقیق ۸۸۰ GFRP گرم با مشخصات  $E=70 \text{ Gpa}$ ;  $t=0.3$ ;  $\epsilon_f = 2.2 \times 10^{-2}$  می باشد. نتایج محاسبات در جدول ذیل آمده است

جدول (۳): نتایج محاسباتی

تیر	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
$M_u$ (Ton.m)	۲/۱۸	۴/۳۱	۵/۹۷	۱/۱۲	۳/۰۵۶	۶/۴۶	۳/۱۹	۵/۷۴	۷/۴۰
P (Ton)	۷/۲۹	۱۴/۴	۱۹/۹	۳/۷۴	۱۰	۲۱/۵	۱۰/۶	۱۸/۲	۲۳/۴۴

## ۳. نتایج آزمایشات

### ۳-۱- بارهای ترک خوردگی-مقاومت نهایی و نوع گسیختگی:

جداول (۴)، (۵) و (۶) میزان بار ترک خوردگی و درصد افزایش آن در قیاس با تیر کنترل و همچنین بار نهایی قابل حمل توسط تیرها در اثر تقویت های انجام شده و خیز حداکثر در دهانه میانی تیرها به هنگام گسیختگی را در سه گروه مختلف ارائه می کند.

جدول (۴): نتایج آزمایشات تیرهای گروه A

نوع گسیختگی	افزایش بار ترک خوردگی برشی	افزایش بار ترک خوردگی خمشی	بار ترک خوردگی برشی ton	بار ترک خوردگی خمشی ton	خیز حداکثر	افزایش بار نهایی نسبت به تیر کنترل	بار نهایی (ton)	مقاومت فشاری $Kg/cm^2$	نمونه
خمشی همراه با جاری شدن میلگردهای کششی	-	-	۵/۹۶	۳	۲۸/۶۷	-	۸	۴۱۷	$A_1$
debonding با جدا شدن CFRP همراه با جدا شدن لایه ای از بتن	۰/۶۷٪	۴۸٪	۶	۴/۵۳	۲۰/۲	۸۱٪	۱۴/۵	۴۱۶	$A_2$
delamination	۰	۵۹٪	۵/۹۶	۴/۶	۲۲/۴	۱۱۶٪	۱۷/۳	۴۲۵	$A_3$



جدول (۵): نتایج آزمایشات تیرهای گروه B

نوع گسیختگی	افزایش بار ترک خوردگی برشی	افزایش بار ترک خوردگی خمشی	بار ترک خوردگی برشی ton	بار ترک خوردگی خمشی ton	خیز حداکثر	افزایش بار نهایی نسبت به تیر کنترل	بار نهایی (ton)	مقاومت فشاری $Kg/cm^2$	نمونه
خمشی همراه با جاری شدن میلگردهای کششی	-	-	۵,۵	۳	۹/۳۷	-	۶	۴۳۶	$B_1$
debonding همراه با جدا شدن لایه ای از بتن	۳/۶٪	۵۶٪	۵/۷	۵	۱۲/۲۷	۳۳٪	۸	۴۲۶	$B_2$
debonding همراه با جدا شدن لایه ای از بتن	۱۳٪	۱۶۶٪	۶/۲	۸	۱۰/۹۸	۲۰,۸٪	۱۸/۵	۴۲۶	$B_3$

جدول (۶): نتایج آزمایشات تیرهای گروه C

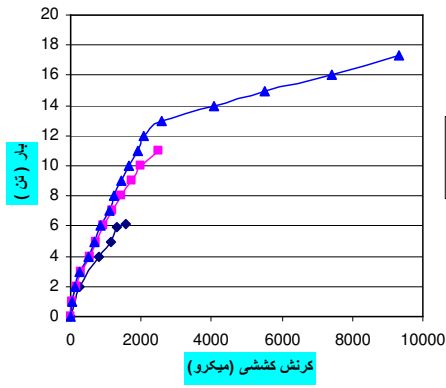
نوع گسیختگی	افزایش بار ترک خوردگی برشی	افزایش بار ترک خوردگی خمشی	بار ترک خوردگی برشی ton	بار ترک خوردگی خمشی ton	خیز حداکثر	افزایش بار نهایی نسبت به تیر کنترل	بار نهایی (ton)	مقاومت فشاری $Kg/cm^2$	نمونه
خمشی همراه با جاری شدن میلگردهای کششی	-	-	۶	۳/۲	۱۹	-	۱۰/۵	۴۲۷	$C_1$
گسیختگی FRP	۲۵٪	۷۲٪	۷/۵	۵/۵	۱۴/۵۶	۶۷٪	۱۷/۵	۴۱۹	$C_2$
برشی	۱۸٪	۱۰,۹٪	۷/۱	۶/۷	۱۹/۲۶	۱۰۰٪	۲۱	۴۰۶	$C_3$

