مقاوم سازی تیرهای بتنی شکافدار با Cfrp پیش تنیده

سید مرتضی موسوی

چکیده

در ساختار بسیاری از سازه های مدرن ، تعبیه لوله‌ها و مجاری سرویسها، کانالهای تهویه هوا ، سیستمهای برق و تلفن و در برخی موارد شبکه های رایانه ای بسیار ضروری می باشد . عبور این لوله ها از قسمت تحتانی طاقها و تیرها سبب ایجاد یک فضای مرده می گردد . در نتیجه برای تأمین ارتفاع مناسب طبقات نیاز به افزایش ارتفاع بوده که متعاقباً افزایش حجم مصالح مصرفی و همچنین بار اعمالی به فونداسیون را در پی خواهد داشت. لذا می توان از طریق ایجاد شکافهای عرضی در اجزای سازه ای ساختمان از جمله تیرها در جهت حذف این فضا اقدام نموده و بدین ترتیب هزینه های اقتصادی و مشکلات فنی منتجه را کاهش داد . ایجاد شکاف در تیر باعث کاهش سطح مقطع و مقاومت تیر می شود که این مشکل با مقاومسازی سازه با لایه FRP قابل حل می باشد.

در این تحقیق تیر بتن مسلّح آزمایشگاهی دارای شکاف مستطیلی به کمک نرم افزار Abaqusمدلسازی شده و با مدل آزمایشگاهی موجود صحت سنجی شده است . در ادامه تیر موجود در محیط نرم افزار با ورقهای پلیمری مسلّح به الیاف کربن با اتصال بصورت پیش تنیده و غیرپیش تنیده بوسیله چسب اپوکسی تقویت شده و با بکارگیری روشهای پیشنهادی ، تأثیر پارامترهایی چون پیش تنیدگی CFRP ، میزان پیش تنیدگی CFRP و مقاومسازی شکاف با CFRP بجای فولاد مورد بررسی قرار گرفته است .

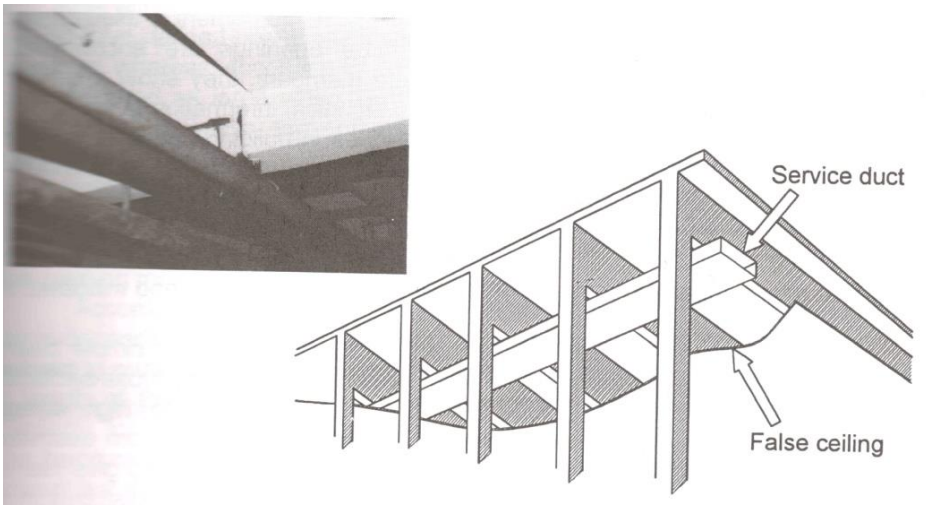
نتیجه گرفته شده است که پیش تنیدگی CFRP باعث کاهش خسارت (ترک) کششی در بتن می شود . پیش تنیدگی باعث استفاده بیشتر از ظرفیت مقاومتی CFRP می شود . پیش تنیدگی CFRP باعث افزایش مقاومت خمشی و باربری تیر در لحظه ترک خوردگی ، جاری شدن فولاد و بار ماکزیمم می شود . پیش تنیدگی CFRP باعث افزایش سختی تیر می شود . زمانیکه در تیر موجود بدون فولاد تقویتی شکاف ایجاد شود می توان بجای فولاد تقویتی با CFRP تیر را مقاومسازی نمود و نتایج قابل قبولی بدست آورد .

کلمات کلیدی : شکاف ، مقاومسازی ، پیش تنیدگی CFRP ، خسارت ، مقاومت .

۱-۱- شکافهای عرضی

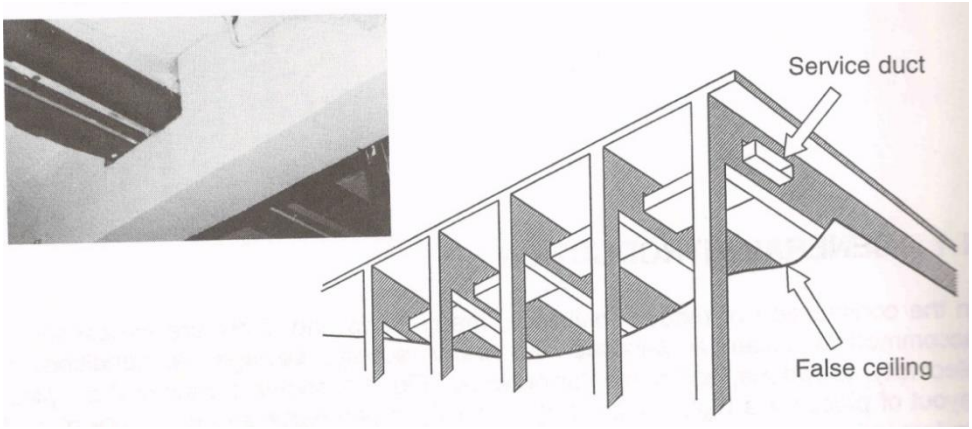
در سازه های مدرن ، تعبیه لوله‌ها و مجاری سرویسها ، کانالهای تهویه هوا ، سیستمهای برق و تلفن و شبکه های رایانه ای بسیار ضروری می باشد . معمولاً این لوله ها و کانالها در قسمت تحتانی طاق و تیرها قرارگرفته و بدلیل حفظ زیبایی، به وسیله سقف کاذب۱ پوشانده می شود. عمق لوله ها وکانالها بسته به نوع کاربریشان ممکن است از یک سانتیمتر تا نیم متر باشد، لذا نصب سقف مجازی سبب ایجاد یک فضای مرده می گردد. در نتیجه برای تأمین ارتفاع مناسب طبقات نیاز به افزایش ارتفاع جهت ایجاد فضای لازم این پوشش می باشد. شکل ۱-۱ نمایی از نحوه قرارگیری لوله ها وکانالها در یک ساختمان بلندمرتبه را که توسط سقف کاذب پوشانده می شود، نشان می دهد . در سازه های بلند (برجها) این افزایش ارتفاع سبب بالا رفتن حجم مصالح مصرفی سازه ای، افزایش طول لوله ها و مجاری انتقال و در نهایت افزایش بار اعمالی به فونداسیون می گردد. بنابراین به عنوان یک راهکار پیشنهادی میتوان از طریق ایجاد شکافهای عرضی۲ در درون اجزای سازه ای ساختمان مانند تیرها، در جهت حذف این فضا اقدام نموده و بدین ترتیب در هزینه های اقتصادی منتجه صرفه جویی به عمل آورد.

۲- Transverse Opening



شکل ۱- ۱- نمونه ای از طرح لوله ها، کانالها و سقف کاذب

همانطورکه در شکل ۱-۲ نشان داده شده است چنین طرحی سبب کاهش ارتفاع سازه، فشردگی طبقات و کاهش هزینه ها می گردد .



شکل ۱-۲- عبور لوله ها و کانالها از جان تیرهای سقف

۱-۱-۱- مزایا و معایب استفاده از شکافهای عرضی

استفاده از شکافهای عرضی ممکن است برای ساختمانهای کوچک صرفه جویی چندانی در هزینه های کلی نداشته باشد. اما در ساختمانهای بلند، کاهش در ارتفاع تک تک طبقات موجب صرفه جویی و کاهش قابل ملاحظه ای در ارتفاع کلی سازه و طول کانالهای تهویه هوا، کانالها و مجاری برق، طول لوله کشی آب و فاضلاب، اندازه دیوارها و سطح تیغه ها شده و در نتیجه باعث کاهش کل بار اعمالی به فونداسیون ساختمان می گردد .

استفاده از چنین سیستمهایی مستلزم بکارگیری تمهیدات ویژه در تسلیح تیرهای بتن مسلّح می باشد. زیرا کاهش ناگهانی در ابعاد مقطع تیر باعث تمرکز تنش در نقاط بحرانی حول شکاف و ایجاد ترکهای عرضی شده که بروز چنین

امری هم از نظر زیبایی و هم از لحاظ پایداری غیرقابل قبول می باشد. مضافاً اینکه کاهش در سختی تیر سبب تغییرشکل و خیز زیاد تیر تحت بار سرویس و در نتیجه بازتوزیع قابل توجه نیروها و ممانهای داخلی در تیر سراسری می شود. در اینصورت اگر تسلیحات ویژه مناسب در محلهای مزبور تعبیه نگردد، مقاومت تیر تا حد مقاومت بحرانی آن کاهش می یابد.

بطور کلی می توان گفت ایجاد شکافهای عرضی در جان تیر بتن مسلّح موجب کاهش مقاومت تیر و بروز رفتار پیچیده تری درآن نسبت به تیر توپر خواهد شد . بنابراین طراحی چنین تیرهایی نیاز به محاسبات ویژه ای دارد که خارج از حدود قواعد مربوط به سازه های عادی قرار می گیرد .

۲-۱-۱ اطلاعات موجود در زمینه شکافها

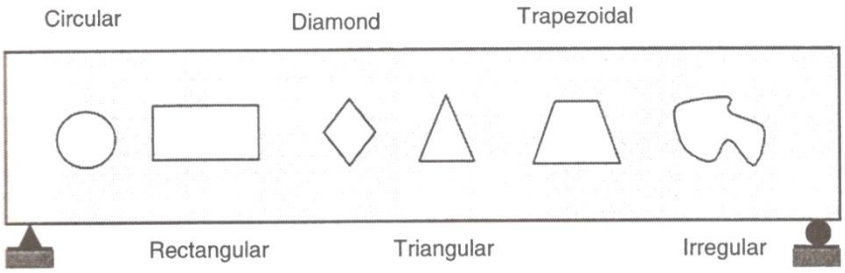
در صورت عبور کانالها و لوله های سرویس از میان لوله های بتنی، تسلیحات جانبی ویژه ای در اطراف شکاف باید در نظر گرفته شود. اما اکثر مهندسین در هنگام مواجه شدن با شکافها به خصوص در تیرهای بتن مسلّح و پیش تنیده، به دلیل ناکافی بودن اطلاعات در زمینه تحلیل این مسأله، تمایلی به استفاده از آنها نشان نمی دهند. همچنین عدم وجود راهکارهای خاص برای استفاده از شکافها در آئین نامه هایی چون ACI و BS از طرف دیگر به محدودیتهای آن افزوده است. گرچه این آئین نامه ها جزئیات عملکرد شکافها در دالهای بتنی مسطح را مورد بررسی قرار داده اند.

