



ارزیابی کاربرد ورقهای FRP در تقویت تیرهای مرکب

کیاچهر بهفرنیا^۱، علیرضا هاشمی نژاد^۲

۱- دکترای مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- کارشناس ارشد سازه، اصفهان

kia@cc.iut.ac.ir

خلاصه

در طی سالهای اخیر، موضوع تقویت و مقاومسازی سازه‌ها بطور گسترده‌ای در جوامع علمی و مهندسی مطرح گردیده است. در این ارتباط، بسته به نوع سازه و هدف از مقاومسازی، روشهای متنوعی از سوی محققین پیشنهاد شده است. یکی از روش‌هایی که به طور گسترده در مورد تقویت اعضای بتنی مورد استفاده قرار گرفته است، کاربرد ورقهای FRP می‌باشد. در این مقاله، استفاده از ورقهای CFRP در تقویت تیرهای مرکب (دال بتنی - تیر فولادی) مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. در این مطالعات، تقویت تیر مرکب توسط نصب ورقهای CFRP بر روی بال کششی تیر فولادی و نیز جان تیر انجام گرفت و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی انجام شده توسط دیگر محققین مقایسه گردید. در این تحقیق میزان تاثیر تقویت ورقهای CFRP در دو ضخامت مختلف و ابعاد متفاوت و همچنین چسبندگی بین ورق و تیر فولادی به کمک معیار کرنش در ورق، با استفاده از روش اجزای محدود غیر خطی، تحت بارگذاری متمرکز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که با استفاده از ورقهای CFRP می‌توان سختی و مقاومت تیرهای مرکب را بطور قابل توجهی افزایش داد.

کلمات کلیدی: تقویت، ورقهای CFRP، تیر مرکب

مقدمه

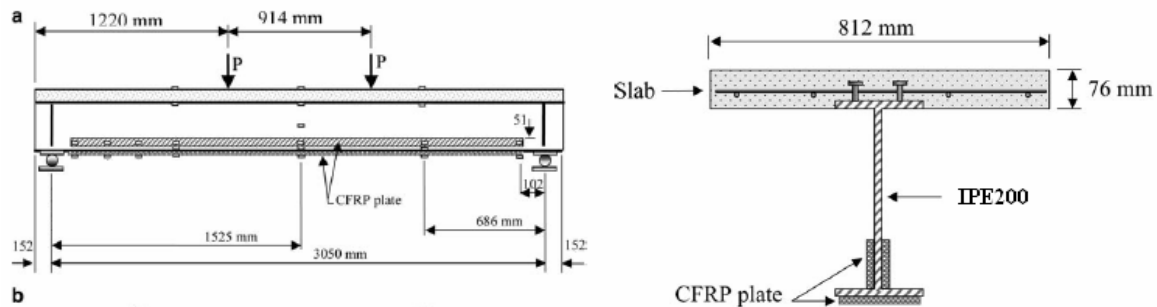
افزایش عمر سازه‌ها، افزایش وزن وسایل نقلیه و حجم ترافیک بر روی پلها، اثرات سوء شرایط محیطی، عدم مراقبت صحیح از سازه‌ها، از عمده دلایل کاهش ظرفیت باربری تیرهای اصلی در سازه‌هایی همچون پلهاست. ترمیم و تقویت چنین سازه‌هایی جهت افزایش عمر سرویس دهی، از لحاظ اقتصادی با صرفه تر و مدت زمان اجرای آنها نیز کوتاهتر می‌باشد، که سبب کاهش معضلات جانبی می‌گردد. اتصال ورقهای فولادی به بال کششی از روشهای معمول تقویت تیرهای فولادی است که علاوه بر هزینه بالا سبب سنگینی سازه نیز می‌شود. سیستم FRP (Fiber Reinforced Polymer) شامل الیاف، رزینهای اتصال دهنده ورق سطح زیرین و روکشهای حفاظتی می‌باشد [۱]. استحکام کششی، مدول الاستیسیته و مقاومت خستگی بالا، مقاومت قابل توجه در برابر خوردگی در مقابل وزن کم این ورقها سبب کاربرد موثر این مواد جهت تقویت تیرها و ستونها شده است. در میان انواع مختلف ورقهای FRP، ورقهای CFRP جهت تقویت تیرهای فولادی مورد توجه قرار گرفته اند [۵-۲]. در سالهای اخیر تحقیقات متنوعی در زمینه استفاده از ورقهای CFRP جهت تقویت بتن های مسلح و پیش تنیده انجام گرفته و در این زمینه دستورالعملهای طراحی با این ورقها جهت سازههای بتنی توسط آیین نامه های مختلف اروپایی، امریکایی و ژاپنی ارائه شده است. ولیکن در زمینه تقویت سازه های فولادی با CFRP تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است. Sen et al. شش تیر مرکب فولادی را که در چهار نقطه تحت بار استاتیکی قرار گرفته بود، توسط ورقهای یک جهته CFRP با ضخامت های ۵ و ۲ میلیمتر تقویت کرد و افزایش بار نهایی ۱۱ تا ۵۰ درصد، بسته به مقاومت تسلیم نمونه و مود شکست بدست آورد [۶]. در تحقیق دیگر