## ۳-۲- مقایسه تیرهای گروههای A, B, C

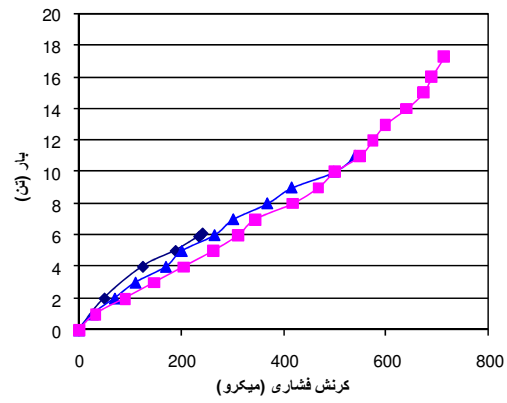
در بارگذاری تیرهای گروه A به نتایجی رسیده که در اینجا این نتایج مرور می شود اولین ترک خمشی ایجاد شده در باری تقریباً ۱/۵ برابر برای  $A_2$  و  $A_3$  بوجود آمده است. اولین ترکهای برشی تقریباً برابر بود و انتظار هم می رفت که تیرها در یک بار مشخص به اولین ترک برشی برسند. همانطور که مشاهده شد افزایش مقاومت ایجاد شده در تیر  $A_2$  حدود ۸۱٪ در تیر  $A_3$  حدود ۱۱۶٪ بوده که این مقدار قابل توجه می باشد ولی باید این نکته را در نظر گرفت که مقدار واقعی افزایش ظرفیت باربری می توانست به مراتب بیشتر از این مقدار باشد. زیرا اولاً شکست تیرهای  $A_2$  و  $A_3$  از نوع جدا شدگی FRP بوده و تیر و FRP قبل از اینکه از تمام ظرفیت خمشی خود استفاده کنند گسیخته شدند و ثانیاً اگر بار وارده برای اولین ترک را در تیرها مقایسه شوند مشاهده خواهد شد که بار اولین ترک در تیرهای  $A_2$  و  $A_3$  تقریباً ۱/۵ برابر تیر  $A_1$  می باشد. لذا می توان نتیجه گیری کرد که افزایش ظرفیت خمشی تیر  $A_3$  به مراتب بیشتر از آنچه مشاهده شده می باشد.

با مقایسه تیرهای  $B_1$  و  $B_2$  و  $B_3$  مشاهده می شود که اولین ترک خمشی در تیرهای  $B_2$  و  $B_3$  به ترتیب ۵۶٪ و ۱۶۶٪ افزایش یافته اند.

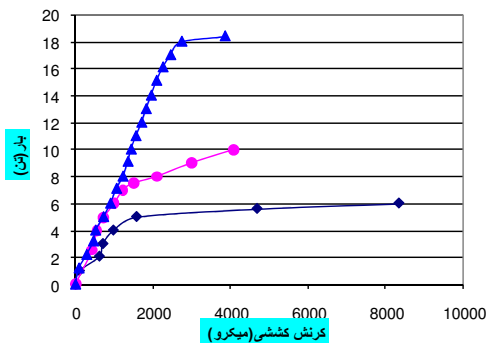
اولین ترک برشی در تیرهای  $B_2$  و  $B_3$  مقدار کمی افزایش یافته است. افزایش مقاومت تیر  $B_2$  نسبت به  $B_1$  تقریباً ۳۳٪ و افزایش مقاومت تیر  $B_3$  نسبت به  $B_1$  تقریباً ۲۰,۸٪ بوده است این مقدار افزایش مقدار قابل توجهی است با توجه به نوع شکست debonding تیرهای  $B_2$  و  $B_3$  به این نتیجه می توان دست یافت که تقویت مناسب انجام شده است ولی هنوز تیرها جا برای مقاومت بیشتر را دارند زیرا که ورقهای GFRP گسیخته نشده اند بلکه به همراه لایه ای از بتن از تیر جدا شدند و این نشان می دهد که ورقهای GFRP هنوز قابلیت تحمل بار بیشتر را دارند