بطور کلی می توان گفت که در اکثر موارد بکار بردن شکافها و تسلیح آنها براساس تجربه و شهود مستقیم صورت می گیرد. در این زمینه تنها انستیتو معماری ژاپن راهنماییها و قواعدی را برای تعبیه شکاف در جان تیرها تهیه نموده است. با این وجود این اطلاعات هنوز کامل نبوده و اکثر تحقیقات انجام شده از سال ۱۹۶۰ در این زمینه، به صورت پراکنده و غیرقابل دسترسی بوده و هنوز برای طراحان قابل استفاده نمی باشد.

۳-۱-۱- طبقه بندی انواع شکافها

شکافهای عرضی در تیرها ممکن است از لحاظ شکل و اندازه با یکدیگر تفاوت داشته باشند. پرنتزاس۳ (۱۹۶۸) در تحقیقات آزمایشگاهی وگسترده خود ، مانند شکل ۱-۳ ، شکافهایی به اشکال دایره، مستطیل، لوزی ، مثلث ، ذوزنقه و برخی از اشکال نامنظم را مورد بررسی قرار داد . گرچه اشکال متعددی از شکافها را می توان در نظر گرفت ، اما شکافهای دایره ای و مستطیلی از بقیه معمولتر می باشند . شکافهای مدوّر برای تعبیه سیستمهای لوله کشی مانند آب و فاضلاب و برق مورد استفاده قرار می گیرند . از سوی دیگر اکثرکانالهای تهویه هوا به شکل مستطیل می باشند . به همین جهت برای عبور آنها از تیرها از شکافهای مستطیلی استفاده می شود . در برخی از موارد نیزگوشه های داخلی شکافهای مستطیلی را گرد میکنند تا از تمرکز تنش در گوشه های تیز شکاف جلوگیری شود. با این تمهید رفتار تیر در برابر ترک خوردگی تحت بار سرویس بهبود می یابد .

۳- Prentzas



شکل ۱-۳- اشکال مختلف شکافها که در تحقیقات پرنتزاس مورد بررسی قرار گرفت

بسیاری از محقّقین اصطلاح شکاف کوچک و بزرگ را بکار می برند ، بدون اینکه هیچ تعریف دقیق و روشنی از آن داشته باشند . سامز۴ و کارلی۵ (۱۹۷۴)، شکافهای مدوّری را که قطر آنها از ۰/۲۵ برابر عمق جان تیر بیشتر باشد ، تحت عنوان شکافهای بزرگ طبقه بندی نمودند . این درحالیست که منصور۶ و هازنات۷ (۱۹۷۹) ، شکافهای دایره ای و مربع شکل یا اشکال نزدیک به مربع را که قطر یا عمق آنها کمتر از ۴۰ درصد عمق کلی تیر باشد ، تحت عنوان شکافهای کوچک معرفی نمودند .

هرچند این محقّقین این نکته را درنظرگرفتند که ماهیت طبقه بندی شکافها به دو دسته کوچک و بزرگ ، اساساً به نحوه جواب سازه ای تیر موردنظر بستگی دارد . اگر یک شکاف به اندازه ای کوچک باشد که تیر رفتار واقعی خود را حفظ کند ، یا به عبارت دیگر تئوری تیر معمولی صادق باشد شکاف ، کوچک خواهد بود . درغیراینصورت شکاف ، بزرگ محسوب خواهد شد . براساس این معیار طبقه بندی شکافها یه صورت کوچک یا بزرگ ، به نحوه بارگذاری تیر نیز بستگی خواهد داشت . به عنوان مثال وقتی شکاف تحت تأثیر خمش خالص قرار می گیرد ، چنین به نظر می رسد که تئوری تیر تا دورترین تار فشاری و تا زمانیکه شکست و ناپایداری به وقوع بپیوندد ، قابل اعمال باشد . بطور مشابه اگر یک تیر تحت تأثیر ترکیبی از بـــرش و خـمش قرار بگیـــرد ، طبـــق تحقیقات پرنتزاس(۱۹۶۸) ، منصور(۱۹۸۵ و ۱۹۹۰) و ناصر۸ (۱۹۶۷) نشان داده شده است که با افزایش اندازه شکافها رفتار تیر به رفتار خرپای ویراندیل۹ تبدیل می شود .

۴-۱-۱- ملاحظات طراحی

٤- Somes

٥- Corely

٦- Mansure

٧- Hasnat

٨- Nasser

٩- Vierendeel Truss

در طراحی یک تیر بتنی دارای شکاف، باید از معیارهای قابل قبول برای طراحی اعضا استفاده نمود که این امر لازمه مقاومت و سرویس دهی مناسب می باشد. به همین دلیل باید ارزیابی دقیقی از مقاومت نهایی تیر به عمل آید تا ایمنی لازم در مقابل انهدام احتمالی تیر فراهم شود. زیرا همانطورکه اشاره شد، تعبیه شکافهای عرضی باعث می شود رفتار ساده تیر به رفتار پیچیده تری تبدیل شود. همچنین واضح است که تعبیه شکافها باعث ایجاد ناپیوستگی در جریان تنشها می شود که این امر باعث تمرکز تنش و ترک خوردگی زودهنگام در اطراف شکاف می گردد. مقاومت نهایی چنین تیری نیز ممکن است بطور خطرناک و جدی تحت تأثیر قرار بگیرد. بنابراین تسلیحات ویژه ای باید در اطراف شکافها تعبیه گردد تا از گسترش عرض ترکها و شکست زودهنگام تیر جلوگیری نماید. به همین جهت در هنگام طراحی یک ساختمان، باید محل عبور تاسیسات وابعاد و موقعیت شکافهای نظیر از قبل مشخص شوند .

همچنین سرویس دهی مناسب بطور کلی مستلزم این است که خیزهای ایجاد شده در تیر تحت بار سرویس به اندازه کافی کوچک باشد و ماکزیمم عرض ترک خوردگی از حد قابل قبول تجاوز ننماید . هرچند به علت وجود شکاف در تیر ، فرایندی که برای طراحی تیرهای معمولی بکار می رود برای تیرهایی که شامل شکاف عرضی می باشند ، بطورکامل و مستقیم قابل اعمال نیست . به عنوان مثال ، روش ارضای غیرمستقیم موردنیاز برای ماکزیمم خیز که با استفاده از مینیمم نسبت دهانه به عمق مؤثّر تیر انجام می شود ، برای تیرهای دارای شکافهای عرضی معتبر نمی باشد . در یک سازه معین استاتیکی ، توزیع ممانهای خمشی و نیروهای برشی را میتوان به روشهای استاتیکی تعیین نمود . هرچند در سازه های نامعین استاتیکی ، توزیع نیروها و ممانهای داخلی بستگی نسبت سختی هر عضو دارد . تعبیه شکافها از میان اعضا، سختی آن عضو را کاهش داده و باعث بازتوزیع نیروهای داخلی در عضو می شود . این بازتوزیع را که به علت وجود شکافهای عرضی اتفاق می افتد ، می توان به روش سازه های نامعین استاتیکی تعیین نمود .

موارد فوق مؤیّد این مطلب است که طراحی تیر بتن مسلّح دارای شکاف نیازمند بررسی دقیق پارامترهای مؤثّر و استفاده از روشهای مناسب می باشد .

۲-۱- استفاده از کامپوزیت های FRP در ساخت ، بهسازی وتقویت سازه ها

بطور کلی مقاوم سازی سازه های بتنی موجود یا مرمت آنها به منظور تحمل بارهای مضاعف طراحی ، بهبود نارسایی های ناشی از فرسایش ، افزایش شکل پذیری سازه یا سایر موارد با استفاده از مصالح مناسب و شیوه های اجرایی صحیح بطور متعارف انجام می گردد . در مورد تیرهای شکافدار نیز بخصوص زمانیکه شکاف در تیر موجود (اجرا شده) ایجاد می شود می توان از روشهای مقاومسازی استفاده نمود . استفاده از صفحات فولادی به صورت پوشش خارجی ، غلاف های بتنی یا فولادی و پس کشیدگی خارجی ، تعدادی از روش های متعارف موجود می باشند .

استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف Fiber reinforced plymer (FRP)، به عنوان یک ضرورت در جایگزینی مصالح سنتی و شیوه های موجود مقاوم سازی معرفی شده است . سیستم FRP بدین صورت تعریف می شود که الیاف و رزین ها برای ساخت چند لایه مرکب مورد استفاده قرار می گیرند، به نحوی که رزین های مصرفی به منظور چسباندن چندلایه مرکب به سطح بتن زیرین و

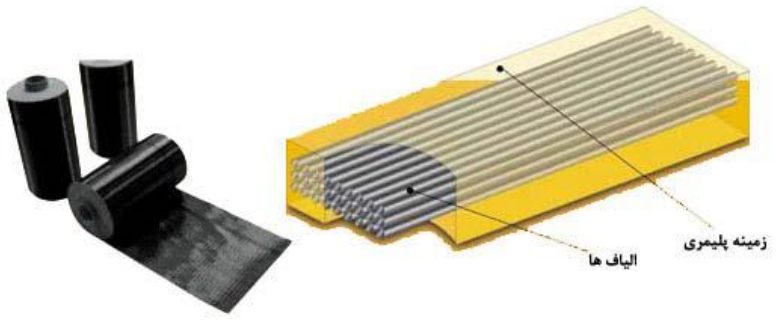
پوشش ها به منظور محافظت مصالح ترکیب شده استفاده می شوند . پوشش های معمول که به منظور زیبایی ظاهری مورد استفاده قرار می گیرند به عنوان قسمتی از سیستم FRP در نظر گرفته نمی شوند.

مصالح FRP ، سبک ، مقاوم در برابر خوردگی و دارای مقاومت کششی بالا می باشند . این مصالح به شکل های مختلف و در گستره ای از انواع ورقه های چند لایه کارخانه ای گرفته تا ورقه های خشک قابل پیچش روی اشکال مختلف سازه ای قبل از اضافه کردن رزین ، قابل دسترس می باشند . دراغلب موارد سیستم های FRP به صورت پروفیل های نسبتاً نازک عمل آوری شده ، در اجرا مطلوب می باشند .بخصوص در مواقعی که ظاهر کار تمام شده یا امکان دسترسی مدنظر باشد.

