بررسی معایب تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه با کامپوزیت FRP و راهکارهای پیشنهادی

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

هدف از این مقاله بررسی و مقایسه روشهای مختلف جهت برطرف کردن معایب موجود در سیستم‌های تقویت تیرهای بتن آرمه با کامپوزیت FRP می‌باشد. از معایب استفاده از کامپوزیت FRP، ترد شدن گسیختگی تیر و ناگهانی بودن آن می‌باشد، زیرا این مواد تا لحظه گسیختگی رفتار تنش ـ کرنش خطی از خود نشان داده و بدون جذب انرژی کافی و عدم دارا بودن ناحیه تسلیم شبیه به ناحیه تسلیم فولاد، دچار گسیختگی می‌شوند. از دیگر معایب استفاده از این مواد، جداشدگی کامپوزیت FRP از بستر بتنی خود می‌باشد. این گسیختگی نیز ناگهانی بوده و جزء گسیختگی‌های ترد تلقی می‌گردد. به جهت رفع این معایب، در تقویت خمشی، روشهای گوناگونی مطرح و مورد ارزیابی قرار گرفته است که در این متن مورد بررسی قرار گرفته می‌شود.

کلمات کلیدی: کامپوزیت هیبرید، تیر بتن آرمه، تقویت خمشی، مهاربندی و پیش تنیدگی، فابریک هیبریدی

۱. مقدمه:

حرکت استمراری علم در عرصه مهندسی سازه ـ زلزله موجب گردیده است تا نوسازی و بهسازی در سالهای اخیر از روشهای نوین و مصالحی جدید بهره‌گیرد که در پیشینه طولانی ساخت و ساز سابقه نداشته است در میان این نوآوری‌ها FRP (مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف) از جایگاه ویژه برخوردار می‌باشد تا آنجا که به نظر برخی از متخصصان FRP را باید مصالح ساختمانی هزاره سوم نامید. کامپوزیت FRP که ابتدا در صنایع هوا و فضا بکار برده شد با داشتن ویژگی‌های ممتازی چون نسبت بالای مقاومت به وزن، دوام در برابر خوردگی، سرعت و سهولت در حمل و نصب، دریچه‌ای نو پیش روی مهندسین عمران گشوده است به گونه‌ای که امروز سازه‌های متعددی در سرتاسر دنیا با استفاده از این مواد تقویت شدند

پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP) به عنوان یک ماده جدید و جالب برای مهندسی سازه در زمینه سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الیاف‌های کربن، آرامید و شیشه از جمله الیاف‌های رایجی هستند که در ساخت کامپوزیت‌های FRP مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های زیادی به صورت رایج و به شکلهای مختلف در دسترس می باشند که از جمله می‌توان صفحات پالتروژن شده، فابریکها و ورقه‌ها را نام برد. با این وجود بیشتر این سیستم‌ها، اما نه همه دارای یکسری معایب و مشکلات در تقویت تیرهای بتن آرمه می‌باشند. این گونه مواد یک رفتار الاستیک خطی تنش ـ کرنش را تا لحظه شکست بدون هیچ ناحیه تسلیمی از خود نشان می‌دهند. مقدار کرنش نهایی این مواد در مقایسه با فولاد بسیار زیاد می‌باشد. بر اساس نتایج، هنگامی که این مواد به وسیله اپوکسی به سطح کششی تیر جهت تقویت خمشی چسبیده می‌شوند، قبل از آنکه کامپوزیت FRP شروع به تحمل بار قابل توجهی کند، فولاد به حالت تسلیم خود می‌رسد. بنابراین افزایش سختی تیر یا بار تسلیم آن بدون افزایش سطح مقطع FRP، جهت همکاری بیشتر در بار تیر، قبل از به تسلیم رسیدن فولاد، ممکن نمی‌باشد. افزایش سطح مقطع FRP نیز اقتصادی نبوده و باعث گسیختگی ترد در تیر ناشی از جدا شدگی ناگهانی FRP از سطح بتن می‌گردد.

