مقاوم‌سازی خمشی و برشی تیرهای T شکل ساخته شده با بتن سبک سازه‌ای با استفاده از ورقهای FRP

محمود میری[۱]، مرتضی حسینعلی بیگی[۲] ، امیر قدس[۳]

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

برای بررسی اثر تقویت تیرهای T شکل ساخته شده با بتن سبک سازه‌ای به وسیله چسباندن ورقهای CFRP به وسیله رزین اپوکسی بر مقاومت خمشی و برشی، تعداد ۹ عدد نمونه آزمایشگاهی طراحی و ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌های آزمایشگاهی با توجه به ضعفشان 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 باشند.. طراحی در گروه B به صورتی انجام گرفت که تیرها دارای ضعف برشی باشند. طراحی در گروه C به صورتی بود که تیرها هم دارای ضعف برشی بودند و هم دارای ضعف خمشی. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته مشاهده شد، در تقویت خمشی تیرها (گروه A) به میزان ۶۰ درصد افزایش مقاومت داشته، رحالی که نوع شکست برشی بوده و ورقهای CFRP به مرحله گسیختگی نرسیدند. همچنین بررسی تقویت برشی تیرها (گروه B) حاکی از افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲۰ درصد می‌باشد و نوع شکست در این حالت با توجه به ضعف بتن به صورت کنده شدن لایه‌ای از بتن همراه با ورق CFRP بوده است. همچنین از تقویت تواماً برشی و خمشی تیرها (گروه C) شاهد افزایش ۴۵ درصدی ظرفیت باربری تیرها بودیم. و نوع شکست در این حالت همراه با کنده شدن لایه‌ای از بتن همراه ورق CFRP از پهلوی تیر بوده است.

کلمات کلیدی: تقویت خمشی و برشی،تیرهای بتن سبک *T* شکل،ورق های مسلح به الیاف کربن *CFRP*.

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 زیربناء 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 ،تالجستن،هات جین سون،گویش و... در دانشگاهها و مراکز علمی دنیا در زمینه تقویت خمشی و برشی بوسیله ورقهایFRP تحقیقات زیادی را انجام دادند .این ورقه‌های پلیمری برخلاف ورقه‌های فولادی تحت اثر عوامل خورنده واقع نشده و در مقابل اثرات زیانبار ناشی از اسیدها، الکلها و نمکها و مواد خورنده موجود در محیط مقاوم بوده و همچنین حرارتهای نسبتاً بالا را بخوبی تحمل می کنند {۱}.

درنتیجه این فاکتورهای مناسب استفاده از این ورقه‌ها نیازمند درنظر گرفتن تمهیدات خاصی قبل از الصاق نبوده و نگهداری آنها نیز بعد از اجراء و نصب در مقایسه با ورق‌های فولادی بسیار راحت‌تر است.

---

[۱] استادیار دانشگاه سیستان و بلوچستان

[۲] استادیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. برنامه آزمایشگاهی:

. در این تحقیق تعداد ۹ تیر T شکل بتن سبک با طول کلی ۱۹۰۰mm که بر روی تکیه‌گاه‌هائی 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 می‌باشند نتـــایج آزمایشات روی میلگردهای مصرفی در جدول۱ 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	شن	ماسه	لیکا	فوق روان‌کننده	نسبت آب به سیمان	مجموع
وزن مصالح (kg/m^3)	۴۵۰	۱۸۰	۲۳۴	۵۶۱/۶	۳۷۴/۴	۶/۷۵	۰/۴	۱۸۰۰

ورقهای CFRPP یک جهته می باشند که تنش تسلیم آن ۳۸۰۰ و مدول الاستیسیته آن ۲۴۰۰۰۰ Mpa و ضخامت آنها ۰،۱۱mm می باشد.

۲-۲- سیستم بارگذاری

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 می شود.