گرایش روز افزون به استفاده از سیستم های FRP برای مقاوم سازی یا مرمت سازه ها دلایل گوناگون دارد . اگر چه الیاف و رزین های مورد استفاده در سیستم های FRP نسبت به دیگر مصالح متعارف مانند بتن و فولاد گرانتر هستند ، لیکن اغلب هزینه های مربوط به دستمزد و تجهیزات نصب سیستم های FRP ارزانتر می باشند . این سیستم ها همچنین می توانند در سطوحی با دسترسی های محدود یا جاهایی که اجرای شیوه های متعارف با مشکلاتی مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرند .

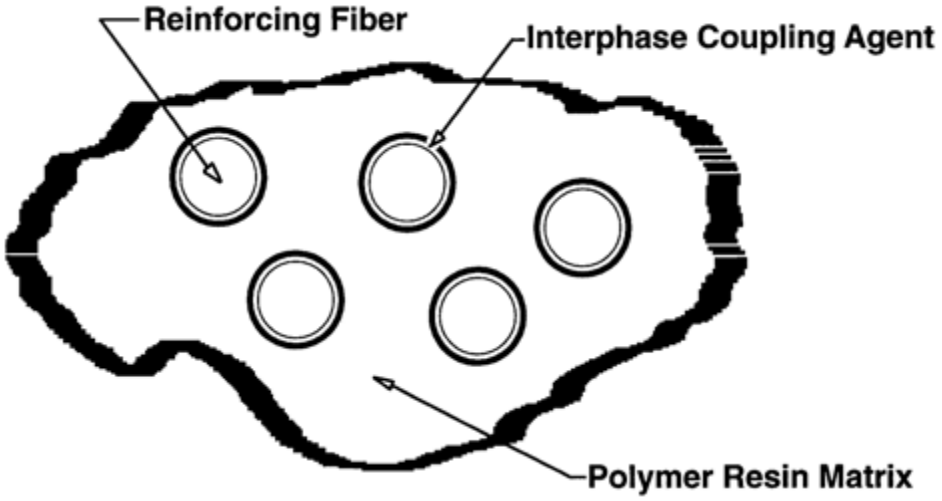
۱-۲-۱- مصالح و ویژگی های فیزیکی و مکانیکی

پلیمرهای مسلح از الیاف بسیار نازکی تشکیل شده اند که توسط ماده زمینه محصور می شوند. الیاف دارای جنس های متفاوت بوده و به صورت قطعات کوتاه ، رشته های دراز و پارچه های بافته تولید می شود . زمینه در FRP ها نقش محافظت از الیاف و انتقال تنش بین آنها را ایفا می کند و الیاف نقش باربری دارد . قطعات FRP به روش های مختلف صنعتی، نیمه صنعتی و یا دست ساز ساخته می شود.



شکل ۱-۴ اجزای اصلی تشکیل دهنده مصالح الیافی پلیمری (FRP)

شکل ۱-۵ ساختار میکروسکوپی مصالح FRP را نمایش می دهد.



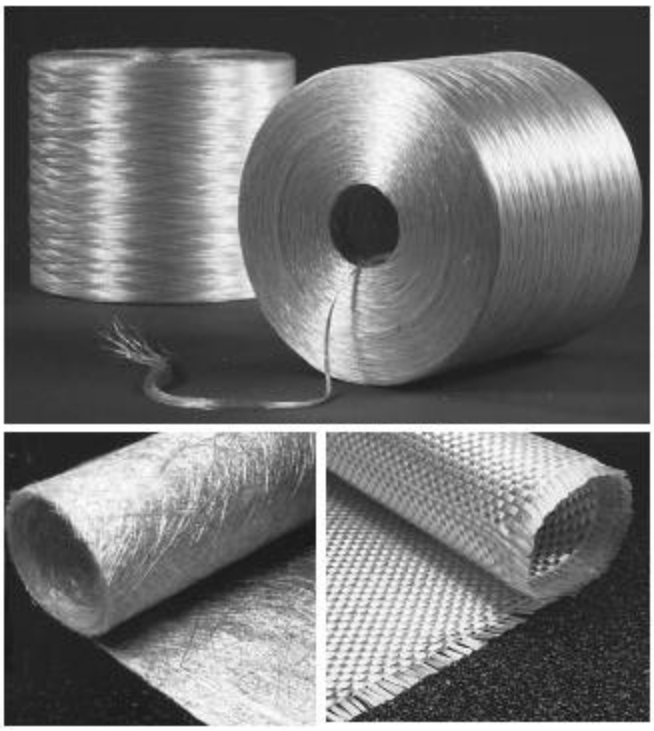
شکل ۱-۵ ساختار میکروسکوپی مواد مرکب الیافی

۱-۱-۲-۱- رزین (مواد زمینه)

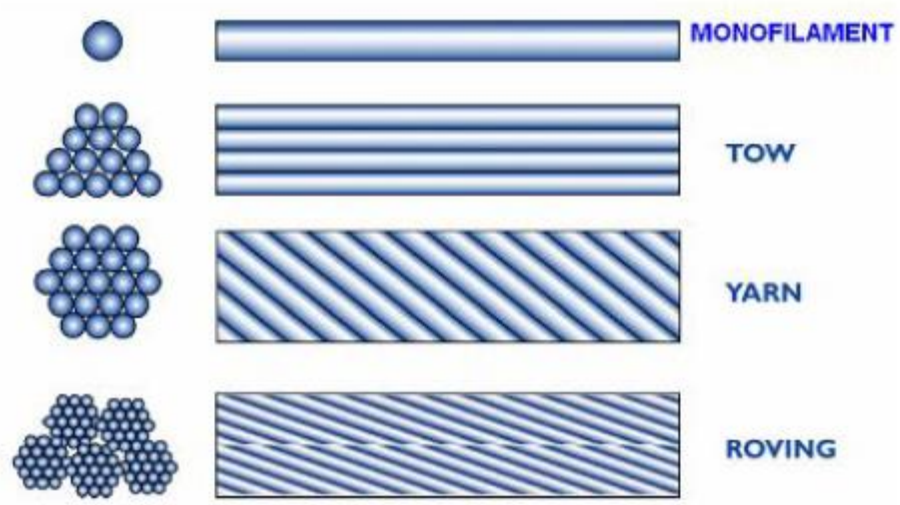
گونه های مختلف پلیمرهای انعطاف پذیر و مقاوم در برابر حرارت نظیر اپوکسی، واینل استر و پلی استر برای ساخت FRP مورد استفاده قرار می گیرند . این مواد باید دارای قابلیت چسبیدن به سطح بتن، مقاومت در برابر تأثیرات محیطی ، کارایی ، زمان گیرش مناسب ، سازگاری حرارتی باشد . مواد زمینه با توجه به غلظت به چسبهای صنعتی ، رزین های اشباع کننده و خمیر پر کننده طبقه بندی می شود.

۲-۱-۲-۱- الیاف

الیاف مورد استفاده در FRP ها عموماً از جنس کربن ، شیشه و یا آرامید بوده که ماده مرکب ساخته شده از آنها به ترتیب CFRP ، GFRP و AFRP نامگذاری شده اند . امروزه با توجه به دوام ، مقاومت و سختی بالای الیاف کربنی بیشترین کاربرد را پیدا نمود ه اند . الیاف شیشه ای در محیط های خشک کارایی مناسب داشته و از الیاف آرامیدی برای جذب انرژی و ضربه استفاده می شود . این الیافها به صورتهای پارچه های بافته شده و یا پارچه با الیاف کوتاه در جهت های تصادفی استفاده فراوان دارند . شکل ۱-۶ نمونه ی ریسمان های الیافی و این دو نوع پارچه های الیافی را نشان می دهد.



شکل ۱-۶ نمونه ریسمان تابیده شده با الیاف ، پارچه با الیاف کوتاه و پارچه بافته شده با الیاف



شکل ۱-۷ الیافهای معمول مورد استفاده در FRP

Monofilament : تار بقطر حدود ۱۰μm

Tow : تارهای پیوسته نبافته

Yarn : تارهای پیچیده شده که بصورت نخ در آمده و برای بافت مناسب می باشد

Roving : تعدادی از نخها یا طنابها که بطور موازی و کمی پیچ خورده یا بدون پیچش کنار هم قرار گرفته اند

۳-۱-۲-۱- پوشش های محافظ

اکثر پلیمرهای مورد استفاده در FRP ها نیاز به محافظت ندارند ولی در موارد خاص می توان سطح خارجی آنها را برای جلوگیری از اشعه فرابنفش، تماس مستقیم با آتش ، ضربه ، سایش ، مواد شیمیایی و غیره پوشش داد.

۴-۱-۲-۱- ویژگی های فیزیکی

مواد FRP بسیار سبک بوده و چگالی آن حدود یک پنجم چگالی فولاد است که این خود دلیل اساسی سهولت در استفاده در این مواد می باشد . در جدول ۱-۱ جرم حجمی انواع FRP ارائه شده است . ضریب انبساط حرارتی مواد FRP بستگی به راستای الیاف آن دارد که در جدول ۱-۲ این مقادیر برای دو راستای طولی و عرضی آورده شده است.

جدول ۱-۱- جرم حجمی مواد FRP و فولاد (g/cm^3)

AFRP	CFRP	GFRP	فولاد
۱.۲-۱.۵	۱.۵-۱.۶	۱.۲-۲.۱	۷.۹

جدول ۱-۲- ضرایب انبساط حرارتی مواد FRP ($*\ \mathbf{10^{-6}}$ /°c)

جهت	AFRP	CFRP	GFRP
طولی (αl)	۶- تا ۲-	۱- تا ۰	۶ تا ۱۰
عرضی (αT)	۶۰ تا ۸۰	۲۲ تا ۵۰	۱۹ تا ۲۳

مقادیر برای درصد حجمی الیاف ۰.۵ تا ۰.۷ می باشند .