---

[۱] استادیار دانشگاه سیستان و بلوچستان

[۲] استادیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. مکانیزم شکست تیرهای تقویت شده:

بررسی‌های تجربی گوناگونی در مورد تقویت خمشی تیر با استفاده از ورقه‌ها، صفحات و فابریکهای FRP صورت پذیرفته است. در تمام این ارزیابی‌ها، تیر تقویت شده از خود بار نهایی بیشتری در مقایسه با حالت تقویت نشده نشان می‌دهد. با این وجود، افزایش مشابه در بار تسلیم تیر گزارش نشده است. بطور کلی مودهای گسیختگی یک عضو بتن آرمه تقویت شده در خمش با تقویت کننده های FRP چسبیده از خارج عضو، می‌تواند به دو دسته تقسیم شود : ۱) حالتی که عملکرد بین بتن و FRP به طور کامل حفظ شده تا لحظه‌ای که بتن در فشار خرد شده و یا FRP در کشش پاره گردد (این نمونه مودهای گسیختگی ممکن است به عنوان مودهای مرسوم شناخته شود) و ۲) حالتی که عملکرد بین بتن و FRP قبل از رسیدن به حالت قبل دچار نقص شده و گسیخته گردد که ناشی از پدیده جدا شدگی خواهد بود . توضیحات مختصری از هر یک از مودهای گسیختگی در زیر آورده شده است :

۲-۱-عملکرد کامل کامپوزیت

۲-۱-۱ -فولاد تسلیم شده و بدنبال آن بتن خرد می‌گردد :

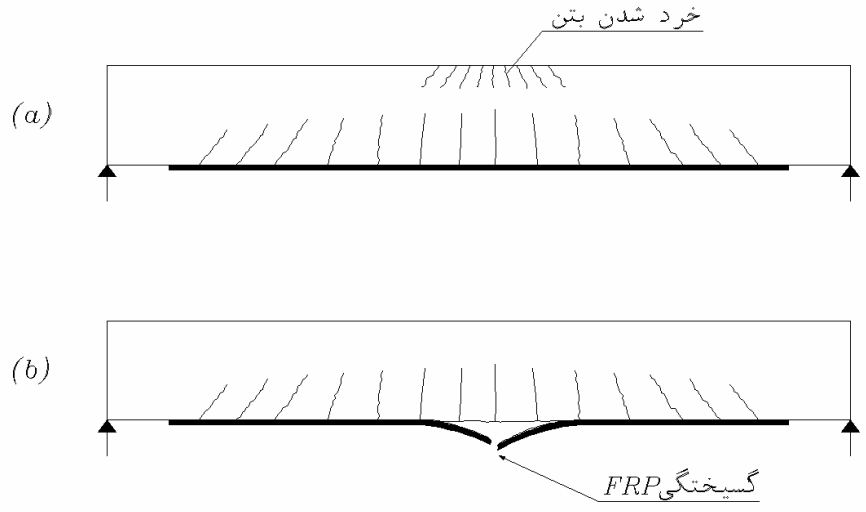
مقاومت خمشی از تسلیم شدگی فولادهای کششی و بدنبال آن خردشدگی بتن در ناحیه فشاری قابل دستیابی بوده در حالی که FRP سالم مانده است . (شکل a)

۲-۱-۲- فولاد تسلیم شده و بدنبال آن FRP گسیخته می‌گردد :

برای مقادیر نسبتا کم از فولاد و FRP ، گسیختگی خمشی ممکن است با تسلیم شدگی فولاد کششی و بدنبال آن گسیختگی کششی FRP صورت گیرد . (شکل b)

۲-۱-۳-خردشدگی بتن :