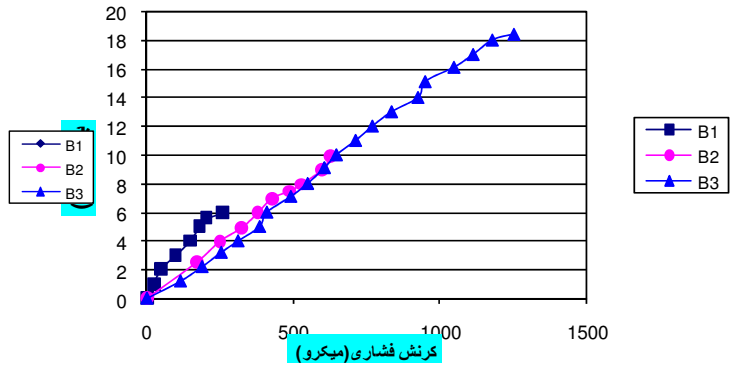
شکل (۷): نمودار بار- کرنش کششی تیرهای  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$



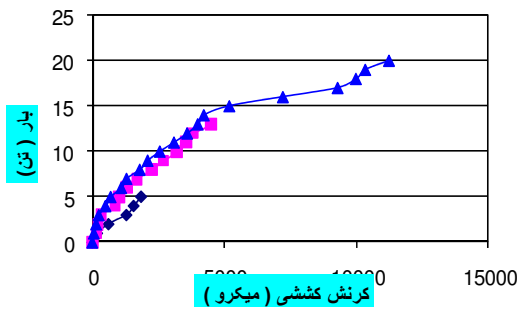
شکل (۶): نمودار بار کرنش فشاری تیرهای  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$



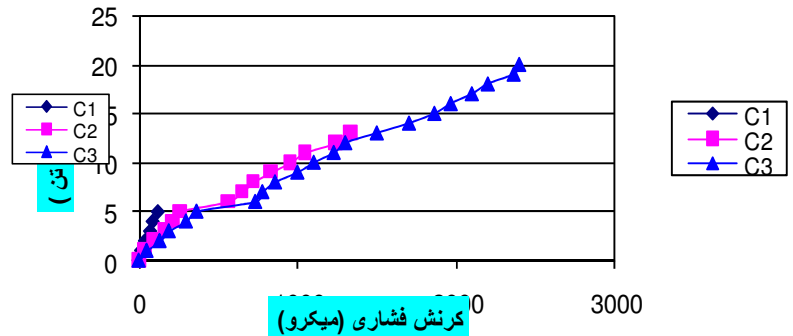
شکل (۹): نمودار بار- کرنشی کششی های تیرهای B



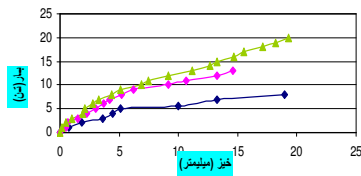
شکل (۸): نمودار بار- کرنش فشاری تیرهای B



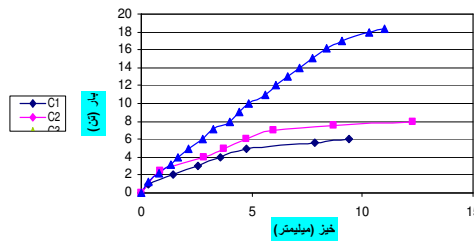
شکل (۱۱): نمودار بار کرنش کششی تیرهای C



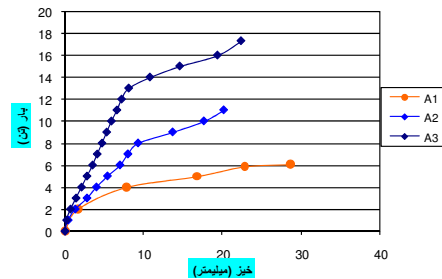
شکل (۱۰): نمودار بار- کرنش فشاری تیرهای C