۵-۱-۲-۱- ویژگی های مکانیکی

۱-۵-۱-۲-۱ رفتار کششی

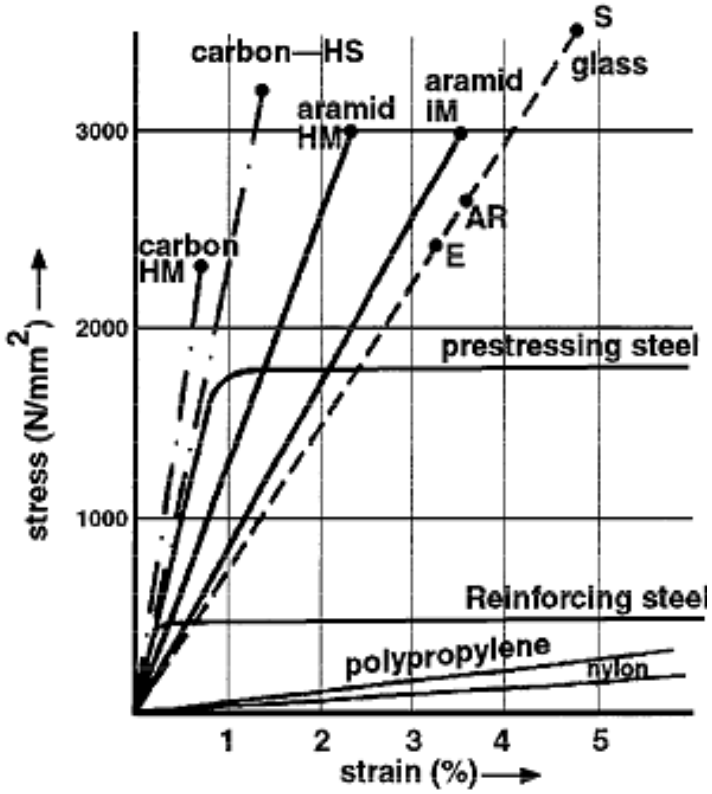
ورق های FRP در هنگام بارگذاری کششی رفتاری کاملاً کشسان دارند و گسیختگی آنها ناگهانی است . در صورت رسم نمودار تنش - کرنش برای الیاف بکار رفته در آنها ، خطوط راستی بدست خواهد آمد که شیب آنها ضریب کشسانی الیاف می باشد . ضریب کشسانی اکثر الیافها کوچکتر از فولاد بوده اما در چند سال اخیر الیاف کربنی با ضریب کشسانی بزرگتر از فولاد نیز تولید شده است . نمودار ۱-۱ رفتار تنش - کرنش الیاف مختلف در کشش را نمایش می دهد.

مقاومت مصالح FRP بستگی به نسبت حجمی الیاف در آنها دارد . از آنجایی که مقاومت کششی الیاف بسیار بالاتر از مقاومت پلیمرها است با افزایش درصد الیاف مقاومت FRP افزایش چشمگیری خواهد داشت . ضریب کشسانی مصالح FRP به صورت وتری تعیین شده و در تعیین مقاوت مجاز احتمال شکست ۰.۱۳ درصدی ملاک است . در جداول ۱-

۳ و ۴-۱ به ترتیب ویژگی های مکانیکی کششی الیافهای مورد استفاده در سیستم FRP و ویژگیهای مکانیکی کششی ورق های FRP ارائه شده است . از آنجایی که در طراحی سیستمهای تقویتی با FRP پیش از اجرا ، ضخامت ورق دقیقاً مشخص نمی باشد و مقاومت کششی به مقدار ضخامت لایه وابسته است ، در بیشتر موارد ظرفیت کششی لایه بر حسب نیروی کششی بر واحد عرض ملاک محاسبات قرار می گیرد .

۲-۵-۱-۲-۱- رفتار فشاری

ورق های FRP که از خارج به سطوح بتنی چسبانده می شود قابلیت تحمل نیروی فشاری را ندارد . پژوهشگران در آزمایشهای متعدد نشان داده اند که ظرفیت فشاری FRP های کربنی ، شیشه ای و آرامیدی به ترتیب در حدود ۸۰ ، ۵۰ و ۲۰ درصد ظرفیت کششی آنهاست این کاهش ظرفیت به دلیل کمانش موضعی الیاف در داخل FRP است .ضریب کشسانی مصالح FRP در فشار بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد مصالح در کشش می باشد .



نمودار ۱-۱ رفتار تنش - کرنش الیاف مختلف در کشش

جدول ۱-۳- ویژگی های کششی الیاف مصرفی در FRP

نوع الیاف	مدول (GPa)	الاستیسیته	مقاومت نهایی (MPa)	حداقل گسیختگی(٪)	کرنش
کربن					
کاربری عمومی	۲۲۰-۲۴۰		۲۰۵۰-۳۷۹۰	۱.۲	
مقاومت بالا	۲۲۰-۲۴۰		۳۷۹۰-۴۸۲۰	۱.۴	
مقاومت بسیار بالا	۲۲۰-۲۴۰		۴۸۲۰-۶۲۰۰	۱.۵	
مدول الاستیسیته بالا	۲۵۰-۳۴۰		۱۷۲۰-۳۱۰۰	۰.۵	
مدول الاستیسیته بسیار بالا	۵۲۰-۶۹۰		۱۳۸۰-۲۴۰۰	۰.۲	
شیشه					
E	۶۹-۷۲		۱۸۶۰-۲۶۸۰	۴.۵	
S	۸۶-۹۰		۳۴۴۰-۴۱۴۰	۵.۴	
آرامید					
کاربری عمومی	۶۹-۸۳		۳۴۴۰-۴۱۴۰	۲.۵	
کارایی بالا	۱۱۰-۱۲۴		۳۴۴۰-۴۱۴۰	۱.۶	

۶-۱-۲-۱- کاربرد و شرایط استفاده

سیستمهای FRP می توانند به منظور بازسازی یا حفظ استحکام یک عضو سازه ای فرسوده ، مرمت یا مقاوم سازی عضو سازه ای سالم به منظور تحمل بارهای افزایش یافته به سبب تغییر در کاربری سازه و یا جبران خطاهای طراحی و اجرا بکار روند . مهندس مشاور قبل از انتخاب نوع سیستم FRP باید ارزیابی نماید که آیا یک سیستم FRP روش مناسبی برای مقاوم سازی مسئله مورد نظرمی باشد یا خیر؟

جدول ۴-۱- ویژگی های کششی برخی ورقهای FRP با حجم الیاف ٤٠ تا ٦٠ درصد

توصیف سیستم FRP (جهت الیاف)	مدول الاستیسیته (GPa)		مقاومت نهایی (MPa)		کرنش گسیختگی (٪)
	۰ درجه	۹۰ درجه	۰ درجه	۹۰ درجه	۰ درجه
کربن/ اپوکسی با مقاومت بالا					
۰	۱۰۰-۱۴۰	۲-۷	۱۰۲۰-۲۰۸۰	۳۵-۷۰	۱-۱.۵

۹۰/۰	۵۵-۷۶	۵۵-۷۵	۷۰۰-۱۰۲۰	۷۰۰-۱۰۲۰	۱-۱.۵
-۴۵/۴۵	۱۴-۲۸	۱۴-۲۸	۱۸۰-۲۸۰	۱۸۰-۲۸۰	۱.۵-۲
شیشه E/ اپوکسی					
۰	۲۰-۴۰	۲-۷	۲۰-۱۴۰۰	۳۵-۷۰	۱.۵-۳
۹۰/۰	۱۴-۳۴	۱۴-۳	۲۰-۱۰۲۰	۵۲۰-۱۰۲۰	۲-۳
-۴۵/۴۵	۱۴-۲۱	۱۴-۲۰	۱۸۰-۲۸۰	۱۸۰-۲۸۰	۲.۵-۳.۵
آرامید / اپوکسی با کارایی بالا					
۰	۴۸-۶۸	۲-۷	۷۰۰-۱۷۲۰	۳۵-۷۰	۲-۳
۹۰/۰	۲۸-۳۴	۲۸-۳۵	۲۸۰-۵۵۰	۲۸۰-۵۰	۲-۳
-۴۵/۴۵	۷-۱۴	۷-۱۴	۱۴۰-۲۱۰	۱۴۰-۲۱۰	۲-۳

برای استفاده از سیستم FRP در پروژه های خاص ، لازم است وضعیت موجود سازه از قبیل ظرفیت باربری ، شناسایی نقایص و عوامل آن و شرایط سطوح بتن ارزیابی شود . ارزیابی کمی می تواند شامل بازرسی دقیق میدانی و اخذ اطلاعات لازم ، مروری بر مدارک طراحی موجود سازه اجرا شده (چون ساخت) و تحلیل سازه باشد . مدارک و نقشه های موجود برای سازه شامل مشخصات پروژه ، نقشه های طراحی اولیه ، نقشه های چون ساخت ، گزارش آزمایشهای میدانی ، مدارک مربوط به تعمیرات و مرمت های حین بهره برداری و مدارک مربوط به تاریخچه نگهداری باید به خوبی مطالعه شود . مهندس مشاور باید بررسی ها و برداشت های لازم سازه موجود را مطابق دستورالعمل های موجود یا سایر مدارک معتبر و مستند هدایت کند . مقاومت کششی بتن در سطح عضو مورد نظر جایی که سیستم FRP روی آن نصب می شود، باید با آزمایش کشش سطحی کنترل شود.

بررسی های میدانی دست کم باید شامل موارد زیر باشد :

- ابعاد موجود اعضای سازه ای
- موقعیت ، اندازه و عامل ایجاد ترک و خردشدگی
- موقعیت و میزان خوردگی میلگردهای فولادی
- نوع ، مقدار و موقعیت آرماتورهای موجود
- مقاومت فشاری درجای بتن

- سلامت بتن ، بخصوص بتن پوششی ، در سطوحی که سیستم FRP به بتن چسبانیده می شود.

لازم است مهندس مشاور مطالعه ای در زمینه ادبیات فنی سیستم موجود نموده و مصالح مختلف موجود FRP را بررسی نماید تا از انتخاب نوع FRP و پوشش های محافظت کننده به منظور کاربری مناسب اطمینان حاصل شود.

۲-۲-۱- محدودیت های مقاوم سازی

توصیه می شود که افزایش ظرفیت باربری عضو تقویت شده با سیستم FRP محدود شود، به این صورت که کاهش یا از بین رفتن سیستم FRP نباید باعث گسیختگی عضو تحت اثر بارهای ثقلی شود.

۳-۲-۱- ایمنی و دوام در برابر آتش

لازم است ایمنی سازه های تقویت شده با FRP در برابر آتش سوزی مورد بررسی قرار گیرد . نرخ گسترش دود و شعله باید مطابق با الزامات ASTM E۸٤ محاسبه شود . پوشش های مناسب به منظور محدود کردن گسترش شعله و دود باید استفاده شوند.

از آنجا که اغلب مصالح پلیمری مقاومت حرارتی پایینی دارند، در طراحی در برابر آتش از مقاومت سیستم های FRP صرفنظر می شود و در این موارد لازم است اعضای سازه ای بدون در نظر گرفتن سیستم FRP مقاومت کافی در برابر بارهای وارده حین آتش سوزی را داشته باشد . مقاومت یک عضو بتنی تقویت شده با سیستم FRP در برابر آتش با استفاده از رزین های مخصوص یا پوشش های ضد حریق افزایش می یابد.