برای مواردی که مقدار تقویت کننده ها نسبتا زیاد می باشد ، گسیختگی اعضای بتن آرمه ممکن است ناشی از خردشدگی فشاری بتن قبل از به تسلیم رسیدن فولاد باشد. این مود شکست ترد بوده و غیر مطلوب می‌باشد. FRP در این حالت، استفاده کمی داشته و باید به گونه ای موجب افزایش ظرفیت فشاری بتن گردد



شکل ۱:مکانیزمهای شکست تقویت شده با عملکرد کامل کامپوزیت

۲-۲- عدم عملکرد کامل کامپوزیت (جدا شدگی و مودهای گسیختگی اتصال)

بطور کلی اتصال باید به گونه ای باشد که نیروی بتن را به FRP منتقل نماید ؛ بنابراین حالتهای گسیختگی اتصال که ممکن است اتفاق بیفتد ، باید به دقت بررسی گردد . گسیختگی اتصال دلالت بر وجود نقص در عملکرد کامل کامپوزیت بین FRP و بستر بتنی دارد . به عبارت دیگر ، جداشدگی موضعی ، یک گسیختگی موضعی در ناحیه اتصال بین بتن و FRP را می رساند . در این حالت کاهش در مقاومت چسبندگی بین بتن و تقویت کننده FRP محدود به یک سطح کوچک می شود . بنابراین جداشدگی موضعی خود به تنهایی یک حالت گسیختگی نبوده بلکه بیانگر علت کاهش در ظرفیت تحمل بار عضو تقویت شده با FRP می باشد .

هنگامی که جداشدگی موضعی گسترش می یابد ، عملکرد کامپوزیت از دست می رود به گونه ای که تقویت کننده FRP دیگر قادر به تحمل بار نمی‌باشد ، در این حالت هیچ توزیع تنشی در تقویت کننده های FRP و آرماتورهای داخلی ممکن نمی‌باشد ، و جداشدگی به صورت ترد و ناگهانی خواهد بود. گسیختگی ناشی از جداشدگی ممکن است در سطوح مختلف بین بتن و FRP رخ دهد که در زیر توضیح داده شده است

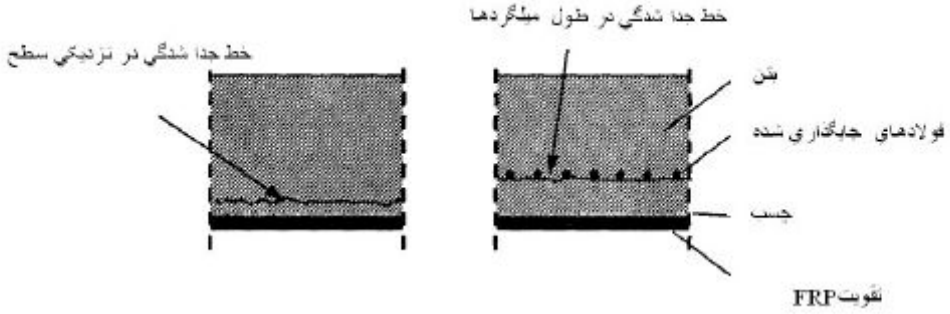
۲-۲-۱ جداشدگی در بتن نزدیک سطح یا در راستای لایه ضعیف شده ، برای مثال در راستای خط محل قرارگیری آرماتورهای فولادی داخلی (شکل ۱)

۲-۲-۲جداشدگی در چسب (گسیختگی خود چسب)