^۲ استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان

Mertz و Gillespie با تقویت تیر مرکب افزایش مقاومت خمشی ۲۵ تا ۵۰ درصد را ثبت کرده اند [۷]. در بررسی حاضر با طرح وضخامت مختلف ورق تقویتی، به مطالعه تاثیر CFRP در ظرفیت باربری نهایی تیر مرکب پرداخته شده است. در روند بررسی جداسازی (Debonding) ورق از سطح فولاد با کنترل کرنش موجود مورد ارزیابی قرار گرفته است.

معرفی

به منظور کالیبراسیون مدل عددی، تیر مرکب آزمایشگاهی مرجع [۸] تحت عنوان تیر کنترل عددی (V Numerical)، با مشخصات نشان داده شده در شکل (۱) مدلسازی شد.



شکل ۱- مشخصات تیر مرکب همراه با طرح تقویت

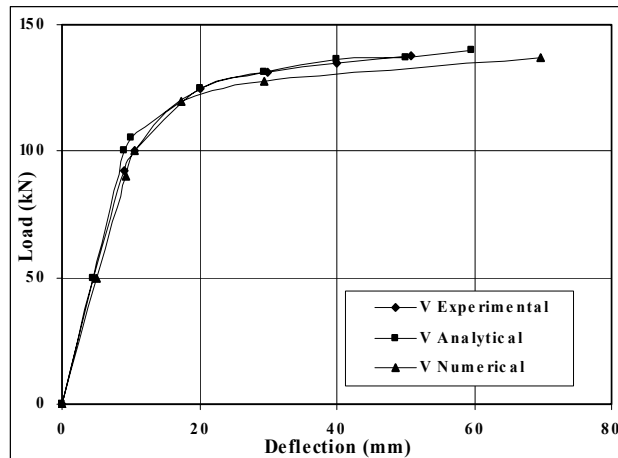
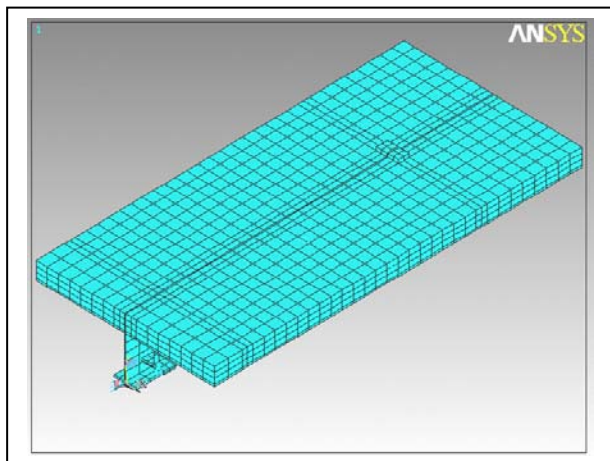
تیر مرکب شامل تیر فولادی IPE200 به طول ۳۴۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر، دال بتنی به عرض ۸۱۲ و ضخامت ۷۶ میلیمتر می باشد. گل میخ های برشی جهت تامین اتصال برشی بین دال و تیر تعبیه شده که در مدل عددی این خاصیت توسط Merge Nodes تحقق می یابد. ورق های فولادی با ابعاد ۱۰۰×۵۰×۲۰ میلیمتر در محل بارگذاری و تکیه گاه در نظر گرفته شده است. تکیه گاهها از نوع ساده و بارگذاری بصورت متمرکز متقارن می باشد. تیر کنترل آزمایشگاهی تقویت شده با ورقهای CFRP با دو طرح S1 و S2 نیز مدلسازی شد که در طرح S1 تنها بال کششی تیر فولادی و در طرح S2 علاوه بر بال، جان نیز مورد تقویت قرار گرفت. مقاومت استوانه ای ۲۸ روزه بتن ۳۵MPa و مقاومت تسلیم فولاد ۳۶۴ MPa می باشد. سایر مشخصات در جدول (۱) ارائه شده است. مش فولادی دال بتنی با آرماتورهایی به قطر ۱۰mm در فواصل ۲۰۰mm اجرا شده که تاثیر آن در مدل عددی با استفاده از خاصیت (Smear) در المان Solid65 اعمال شد. مدل عددی با استفاده از نرم افزار ANSYS (V.8.1) به روش اجزای محدود غیرخطی طراحی و از المانهای Solid65 جهت مدلسازی بتن، Shell41 برای مدلسازی CFRP و از Soild45 به منظور طراحی ورقهای فولادی استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات مصالح

