

بهسازی و مقاوم سازی سازه ها با کامپوزیت FRP براساس آیین نامه CEB-FIP

رضا شاهرادی، کارشناس ارشدسازه

ایمان الیاسیان، دانشجوی دکترای عمران ساره

Eiman.Elyasian@gmail.com

فصل اول : مقدمه

1-1 تعمیر، تقویت و مقاوم سازی

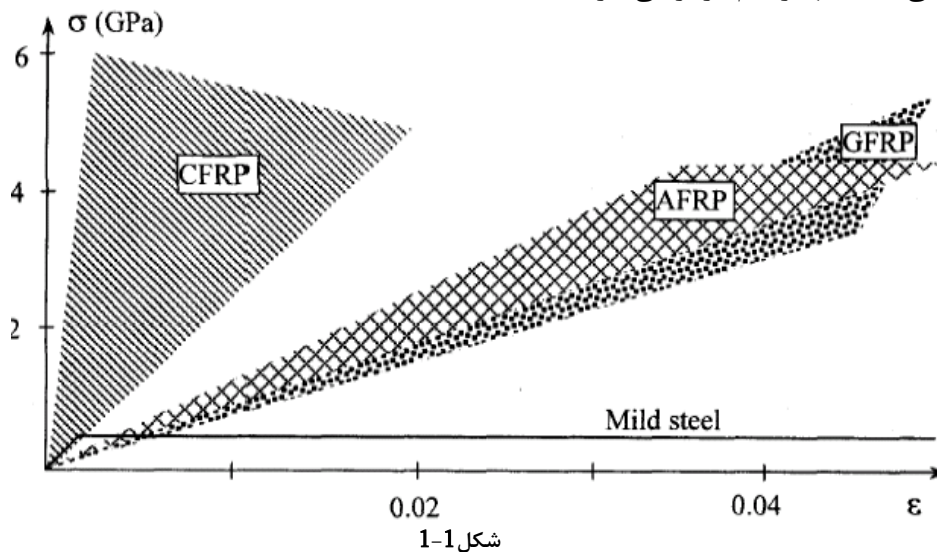
بیش از یک دهه است که مقوله بهبود و ارتقاء، کیفی زیر ساخت های دانش مهندسی ساختمان، یکی از مهمترین موارد می باشد. خراب شدن و از بین رفتن عرشه پل ها، تیرها شاه تیرها و ستون ها، منازل و سازه های پارکینگ و غیره به مواردی همچون بالا رفتن سن سازه، عوامل مضر و مخرب محیطی، طراحی یا اجرای ضعیف، اشکال و ضعف نگهداری از بنا و یا حوادثی همچون زلزله، نسبت داده می شود.

ضعف های مشاهده شده در زیر ساختها همراه با نیاز روز به ارتقاء و بهبود کیفیت باعث شده که پیش نیازهای کاملتر و قانع کننده تری برای طراحی در نظر گرفته شود. (به عنوان مثال افزایش حجم ترافیک بروی پلها بیش از مقادیر طراحی اولیه). به این ترتیب در سالهای اخیر بازنگری در ابعاد گوناگون دانش مهندسی ساختمان بطور قابل ملاحظه ای مورد توجه گرفته است. در عین حال، مقاوم سازی لرزه ای هم از اهمیت مشابهی برخوردار شده است علی الخصوص در مناطقی که خطر نسبی زلزله در آنها بالا می باشد.

2-1 مسلح سازی از طریق چسباندن لایه سطحی FRP

پیشرفتهای اخیر در زمینه مواد و مصالح، روش ها و تکنولوژی تقویت سازه ها، بسیار عظیم بوده است. یکی از روشهای ارائه شده امروزی، استفاده از FRP می باشد که در حال حاضر از نظر مهندسی، جدید و بسیار نویدبخش در صنعت ساخت و ساز می باشد. مصالح مرکب یا کامپوزیت ها امروزه برای تقویت و مقاوم سازی سازه ها در مهندسی عمران اغلب به صورت های زیر در دسترس می باشند: نوارهای نازک تک محوره (با ضخامت در حدود 1 میلیمتر) ساخته شده از Pultrusion صفحات انعطاف پذیر تک محوره یا منسوج ساخته شده از رشته هایی که حداقل در دو جهت متفاوت قرار دارند و گاهی قبل از استفاده با رزین آغشته می گردند برای مقایسه با فولاد، دیگرام تنش - کرنش برای مواد مرکب تک محوره تحت بارگذاری کوتاه مدت یکنواخت در شکل 1-1 ارائه شده است. دلایل عمده استفاده از مواد مرکب، یا کامپوزیت برای تقویت و مقاوم سازی المانهای بتن مسلح به صورت خلاصه عبارتند از: ایمنی و مصونیت در برابر زنگ زدگی و خوردگی، وزن کم (در حدود $\frac{1}{4}$ فولاد)، کاربرد راحت تر در فضاهای محصور، عدم نیاز به داربست و پایین آوردن هزینه نیروی کار (دستمزدها)، مقاومت کششی بسیار بالا (در برابر بارگذاری کوتاه مدت و بلند مدت البته در بعضی از مواد FRP)، سختی که می تواند متناسب با نیازها و شرایط طراحی تعیین گردد، قابلیت تغییر شکل بالا، دسترسی بسیار بالا به ابعاد و اندازه های گوناگون FRP. البته مواد کامپوزیت معایب

خاص خود را هم دارند که این موارد توسط مهندسين نادیده گرفته نمی‌شوند، همانند: بر خلاف فولاد که رفتاری الاستو پلاستیک دارد، کامپوزیت‌ها عموماً تا مرحله شکست، بدون آنکه نقطه تسلیم مشخصی داشته باشند یا تغییر شکل پلاستیک از خود نشان دهند، خطی و الاستیک باقی می‌مانند و این منجر به کاهش شکل‌پذیری خواهد شد. علاوه بر این، هزینه مواد و مصالح مصرفی کامپوزیت بر مقیاس وزن، چندین برابر بیشتر از فولاد می‌باشد. (اما اگر هزینه‌ها بر پایه مقاومت مصالح در نظر گرفته شود، آنها کمتر نگران کننده خواهند بود) همچنین برخی از مواد که در برخی از مواد که در FRP به کار گرفته می‌شوند، همانند کربن و آرامید، ضریب انبساط حرارتی ناسازگاری با ضریب انبساط حرارتی بتن دارند و در نهایت اینکه در معرض حرارت بالا قرار گرفتن آنها مثلاً در حین آتش سوزیها ممکن است سبب از بین رفتن زود هنگام این مواد گردد. (برخی رزین‌های اپوکسی در دمای 45 تا 70 درجه سانتیگراد شروع به نرم شدن می‌کنند. بنابراین مواد FRP نمی‌توانند جایگزین فولاد یا هر مصالح دیگر در امر ساخت و ساز گردند. در عین حال مزایای استفاده از آنها می‌بایست در کنار معایب نام برده شده ارزیابی گردند و تصمیم نهایی برای استفاده از آنها می‌بایست با ملاحظه و در نظر گرفتن فاکتورهای متعددی صورت گیرد این فاکتورها نه تنها شامل ابعاد و زوایای عملکرد و فیزیکی و مکانیکی آنها می‌باشد بلکه قابلیت کاربردی بودن و دوام طولانی مدت آنها را هم در بر می‌گیرد.



3-1 کاربردهای EBR

کامپوزیت‌ها بعنوان مواد و مصالحی جهت تقویت و مقاوم کردن المانهای بتنی مسلح همچون تیرها، ستونها، دالها و غیره به صورتهای گوناگون در سرتاسر دنیا به کار گرفته می‌شوند. همچنین در مواردی که راههای مرسوم و معمول مقاوم‌سازی با مشکل مواجه می‌شود، استفاده از این مواد مطرح می‌گردد. بعنوان مثال یکی از تکنیک‌های شناخته شده برای تقویت المانها و اعضای بتن مسلح (RC)، استفاده از صفحات فولادی می‌باشد که با رزین اپوکسی به سطح خارجی تیرها و دالها در مناطق تحت کشش چسبانیده می‌شود. این روش هم ساده و هم موثر می‌باشد از نظر هزینه و نحوه اجرا هم مناسب است اما معایبی هم دارد (Mrier 1987): خوردگی و زنگ زدگی فولاد، چرا که امر

در سطوح که در هنگام چسبانیدن به بتن زخمی یا خراب می‌شوند؛ مشکل بودن کار کردن با ورق‌های فولادی سنگین در محلهای تنگ که باید مقاوم سازی در آنها صورت گیرد لزوم استفاده از داربست و همچنین محدودیت دسترسی به طولهای زیاد ورق‌های فولادی (که در مورد شاه‌تیرهای با طول زیاد، لازم می‌گردد) این باعث بوجود آمدن درز اجرایی در طول ورق تقویت می‌گردد. جایگزین کردن لایه های مقاوم FRP به جای ورق‌های فولادی راه‌حل مناسبی برای معایب فوق‌الذکر می‌باشد.

از دیگر تکنیک‌های معمول مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح (RC)، استفاده از ژاکت یا غلاف بتنی (بصورت بتن درجا یا شاتکریت) دور تا دور اعضای موجود بتنی می‌باشد. این روش نیز موثر می‌باشد و از جنبه افزایش سختی و شکل‌پذیری قابل قبول می‌باشد اما بدلیل فشردگی و سختی اجرا، اغلب افزایش مقاومت و سختی مورد انتظار بدست نمی‌آید. پوشش و غلاف پیرامونی اعضای بتنی می‌تواند فولادی هم باشد اما در این مورد، مقوله خوردگی و زنگ زدگی فولاد اهمیت فوق‌العاده‌ای می‌یابد. می‌توان این غلاف را با پوشش‌های FRP دور تا دور اعضای بتن مسلح (RC)، جایگزین نمود و به این ترتیب افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت اعضا (محوری، برشی، خمشی و پیچشی) بوجود خواهد آمد بدون آنکه تاثیر خاصی بر روی سختی عضو بگذارند. گستره استفاده از EBR در سازه‌های بتن مسلح رو به افزایش است. یک نمونه از کاربرد این روش که اخیراً مورد توجه بیشتر قرار گرفته افزایش مقاومت برشی اتصال تیر و ستون می‌باشد

4-1 محتوا و هدف از این گزارش:

در این گزارش هدف این است که مروری کلی بر کاربردهای عمده مواد مرکب بعنوان تقویت کننده‌های خارجی قابل نصب (EBR) به روی سازه‌های بتنی داشته باشیم و توصیه‌هایی هم برای طراحی ارائه می‌گردد. در گزارش علاوه بر توصیفات کلی از مواد و مصالح و تکنیک‌های مرتبط با کاربرد کامپوزیت‌ها به عنوان مقاوم کننده‌هایی که به روی سطوح خارجی اعضای بتنی چسبانیده می‌گردند، بخشهای متعددی وجود دارد که هر کدام به جنبه‌های خاصی از مقاوم‌سازی به کمک FRP اختصاص دارد. در بخشهای جداگانه، به جزئیات طراحی و رفتار سازه‌های اعضای بتنی مقاوم‌سازی شده تحت خمش، برش یا پیچش پرداخته شده است. طبیعتاً این بخشها با جزئیات اجرایی و کنترل کیفیت ادامه می‌یابند. فصل بعدی اطلاعاتی را در زمینه ملاحظات خاص طراحی و اثرات محیطی ارائه می‌کند.

لازم است که تاکید کنیم:

(a) هدف این گزارش پرداختن به تمام ابعاد و جنبه‌های مقاوم‌سازی اعضای بتن مسلح به کمک کامپوزیت‌ها نمی‌باشد.

(b) بسیاری از موضوعات ارائه شده، مواردی هستند که تحقیق و بررسی بروی آنها متمرکز شده و سایر تحقیقات و جنبه‌های این کار ممکن است در نسخه‌های آتی ارائه گردند. حداکثر سعی ما بر این بوده که در این گزارش مواد و مصالح مورد استفاده در مقوله مقاوم‌سازی به کمک کامپوزیت‌ها، ارائه گردند.

در این بولتن، در جاهایی اعداد و مقادیری ارائه شده (برحسب آیین نامه اروپا) که دور آنها یک کادر بسته مشاهده می شود. مفهوم این کادر این است که این احتمال وجود دارد که این مقادیر در آینده دستخوش تغییر و تجدید نظر قرار گیرند.

فصل دوم: مواد مقاوم کننده (FRP) و تکنیک های مربوطه

در این فصل اطلاعات کلی را در مورد مواد FRP که برای مقاوم سازی سازه های بتنی مورد استفاده قرار می گیرند و تکنیک ها و روشهای استفاده آنها و همچنین آخرین متدهای استفاده از FRP بعنوان لایه مقاوم کننده خارجی که بروی سطوح بتنی چسبانیده می شود ارائه می نماییم. بعداً در فصل هشتم جزئیات بیشتری را در مورد نکات اجرایی بیان خواهیم کرد.

1-2 مواد و مصالح مربوط به مقاوم سازی به کمک FRP

1-1-2: کلیات

انتخاب مواد مناسب برای مقاوم سازی های گوناگون، یک گام حیاتی و بسیار مهم است هر سیستمی برای مقاوم سازی دارای شرایط منحصر بفرد برای عملکرد منسوج به کار گرفته شده و رزین آن می باشد این یعنی اینکه نوع رزینی که در یک سیستم مقاوم سازی به کار گرفته می شود بصورت خودکار برای یک سیستم دیگر مناسب نخواهد بود. علاوه بر این هر نوع رزینی لزوماً چسبندگی لازم با بتن را فراهم نمی آورد. این موضوع مشخص می کند که تنها سیستم هایی که در ابعاد و مقیاسهای واقعی بروی سازه های بتن مسلح، آزمایش و بررسی شده اند، می بایست برای مقاوم سازی به کمک FRP به کار گرفته شوند.

امروزه انواع متعددی از سیستم های مقاوم سازی با FRP وجود دارند که بصورت زیر خلاصه می شوند:

- سیستم های wet lay-up
- سیستم های پیش ساخته
- سیستم های ویژه ای همانند روکش کردن خودکار، پیش تنیدگی و غیره

این سیستمها متناسب با تولیدکنندگان و عرضه کنندهای مختلف، شکلهای و ترکیبات متفاوت، نوع منسوج، ماده چسبانیده و غیره می باشد. همچنین سودمندی و تاثیر هر کدام از این سیستمها بستگی به نوع سازه ای دارد که قرار است مقاوم سازی شود. برای مثال نوارهای از پیش ساخته عموماً بهترین گزینه برای سطوح صاف می باشند روش روکش کردن اتوماتیک می تواند در جاهایی که تعداد زیادی ستون در یک زمان مقاوم سازی می شوند، گزینه مناسب باشد. نکات اجرایی و عملی همانند تمیز کردن سطوح و درجه حرارت مناسب هم برای رسیدن به چسبندگی خوب، بسیار حائز اهمیت می باشند. سطوح کثیف هرگز به چسبندگی مناسب نمی رسند.

مواد چسباننده یک سری مراحل شیمیایی را تا مرحله سخت شدن نهایی پشت سر می گذارند که نیازمند به درجه حرارت بالای 10 درجه سانتیگراد برای آغاز سخت شدگی دارند. اگر درجه حرارت افت کند، سخت شدن با تاخیر همراه بود در ادامه سه مقوله اصلی با عناوین: چسبها، رزین ها و منسوج در سیستم مقاوم سازی با کمک FRP، بصورت خلاصه مورد بحث قرار می گیرد.

2-1-2: چسبها

دلیل استفاده از چسب، بوجود آوردن انتقال ایجاد نیروی برشی بین سطوح بتنی و مواد کامپوزیت تقویت کننده می‌باشد. دانش چسب و چسبندگی یک مفهوم مبتنی بر چندین پایه و جزء می‌باشد و موضوعاتی از علم شیمی، شیمی پلیمرها تحلیل تنشها و مکانیک شکست را شامل می‌گردد. هدف ما در اینجا پرداختن جزئی به این موضوعات نمی‌باشد. فقط منظور این است که اطلاعات اساسی و کلیدی در ارتباط با چسبها و مواد مربوط به استفاده از آنها می‌بایست توسط سازنده سیستم مقاوم‌سازی فراهم گردد. ما در اینجا تنها به انواع بسیار متداولی از چسبهای سازه‌ای که چسبهای اپوکسی نامیده می‌شوند اشاره می‌کنیم. این چسبها از ترکیب یک رزین اپوکسی (پلیمر) با یک سخت کننده بدست می‌آیند. متناسب با نیازهای اجرایی، این چسب ممکن است شامل پر کننده‌ها، مواد روان کننده، مواد سخت کننده یا زورگیر و غیره باشد. کاربرد موفقیت آمیز یک سیستم چسباننده اپوکسی نیازمند فراهم آوردن شرایط کافی و مناسب می‌باشد. این شرایط شامل مواد و اجزا تشکیل دهنده چسب، دمای مخلوط کردن و نیز دما و تکنیک به کار بردن آن، دمای عمل آوری، شرایط آماده‌سازی سطح، ضریب انبساط سطحی، مشخصات خیز عضو بتنی و سایش و مقاومت شیمیایی آن می‌باشد هنگام به کار بردن چسبهای اپوکسی دو مفهوم زمانی متفاوت باید در ملاحظات آورده شود. اولی زمان گیرش و بازه زمانی دیگر زمان آزاد می باشد. زمان گیرش زمانی است که پس از مخلوط کردن رزین و سخت کننده چسب، سفت شدن و گرفتن چسب در ظرف مخلوط آغاز می‌گردد. برای یک چسب اپوکسی این زمان ممکن است از چند ثانیه تا چند سال متغیر باشد. زمان آزاد هم مدتی است که شخص پس از استفاده از چسب بین قطعات که باید به هم چسبانیده شوند، قبل از وصل شدن آنها به یکدیگر زمان دارد. پارامتر مهم دیگری که باید ملاحظه شود دمای مدت زمان سفت و سخت شدن چسب می‌باشد. این دما با T_g نشان داده می شود. اغلب چسبهای ترکیبی، پایه پلیمری دارند و خصوصیتی که از خود نشان می‌دهند ناشی از پلیمرهای به کار گرفته شده در آنهاست. پلیمرها در یک دمای معین از حالت نسبتاً سخت، الاستیک، شیشه مانند به موادی کششان و الاستیک مانند تغییر حالت می‌دهند. این دما دمای گذر از حالت شیشه مانند، نامیده می‌شود و برای هر نوع پلیمری متفاوت می باشد.

چسبهای اپوکسی به عنوان عامل گیرش و چسباندن در کاربردهای مهندسی عمران، نسبت به سایر پلیمرها مزایای متعددی دارند (Hollaway & Leeming 1999) :

- فعالیت سطحی بالا و خصوصیات نم داری مناسب برای گستره وسیعی از مواد
- قابلیت تغییر فرمولاسیون آنها برای بدست آوردن زمان آزاد (opentime) طولانی
- قدرت چسبندگی بالا، ممکن است شکست اتصال در اثر مقاومت طرفین اتصال بوجود آید.
- قابلیت سخت شدن از طریق به هم خوردن حالت لاستیکی و کشا نی
- بدلیل عدم وجود پیامدهای جنبی در فعل و انفعالات مرحله عمل آوری، افت و انقباض به حداقل رسیده و این امکان را فراهم می‌آورد که قطعات بزرگ فقط با فشار تماسی به هم بچسبند
- افت و انقباض پایین در قیاس با پلی استر، اکریلیک‌ها و ونیل‌ها.
- خیز کم و مقاومت بالای نگهداری و ابقاء تحت بارهای ممتد و ادامه دار
- می‌توان آنها را برای استفاده در سطوح قائم بصورت thixotropic تهیه کرد.

- قابلیت انطباق با خطوط اتصال ضخیم یا نامنظم.

در جدول 2-1 (Mays & Hutchinson) مشخصات نمادین لازم برای عمل آوری سرد چسبهای اپوکسی مورد استفاده در مهندسی ساختمان ارائه شده است. به جهت مقایسه مشخصات مشابهی برای بتن و فولاد نرمه نیز در جدول آورده شده است.

Property (at 20 °C)	Cold-curing epoxy adhesive	Concrete	Mild steel
Density (kg/m ³)	1100 – 1700	2350	7800
Young's modulus (GPa)	0.5 - 20	20 - 50	205
Shear modulus (GPa)	0.2 – 8	8 - 21	80
Poisson's ratio	0.3 – 0.4	0.2	0.3
Tensile strength (MPa)	9 - 30	1 - 4	200 - 600
Shear strength (MPa)	10 - 30	2 - 5	200 - 600
Compressive strength (MPa)	55 - 110	25 - 150	200 - 600
Tensile strain at break (%)	0.5-5	0.015	25
Approximate fracture energy (Jm ⁻²)	200-1000	100	10 ⁵ -10 ⁶
Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /°C)	25 - 100	11 - 13	10 - 15
Water absorption: 7 days - 25 °C (% w/w)	0.1-3	5	0
Glass transition temperature (°C)	45 - 80	---	---

3-2-1 منابع:

منابع مورد استفاده برای رزین در کامپوزیت‌های سازه‌ای می‌تواند از نوع گرماسخت و یا از نوع گرمانرم باشند که البته اولی بیشتر متداول بوده است. عملکرد ماتریس‌ها محافظت از منسوج بکار رفته در مقابل خوردگی محیط یا ساییدگی می‌باشند و نیز منسوج و الیاف مقاوم کننده را محصور کرده و آنرا حفاظت می‌کند علاوه بر این نقش دیگر آن پخش بارهای وارده می‌باشد. این مواد نقش بسیار مهمی در خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها دارند همانند دمای ذوب و عمل آوری، ویسکوزیته و فعل و انفعالات شیمیایی که اینها در مراحل نصب و بکار بردن کامپوزیت‌ها بسیار مهم و موثر هستند بنابراین انتخاب مناسب و صحیح مواد ماتریسی برای یک سیستم کامپوزیت نیازمند در نظر گرفتن تمام این موارد می‌گردد. (Agarwal & Broutman 1990)

رزین‌های اپوکسی، پلی استر و وینیل استر از متداول‌ترین مواد پلیمری هستند که برای منسوج و تارهای تقویت کننده با قابلیت زیاد، مورد استفاده قرار می‌گیرند در کل، اپوکسی‌ها خصوصیات مکانیکی بهتری نسبت به پلی استرها و وینیل استرها دارند و همچنین با دوام‌تر از آن دو هستند.

4-2-1-4 منسوج (الیاف)

اغلب مواد در فرم و شکل تار و الیاف بسیار قوی‌تر و سخت از حالتی هستند که در حالت عادی به صورت یکجا وجود دارند. نسبت بالای حالت الیافی نسبت طول به قطر رشته‌ها، امکان خیلی موثر انتقال بار به تمام الیاف از طریق مواد ماتریسی بکار برده شده را فراهم می‌آورد و به این ترتیب از تمام مزایای شکل و فرم الیاف‌ها استفاده شده است. بنابراین الیاف‌ها مصالح تقویت کننده بسیار جالب توجه و موثری هستند. این امکان فراهم است که الیاف مذکور به صورت پیوسته و یا منقطع تولید شوند اما تنها الیاف به صورت پیوسته مورد توجه هستند. قطر این الیاف در حدود 5 تا 20 میکرومتر می‌باشند و می‌توان آنها را بصورت یک جهته یا دو جهت تولید نمود. این الیاف تا مرحله

گسیختگی از خود رفتار الاستیک خطی نشان می‌دهند و همانند فولاد مرحله ورود به حالت پلاستیک ندارند. عموماً سه گروه عمده از الیاف هستند که برای مقاوم سازی در مهندسی ساختمان بکار گرفته می‌شوند که عبارتند از شیشه، آرامید و کربن. باید توجه نمود که هر کدام از این سه دسته دارای خصوصیات خاص خود می‌باشند. الیاف شیشه به عنوان الیاف بکار گرفته شده برای مقاوم سازی، خود به سه دسته الیاف E-glass، S-glass و الیاف ضد قلیایی AR-glass تقسیم بندی می‌گردند. الیاف E-glass که مقادیر زیادی اسید بوریک و آلومینات در خود دارند، مقاومت پایینی در برابر محیط‌های قلیایی دارند. الیاف S-glass مقاومت و سختی بیشتری نسبت به E-glass دارند اما آنها هم در برابر مواد قلیایی مقاوم نمی‌باشند. برای محافظت از خوردگی در برابر مواد قلیایی موجود در سیمان، مقدار قابل ملاحظه‌ای zircon به الیاف اضافه می‌گردد. چنین الیافی، خصوصیات مکانیکی مشابهی با الیاف نوع E-glass دارند. یکی از ویژگی‌های مهم الیاف شیشه هزینه پایین آنهاست. الیاف آرامید (Aramid) اولین بار در سال 1971 تولید شدند و امروزه توسط تولید کنندگان متعددی با مارک‌های متنوع تجاری عرضه می‌شوند. ساختار الیاف آرامید غیر ایزوتروپ (anisotropic) می‌باشد و مقاومت و مدول بالاتری را در جهت طول تارها از خود ارائه می‌دهد. قطر الیاف آرامید در حدود 12 میکرومتر می‌باشد. رفتار این الیاف، در کشش الاستیک می‌باشد و در فشار هم غیر الاستیک و شکل پذیر می‌باشند. همچنین از نظر خستگی و طاقت و تلورانس خطر مشخصات خوبی دارند. الیاف کربن که معمولاً بر اساس قیر (Pitch) یا PAN به دست می‌آیند. الیاف قیر به کمک مواد پتروشیمی پالایش شده و یا زغال قیر (Coal pitch) که از یک منفذ نازک عبور داده می‌شود و با حرارت پایدار می‌شود، تولید می‌شوند. الیاف PAN از پلی اکریلو نیتریل (Poly acrylonitrile) بدست می‌آیند که در طی سوختن کربن ایجاد می‌شوند. قطر الیاف قیر تقریباً 9 تا 18 میکرومتر و نوع PAN در حدود 5 تا 8 میکرومتر می‌باشد. ساختار این الیاف کربن با توجه به جهت قرار گیری کریستال‌های آن، متغیر می‌باشد. هر چه درجه کربنی (Carbonation degree) بالاتر باشد، درجه همسویی کریستال‌ها (Orientation degree) و صلبیت بدلیل بالا رفتن میزان کریستال‌ها همسو، بیشتر خواهد بود. تارهای کربنی بر پایه قیر خصوصیات عمومی از خود نشان می‌دهند و نسبت مقاومت به مدول الاستیسیته بالایی دارند. الیاف کربنی نوع PAN مصالحی با مقاومت و مدول الاستیسیته بالا ارائه می‌دهند خصوصیات کلی انواع مختلف الیاف های فوق‌الذکر در جدول 2-2 ارائه شده است. توجه کنید که مقادیر ارائه شده در این جدول تنها مقاومت استاتیک الیاف در حالت غیر سرباز (unexposed) ارائه شده است و برای طراحی باید مقادیری مد نظر قرار گیرد که وجود رزین، کاهش مقاومت در اثر بارگذاری طولانی مدت، اثرات در معرض محیط قرار گرفتن و غیره در آنها لحاظ شده باشند. (البته چنین کاهش‌هایی در مقاومت به طول معمول توسط تولید کنندگان مشخص می‌گردد)

Material	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate tensile strain (%)
Carbon			
High strength	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Ultra high strength	215-235	3500-6000	1.5-2.3
High modulus	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Ultra high modulus	500-700	2100-2400	0.2-0.4
Glass			
E	70	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.5
Aramid			
Low modulus	70-80	3500-4100	4.3-5.0
High modulus	115-130	3500-4000	2.5-3.5

جدول 2-2

2-1-5 مصالح FRP

مصالح FRP مشتمل بر تعداد زیادی الیاف کوچک، پیوسته، جهت داده شده غیر فلزی که در یک رزین قرار گرفته است می باشد. بسته به نوع الیاف که آنها را AFRP (الیاف بر پایه آرامید)، CFRP (الیاف بر پایه کربن) و GFRP (الیاف بر پایه شیشه) می نامند. بصورت نرمال، حجم الیاف بکار رفته در کامپوزیت FRP اگر بصورت پیش ساخته باشد حدود 50 تا 70٪ و اگر بصورت منسوج باشد 25 تا 35٪ می باشد. بنابراین الیاف بکار رفته نقش اساسی را در تحمل تنش بر عهده دارند و رزین بکار رفته تنش را بین تارهای مختلف پخش می کند و آنها را در کنار هم نگه می دارد.