۴-۲-۱- حداکثر دمای بهره برداری

خواص فیزیکی و مکانیکی اجز ای رزین FRP در دمای بالاتر از حدی موسوم به دمای گذار شیشه ای ، Tg ، تنزل می یابد . Tg نقطه حدی دمای رزین می باشد ، که بالاتر از آن دما ، رزین از حالت سخت بودن و شکنندگی ، تغییر حالت داده ، نرم شده و به صورت پلاستیک تبدیل می شود . این مسئله باعث کاهش خواص ساختار لایه ای می گردد . برای هر سیستم FRP ، Tg مقدار منحصر به فردی است و برای مصارف متعارف ساختمانی معمولاً بین ۶۰ تا ۸۲ درجه سلسیوس تغییر می کند . لذا حداکثر دمای بهره برداری سیستم FRP نباید از دمای حدی Tg آن بیشتر شود . لازم است دمای Tg هر سیستم از سازنده آن اخذ و مورد بررسی قرار گیرد.

۵-۲-۱- حداقل مقاومت سطوح بتن

مقاومت بتن موجود عامل مهمی برای کاربری های چسبندگی بحرانی شامل مقاوم سازی خمشی یا برشی اعضا می باشد . بتن موجود باید مقاومت لازم را به منظور تحمل تنش های طراحی سیستم FRP از طریق چسب داشته باشد . بتن زیرکار شامل تمامی سطوح تعمیر شده و بتن اصلی باید از مقاومت کششی و برشی کافی به منظور انتقال نیرو به FRP برخوردار باشد . حداقل مقاومت کششی بتن ۱.۴ مگاپاسکال می باشد که با آزمایش کشش مطابق ACI ۵۰۳R یا ASTM D٤٥٤١ اندازه گیری میشود . سیستم FRP نباید برای کاربری های چسبندگی بحرانی هنگامی که بتن دارای مقاو مت فشاری کمتر از ۱۷مگاپاسکال است ، استفاده شود . استفاده از سیستم های FRP سبب توقف خوردگی

میلگردهای در حال خورده شدن نخواهد شد . هر گاه خوردگی فولادها مشهود باشد، لازم است ضمن بررسی سیستم FRP آرماتورها و بتن تعمیر شوند.

۶-۲-۱- بررسی معایب مقاومسازی خمشی تیرها با مصالح FRP

بررسی های تجربی گوناگونی در مورد تقویت خمشی تیر با استفاده از ورقه ها و صفحات FRP صورت گرفته است . در تمام این ارزیابی ها ، تیر تقویت شده باربری نهایی بیشتری در مقایسه با حالت تقویت نشده نشان می دهد . با این وجود ، افزایش مشابه در بار تسلیم تیر گزارش نشده است . بطور کلی مودهای گسیختگی عضو بتن مسلح تقویت شده در خمش با تقویت کننده های FRP چسبیده از خارج عضو ، می تواند به حالتهای ذیل تقسیم شود:

الف) شکست به علت گسیختگی FRP در اثر کشش ناشی از خمش

ب) شکست ترد به علت خرد شدن بتن فشاری تیر در اثر فشار ناشی از خمش در وجه فوقانی تیر

پ) شکست برشی

ت) جدا شدن پوشش بتن از تیر

ث) از بین رفتن مقاومت برشی چسب و جدا شدن FRP از چسب

ج) گسستن چسبندگی بصورت موضعی ناشی ازبروز تر کهای خمشی در میانه دهانه تیرو انتشار این روند

چ) از بین رفتن موضعی چسبندگی در سطح تماس FRP و بتن در اثر بروز ترکهای مایل برشی در طول دهانه و انتشار این روند گسستگی .

بصورت خلاصه تر حالت های (ت) و (ث) را از حالات شکست چسبندگی در انتهای لایه چسبانده شده به حساب می آورند . به طریق مشابه حالتهای (ج) و (چ) را شکست چسبندگی در سطح مشترک بتن و FRP ناشی از بروز ترک خوردگی در طول دهانه می نامند.

تمام حالات شکست نشان داده شده در شکل ۱-۷ به جز حالات (ج) و (چ) که رشد و انتشار ترک خوردگی بتن و جدا شدن صفحه چسبانده شده از روی بتن بصورت تدریجی رخ می دهد ، حالات شکست ترد و ناگهانی می باشد . اینکه شکست مقاوم سازی در یک تیر طبق کدامیک از این حالات صورت پذیرد ، به عوامل متعددی نظیر مشخصات فولاد خمشی و برشی داخل مقطع ، ابعاد هندسی ، خصوصیات مصالح مصرف شده و لایه چسب به کار رفته بستگی دارد.

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

۱-۳-۱ راهکارهای اجرایی برای رفع معایب FRP

جهت رفع معایب اشاره شده در بخش قبلی و سایر معایب FRP ، راه حلهای اجرائی پیشنهاد شده که بعضی از این نقایص را مرتفع می نماید از جمله راهکارهای معرفی شده ، می توان استفاده از مهاربندی ها و اعمال پیش تنیدگی را نام برد .

۱-۱-۳-۱- اعمال سیستم مهاربندی در انتهای لایه FRP

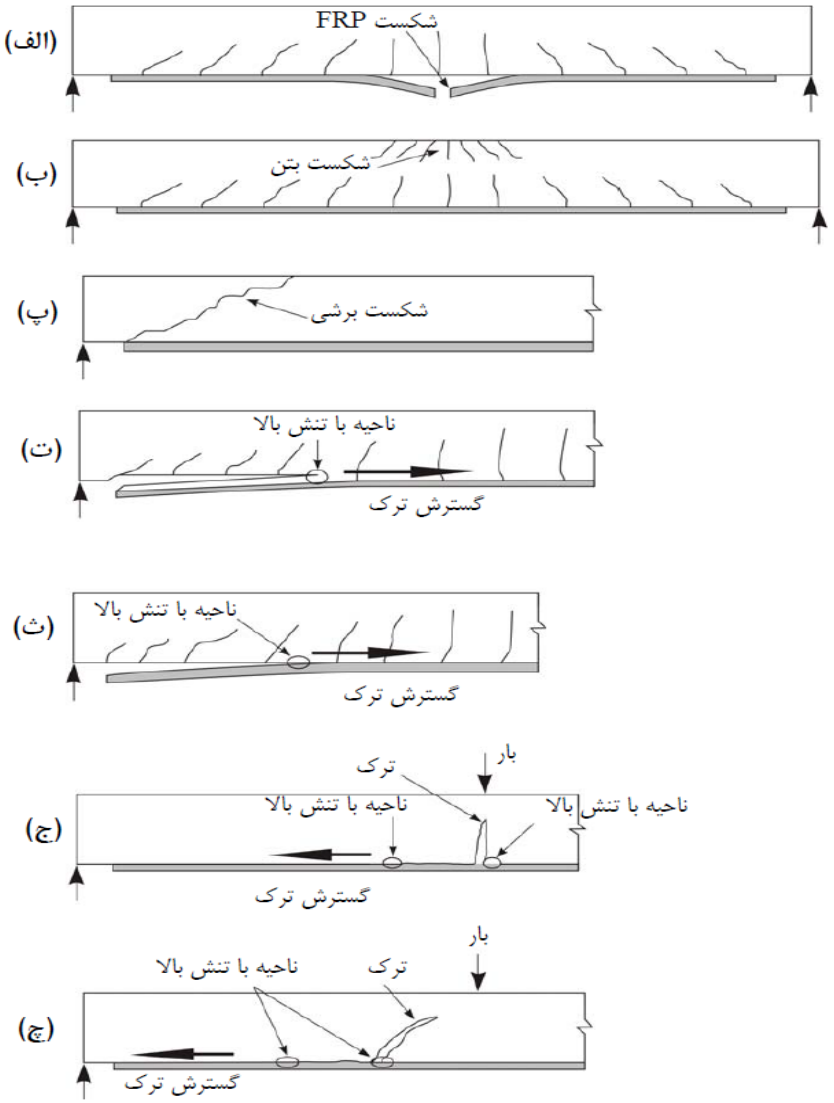
سیستم مهاربندی اصولاً به این جهت مورد استفاده قرار می گیرد که بتوان از ظرفیت باربری سیستم FRP نهایت استفاده را برد . گسیختگی های ناشی از جدا شدگی لایه های FRP عموماً در اثر نبود چنین سیستمی می باشد . در این روش از دورپیچ کردن کامل انتهای FRP توسط نوارهایی از FRP استفاده می گردد .

با توجه به اینکه معمولاً، ناحیه فوقانی تیرهای موجود به دلیل وجود دال ، قابل دستیابی نیستند ، از نوارهایی که فقط سطوح پایینی و جانبی تیر را می پوشانند استفاده می گردد . از سایر رو شها نیز می توان به استفاده از پیچ های مخصوص در انتهای لایه FRP نام برد . این روش یکی از اولین روشها بوده که جهت نصب و مهاربندی صفحات فولادی مورد استفاده قرار می گرفت . بر اساس مطالعات انجام شده ، این روش بر روی لایه های کامپوزیتی نیز مناسب بوده و اثر مثبتی از خود نشان می دهد ولی مشکلی که ایجاد می کند سوراخ شدن لایه FRP بوده که اثر نامطلوبی بر عملکرد آن خواهد داشت و باعث ایجاد تمرکز تنش در FRP می گردد .

۲-۱-۳-۱- اعمال سیستم پیش تنیدگی در لایه

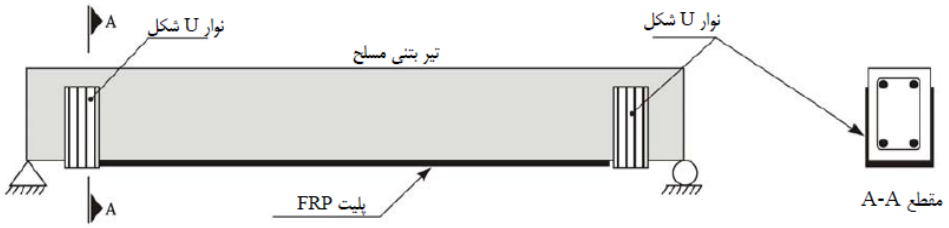
این روش تقریباً مشابه روش مهاربندی در انتهای لایه FRP می باشد ، زیرا در این روش برای ایجاد پیش تنیدگی تعبیه سیستم مهاری لازم است . تنها فرق این روش ، اعمال نیروی پیش تنیدگی قبل از نصب کامل و عمل آوری لایه FRP می باشد .

می توان نوارها یا صفحات FRP را قبل از چسباندن بر روی بتن ، پیش تنیده کرد . مزیت اصلی این کار این است که چنین نوارهایی پس از چسبانده شدن بر روی المان در باربری المان سهیم می شوند و برای شرکت آنها در ظرفیت باربری المان ، دیگر نیازی به اضافه شدن بر مقدار بارهای وارده بر المان نمی باشد.