مصالح	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
بتن	۳۵	۳/۷	-	۲۸
فولاد	-	۴۹۶	۳۶۴	۲۰۰
CFRP	-	۲۴۸۰	-	۲۰۰

بررسی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

با کالیبره کردن نرم افزار در ابتدای هر تحقیق به روش عددی می توان از صحت نتایج آن اطمینان حاصل کرد؛ به همین منظور با مدلسازی عددی تیر آزمایشگاهی و مقایسه نتایج (شکل ۲)، مدلی که با کمترین خطا بیشترین تطابق را با مدل آزمایشگاهی داشته، تحت عنوان تیر کنترل عددی، (V Num) انتخاب شد. با بررسی مش بندی (Mesh Study)، تیر کنترل عددی به ۲۹۴۴ المان مکعبی، با رعایت نسبت اضلاع (Fine Mesh) تقسیم شد. جهت کاهش حجم محاسبات عددی و سرعت بخشیدن به روند تحلیل، نیمی از تیر متقارن مدل شده و نتایج برای کل تیر ارائه گردیده است (شکل ۲). معیارهای تطابق، تغییر مکان وسط دهانه، نقطه تسلیم تیر فولادی، میزان کرنش در ورق CFRP، تنش و کرنش در بتن می باشد. شکل (۳) تطابق قابل قبولی بین تیر کنترل عددی (V Num) با تیر آزمایشگاهی (V Exp) بررسی شده توسط A.H.Ai.Saidy و همکارانش نشان می دهد [۸]. همچنین در شکل (۳)، نمودار حاصل از فرمولهای محاسباتی، ارائه شده توسط Saidy [۸] با مشخصه (V Anl)، نشان داده شده است.

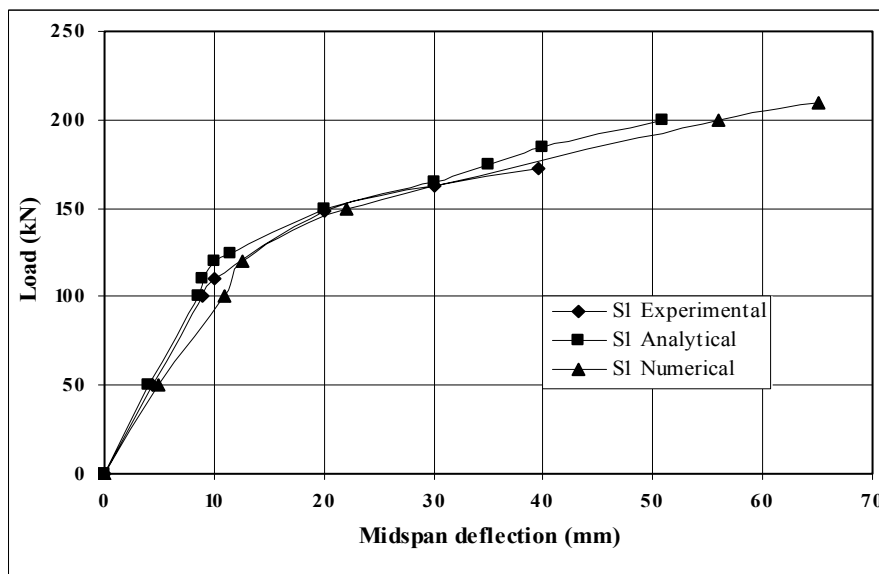


شکل ۲- نصف مدل عددی تیر کنترل

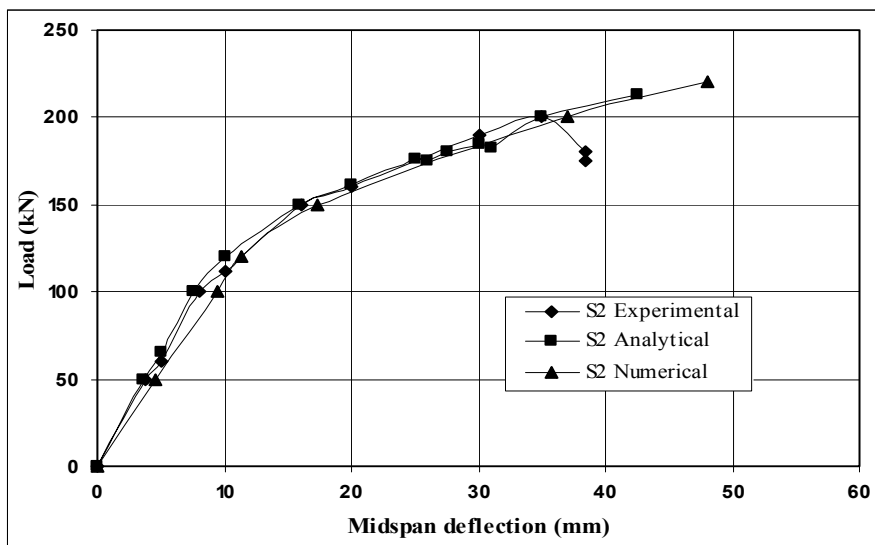
شکل ۳- تغییر مکان وسط دهانه تیرهای کنترل عددی، آزمایشگاهی، محاسباتی