شکل (۱۴): نمودار بار- تغییر مکان وسط تیرهای C



شکل (۱۳): نمودار بار- تغییر مکان تیرهای B



شکل (۱۲): نمودار بار- تغییر مکان تیرهای A



با مقایسه تیرهای  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_3$  مشاهده می شود که اولین ترک خمشی در تیرهای  $C_2$  و  $C_3$  به ترتیب ۷۲٪ و ۱۰۹٪ افزایش داشته اند. اولین ترک برشی ایجاد شده در تیرهای  $C_2$  و  $C_3$  به ترتیب ۲۵٪ و ۱۸٪ افزایش داشته اند که این افزایش می تواند از جهت استفاده دو نوار U شکل در نزدیکی دو تکیه گاه باشد. شکست تیر  $C_2$  و  $C_3$  به ترتیب از نوع گسیختگی FRP و برشی می باشند. همانطور که ملاحظه شد در این تقویت افزایش مقاومت خوبی را شاهد بوده که این افزایش ۶۷ درصد برای تیر  $C_2$  و ۱۰۰٪ برای تیر  $C_3$  می باشد.

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

#### ۴-۱- کرنش در ورقهای تقویتی، رفتار بار-تغییر مکان

مشاهده اشکال (۶ تا ۱۴) مربوط به نمودار بار - کرنش فشاری و بار - کرنش کششی تیرها می باشد که با انجام عمل تقویت شاهد افزایش کرنش فشاری و کاهش کرنش کششی در یک بار مشخص می باشیم که علت آن به جابجایی تار خنثی در اثر تقویت می تواند مربوط باشد. تغییر مکان وسط تیرهای تقویت شده از تیر شاهد کمتر می باشد که این پدیده مطابق انتظار بوده است.

#### ۵- نتیجه گیری

- بر اساس آزمایشات صورت گرفته و محاسبات انجام شده نتایج زیر در این تحقیق بدست آمده است:
- ۱- در تیرهایی که عمل تقویت خمشی را روی آنها انجام گرفت به دلیل اینکه مقاومت برشی رزین اپوکسی از بار کششی ناشی از خمش کمتر بوده قبل از اینکه ورقهای GFRP گسیخته شوند GFRP همراه با لایه ای از بتن از تیر جدا می شود که این شکست نامطلوب ترین نوع شکست تیرهای تقویت شده می باشد. چرا که تمام از ظرفیت GFRP استفاده نمی گردد.
  - ۲- با تقویت خمشی بر روی نمونه های مختلف مشاهده شد که کرنش فشاری به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش یافته است احتمال اینکه در این تیرها کرنش فشاری از کرنش مجاز بیشتر شود و احتمال این نوع مکانیزم در تیرهای معمولی به علت کم بودن سطح فشاری این تیرها نسبت به تیرهای T شکل بیشتر است.
  - ۳- در تیرهای تقویت شده شکست برشی به صورت ترکی که از نقطه بارگذاری شروع شده و تا نزدیکی تکیه گاه ادامه دارد می باشد. و این شکست ها همراه با جدا شدن ورقها از بتن در نزدیکی تکیه گاهها می باشد.
  - ۴- با تقویت تیرها میزان بار ترک خوردگی در تیرها افزایش می یابد.
  - ۵- تغییر شکل تیرهای تقویت شده خمشی از تیر تقویت نشده کمتر است.
  - ۶- شکل پذیری تیرهایی که تقویت خمشی بر روی آنها انجام شده است کاهش می یابد
  - ۷- با تقویت تیرها حرکت تار خنثی به سمت بالا یا سرعت کمتری صورت می گرفته است.
  - ۸- با بررسی نتایج تجربی و محاسباتی تفاوتی مشهود می باشد که ناشی از استفاده از بتن سبک در کار آزمایشگاه و در نظر گرفتن تنش نهایی برای فولاد و FRP در محاسبات و خطاهای آزمایشگاهی می باشد

#### ۶. منابع

۱. راهنمای تقویت و بهسازی سازه های بتنی با استفاده از کامپوزیت FRP تحت گزارش کمیته ACI-440.
۲. Hayder A. Rasheeda,\*, Shariq Pervaizb "Closed form equations for FRP flexural strengthening design of RC beams" Department of Civil Engineering, Kansas State University, Manhattan, KS 66506, USA