ردیف	A_{fib}	A_m	A_{frp}		t_{frp}	t_{fib}	D	W	f_{frp}	f_{fib}	E_{frp}	E_{fib}	ε_{frp}	ε_{fib}	k_{frp}	P_{frp}
	سطح مقطع الیاف mm ²	سطح مقطع ماتریس mm ²	سطح مقطع کامپوزیت mm ²	درصد حجم الیاف %	ضخامت کامپوزیت mm	ضخامت الیاف mm	دانسیته الیاف kg/m ³	وزن واحد متر مربع الیاف kg/m ²	تنش شکست کامپوزیت MPa	تنش شکست الیاف MPa	مدول الاستیسیته کامپوزیت GPa	مدول الاستیسیته الیاف GPa	کرنش شکست کامپوزیت %	کرنش شکست الیاف %	سختی $t_{frp} \times E_{frp} = k_{frp}$ kN/mm	نیرو در واحد طول کامپوزیت $t_{frp} \times f_{frp} = P_{frp}$ kN/mm
1	300	0	300	100	0/3	0/3	1/7	510	4000	4000	220	220	1/84	1/84	66	1/20
2	300	300	600	50	0/6	0/3	1/7	510	2040	4000	111/5	220	1/84	1/84	66	1/22
3	300	700	1000	30	1	0/3	1/7	510	1256	4000	68	220	1/84	1/84	66	1/25
4	700	300	100	70	1	0/7	1/7	1200	2824	4000	155	220	1/84	1/84	155	2/82
5	1000	500	150	66	1/5	1	1/7	1700	2667	4000	146/2	220	1/84	1/84	220	4

سه سیستم اشاره شده 1، 2 و 3 نمایانگر سیستم پیچیدن تر می‌باشند. برای این سیستم سطح مقطع خالص با استفاده از سطح مقطع معلوم الیاف، بدون در نظر FRP گرفتن عرض و ضخامت کامپوزیت در نظر گرفته می‌شود. با مقایسه سه سیستم 1، 2 و 3 مشخص می‌گردد که مقاومت، سختی و کرنش شکست کامپوزیت برای هر سه نوع یکسان می‌باشد بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که مقدار رزین در خصوصیات نهایی کامپوزیت تاثیری ندارد یعنی با افزایش ضخامت کامپوزیت به دلیل افزایش رزین مشخصات مکانیکی کامپوزیت تغییر نمی‌یابد. سیستم‌های اشاره شده 4 و 5 دارای کاربردی به عنوان سیستم پیش سخت شده می‌باشد در این سیستم افزایش ضخامت نهایی کامپوزیت به دلیل افزایش در سطح مقطع الیاف می‌باشد بنابراین این نوع سیستم دارای مقاومت و سختی بیشتری به دلیل افزایش سطح مقطع الیاف می‌باشد.

$$\frac{P_{frp(5)}}{P_{frp(1)}} = \frac{k_{frp(5)}}{k_{frp(1)}} = \frac{A_{frp(5)}}{A_{frp(1)}} = \frac{W(5)}{W(1)} = \frac{t_{frp(5)}}{t_{frp(1)}} = 3.33$$

می‌توان این مشخصات را به صورت ساده شده و با در نظر گرفتن " اصل ترکیبات " یعنی "rule of mixture" بصورت زیر نوشت:

$$E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m V_m \quad \text{رابطه 2-1}$$

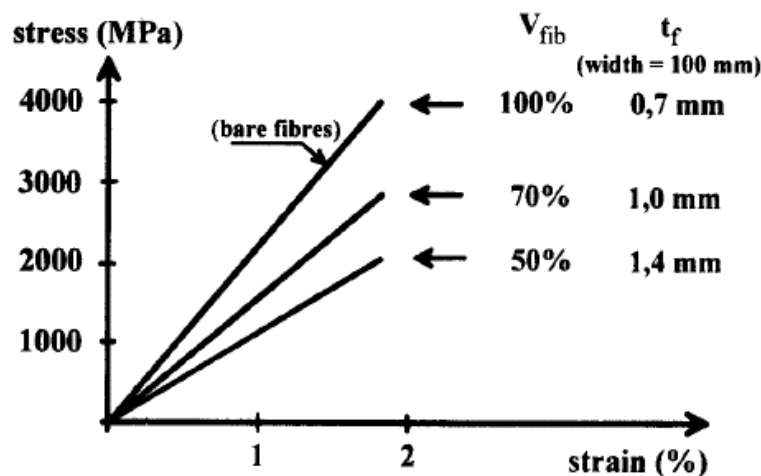
$$f_f = f_{fib} \cdot V_{fib} + f_m V_m \quad \text{رابطه 2-2}$$

در این روابط E_f مدول یانگ مصالح FRP در راستای الیاف می‌باشد. E_{fib} و E_m به ترتیب مدول یانگ الیاف و رزین به کار رفته (matrix) می‌باشند. V_m ، V_{fib} هم به ترتیب مقدار کسر نسبی الیاف و رزین در مصالح FRP می‌باشند. F_f مقاومت کششی الیاف و رزین به کار رفته می‌باشند توجه کنید که در این روابط باید $V_{fib} + V_m = 1$ باشد. همچنین در حالت کلی مقدار نسبی الیاف در FRP پیش ساخته در حدود 0.5-0.65 است. البته با توجه به اینکه " اصل ترکیبات " یک قاعده تقریبی برای بدست آوردن مشخصات مصالح می‌باشد برای پیدا کردن دقیق‌تر رفتار تنش - کرنش این مصالح می‌بایست آزمایش کششی بروی آنها انجام گیرد. موارد متعددی در رفتار مصالح FRP نقش دارند که در ملاحظات دقیق‌تر و ریزتر باید مورد توجه قرار گیرند از آن جمله می‌توان به قطر الیاف، میزان موازی بودن و جهت قرارگیری آنها (البته در مقیاس میکروسکوپی)، ایرادات و صدمات وارد شده به الیاف در جریان تولید، نسبت حجمی به کار رفته در مصالح و اندرکنش الیاف و رزین (matrix) اشاره نمود. در جدول زیر مشخصات مکانیکی انواع تجاری FRP تهیه شده به صورت پیش ساخته، ارائه شده است. جهت مقایسه مشخصات فولاد نرمه هم در جدول آورده شده است.

Material	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate tensile strain (%)
<i>Prefabricated strips</i>	E_f	f_f	ϵ_{fu}
Low modulus CFRP strips	170	2800	1.6
High modulus CFRP strips	300	1300	0.5
Mild steel	200	400	25*

در حالت پیش ساخته که بصورت آماده خریداری می‌شوند، مشخصات مصالح مربوط به سطح مقطع عرضی که می‌توان در محاسبات مدنظر قرار داد، معمولاً توسط تولید کنندگان عرضه می‌شود. اما در حالتی که آماده سازی مصالح FRP در محل صورت می‌گیرد، ضخامت لایه FRP و همچنین کسر نسبی مقدار الیاف که جهت تهیه FRP مصرف شده ممکن است تغییر کند و به همین دلیل محاسبات بر اساس مشخصات FRP (الیاف و ماده ماتریکس) و ضخامت واقعی لایه آن دقیق نمی‌شود. باید توجه کرد گاهی تولید کنندگان مشخصاتی را ارائه می‌دهند که بر اساس خواص الیاف خام (بدون افزودن ماتریکس) می‌باشد. بنابراین وقتی شخصی می‌خواهد مشخصات فنی سیستم‌های مختلف FRP را با یکدیگر مقایسه کند باید به این نکته توجه کند که اعداد ارائه شده با توجه به چه شرایطی محاسبه شده‌اند.

با توجه به این واقعیت که سختی و مقاومت الیاف به کار رفته (E_{fib}, f_{fib}) بسیار بزرگتر از سختی و مقاومت رزین (E_m, f_m) می‌باشد بنابراین بیشتر تحت‌الشعاع خصوصیات الیاف و سطح مقطع الیاف خام می‌باشند. در هنگام مقایسه مشخصات فنی مصالح FRP بر مبنای سطح مقطع، با همان مشخصات برای الیاف خام، مشخص می‌شود که مقاومت و سختی FRP کاهش یافته است. دلیل این امر این است که وقتی مبنای مقایسه بر اساس سطح مقطع باشد، آشکار است که بخشی از سطح مقطع FRP را رزین تشکیل داده و این کاهش ظاهری مقاومت نسبت به الیاف خام به این دلیل می‌باشد. بنابراین کسر نسبی مقدار الیاف در کل سطح مقطع FRP اهمیت زیادی در مشخصات فنی FRP دارد که باید در محاسبات لحاظ شود. این مورد در جدول 2-4 و شکل 2-1 بیان شده است. در مقابل یک مقدار ثابت الیاف (سطح مقطع = 70mm^2) بار متناظر شکست و کرنش مصالح FRP در این مرحله تفاوت اندکی به هنگام افزایش مقدار رزین در حجم کل مصالح FRP، پیدا خواهد کرد. البته در مشخصات FRP که باید در محاسبات مدنظر قرار داده شوند (بر مبنای سطح مقطع) تفاوت زیادی بوجود خواهد آمد.



مثال بالا نشان می‌دهد که برای مقایسه مصالح FRP این کافی نیست که تنها مقادیر مقاومت و یا دیاگرام تنش - کرنش مدنظر قرار داده شود. بلکه مهم است بدانیم که ترکیب اجزاء تشکیل دهنده FRP که مشخصات آنرا می‌دانیم، چگونه می‌باشد. در مواردی که در مورد ضخامت لایه FRP عدم اطمینان وجود دارد (مثلاً اگر در محل کار، تهیه شده باشد) شاید راحت‌تر باشد که مبنای محاسبات بر پایه خصوصیات الیاف به کار رفته و سطح مقطع الیاف باشد تا بر مبنای خصوصیات کل سیستم. همانگونه که بیان شد در سیستم‌های FRP که در محل اجرا، تهیه و آماده می‌شوند ممکن است مبنای محاسبات برای بدست آوردن مشخصات FRP، تنها مشخصات الیاف خام باشد. در این حالت از ترم دوم در معادلات 2-1 و 2-2 صرف‌نظر می‌گردد و مقدار V_{fib} یعنی کسر نسبی مقدار الیاف باید برابر 1 قرار داده شود و سطح مقطع هم برابر سطح مقطع الیاف در نظر گرفته شود. اگر از این روش در محاسبات استفاده شود آنگاه لازم می‌باشد که نتایج بدست آمده را در ضریب کاهش r ضرب کنیم چنین ضریبی باید بر اساس آزمایش توسط تهیه کننده مصالح FRP، ارائه گردد. راه دیگر این است که با کمک آزمایش در محل اجرا، مشخصات دقیق (ضخامت، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی) تعیین گردد. به

این ترتیب ما فرض می‌کنیم که یک ورقه FRP دارای ضخامت اسمی t_{fib} و مدول الاستیسیته E_{fib} می‌باشد (که هر دو بر اساس مشخصات الیاف خام می‌باشد) پس از آغشته کردن الیاف با ماتریکس و تهیه FRP، ضخامت t_f و مدول الاستیسیته هم E_f خواهد شد که این حالت با رابطه زیر مرتبط هستند:

$$t_{fib} \cdot E_{fib} \cdot r = t_f \cdot E_f$$

2-2 سیستم‌های FRP EBR

سیستم‌های گوناگون مقاوم‌کننده برون چسب FRP (به اختصار FRP EBR) بوجود آمده‌اند که هر کدام با توجه به مواد و اجزای تشکیل دهنده، شکل و روش گوناگونی برای مقاوم‌سازی با FRP دارند. در کل می‌توان آنها را به دو زیر مجموعه ساخت و عمل‌آوری شده در محل Wet lay up و سیستم "از پیش ساخته شده" Prefab تقسیم بندی کرد. در ادامه مروری بروی این سیستم‌ها خواهیم داشت (ACI 1996). روشها و تکنیک مقاوم‌سازی با FRP در بخش 3-2 ارائه خواهد شد.

1-2-2 سیستم‌های Wet lay-up (سیستم‌های چسباندن تر)

الیاف خشک که در یک جهت کنار هم بصورت یک ورقه یا صفحه در آمده‌اند و یا منسوج بافته شده از این الیاف که در یک جهت قرار گرفته‌اند، تمام یا قسمتی از عضو سازه را می‌پوشانند برای نصب و قرار دادن این الیاف بروی اعضای بتنی معمولاً ابتدا یک لایه آستر از رزین بر روی بتن بکار می‌رود بعد الیاف چسبانیده شده بروی عضو، با رزین آغشته می‌شوند. برای استفاده از منسوج تهیه شده دو روش متفاوت می‌توان به کار برد:

- ابتدا رزین بصورت یکنواخت بروی سطح آمده شده بتن قرار گیرد سپس بافته‌ها بروی رزین چسبانیده شود.

- ابتدا بافته‌ها در دستگاه آغشته کننده، کاملاً با رزین اشباع شود و به صورت خیس بروی سطح پرداخت شده بتن چسبانیده شود.

بافته‌های با الیاف چند جهته که الیاف آن حداقل در دو جهت قرار گرفته‌اند برای به کار بردن این بافته‌ها می‌توان به یکی از دو روش بالا عمل کرد.

• ورقه‌ها یا منسوج یک جهته که از قبل با رزین آغشته شده ولی عمل‌آوری نشده است. در این ورقه‌ها یا منسوج، الیاف در یک جهت قرار گرفته‌اند. به کار بردن آنها می‌تواند همراه و یا بدون افزودن رزین صورت پذیرد.

• ورقه‌ها یا منسوج چند جهته که از قبل با رزین آغشته شده ولی عمل‌آوری نشده. در این سیستم، الیاف در دو راستا قرار گرفته‌اند. به کار بردن آنها می‌تواند همراه و یا بدون افزودن رزین اضافه، صورت گیرد.

• دسته‌هایی از الیاف که پیچ و تاب نخورده‌اند و بصورت پیوسته هستند، به صورت مکانیکی دور عضو بتنی پیچانده می‌شوند و همزمان با این عمل، رزین بر روی الیاف قرار می‌گیرد.

• دسته‌هایی از الیاف که از پیش به رزین آغشته شده‌اند و به صورت مکانیکی دور عضو بتنی پیچانده می‌شوند این عمل نیز می‌تواند همراه با افزودن رزین اضافی صورت پذیرد.

2-2-2 اعضای پیش ساخته

• نوارهای آماده شده و عمل آوری شده FRP که بوسیله چسب بروی سطح چسبانیده می‌شوند. اغلب آنها بشکل نوارهای کم عرض و باریک بصورت رول می‌باشند این نوارها معمولاً دارای روکش نیز می‌باشد. تولیدات پیش ساخته که می‌تواند به اشکال ورقه‌ای، غلاف مانند و یا زاویه دار باشد و با کمک چسب بروی قسمتهای مورد نظر چسبانیده می‌شوند این تولیدات معمولاً بصورت جداگانه و مجزا از کارخانه عرضه می‌شوند و می‌توان آنها را برای به کار بردن دور ستونها و یا سایر اعضا، میزان کرد.

3-2 روش‌ها و تکنیک‌های مقاوم‌سازی با FRP

تکنیک پایه مقاوم‌سازی با FRP که در طیف گسترده‌ای به کار می‌رود، هم روش چسباندن دستی (hand lay-up) و هم استفاده از نوارهای تولید شده در کارخانه است که این نوارها را با عمل آوری سرد ماده چسباننده، بر روی سطح کار می‌چسبانند. نکته‌ای که در این جا وجود دارد این است که راستای نوارهای FRP و یا الیافی که به کمک رزین در محل به کامپوزیت FRP تبدیل می‌شوند باید تا حدی که امکان اجرایی وجود دارد، در جهت محور اصلی تنشهای کششی عضو باشد.

1-3-2: روش‌های ویژه

در کنار روش پایه، روش‌های دیگری نیز بوجود آمده‌اند. بدون اینکه قصد داشته باشیم نگاه کامل و جزیی بر این تکنیک‌های ویژه بیاندازیم، تعدادی از آنها به صورت خلاصه در بخشهای بعدی معرفی می‌شوند.

برخی از این روشها با همان نام شرکتی که آنها ابداع کرده، شناخته می‌شوند.

1-3-1-2 روش‌های غلاف اتوماتیک

تکنیک مقاوم‌سازی با FRP به طریقه پیچیدن اتوماتیک نوار یا الیاف دور اعضا اولین بار در اوایل دهه 90 در ژاپن و سپس در آمریکا رواج یافت. این تکنیک به این صورت می‌باشد که الیاف خیس، تحت یک زاویه جزیی، به کمک روبات دور ستونها و یا سایر اعضا پیچیده می‌شود در ژاپن حتی این کار به روی دودکشها هم انجام شده است. مزیت کلیدی و مهم این تکنیک، جدا از کنترل کیفیت خوب، سرعت در اجراء می‌باشد.

2-3-1-2 FRP پیش تنیده

در بعضی حالات، استفاده از حالت پیش تنیدگی برای مقاوم‌سازی اعضای بتنی با مقاوم کننده برون چسب FRP، مفید می‌باشد. هم بررسی‌های آزمایشگاهی و هم نتایج عملی (Triantafillou 1992) (Deuring 1993) نشان داده است که پیش تنیده کردن لایه FRP تاثیر مثبت بر تکنیک مقاوم‌سازی با FRP دارد و این روش به شرایط پیش تنیدن در طول مدت استفاده توسعه پیدا کرده است (Luke et al. 1998)

پیش تنیده کردن نوارهای FRP قبل از چسباندن آنها مزایایی دارد که عبارتند از:

- به دلیل اینکه عضو بتنی محکمتر و سخت تر محصور می‌شود بیشتر در فشار جانبی قرار می‌گیرد، در نتیجه لنگر مقاوم مقطع افزایش می‌یابد.
- ایجاد ترک‌های برشی را به تاخیر می‌اندازد و در زمانی که این ترک‌ها ظاهر می‌شوند آنها بیشتر به صورت ترک‌های ریز و تنگ خواهند بود.

- در اعضایی که از قبل ترک خورده بودند، ترک‌ها را می‌بندد.
 - به خاطر کاهش دادن ترک خوردگی عضو بتنی، سرویس دهی و دوام آنها را بالا می‌برد.
 - مقاومت برشی و خمشی عضو را افزایش می‌دهد. زیرا میزان ترک خوردگی کاهش یافته و سطح مقطع بیشتری در برش و خمش کار می‌کند.
 - اگر این نوارهای FRP به صورت پیش تنیده استفاده شوند می‌توان با استفاده از مساحت کمتر نسبت به نوارهای غیر پیش تنیده، همان مقدار مقاوم‌سازی کرد.
 - با وجود مهار کافی، پیش تنیدگی امکان افزایش مقدار نهایی لنگر مقاوم مقطع را فراهم می‌آورد. این افزایش به این دلیل است که از شکل‌گیری حالت‌های شکست همراه با کنده شدن و ور آمدن در محل ترک‌ها و انتهای نوارهای چسبانده شده جلوگیری می‌کند.
 - پایین تر رفتن تار خنثی مقطع نسبت به حالتی که نوارهای غیر پیش تنیده استفاده شده است که این باعث افزایش ظرفیت خمشی عضو می‌گردد.
 - پیش تنیدگی نوارهای FRP به صورت محسوس باعث افزایش میزان باری می‌شود که در آن بار، فولاد داخل مقطع شروع به تسلیم شدن می‌نماید.
- البته پیش تنیده کردن نوارها معایبی هم دارد که عبارتند از :
- هزینه بالاتر نسبت به حالت عادی زیرا به نیروی کار و دستگاه‌های بیشتری نیاز می‌باشد.
 - مدت زمان اجراء طولانی تر می‌گردد.
 - دستگاه‌های مورد نیاز برای فشردن این نوارها بر سطح زیرین تیرها می‌بایست تا زمان گیرش چسب، در محل باقی بمانند.
- وقتی نیروی پیش تنیدگی خیلی زیاد باشد، شکست تیرهای بتنی به دلیل افزایش یافتن تنش‌های برشی در دو انتهای آنها، در دو سر تیر و در بالای لایه FRP رخ می‌دهد بنابراین طراحی و ساخت ناحیه انتهایی تیر نیازمند دقت ویژه خواهد شد. آزمایش‌ها و بررسی‌ها نشان می‌دهند اگر هیچ عامل مهار کننده خاصی در دو انتها بکار نرود، نوارهای پیش تنیده FRP که نیروی پیش تنیدگی آنها تنها در حدود 5 تا 6٪ مقاومت کششی آنها می‌باشد (در مورد CFRP) از دو انتها کنده خواهند شد. اما از نظر اقتصادی مقدار منطقی پیش تنیدگی نوارها باید در حدود 50٪ مقاومت کششی آنها باشد که در این صورت حتماً لازم است از مهار کننده ویژه برای نگهداری دو انتهای نوارها استفاده نمود. چنین روشی در عمل اجرا شده و با نتایج بررسی‌ها همخوانی دارد.
- پیش تنیدن روکش‌های FRP برای ستون‌ها یا باید از طریق ایجاد کشش اولیه در زمان پیچیدن الیاف دور ستون صورت پذیرد و یا اینکه روکش‌های غیر پیش تنیده را با تزریق اپوکسی تحت فشار بالا و یا ملات دیگر مورد استفاده قرار دهیم.

3-1-2-3 نوارهای کشیده شده به روی هم Fusion-bonded pin-load از دیگر روش‌های جالب برای مقاوم‌سازی با FRP می‌باشد، جایگزین کردن یک لایه نسبتاً ضخیم FRP با چندین لایه نازکتر که بر هم فشار وارد می‌کنند این موضوع در شکل‌های 2-6a و 2-6b ملاحظه می‌گردد. (Winistoerfer & Mottram 1997) در این سیستم نوارهای نازک تشکیل شده از الیاف پیوسته در رزین ترموپلاستیک به

صورت چندین لایه یکی پس از دیگری به روی عضو مورد نظر کشیده می‌شوند بدین ترتیب به دلیل نیروهای بوجود آمده در بین مرز مشترک لایه‌ها که مخالف جهت هم می‌باشند می‌توان اثرات ثانویه تنش‌های ناشی از خمش را روی لایه‌ها کاهش داد. کنترل دقیق کشش اولیه که به هر لایه در حین قرار گرفتن بروی لایه قبلی داده می‌شود، اجازه می‌دهد تمرکز تنش‌های برشی بین لایه‌ها کاهش یافته و پخش کرنش به صورت یکنواخت در تمام لایه‌ها صورت پذیرد.

4-1-3-2 عمل آوری سریع در محل اجرا به کمک ابزار حرارتی

به جای عمل آوری سرد سطوح چسبنده (عمل آوری در دمای محیط) می‌توانیم از ابزارهای حرارتی استفاده کنیم. در این روش، زمان عمل آوری کاهش می‌یابد و به این ترتیب در محیط‌هایی که دما پایین است و عمل آوری با سرعت خیلی کم صورت می‌گیرد مثلاً در فصل زمستان، می‌توان مقاومت‌سازی را انجام داد.

سیستم‌های مختلفی برای حرارت دادن لایه‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد مانند گرم‌کننده‌های الکتریکی، سیستم‌های حرارتی IR و یا حرارت دادن با پوشش‌های حرارتی. برای سیستم‌های CFRP، روشی دیگر را، هم می‌توان به کار برد. این سیستم از خصوصیت رسانایی الیاف کربن سود برده است. به این ترتیب که با عبور جریان الکتریکی از مسیر لایه CFRP در حین عمل مقاوم‌سازی و استفاده از یک گرمکن ویژه (المنت) حرارت دهی صورت می‌پذیرد. واحد کنترل کننده دما اجازه می‌دهد که دمای مورد نیاز عمل آوری در طول مدت اجرا ثابت نگاه داشته شود.

این روش علاوه بر سرعت دادن به اجرا (عمل آوری کامل در دمای 70 درجه سانتیگراد در 3 ساعت امکان پذیر می‌شود) همچنین باعث افزایش دمای مرحله Tg می‌شود.

5-1-3-2 شکل‌های از پیش ساخته

این نوع از سیستم‌های FRP EBR اغلب به صورت نوارهای صاف به کار می‌روند اگرچه امکان تولید شکل‌های دیگر هم وجود دارد. با تغییر شکل دادن به این سیستم‌ها در مرحله تولید می‌توان آنها را در نقاطی که به دلیل موقعیت و شکل خاص از سیستم غیر پیش ساخته یعنی آماده سازی در محیط (wet lay-up) استفاده می‌شود، هم به کار برد. برای تقویت مقاوم سازی برشی تیرها می‌توان از سیستم پیش ساخته به شکل نبشی یا کنج (angles) استفاده کرد برای این منظور، غلاف‌های آماده شده باید از نظر اختلاف ابعاد نسبت به ابعاد ستون، اختلاف کمی داشته باشند. برای ساخت سازه‌های جدید هم ممکن است همانند قالب‌بندی در حین ساخت و یا مقاوم‌سازی با عناصر خارجی یک عضو تحت بارگذاری قالب‌هایی از FRP به کار رود.

6-1-3-2 CFRP داخل شکاف‌ها

استفاده از CFRP داخل شکاف‌های بتن را می‌توان یک روش ویژه برای تکمیل مقاوم‌سازی بتن در سازه‌ها به حساب آورد. در این روش شکاف‌ها با عمقی کمتر از مقدار پوشش بتن (Cover) بروی عضو بتنی ایجاد می‌شود و بعد نوارهای CFRP به ضخامت 2 میلیمتر و عرض 20 میلیمتر به داخل این شکاف‌ها چسبانده می‌شود (شکل 9-2) برای مطالعه چگونگی رفتار این سیستم آزمایشاتی برای چسبندگی و همچنین آزمایشاتی بروی تیرها صورت گرفته است (Blaschko & Zilch 1999)

مشخص شده است که با این روش ظرفیت مهاری بالاتری نسبت به حالتی که نوار CFRP بروی سطح بتن چسبانده شده است، بدست می‌آید. رفتار عضو هم تحت بارهای سرویس سخت‌تر اما شکل‌پذیری آن در حد نهایی، بالاتر بوده است. در تیرهایی که به این صورت مقاوم‌سازی می‌شوند اگر قدرت تحمل قسمت فشاری بتن کافی باشد و نیز تیر در مقابل برش تحمل کافی داشته باشد، نیروی کششی بوجود آمده در ناحیه کششی می‌تواند به حد مقاومت کششی CFRP برسد. چسبندگی بهتر، مقاومت و شکل‌پذیری بالاتر اجازه می‌دهد که در صورت ترک‌خوردگی، و آمدن لایه CFRP رخ ندهد. بنابراین به این روش می‌توان نسبت به حالتی که نوارهای CFRP بروی سطح چسبانیده می‌شوند، به صورت موثرتری از این مصالح تقویتی استفاده کرد.

7-1-3-2 اشباع سازی FRP به کمک خلاء

این روش در صنایع پلاستیک کاملاً معمول می‌باشد. این روش اشباع سازی به نوعی با آماده‌سازی در محل اجرای مصالح FRP (wet lay-up) قابل مقایسه می‌باشد. سطح عضو بتنی که قرار است تقویت شود به همان روش‌هایی که برای این کار وجود داشت (همچون سند بلاست یا واتر بلاست) آماده سازی می‌شود. پس از اینکه سطح کاملاً آماده شد، یک لایه آستر بروی سطح زده می‌شود و پس از عمل‌آوری این لایه، الیاف‌ها در جهت از پیش مشخص شده بروی سطح قرار داده می‌شوند. نکته حائز اهمیت در اینجا این است که نحوه قرار گرفتن الیاف‌ها بروی سطح باید به گونه‌ای باشد که مابین آنها کانالها یا شیارهایی جهت جریان پیدا کردن رزین در راستای طولی الیاف‌ها، تعبیه گردد. در غیر اینصورت، باید از مواردی که این فضا را ایجاد می‌کنند استفاده شود. سپس یک محفظه بروی الیاف‌ها قرار داده می‌شود که نقش این محفظه ایجاد حالت مکندگی و خلاء در محیط الیاف‌ها می‌باشد حال در یک انتهای محفظه، ظرف محتوی اپوکسی به آن متصل می‌گردد و از انتهای دیگر این محفظه مسیری جهت خروج هوای مکیده شده و نیز ظرفی جهت جمع‌آوری اپوکسی که ممکن است مقداری از آن همراه با هوای مکیده شده به خارج محفظه، بیرون آمده باشد تعبیه می‌گردد. (Taljsten & Elfgrén 2000) جهت رسیدن به فشار مطلوب می‌بایست از مواد درزگیر ویژه در لبه‌های محفظه جهت مکش، در سطح تماس با بتن، استفاده کرد. این روش نسبت به روش قدیمی آماده‌سازی در محیط یعنی (wet lay-up) مزیت‌هایی دارد. اول اینکه تماس دست با مواد چسبنده و رزین‌ها، حذف می‌شود و دیگر از این بابت اتلاف وقت در کارگاه به حداقل خواهد رسید. علاوه بر آن کیفیت مصالح مرکب تولید شده هم بهتر می‌شود. هر چند این روش مشکلاتی هم دارد مثلاً اینکه رسیدن به فشار بالا در محفظه مکش نیازمند ابزار و وسایل دقیق و پرداخت و آماده‌سازی خوب سطح بتن می‌باشد. و اینکه در اشکال هندسی پیچیده و یا موقعیتهای خاص، استفاده از این روش خیلی دشوار و یا غیر ممکن خواهد شد. همچنین هزینه مقاوم‌سازی بالاتر می‌رود. در این روش از نوع اپوکسی با ویسکوزیته پایین و عمل‌آوری سرد استفاده می‌شود.

فصل سوم : اساس طراحی و مفهوم ایمنی

1-3: اساس طراحی

1-1-3 : ضروریات کلی

مقاوم‌سازی سازه های بتنی به کمک FRP EBR یک روش کارآمد بوده که بر پایه عملکرد کامپوزیت بین یک عضو بتنی مسلح شده و FRP چسبیده به صورت خارجی می باشد. جهت تضمین ایمنی سازه لازم است که از یک سیستم FRP مناسب استفاده شده و این سیستم به دقت طراحی و اجرا گردد. حالت و شرایط عضو قبل از مقاوم‌سازی مهم می‌باشد چرا که ممکن است سازه قبل از مقاوم‌سازی به یکسری عملیات برای ترمیم، نیاز داشته باشد. سیستمهای FRP EBR موجود براساس نوع FRP، نوع چسب، روش عمل آوری، خصوصیات مواد و غیره با یکدیگر تفاوت دارند. باید همواره دقت شود که سیستم FRP مناسب برای مقاوم‌سازی انتخاب گردد. استفاده از سیستمهای FRP که دارای کیفیت مناسب نیستند (از لحاظ مواد سازنده، نوع سیستم و اجرای آن) ایمنی سازه را به خطر خواهند انداخت. جهت اجتناب از این موضوع باید تولیدات، سیستمها و پرسنل اجرا به دقت کنترل شوند. پروسه کنترل کیفیت شامل بررسی روش تولید، طراحی، اجرا و رفتار در حالت سیستم خواهد بود. مهندس پروژه باید دارای تجربه کافی در طراحی ترمیم سازه ای بوده و با مواد تشکیل دهنده سیستمها، رفتار سازه ها و ایمنی آنها، آشنایی کافی داشته باشد.

2-1-3 : ضروریات طراحی

3-1-2-1 : کلیات

برای طراحی باید همه شرایط لازم و ترکیب بارهای مختلف مورد توجه قرارگیرد. همچنین باید حالت حدی مناسب انتخاب شود. طراحی FRP EBR دارای دو جنبه است، یکی بررسی اثرات تقویت کننده در مقطع (طراحی با فرض عملکرد کامل کامپوزیت) و دوم توانایی انتقال نیروها به وسیله اتصال بین دو لایه (تشخیص جداسازی) می باشد. همچنین باید قواعد مربوط به جزئیات و حالت‌های خاص مورد بررسی قرار گیرد. محاسبات طراحی براساس مدل‌های تئوری یا نیمه تجربی می باشد. پایه طراحی تقویت کننده های FRP، حالت سازه (ترمیم نشده) قبل از مقاوم‌سازی می باشد. در استفاده از سیستمهای FRP EBR باید آسیبهای ممکن مشخص شده و علت این نقایص معلوم گردد و در صورت لزوم باید ترمیم مناسب صورت گیرد. به علت کمبود خاصیت پلاستیسیته در FRP، به طور کلی توزیع ممان‌ها در قسمتهای تقویت شده از عضو بدرستی صورت نگرفته مگر اینکه محبوس شدگی کافی در بتن اعمال شده باشد که اجازه دهد تغییر شکلهای پلاستیک صورت گیرد. بنابراین در اعضای تقویت شده مانند ستونها و دیوارها، اثرات تغییر شکل خارج از صفحه (اثرات ثانوی) باید در طراحی مورد ملاحظه قرار گیرند.

2-2-1-3 : حالت‌های حدی و شرایط حدی

روند طراحی باید شامل بررسی هر دو حالت حدی سرویس (SLS) و نهایی (ULS) باشد. در بعضی موارد ممکن است انتظار رود که حالت حدی سرویس در طراحی حاکم باشد.