۲-۳- معرفی نمونه ها

در این تحقیق تعداد ۹ تیر T شکل بتن سبک با طول کلی ۱۹۰۰mm که بر روی تکیه‌گاه‌هائی 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 می گردند.تیرها در زمان آزمایش دارای طول عمر تقریبا برابر می باشند.حداقل عمر برای تقویت ۲۱ روز می باشد که در این تحقیق عمر تیرها در موقع تقویت حدودا ۱۰۰ روز می باشد .مقاومت فشاری بتن مصرفی در همهء تیرها برای f_c =۴۱۰ Kg/cm^2 طرح شده است

۲-۳-۱- تیرهای گروهA

گروه A مربوط به تیرهایی است که از لحاظ خمشی دارای ضعف می‌باشند. در این گروه از تیرها از دو میلگرد آجدار نمره ۱۲ به عنوان آرماتور کششی و دو میلگرد آجدار نمره ۱۲ به عنوان آرماتور فشاری استفاده شده است و برای آرماتورهای برشی از میلگرد آجدار نمره ۱۰ بصورت مستطیلی به فاصله محور تا محور ۷۵ میلیمتر استفاده شده است.انتخاب آرماتور فوق برای تیرهای گروه A بدین‌خاطر 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

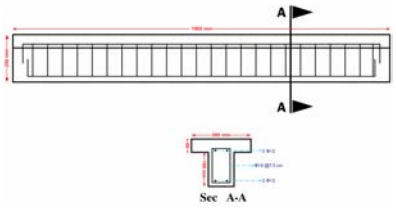
۲-۳-۲- تیرهای گروه B

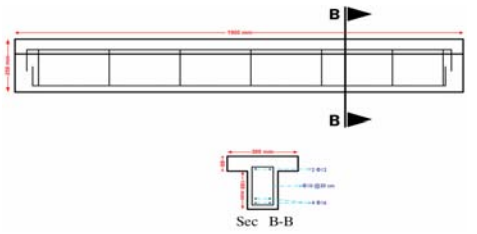
گروه B مربوط به تیرهائی می‌باشد که دارای ضعف برشی می‌باشند. در این گروه از تیرها از چهار میلگرد آجدار نمره ۱۶ به عنوان آرماتور کششی که در دو ردیف دوتائی قرار گرفته‌اند و از دو میلگرد آجدار نمره ۱۲ به عنوان آرماتور فشاری استفاده شده است. برای آرماتورهای برشی از میگلرد آجدار نمره ۱۰ به صورت مستطیلی و به فاصله محور تا محور ۳۰۰ میلیمتر استفاده شده است و مشخصات مربوط به تیرهای گروه B در شکل (۲) نشان داده شده است

.

۲-۳-۳- تیرهای گروه C

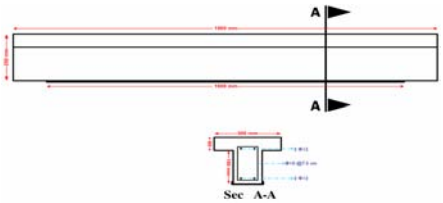
گروه C مربوط به تیرهائی می‌باشد که هم از لحاظ برشی و هم از لحاظ خمشی دارای ضعف می‌باشند. در این گروه از تیرها از دو میلگرد نمره ۱۲ آجدار به عنوان آرماتور کششی و دو میلگرد آجدار نمره ۱۲ به عنوان آرماتور فشاری استفاده شده است و برای آرماتورهای برشی از میلگرد آجدار نمره ۱۰ به صورت مستطیلی به فاصله محو تا محور ۳۰۰mm استفاده شده است. مشخصات مربوط به تیرهای گروه C در شکل (۳) آورده شده است.