الف) گسیختگی FRP ب) خرد شدن بتن فشاری
پ) گسیختگی برشی ت) ورقه شدن پوشش بتن
ث) جدایش در فصل مشترک FRP و بتن در انتها
ج) جدایش در فصل مشترک ناشی از ترک خمشی
چ) جدایش در فصل مشترک ناشی از ترک برشی

شکل ۱-۸ مودهای گسیختگی تیر بتنی تقویت شده با صفحه FRP



شکل ۱-۹ تقویت خمشی تیر با اعمال مهاربندی

همچنین پیش تنیدگی این نوارها باعث کاهش عرض تر کهای موجود در طول المان می شود که این در برخی موارد موضوع بسیار حیاتی و مهمی می باشد . علاوه بر اینها بدلیل اینکه مصالح FRP مقاومت کششی بالایی دارند ، پیش تنیده کردن آنها سبب استفاده بهتر و افزایش بهره وری از آنها می گردد . البته این روش نیازمند نیروی کار ماهرتر و دقت بیشتر در طراحی و اجرا می باشد .

۱-۲-۱-۳-۱- روشهای پیش تنیده نمودن صفحات FRP

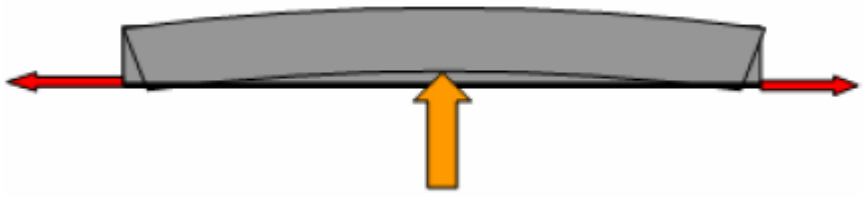
پیش تنیده نمودن با استفاده از خمش تیر اصلی

پیش تنیده نمودن با کشش مستقیم صفحه FRP با کمک قاب مخصوص

پیش تنیده نمودن با کشش مستقیم صفحه FRP با کمک تیر اصلی

روش اول توسط سعادتمنش و احسانی (۱۹۹۱) پیشنهاد شده است بدین ترتیب که تنش لازم جهت پیش تنیدگی FRP به کمک خمش تیر اصلی مورد مقاومسازی به سمت بالا با استفاده از جک هیدرولیکی بدست می آید . پس از خمیدن تیر اصلی صفحه FRP به قسمت تحتانی تیر چسبیده می شود (شکل ۱-۱۰) . پس از عمل آوری کامل چسب اپوکسی نیروی جک برداشته می شود و نیروی حذف شده وارد FRP شده و باعث ایجاد تنش اولیه در آن می گردد .

برخی از معایب این روش محدودیت در میزان پیش تنیدگی در صفحات می باشد و همچنین پی سازه و سایر اعضای مرتبط با عضو مورد پیش تنیدگی بایستی مقاومت لازم در مقابل عکس العمل نیروی جک هیدرولیکی را داشته باشند . از مزایای این روش عدم نیاز به وسیله مکانیکی خاص جهت پیش تنیدگی و راحتی چسباندن و مهار کردن انتهای FRP می باشد (Piyoung Yu et al , ۲۰۰۸) .

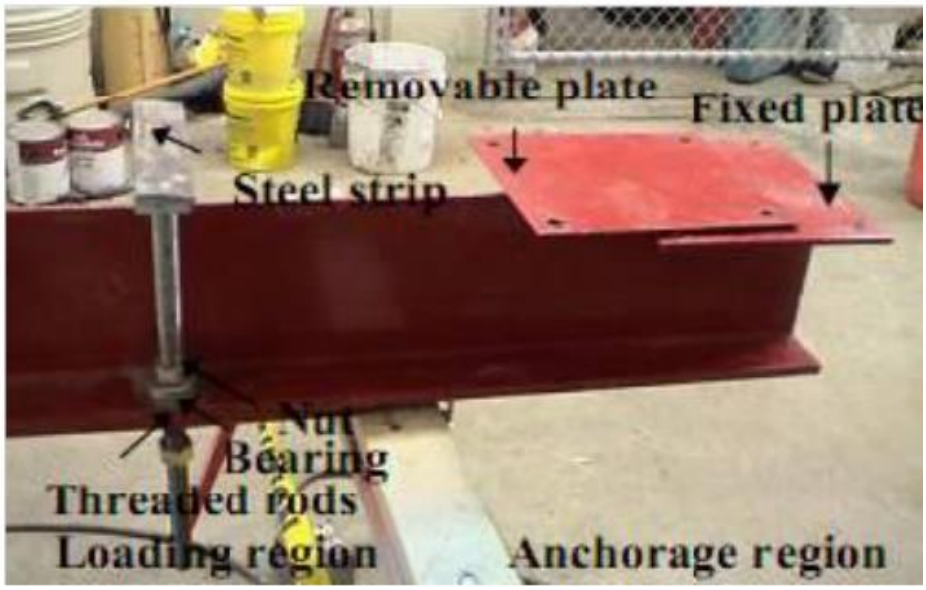


شکل ۱-۱۰ پیش تنیده نمودن FRP با استفاده از خمش تیر اصلی

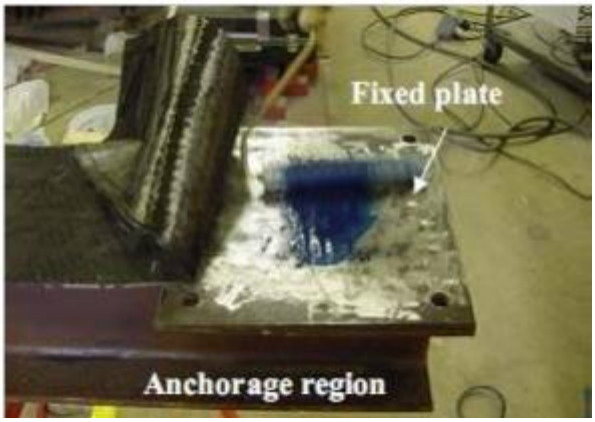
در روش دوم با استفاده از عکس العمل نیروی جک وارد به قاب خارجی، کشش مستقیم به صفحه FRP وارد می شود (Triantafillou et al., ۱۹۹۲, Meier, ۱۹۹۵, Piyoung Yu et al, ۲۰۰۳) .

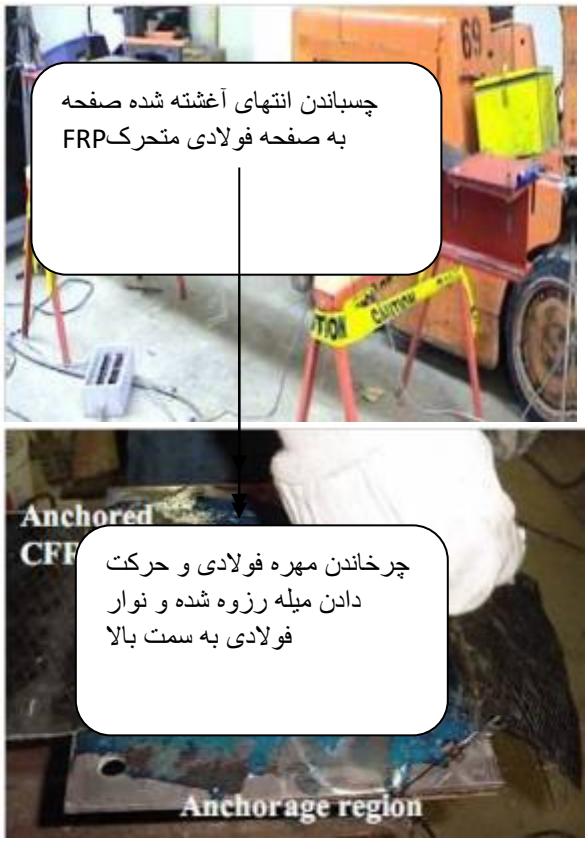
برای این روش پیونگ یو (۲۰۰۳) یک وسیله مکانیکی که یک تیر فولادی می باشد جهت پیش تنیده نمودن FRP پیشنهاد کرده است . همانطورکه در شکل ۱-۱۱ معلوم است وسیله مکانیکی شامل یک تیر فولادی ، دو سیستم مهاری در انتها و دو محل بارگذاری می باشد . ناحیه مهاری شامل دو صفحه فولادی ثابت و متحرک جهت مهار FRP می باشد . محل بارگذاری شامل نوار فولادی جهت نگهداری و اعمال پیش تنیدگی به صفحه FRP می باشد . دو میله رزوه شده جهت بالا بردن نوار فولادی و اعمال نیروی پیش تنیدگی به FRP به دو انتهای نوار فولادی جوش شده است .

یک ویژگی جالب این روش دستی بودن و بی نیازی از انرژی خارجی مانند جک هیدرولیک می باشد . پیش تنیده نمودن سریع FRP باعث تمایل به جدا شدگی انتهای آن می شود (Pornpongsaroj and Pimanmas ۲۰۰۳) که در این روش با توجه به پیش تنیده نمودن آرام FRP این اتفاق رخ نمی دهد . در مواردی که سرعت پیش تنیدگی و در نتیجه جداشدگی انتهای FRP غیر قابل کنترل باشد از لفافه U شکل FRP براحتی در انتهای FRP پیش تنیده نصب می شود . از معایب این روش عبارتند از : ۱- وجود فاصله میان ناحیه مهاری و بارگذاری امکان چسباندن صفحه پیش تنیده را تا انتهای تیر اصلی فراهم نمی کند . ۲- طول FRP مورد پیش تنیدگی بدلیل کمانش وسیله پیش تنش محدود می باشد(Piyong Yu et al ۲۰۰۸) .