موقعیتها و شرایط زیر در طراحی مورد توجه قرار گرفته است :

- شرایط پایا که مربوط به استفاده معمولی از سازه است
- شرایط بحرانی و غیرمترقبه که مربوط به کاهشهای غیر پیش بینی نشده در FRP بوده و ممکن است ناشی از ضربه، خرابکاری و حریق باشد
- ملاحظات طراحی خاص (برای مثال تنشهای اتصال ناشی از اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی، اختلاف در مقاومت در برابر حریق و اختلاف در مقاومت در برابر ضربه)

3-2-1-3: بررسی و تحقیق SLS

در مقاومسازی یک عضو باید نشان داده شود که عضو یا سازه تقویت شده در حالت معمولی به خوبی کار خود را انجام دهد. جهت برآورده شدن این مطلب باید حالت حد سرویس برای معیارهای زیر مورد بررسی قرار گیرد :

- تنشها : طراحی باید به گونه ای انجام گیرد که از تسلیم فولاد، خرابی یا خزش بیش از حد بتن، خزش بیش از حد و یا گسیختگی FRP، اجتناب شود.
- تغییر شکلهای و خیزها : بروز تغییر شکلهای بیش از حد ممکن است باعث خرابی در اعضایی که در تحمل بار شرکت نمی کنند شده و یا اثر منفی در ظاهر سازه بگذارد، لذا مقدار تغییر شکلهای باید به همان مقدار ارائه شده در سازه های بدون تقویت، محدود گردد.
- ترک خوردگی (شامل ترک خوردگی در اتصال بین لایه ای) : عدم کنترل ترک خوردگی می تواند به دوام، عملکرد و ظاهر سازه آسیب رسانده و یا اینکه ممکن است یکپارچگی اتصال بین FRP و بتن را به خطر اندازد.

اگر طراحی مقاومسازی بر اساس بهبود خدمت پذیری صورت گیرد، SLS در طراحی حاکم خواهد بود. حتی اگر علت مقاومسازی براساس افزایش مقاومت سازه صورت گیرد، ممکن است SLS در طراحی حاکم باشد ؛ چراکه مواد FRP دارای مقاومت بالایی بوده و سطح مقطع کمی از آن برای ارضای ضوابط ULS کافی است اما با توجه به مدول الاستیسیته کم FRP ممکن است این سطح مقطع برای برآورده کردن ضوابط SLS کافی نباشد.

ترکیب بار لازم برای طراحی در حالت SLS در آیین نامه (CEN 1991) EC2 مشخص شده است. ضریب ایمنی مواد، γ_m ، به استثنای موارد خاص برابر 1.0 فرض می شود. برای بررسی و تحقیق SLS، رفتار تنش - کرنش FRP در فصل 1-3-1-1 تعیین شده است.

4-2-1-3: بررسی و تحقیق ULS

در حالت حدی نهایی باید همه گسیختگی های ممکن بررسی شود. حالات گسیختگی مختلف بر دو اصل می باشد، اول اینکه فرض شود عملکرد بین کامپوزیت و بتن تا آخر به طور کامل باقی بماند (اتصال کافی) ؛ دوم اینکه فرض شود، گسیختگی ناشی از یکی از حالت های جداشدگی است.

ترکیب بارها و ضرایب ایمنی (ضرایب بار γ_f و ضرایب مواد γ_m) در حالت حدی نهایی بر اساس آیین نامه (EC2 (CEN 1991) مشخص شده است، مگر آنکه برای حالت‌های خاص غیر از این تعیین شده باشد.

3-1-2-5 : شرایط و موقعیتهای غیرمترقبه

طراحی در شرایط و موقعیتهای غیرمترقبه باید براساس بررسی میزان کاهش در خصوصیات FRP ناشی از عوامل غیرمترقبه ای چون آتش سوزی، ضربه و خرابکاری صورت گیرد. در حالت حد نهایی باید از ضریب ایمنی 1.0 برای مواد استفاده نموده و از ضرایب ایمنی کاهنده و ضرایب ترکیب بار مندرج در آیین نامه (EuroCode 1 (EC1) (CEN 1994) استفاده نمود.

3-1-2-6 : ملاحظات ویژه طراحی

ممکن است در طراحی، ملاحظات ویژه ای ناشی از عواملی چون بارگذاری نوسانی، وجود تنشهای بالا در چسب ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین بتن و FRP، اختلاف مقاومت در برابر ضربه و آتش سوزی لازم باشد. این ملاحظات به طور زیادی وابسته به شرایط اجرایی کارگاه بوده و ممکن است روند طراحی و اجرا را تحت تاثیر قرار دهد. با توجه به سرفصل قبل ممکن است این ابهام پیش آید که بحث آتش سوزی و ضربه در قسمت موقعیتهای غیرمترقبه مورد بررسی قرار گرفت و اشاره به آن در این فصل ضرورتی ندارد. با کمی دقت ملاحظه می گردد که در قسمت قبل اثر حریق و ضربه در کاهش خصوصیات FRP بررسی شد در حالی که در این قسمت به اختلاف مقاومت اجزای سازه در برابر این حوادث و اثرات ناشی از آن پرداخته می شود. این اختلاف مقاومتها در شرایط مختلف قادر است که اثرات قابل توجهی را در ایمنی سازه بگذارد.

3-1-2-7 : دوام

شرایط محیطی باید از لحظه شروع طراحی مورد توجه قرار گرفته و اثر آنها در دوام سازه مورد بررسی قرار گیرند و در صورت لزوم از اقدامات حفاظتی استفاده شود.

3-1-3 : مدل‌های مواد سازنده و ضرایب ایمنی

برای بررسی طراحی، مدل‌های تنش - کرنش و ضرایب ایمنی مواد مربوطه γ_m ، در این فصل تعیین شده و ارائه می گردد. برای ضرایب ایمنی بار γ_f و ضرایب ترکیب بار ψ به آیین نامه های (EC1 (CEN 94 و (EC2 (CEN 91 مراجعه می گردد.

3-1-3-1 : بررسی SLS

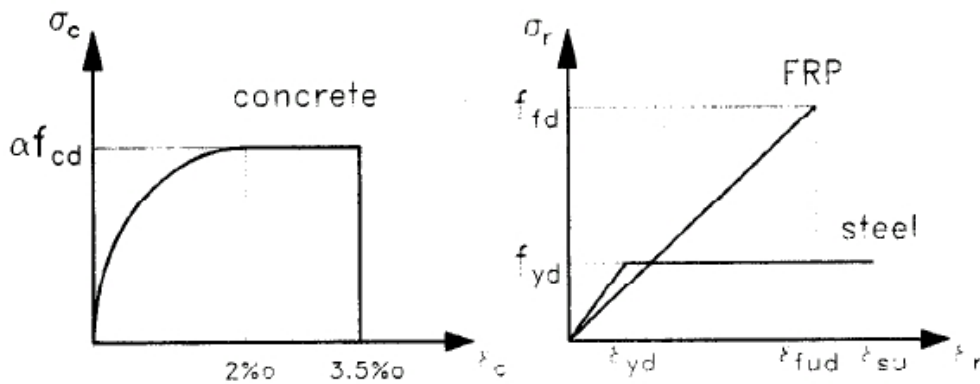
برای بررسی SLS، یک پاسخ تنش - کرنش خطی برای مواد سازنده در نظر گرفته شده و ضریب ایمنی γ_m برابر 1.0 فرض می گردد. رابطه تنش - کرنش در FRP به صورت زیر نشان داده می شود :

$$\sigma_f = E_{fk} \varepsilon_f \quad (1-1)$$

که در آن E_{fk} مقدار مشخصه مدول سکانت الاستیسیته می باشد. مقدار این مدول بین 10% تا 50% مدول نهایی FRP می باشد.

معمولا کمترین حد مقدار $E_{fk0.05}$ (5% شکست)، برای طراحی استفاده می شود. در بعضی تحقیقات که از یک E بالاتر با ضریب اعتماد کمتر استفاده می کنند، مقدار حد بالایی $E_{fk0.95}$ (95% شکست) را در روابط به کار می برند. هنگامی که E به عنوان یک متغیر اصلی در رابطه نیست، باید از مقدار متوسط، E_{fm} استفاده نمود.

3-1-3: بررسی ULS، با فرض عملکرد کامل کامپوزیت بین بتن و FRP
برای بررسی حالت حدی نهایی (ULS)، می توان به منحنی های تنش - کرنش شکل 1-1 مراجعه نمود.



شکل 1-1: منحنی تنش - کرنش مواد سازنده در حالت حدی نهایی

برای بتن در آغاز یک منحنی سهموی و در ادامه یک منحنی خطی با شیب صفر براساس EC2 فرض شده است. مقاومت طراحی بتن براساس مقدار مشخصه مقاومت فشاری f_{ck} ، ضریب ایمنی $\gamma_c = 1.5$ و ضریب کاهش $\alpha = 0.85$ جهت محاسبه مقاومت فشاری کاهش یافته تحت بارگذاری طولیل المدت از رابطه $\alpha f_{cd} = \alpha f_{ck} / \gamma_c$ تعیین می گردد. برای آرماتورهای فولادی، یک رابطه تنش - کرنش دوطبقی فرض شده است که دارای مقاومت تسلیم طراحی $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$ است. ضریب ایمنی مصالح γ_s برابر 1.15 فرض می شود. جزئیات بیشتر در منحنی های تنش - کرنش، مقادیر مشخصه و طراحی بتن و فولاد می تواند از آیین نامه EC2 (CEN 1991) بدست آید.

رفتار تنش - کرنش کششی FRP برای حالت حد نهایی می تواند به وسیله یک پاسخ خطی به صورت رابطه زیر و شکل 1-1 ارائه گردد.

$$\sigma_f = E_{fu} \varepsilon_f \leq f_{fd} \quad (2-1)$$

که در آن $E_{fu} = f_{fk} / \varepsilon_{fuk}$ ، مدول الاستیسیته در حالت نهایی براساس مقادیر مشخصه مقاومت کششی و کرنش نهایی FRP است. مقاومت مشخصه f_{fk} مربوط است به 5% شکست مقاومت کششی و ε_{fuk} مربوط به 5% شکست کرنش گسیختگی می باشد. باید دقت شود که مدول الاستیسیته E_{fu} معمولاً بزرگتر از مدول سکانت E_{fk} می باشد (زیرا الیافها که در ابتدا مرتب نشده اند، در بیشترین مقدار بار مرتب شده و در نتیجه سختی FRP افزایش می یابد). به هر حال مقدار E_{fu} نباید از $E_{fk0.05}$ کمتر گردد.

هنگامی که حالت حد سرویس حاکم باشد و یا حالت حد نهایی به واسطه خردشدگی بتن یا گسیختگی اتصال حاکم گردد، کرنش در FRP در نهایت محدودتر می گردد. تحت این شرایط تنش در FRP، σ_f ، به طور قابل ملاحظه ای کمتر از مقاومت کششی آن بوده و بنابراین به طور کلی مقاومت کششی در طراحی حاکم نخواهد بود. از این رو در این موارد که حالت حدی نهایی با گسیختگی کششی نهایی FRP تعیین می شود، مقاومت کششی طراحی با مراجعه به رابطه زیر تعیین خواهد شد.

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}} \quad (3-1)$$

مقادیر ضریب ایمنی مصالح FRP در جدول 1-1 آورده شده است. این مقادیر اساساً بر پایه اختلافات مشاهده شده در رفتار طولی‌المدت FRP (اصولاً وابسته به نوع الیافها) و همچنین بر پایه روش به کار رفته در استفاده از آنها می باشد. از آنجاییکه انتظار می رود کرنش نهایی مؤثر FRP، ε_{fue} ، به طور قابل ملاحظه ای با کرنش متوسط، ε_{fum} ، بدست آمده از آزمایش کشش تک محوری اختلاف نداشته باشد و با توجه به تغییرات کم محاسبه شده برای ضریب ایمنی مواد FRP، γ_f ، نسبت $\varepsilon_{fue}/\varepsilon_{fum}$ معمولاً برابر 1.0 فرض می گردد. با این وجود ممکن است در موارد خاص کرنش گسیختگی مؤثر، ε_{fue} ، به طور قابل توجهی کمتر بوده که می تواند نتیجه نصب FRP بر روی گوشه های تیز، استفاده از تعداد لایه های زیاد، حالت تنش چند محوری و غیره باشد. همچنین ممکن است مقدار محدود شده کرنش گسیختگی FRP به عنوان یک طراحی ساده شده جایگزین مورد ملاحظه قرار گیرد.

جدول 1-1: ضرایب ایمنی مواد FRP، γ_f

نوع کاربرد B	نوع کاربرد A	نوع FRP
1.35	1.20	CFRP
1.45	1.25	AFRP
1.50	1.30	GFRP

نوع کاربرد A: استفاده از سیستمهای FRP پیش ساخته تحت شرایط کنترل با کیفیت معمولی؛ استفاده از سیستمهای wet lay-up در صورتی که همه ضوابط لازم اجرا شده و کنترل بالایی در کیفیت شرایط کاربرد و پروسه کاربرد انجام گردد.

نوع کاربرد B: استفاده از سیستمهای wet lay-up تحت شرایط کنترل کیفیت معمولی و استفاده از هر نوع سیستم تحت شرایط کاری سخت کارگاه.

3-3-1-3: بررسی حالت حد نهایی در مورد گسیختگی اتصال

گسیختگی اتصال ممکن است به علت دلایل مختلفی که در فصل 2 به آن اشاره می شود باشد. با فرض کاربرد صحیح و نصب مناسب FRP و استفاده از مواد مناسب، گسیختگی اتصال معمولاً در بتن رخ خواهد داد. بررسی حالت حد نهایی در این مورد براساس مقاومت برشی یا کششی طراحی بتن با معرفی ضریب ایمنی ماده γ_{cb} خواهد بود. این ضریب مشابه با آیین نامه EC2 برابر 1.5 فرض می شود. در موارد خاص، مثلاً بتن با مقاومت بالا، مقاومت برشی چسب ممکن است کمتر از مقاومت برشی بتن باشد. در این مورد برای بررسی حالت حد نهایی، از مقاومت برشی یا کششی طراحی چسب با در نظر گرفتن یک ضریب ایمنی $\gamma_a = 1.5$ استفاده خواهد شد.

تنشهای کششی بالاتر از FRP منجر به نیروهای اتصال بالاتر خواهد شد. بنابراین بررسی و تحقیق گسیختگی اتصال باید به مقدار حد بالای مدول الاستیسیته مربوط شود که برابر ماکزیمم دو مقدار زیر خواهد بود:

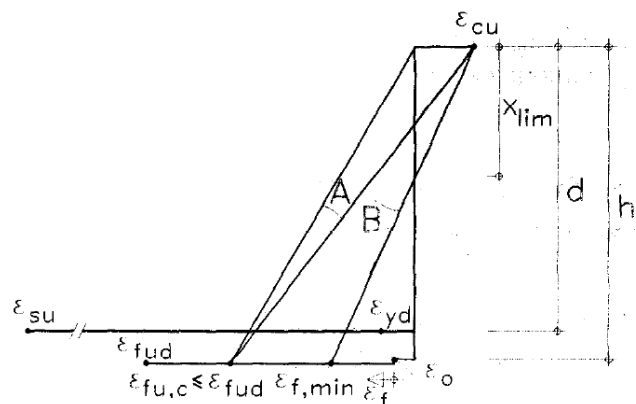
- مدول الاستیسیته نهایی، E_{fu} ، (اگر چه ممکن است که گسیختگی اتصال در کرنشی به طور قابل ملاحظه کمتر از کرنش نهایی رخ دهد).
- مقدار حد بالایی مشخصه مدول سکانت $E_{fk0.95}$.

3-2: مفهوم ایمنی

طراحی باید به گونه ای باشد که ایمنی کافی برای سازه فراهم گردد که می تواند شامل شکل پذیری کافی باشد.

3-2-1: مفهوم ایمنی با توجه به حالت حد نهایی

در حالت حد نهایی، مدلسازی باید به گونه ای باشد که مودهای مختلف گسیختگی ممکن را مورد توجه قرار دهد. طراحی باید به صورتی بوده که از گسیختگی های ترد مانند گسیختگی برشی و پیچشی جلوگیری شود. با وجود اینکه خرد شدگی بتن، پارگی FRP و گسیختگی اتصال به صورت ذاتی ترد می باشد؛ برای تضمین شکل پذیری گسیختگی کل عضو باید فولاد داخلی در حالت حد نهایی به اندازه کافی به تسلیم برسد. بنابراین مود گسیختگی حاکم از یک عضو خمشی یا به صورت تسلیم شدگی فولاد و خردشدگی بتن (قبل از پارگی یا جداشدگی FRP) مربوط به ناحیه B از شکل 1-2 بوده و یا به صورت تسلیم شدگی فولاد و گسیختگی FRP (پارگی FRP یا گسیختگی اتصال) مربوط به ناحیه A از شکل 1-2 خواهد بود. در شکل 1-2، ϵ_0 کرنش اولیه در دورترین تار کششی قبل از مقاوم سازی، $\epsilon_{f,min}$ حداقل کرنش مجاز FRP در حالت نهایی و $\epsilon_{fu,c}$ کرنش FRP در مقطع بحرانی در حالت نهایی می باشد. در حالتی که گسیختگی FRP مود حاکم است، $\epsilon_{fu,c}$ برابر مقدار طراحی کرنش نهایی FRP، $\epsilon_{fu,d}$ خواهد بود. در حالت گسیختگی ناشی از اتصال، $\epsilon_{fu,c}$ برابر کرنش FRP در مقطع بحرانی هنگامیکه جداشدگی رخ می دهد، می باشد. این جداشدگی ممکن است در محلی غیر از مقطع بحرانی آغاز شده که می تواند این موضوع برای بررسی ظرفیت خمشی مورد توجه قرارگیرد. گسیختگی اتصال به شرطی مجاز خواهد بود که رابطه $\epsilon_{fu,c} > \epsilon_{f,min}$ برآورده شود. بهینه ترین طراحی مربوط به حالتی است که خردشدگی بتن ($\epsilon_{cu} = 0.0035$) به طور همزمان با گسیختگی کششی FRP ($\epsilon_{fu,d}$) رخ دهد (شکل 1-2). برای اعضای خمشی اغلب SLS در طراحی حاکم خواهد بود (همانطور که در فصل 1-1-2-3 اشاره شد). این موضوع نشان دهنده این مطلب است که مقادیر بیشتر از FRP نسبت به مقدار مورد نیاز برای حالت حد نهایی، باید مورد استفاده قرار گیرد. عموماً این امر تاثیر مثبت بر نسبت بار نهایی به بار سرویس خواهد گذاشت. در همه موارد مقاوم سازی، باید بررسی گردد که ظرفیت برشی یا پیچشی عضو تقویت شده بزرگتر از نیروهای برشی یا پیچشی وارده هستند. در صورت نیاز، مقاوم سازی خمشی باید با مقاوم سازی برشی توأم گردد.



شکل 2-1: توزیع کرنش در حالت حد نهایی در مقطع بحرانی از اعضای خمشی تقویت شده برای اعضای کششی، طرح بهینه در حالت حد نهایی وابسته به گسیختگی FRP خواهد بود. گسیختگی اتصال به مقدار زیادی ظرفیت تحمل بار را در عضو کششی کاهش خواهد داد. در هر حالت، طرح باید به گونه ای باشد که با تسلیم شدگی کافی فولاد، شکل پذیری عضو را تضمین کند (فصل 1-3). برای اعضای فشاری، مقاوم سازی با حبس کردن عضو صورت می گیرد. این روش به طور قابل ملاحظه ای ایمنی سازه ها را افزایش می دهد، چراکه نتیجه محبوس کردن، افزایش شکل پذیری است.

2-2-3: مفهوم ایمنی با ملاحظه شرایط طراحی غیرمترقبه

بعضی اوقات FRP به عنوان یک تقویت کننده ثانوی مورد استفاده قرار می گیرد. تحت این شرایط عوامل غیرمترقبه تاثیر چندانی در عملکرد سازه نخواهند داشت و سازه موجود قادر است همه ترکیب بارهای مربوطه را تحمل کند.

با در نظر گرفتن شرایط غیرمترقبه، ایمنی سازه ماکزیمم شده و دیگر عواملی چون خرابکاری، آتش سوزی و ضربه در گسیختگی حاکم، از درجه اهمیت کمتری برخوردار خواهند بود. در هر حادثه، افزایش مقاومت عضو تقویت شده نه تنها به وسیله حالت حد نهایی بلکه ممکن است به وسیله حالت حد سرویس و ضروریات مربوط به شکل پذیری نیز محدود گردد.

3-3: شکل پذیری

عموما، شکل پذیری یک عضو مقاوم سازی شده به صورت خمشی یا کششی، نسبت به حالت قبل از تقویت کاهش می یابد. این حالت مخصوصا در گسیختگی های نابهنگام ناشی از جداشدگی اتصال و همچنین در مقاوم سازی های با درصد تقویت زیاد به واسطه کم بودن کرنش نهایی FRP و در نتیجه کوچک بودن تغییر شکلها و انحناها در لحظه شکست صورت می گیرد. برای تضمین شکل پذیری مناسب از اعضای تقویت شده به صورت خمشی، فولاد داخلی باید در لحظه گسیختگی به مقدار کافی تسلیم شده باشد، یعنی انحنا (یا خیز) باید در نهایت به اندازه کافی بزرگ باشد. با ملاحظه این مطلب، EC2 (CEN 1991) حدود زیر را برای عمق ناحیه فشاری در لحظه گسیختگی تعیین کرده است:

$$\begin{aligned} \xi &\leq 0.45 & \text{for concrete types C35/45 or lower} \\ \xi &\leq 0.35 & \text{for concrete types higher than C35/45} \end{aligned} \quad (4-1)$$

که در آن $\xi = x/d$ ، x عمق ناحیه فشاری و d عمق مؤثر تیر است.

براساس رابطه (1-4) و شکل 1-2، با کرنش نهایی بتن $\varepsilon_{cu} = 0.0035$ و $h/d \sim 1.1$ ضابطه زیر براساس کرنش مینیمم FRP در لحظه گسیختگی قابل ارائه است :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fu,c} &\geq 0.0050 - \varepsilon_0 && \text{for concrete types C35/45 or lower} \\ \varepsilon_{fu,c} &\geq 0.0075 - \varepsilon_0 && \text{for concrete types higher than C35/45} \end{aligned} \quad (5-1)$$

که در آن $\varepsilon_{fu,c}$ کرنش FRP در مقطع بحرانی در لحظه نهایی است. براساس کرنش مینیمم آرماتور فولادی داخلی در لحظه نهایی، رابطه (1-4) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{su,c} &\geq 0.0043 && \text{for concrete types C35/45 or lower} \\ \varepsilon_{su,c} &\geq 0.0065 && \text{for concrete types higher than C35/45} \end{aligned} \quad (6-1)$$

که در آن $\varepsilon_{su,c}$ کرنش فولاد در مقطع بحرانی در لحظه نهایی است. براساس فولاد از نوع S500 (یعنی فولاد با کرنش تسلیم $\varepsilon_{yk} = 0.0025$) کرنش فولاد $\varepsilon_{su,c}$ برابر خواهد بود با حداقل مقدار 1.7 و مقدار 2.6 برابر کرنش تسلیم. بنابراین حداقل شاخص انحناء شکل پذیری می تواند به طور تقریبی از دو رابطه زیر تعیین شود.

$$\begin{aligned} \delta_{x,min} &\approx 1.7 && \text{for steel S500 and concrete types C35/45 or lower} \\ \delta_{x,min} &\approx 2.6 && \text{for steel S500 and concrete types higher than C35/45} \end{aligned} \quad (7-1)$$

که در آن شاخص شکل پذیری، δ_x ، برابر است با نسبت انحناء در لحظه گسیختگی، (χ_u) ، به انحناء در لحظه تسلیم χ_y . برای اعضای کششی، کرنشها در لحظه نهایی باید شرایط تعیین شده در رابطه (3-6) را ارضاء نمایند.

مقدار فولاد داخلی باید حداقل تعیین شده در فصل 7 را برآورده کند به گونه ای که از گسیختگی ترد بعد از بروز اولین ترک حتی بدون وجود FRP، جلوگیری گردد. در نهایت می توان اشاره نمود که محبوس کردن عضو به صورت کامل، شکل پذیری را به طور قابل توجهی افزایش خواهد داد. اگر حالت حد سرویس در طراحی عضو مقاوم سازی شده به صورت خمشی یا کششی حاکم باشد، ممکن است مقدار FRP فراهم شده در سازه به طور قابل توجهی بیشتر از آنچه که برای ارضای حالت حد نهایی لازم است، باشد. در این وضعیت برآورده کردن ضوابط شکل پذیری با توجه به اینکه ضریب ایمنی بالایی بین بار سرویس (S) و بار مقاوم طراحی (R) وجود دارد، مشکل می باشد. لذا در مواردی که $R > 1.2S$ ، لازم نیست که شرایط شکل پذیری برآورده شود.

فصل چهارم : تقویت خمشی

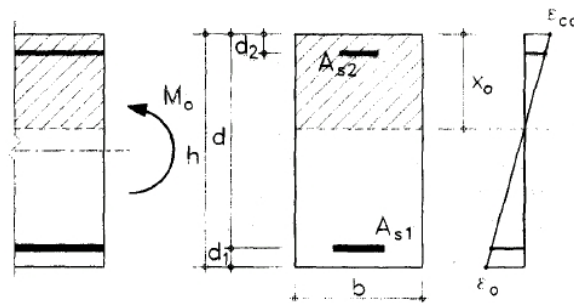
1-4 : کلیات

اعضای بتن آرمه، مانند تیرها و ستونها، ممکن است در خمش به وسیله استفاده از کامپوزیت‌های FRP که توسط اپوکسی به ناحیه کششی چسبیده اند و دارای الیاف‌های با راستای موازی با جهت تنش‌های کششی ماکزیمم (محور عضو) هستند، تقویت گردند. برای طراحی اعضای مقاوم‌سازی شده با FRP، می‌توان آنالیز حالت حد نهایی برای سازه های بتن آرمه را با ملاحظه دو حالت زیر دنبال نمود : 1) سهم تقویت کننده های FRP به طور مناسب محاسبه شود، 2) موضوع اتصال بین FRP و بتن مورد توجه قرار گیرد.

منحنی های ایده آل شده تنش - کرنش برای بتن، FRP و فولاد در شکل 1-1 نشان داده شد. این منحنی ها با توجه به فرض صرفنظر کردن لغزش بین بتن و FRP (این فرض برای اغلب چسبهای با ضخامت بین 1.0 تا 1.5 میلیمتر در حالت ویسکوالاستیک تایید شده است)، بر اساس آنالیزهای حالت حد مقاومت نهایی از اعضای بتنی تقویت شده در خمش می باشد. محور آنالیز این اعضا، تعیین همه موده‌های گسیختگی ممکن می باشد.

2-4 : شرایط اولیه

در محاسبات مربوط به مقاوم‌سازی یک عضو باید اثر بار اولیه قبل از تقویت مورد ملاحظه قرار گیرد. با داشتن ممان سرویس اعمال شده، M_0 ، بر مقطع بحرانی عضو بتن آرمه در طول مقاوم‌سازی (بدون اعمال ضریب ایمنی بار) و براساس تئوری الاستیسیته، توزیع کرنش عضو قابل تخمین است. همچنانکه M_0 عموماً بزرگتر از ممان ترک خوردگی، M_{cr} ، می باشد، محاسبات براساس مقطع ترک خورده صورت می گیرد (شکل 1-2). اگر M_0 کوچکتر از M_{cr} بود، اثر آن در محاسبات عضو تقویت شده به راحتی صرفنظر می گردد.



براساس مقطع ترک خورده معادل، عمق تار خنثی x_0 ، می تواند از حل رابطه زیر بدست آید.

$$\frac{1}{2} b x_0^2 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_0 - d_2) = \alpha_s A_{s1} (d - x_0) \quad (1-2)$$

که در آن $\alpha_s = E_s/E_c$ ، کرنش بتن ϵ_{co} ، در تار بالایی می تواند از رابطه زیر تعیین شود :

$$\epsilon_{co} = \frac{M_0 x_0}{E_c I_{c0}} \quad (2-2)$$

که در آن I_{c0} ممان اینرسی مقطع ترک خورده معادل می باشد و از رابطه زیر تعیین می گردد :

$$I_{c0} = \frac{bx_0^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_0)^2 \quad (3-2)$$

براساس سازگاری کرنشی، کرنش بتن ε_0 در دورترین تار کششی می تواند از رابطه زیر استخراج گردد :

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} \frac{h - x_0}{x_0} \quad (4-2)$$

این کرنش برابر است با کرنش اولیه محوری در محل FRP بر روی عضو تقویت نشده که برای ارزیابی عضو مقاوم سازی شده لازم می باشد.