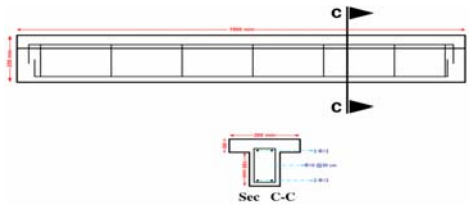




شکل (۱): مشخصات مربوط به تیرهای گروه A

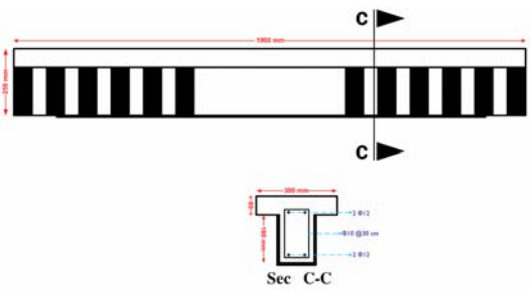
شکل (۲): مشخصات مربوط به تیرهای گروه B

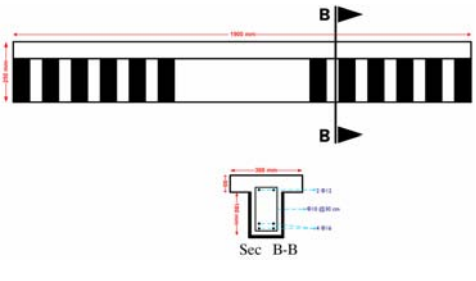




شکل (۳): مشخصات مربوط به تیرهای گروه C

شکل (٤): نحوه تقویت تیر A_2 ، A_1





شکل (۵): نحوه تقویت تیر B_2 و B_3

شکل (٦): نحوه تقویت تیرهای گروهC

۲-۴- 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_3 به عنوان تیر مرجع و بر روی تیر A_1 و A_2 عمل تقویت را انجام می دهیم. برای تقویت تیرای A_1 و A_2 از ورقهای CFRP یک جهته با تنش تسلیم ۳۸۰۰Mpa و مدول الاستیسیته ۲۴۰۰۰۰Mpa استفاده شده است. عرض ورق تقویتی ۱۶cm و طول آن ۱۶۰cm می‌باشد. ضخامت خالص این ورق ۰/۱۱ میلی‌متر می‌باشد و چگونگی تقویت در شکل(۴) نشان داده شده است.

۲-۴-۲- تقویت تیر گروه B

تیرهای گروهB 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. برای تقویت برشی تیرهای B_2 و B_3 از ورقهای CFRP به عرض ۷cm و طول ۴۸cm به شکل U استفاده شده است که نحوه تقویت این تیر در شکل (۵) نشان داده شده است.

۲-۴-۳- تقویت تیر گروه C

تیرهای گروهC 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. برای تقویت این تیر ابتدا همانند تیرهای گروه A از ورق تقویتی به عرض ۱۶cm و طول ۱۶۰cm برای تقویت خمشی تیر استفاده شده است. سپس همانند تیر B_2 از ورقهای ۷cm*۴۸ برای تقویت برشی استفاده کردیم که نحوه تقویت در شکل (۶) نشان داده شده است. علت اینکه ابتدا CFRP خمشی و سپس CFRP برش نصب گردید این است که CFRP خمشی در زیر تیر نیروهای کششی را تا حدودی به CFRP جان تیر منتقل می‌نماید و احتمال خطر شکست ناشی از جدا شدن CFRP خمشی در زیر بتن را کاهش می‌یابد. سیستم چسباندن ورقهای CFRP به صورت wet lay up و نوع رزین و روش تقویت مانند تیرهای قبلی می‌باشد .

۳. نتایج آزمایشات

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

جداول (۳)،(۴)و(۵) 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 وخیز حداکثر در دهانه میانی تیرها به هنگام گسیختگی را در سه گروه مختلف ارائه می کند.

جدول (۳): نتایج آزمایشات تیرهای گروه A

نمونه	مقاومت فشاری Kg/cm^2	بار نهایی (ton)	افزایش بار نهایی نسبت به تیر کنترل	خیز حداکثر	بار ترک خوردگی خمشیton	بار ترک خوردگی برشیton	افزایش بار ترک خوردگی خمشی	افزایش بار ترک خوردگی برشی	نوع گسیختگی
A_3	۵۲۵	۱۱/۲	-	۱۴/۸	۲/۹	۵/۹۶	-	-	خمشی همراه با جاری شدن میلگردهای کششی
A_1	۵۲۵	۱۷/۵	۵۶٪	۱۰/۵	۴/۳	۶	۴۸٪	۰/۶۷٪	برشی
A_2	۵۴۰	۱۸/۹	۶۹٪	۱۰	۴/۶	۵/۹۶	۵۹٪	۰	برشی با جدا شدن CFRP همراه با جدا شدن لایه ای از بتن

جدول (۴): نتایج آزمایشات تیرهای گروه B

نمونه	مقاومت فشاری Kg/cm^2	بار نهایی (ton)	افزایش بار نهایی نسبت به تیر کنترل	خیز حداکثر	بار ترک خوردگی خمشیton	بار ترک خوردگی برشیton	افزایش بار ترک خوردگی خمشی	افزایش بار ترک خوردگی برشی	نوع گسیختگی
B_1	۵۵۰	۱۸/۵	-	۸/۸	۴/۳	۵,۵	-	-	برشی با ترکیدن بال فشاری
B_2	۵۶۰	۲۱	۱۴٪	۹	۴/۳	۱۱/۱	۰	۱۰۲٪	برشی با جدا شدن CFRP همراه با جدا شدن لایه ای از بتن
B_3	۵۶۰	۲۲/۵	۲۲٪	۹/۴	۵/۵	۱۴	۲۸٪	۱۵۵٪	برشی با ترکیدن بال فشاری