نمودار تغییر مکان وسط دهانه تیر مرکب تا نقطه تسلیم تیر فولادی بصورت خطی افزایش یافته و پس از تسلیم با شیب ملایم به طرف ظرفیت نهایی باربری تیر میل می کند؛ در این حالت مود شکست خرد شدن بتن دال می باشد (شکل ۳). مطالعه حاضر بر اساس فرضیات ذیل انجام گرفته است:

- اتصال بین دال بتنی و تیر فولادی، و همچنین تیر فولادی و ورق CFRP بطور کامل و بدون هیچگونه جداشدگی می باشد.
 - نمودار تنش_ کرنش فولاد بصورت الاستیک-کاملاً پلاستیک (Elastic- Perfectly-Plastic) فرض شده است.
 - تغییرات کرنش در کل مقطع تیر خطی می باشد.
 - تغییرات تنش_ کرنش ورقهای CFRP تا گسیختگی ورق بصورت خطی است.
 - نمودار تنش_ کرنش بتن از منحنی ساده شده پنگاش [۹] تبعیت می کند.
- در مرحله بعد، تیرهای تقویت شده S1 و S2 با استفاده از نرم افزار مدلسازی و با نتایج آزمایشگاهی کالیبره می گردند. انطباق نتایج در اشکال (۴) و (۵) جهت بررسی و مقایسه ارائه شده اند. ارتفاع جان تقویت شده در مدل S2، ۵۰ میلیمتر و ضخامت ورق در هر دو مدل ۱/۴ میلیمتر می باشد.

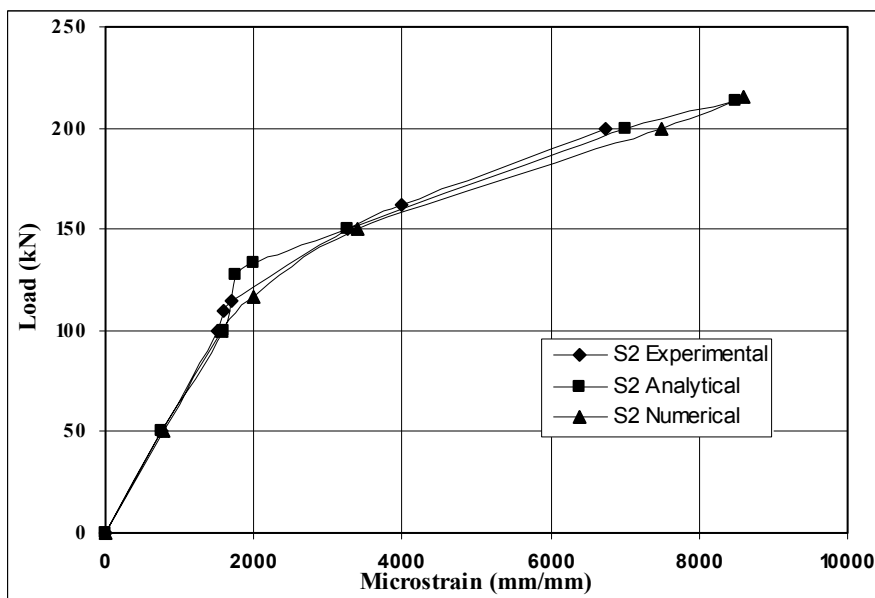


شکل ۴- مقایسه تغییر مکان وسط دهانه مدل عددی S1 با مدل آزمایشگاهی و فرمول محاسباتی



شکل ۵- مقایسه تغییر مکان وسط دهانه مدل عددی S2 با مدل آزمایشگاهی و فرمول محاسباتی