3-4: مودهای گسیختگی - حالت حد نهایی

مودهای گسیختگی یک عضو بتن آرمه تقویت شده در خمش با تقویت کننده های FRP چسبیده به صورت خارجی، می تواند به دو دسته تقسیم شود : 1) حالتی که عملکرد بین بتن و FRP به طور کامل حفظ شده تا لحظه اینکه بتن در فشار خرد شده و یا FRP در کشش پاره گردد (این نمونه مودهای گسیختگی ممکن است به عنوان مودهای کلاسیکال شناخته شود) و 2) حالتی که عملکرد بین بتن و FRP قبل از رسیدن به حالت قبل دچار نقص شده و گسیخته گردد که ناشی از پدیده جداشدگی خواهد بود. توضیحات مختصری از هر یک از مودهای گسیختگی در زیر آورده شده است:

1-3-4: عملکرد کامل کامپوزیت

- فولاد تسلیم شده و بدنبال آن بتن خرد می گردد :
- 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.
- فولاد تسلیم شده و بدنبال آن FRP گسیخته می گردد :
- 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.
- خردشدگی بتن :

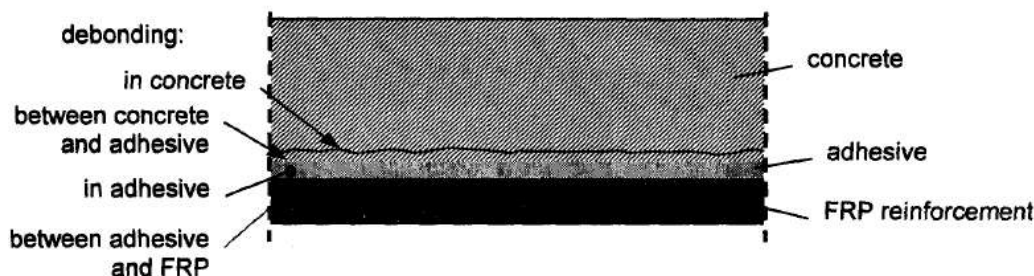
برای مواردی که مقدار تقویت کننده ها نسبتا زیاد می باشد، گسیختگی اعضای بتن آرمه ممکن است ناشی از خردشدگی فشاری بتن قبل از به تسلیم رسیدن فولاد باشد. این مود شکست ترد بوده و غیر مطلوب می باشد. FRP در این حالت، استفاده کمی داشته و باید به گونه ای موجب افزایش ظرفیت فشاری بتن گردد (مثلاً محبوس کردن)

2-3-4: عدم عملکرد کامل کامپوزیت

1-2-3-4: جداشدگی و مودهای گسیختگی اتصال FRP و بتن

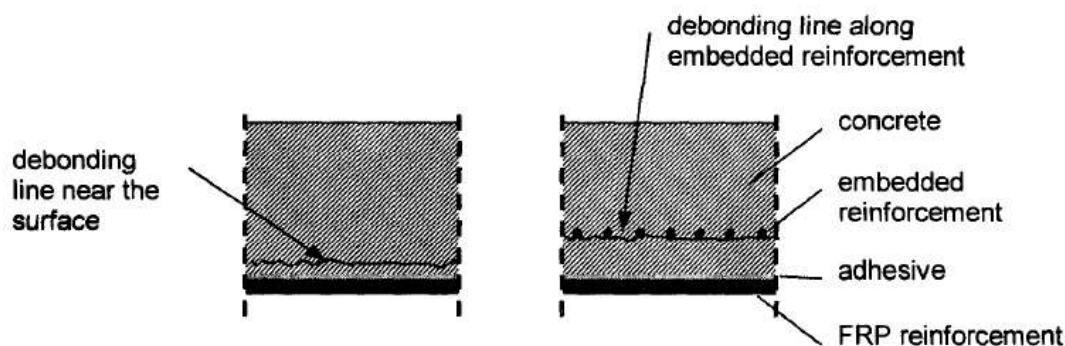
چسبندگی FRP به بتن باید به گونه ای باشد که نیروی بتن را به FRP منتقل نماید ؛ بنابراین حالتی گسیختگی اتصال که ممکن است رخ دهد، باید به دقت بررسی گردد. گسیختگی اتصال دلالت بر وجود نقص در عملکرد کامل کامپوزیت بین FRP و بستر بتنی دارد. به عبارت دیگر، جداشدگی

موضعی، یک گسیختگی موضعی در ناحیه اتصال بین بتن و FRP را می‌رساند. در این حالت کاهش در مقاومت چسبندگی بین بتن و تقویت کننده FRP محدود به یک سطح کوچک می‌شود. بنابراین جداشدگی موضعی خودش به تنهایی یک حالت گسیختگی نبوده بلکه مشخص کننده علت کاهش در ظرفیت تحمل بار عضو تقویت شده با FRP می‌باشد. هنگامی که جداشدگی موضعی گسترش می‌یابد، عملکرد کامپوزیت از دست می‌رود به گونه‌ای که تقویت کننده FRP دیگر قادر به تحمل بار نمی‌باشد، این حالت گسیختگی به نام جداشدگی (peeling - off) شناخته می‌شود. اگر هیچ توزیع تنشی در تقویت کننده های FRP و آرماتورهای داخلی ممکن نباشد، این جداشدگی به صورت یک جداشدگی 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 (شکل 2-2 ملاحظه گردد).



شکل 2-2: سطوح مختلف گسیختگی اتصال

- جداشدگی در بتن نزدیک سطح یا در راستای لایه ضعیف شده، برای مثال در راستای خط محل قرارگیری آرماتورهای فولادی داخلی (شکل 2-3).



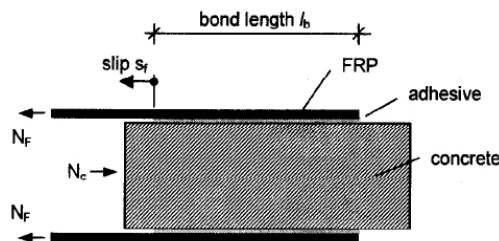
شکل 2-3: سطوح مختلف جداشدگی در بتن

- جداشدگی در چسب (گسیختگی خود چسب)
از آنجاییکه مقاومت برشی و کششی چسب (رزین اپوکسی) معمولاً بالاتر از مقاومت برشی و کششی بتن می‌باشد، عموماً 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 می‌شود. 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)

- جداسدگی در سطح بین بتن و چسب و یا بین چسب و FRP (گسیختگی چسبندگی)
به دلیل اینکه خود FRP یک ماده کامپوزیت می باشد، ممکن است جداسدگی در داخل FRP بین الیاف ها و رزین ها اتفاق افتد. این مکانیزم گسیختگی، براساس مکانیزمهای شکست بررسی شده زمانی رخ می دهد که انتشار و تکثیر ترکها در لایه FRP به انرژی کمتری نسبت به انتشار آنها در بتن نیاز داشته باشد، این گونه شکست اغلب در بتن های پر مقاومت ممکن است اتفاق بیافتد . با این حال، گسیختگی بین لایه ای با توجه به اینکه معمولا جداسدگی در بتن رخ می دهد، یک مود گسیختگی ثانوی بوده و عموما در طراحی لحاظ نمی گردد.

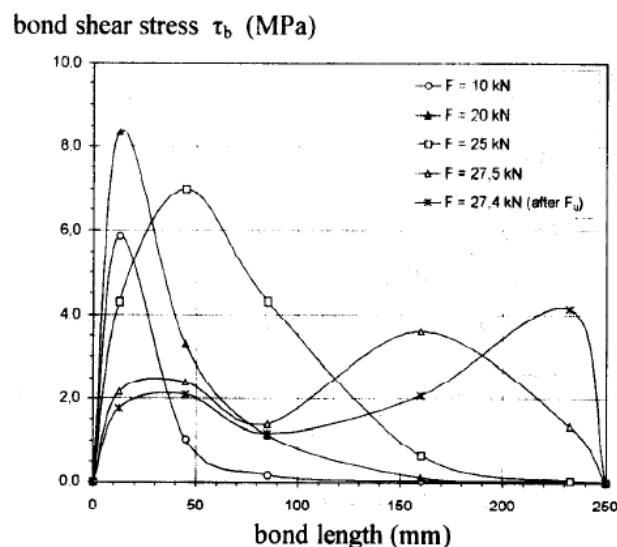
4-2-3-2: رفتار چسب

رفتار اتصال بین FRP و بتن در آزمایشهای چسبندگی مورد بررسی قرار گرفته و آنالیز می گردد که یکی از آنها برای نمونه در شکل 4-2 نشان داده شده است.



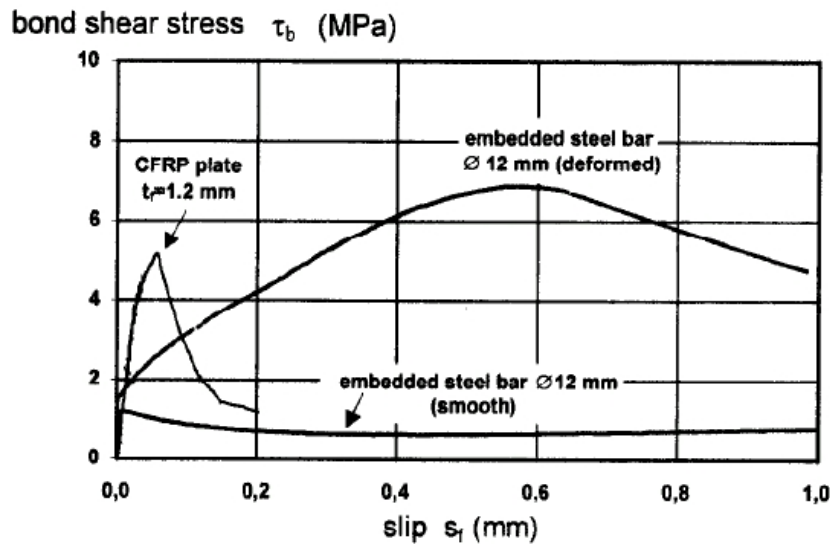
شکل 4-2: آزمایش اتصال ساده

در شکل 4-2 توزیع تنش برشی عمودی در طول اتصال برای مقادیر مختلف از بار برای یک صفحه CFRP با عرض 50 mm و ضخامت 1.2 mm، با طول اتصال 250 mm نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می شود، برای بارهای با مقدار کم، تنشهای برشی اساسا متمایل به انتهای نزدیک به بار هستند. اما همچنانکه بار افزایش می یابد، به سمت انتهایی که از بار دور است کشیده می شوند. بر خلاف آزمایش چسبندگی ساده، توزیع حقیقی تنش در محل اتصال عضو تقویت شده به صورت خمشی، از تنشهای نرمال عمود بر سطح اتصال که ناشی از اثر خمش هستند، تاثیر می پذیرد.

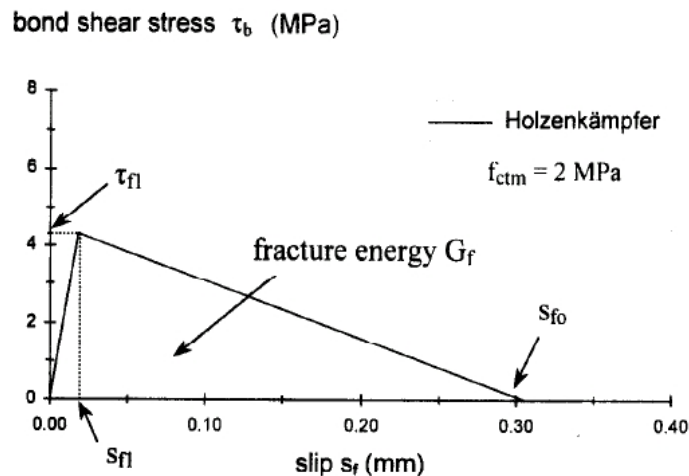


شکل 2-5: توزیع تنشهای برشی در راستای طول اتصال

رفتار اتصال بین بتن و تقویت کننده FRP می تواند با رابطه برش - لغزش مشخص شود. این رابطه براساس تغییرات تنش برشی موضعی بین بتن و تقویت کننده نسبت به جابجایی که به صورت لغزش بین دو ماده بروز می کند، نشان داده می شود. روابط برش - لغزش برای انواع تقویت کننده ها در شکل 2-6 نشان داده شده است. اتصال FRP در مقایسه با اتصال میلگردهای فولادی داخلی آجدار به بتن، بسیار سخت تر بوده اما ظرفیت کل بار اتصال آن بسیار کمتر می باشد (سطح زیر منحنی های شکل 2-6 معرف انرژی لازم برای شکست اتصال می باشد). تفاوت در خصوصیات اتصال بر توزیع نیروی کششی بین تقویت کننده های FRP و آرماتورهای فولادی داخلی تاثیر می گذارد. به منظور طراحی، رفتار برش - لغزش می تواند ساده سازی شده و براساس درجه های مختلف از ترکیب مدل گردد. برای مثال یک نمونه مدل در شکل 2-7 نشان داده شده است (مقاومت کششی بتن در این نمونه $f_{ctm} = 2 \text{ MPa}$ فرض شده است).



شکل 2-6: روابط تنش برشی - لغزش برای انواع مختلف از تقویت کننده ها



شکل 2-7: مدل ساده شده برای رابطه تنش برشی - لغزش FRP

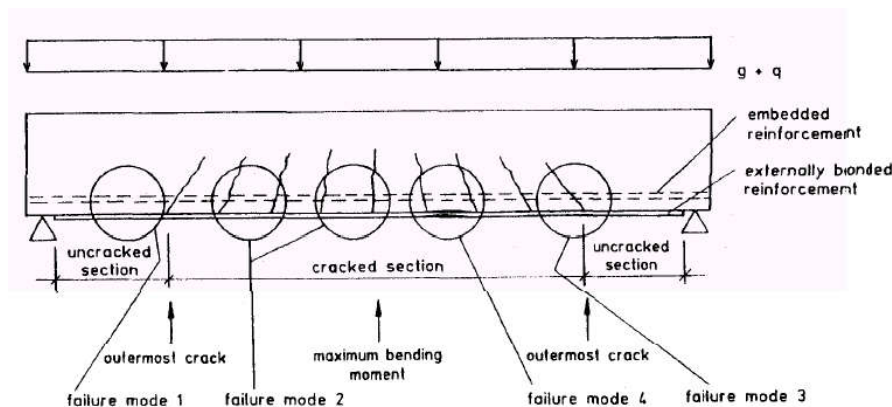
می توان از مدل های اتصال ارائه شده در بالا برای محاسبه نیروهای مهاري، تشکیل ترکها و غیره استفاده نمود.

3-2-3-4: رفتار اتصال اعضای بتن آرمه تقویت شده با FRP

بیشتر گسیختگی های مشاهده شده در آزمایشات اعضای خمشی بتن آرمه تقویت شده با FRP ناشی از جدایشگی FRP می باشد. همچنانکه در بالا توضیح داده شد، عضو ضعیف در اتصال بین بتن و FRP، بتن بوده که معمولاً در لایه ای نزدیک به سطح جدا می گردد. بنابراین باید در ادامه بر روی مودهای گسیختگی اتصال مربوط به سطح بتن متمرکز شد. بسته به نقطه شروع روند جدایشگی، مودهای گسیختگی زیر می تواند معرفی گردد (شکل 2-8).

- مود 1: جدایشگی در ناحیه فشاری ترک نخورده

ممکن است FRP در ناحیه مهاري ناشی از گسیختگی برشی چسب از بتن، جدا گردد.



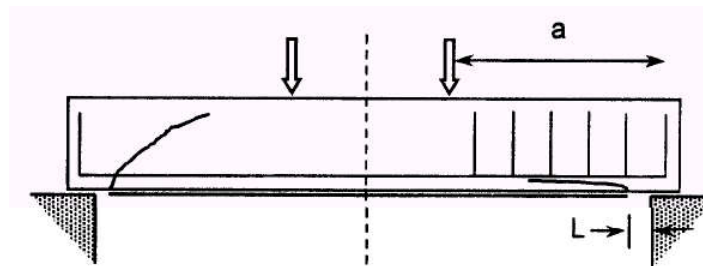
شکل 2-8: مودهای گسیختگی اتصال یک عضو بتنی تقویت شده با FRP

- مود 2: جدایشگی ناشی از ترکهای خمشی
ترکهای خمشی (عمودی) در بتن ممکن است به صورت افقی رشد کرده و در نتیجه موجب جدایشگی در FRP در ناحیه ای دور از قسمت مهاري گردد.
- مود 3: جدایشگی ناشی از ترکهای برشی
ترکهای برشی در بتن عموماً باعث بروز باز شدگی های افقی و عمودی می گردد دو لبه ترک خورده نسبت به یکدیگر جابجایی افقی و قائم دارند) که می تواند منجر به جدایشگی FRP گردد. با این وجود، در اعضای دارای آرماتورهای برشی داخلی کافی (یا تقویت کننده های خارجی کافی) مانند از بتن دالها، اثر بازشدگی ناشی از ترکهای عمودی، قابل صرف نظر کردن است.
- مود 4: جدایشگی ناشی از ناصافی در سطح بتن

وجود ناصافی و یا ناهموازی در سطح بتن می تواند باعث جداسازی موضعی FRP شده که ممکن است این جداسازی موضعی پخش شده و موجب جداسازی کلی گردد.

4-3-4: گسیختگی برشی انتهای FRP

آزمایشهای انجام شده توسط محققین نشان داده است که هنگامیکه صفحات چسبیده خارجی در یک فاصله خاص از تکیه گاه قطع می شوند (عموماً در کاربردهای مقاومسازی به این صورت است)، ممکن است یک ترک تقریباً عمودی از انتهای صفحه آغاز شده و سپس به صورت یک ترک برشی مورب رشد نماید (شکل 2-9 چپ). اما در صورت وجود خاموت‌های برشی به اندازه کافی، ترک برشی متوقف شده و صفحه چسبیده به بتن از محل آرماتورهای طولی به صورتی که در شکل 2-9 (راست) نشان داده شده است، جدا می شود. هر دو مکانیزم گسیختگی ذکر شده هنگامی فعال خواهد شد که ماکزیم تنش برشی نزدیک انتهای صفحه به مقدار بحرانش برسد. جزئیات بیشتر از مکانیزم گسیختگی های مذکور در فصل بعدی ارائه شده است.



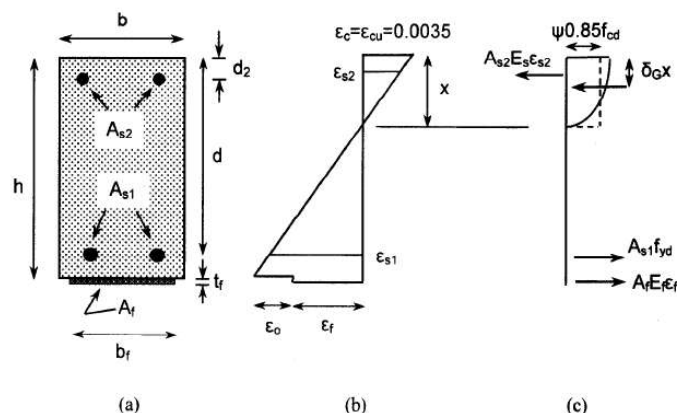
شکل 2-9: گسیختگی برشی انتهای صفحه FRP

4-4: آنالیز حالت حد نهایی

4-4-1: عملکرد کامل کامپوزیت

4-4-1-1: تسلیم شدگی فولاد و بدنبال آن خردشدگی بتن

براساس مود گسیختگی تسلیم شدگی فولاد و خردشدگی بتن، که مطلوبترین حالت است، گسیختگی سطح مقطع بحرانی با تسلیم شدن آرماتور فولاد کششی و بدنبال آن خردشدگی بتن رخ داده و FRP سالم خواهد ماند. ممان خمشی طراحی عضو تقویت شده براساس اصول طراحی بتن آرمه محاسبه می شود (شکل 2-1 ملاحظه گردد). در ابتدا عمق تار خنثی x ، از سازگاری کرنشی و تعادل نیروهای داخلی محاسبه شده و سپس ممان طراحی با برقراری رابطه تعادل بین ممان‌ها، بدست می آید. آنالیز باید برای حالتی انجام شود که فرض گردد عضو بتن آرمه در هنگام مقاومسازی تحت بارهای سرویس خود قرار می گیرد و بنابراین یک کرنش اولیه ϵ_0 در دورترین تار کششی باید مورد ملاحظه قرارگیرد (شکل 2-10).



شکل 2-10: آنالیز سطح مقطع برای حالت حد نهایی در خمش (a) هندسه (b) توزیع کرنش (c) توزیع تنش

ظرفیت ممان خمشی طراحی می تواند براساس روابط زیر محاسبه شود :

محاسبه عمق تار خنثی، x :

$$0.85\psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_fE_{fu}\varepsilon_f \quad (5-2)$$

که در آن $\psi = 0.8$ و

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x} \quad (E_s\varepsilon_{s2} \text{ not to exceed } f_{yd}) \quad (6-2)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \quad (7-2)$$

ظرفیت ممان خمشی طراحی برابر خواهد بود با :

$$M_{Rd} = A_{s1}f_{yd}(d - \delta_G x) + A_fE_f\varepsilon_f(h - \delta_G x) + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2}(\delta_G x - d_2) \quad (8-2)$$

که در آن $\delta_G = 0.4$ است.

برای روابط در نظر گرفته شده در بالا، حدهای زیر باید کنترل گردد :

1) تسلیم شدگی آرماتورهای فولادی کششی، 2) کرنش FRP محدود به کرنش نهایی آن شود (ε_{fud})

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (9-2)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} \quad (10-2)$$

4-4-2: تسلیم شدگی فولاد و بدنبال آن گسیختگی FRP

مود گسیختگی دربرگیرنده تسلیم شدگی فولاد و گسیختگی FRP از لحاظ تئوری ممکن می باشد. با این وجود، احتمال جداشدگی زود هنگام FRP قبل از پارگی FRP بسیار زیاد بوده و بنابراین این مکانیزم شکست قابل دستیابی نخواهد بود. در این حالت روابط (2-5) تا (2-8) با جایگزین کردن ε_c به جای ε_{cu} و ε_{fud} به جای ε_f و محاسبه ψ و δ_G از روابط زیر، قابل استفاده می باشد.

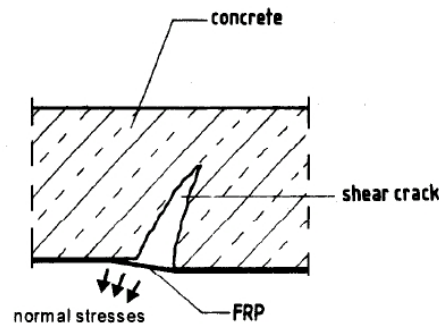
$$\psi = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left(0.5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \text{for } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} & \text{for } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (11-2)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & \text{for } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} & \text{for } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (12-2)$$

2-4-4: عدم عملکرد کامل کامپوزیت

1-2-4-4: جداسدگی ناشی از ترکهای برشی

ترکهای برشی در اعضای بتنی به صورت مایل بوده و مربوط به هر دو جابجایی باز شدگی افقی، w ، و عمودی، v ، بوده و اساساً ناشی از قفل شدگی سنگدانه ها و مکانیزم عمل پین شدگی (dowel) می باشد. شبیه به آنچه در فصل 3-2-3 در مورد آن بحث شد، جابجایی باز شدگی ترک افقی ممکن است باعث جداسدگی گردد. جابجایی باز شدگی ترکهای عمودی نیز به واسطه اعمال کشش مستقیم در لایه بتنی بین FRP و آرماتورهای فولادی داخلی می تواند باعث جداسدگی گردد (شکل 2-11). شروع جداسدگی در این حالت و یا عدم شروع آن (برای یک جابجایی باز شدگی ترک افقی مفروض) وابسته به تعدادی پارامتر می باشد که عبارتند از: (1) جابجایی باز شدگی ترک عمودی، (2) سختی برشی و خمشی FRP، (3) مقاومت کششی بتن.



شکل 2-11: جداسدگی ناشی از ترکهای برشی

جداسدگی ناشی از ترکهای برشی به صورت جزئیات کامل توسط تحقیقات جاری مشخص نشده است. مدل ارائه شده در سال 1993 شاید جامعترین مدل تاکنون بوده اما برای استفاده بسیار پیچیده می باشد. در مطالعات اخیر ارائه شده توسط Blaschko (1997) پیشنهاد شده است که جداسدگی در ترکهای برشی قابل پیشگیری است با محدود کردن عملکرد نیروی برشی به مقاومت برشی V_{Rd1} از عضو بتن آرمه بدون آرماتورهای برشی (روش EuroCode 2) با اصلاحات انجام شده برای مقاومت مشخصه برشی بتن، τ_{Rk} ، و نسبت تقویت کننده های طولی معادل، ρ_{eq} ، به صورت زیر:

$$\tau_{Rk} = 0.15 f_{ck}^{1/3} \quad (13-2)$$

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \frac{E_f}{E_s}}{bd} \quad (14-2)$$

در حالتی که ظرفیت برشی طراحی کمتر از مقدار مورد نیاز می شود، یک میانگین مناسب از مقاوم سازی برشی باید فراهم گردد. براساس نتایج تجربی (برای بتنهای C25/30 تا C30/37 و CFRP های پیش بافته شده و نصب شده به صورت wet lay-up) (Matthys (2000) مقدار مقاومت برشی و مقدار مشخصه مقاومت برشی را به صورت زیر اقتباس کرده است.

$$\tau_{RP} = 0.38 + 151\rho_{eq} (MPa)$$

$$V_{RP} = \tau_{RP} \cdot bd$$

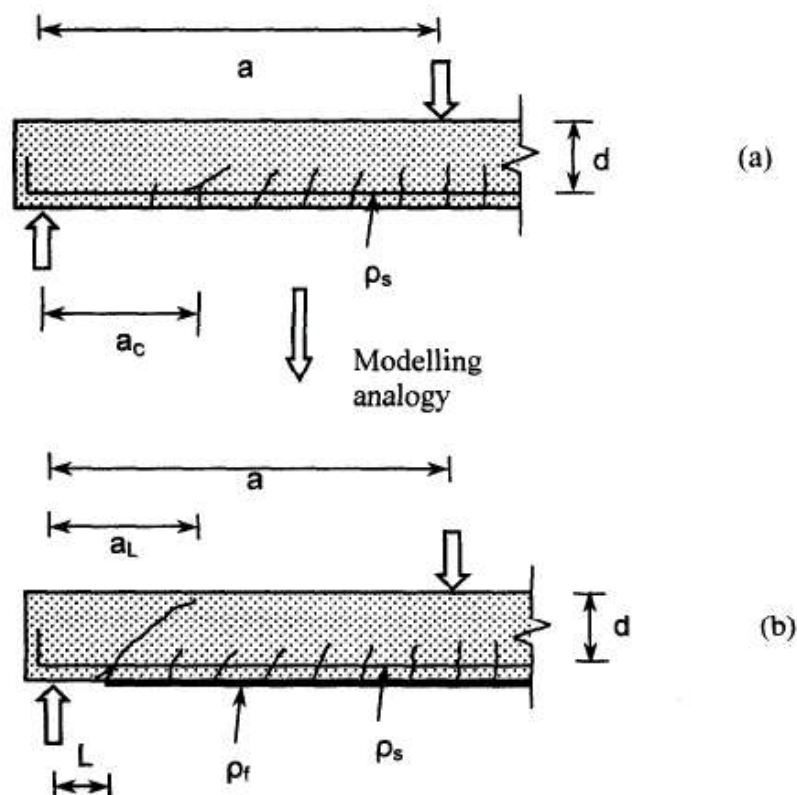
4-2-2: جداسدگی در انتهای مهار و در ترکهای خمشی

رفتار جداسدگی در انتهای مهار و در ترکهای خمشی براساس روشهای مختلفی استخراج شده که به صورت خلاصه در زیر توضیح داده شده اند. جزئیات رفتار این روشها در ضمیمه این فصل آورده شده است.

- بررسی انتهای مهار، محدودیتهای کرنش در FRP
این روند شامل دو مرحله مستقل است: اول اینکه انتهای مهار باید براساس قانون ساختاری لغزش - تنش برشی در سطح بین FRP و بتن بررسی شود. سپس باید یک حد کرنشی برای FRP جهت اطمینان از عدم گسیختگی اتصال دور از مهار اعمال گردد. این روش با توجه به سادگی آن در بسیاری از راهنماهای طراحی ارائه شده است. اما از آنجاییکه کرنش FRP مربوط به گسیختگی اتصال یک مقدار ثابت نبوده و بستگی به یکسری از پارامترها شامل رابطه برش - ممان، کرنش در فولاد داخلی و توزیع ترکها دارد، این ساده سازی تا حدی از رفتار حقیقی دور است.
- بررسی براساس خط پوش تنشهای کششی در FRP
روش بررسی جداسدگی در انتهای مهار و در هر نقطه از اتصال بین FRP و بتن یکسان بوده و بر اساس رابطه تنش برشی - لغزش و خط پوش تنشهای کششی می باشد. مزیت اصلی این روش نزدیک بودن رفتار مدل با رفتار حقیقی در بررسی جداسدگی در انتها و در ترکهای خمشی بوده در حالی که عیب اصلی آن، پیچیده بودن آن است به گونه ای که در استفاده های عملی در مدلهای مهندسی مشکل می باشد.
- بررسی انتهای مهار و نیروی انتقال داده شده در سطح بین بتن و FRP
بر اساس این روش، دو مرحله مستقل باید دنبال شود. در ابتدا، باید انتهای مهار براساس قانون ساختاری لغزش - تنش برشی در سطح بین FRP و بتن بررسی شود. سپس کنترل گردد تنش برشی بین دو سطح، که براساس شرایط تعادل ساده شده محاسبه شده است، کمتر از مقدار بحرانی (مقاومت برشی بتن) باشد. معایب این روش آنست که در مدلهای مختلف رفتار مشابه ای را داشته (جداسدگی در انتهای FRP و دور از آن) و دیگر اینکه این روش براساس توزیع تنش بر روی یک تیر ترک نخورده همگن پایه گذاری شده است. به هر حال مزیت اصلی آن، ساده سازی کاربرد در موارد عملی می باشد.

4-2-3: گسیختگی برشی انتها

Jansze (1997) در راستای قوانین آیین نامه (CEB (1993 برای محاسبه مقاومت برشی تیرهای تقویت شده با صفحات، از مفهوم ناحیه برشی مجازی استفاده کرده است (شکل 2-12).



شکل 2-12: (a) مفهوم ناحیه برشی مجازی، (b) قیاس مدلسازی برای آنالیز گسیختگی برشی انتهای FRP

روابط استخراج شده به صورت زیر خلاصه شده اند:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} b d \quad (15-2)$$

$$\tau_{Rd} = 0.15 \sqrt[3]{3 \frac{d}{a_L} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right)} \sqrt[3]{100 \rho_s f_{ck}} \quad (16-2)$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \sqrt{\rho_s})^2}{\rho_s}} d L^3 \quad (17-2)$$

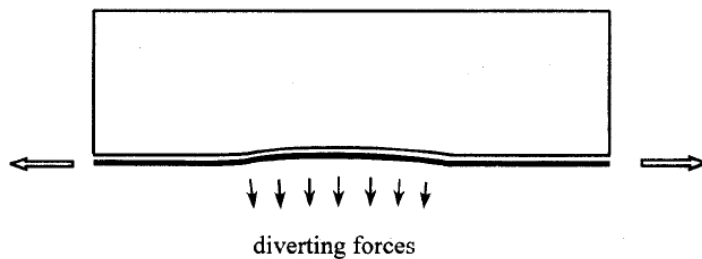
$$a > L + d, \quad a_L < a \quad (18-2)$$

در روابط بالا فاصله انتهای FRP از تکیه گاه، L ، و طول ناحیه برشی، a ، برحسب میلیمتر بوده و $\rho_s = A_{s1}/bd$.

مفهوم ناحیه برشی مجازی یک راه مهندسی ساده را برای گسیختگی برشی انتهای FRP (شامل گسیختگی ناشی از جداشدگی بتن) فراهم می کند. باید دقت شود که دیگر مدلها براساس محاسبات تحلیلی تنشهای برشی و نرمال در انتهای FRP شکل گرفته اند.

4-2-4-4: جداشدگی ناشی از ناهمواریهای موجود در سطح بتن

جداشدگی FRP ناشی از ناهمواریهای موجود در سطح بتن (شکل 2-13) مکانیزم گسیختگی دیگری است که به طور کامل مطالعه نشده است. شواهد تجربی نشان داده است که این مکانیزم گسیختگی با اعمال قوانین اجرایی عملی اعمال محدودیتهای خاصی در میزان ناهمواریهای سطح بتن قابل اجتناب می باشد. بیشتر این محدودیتها مربوط به ماکزیمم ناهمواری سطح بتن در یک طول مفروض بوده و بستگی به نوع FRP و ابعاد آن دارد (مثلا ضخامت). جزئیات بیشتر باید از سازنده سیستم FRP گرفته شود.