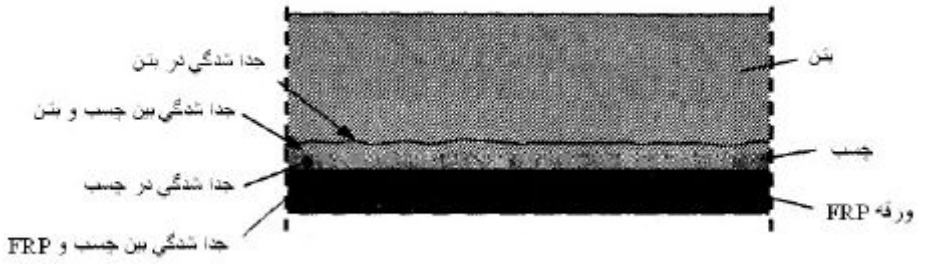
از آنجاییکه مقاومت برشی و کششی چسب (رزین اپوکسی) معمولا بالاتر از مقاومت برشی و کششی بتن می باشد ، عموما گسیختگی در بتن رخ خواهد داد . در این حالت یک لایه نازک از بتن (یک ضخامت میلیمتری نازک) همراه FRP چسبیده و از بستر جدا می شود . جداشدگی در چسب تنها ممکن است وقتی اتفاق افتد که مقاومت آن کمتر از بتن گردد (برای مثال در درجه حرارتهای بالا یا هنگامی که مقاومت بتن به طور غیر معمول بالا باشد). (شکل ۲)

۲-۲-۳- جداشدگی در سطح بین بتن و چسب و یا بین چسب و FRP (گسیختگی چسبندگی)

این نوع گسیختگی معمولاً در داخل FRP بین الیاف و رزین اتفاق می‌افتند که به نام گسیختگی بین لایه‌ای نامیده می‌شود این حالت گسیختگی عموماً گسیختگی ثانوی محسوب و در طراحی لحاظ نمی‌گردد. (شکل ۲)



شکل ۲ :شکست تیر تقویت شده در لایه ضعیف در امتداد شکست



شکل ۳:جدا شدگی ناشی از چسب و بتن یا چسب و FRP

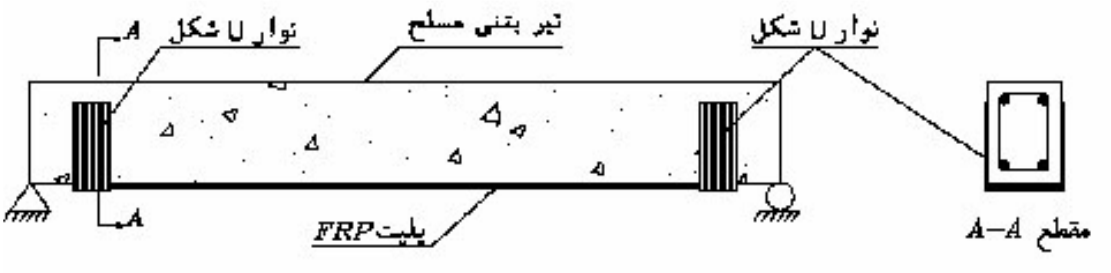
جهت رفع این معایب، راه‌هایی پیشنهاد شده است که بعضی از این نقایص را مرتفع می‌نماید از جمله راهکارهایی تقویت خمشی معرفی شده می‌توان اعمال پیش تنیدگی و استفاده از مهاربندی‌ها را نام برد.

۳- راهکارهای مقابله با ضعف های شکست احتمالی تیرهای تقویت شده

۳-۱- اعمال سیستم مهاربندی در انتهای لایه FRP

سیستم مهاربندی اصولاً به این جهت مورد استفاده قرار می‌گیرد که بتوان از ظرفیت باربری سیستم FRP نهایت استفاده را برد. بر اساس نتایج، معمولاً در اثر نبود چنین سیستمی، گسیختگی‌ها ناشی از جدا شدگی لایه‌های FRP می‌باشد در این روش از دورپیچ کردن کامل انتهای FRP توسط نوارهایی از FRP استفاده می‌گردد.

اما با توجه به اینکه معمولاً، تیرهای موجود از ناحیه فوقانی به دلیل وجود دال قابل دستیابی نیستند، از نوارهایی که فقط سطوح پایینی و جانبی تیر را می‌پوشانند استفاده می‌گردد. از سایر روشها نیز می‌توان به استفاده از پیچهای مخصوص در انتهای لایه FRP نام برد. این روش یکی از اولین روشها بوده که جهت نصب و مهاربندی صفحات فولادی مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما به هر حال بر اساس مطالعات انجام شده، این روش بر روی لایه‌های کامپوزیتی نیز مناسب بوده و اثر مثبتی از خود نشان می‌دهد ولی مشکلی که ایجاد می‌کند سوراخ شدن لایه FRP بوده که اثر نامطلوبی بر عملکرد آن خواهد داشت و باعث ایجاد تمرکز تنش در FRP می‌گردد.