جدول (۵): نتایج آزمایشات تیرهای گروه C

نمونه	مقاومت فشاری Kg/cm^2	بار نهایی (ton)	افزایش بار نهایی نسبت به تیر کنترل	خیز حداکثر	بار ترک خوردگی خمشیton	بار ترک خوردگی برشیton	افزایش بار ترک خوردگی خمشی	افزایش بار ترک خوردگی برشی	نوع گسیختگی
c_1	۵۵۵	۱۰/۵	-	۲۱/۸	۳/۲	۵/۶	-	-	برشی
c_2	۵۴۵	۱۵	۴۳٪	۱۹/۶	۴	۷/۵	۲۵٪	۳۴٪	برشی با جدا شدن CFRP همراه با جدا شدن لایه ای از بتن
c_3	۵۵۰	۱۴/۱	۳۴٪	۱۵/۷	۳/۸	۷/۱	۱۹٪	۲۷٪	برشی

۳-۲- مقایسه تیرهای گروه A

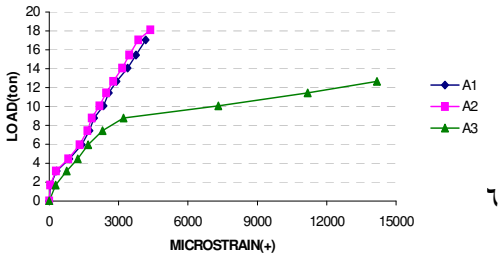
در بارگذاری تیرهای گروه A به نتایجی رسیده که در اینجا این نتایج مرور می‌شود. اولین ترک خمش ایجاد شده در تیر A_3 در بار ۲/۹ton بوده درحالی که اولین ترک خمشی ایجاد شده در تیرهای A_1 و A_2 به ترتیب ۴/۳ton و ۴/۶ton بوده مشاهده می‌شود که اولین ترک این تیرهای در باری تقریباً ۱/۵ برابر برای A_1 و ۱/۶ برابر برای A_2 بوجود آمده است. اولین ترک برشی ایجاد شده در تیر A_3 در بار ۵/۹۶ton بود و اولین ترک برشی ایجاد شده در تیرهای A_1 و A_2 به ترتیب برابر ۶ton و ۵/۹ton بوده و انتظار هم می‌رفت که تیرها در یک بار مشخص به اولین ترک برشی برسند. شکست تیر A_3 در بار ۱۱/۲ton اتفاق افتاد که این شکست از نوع خمشی بوده و با جاری شدن میلگردهای کششی همزمان بوده در حالی که شکست تیرهای A_1 و A_3 در بارهای به ترتیب ۱۷/۵ton و ۱۸/۹ton بوده است و از نوع برشی بوده است. همانطور که مشاهده شد افزایش مقاومت ایجاد شده در تیر A_1 حدود ٪۵۶ و در تیر A_2 حدود ٪۷۰ بوده که این مقدار تقریباً قابل توجه می‌باشد ولی باید این نکته را درنظر گرفت که مقدار واقعی افزایش ظرفیت باربری می‌توانست به مراتب بیشتر از این مقدار باشد. زیرا اولاً شکست تیرهای A_1 و A_2 از نوع برشی بوده و تیر قبل از اینکه از تمام ظرفیت خمشی خود استفاده کند گسیخته شده و ثانیاً اگر بار وارده برای اولین ترک را درتیرها مقایسه شوند مشاهده خواهد شد که بار اولین ترک در تیرهای A_1 و A_2 تقریباً ۱/۵ برابر تیر A می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش ظرفیت خمشی تیر A_2 به مراتب بیشتر از آنچه مشاهده شده می‌باشد.