بطوریکه مشاهده می گردد مدل عددی در نمودارهای فوق انطباق قابل قبولی از خود نشان داده، بطوریکه شیب در تمامی نمودارها، پس از تسلیم فولاد کمتر شده و با تغییرات کوچک افزایش بار، تغییر مکان بزرگتری را تا باربری نهایی نشان داده اند. کارایی چنین روش تقویت تیر با استفاده از ورقهای CFRP به طور قابل ملاحظه ای بستگی به میزان چسبندگی ورق با سطح زیرین خود دارد؛ بطوریکه در بسیاری از مواقع به دلیل عدم اتصال کامل و یا جداسدگی ورق (Debonding) به دلیل کرنش بیش از حد در ورق تقویتی، نتیجه مورد انتظار و قابل قبول بدست نمی آید. جهت کنترل این پدیده ACI نیز راهکارهایی همچون اعمال محدودیت در کرنش ورق ارائه کرده است. در مدل مورد بررسی نیز به توصیه کارخانه سازنده کرنش نهایی در ورق CFRP به ۱/۴٪ و همچنین کرنش نهایی در بتن طبق دستورالعمل ACI به ۰/۰۰۳ محدود شده است. شکل ۶ علاوه بر انطباق کرنش موجود در ورق CFRP وسط دهانه تیر مدل عددی با مدل آزمایشگاهی و فرمول محاسباتی، رعایت محدودیت کرنش در ورق را نیز ارائه می دهد.

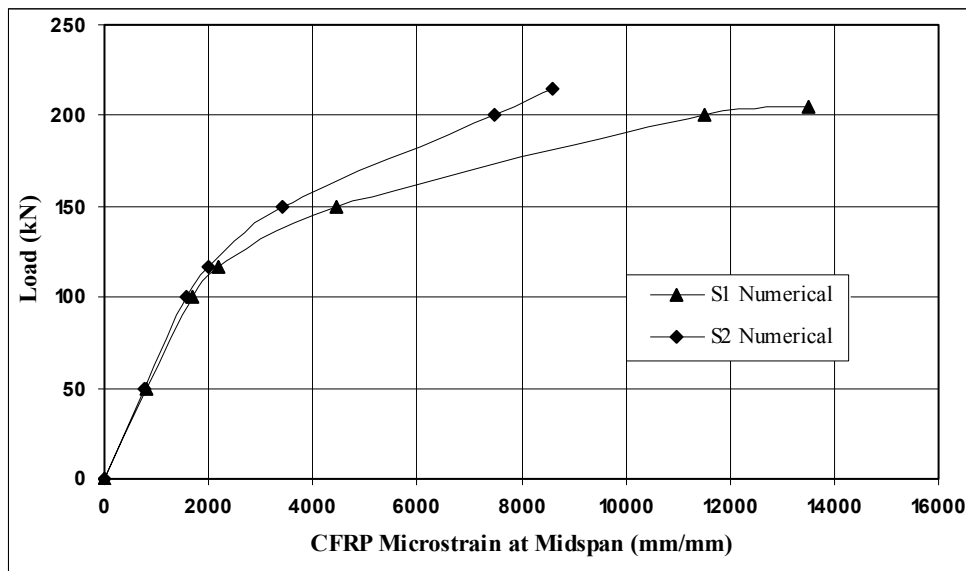


شکل ۶- مقایسه کرنش طولی ثبت شده ورق CFRP در وسط دهانه تیر مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

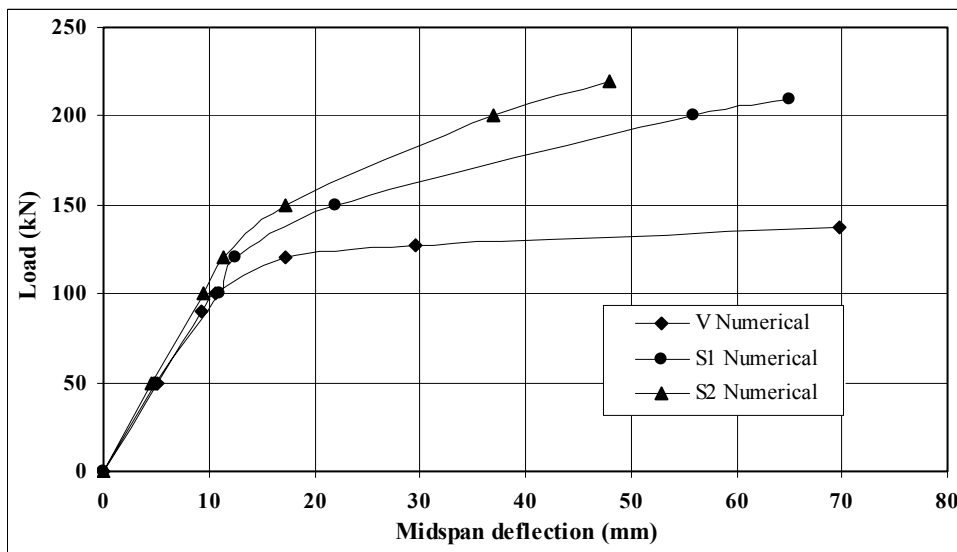
هرچند اتصال CFRP به جان تیر به طور مستقیم، چندان سبب افزایش مقاومت خمشی نهایی نمی شود، ولی بطور موثر باعث کاهش تنش و کرنش بین ورق تحتانی (متصل به بال کششی) و سطح بال تیر فولادی شده و این امر موجب افزایش ظرفیت باربری نهایی تیر می گردد. به عنوان مثال تحت



بار ۲۰۰ kN، کرنش CFRP در بال تحتانی در وسط دهانه تیر S1 Num (ناحیه تسلیم فولاد) حدود ۱۵۰۰ Ms اولی در تیر S2 Num حدود ۷۰۰۰ Ms اندازه گیری شده است (شکل ۷).