(شکل٤):تقویت خمشی تیر با اعمال مهاربندی

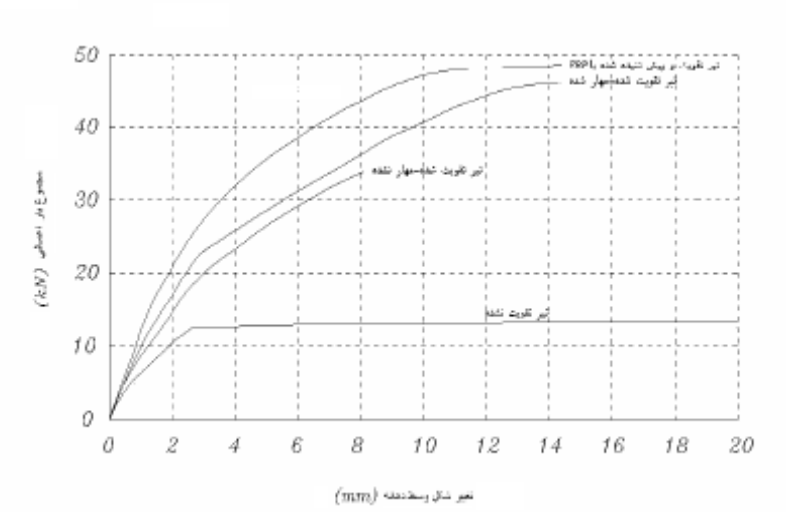
۳-۲-- اعمال سیستم پیش تنیدگی در لایه FRP

این روش تقریباً مشابه روش اول می‌باشد، زیرا که لایه FRP در انتهای آن به واسطه حفظ نیروی پیش تنیدگی لازم است توسط سیستمی مهار گردد. تنها فرق این روش، اعمال یک نیروی پیش تنیدگی قبل از نصب کامل و عمل آوری لایه FRP می‌باشد.

بطور کلی پیش تنیدگی در FRP دارای مزیت‌هایی از قبیل:

- افزایش سختی
- کاهش عرض و توزیع ترک
- بهبود خدمت‌پذیری و دوام
- بهبود مقاومت برشی و خمشی عضو (بدلیل ترک نخوردن مقطع)
- اجتناب از مودهای شکست ناشی از پوسته پوسته شدن در ناحیه ترک‌ها و انتهای لایه FRP
- افزایش ظرفیت مقطع (تار خنثی پایین‌تر قرار می‌گیرد نسبت به حالت غیر پیش تنیده)
- افزایش بار تسلیم مقطع

بنابراین دو روش بیان شده به گونه‌ای عمل می‌کند که انتهای لایه FRP را محکم نگهداشته و بعد از ایجاد جدا شدگی، از لغزش و جدا شدگی کامل لایه FRP جلوگیری نماید.



شکل (۵)تاثیر استفاده از سیستم مهاربندی وپیش تنیدگی لایه FRP

۴- استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی

در این روش با کمک اثر هیبریداسیون از سه نوع الیاف با خصوصیات متفاوت استفاده می‌گردد. در این طرح از فابریک با الیاف‌هایی در سه راستای ۰ و ۴۵ و ۴۵- درجه استفاده می‌گردد. راستای محوری (۰) به عنوان تقویت کننده خمشی و راستاهای ۴۵ و ۴۵- به عنوان تقویت کننده برشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم دارای رفتار شکل‌پذیر از خود بوده و به گونه‌ای طراحی شده که عاری از اغلب معایب گزارش شده در سیستم‌های تقویت رایج FRP می‌باشد. در ادامه قبل از آنکه به شرح و تفسیر این روش پرداخته شود ابتدا به معرفی انواع منسوجات می‌پردازیم

بطور کلی منسوجات الیافی از لحاظ موقعیت و قرارگیری در بافت می‌توانند به اشکال a) الیاف تک جهتی b) الیاف دو جهتی c) الیاف سه جهتی و بیشتر به صورت بافته شده و بافته نشده تولید گردد.