شکل 2-13: جداشدگی ناشی از ناهمواریهای سطح بتن

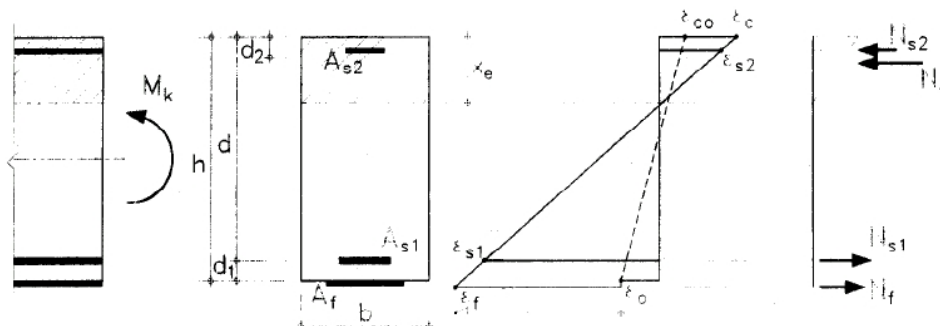
5-4: ضروریات شکل پذیری

میزان شکل پذیری می تواند با شاخص انحنای شکل پذیری مشخص شود که برابر است با انحناء در لحظه گسیختگی تقسیم بر انحناء در لحظه تسلیم و از دیاگرامهای ممان - انحناء قابل استخراج است. از آنجاییکه گسیختگی های بدون و یا با اعلام خطر کم نامطلوب می باشند، شاخص شکل پذیری باید از یک مقدار مشخص اشاره شده در فصل 1 بیشتر باشد.

6-4: حالت حدی سرویس

1-6-4: اساس محاسبات

محاسبات مربوط به حالت حد سرویس می تواند براساس یک آنالیز الاستیک خطی شکل بگیرد. برای این منظور دو حالت قبل از ترک خوردگی و بعد از ترک خوردگی بررسی می شود. از آنجاییکه عمق تار خشی از اعضای بتن آرمه، براساس محاسبه الاستیک خطی مستقل از ممان عمل کننده است، حالت دیگری برای مقطع مقاوم سازی شده که نتیجه کرنش اولیه قبل از مقاوم سازی باشد، وجود ندارد. با فرض رفتار خطی الاستیک مواد و اینکه بتن کشش تحمل نمی کند، آنالیز مقطع ترک خورده براساس شکل 2-14 صورت می گیرد.



شکل 2-14: آنالیز الاستیک خطی مقطع ترک خورده

از تعادل نیروها و سازگاری کرنشی، عمق تار خنثی، x_e ، از رابطه زیر بدست می آید :

$$\frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[h - \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) x_e \right] \quad (19-2)$$

که در آن $\alpha_f = E_f / E_c$ برای مقادیر کم کرنش اولیه، ε_0 ، مقدار مؤلفه $(1 + \varepsilon_0 / \varepsilon_c)$ برابر یک بوده بنابراین رابطه (19-2) می تواند به طور مستقیم برای x_e حل شود. برای مقادیر بالای ε_0 در مقایسه با کرنش بتن، ε_c ، در دورترین تار فشاری، عمق تار خنثی، x_e ، باید از حل معادلات (19-2) و (20-2) بدست آید.

$$E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e \left(h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1)A_{s2} \frac{(x_e - d_2)}{x_e} (h - d_2) - \alpha_s A_{s1} \frac{d - x_e}{x_e} (h - d)} \quad (20-2)$$

با صرفنظر از فولاد فشاری ($A_{s2} = 0$) و فرض $h/d \sim 1.1$ (یعنی اینکه میانگین عمق مؤثر فولاد و تقویت کننده تقریباً برابر است با $1.05d$)، رابطه (20-2) می تواند به صورت زیر بازنویسی شود :

$$E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e \left(1.05d - \frac{x_e}{3} \right)} \quad (21-2)$$

یا براساس روابط فصل 2-21

$$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \approx \frac{M_0}{M_k} \frac{x_e}{x_0} \quad (22-2)$$

که در آن M_0 ممان سرویس قبل از مقاومسازی و x_0 عمق مربوط به تار خنثی بوده که از رابطه (2-1) محاسبه می گردد. ممان اینرسی مقطع ترک خورده از رابطه زیر تعیین می شود :

$$I_2 = \frac{bx_e^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_e)^2 + \alpha_f A_f (h - x_e)^2 \quad (23-2)$$

و مشابه با x_e وابسته به ممان اعمال شده، M_k ، است.

آنالیز مقطع ترک نخورده مشابه با آنالیز مقطع ترک خورده قابل اجرا می باشد. با این وجود، از آنجاییکه عموماً M_0 بیشتر از ممان ترک خوردگی M_{cr} بوده و اثر تقویت کننده های FRP به هر حال محدود می گردد، خصوصیات هندسی مقطع ترک نخورده قبل از مقاومسازی مورد استفاده قرار می گیرد. با صرفنظر کردن از سهم فولاد، ممان اینرسی (برای تیرهای مستطیلی شکل) می تواند به صورت تقریبی از رابطه زیر محاسبه شود :

$$I_1 \approx \frac{bh^3}{12} \quad (24-2)$$

و ممان ترک خوردگی برای تیرهای مستطیلی شکل نیز از رابطه زیر به صورت تقریبی محاسبه می گردد :

$$M_{cr} \approx f_{ctm} \frac{bh^2}{6} \quad (25-2)$$

2-6-4: محدودیتهای تنشی

تحت شرایط بار سرویس لازم است که تنشها در بتن، فولاد و FRP جهت جلوگیری از آسیب یا خزش بیش از حد بتن، تسلیم شدگی فولاد و خزش زیاد یا گسیختگی خزشی FRP محدود شوند. اگر تقویت کننده های کششی خارجی اضافه شده و به واسطه اینکه نیروی فشاری برابر کل نیروی کششی است، یک تغییر قابل ملاحظه در حالت تنش بتن ممکن است پیش بینی شود. جهت اجتناب از فشار بیش از حد، بروز ترکهای طولی و کرنشهای غیر برگشت پذیر، محدودیتهای زیر برای تنش فشاری بتن اعمال می شود (EuroCode 2).

$$\sigma_c \leq 0.60 f_{ck} \quad \text{under the rare load combination} \quad (26a - 2)$$

$$\sigma_c \leq 0.45 f_{ck} \quad \text{under the quasi - permanent load combination} \quad (26b - 2)$$

که در آن $\sigma_c = E_c \varepsilon_c$ از رابطه (2-20) بدست می آید.

جهت اجتناب از تسلیم شدگی فولاد در بار سرویس، ضابطه EuroCode 2 عبارتست از :

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_c \frac{d - x_e}{x_e} \leq 0.80 f_{yk} \quad \text{under the rare load combination} \quad (27 - 2)$$

به طریق مشابه، تنش FRP تحت بار سرویس باید به مقدار زیر محدود شود.

$$\sigma_f = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h - x_e}{x_e} - \varepsilon_0 \right) \leq \eta f_{fk} \quad \text{under the quasi - permanent load combination} \quad (28 - 2)$$

که در آن $\eta < 1$ ضریب محدودیت تنش FRP است. این ضریب بستگی به نوع FRP داشته و باید براساس تجربه بدست آید. براساس نتایج آزمایش گسیختگی خزشی، مقادیر η برابر 0.8، 0.5 و 0.3 به ترتیب برای CFRP، AFRP و GFRP پیشنهاد شده است. از آنجاییکه اغلب حالت حدی حاکم در طراحی حالت حد سرویس می باشد، در FRP در بار سرویس کرنش کمی مورد انتظار بوده و بنابراین گسیختگی خزشی FRP عموماً نگران کننده نبوده و اهمیت ندارد.

2-6-3: بررسی تغییر شکل و خیزها

همانطور که قبلاً اشاره شده، سطح مقطع کمی از FRP به طور قابل توجهی بار گسیختگی را افزایش داده و مقدار سطح مقطع کمی از آن جهت ارضای ضوابط حالت حدی نهایی کافی می باشد. از آنجاییکه مدول الاستیسیته FRP نسبتاً کم است، باعث اعمال سختی محوری $E_f A_f$ کمی می گردد. این سختی اغلب برای حدود انحناء و خیز تیر مقاوم سازی شده تحت بار سرویس کافی نبوده و لازم است که جهت برآورده کردن ضوابط SLS افزایش یابد. در روشهای تعیین خیز، با توجه به محاسبات بر پایه انتگرال عددی انحناء دقت بسیار بالایی بدست می آید که مقدار انحناء نیز با محاسبه سختی کششی و یک آنالیز غیرخطی از مقطع ترک خورده قابل تعیین است. روش ساده تری که براساس طرح دو خطی CEB ارائه شده است، مقدار خیز را با دقت معقولانه ای در حالت حد سرویس محاسبه می کند. براساس این روش، خیز متوسط، a از رابطه زیر بدست می آید :

$$a = a_1 (1 - \zeta_b) + a_2 \zeta_b \quad (29 - 2)$$

که در آن a_1 و a_2 به ترتیب خیزهای حالت ترک نخورده و حالت ترک خورده به صورت کامل بوده و ζ_b یک ضریب توزیع (سختی کششی) می باشد.

$$\zeta_b = 0 \quad M_k < M_{cr}$$

$$\zeta_b = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^n \quad M_k > M_{cr} \quad (30-2)$$

که در آن β_1 ضریبی جهت بدست آوردن مشخصه های اتصال تقویت کننده و β_2 ضریبی جهت به حساب آوردن نوع بارگذاری می باشد. براساس (CEB 1993) توان n برابر 2 فرض می شود. برای بتن با مقاومت بالا استفاده از مقدار 3 برای n دقت بیشتری را نتیجه خواهد داد. اگرچه رفتار اتصال FRP با فولاد فرق می کند، براساس تحقیقات انجام شده اگر از β_1 و β_2 ارائه شده در آیین نامه EC2 استفاده گردد ($\beta_1 = 0.5$ و $\beta_1 = 1.0$ به ترتیب برای فولاد بدون آج و فولاد آجدار؛ $\beta_2 = 0.5$ و $\beta_2 = 1.0$ به ترتیب برای بارگذاری طولی المدت و بارگذاری کوتاه مدت)، سازگاری خوبی بین نتایج تجربی و تحلیلی مشاهده می شود. خیز حالت ترک نخورده، a_1 ، و خیز حالت ترک خورده کامل، a_2 ، می تواند با آنالیز الاستیک کلاسیک محاسبه شود که بستگی به سختی خمشی حالت ترک نخورده، $E_c I_1$ ، و سختی خمشی حالت ترک خورده کامل، $E_c I_2$ ، دارد. در حالتی که از FRP استفاده می شود، جهت به حساب آوردن ممان M_0 مقادیر a_1 و a_2 به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$a_1 = k_M l^2 \frac{M_k}{E_c I_1} \quad (31-2)$$

$$a_2 = k_M l^2 \left(\frac{M_0}{E_c I_{02}} + \frac{M_k - M_0}{E_c I_2} \right) \quad M_k > M_0 \quad (32-2)$$

که در آن k_M ضریب وابسته به نوع بار و I_{02} ممان اینرسی حالت ترک خورده قبل از مقاوم سازی است. 4-6-4: بررسی عرض ترکها

برای محافظت از فولاد داخلی و تضمین عملکرد عضو، عرض ترک باید محدود شود. برای تیرهای بتن آرمه مقاوم سازی شده با FRP، ترکهای جدید در بین ترکهای موجود ظاهر خواهد شد. بنابراین ترکها به صورت متراکم تر و با عرض کمتر شکل گرفته که باعث می شود در اغلب اوقات بررسی عرض ترک لازم نباشد.

با فرض ترکهای تثبیت شده، مقدار مشخصه عرض ترک براساس EuroCode 2 به صورت زیر محاسبه می شود:

$$w_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{rm,r} = \beta s_{rm} \zeta \varepsilon_2 \quad (33-2)$$

که در آن $\beta = 1.7$ ضریبی وابسته به متوسط مقدار مشخصه عرض ترک، s_{rm} فاصله متوسط ترکها، $\varepsilon_{rm,r}$ کرنش متوسط آرماتور فولادی نسبت به بتن اطرافش و ζ ضریب سختی کششی مشابه آنچه که در رابطه (2-30) داده شده است می باشد.

$$\zeta = 0 \quad M_k < M_{cr}$$

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^n \quad M_k > M_{cr} \quad (34-2)$$

ε_2 کرنش تقویت کننده در حالت ترک خورده کامل می باشد. با فرض $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_{s1} \sim \varepsilon_f + \varepsilon_0$ و $N_{rk} \approx N_{s1} + N_f$ از رابطه زیر تعیین می شود :

$$\varepsilon_2 = \frac{N_{rk} + E_f A_f \varepsilon_0}{E_s A_s + E_f A_f} \quad (35-2)$$

با $N_{rk} = M_k / z_e$ و z_e بازوی لنگر بین نیروی کششی نهایی ($N_{s1} + N_f$) و نیروی فشاری ($N_{s2} + N_c$) است.

فاصله متوسط ترکها، برای به حساب آوردن اثر هر دو تقویت کننده خارجی و داخلی می تواند از رابطه زیر محاسبه شود :

$$s_{rm} = \frac{2f_{ctm} A_{c,eff}}{\tau_{sm} u_s} \frac{E_s A_s}{E_s A_s + \xi_b E_f A_f} = \frac{2f_{ctm} A_{c,eff}}{\tau_{fm} u_f} \frac{\xi_b E_f A_f}{E_s A_s + \xi_b E_f A_f} \quad (36-2)$$

که در آن $A_{c,eff}$ سطح مؤثر کششی که حداقل مقدار $2.5(h-d)b$ و $(h-x)b/3$ (EuroCode 2) بوده، τ_{sm} و $\tau_{fm} = 1.25 f_{ctm}$ (CEB 1993) و $1.8 f_{ctm}$ به ترتیب تنش متوسط اتصال آرماتور فولادی و FRP بوده u_s و u_f به ترتیب محیط اتصال فولاد و FRP در واحد طول بوده و ξ_b یک پارامتر اتصال است که از رابطه زیر تعیین می شود :

$$\xi_b = \frac{\tau_{fm} E_s A_s u_f}{\tau_{sm} E_f A_f u_s} = \frac{\tau_{fm} E_s d_s}{\tau_{sm} E_f 4t_f} \quad (37-2)$$

که در آن d_s قطر (متوسط) میلگردهای فولادی و t ضخامت FRP می باشد. با صرف نظر از اثر سختی کششی ($\zeta = 1.0$) و فرض اینکه $\varepsilon_0 \sim 0$ ، عرض ترک از روابط (33-2) تا (37-2) به صورت زیر استخراج می شود :

$$w_k = 2.1 \rho_{c,eff} \frac{M_k}{E_s d \rho_{eq}} \frac{1}{(u_s + 0.694 u_f)} \quad (38-2)$$

که در آن $\rho_{c,eff} = A_{c,eff} / bd$ نسبت سطح مؤثر در کشش و ρ_{eq} نسبت تقویت کننده های معادل می باشد. با تعیین $w_k < 0.3 \text{ mm}$ (EC2)، شرایط زیر برای عرض اتصال $u_f = b_f$ بدست می آید (b_f عرض کل FRP چسبیده می باشد).

$$u_f \geq 10.1 \rho_{c,eff} \frac{M_k}{E_s d \rho_{eq}} - 1.44 u_s \quad (39-2)$$

رابطه (39-4) سطح چسبندگی لازم FRP را برای متصل کردن دو سر ترکها، به صورتی که عرض ترکها در شرایط بارگذاری سرویس، درصد مشخص شده با باقی بماند مشخص می نماید (برای یک

مقدار ثابت از ρ_f و متعاقب آن یک مقدار ثابت از ρ_{eq} ، با استفاده از FRP دارای عرض زیاد و ضخامت کم، عرض ترک کوچکتر خواهد بود). در تیرهای عمیق ممکن است عرض اتصال مورد نیاز، a_f ، از مقدار دردسترس، b ، بیشتر گردد. در این حالت باید با استفاده از FRP ضخیم تر مقدار ρ_{eq} را افزایش داد.

4-6-5: بررسی ترک خوردگی بین صفحه ای اتصال

در اعضای تقویت شده با FRP در محل ترکها و انتهای FRP تمرکز تنش به وجود می آید. در بار سرویس، باید از شروع ترک بین صفحه ای اتصال در محل انقطاع FRP اجتناب شود چراکه ممکن است باعث کاهش یکپارچگی طولی المدت ناحیه مهاری تحت مثلاً بارهای نوسانی و اثر یخ زدگی و آب شدگی گردد. جهت برآورده کردن این ضروریات باید بررسی شود (حالت حد سرویس، ترکیب بار نیمه دائمی) که ماکزیمم تنش برشی τ_{fl} در انتهای FRP، که براساس یک آنالیز الاستیک خطی محاسبه می شود، کمتر از f_{ctk} باشد. در حالتی که مهار اضافی در انتهای FRP ایجاد شده است، این بررسی و تحقیق خیلی ضروری نیست. یک روش جهت محاسبه τ_{fl} استفاده از رابطه زیر می باشد:

$$\tau_{f1} = \left[V_{x=0} + \left(\frac{G_a}{E_f t_f t_a} \right) M_{x=0} \right] \frac{t_f (h - x_e)}{I_c} \quad (40-2)$$

که در آن G_a و t_a به ترتیب مدول برشی و ضخامت چسب در سطح بین FRP و بتن بوده؛ $V_{x=0}$ و $M_{x=0}$ به ترتیب نیروی برشی و ممان خمشی اعمالی در مقطع مربوط به انتهای FRP بوده و I_c ممان اینرسی مقطع ترک خورده انتقالی می باشد. می توان بیان کرد که جداشدگی موضعی در محل ترکها در حالت حد نهایی تا هنگامی که گسیختگی اتصال صورت نپذیرد، مجاز است. اما این جداشدگی موضعی باید در بار سرویس جهت تضمین یکپارچگی طولی المدت سطح اتصال، اجتناب گردد. از شکل 7-2 می توان به این مطلب رسید که جداشدگی موضعی هنگامی اتفاق می افتد که لغزش بیشتر از s_{f0} باشد. مقدار s_{f0} از رابطه زیر بدست می آید:

$$s_{f0} = \frac{2G_f}{\tau_{f1}} \quad (41-2)$$

که در آن $G_f = c_f f_{ctm}$ ، $\tau_{f1} = 1.8 f_{ctm}$ و $c_f = 0.202$ mm. لغزش نهایی s_{f0} برابر است با 0.224 mm که مربوط به عرض ترک $s_{f0} = 0.45$ mm می باشد. از آنجائیکه مقدار مشخصه عرض ترک تحت بار سرویس به مقدار ماکزیمم 0.30 mm محدود می شود (عرض متوسط ترک 0.18 mm)، جداشدگی موضعی در حالت حد سرویس رخ نخواهد داد.

4-7: خلاصه روند طراحی

- روند طراحی اعضای بتن آرمه تقویت شده با FRP در خمش می تواند به صورت زیر خلاصه گردد:
- در عضو قبل از مقاومسازی: ممان طراحی مقاوم (ULS) تعیین شده و SLS کنترل می گردد که البته به طور مستقیم ضروری نمی باشد اما اطلاعات مفید و با اهمیتی نسبت به SLS برای عضو بعد از مقاومسازی فراهم خواهد نمود (احتمال بیشتر برای حاکم بودن در طراحی).
- از ممان سرویس M_0 قبل از مقاومسازی، کرنش اولیه ε_0 در دورترین تار کششی محاسبه می شود.

- با فرض عملکرد کامل کامپوزیت و از ممان طراحی بعد از مقاومسازی، سطح مقطع لازم FRP برای ارضای ضوابط ULS تعیین می گردد. سپس به جهت دست یافتن به شکل پذیری مناسب، عضو براساس فصل 1-3 مورد بررسی قرار می گیرد.
- خیز در حالت حد سرویس محاسبه می شود. اگر از ماکزیمم خیز مجاز تجاوز کرد، سطح مقطع لازم FRP برای ارضای ضروریات مربوط به خیز محاسبه می گردد.
- محاسبه تنشها در بتن، فولاد و FRP در حالت حد سرویس. اگر از تنشهای مجاز بیشتر شد، سطح مقطع لازم برای FRP جهت ارضای محدودیتهای تنشی محاسبه می گردد.
- بررسی عرض اتصال کافی جهت ارضای ضوابط عرض ترک در حالت حد سرویس. در صورت نیاز، عرض FRP افزایش یافته و یا با داشتن ماکزیمم عرض ممکن، مقدار FRP (ضخامت آن) افزایش می یابد. ترک خوردگی اتصال بین صفحه ای در حالت حد سرویس نگران کننده نبوده و اهمیت ندارد.
- بررسی نیروی مقاومت برشی بر اثر گسیختگی اتصال ناشی از ترکهای برشی (جابجاییهای ترک عمودی) (ULS). اگر این مود از گسیختگی حاکم بود، یک مقدار جدید برای سطح مقطع FRP تعیین می شود.
- بررسی اینکه گسیختگی اتصال در انتهای مهار و در راستای FRP (مثلاً نواحی که ترکهای خمشی حاکم است) رخ ندهد. در صورت وقوع، یک مهاربندی مکانیکی باید مورد استفاده قرار گیرد.
- بررسی اینکه گسیختگی برشی انتهای FRP اجتناب شود. در صورت نیاز تقویت کننده های برشی در انتها باید فراهم گردد.
- بررسی شرایط و موقعیتهای غیرمترقبه و ناگهانی
- بررسی مقاومت طراحی برشی عضو مقاومسازی شده (فصل بعد ملاحظه گردد). در صورت نیاز باید تقویت کننده های برشی فراهم شود.

ضمائم : بررسی حالت حد نهایی به جهت جداسازی در انتهای مهار و در ترکهای خمشی

A.1 : روند 1 : بررسی مهار و محدودیت کرنشی FRP

یک روش برای جلوگیری از جداسازی، محدود کردن کرنش کششی نهایی $\epsilon_{f,lim}$ در حالت حد نهایی به یک مقدار مشخص است. همچنین، مهار انتهایی با استفاده از روشهایی که بر پایه مکانیزم شکست و روابط لغزش - تنش اتصال هستند، کنترل و بررسی می شود. این روند محدودسازی کرنشی در تعداد کمی از راهنماها ارائه شده و در آنها کرنش نهایی $\epsilon_{f,lim}$ را محدود به مقدار 0.0065 تا 0.0085 می کنند. نتایج آزمایشگاهی اخیر نشان داده است که کرنش کششی FRP در لحظه وقوع جداسازی به پارامترهای زیادی از جمله خصوصیات FRP و بتن، شکل بارگذاری، فاصله ترکها و ... بستگی دارد. بنابراین استفاده از یک حد کرنشی کلی برای کل محدوده کاربردها، مناسب نخواهد بود. برای مثال محدودیت کرنشی در بعضی موارد می تواند منجر به یک استفاده غیراقتصادی از FRP خصوصاً در هنگام مقاومسازی با ابعاد بزرگ باشد. بنابراین براساس داده های آزمایشی وسیعتر و

محاسبات تحلیلی بیشتر، باید مدل محدودسازی کرنشی به وسیله یک مدل دقیق تر نسبت به آن جایگزین گردد. دو مدل پیشنهادی که پیش بینی واقع بینانه تری از جداسازی FRP داشته و استفاده اقتصادی بهتری از FRP ارائه می دهند در دو فصل آتی مورد بررسی قرار می گیرند. برای بررسی مهار انتهایی، در زیر مدل Holzenkampfer (1994) توسط Rostasy & Neubaner (1997) اصلاح شده و ارائه گردیده است. این مدل براساس روابط اتصال از شکل 2-7 بوده و ماکزیمم نیروی FRP که قابل مهار شدن است، $N_{fa,max}$ ، و ماکزیمم طول مهاری، $l_{b,max}$ ، را به صورت روابط زیر تعیین می کند :

$$N_{fa,max} = \alpha c_1 k_c k_b b_f \sqrt{E_f t_f f_{ctm}} \quad (N) \quad (A1-1)$$

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (A1-2)$$

که در آن α ضریب کاهش، تقریباً برابر 0.9، برای به حساب آوردن اثر ترکهای مورب در مقاومت اتصال بوده (دقت شود که $\alpha = 1$ در تیرها با تقویت کننده های کافی داخلی و خارجی و در دالها قابل استفاده است) ؛ k_c یک فاکتور برای به حساب آوردن فشردگی بتن (k_c عموماً می تواند برابر 1.0 فرض شود، اما برای FRP چسبیده به بتنی که خوب فشرده نشده، مثلاً در زمان بتن ریزی به خوبی با سطح قالب همسطح نشده، $k_c = 0.67$ فرض می گردد) و k_b ضریب هندسی بوده و از رابطه زیر تعیین می

$$k_b = 1.06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (A1-3)$$

شود :

با این شرط که b, b_f, t_f بر حسب mm محاسبه شده و E_f و f_{ctm} بر حسب MPa هستند. c_1 و c_2 می تواند از کالیبراسیون نتایج آزمایش بدست آیند، که برای نوارهای CFRP به ترتیب برابر 0.64 و 2 می باشند.

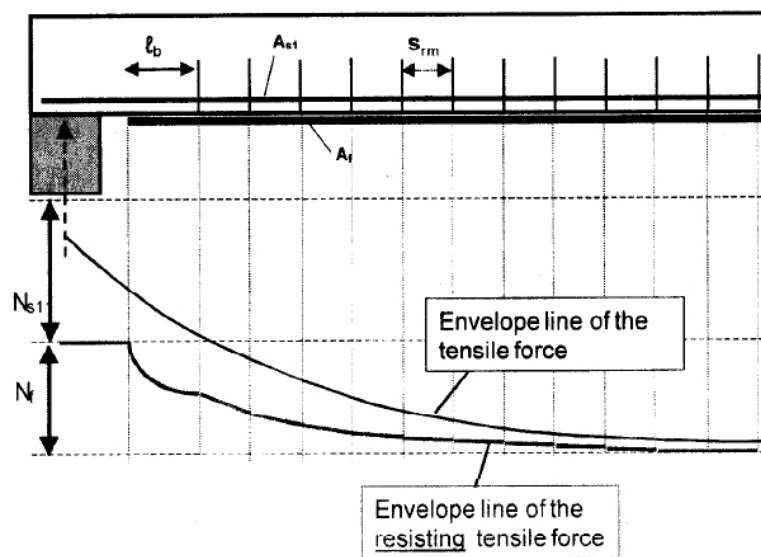
برای طول اتصال $l_b \leq l_{b,max}$ ، نیروی اتصال نهایی براساس رابطه زیر محاسبه می شود :

$$N_{fa} = N_{fa,max} \frac{l_b}{l_{b,max}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) \quad (A1-4)$$

A.2 : روند 2: محاسبه خط پوش تنش کششی

یک راه جزئی تر برای جلوگیری از جداسازی در ترکهای خمشی در حالت بارگذاری استاتیک کوتاه مدت به وسیله Niedermeier (2000) پیشنهاد شده است. هدف از این راه محاسبه ماکزیمم افزایش ممکن در تنش کششی FRP بوده که قابل انتقال به وسیله تنش اتصال بین دو ترک خمشی متوالی است. این افزایش باید با افزایش ناشی از طراحی بر پایه عملکرد کامل کامپوزیت مقایسه شود (شکل A2-1). نتایج آزمایشها نشان می دهد که جداسازی در ترکهای خمشی هنگامی شروع می شود

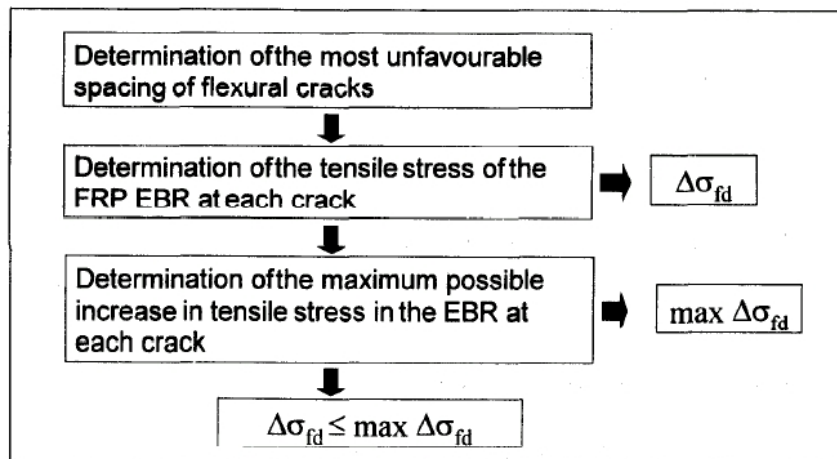
که تنش کششی در FRP از مقدار قابل انتقال به وسیله تنشهای اتصال بیشتر شود. از آنجاییکه فاصله ترکها یک اثر مهم در تشکیل تنشهای کششی است، لازم است که فرضیاتی در مورد فاصله ترکها در حالت حد نهایی در نظر گرفته شود.