شکل ۷- مقایسه کرنش ورق CFRP در تیرهای عددی S1 و S2



شکل ۸- نمودار نیرو- تغییر مکان تیرهای کنترل و تقویت شده عددی

همچنین با توجه به شکل (۸)، تحت بار ۱۳۵kN، تغییر مکان وسط دهانه تیر کنترل (V Num) حدود ۶۰ میلیمتر و در تیرهای S1 و S2 به ترتیب ۱۵ و ۱۳/۵ میلیمتر است. کاهش ۲۵٪ تغییر مکان، نشان دهنده افزایش سختی تیر تقویت شده و کاهش انعطاف پذیری آن می باشد. همچنین تقویت‌های CFRP، با محدود کردن تنش در فولاد مانع از تشکیل مفصل پلاستیک شده و ظرفیت باربری تیر را تا حدود ۴۵٪ (۲۰۰ kN) افزایش داده است. در جدول (۲۹) خلاصه نتایج و مود گسیختگی هر یک از مدلها ارائه شده است.



جدول ۲- مقایسه نتایج بارگذاری تیر مدل شده عددی با تیر آزمایشگاهی و فرمول محاسباتی

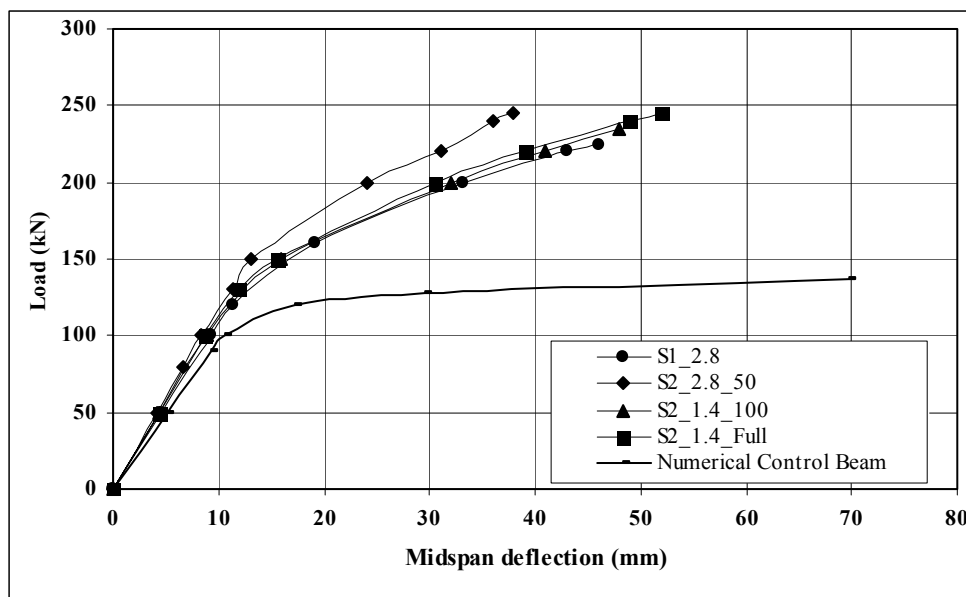
مشخصه تیر	بار نهایی (kN)			افزایش ظرفیت باربری (%)			مود گسیختگی
	EXP	ANL	NUM	EXP	ANL	NUM	
V	۱۳۸	۱۴۰	۱۳۰-۱۴۰	----	----	----	CC
S1	۱۷۳	۲۰۰	۲۰۰-۲۱۰	۲۵	۴۲	حدود ۵۰	R
S2	۲۰۰	۲۱۳	۲۰۰-۲۲۰	۴۵	۵۲	حدود ۵۰	R&CC

CC: خرد شدگی بتن
R: گسیختگی CFRP

اعداد بدست آمده از مدل‌های عددی بر اساس فرضیات ارائه شده می باشد؛ که موجب وارد شدن خطای معقول در افزایش ظرفیت باربری نهایی تیر می گردد. ولی آنچه در مقاله حاضر از اهمیت بیشتری برخوردار است اثبات تاثیر قابل ملاحظه تقویتی های CFRP در افزایش ظرفیت باربری تیرهای مرکب است.