شکل ۱-۱۱ ناحیه مهاری و ناحیه بارگذاری وسیله پیش تنش (Piyong Yu ۲۰۰۳)



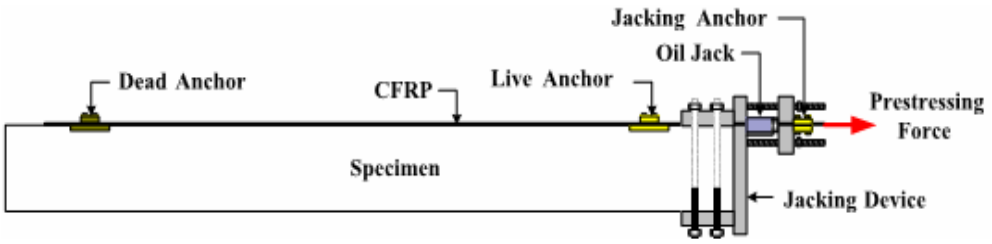


شکل ۱-۱۲ فرآیند پیش تنیده نمودن FRP با روش دوم

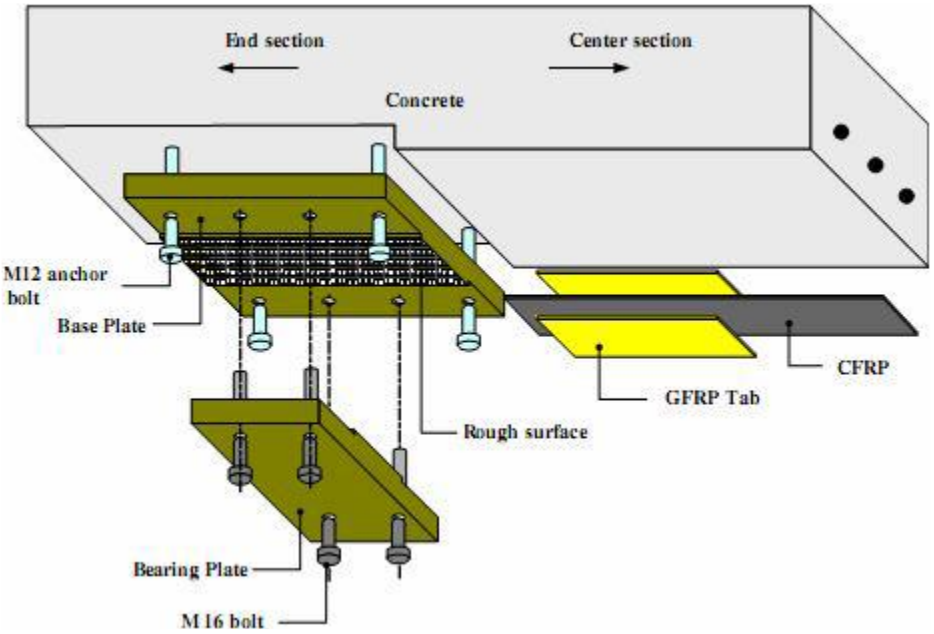
در روش سوم (روش مستقیم) صفحه FRP از یک طرف به صفحه ثابت فولادی(dead anchor) و از طرف دیگر به صفحه فولادی متحرک(live anchor) متصل می شود و نیروی پیش تنیدگی با استفاده از جک هیدرولیکی به صفحه فولادی متحرک وارد می شود .

(Wight et al., ۲۰۰۱, El-Hacha et al.,۲۰۰۱, Dong-Suk Yang et al., ۲۰۰۸) .

مطابق این روش صفحات FRP از دو انتها به تیر اصلی متصل می شوند ؛ یک انتها قبل از پیش تنیدگی و انتهای دیگر بعد از پیش تنیدگی متصل می شود (شکل ۱-۱۳) . FRP مابین دو سطح زبر صفحه فولادی قرار می گیرد و جهت جلوگیری از تمرکز تنش در صفحه FRP لایه GFRP در دو طرف آن قرار می گیرد (شکل ۱-۱۴) (Dong -Suk Yang et al. ۲۰۰۸) . باقی ماندن سیستم مهاری روی تیر هزینه را بالا خواهد برد لذا بعد از اجرای کامل FRP پیش تنیده سیستم مهاری از تیر جدا شده و در عملیات بعدی مورد استفاده قرار می گیرد ؛ در این صورت جهت مهار انتهای FRP پیش تنیده لفاف U شکل FRP به انتهای آن چسبانده می شود .



شکل ۱-۱۳ ابزار پیش تنش (Dong -Suk Yang ۲۰۰۸)



شکل ۱-۱۴ جزییات سیستم مهاری انتهای FRP (Dong -Suk Yang ۲۰۰۸)

های زیر می باشد : مزیت دارایFRPدر تنیدگی پیش کلی بطور

سختی افزایش

ترک توزیع و عرض کاهش

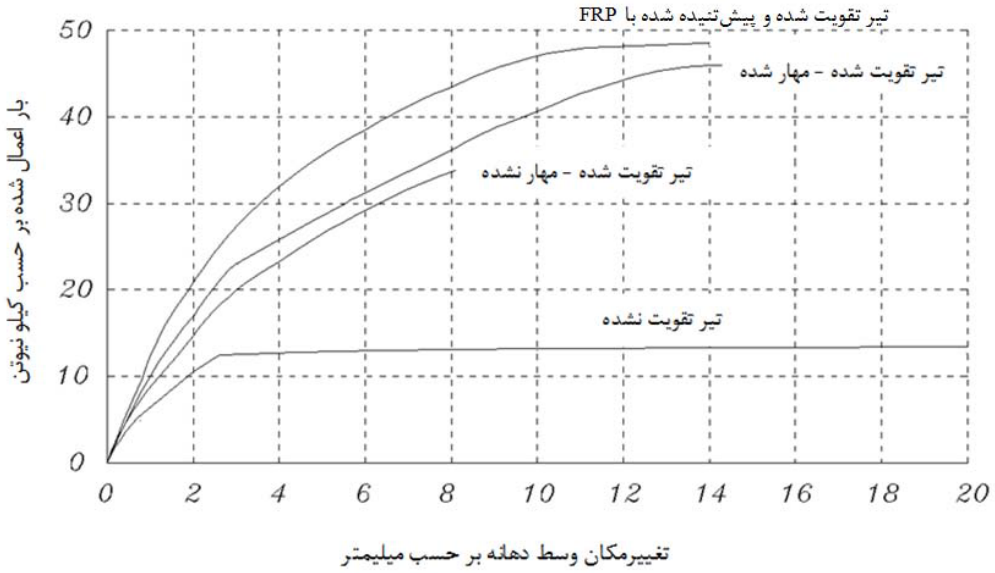
دوام و پذیری خدمت بهبود

مقطع) نخوردن ترک (بدلیل عضو خمشی و برشی مقاومت بهبود

FRPلایه انتهای و کها تر ناحیه در شدن پوسته پوسته از ناشی شکست مودهای از اجتناب

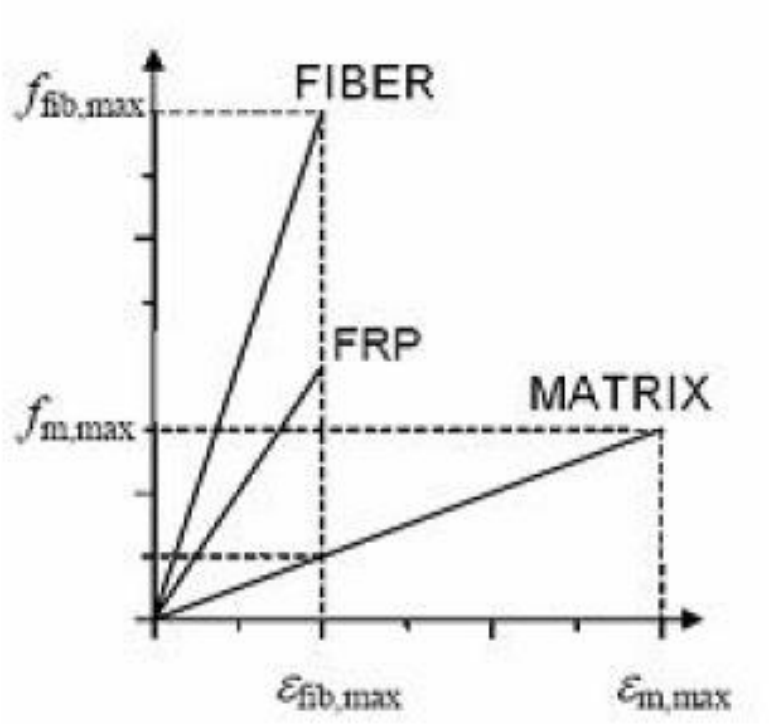
گیرد) می پایین تر قرار تنیده پیش غیر حالت به نسبت خنثی (تار مقطع ظرفیت افزایش

مقطع تسلیم بار افزایش

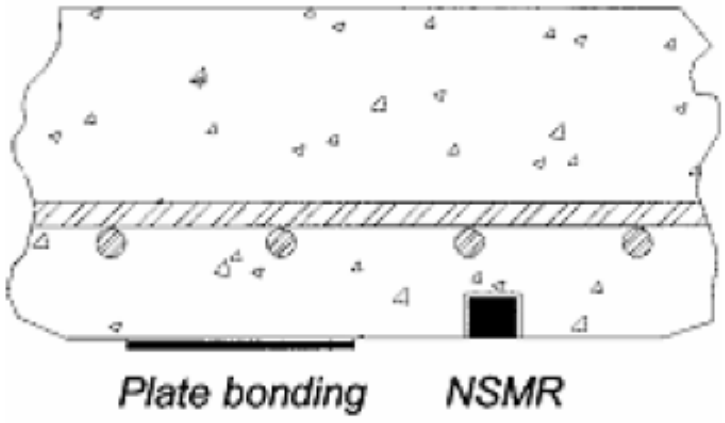


نمودار ۱-۲ منحنی رفتار تیرهای تقویت شده و پیش تنیده شده با FRP و تقویت نشده تحت بارگذاری خمشی

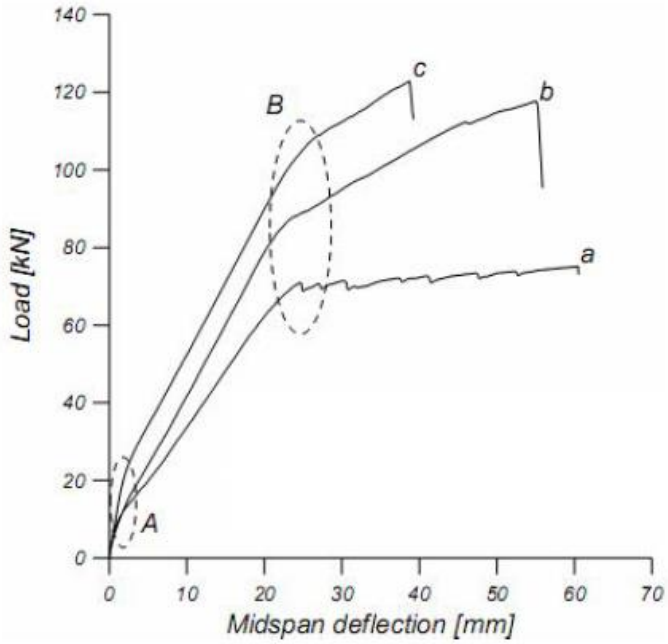
در عمل ، استفاده از مهاربندی مکانیکی انتهایی می بایست موقعی مدنظر قرار گیرد که کاربرد آن لازم باشد و همچنین تأثیر و سودمندی آن برای حفظ چسبندگی FRP و بتن به اثبات برسد . در بسیاری از موارد ، مهاربندی با استفاده از نوارهای U شکل انتهایی ، امکان پذیر و یا مؤثر نمی باشد همانند مقاومسازی تیرهای با عرض زیاد یا دالها . در چنین مواردی لازم است راه های دیگری برای مهاربندی مکانیکی بررسی و ابداع گردد . یکی از این راه ها ، استفاده از مهارهای الیافی می باشد .