شکل A2-1: خط پوش نیروی کششی مقاوم

روند اصلی شامل سه مرحله است (شکل A2-2):

- تعیین بیشترین فاصله نامطلوب از ترکهای خمشی
- تعیین نیروی کششی در FRP بین دو ترک متوالی براساس طراحی خمشی (فصل 1-4-2)
- تعیین ماکزیمم افزایش ممکن در تنش کششی در FRP



شکل A2-2: روند اصلی - الگوریتم

- تعیین بیشترین فاصله نامطلوب از ترکهای خمشی:

فاصله بین دو ترک متوالی معادل 1 تا 2 برابر طول انتقال l_t بوده و می تواند با فرض تنشهای اتصال متوسط ثابت از دو تقویت کننده های داخلی و خارجی محاسبه شود. تنش متوسط اتصال از آرماتورهای

داخلی τ_{sm} می تواند براساس EC2 با در نظر گرفتن اینکه تنش متوسط اتصال تقویت کننده های خارجی از رابطه (A2-2) قابل دستیابی است، تعیین شود [رابطه (A2-1) در حالت عملکرد اتصال قوی]. طول انتقال می تواند از روابط (A2-3) تا (A2-5) محاسبه گردد که در آن M_{cr} ، ممان خمشی ناشی از ترک خوردگی است. در رابطه (A2-4) فاکتور k ، از میان دیگر فاکتورها، براساس بیشترین مقدار مقاومت کششی خمشی $f_{ct,fl}$ در مقایسه با مقاومت کششی محوری یا مقاومت کششی سطح بتن، قابل محاسبه است. در این حالت فاکتور k باید برابر 2.0 فرض شود (EC2). بازوی لنگر متوسط z_m می تواند با محاسبه سختی محوری لایه های مختلف از تقویت کننده براساس رابطه (A2-5) تعیین گردد. برای ساده سازی محاسبات می توان از یک فاصله ترک ثابت در کل طول عضو خمشی استفاده نمود. از آنجاییکه تنشهای اتصال قابل انتقال در یک ناحیه ترک نخورده از بتن (یعنی ناحیه مهاري یا بین دو ترک متوالی) به واسطه محدودسازی انرژی شکست، محدود می گردد، فواصل زیاد بین ترکها نامطلوب است. بنابراین فاصله ترکها به دو برابر طول انتقال وابسته خواهد بود.

$$\tau_{sm} = 2.25 f_{ctk,0.95} = 1.85 f_{ctm} \quad (A2-1)$$

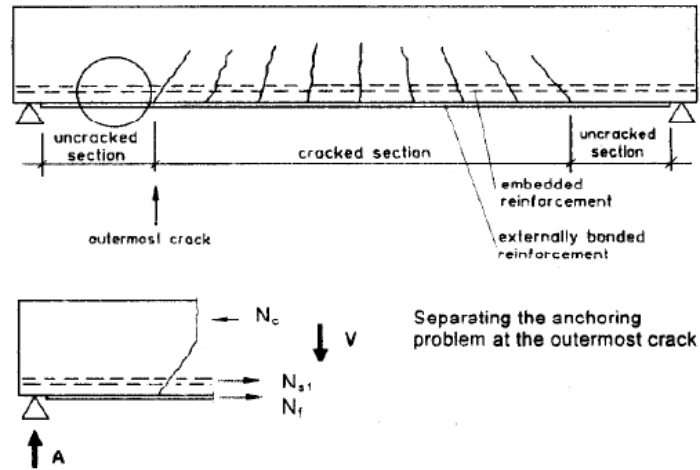
$$\tau_{fm} = 0.44 f_{ctm} \quad (A2-2)$$

$$s_{rm} = 2l_t = 2 \frac{M_{cr}}{z_m} \left(\frac{1}{\sum \tau_{fm} b_f + \sum \tau_{sm} d_s \pi} \right) \quad (A2-3)$$

$$M_{cr} = \frac{k f_{ctk,0.95} b h^2}{6} \quad (A2-4)$$

$$z_m = 0.85 \frac{(h E_f A_f + d E_s A_{s1})}{(E_f A_f + E_s A_{s1})} \quad (A2-5)$$

- تعیین تنش کششی FRP در هر ترک :
- براساس فصل 2-4-1، با برقراری سازگاری کرنشی و تعادل نیروهای داخلی، تنش کششی محاسبه شده است. قانون انتقال براساس EC2 قابل اعمال است.
- تعیین ماکزیمم افزایش ممکن در تنش کششی در FRP :
- با بررسی بالاتر نرفتن تنشهای کششی بین دو ترک متوالی که در طراحی خمشی محاسبه شده اند، از ماکزیمم افزایش ممکن تعیین شده به وسیله تنشهای اتصال، میزان افزایش قابل دستیابی تخمین زده می شود. این بررسی در نواحی که ترکهای خمشی رخ داده و همچنین برای نواحی مهاري قابل اعمال است. نیروی کششی ماکزیمم که از طریق تنشهای متوسط اتصال در ناحیه مهاري قابل انتقال از FRP به بتن است (شکل A2-3)، می تواند براساس روابط (A2-6) تا (A2-8) محاسبه شود.



شکل A2-3: مهار انتهایی در یک ناحیه بتن ترک نخورده

$$\sigma_{fad, \max} = \frac{c_1}{\gamma_c} \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_f}} \quad [MPa] \quad (A2-6)$$

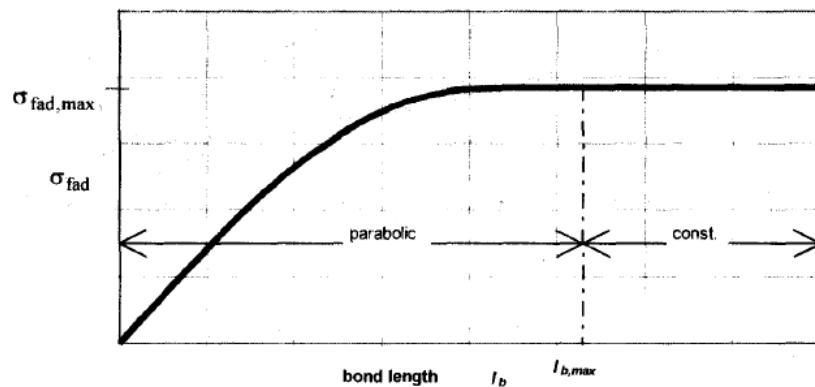
در رابطه (A2-6)، c_1 برابر 0.23 می باشد. ماکزیمم تنش ممکن به طور نزدیکی وابسته به طول مهاری مؤثر $l_{b, \max}$ می باشد (رابطه (A2-7)).

$$l_{b, \max} = c_2 \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}} \quad [mm] \quad (A2-7)$$

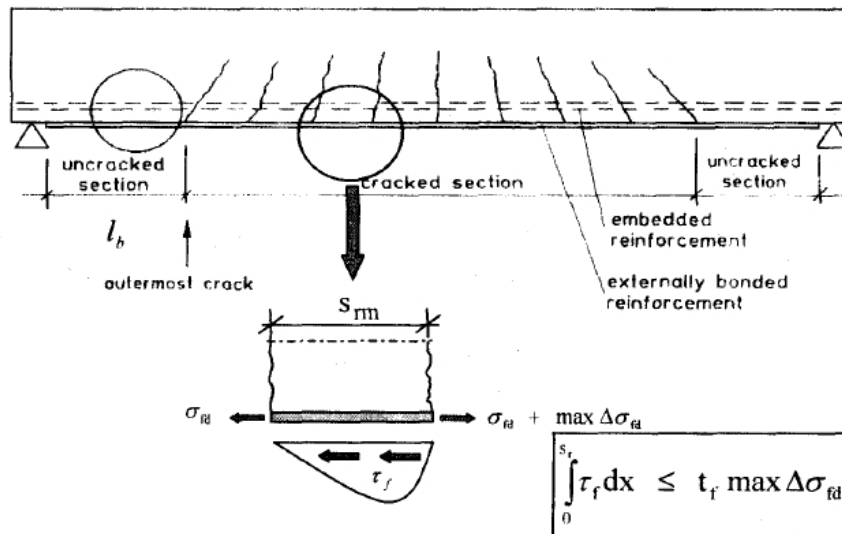
که در آن $c_2 = 1.44$.

افزایش در طول مهاری تا مقداری بیشتر از $l_{b, \max}$ باعث افزایش در تنشهای کششی مقاوم نمی گردد (شکل A2-4). این موضوع ناشی از محدود کردن انرژی شکست می باشد. برای طول مهاری کمتر از $l_{b, \max}$ ، ماکزیمم تنش کششی به وسیله رابطه (A2-8) تعیین می گردد.

$$\sigma_{fad} = \frac{l_b}{l_{b, \max}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b, \max}} \right) \cdot \sigma_{fad, \max} \quad l_b \leq l_{b, \max} \quad (A2-8)$$



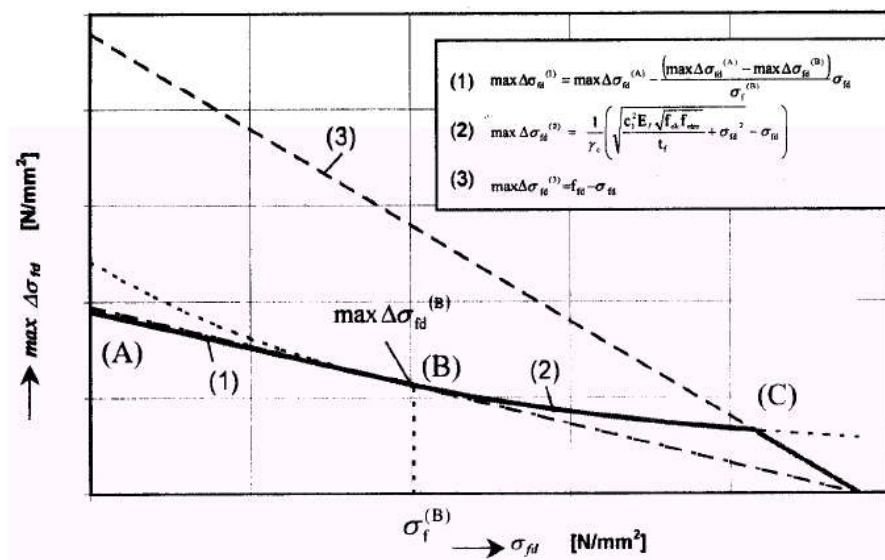
شکل A2-4: تنش کششی قابل مهار وابسته به طول مهاری



شکل A2-5: عضو بین دو ترک متوالی - آنالیز جدانشدگی در ترکهای خمشی

یک آنالیز رفتاری برای اتصال FRP براساس رابطه لغزش - تنش اتصال دو خطی ساده شده منجر به معادلاتی می گردد که می تواند برای محاسبه ماکزیمم افزایش در تنش کششی $\max \Delta \sigma_{fd}$ در یک عضو بین دو ترک استفاده شده که وابسته به تنش کششی σ_{fd} می باشد استفاده نمود. σ_{fd} تنش کششی است که براساس سازگاری کرنشی و تعادل نیروها در مقطعی که در آن تنشهای کششی کمتری عمل می کند، تعیین می شود (شکل A2-5).

در شکل A2-6 ماکزیمم افزایش ممکن که وابسته به یک فاصله خاص از ترکها می باشد، نشان داده شده است.



شکل A2-6: دیاگرام ماکزیمم افزایش ممکن در تنش کششی بین دو ترک متوالی

نقاط A، B و C نشان داده شده در دیاگرام می تواند با استفاده از معادلات زیر تخمین زده شود. در شکل A2-6 نقطه A مربوط به بررسی در مهار انتهایی جایی که $\sigma_{fd} = 0$ است، می باشد. مقایسه ماکزیمم افزایش در تنش - یا در این حالت ماکزیمم تنش کششی مهاری، $\max \Delta \sigma_{fd}^{(B)}$ می تواند با کمک روابط (A2-6) تا (A2-8) صورت گیرد. مقدار σ_f از رابطه (A2-9) و ماکزیمم افزایش مربوطه $\max \Delta \sigma_{fd}^{(B)}$ از رابطه (A2-10) قابل تعیین است.

$$\sigma_f^{(B)} = \frac{c_3 E_f}{s_{rm}} - c_4 \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \frac{s_{rm}}{4 t_f} \quad [MPa] \quad (A2-9)$$

$$\max \Delta \sigma_{fd}^{(B)} = \frac{1}{\gamma_c} \left[\sqrt{\frac{c_1^2 E_f \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_f} + (\sigma_f^{(B)})^2} - \sigma_f^{(B)} \right] \quad [MPa] \quad (A2-10)$$

که در آنها $c_3 = 0.185$ و $c_4 = 0.285$. کاهش خطی بین نقطه A و B می تواند با رابطه (A2-11) تعیین گردد. نمودار بین B و C با رابطه (A2-12) تعیین می شود.

$$\max \Delta \sigma_{fd}^{(1)} = \max \Delta \sigma_{fd}^{(A)} - \frac{(\max \Delta \sigma_{fd}^{(A)} - \max \Delta \sigma_{fd}^{(B)})}{\sigma_f^{(B)}} \sigma_{fd} \quad (A2-11)$$

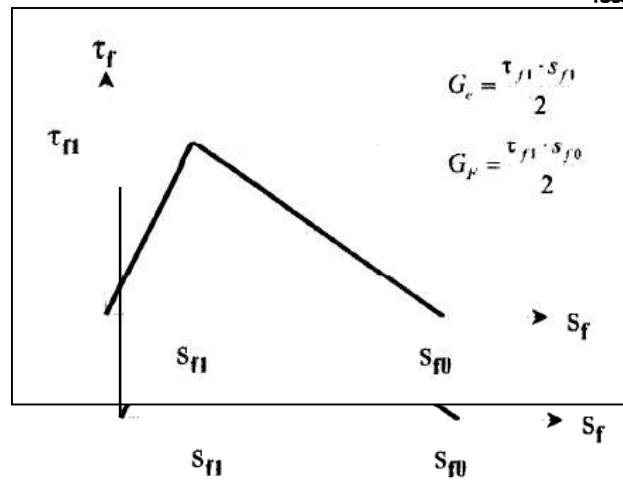
$$\max \Delta \sigma_{fd}^{(2)} = \frac{1}{\gamma_c} \left[\sqrt{\frac{c_1^2 E_f \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{t_f} + \sigma_{fd}^2} - \sigma_{fd} \right] \quad [MPa] \quad (A2-12)$$

برای تنشهای کششی زیاد، حد بالای افزایش تنشها از طریق مقاومت کششی FRP به کمک رابطه (A2-13) قابل تعیین است (شکل A2-6 ملاحظه گردد).

$$\max \Delta \sigma_{fd}^{(3)} = f_{fd} - \sigma_{fd} \quad (A2-13)$$

دقت شود که در روابط (A2-6) تا (A2-12) واحدهای تنش و مدول الاستیسیته بر حسب MPa بوده و واحد ابعاد بر حسب mm می باشد.

ضرایب c_1 ، c_3 و c_4 به وسیله کالیبره کردن مدل اتصال براساس آزمایشهای اتصال ساده بدست می آیند. با مطالعه بیشتر در این زمینه مقادیر این ضرایب ممکن است براساس داده های آزمایشهای جدید، تغییر کند. دقت شود که این پارامترها بسیار وابسته به رابطه اساسی لغزش - تنش اتصال نشان داده شده در شکل A2-7 می باشند.



شکل A2-7: رابطه لغزش - تنش اتصال

که در آن :

$$\tau_{f1d} = \frac{c_4}{\gamma_c} \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \quad \text{is the maximum bond stress,}$$

$$s_{f0d} = c_3 = c_1^2 / c_4 \quad \text{is the slip where debonding occurs,}$$

$$G_{Fd} = 0.5 \tau_{f1d} s_{f0d} = 0.5 \frac{c_1^2}{\gamma_c} \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \quad \text{is the fracture energy of concrete.}$$

A.3 : روند 3: بررسی مهار و نیروی انتقال یافته بین FRP و بتن

این روند شامل دو مرحله است. در ابتدا شامل بررسی مهار انتها به صورتی که در فصل A.1 اشاره شده، می باشد. در مرحله دوم باید بررسی شود که تنش برشی τ_b در سطح میانی FRP و بتن، ناشی از تغییر در نیروی کششی در طول FRP، محدود شود. با ملاحظه دو سطح مقطع در فاصله Δx ، که تحت ممانهای M_d و $M_d + \Delta M_d$ قرار گرفته اند، τ_b برابر است با :

$$\tau_b = \frac{\Delta N_{fd}}{b_f \Delta x} \quad (A3-1)$$

که در آن ΔN_{fd} تغییرات نیروی محوری FRP بین دو مقطع می باشد. برای تحقیق حالت حد نهایی، تنش برشی τ_b باید به مقاومت برشی اتصال طراحی محدود شود که در بیشتر موارد عملی برابر است با مقاومت برشی اتصال بتن، f_{cbd} . با اتخاذ ضوابط گسیختگی مور - کولمب در حالت تنش عمودی صفر، مقاومت اتصال حدود 1.8 برابر مقاومت کششی می گردد؛ یعنی اینکه :

$$f_{cbd} = 1.8 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} \quad (A3-2)$$

رابطه (A3-1) می تواند با ملاحظه $N_{rd} = N_{fd} + N_{sd}$ و $N_{rd} = M_d / z_m$ ساده شود. براساس اینکه آیا فولاد داخلی تسلیم می شود یا نه، N_{rd} و ΔN_{fd} می تواند به صورت تقریبی از روابط زیر بدست آیند.

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} : N_{rd} = N_{fd} \left(1 + \frac{A_{s1} E_s \varepsilon_s}{A_f E_f \varepsilon_f} \right) \approx N_{fd} \left(1 + \frac{A_{s1} E_s}{A_f E_f} \right) \quad (A3-3a)$$

$$\text{or } \Delta N_{fd} \approx \frac{\Delta M_d}{z_m \left(1 + \frac{A_{s1} E_s}{A_f E_f} \right)}$$

$$\varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd} : N_{rd} = N_{fd} + A_{s1} f_{yd} \quad \text{or } \Delta N_{fd} = \frac{\Delta M_d}{z_m} \quad (A3-3b)$$

با داشتن روابط $\Delta M_d / \Delta x \sim V_d$ و $z_m = (z_s \pm z_f) / 2 \sim 0.95d$ دو رابطه بالا به صورت زیر بازنویسی می شوند :

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} : \quad \frac{V_d}{0.95db_f \left(1 + \frac{A_{s1}E_s}{A_fE_f} \right)} \leq f_{cbd} \quad (A3-4a)$$

$$\varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{yd} : \quad \frac{V_d}{0.95db_f} \leq f_{cbd} \quad (A3-4b)$$

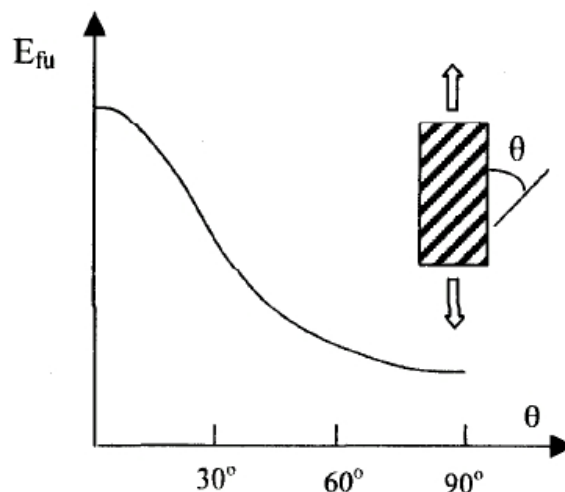
در رابطه (A3-3a) فرض شده است که $\varepsilon_{sl} / \varepsilon_f \sim 1$. از رابطه (A3-4a) می توان ملاحظه نمود که این فرض در ناحیه ایمن قرار دارد. به جهت عرض قابل توجه از اتصال بین لایه ای که معمولا در دسترس است، بررسی رابطه (A3-4) عموما به عنوان رابطه بحرانی تلقی نمی شود. مشکلات اتصال ممکن است در حالتی که فولاد داخلی تسلیم شده و یا نیروی برشی بالایی ایجاد شود، رخ دهد. یک فرض مهم در این روش آنستکه اگر شرایط ذکر شده در بالا بررسی شود، ترکهای خمشی ایجاد شده تنها به صورت ترکهای ریز پایداری در سطح بین بتن و FRP بوده و جداشدگی موضعی موجب گسیختگی اتصال بتن و FRP نخواهد شد. بنابراین هیچ محدودیت اضافی در کرنش FRP نباید استفاده شود.

فصل پنجم : تقویت برشی و پیچشی

1-5 : مقاومت سازی برشی

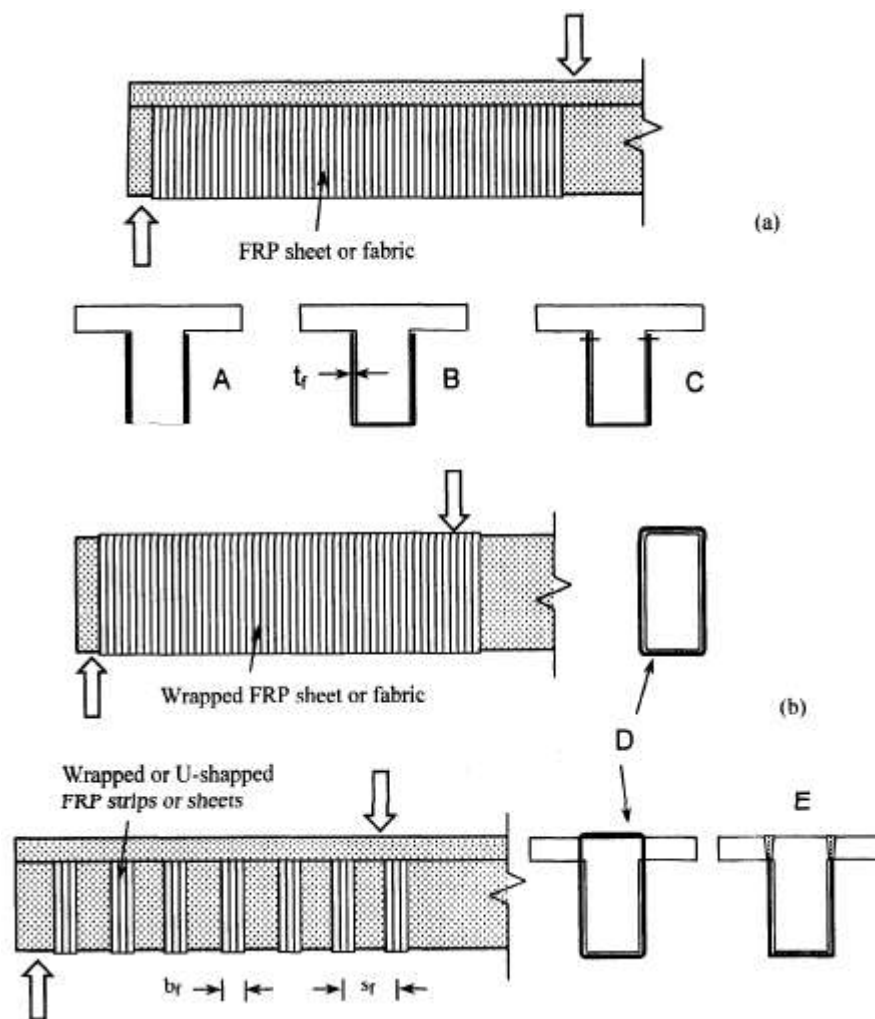
1-1-5 : کلیات

مقاومت سازی برشی اعضای بتن آرمه با استفاده از FRP به وسیله چسباندن تقویت کننده های خارجی با راستای اصلی الیافها موازی با ماکزیمم تنشهای کششی اصلی (حالت بهینه) صورت می گیرد. شکل 1-3 رابطه بین مدول الاستیسیته FRP، E_{fu} را با راستای الیاف نشان می دهد. در بیشتر حالتیهای رایج از اعضای سازه ای که تحت بار جانبی قرار می گیرند، بار وارده عمود بر محور عضو است (مثلا تیر تحت بار ثقلی یا ستونهای تحت بار زلزله) ؛ در نتیجه راستای ماکزیمم تنشهای اصلی در نواحی برشی بحرانی دارای زاویه ای حدود 45° نسبت به محور عضو خواهد بود. با این حال، معمولا FRP به طور عملی به گونه ای نصب می شود که راستای الیافهای آن عمود بر محور عضو است (شکل 2-3).



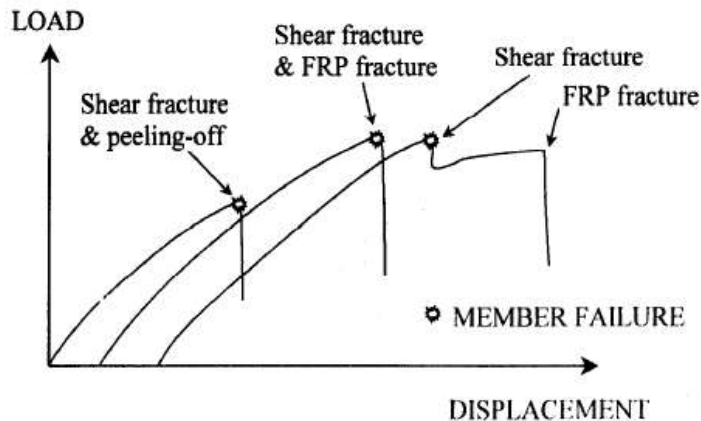
شکل 3-1: رابطه بین مدول الاستیسیته FRP و راستای الیافها

بررسی جزئیات مقاومسازی برشی اعضای بتن آرمه نسبتاً محدود بوده و بحث انگیز می باشد. به استثنای چند مورد، بیشتر محققین رفتار مواد FRP را در برش همانند خاموتهای فولادی داخلی ایده آل کرده اند، با این فرض که سهم FRP، ناشی از ظرفیت تحمل تنشهای کششی الیافها تا حد کرنش نهایی آن و یا مقدار کمتری از آن (مثلاً 0.005 یا یک کسر ثابت از ϵ_{fu}) می باشد. در مطالعات اخیر نشان داده شده است هنگامی که اعضای بتنی به ظرفیت برشی خود می رسند (قبل از آنکه دچار گسیختگی برشی شوند)، FRP در راستای الیافهای خود به اندازه کرنشی کمتر از کرنش نهایی ϵ_{fu} کشیده می شود. این کرنش به عنوان کرنش مؤثر ϵ_{fe} شناخته می شود. با ضرب کرنش مؤثر در مدول الاستیسیته FRP، E_f ، و سطح مقطع آن، می توان نیروی تحمل شده توسط FRP در گسیختگی برشی عضو را محاسبه نمود.



شکل 3-2: نمایش شماتیک اعضای بتن آرمه مقاومسازی شده در برش با FRP: (a) ورقه ها و یا فابریکهای FRP چسبیده به جان؛ (b) FRPهای دور پیچ شده و یا U شکل (نوع نشان داده شده در D قابل استفاده برای همه تیرها و ستونها می باشد)

امکان محاسبه کرنش مؤثر FRP با توجه به سختی آنالیز بسیار مشکل می‌باشد. اما براساس مدلسازی ساده شده و با استفاده از داده های آزمایشگاهی قابل تخمین است. عامل تخمین $\varepsilon_{f,e}$ ، تشخیص و شناخت حالت مواد FRP در گسیختگی برشی اعضای بتن آرمه می باشد. دقت شود که اغلب، گسیختگی از کشش قطری بتن معین می‌شود. همانطور که در شکل 3-3 دیده می شود، ممکن است این گسیختگی به صورت زود هنگام ناشی از جداسازی یا بعد از آنکه FRP به مقدار قابل توجهی کشیده شود، اتفاق افتد. در حالت کشیده شدن FRP ممکن است کامپوزیت دقیقاً در بار ماکزیمم و یا به مقدار کمی بعد از آن ناشی از تنشهای بالا در نزدیکی ترکهای قطری، پاره شود.



شکل 3-3: نمایش شماتیک از پاسخ گسیختگی برشی

می توان استدلال کرد که در حالت حد نهایی معمولاً یک مقدار مشخص از جداسازی FRP در سطح بین بتن و کامپوزیت پیش بینی می شود، حتی اگر گسیختگی نهایی به طور همزمان با جداسازی رخ ندهد. این موضوع به واسطه کرنش بیش از حد FRP بوده که نتیجه آن ناسازگاری کرنشی بین مواد بستر (بتن) و ترک خوردگی های متعاقب آن است. این ترک خوردگی ها موجب تمرکز تنش شده که باعث پیدایش جداسازی موضعی می گردد. بنابراین $\varepsilon_{f,e}$ بسیار وابسته به طول اتصال FRP، رابطه اش با " طول مؤثر اتصال " (به واسطه اینکه تنش اتصال برشی بین سطوح FRP و بتن به وجود آمده است) و رابطه اش با " طول گسترش یافته " (که به عنوان طول لازم برای رسیدن به گسیختگی کششی FRP قبل از جداسازی تعریف می شود) می باشد. جدا از شرایط اتصال (آماده سازی سطح، اجرا و غیره)، طول گسترش یافته بستگی به سختی محوری FRP که با عبارت $E_f \rho_f$ بیان می شود، داشته و نسبت عکس با برش، که همان تنش کششی بتن است، دارد. امروزه تأیید شده است که مقاومت کششی بتن متناسب با f_{cm} بوده که در آن f_{cm} مقاومت فشاری بتن می باشد. بنابراین می توان گفت که $\varepsilon_{f,e}$ وابسته به مقدار $E_f \rho_f / f_{cm}^{2/3}$ خواهد بود. این وابستگی با نتایج تجربی تأیید می شود.