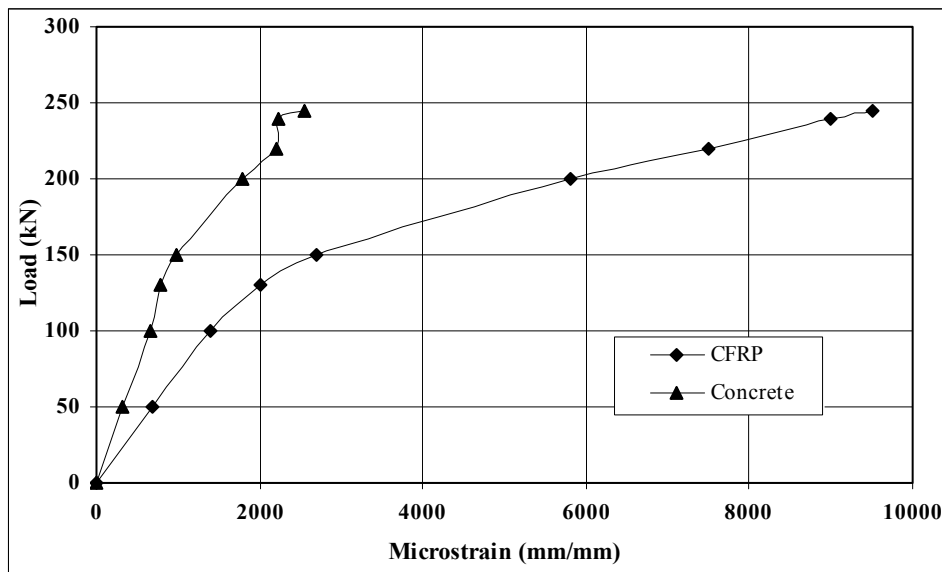
مطالعه پارامتریک

در این مطالعه، میزان تاثیر ارتفاع ورق تقویتی در جان تیر و ضخامت آن، دو پارامتر مورد بررسی بوده است. در ابتدا ارتفاع ورق CFRP را از ۵۰ mm به ۱۰۰ mm و در مرحله بعد به کل ارتفاع جان افزایش داده و ظرفیت نهایی باربری با تیر کنترل مقایسه گردید (شکل ۹).



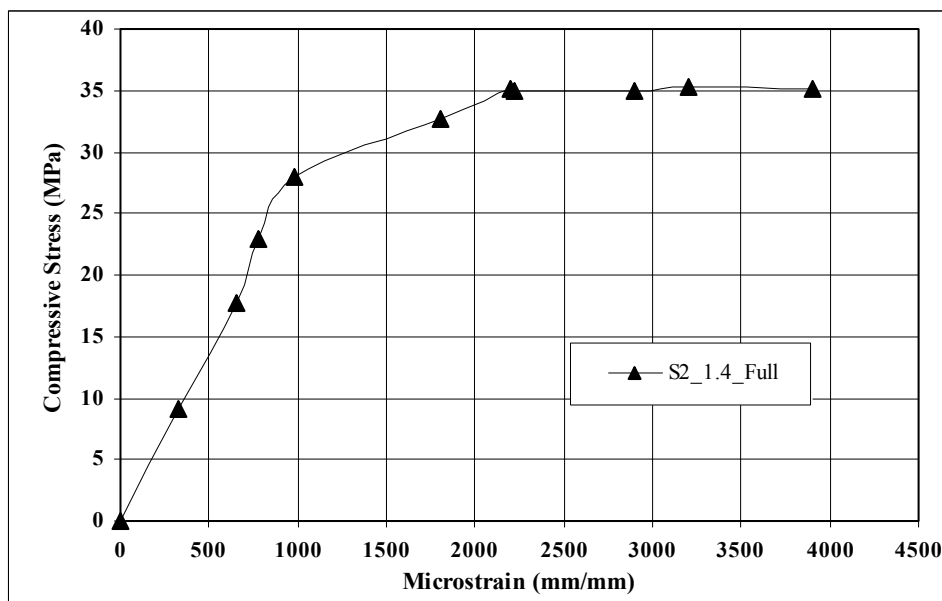
شکل ۹- مقایسه بار نهایی و تغییر مکان وسط دهانه مدل‌های پارامتریک با تیر کنترل عددی

سیس دو تیر S1 و S2 با ورق CFRP به ضخامت ۲/۸ میلی‌متر (ضخامت به ۲ برابر افزایش یافته است) تقویت شده اند (شکل ۹). در تیر S1_2.8، بار نهایی تا خرد شدن بتن ادامه یافت؛ در حالیکه در مدل S2_2.8 با افزایش سطح ورق، تنش فشاری در بتن محدود شده و تسلیم قسمت تقویت نشده جان سبب قطع مراحل بارگذاری گردید. همین روند در تیر S2_1.4-100 نیز تکرار گردید. در هر دو حالت اخیر تمرکز تنش در جان تقویت نشده موجب تسلیم جان شد. به منظور جلوگیری از این پدیده در تیر S2_1.4_Full، جان را به طور کامل با ورق به ضخامت ۱/۴ میلی‌متر تقویت نموده، در این حالت مود شکست از تسلیم جان به خرد شدگی بتن تغییر پیدا نمود. در شکل (۱۰) وضعیت کرنش در مقابل بار، در بتن و CFRP جهت مقایسه و بررسی برای مدل S2_1.4_Full ارائه شده است.