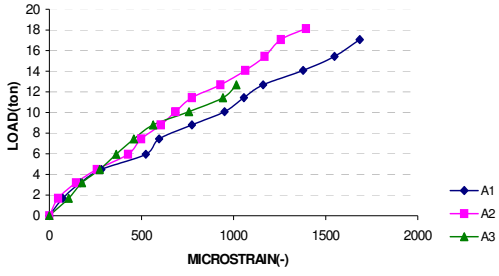
۳-۳- مقایسه تیرهای گروهB

با مقایسه تیرهای B_1 و B_2 و B_3 مشاهده می‌شود که اولین ترک خمش در تیر B_1 در بار ۴/۳ton بوده که همانطور که انتظار می‌رفت اولین ترک خمش تیرهای B_1 و در یک بار انجام شده ولی اولین ترک خمشی در تیر B_3 و در بار ۵/۵ تن ایجاد شده که اندکی بیشتر از رویکرد دیگر بوده است. اولین ترک برشی درتیـر B_1 در بار ۵/۵ton بوجود آمده در حالی که این ترکها در تیرهای B_2 و B_3 به ترتیب در بارهای ۱۱/۱ و ۱۴ تن بوجود آمده که مقدار قابل توجهی مقاومت در برابر اولین ترک برشی را افزایش داده است شکست تیر B_1 در بار ۱۸/۵ تن بوده و این شکست از نوع برشی بوده است شکست تیرهای B_2 و B_3 به ترتیب دربارههای ۲۱ton و ۲۲/۵ton و از نوع برشی بوده است همانطور که مشاهده می‌شود افزایش مقاومت تیر B_2 نسبت به B_1 تقریباً ٪۱۵ و افزایش مقاومت تیر B_3 نسبت به B_1 تقریباً ٪۲۲ بوده است این مقدار افزایش مقدار قابل توجهی نیست با توجه به نوع شکست برشی تیرهای B_2 و B_3 به این نتیجه می‌توان دست یافت که تقویت مناسب انجام نشده است تیرها هنوز دارای ضعف برشی بوده و نکته جالب اینکه ورقهای CFRP گسیخته نشده‌اند بلکه به همراه لایه‌ای از بتن از تیر جدا شدند و این نشان می‌دهد که ورقهای CFRP هنوز قابلیت تحمل بار بیشتر را دارند.

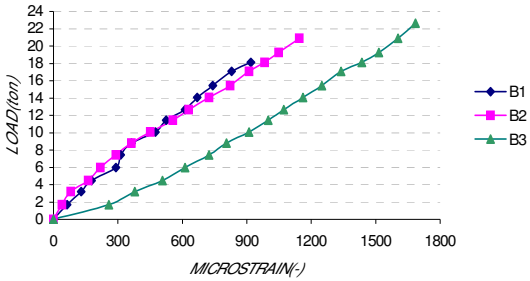
۳-۴- مقایسه تیرهای گروه C

با مقایسه تیرهای c_1 و c_2 و c_3 مشاهده می‌شود که اولین ترک خمشی در تیر c_1 دربار ۳/۲ton ایجاد شده است و این ترک در تیرهای c_2 و c_3 به ترتیب ۴ton و ۳۸ton بوده که افزایش بسیار کمی داشته است. اولین ترک برشی ایجاد شده در تیر c_1 دربار ۵/۶ton بوده و در حالی که اولین ترک برشی در تیرهای c_2 و c_3 به ترتیب ۷/۵ton و ۷/۱ton می‌باشد که افزایش آن در مقابل تیر c_1 برای تیر c_2 ٪۳۵ و برای تیر c_3 ٪۲۸ می‌باشد در ایجاد ترکهای اولیه برشی افزایش قابل ملاحظه داشته است. شکست تیر c_1 دربار ۱۰/۵ton بوده و این شکست از نوع برشی می‌باشد در حالی که شکست تیر c_2 دربار ۱۵ton و تیر c_3 دربار ۱۴/۱ton می‌باشد که شکست هر دو از نوع برشی می‌باشد. همانطور که ملاحظه شد در این تقویت افزایش مقاومت خوبی را شاهد بوده که این افزایش ۴۵ درصد برای تیر c_2 و ٪۳۵ برابر تیر c_3 می‌باشد.