نمودار ۱-۳ رابطه تنش-کرنش الیاف ، ماتریس و FRP



شکل ۱-۱۵ نمای شماتیک دو روش مقاومسازی نصب نزدیک سطح و چسباندن صفحه FRP



a- بدون مقاومسازی b- مقاومسازی شده با CFRP c- مقاومسازی شده با CFRP پیش تنیده

نمودار ۱-۴ تیرهای مقاومسازی شده با CFRP (Nordin etal ۲۰۰۱)

همانطورکه از نمودار ۱-۴ مشخص می باشد رفتار تیر بتن مسلح تحت اثر بار خارجی به سه مرحله قابل تقسیم است : نقطه A نماینده مرحله ترک در بتن ، نقطه B نماینده مرحله جاری شدن فولاد در بتن و انتهای نمودارها نماینده مرحله گسیختگی سازه می باشد . ملاحظه می شود در هر سه مرحله ، پیش تنیدگی باعث افزایش مقاومت نمونه می گردد همچنین کاهش شکل پذیری نمونه نیز در نمودار مشهود است .

اگر شکاف تیر قبل از اجرای آن طراحی شود می توان با استفاده از میلگردهای فولادی در اطراف شکاف ضعف مقاومت تیر راجبران نمود اما در صورتیکه شکاف ، در تیر اجرا شده ایجاد شود بایستی از روشهای مقاومسازی استفاده نمود (شکل ۱-۱۶) .

شکل ۱-۱۶ تقویت موضعی شکافها در تیر FRP

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده را بصورت زیر می توان خلاصه نمود :

۱ - پیش تنیدگی CFRP باعث کاهش خسارت (ترک) کششی در بتن می شود .

۲ - با توجه به مقاومت بتن و لایه CFRP میزان پیش تنیدگی CFRP محدود است و برای پیش تنیدگیهای بیشتر تمهیدات خاصی در خصوص موارد ذکر شده در نظر گرفته شود از جمله افزایش مقاومت بتن در صورت امکان ، افزایش مقاومت و تعداد لایه های CFRP .

۳ - برای پیش تنیدگی زیاد معمولا انتهای CFRP از بتن جدا می شود که این مسئله با مهار انتهای CFRP قابل حل است .

۴ - پیش تنیدگی باعث استفاده بیشتر از ظرفیت مقاومتی CFRP می شود .

۵ - پیش تنیدگی CFRP باعث افزایش مقاومت خمشی و باربری تیر در لحظه ترک خوردگی ، جاری شدن فولاد و بار ماکزیمم می شود .

۶ - پیش تنیدگی CFRP باعث افزایش سختی تیر می شود .

۷ - با افزایش میزان پیش تنیدگی مقاومت خمشی و باربری تیر در لحظه ترک خوردگی ، جاری شدن فولاد و بار ماکزیمم افزایش می یابد .

۸ - با افزایش پیش تنیدگی تغییرات محسوسی در شکل پذیری تیر ایجاد نمی شود .

۹ - با افزایش میزان پیش تنیدگی خسارت (ترک) کششی در بتن کاهش می یابد .

۱۰ - افزایش تسلیحات فولادی یا CFRP باعث افزایش خسارت (ترک) در بتن و در مقابل باعث افزایش مقاومت و باربری می شود .

۱۱ - زمانیکه در تیر موجود بدون فولاد تقویتی شکاف ایجاد شود می توان بجای فولاد تقویتی با CFRP تیر را مقاومسازی نمود .

۵-۵ پیشنهاد برای تحقیقات آینده

۱ - بررسی مقاومت پیچشی تیر شکافدار و نحوه مقاومسازی آن .

۲ - ارزیابی رفتار تیرهای شکافدار در شرایط مرزی و تکیه گاهی متفاوت .

۳ - ارزیابی رفتار لرزه ای تیرهای شکافدار .

۴ - ارزیابی رفتار وابسته به زمان در تیر مقاومسازی شده با CFRP .

۵ - بررسی رفتار تیر مقاومسازی شده با CFRP در دماهای مختلف .

فهرست منابع فارسی :

حسین زاده اطاقسرا ، س. ، ۱۳۸۱ ، تعیین ظرفیت خمشی نهایی تیرهای تقویت شده با ورقهای فولادی و GFRP با استفاده از چسب اپوکسی ، پایان نامه کارشناسی ارشد گروه سازه ، دانشگاه مازندران دانشکده فنی و مهندسی بابل .

خلخالی ، ا. ، ۱۳۸۹ ، تحلیل اجزای محدود با کمک ABAQUS ، موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران

روشنی رودسری ، ع. ، ۱۳۸۳ ، بررسی تأثیر بازشوهای مستطیلی بر رفتار برشی و خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از بتن معمولی و مقاومت بالا، پایان نامه کارشناسی ارشد گروه سازه ، دانشگاه مازندران دانشکده فنی و مهندسی بابل .

رحیمی آبکناری ، م. ، ۱۳۸۲ ، تأثیر بازشوهای مدور کوچک و نوع آرایش و تسلیح آنها بر رفتار تیرهای بتن آرمه ساخته شده از بتن معمولی و عملکرد بالا (توانمند) ، پایان نامه کارشناسی ارشد گروه سازه ، دانشگاه مازندران دانشکده فنی و مهندسی بابل .

ضیایی ، م. ، پیغاله ، ا. ، ۱۳۸۹ ، راهنمای مدل سازی با نرم افزار ABAQUS ، انتشارات پندار پارس .

عزیزنژاد ، س. ، ۱۳۷۵ ، روش های کنترل کیفیت تقویت سازه های بتن آرمه ، سمینار کارشناسی ارشد ، دانشگاه علم و صنعت .

عباسی ، م. ، ۱۳۹۰ ، مقاوم سازی تیرهای بتنی بازشودار با استفاده از FRP ، پایان نامه کارشناسی ارشد گروه سازه ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر.

معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور ، ۱۳۸۵ ، راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمانهای بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP ، نشریه شماره ۳۴۵

معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور ، ۱۳۸۹، راهنمای روشها و شیوه های بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود و جزییات اجرایی ، نشریه شماره ۳۴۵

مباحی ، پ. و حکیمی ، ب. ، مرمت و تقویت سازه های بتن مسلح در مناطق زلزله خیز ، مرکز تحقیقات بنیاد مسکن انقلاب اسلامی .

مجد ، ح. ، ۱۳۷۷ ، بررسی روشهای مختلف مقاوم سازی ساختمانهای بتنی متعارف و ارائه شیوه تقویت برای آنها ، پایان نامه کارشناسی ارشد گروه سازه ، دانشگاه علوم و فنون مازندران .

محسنی شکیب ، م. ، ۱۳۸۹ ، مکانیک سازه های مرکب ، انتشارات دانشگاه امام حسین .

فهرست منابع انگلیسی :

۱۳. Abdalla , HA. , Torkey , AM. , Haggag , HA. , Abu-Amira , AF. , ۲۰۰۳, Design against cracking at openings in reinforced concrete beams strengthened with composite sheets , Compos Struct , ٦۰:۱۹۷–۲۰٤.
۱٤. Camanho , P.P. , Tavares , C.M.L. , de Oliveira , R. , Marques , A.T. , Ferreira , A.J.M. , ۲۰۰٥, Increasing the efficiency of composite single-shear lap joints using bonded inserts , Composites Part B ۳٦ ۳۷۲–۳۸۳,
۱٥. El Maaddawy , T. , Sherif , S. , ۲۰۰۹ , FRP composites for shear strengthening of reinforced concrete deep beams with openings , Compos Struct , ۸۹:٦۰–٦۹.
۱٦. Hillerborg , A. , Modeer , M. , Petersson , P. E. , ۱۹۷٦, Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements , Cement and Concrete Research vol. ٦, pp. ۷۷۳–۷۸۲.
۱۷. Hashin , Z. , ۱۹۸۰, Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, Journal of Applied Mechanics vol. ٤۷, pp. ۳۲۹–۳۳٤.
۱۸. Hashin , Z. , Rotem , A. , ۱۹۷۳, A Fatigue Criterion for Fiber-Reinforced Materials , Journal of Composite Materials vol. ۷, pp. ٤٤۸–٤٦٤.
۱۹. Kong , FK. , Sharp , GR. , ۱۹۷۷, Structural idealization for deep beams with web openings , Mag Concr Res , ۲۹(۹۹):۸۱–۹۱.
۲۰. Lee , J. , Fenves , G. L. , ۱۹۹۸, Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures , Journal of Engineering Mechanics , vol. ۱۲٤, no.۸, pp. ۸۹۲–۹۰۰.
۲۱. Lubliner, J. , Oliver , J. , Oller , S. , Oñate , E. , ۱۹۸۹, A Plastic-Damage Model for Concrete , International Journal of Solids and Structures vol.۲٥, pp. ۲۹۹–۳۲۹.
۲۲. Mansur , MA. , ۱۹۹۸ , Effect of openings on the behavior and strength of R/C beams in shear , Cem Concr Compos , ۲۰:٤۷۷–۸٦ .
۲۳. Mansur , MA , Tan , KW , Wei , W , ۱۹۹۹ , Effects of creating an opening in existing beams , ACI Struct J , ۹٦(٦):۸۹۹–۹۰٦.
۲٤. Mansur , MA. , Alwist , WA. , ۱۹۸٤ , Reinforced fibre concrete deep beams with web openings , Int J Cement Compos Lightweight Concr , ٦(٤):۲٦۳–۷۱.
۲٥. Mansur , MA. , Tan , K. , Wei , W. , ۱۹۹۹, Effects of creating an opening in existing beams , ACI Struct ,۹٦(٦):۸۹۹–۹۰٦.
۲٦. Ove , A. , ۱۹۷۷, The Design of Deep Beams in Reinforced Concrete , Construction Industry Research and Information Association (CIRIA Guide ۲) , London .
۲۷. Piyong , Yu. , Pedro F. , Silva, Antonio, Nanni, ۲۰۰۳ , Flexural performance of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets , CCC۲۰۰۳ International Conference .
۲۸. Ray , S. , Reddy , C. , ۱۹۷۹, Strength of reinforced concrete deep beams with and without opening in the web , Ind Concr ,٥۳(۹):۲٤۲–٦.
۲۹. Shanmugamt , NE. , Swaddiwudhipong , S. ,۱۹۸۸, Strength of fibre reinforced concrete beams containing openings , Int J Cement Compos Lightweight Concr ,۱۰(۱):٥۳–٦۰.
۳۰. Tan , KH. , Mansur , MA. , Huang , LM. , ۱۹۹٦ , Reinforced concrete Tbeams with large web openings in positive and negative moment regions , ACI Struct , ۹۳(۳):۲۷۷–۸۹.
۳۱. Zhang , Z. , Hsu , C. , Moren , J. , ۲۰۰٤, Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using carbon fiber reinforced polymer laminates , ASCE J Compos Constr , ۸(٥):٤۰۳–۱٤.