در مورد الیاف دو جهتی و بیشتر معمولاً از الیاف یکسان در راستاهای متفاوت استفاده می‌گردد .در صورتیکه از الیاف‌های متفاوت در بافت منسوج استفاده گردد ، منسوج هیبریدی (مرکب) نامیده می‌گردد. شایان ذکر است الیاف تک جهتی دارای بیشترین کاربرد در تقویت اعضای بتن مسلح با توجه به خصوصیات ارتوتروپیک خود می‌باشند.

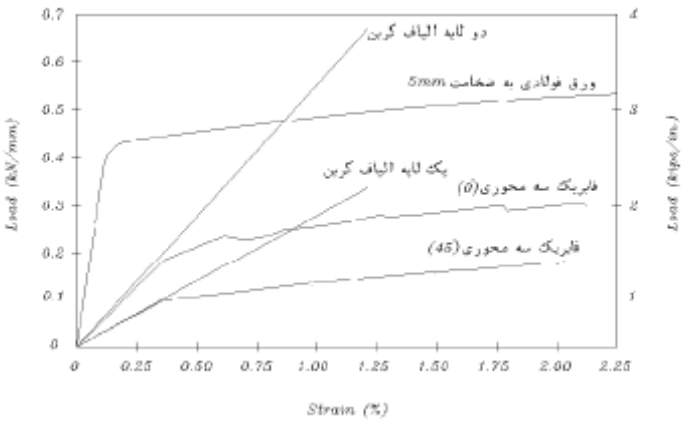
برای این منظور سه نوع الیاف با کرنش‌های مختلف انتخاب که خصوصیات مکانیکی آن در جدول زیر مشخص گردیده است.

جدول ۱

نوع الیاف	کرنش گسیختگی	مقاومت نهایی کششی (Mpa)	مدول‌الاستیسیته (Gpa)
کربن با مدول الاستیسیته بالا	کرنش کم(LE)	مقاومت کششی متوسط	مدول‌الاستیسیته بالا
کربن با مقاومت بالا	کرنش متوسط(ME)	مقاومت کششی بالا	مدول‌الاستیسیته متوسط
شیشه با کرنش بالا	کرنش زیاد(HE)	مقاومت کششی کم	مدول‌الاستیسیته کم

با ترکیب این الیاف و کنترل نسبت ترکیب، الیاف‌هایی که کرنش آنها در هنگام شکست کمتر از همه می‌باشد (کربن با مدول الاستیسیته بسیار بالا) وقتی که فابریک تحت کشش قرار می‌گیرد در ابتدا گسیخته می‌شود و کرنش نهایی این الیاف در لحظه گسیختگی به عنوان کرنش معادل تسلیم معرفی می‌گردد. در حالیکه کرنش نهایی الیاف شیشه در لحظه شکست معرف کرنش نهایی فابریک می‌باشد. بار مربوط به گسیختگی الیاف کربن معرف بار معادل تسلیم و بار حداکثر تحمل شده توسط الیاف شیشه معرف بار نهایی فابریک می‌باشد. الیاف‌هایی با کرنش متوسط در لحظه شکست (کربن با مقاومت بالا) به این منظور انتخاب شده است که افت ناگهانی بار را که بعد از گسیختگی الیاف کربن در طول آزادسازی کرنش صورت می‌گیرد به حداقل رسانده و همچنین از انتقال ناگهانی بار از الیاف کربن با به شیشه جلوگیری نماید.