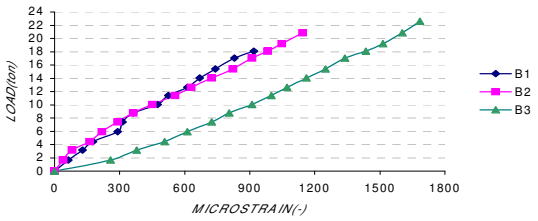


شکل (۷): نمودار بار- کرنش کششی تیرهای A
کرنش فشاری تیرهای A

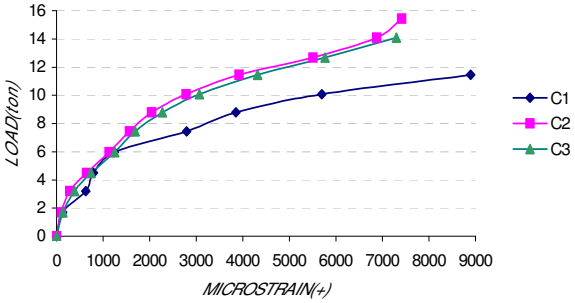


شکل(۰۹): نمودار بار- کرنشی کششی‌های تیرهای B_1 و B_2 و B_3

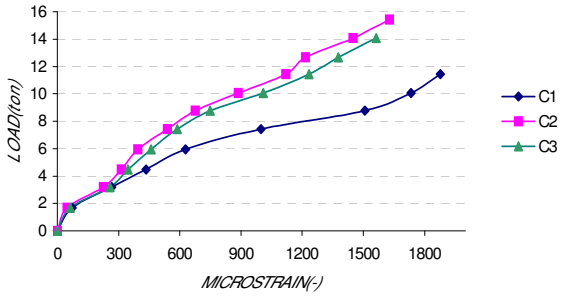
شکل (۸): نمودار بار



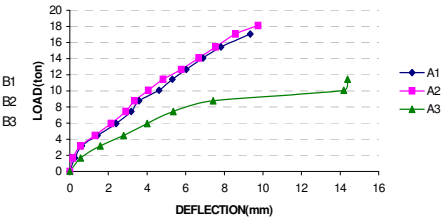
شکل (۱۰): نمودار بار- کرنش فشاری تیرهای B_1 و B_2 و B_3



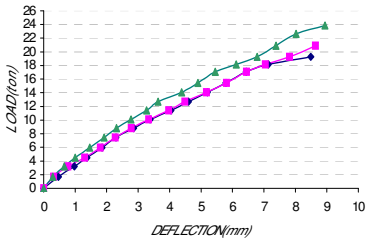
شکل(۱۱) نمودار بار- کرنش کششی تیرهای c_1 و c_2 و c_3



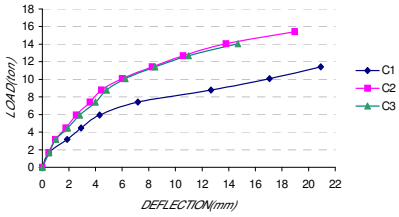
شکل (۱۲)ودار بار- کرنش فشاری تیرهای c_1 و c_2 و c_3



شکل (۱۳): نمودار بار- تغییرمکان تیرهای A



شکل (۱٤)نمودار بار- تغییرمکان تیرهایB



شکل (۱۵)نمودار بار-تغییرمکان C

۴-بحث و بررسی نتایج

۴-۱- کرنش در ورقهای تقویتی

مشاهده اشکال (۷ تا ۱۵)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..

۴-۲- رفتار بار-تغییر مکان

تغییرمکان وسط تیرهای تقویت شده از تیر شاهدکمتر می‌باشد که این پدید مطابق انتظار بوده است.

۵–نتیجه گیری

براساس آزمایشات صورت گرفته و محاسبات انجام شده نتایج زیر در این تحقیق بدست آمده است:

۱- مدهای شکست برشی در تیر تقویت شده به صورت

الف) ناشی از گسیختگیFRP ب) بدون گسیختگی FRP ج) ناشی از جدا شدن FRP می‌باشد.

۲- با تقویت خمشی و برشی بر روی نمونه‌های مختلف مشاهده شد که کرنش فشاری به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است .

۳- با تقویت تیرها میزان بار ترک‌خوردگی در تیرها افزایش می‌یابد.

۴- تغییر شکل تیرهای تقویت شده خمشی از تیر تقویت نشده کمتر است.

۵- با تقویت تیرها حرکت تار خنثی به سمت بالا یا سرعت کمتری صورت می‌گرفته است.

۶.منابع

۱. راهنمای تقویت و بهسازی سازه‌های بتنی با استفاده از کامپوزیت FRP تحت گزارش کمیته ۴۴۰-ACI.