5-1-2: مدل طراحی در حالت حد نهایی

5-1-2-1: اعضای با مقطع مستطیلی، T شکل و T شکل دویل

براساس مدل پیشنهاد شده تقویت کننده های FRP شبیه فولاد داخلی عمل می کنند (با قبول اینکه FRP تنها تنشهای نرمال را در راستای اصلی مواد خود تحمل می کند). فرض می شود که در حالت حد نهایی در برش (کشش قطری بتن) در FRP یک کرنش مؤثر در راستای الیافهایش، $\varepsilon_{f,e}$ ، به وجود می آید (توجه : این کرنش کششی اصلی نبوده چراکه ممکن است عمود بر ترک فرض شود). کرنش مؤثر، $\varepsilon_{f,e}$ ، به طور کلی کمتر از کرنش گسیختگی کششی، ε_{fu} ، می باشد. بنابراین، ظرفیت برشی عضو تقویت شده براساس EC2 توسط رابطه زیر محاسبه می شود :

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}) \quad (1-3)$$

سهم FRP در ظرفیت برشی، V_{fd} ، به صورت زیر تعیین می گردد (شکل 3-4) :

$$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{fd,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (2-3)$$

که در آن :

$\varepsilon_{fd,e}$: مقدار طراحی کرنش مؤثر FRP

b_w : حداقل عرض سطح مقطع بالای عمق مؤثر

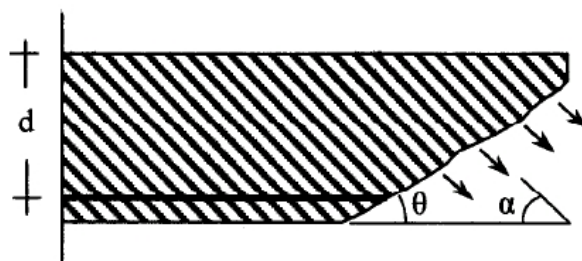
d : عمق مؤثر سطح مقطع

ρ_f : نسبت تقویت کننده های FRP که معادل $2t_f \sin \alpha / b_w$ برای تقویت کننده های برشی یکپارچه چسبیده با ضخامت t_f است یا معادل $(b_f / s_f)(2t_f / b_w)$ برای تقویت کننده های FRP با شکل نوارهای با عرض b_f و فاصله s_f می باشد (شکل 3-2)

E_{fu} : مدول الاستیسیته FRP در راستای اصلی الیافها

θ : زاویه ترک قطری نسبت به محور عضو، فرض می شود برابر 45° است

α : زاویه بین راستای اصلی الیافها و محور طولی عضو



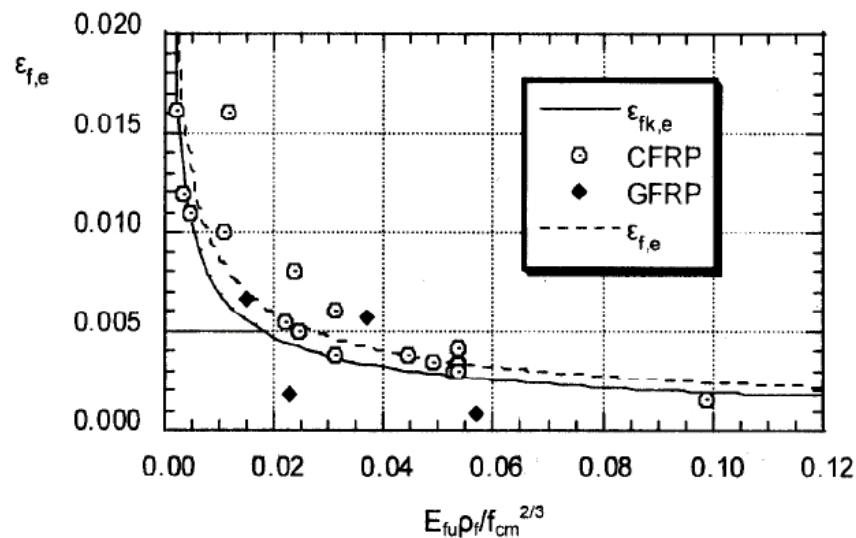
شکل 3-4 : سهم FRP در ظرفیت برشی

مقدار کرنش مؤثر طراحی FRP برابر است با مقدار مشخصه $\varepsilon_{fk,e}$ که بر ضریب ایمنی جزئی γ_f تقسیم شده است. به علت کمبود داده های کافی، می توان مقدار $\varepsilon_{fk,e}$ را با ضرب مقدار متوسط کرنش مؤثر FRP، $\varepsilon_{f,e}$ ، در ضریب کاهش k به طور تقریبی به صورت زیر بدست آورد :

$$\varepsilon_{fk,e} = k \varepsilon_{f,e} \quad k = 0.8 \quad (3-3)$$

اگر گسیختگی به صورت گسیختگی FRP باشد (همراه با و یا بدنبال کشش قطری)، ضریب ایمنی جزئی از جدول 1-1 بدست آمده و اگر گسیختگی اتصال منجر به حاکم شدن پدیده جداشدگی گردد مقدار ضریب ایمنی برابر خواهد بود با : $\gamma_f = \gamma_{fb} = 1.3$.

بعضی محققین پیشنهاد کرده اند که به جهت حفظ یکپارچگی بتن و تأمین عملکرد مکانیزم قفل شدگی سنگ دانه ها، کرنش مؤثر به مقدار ماکزیمم 0.006 محدود گردد. چنین محدودیتی تنها باید وقتی اعمال شود که عملکرد این مکانیزم بسیار مهم است. با بررسی و مرور نتایج تجربی مقاومت سازی برشی اعضای بتن آرمه به کمک ورقه های FRP منحنی هایی حاصل از این نتایج به صورت نشان داده شده در شکل های 3-5 و 3-6 بدست آمده است.



شکل 3-5: اثر کرنش FRP براساس تغییرات $E_{fu} \rho_f / f_{cm}$ - حالت گسیختگی برشی همراه با جداشدگی FRP

- دورپیچ کامل (یا مهاربندی مناسب) CFRP، کنترل گسیختگی FRP (شکل 3-2b):

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \quad (4a-3)$$

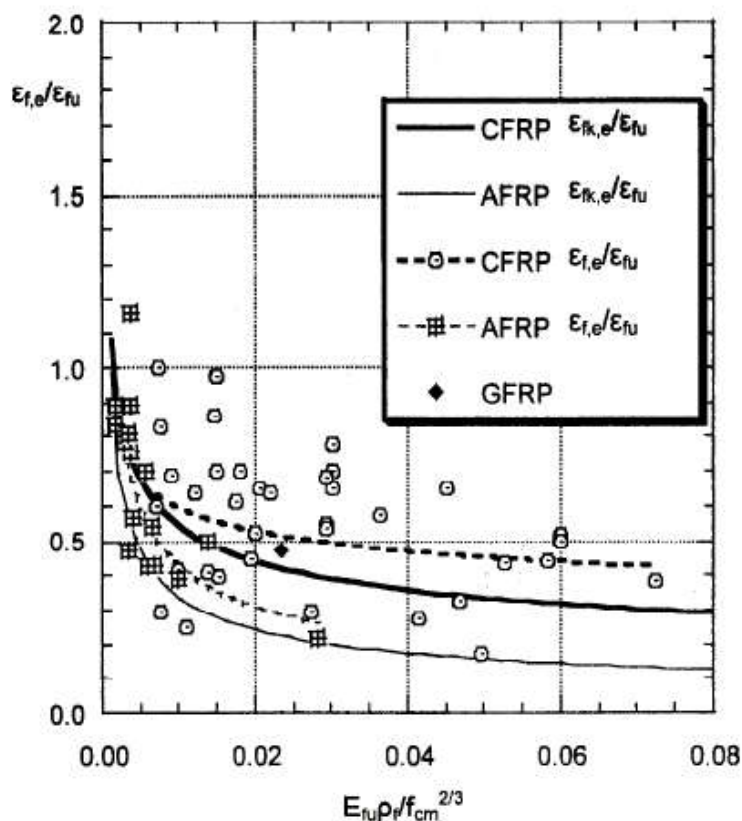
- پوشش در سطوح جانبی و یا U شکل CFRP (شکل 3-2a):

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[\underbrace{0.65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3}}_{\text{Peeling-off}}, \underbrace{0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu}}_{\text{fracture}} \right] \quad (4b-3)$$

- دورپیچ کامل AFRP (کنترل گسیختگی):

$$\varepsilon_{f,e} = 0.048 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.47} \varepsilon_{fu} \quad (4c-3)$$

دقت شود که در همه روابط f_{cm} ، بر حسب MPa و E_{fu} بر حسب GPa است.



شکل 3-6: کرنش نرمالایز شده FRP بر حسب مؤلفه $E_{fu}ρf/f_{cm}$ - گسیختگی برشی همراه و یا بدنبال

پارگی FRP

در اغلب موارد در عمل، مقدار کرنش مؤثر بدست آمده از روابط بالا برای FRP بیشتر از کرنش تسلیم خاموت‌های فولادی داخلی است. به منظور تکمیل بحث باید اشاره شود که اگر این چنین نبود، باید کرنش مؤثر FRP برای محاسبه سهم فولاد داخلی هم در نظر گرفته شود.

5-1-2-2: توصیه های طراحی

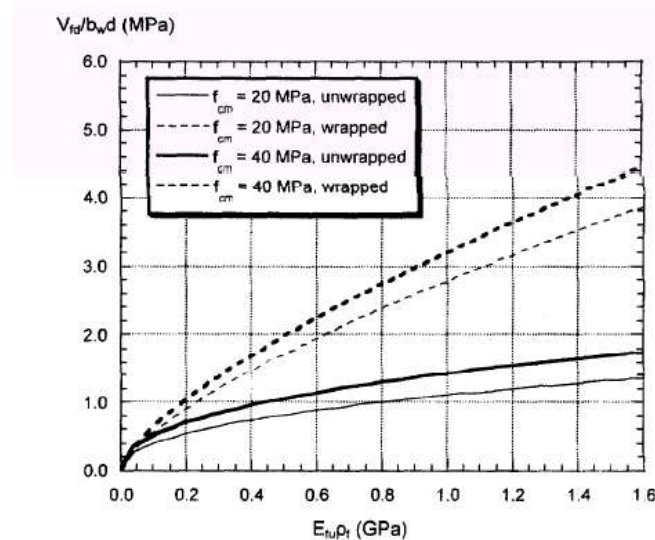
با یک بررسی دقیق روابط بالا (تنها برای CFRP به واسطه اینکه اطلاعات مربوط به AFRP و GFRP بسیار محدود و کم می باشد) می توان منحنی های شکل 3-7 را رسم نموده و نتایج زیر را استخراج نمود:

(1) اگر گسیختگی حاکم، جداشدگی همراه با گسیختگی برشی بود (برای مثال در دورپیچ U شکل و نصب در سطوح جانبی)، افزایش در ظرفیت برشی با $E_{fu}ρf$ نسبتاً کم بوده اما مقاومت بتن نقش مهمی را بازی می کند.

(2) اگر گسیختگی حاکم گسیختگی برشی همراه با و یا بدنبال پارگی CFRP باشد (مثلاً در دورپیچ کامل) افزایش در ظرفیت برشی با E_{frp} بسیار قابل توجه بوده، اما نقش بتن در درجه دوم اهمیت قرارخواهدگرفت.

واضح است که دورپیچ کامل بسیار مؤثرتر نسبت به پوشش قسمتی از دور مقطع می باشد. هنگامی که دورپیچ کامل میسر نیست (برای مثال، هنگامی که دسترسی به وجه بالای تیرهای T شکل وجود ندارد)، توصیه می شود که نوارهای FRP به ناحیه فشاری عضو بتن آرمه چسبانده شوند. همچنین توصیه می شود که با استفاده از مهاربندی مکانیکی ساده و یا چسباندن انتهای نوارها در شکافهای سراسری ایجاد شده در قسمت بال تیر T شکل از پدیده جدشدگی جلوگیری گردد.

یک توصیه در جهت طراحی مناسب و صحیح از اعضای بتن آرمه تقویت شده در برش با FRP که باید خاطرنشان شود، آن است که فاصله نوارها، s_f ، در صورتی که راستای الیافهای کامپوزیت در جهت عمود بر محور عضو باشد، نباید از حد $(0.9d - bf/2)$ برای سطح مقطعهای مستطیلی شکل و از حد $(d - hf - bf/2)$ برای تیرهای T شکل (با ضخامت دال برابر h_f) بیشتر گردد ؛ بنابراین با ارضای این شرط، هیچ ترک قطری تشکیل نمی شود مگر آنکه یکی از نوارها را قطع کند.



3-2-1-5 : ملاحظات مربوط به طول اتصال FRP

یکی از معایب راه اشاره شده در بالا آن است که طول اتصال FRP به طور واضح مشخص نمی گردد. اما با مرور دلایل زیر عدم اهمیت این مسئله توجیح می گردد :

- (1) برای سازه ها با ابعاد حقیقی، طول مؤثر اتصال عموماً یک کسر کوچکی از عمق عضو بتن آرمه می باشد و بنابراین بخش بی اثر FRP دربرگیرنده کسر کوچکتری از کل می گردد.
- (2) اثر طول اتصال کوتاه برای FRP از روند کالیبره کردن و تطبیق دادن داده های آزمایشگاهی و تجربی محاسبه می شود.

- (3) اعمال پیچیدگی اضافی در روش (به منظور محاسبات طراحی) نامطلوب می باشد.

به هر حال می توان ماکزیمم نیروی قابل تحمل توسط FRP قبل از جداسدگی را بر اساس مفاهیم مطرح شده در فصلهای 2-2-2 و 1-2-3-2، تخمین زد.

4-2-1-5: اعضای دارای سطح مقطع دایره ای

مفاهیم ارائه شده در چند فصل اخیر، اساساً مربوط به اعضای بتن آرمه مستطیلی (یا شبیه مستطیلی) است. اگر سطح مقطع دایره ای باشد (مانند بعضی از ستونها)، سهم FRP (دورپیچ شده دور ستون) در ظرفیت برشی به وسیله مقاومت کششی در پوشش FRP کنترل می شود، اما ممکن است با یک مقدار ماکزیمم وابسته به گشادشدگی بیش از اندازه بتن ناشی از قفل شدگی سنگدانه ها (یکی از مکانیزمهای مهم انتقال نیروی برشی) در ترکهای مایل محدود شود. با محدود کردن میزان گشادشدگی بتن، که همان کرنش شعاعی است و برابر کرنش حلقوی FRP می باشد، به یک مقدار ماکزیمم به نام ϵ_{max} ، به سادگی می توان نشان داد که برای ترکهای مایل تشکیل شده با زاویه θ نسبت به محور ستون، سهم FRP در ظرفیت برشی از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$V_{fd} = \frac{\epsilon_{max}}{\gamma_f} E_{fu} \rho_f \frac{1}{2} \frac{\pi D^2}{4} \cot \theta \quad (5-3)$$

که در آن D قطر ستون و ρ_f نسبت حجمی FRP است. با دقت در رابطه (5-3) می توان به آسانی فهمید که اگر فرض شود در گسیختگی برشی همه مواد FRP یک ترک برشی را قطع کنند، کرنش یکنواختی برابر ϵ_{max} ایجاد خواهد شد. شواهد تجربی پیشنهاد می کند که ϵ_{max} برابر 0.006 در نظر گرفته شود.

3-1-5: حالت حد سرویس

تقویت کننده های چسبیده به صورت خارجی نباید در حالت حد سرویس دچار جداسدگی گردند. بنابراین مهم است که مشکلات مربوط به نفوذ رطوبت، گسترش ترک، و غیره اجتناب شود. برای بررسی این موضوع، کرنش در FRP در حالت حد سرویس، $\epsilon_{fk,e}$ ، باید به مقدار $0.8f_{yk}/E_s$ محدود شود، مگر اینکه مقداری غیر از این به وسیله سازنده سیستم FRP ارائه گردد.

2-5: مقاوم سازی پیچشی

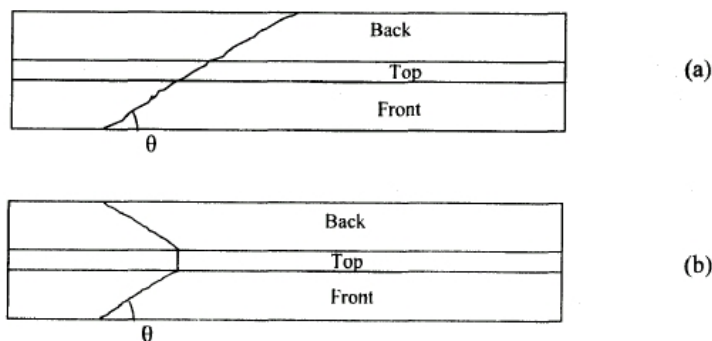
1-2-5: کلیات

مقاوم سازی پیچشی ممکن است در تیرها و ستونهای قدیمی و همچنین در شاه تیر پلها لازم باشد. اصول مطرح شده در مقاوم سازی برشی در مورد پیچش نیز معتبر است با کمی اختلاف که در قسمتهای زیر مشخص شده است.

2-2-5: مدل طراحی در حالت حد نهایی، سطح مقطع مستطیلی

ترکهای پیچشی به علت همان مکانیزم ترکهای برشی، تشکیل می شوند. تفاوت اساسی بین ترکهای برشی و ترکهای پیچشی در شکل و الگوی ترک آنهاست. ترکهای پیچشی همانند ترکهای برشی مایل بوده اما دارای راستای مختلفی در وجه های پشت به پشت هم از مقطع هستند که به صورت یک طرح مارپیچی می باشد (شکل 3-8 ملاحظه گردد). بنابراین، FRP نصب شده با راستای الیاف با زاویه α

نسبت به محور عضو ممکن است در یک وجه از نظر توقف ترکهای قطری بسیار مؤثر بوده و در یک وجه دیگر مؤثر نباشد. این نکته باید مورد توجه قرار گرفته و در طراحی به حساب آید.



شکل 3-8: طرح ترک خوردگی (a) پیچشی؛ (b) برشی

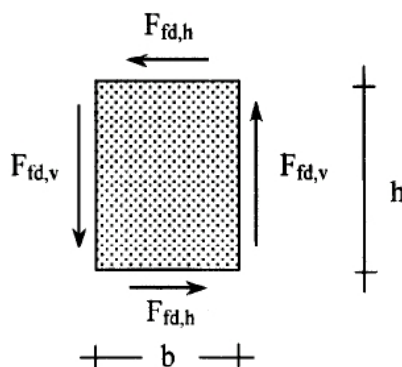
یک پوشش FRP تنها هنگامی در ظرفیت پیچشی همکاری می کند که به طور کامل سطح مقطع عضو را دورپیچ نماید؛ بنابراین نیروهای کششی تحمل شده به وسیله FRP در هر وجه از سطح مقطع می تواند یک حلقه یکپارچه را تشکیل دهد (شکل 3-9 ملاحظه گردد). این نیروها برای حالتی که $\alpha = 90^\circ$ است، مشابه با محاسبات مربوط به برش (که در آن مکانیزم خرابایی فرض می شود) به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$F_{fd,v} = \varepsilon_{fd,e} E_{fu} \frac{t_f b_f}{s_f} h \cot \theta \quad (6a-3)$$

$$F_{fd,h} = \varepsilon_{fd,e} E_{fu} \frac{t_f b_f}{s_f} b \cot \theta \quad (6b-3)$$

بنابراین سهم FRP در ظرفیت پیچشی، T_{fd} ، به وسیله رابطه زیر تعیین می گردد (شکل 3-9):

$$T_{fd} = F_{fd,v} b + F_{fd,h} h = 2 \varepsilon_{fd,e} E_{fu} \frac{t_f b_f}{s_f} b h \cot \theta \quad (7-3)$$



شکل 3-9: نیروهای تحمل شده به وسیله FRP

مقدار کرنش مؤثر طراحی FRP در راستای اصلی آن با آنالیز قبلی انجام شده برای برش در حالت دورپیچ کامل به صورت زیر تعیین می شود:

$$\varepsilon_{fd,e} = \varepsilon_{fk,e} / \gamma_f$$

که در آن :

$$\varepsilon_{fk,e} = k\varepsilon_{f,e} \quad k = 0.8 \quad (3-3)$$

برای حالت گسیختگی ناشی از پارگی FRP، ضریب ایمنی از جدول 1-1 استخراج می گردد. اگر جداسازی محیطی منجر به حاکم شدن گسیختگی ناشی از جداسازی گردد، در نتیجه مقدار ضریب ایمنی برابر خواهد بود با: $\gamma_f = \gamma_{fb} = 1.30$.

$$CFRP : \varepsilon_{f,e} = 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \quad (4a-3)$$

$$GFRP : \varepsilon_{f,e} = 0.048 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.47} \varepsilon_{fu} \quad (4c-3)$$

آزمایشهای انجام گرفته بر روی اعضای بتنی تقویت شده با FRP در پیچش بسیار محدود می باشد. برخی آزمایشهای انجام شده توسط محققین نشان می دهد که مقاومت سازی پیچشی تیرهای با مقطع مستطیلی با دورپیچ کردن توسط CFRP امکان پذیر است.

3-2-5 : حالت حد سرویس

همانطور که در مقاومت سازی برشی مطرح شد، تقویت کننده های چسبیده به صورت خارجی نباید در حالت حد سرویس دچار گسیختگی گردند. جهت بررسی این موضوع، کرنش در FRP، $\varepsilon_{fk,e}$ ، باید به مقدار $0.8 f_{yk} / E_s$ محدود شود، مگر آنکه مقدار خاصی توسط سازنده سیستم FRP ارائه گردد.

فصل ششم : محصوریت

1-6 : مقدمه

عموماً محبوس کردن برای اعضای تحت فشار کاربرد داشته و با هدف افزایش ظرفیت تحمل بار، یا در مورد مقاومت سازی لرزه ای، جهت افزایش شکل پذیری استفاده می گردد. روشهای محبوس کردن قدیمی بر استفاده از حلقه های فولادی یا پوشش های فولادی تکیه دارد. در حقیقت به خوبی شناخته شده است که افزایش اثر حبس کنندگی، مقاومت و شکل پذیری بتن را افزایش داده و بعلاوه از لغزش و کماتش آرماتورهای طولی جلوگیری می کند. در مسائل لرزه ای، روشهای مقاومت سازی موجود عموماً براساس افزایش فشار حبس کنندگی در نواحی محل تشکیل مفصل پلاستیک یا بر روی کل عضو صورت می گیرد. این روش همچنین در نواحی روی هم افتادگی لبه ای مفید است.

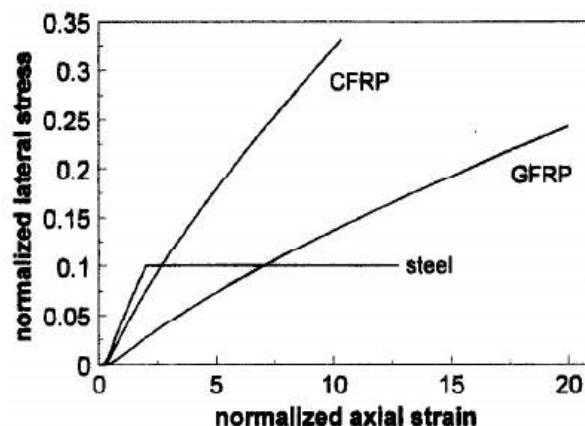
مواد کامپوزیت FRP اخیراً به عنوان یک وسیله حبس کنندگی مطمئن برای اعضای بتن آرمه شناخته شده اند. مطالعات تجربی مختلفی قابلیت حل این مشکل را به وسیله مواد FRP تأیید کرده است. همچنین تحقیقات تحلیلی و عددی جاری در جهت معرفی قوانین ساختاری مناسب برای مدل‌های حبس شده به وسیله FRP به خدمت گرفته شده اند. در زمینه طراحی پوششهای FRP کارهای تجربی ارزنده ای توسط Seible et al. (1995) صورت گرفته و کارهای تحلیلی و عددی نیز به وسیله Monti et

al. (1999) با هدف معرفی روابط طراحی مناسب انجام شده است که ضخامت پوشش FRP را به گونه ای بهینه می کند که عملکرد آن در جهت مقاوم سازی مطلوب گردد. باید تأکید شود که در اغلب اوقات، افزایش در مقاومت به اندازه افزایش در شکل پذیری اهمیت نداشته و مورد توجه قرار نمی گیرد.

6-2: بتن محبوس شده با تقویت کننده FRP خارجی تحت بارگذاری محوری

1-2-6: کلیات

برخلاف فولاد که بعد از تسلیم شدگی فشار محبوس کنندگی ثابتی را اعمال می کند، FRP دارای رفتار الاستیک تا لحظه گسیختگی بوده و بنابراین عمل حبس کنندگی (غیر فعال) خود را بر روی نمونه های بتنی تحت بار محوری، در یک روش متفاوت نسبت به فولاد اعمال می کند. همانطور که در شکل 1-4 دیده می شود، فولاد در یک مقدار کرنش نرمالایز شده بتن تسلیم شده و سپس از این نقطه به بعد، یک فشار حبس کنندگی جانبی ثابتی را اعمال می کند در حالی که اثر حبس کنندگی ناشی از FRP به طور مداوم افزایش می یابد. مقدار این عملکرد بستگی به انبساط جانبی بتن دارد. بنابراین، در مدل های بتن حبس شده با FRP باید اثر متقابل بین انبساط جانبی بتن محبوس شده و سیستم حبس کننده بررسی شود. همچنین باید روابط تعیین کننده مقاومت و کرنش نهایی بتن محبوس شده با FRP، این رفتار ویژه را مورد توجه قرار دهند. در فصل های زیر، مدلسازی حبس کنندگی FRP مورد بحث قرار خواهد گرفت.



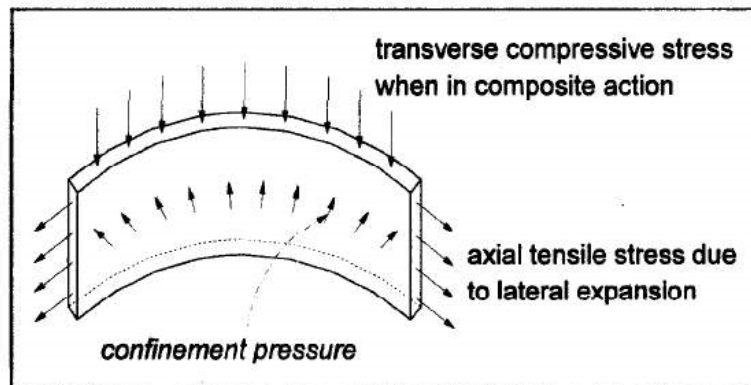
شکل 1-4: مقایسه عملکرد حبس کنندگی فولاد و مواد FRP

6-2-2: کرنش پیرامونی نهایی مؤثر

مقاومت نهایی بتن محبوس شده به طور تنگاتنگی وابسته به کرنش گسیختگی تقویت کننده های دورپیچ شده FRP بر روی عضو محبوس شده دارد. شواهد تجربی نشان می دهد که این کرنش گسیختگی پیرامونی اغلب در کرنشی کمتر از کرنش نهایی ϵ_{fit} که از آزمایش های کششی استاندارد ورقه FRP بدست می آید، رخ می دهد. این کاهش نتیجه چندین علت می باشد که عبارتند از:

- حالت سه محوری تنش از تقویت کننده دورپیچ شده. این موضوع در شکل 2-4 نشان داده شده است. در این شکل مفهوم عملکرد کامپوزیت نشان داده شده به گونه ای که کامپوزیت قادر است همزمان با اثر محبوس کنندگی، قابلیت تحمل بارهای طولی را نیز داشته باشد. این موضوع بستگی به

راستای قرارگیری الیافها و خصوصیات بین صفحه ای اتصال دارد؛ همچنین خصوصیات بین صفحه ای اتصال خود به تعداد زیادی عامل بسته است که می توان از جمله سختی چسب بین FRP و بتن، شرایط و نحوه آماده سازی سطح را نام برد. در حالتی که در کامپوزیت واکنشی نباشد، پوشش تنها متحمل کرنشهای عرضی بوده و بنابراین گسیختگی به صورت حالت کششی رخ خواهد داد که می تواند ناشی از پاره شدن الیافها و یا جداشدگی بین لایه ها در کرنش محیطی ϵ_j کمی کمتر از ϵ_{fu} رخ دهد زیرا که گرادیان تنش در پوشش ناشی از فشار حبس کنندگی دارای یک اثر مشخص و معین بر مقاومت نهایی است. در حالت عملکرد کامل کامپوزیت، پوشش هر دو کرنشهای عرضی و طولی را تحمل خواهد کرد. سپس با رشد کمانش های موضعی و جداشدگی ها، کرنش و تنش نهایی کاهش می یابد. بنابراین، گسیختگی در یک کرنش محیطی کمتر از حالتی که در کامپوزیت واکنشی وجود ندارد اتفاق می افتد.



▪ کیفیت اجرا. منظور این است که اگر الیافها به صورت موضعی به طور غیر مؤثر ناشی از وجود حباب های هوا و یا عدم آماده سازی مناسب، قرارگیرند، قسمتی از کرنش محیطی جهت کشش الیافها مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین، ممکن است الیافها در محل گوشه های تیز و یا جلو آمدگی های موضعی، آسیب ببینند.

▪ شکل انحنای تقویت کننده های دورپیچ شده، مخصوصا در گوشه های با شعاع کم.

▪ اثرات ابعادی در هنگامی که از چندین لایه استفاده می شود.

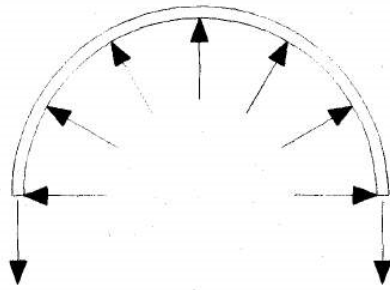
در ادامه، کرنش محیطی نهایی مؤثر برای تمامی اثرات اشاره شده در بالا محاسبه می شود که می توان آن را با ϵ_{ju} نشان داد. مقادیر مناسب برای کرنش طراحی محیطی نهایی مؤثر، ϵ_{ju} ، باید در محاسبات در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه اطلاعات محدودی در این زمینه وجود دارد، مقادیر مناسب ϵ_{ju} باید به وسیله شواهد تجربی تایید گردد.

3-2-6: فشار محبوس کنندگی جانبی

برای نمونه های بتنی استوانه ای که تحت بار تک محوری قرار گرفته اند و توسط حلقه ها یا دورپیچ های فولادی محبوس شده اند، فشار حبس کنندگی مؤثر، f_l ، براساس تابعی از نسبت حجمی فولادهای عرضی، ρ_{st} ، و تنش تسلیم آن، f_y ، به صورت زیر محاسبه می شوند (شکل 3-4):

$$f_l = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_y \quad \text{with} \quad \rho_{st} = \frac{4A_{st}}{sd_s} \quad (1-4)$$

که در آن k_e ، ضریب اثر کمائی ؛ s ، فاصله حلقه ها یا گام دورپیچ ها ؛ A_{st} ، سطح مقطع فولاد عرضی و d_s ، قطر حلقه و یا دورپیچ فولادی ؛



شکل 3-4: فشار حبس کنندگی جانبی ناشی از پوشش

در مورد بتن استوانه ای حبس شده با تقویت کننده های FRP که دارای الیافهایی منظم شده به صورت محیطی بوده و کل سطح بتن را پوشانده اند، فشار حبس کنندگی جانبی σ_l می تواند مشابه با رابطه (4-1) به صورت زیر محاسبه شود :

$$\sigma_l = \frac{1}{2} \rho_j \sigma_j = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{j=l} \quad \text{with} \quad \rho_j = \frac{4t_j}{d_j} \quad (2a-4)$$

که در آن ρ_j ، نسبت حجمی پوشش FRP ؛ σ_j ، تنش در پوشش FRP ؛ E_j ، مدول مواد کامپوزیت پوشاننده ؛ $\varepsilon_{j=l}$ ، کرنش محیطی در FRP (معادل کرنش جانبی در بتن فرض می شود) ؛ t_j ، ضخامت پوشش FRP و d_j ، قطر پوشش FRP است. باید دقت شود که $k_e = 1$ مربوط به حالت استوانه ای است که به طور کامل دورپیچ شده باشد.

فشار حبس کنندگی جانبی σ_l که به وسیله پوشش حبس کننده اعمال می شود براساس تنش موجود در آن محاسبه می گردد که $\sigma_j = E_j \varepsilon_j < f_j = E_j \varepsilon_{ju}$ در حالی که ماکزیمم حبس کنندگی جانبی، f_l ، در حالت، $\varepsilon_{ju} = \varepsilon_j =$ کرنش نهایی مؤثر پوشش، رخ می دهد.