ایجاد ناحیه معادل تسلیم در راستای ۰ درجه به گونه‌ای است که با افزایش کرنش، تا حد کرنش گسیختگی کربن LE، این الیاف گسیخته شده و در نتیجه کرنش FRP تا حدی آزاد شده و تنش در آن به مقدار قابل توجهی افزایش نمی‌یابد. در این حالت بار FRP بر روی دو نوع الیاف دیگر تقسیم می‌گردد. به این ترتیب با استفاده از عمل ترکیب چند نوع الیاف در کنار هم، تا حدودی اثر تسلیم مشابه آنچه در فولاد دیده می‌شود. ایجاد شده و بنابراین شکل‌پذیری تیر تقویت شده، به حد قابل قبولی می‌رسد.



شکل ٦:مقایسه تنش- کرنش الیاف مختلف با همدیگر

علاوه بر این با توجه به اینکه در این فابریک، مقدار تنش مشابه قبل افزایش خطی از خود نشان نداده و به مقدار قابل توجهی زیاد نمی‌شود. مقدار کشش در FRP نسبت به قبل تقلیل یافته و از پدیده گسیختگی ناشی از جدا شدگی لایه FRP تا حدودی ممانعت می گردد.

۵-نتیجه‌گیری:

۱-تیرهای تقویت شده با کامپوزیت هیبریدی در خمش دارای شکل‌پذیری بیشتری نسبت به تیرهای تقویت شده با ورقه‌های FRP می‌باشند. نصب فابریک هیبریدی، یک رفتار تسلیم، شبیه به تیر تقویت نشده و یا تیر تقویت شده با مواد شکل‌پذیر مانند فولاد بر روی تیر اعمال می‌نماید.

۲-در تیرهای تقویت شده با کامپوزیت هیبریدی، عموماً احتمال کمتری در وقوع گسیختگی ناشی از جدا شدگی وجود خواهد داشت.

۳-تیرهای تقویت شده با کامپوزیت هیبریدی در مقایسه با تیرهای تقویت شده با صفحه فولادی، دارای شکل‌پذیری مناسب بوده، صفحات فولادی در بار کمتری نسبت به آرماتورهای داخلی تسلیم می‌گردند، زیرا که صفحه فولادی دارای کرنش تسلیم شدگی کمتری نسبت به آرماتور فولادی بوده و همچنین در سطح خارجی تیر نصب می‌گردد.

۴-تسلیم شدگی فابریک هیبریدی با صداهایی قابل تشخیص، توام خواهد بود که ناشی از پاره شدن الیاف با کرنش‌های کم و متوسط در لحظه گسیختگی می‌باشند. چنین صداهایی در تیرهای تقویت شده با ورقه‌های FRP و فولاد قابل شنیدن نمی‌باشد.

۵-در مورد تیرهایی که به صورت U شکل دورپیچ می‌شوند، فابریک سه محوری از این جهت که تارهایی در راستای ۴۵+ و ۴۵- دارد نسبت به ورقه‌های FRP مزیت دارد. این تارها به عنوان یک مهار مطمئن برای فابریک در موقعی که به سطح کششی سطوح جانبی تیر برای تقویت خمشی نصب می‌گردند عمل کرده و از گسیختگی ناشی از جدا شدگی جلوگیری بعمل می‌آورد.

مراجع

۱. Nabil F. Grace and Wael F. Ragheb and George Abdel-Sayed, "Development and application of innovative triaxially braided ductile FRP fabric for strengthening concrete beams", Depatment of Civil Engineering Lawrence Technological University Southfield, MI ٤٨٠٧٥, USA

۲)Khalifa, A.,A. Belarbi, and A. Nanni,"Shear Performance of RC Members Strengthened with Externally Bonded FRP Wraps, "Proc., ١٢th World Ccnference on Earthquake Engineering, Jan ٣٠-Feb ٠٤،٢٠٠٠, Auckland, New Zealand, paper ٣٠٥،١٠ pp