شکل ۱۰- میزان کرنش CFRP و بتن در وسط دهانه تیر S2_1.4_Full

با توجه به شکل (۱۰)، کرنش فشاری بتن به حد نهایی خود نزدیک شده (۰/۰۰۳) و دیگر قادر به تحمل بار بیشتر نمی باشد. از طرف دیگر با توجه به میزان کرنش، ورق تقویتی در آستانه تورق می باشد. در این شرایط ظرفیت باربری تیر تا حدود ۲۴۰ kN افزایش یافته که نشان دهنده تاثیر قابل ملاحظه افزایش ارتفاع تقویتی CFRP در جان تیر مرکب بر بار نهایی است. این میزان افزایش باربری در مدل S2_2.8 نیز حاصل شد ولی در آن حالت تسلیم فولاد رفتار نهایی را بجای بتن کنترل می کند. با توجه به کرنش موجود در ورق تقویتی، جداسدگی CFRP از سطح فولاد رخ نخواهد داد. طبق فرض اولیه رفتار تنش-کرنش بتن باید به صورت الاستیک-پلاستیک کامل باشد که این رفتار در تیر S2_1.4_Full بطور واضح قابل مشاهده می باشد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- تنش-کرنش فشاری بتن در وسط دهانه تیر S2_1.4_Full



نتیجه گیری

- از بررسی های انجام شده در این مطالعه ، نتایج زیر قابل ارائه می باشد :
- کاربرد ورق های CFRP در تقویت تیر های مرکب سبب افزایش ظرفیت نهایی باربری مقطع می گردد. این افزایش در مورد نمونه های مورد مطالعه در این تحقیق در یک محدوده قابل اطمینان بین ۴۰ تا ۵۰ درصد می باشد.
 - کاربرد ورق های CFRP در تقویت تیر های مرکب سبب افزایش سختی و کاهش خیز تیر تقویت شده می گردد. در مورد تیر مورد مطالعه در این تحقیق ، خیز تا میزان ۲۵ درصد کاهش یافت.
 - اتصال ورقهای CFRP به تیر مرکب موجب کاهش شکل پذیری (Ductility) آن می گردد.
 - با توجه به کرنش نهایی ثبت شده در CFRP، چسبندگی بین ورق و فولاد در سیستم معرفی شده تقریباً بدون تورق بوده و مشکلی در روند باربری تیر ایجاد نخواهد نمود.
 - تقویت جان بطور ناقص موجب تمرکز تنش در قسمت بدون تقویت شده و تسلیم فولاد را تسریع می کند؛ لذا توصیه می گردد تقویت بطور کامل انجام پذیرد. بطور کلی افزایش سطح CFRP (تقویت جان علاوه بر بال کششی) میزان بار نهایی را افزایش می دهد.

مراجع

1. ACI committee 440. Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for concrete structures (ACI 440.2R-02), MCP 2004.
2. Adams RD, Atkins RW, Harris JA, Kinloch AJ. Stress analysis and failure properties of carbon reinforced plastic/steel lap joints. JAdhes 1986;20:29-53.
3. Adams Rd, Comyn J, Wake WC. Structural adhesives joints in engineering. London: Chapman & Hall; 1997.p.126.
4. Kinloch AJ, editor. Durability of structural adhesives. London: Applied Science; 1983.
5. Davis P, Roy A. Accelerated marine aging of composites and composite/metal joints. In: Cardon et al. editores. Recent developments in durability analysis of composite system. Rotterdam: Balkema; 2000.p. 253-8.
6. Sen R, Liby L, Spillet K, Mullins G. Strengthening steel composite bridge members using CFRP laminates. In: Taerwe L, editor. Proceedings of the second international RILEM symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Ghent, Belgium; 1995. p. 551-8.
7. Mertz DR, Gillespie JW. Rehabilitation of steel bridge girders through the application of advanced composites material. Final Research Council; 1996.p.30.
8. A.H.Al-Saidy, F.W.Klaiber, T.J.Wipf. Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymer plates ,0950 -0618/\$ -see frontmatter – 2005 Elsevier Ltd.dio :10.1016/j .conbuildmat .2005.08.018
9. Kachlakev, D., Miller, T., Yim, s. and chansawat, kasidit, "Finite Element modeling of Reinforced concrete structures with FRP Laminates, " Final Report for oregon department of Transportation Resear_ ch Group, Internet file, 2001.