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju} \quad (2b-4)$$

4-2-6: مدل تنش - کرنش بتن محبوس شده در FRP

روابط زیادی وجود دارد که نشان دهنده ارتباط بین تنش - کرنش بتن تحت حالت های تنش چند محوری است. در مدل Mander که براساس مدل (1973) Popovics می باشد، ثابت شده است که در محاسبه تنش ماکزیمم براساس تنش محبوس کنندگی، بیشترین اثر تنها هنگامی است که پاسخ تک محوری مورد توجه قرارگیرد. در سالهای اخیر محققین کوشش کرده اند که این مدل را برای پوششهای الاستیک FRP بر روی بتن، تعمیم دهند. مشکل اصلی مدل Mander استفاده از یک فشار ثابت حبس کنندگی در طی بارگذاری می باشد. در حقیقت اینگونه نبوده و میزان حبس کنندگی غیر فعال هنگامی افزایش می یابد که بتن به صورت جانبی انبساط یابد و مقدار آن وابسته به رابطه تنش - کرنش ماده حبس کننده می باشد. در مورد اعمال اثر حبس کنندگی با آرماتورهای عرضی فولادی، فرض فشار

حبس کنندگی ثابت هنگامی واقع بینانه است که فولاد تسلیم گردد. بنابراین، مدل Mander در مورد رفتار بتن محبوس شده در فولاد بعد از تسلیم شدن آن، صادق است. برعکس فولاد، FRP تا لحظه گسیختگی رفتار الاستیک داشته و فشار داخلی آن به طور مداوم افزایش می یابد؛ بنابراین این فرض در این حالت صحیح نمی باشد. در متون تحقیقاتی، مدل‌های مختلفی برای بتن محبوس شده با FRP پیشنهاد گردیده است که کوشش دارند رفتار ویژه FRP را مورد ارزیابی قرار دهند. در مدل ارائه شده توسط Spolestra & Monti (1999) یک روند محاسبه تکراری - افزایشی (incremental - itreative) پیشنهاد شده است که در آن روابط ارائه شده توسط Mander با یک مدل بیان کننده کرنش پیرامونی براساس تابعی از کرنش محوری ترکیب شده است. یک روند افزایشی نیز به وسیله Saafi et al. (1999) ارائه گردیده است که بدون تکرار می توان مسئله را حل نمود. این مدل در ناحیه اول رفتار تنش - کرنش بتن را به صورت محبوس نشده در نظر می گیرد به واسطه اینکه در ابتدا انبساط جانبی بتن کوچک می باشد. در ناحیه دوم، فرض می شود عملکرد حبس کنندگی FRP به طور کامل بوده و برای محاسبات از اصول مدل ارائه شده توسط Richart et al. (1929) استفاده می گردد با این تفاوت که ضرایب آن با توجه به نتایج تجربی تعیین می گردد. برای این منظور یک روش دیگر توسط Samaan et al. (1998) ارائه گردید. این مدل (یک نسخه نرمالایز نشده از روابط معروف Menegotto - Pinto برای فولاد اما با یک برگشت براساس پارامترها) براساس مشاهداتی که در نرخ گشادشدگی بتن محبوس شده با FRP (تغییر در کرنش محیطی نسبت به کرنش محوری) بوده که به یک مقدار مجانب نزدیک می شود. بنابراین جهت مدل کردن عملکرد مهارکنندگی FRP تنها لازم است که فشار محبوس کنندگی نهایی و سختی دورپیچ کنندگی آن بدون هیچ نیازی به یک روند افزایشی، محاسبه شود. پارامترهای مدل لازم است که به صورت تجربی کالیبره شوند. اگرچه مدل‌های اشاره شده در بالا رفتار ویژه ای از FRP محبوس کننده را در نظر گرفته اند، هرکدام از آنها دارای مزایا و معایبی می باشند. مدلی که توسط Samman ارائه گردید، ساده ترین روش بوده اما بسیار وابسته به کالیبراسیون تجربی هدایت شده توسط ارائه دهنده این روش می باشد. (Matthys 2000) براساس کارهای تجربی و تحلیلی استدلال کرده است که این مدل اخیر و همچنین مدل ارائه شده توسط Saafi et al. (1999) نیاز به ملاحظات بیشتر و بررسی های بیشتری در رابطه با داده های تجربی از نمونه های با سایز بزرگ داشته و همچنین بیان نموده است که از میان سه مدل پیشنهادی، مدل مطرح شده توسط Spoelstra & Monti (Matthys 2000) پیچیده ترین محاسبات را دارا می باشد. با اینحال به نظر می رسد مدل اخیر دقیقترین مدل بوده (اگرچه باید بررسیهای اضافی بر روی داده های تجربی انجام شود)، و چیزی که مهمتر می باشد آن است که می توان به آسانی آن را برای بارهای نوسانی تعمیم داد. این مدل در زیر ارائه گردیده است.

مدل Spoelstra - Monti براساس فرمول زیر (Popovics 1973) می باشد :

$$\sigma_c = \frac{f_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (3-4)$$

که در آن :

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (4-4)$$

که در آن ε_{cc} کرنش فشاری در مقاومت ماکزیمم حبس کنندگی، f_{cc} است. مقاومت ماکزیمم حبس کنندگی، f_{cc} براساس یک مؤلفه فشار محبوس کنندگی مؤثر ثابت $\sigma_l < f_l$ از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$\frac{f_{cc}(\sigma_l)}{f_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma_l}{f_{co}}} - 2 \frac{\sigma_l}{f_{co}} - 1.254 \quad (5-4)$$

برای تعیین رفتار ویژه FRP، روند زیر ارائه شده است. پاسخ تنش محوری σ_c از بتن مسلح تحت کرنش محوری فشاری ε_c به صورت زیر بیان می گردد :

$$\sigma_c = E_{sec}(\varepsilon_l) \cdot \varepsilon_c \quad (6a-4)$$

$$E_{sec}(\varepsilon_l) = E_c \frac{1}{1 + \beta \varepsilon_A} = E_c \frac{1}{1 + 2\beta \varepsilon_l} \quad (6b-4)$$

دقت شود که کرنش سطح ε_A نشان دهنده میزان آسیب دیدگی داخلی ناشی از ترک خوردگی بوده که موجب کاهش مدول سکانت E_{sec} نسبت به مدول تانژانت اولیه E_c می شود. ثابت β یک خصوصیت بتن است که براساس رابطه ارائه شده در زیر تعیین می گردد. دقت شود که در رابطه (6b-4) فرضیه تقارن شعاعی ($\varepsilon_A = 2\varepsilon_l$) اتخاذ شده است. همچنین علامت قراردادی لحاظ شده در این روابط اینگونه است که فشار ε_c و σ_c منفی بوده در حالی که انبساط و گشادشدگی ε_A و ε_l مثبت فرض می گردند. روابط (6a-4) و (6b-4) با یکدیگر ترکیب شده و رابطه زیر استخراج می گردد :

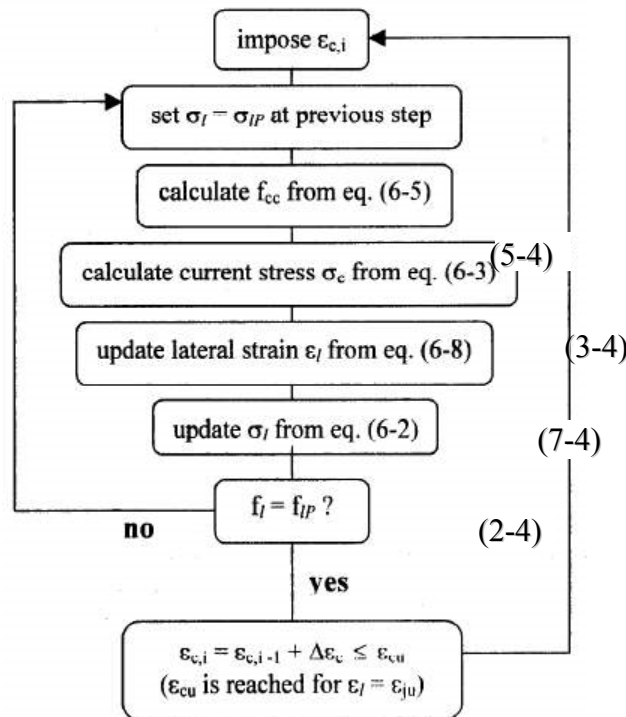
$$\varepsilon_l(\varepsilon_c, \sigma_l) = \frac{E_c \varepsilon_c - \sigma_c(\varepsilon_c, \sigma_l)}{2\beta \sigma_c(\varepsilon_c, \sigma_l)} \quad (7-4)$$

که در آن وابستگی کمیت‌های σ_c و ε_l در کرنش موجود ε_c و فشار حبس کنندگی موجود σ_l به طور روشنی ارائه می گردد. ثابت β یک خصوصیت بتن است که از رابطه زیر تعیین می شود :

$$\beta = \frac{5700}{\sqrt{|f_{co}|}} - 500 \quad (8-4)$$

مقدار آن تابعی از مقاومت بتن محبوس نشده f_{co} بر حسب MPa می باشد.

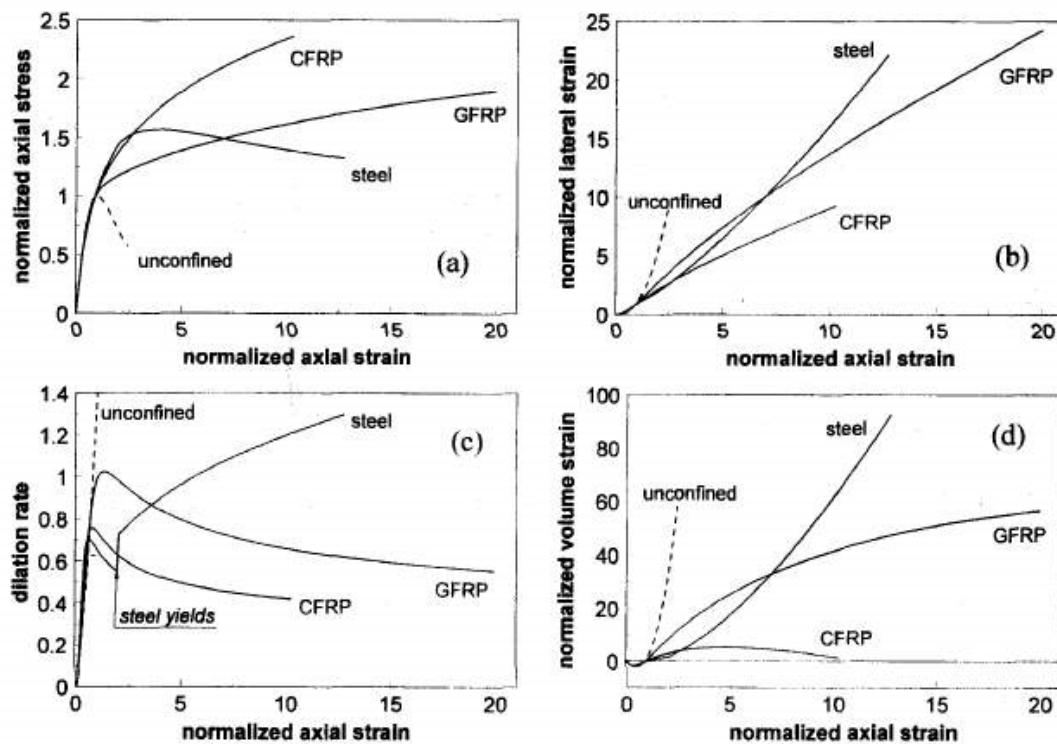
بعد از محاسبه ε_l از رابطه (7-4)، کرنش ε_j در پوشش محبوس کننده با کمک تنش موجود در آن $\sigma_j = E_j \varepsilon_j$ قابل محاسبه است (برای مثال در بارگذاری محوری در بتن استوانه ای بسادگی می توان گفت : $\varepsilon_j = \varepsilon_l$). مقدار جدید σ_l بدست آمده می تواند برای محاسبه مجدد ε_l از رابطه (7-4) استفاده گردد. این روند تکرار تا هنگامی ادامه خواهد داشت (شکل 4-4) که σ_l به مقدار صحیح همگرا شود. کل روند برای هر ε_c تکرار می گردد. همه آزمایشهای عددی نشان داده است که همگرایی بسیار سریع می باشد.



شکل 4-4: روند تکرار مدل Spoelstra & Monti (1999)

پاسخ یک نمونه بتنی دورپیچ شده با FRP که براساس این مدل بدست آمده است در شکل 5-4 نشان داده شده و با حالت بتن محبوس شده با فولاد مقایسه گردیده است. در شکل 5a-4 تنش محوری نسبت به کرنش محوری نشان داده شده است. همانطور که در این نمودار دیده می شود، منحنی مربوط به فولاد و CFRP اغلب با یک شیب یکسان شروع می شود. منحنی مربوط به GFRP نیز با همان شیب شروع شده تا اینکه به مقاومت بتن محبوس نشده برسد؛ بعد از این نقطه، منحنی مربوط به GFRP با یک شیب کمتر ادامه می دهد که باعث کرنشهای محوری بیشتر می گردد.

در شکل 5b-4، رابطه کرنش جانبی نسبت به کرنش محوری نشان داده شده است. می توان مشاهده نمود که شیب هرکدام از حالتها بستگی به نوع ماده حبس کننده دارد. منحنی مربوط به GFRP با یک شیب بیشتر شروع شده (به علت اینکه بتن دارای انبساط جانبی اولیه بیشتری است)، و تا لحظه گسیختگی پوشش، ثابت باقی می ماند. CFRP کرنش جانبی اولیه را کاهش می دهد، اما اثر آن به واسطه کمتر بودن کرنش نهایی گسترش یافته ϵ_{ju} ، تا مدت کوتاهی می باشد.



شکل 4-5: مدلسازی رفتار بتن محبوس شده با فولاد، CFRP و GFRP

(a) تنش محوری نسبت به کرنش محوری ؛ (b) کرنش جانبی نسبت به کرنش محوری ؛

(c) نرخ گشادشدگی نسبت به کرنش محوری ؛ (d) کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری

در شکل 4-5c میزان انبساط به صورت تابعی از کرنش محوری نشان داده شده است. میزان انبساط $\mu = \Delta \epsilon_l / \Delta \epsilon_c$ به صورت نرخ افزایش کرنش جانبی، $\Delta \epsilon_l$ ، نسبت به افزایش کرنش محوری، $\Delta \epsilon_c$ ، معرفی می گردد. همانطور که نشان داده شده است، هنگامی که فولاد به تسلیم می رسد یک عدم یکپارچگی و پرش در نمودار دیده می شود که ناشی از تغییر ناگهانی در مدول است ؛ بعد از این لحظه، نرخ انبساط به طور نامحدودی افزایش می یابد. به عبارت دیگر، برای دو نوع FRP، نرخ گشادشدگی به طور ثابتی تا یک مقدار مجانب کاهش می یابد. دقت شود که محل تاثیر عملکرد محبوس کنندگی در روی نمودار بستگی به سختی ماده محبوس کننده دارد.

در شکل 4-5d، رابطه کرنش حجمی نسبت به کرنش محوری نشان داده شده است. در مورد پوشش CFRP، کرنش حجمی ابتدا کاهش یافته، سپس به مقدار صفر برگشته و تا یک مقدار مشخص از کرنش محوری ادامه می یابد. در هر صورت در CFRP، افزایش در فشار محبوس کنندگی تاثیر کمی در باز شدگی حجمی دارد.

5-2-6 : روابط تعیین کننده خصوصیات بتن محبوس شده با FRP

گسیختگی نمونه بتنی دورپیچ شده با FRP هنگامی رخ می دهد که رابطه زیر برقرار گردد :

$$\epsilon_l = \epsilon_{ju} \quad (9-4)$$

یعنی اینکه، اگر کرنش جانبی بتن به کرنش مجاز یا کرنش نهایی مؤثر مواد FRP برسد، پوشش گسیخته شده و در نتیجه نمونه نیز گسیخته می گردد. مقدار مقاومت و کرنش نهایی بتن محبوس شده با FRP از طریق مدل ارائه شده در فصل قبل، قابل محاسبه است. با این وجود، به منظور طراحی، روابط

ساده شده ای در این فصل ارائه می گردد. در مورد بتن محبوس شده با فولاد، کرنش نهایی بتن، ϵ_{cu} ، از طریق یک روش تعادل انرژی محاسبه می گردد. در این روش میزان افزایش ظرفیت انرژی کرنشی بتن محبوس شده از طریق محاسبه ظرفیت انرژی کرنشی ماده حبس کننده بدست می آید. ظرفیت انرژی کرنش نهایی ماده حبس کننده به وسیله سطح زیر منحنی تنش - کرنش که متناسب با نسبت حجمی است، بدست می آید. هنگامی که ماده حبس کننده به انرژی نهایی خود می رسد، ماده حبس کننده گسیخته شده و کرنش بتن به کرنش نهایی خود می رسد. با این وجود، روش تعادل انرژی برای حالت حبس کردن با FRP قابل استفاده نمی باشد. به این دلیل، برای محاسبه مقاومت و کرنش فشاری نهایی بتن محبوس شده با FRP یک فرمول تجربی ارائه می گردد که برای موارد طراحی عملی مناسب است.

6-2-5-1 : معادلات پیش بینی کننده به صورت دقیق

با ملاحظه شکل 4-6 می توان به روابط زیر دست یافت :

1- فشار حبس کنندگی نهایی به وسیله رابطه زیر تعیین می شود :

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j f_j = \frac{2t_j f_j}{d_j} \quad (10-4)$$

2- پارامترهای مدل حبس کنندگی Mander وابسته است به f_l ، بنابراین :

$$f_{cc} = f_{co} \left(2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} - 1.254 \right) \quad \epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \times \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (11-4)$$

3- مدول سکانت در نهایت برابر است با :

$$E_{sec,u} = \frac{E_c}{1 + 2\beta \epsilon_{ju}} = \frac{E_c}{1 + 2\beta f_j / E_j} \quad (12-4)$$

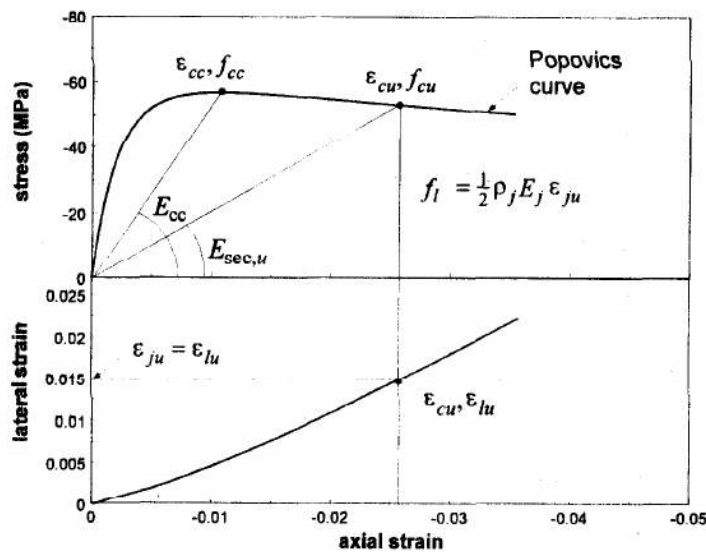
4- محل قطع خطی با شیب $E_{sec,u}$ در شکل 4-6 با منحنی Popovics در نهایت کرنش و تنش فشاری مورد نظر در بتن را به صورت زیر می دهد :

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{cc} \left[\frac{E_{cc}(E_c - E_{sec,u})}{E_{sec,u}(E_c - E_{cc})} \right]^{1-E_{cc}/E_c} \quad f_{cu} = E_{sec,u} \epsilon_{cu} \quad (13-4)$$

که در آن $E_{cc} = f_{cc} / \epsilon_{cc}$.

5- جایگزینی رابطه (12-4) در (13-4) رابطه زیر را نتیجه خواهد داد :

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{cc} \left(\frac{2\beta \epsilon_{ju} E_{cc}}{E_c - E_{cc}} \right)^{1-E_{cc}/E_c} \quad f_{cu} = \frac{E_c \epsilon_{cu}}{1 + 2\beta \epsilon_{ju}} \quad (14-4)$$



2-5-2-6: معادلات پیش بینی کننده به صورت تقریبی

فرمول تجربی ارائه شده توسط (Seible et al. (1995):

کرنش نهایی ϵ_{cu} از فرمول استخراج شده تجربی برای بتن و بتن محبوس شده با FRP به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5\rho_j f_j \epsilon_{ju}}{f_{cc}} \quad (15-4)$$

که در آن نسبت حجمی پوشش و f_j و ϵ_{ju} به ترتیب مقاومت و کرنش نهایی مؤثر پوشش FRP هستند. مقاومت ماکزیمم بتن محبوس شده، f_{cc} ، براساس رابطه (4-11) بدست می آید.

فرمول تجربی ارائه شده توسط (Spoelstra and Monti (1999):

فرمولهای زیر براساس مشاهدات آزمایشهای تجربی انجام شده برای مقاومت و کرنش نهایی بوده و دارای یک رابطه مستقیم با کرنش نهایی عضو محبوس کننده، ϵ_{ju} ، فشار محبوس کنندگی ماکزیمم، f_l ، و مدول بتن، E_c ،

$$f_{cu} = f_{co} \left(0.2 + 3\sqrt{\bar{f}_l} \right) \quad (16-4)$$

بوده در حالیکه با مقاومت بتن محبوس نشده، f_{co} ، نسبت عکس دارد. از طریق آنالیز برگشتی، دو رابطه زیر بدست آمده است:

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left(2 + 1.25 \bar{E}_c \epsilon_{ju} \sqrt{\bar{f}_l} \right) \quad (17-4)$$

که در آن مقادیر نرمالایز شده تنش محبوس کنندگی ماکزیمم و مدول تانژانت بتن به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\bar{f}_l = \frac{f_l}{f_{co}} \quad \text{and} \quad \bar{E}_c = \frac{E_c}{f_{co}} \quad (18-4)$$

دقت شود که در صورت عدم وجود محبوس کنندگی ($f_l = 0$)، کرنش و مقاومت بر اساس بتن محبوس نشده بوده که کرنش، محدود به مقدار 0.004 و مقاومت، به f_c 20% محدود می گردد.

در تمام روابط بالا برای محاسبه مقاومت نهایی در حالتیایی که اثر دورپیچ FRP کم می باشد (مانند سطح مقطعیهای مربعی یا مستطیلی، دورپیچهای غیر کامل)، براساس نتایج آزمایشها و مدلسازی های تحلیلی یک کاهش در رفتار تنش - کرنش دیده می شود. در این حالتها، نتیجه فشار محبوس کنندگی یک افزایش مقاومت ناچیز بوده و بنابراین مقاومت بتن محبوس شده، f_{cc} ، در عمل برابر حالت غیر محبوس شده اش، f_{co} ، می باشد.

3-6: محبوس کردن ستونها

1-3-6: کلیات

محبوس کردن ستونهای بتن آرمه (یا اعضای مشابه آن مانند دودکش ها و کوره ها)، به طور قابل توجهی عملکرد محوری، خمشی و برشی آن را بالا می برد زیرا که موجب افزایش مقاومت فشاری بتن، شکل پذیری، مقاومت برشی و مقاومت در برابر کماترهای آرماتورهای فولادی تحت فشار، می گردد. محبوس کردن ستونها به وسیله آرماتورهای جانبی داخلی (خاموت های حلقوی یا بسته) یا به وسیله تقویت کننده های خارجی (پوششهای فولادی یا FRP)، قابل دستیابی است. اهداف اصلی محبوس کردن عبارتست از: (1) جلوگیری از جداسازی پوشش بتنی؛ (2) فراهم کردن تکیه گاه جانبی برای آرماتورهای طولی؛ (3) افزایش مقاومت و ظرفیت تغییر شکل بتن. در مورد ستونهای دایره ای این هدف با نصب پوشش خارجی FRP به صورت یکپارچه بر روی کل سطح و یا به صورت نوارهای جدا از یکدیگر قابل دستیابی است. در مورد ستونهای مستطیلی شکل، اثر محبوس کردن، با استفاده از تقویت کننده های مستطیل شکل با گوشه های گرد شده (شعاع آنها در حدود 15 mm تا 25 mm بوده که وابسته به خصوصیات تعیین شده به وسیله سازنده پوشش FRP دارد) قابل اعمال است. تقویت کننده های محبوس کننده مستطیل شکل دارای اثر کمتری هستند، چراکه عملکرد حبس کنندگی به طور عمده در گوشه ها متمرکز شده و در نتیجه ضخامت زیادی برای پوشش FRP در بین گوشه ها جهت جلوگیری از انبساط جانبی و کماترهای آرماتورهای طولی ستون لازم است. یک راه جایگزین، پوشاندن ستون مستطیلی با ریختن بتن خارجی به صورت گرد و یا بیضوی برای فراهم کردن شکل مناسب برای پوشش است.

الیافهای کربن در افزایش مقاومت نسبت به دو الیاف دیگر (شیشه و آرامید) اثر بهتری داشته ولی از لحاظ افزایش شکل پذیری، شیشه اثر بهتری خواهد داشت. پوشش FRP می تواند دارای لایه های فعال و یا غیرفعال و یا ترکیبی از این دو باشد. همانند پوششهای فولادی، پوششهای FRP غیر فعال دارای یک فشار حبس کنندگی جانبی غیرفعال می باشند. هنگامی که از پوششهای فعال (پیش تنیده) استفاده شود، فشار ناشی شده از این عملکرد عمدتاً از حالت غیر فعال بیشتر می باشد.

2-3-6: فشار محبوس کنندگی جانبی مؤثر

براساس شکل ستون و طرح مقاوم سازی، یک توزیع تنش محبوس کنندگی غیر یکنواخت بدست می آید. سپس، حالتیهای زیر مورد بررسی قرار می گیرد: (1) دورپیچ کامل نمونه های استوانه ای به گونه

ای که الیافها دارای راستایی عمود بر محور طولی باشند ؛ (2) اثر دورپیچ موضعی ؛ (3) اثر نحوه ترتیب الیافها ؛ (4) اثر شکل ستون.

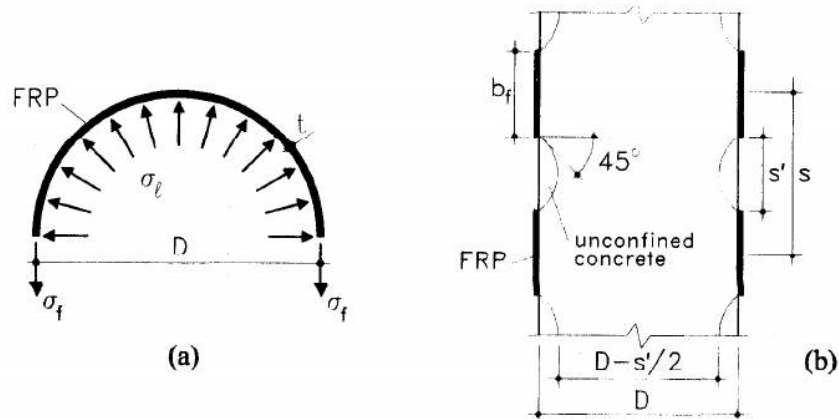
6-3-1 : دورپیچ کامل نمونه های استوانه ای با الیافهای عمود بر محور طولی
برای نمونه های بتنی استوانه ای بارگذاری شده در یک جهت که توسط FRP به طور کامل محبوس شده اند، فشار محبوس کنندگی جانبی می تواند با ملاحظه شکل 4-7 بدست آید. با فرض کشش یکنواخت در FRP، فشار جانبی یکنواخت بر هسته بتنی اعمال خواهد شد.
فشار محبوس کنندگی جانبی σ_l می تواند به صورت تابعی از تنش موجود σ_j در پوشش FRP به صورت رابطه زیر محاسبه شود (رابطه 4-2b) (ملاحظه گردد) :

$$\sigma_l = K_{conf} \varepsilon_l \quad \text{with} \quad K_{conf} = \frac{1}{2} \rho_j E_j \quad (19-4)$$

که در آن K_{conf} ، سختی FRP حبس کننده ؛ ε_l ، کرنش محیطی بتن که برابر است با کرنش ε_j در پوشش FRP ؛ ρ_j ، نسبت حجمی پوشش FRP و E_j ، مدول FRP است. بنابراین، فشار حبس کنندگی جانبی، σ_l ، که توسط پوشش FRP اعمال می شود، براساس تنش موجود در آن $\sigma_j = E_j \varepsilon_j < f_j$ بدست می آید. ماکزیمم فشار حبس کنندگی جانبی، f_l ، از رابطه زیر بدست می آید :

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju} \quad (20-4)$$

ε_{ju} ، کرنش گسیختگی مؤثر تقویت کننده های دورپیچ شده FRP بوده که در فصل 4-2-2 به آن پرداخته شده است.



شکل 4-7 : فشار محبوس کنندگی اعمال شده به وسیله FRP

6-3-2: اثر دورپیچ موضعی

اگر بتن به صورت موضعی دورپیچ شود، اثر کمتری به واسطه وجود هر دو ناحیه محبوس شده و محبوس نشده، خواهد داشت (شکل 4-7b). در این حالت، فشار محبوس کننده جانبی مؤثر از رابطه (4-21) با معرفی یک ضریب اثر محبوس کنندگی $k_e < 1$ قابل دستیابی است.

$$K_{conf} = \frac{1}{2} k_e \rho_f E_f \quad (21-4)$$

این ضریب اثر با توجه به اینکه فشار عرضی ماده محبوس کننده تنها جایی مؤثر است که فشار محبوس کنندگی به طور کامل ناشی از عملکرد کمانی گسترش می یابد، قابل دستیابی است. همانطور که در شکل 4-7 نشان داده شده است، اثر کمانی با یک سهمی که شیب ابتدای آن 45° می باشد، توصیف شده است. در بین دو دورپیچ متوالی FRP، سطح مؤثر هسته بتن محبوس شده، A_e ، از رابطه زیر بدست می آید:

$$A_e = \frac{\pi}{4} \left(D - \frac{s'}{2} \right)^2 \quad (22-4)$$

که در آن $s' = s - b_f$ فاصله بین نوارهای دورپیچ FRP است. سپس ضریب اثر محبوس کنندگی k_e با توجه به نسبت A_e / A_c که در آن $A_c = A_g - A_s$ (سطح مقطع کل منهای سطح مقطع آرماتورهای طولی)، از رابطه زیر قابل دستیابی می باشد:

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2D} \right)^2}{1 - \rho_{sg}} \approx \left(1 - \frac{s'}{2D} \right)^2 \quad (23-4)$$

که در آن $\rho_{sg} = A_s / A_g$ نسبت آرماتورهای فولادی طولی به سطح مقطع کل است.

6-3-3: اثر نحوه ترتیب الیافها

اگر الیاف ها به صورت مارپیچی نصب شوند، نحوه ترتیب الیافها کمترین اثر را در جلوگیری از انبساط جانبی بتن خواهد داشت. مشابه با قسمت قبل، اثر FRP می تواند با تعریف یک ضریب اثر محبوس کنندگی، مورد ملاحظه قرارگیرد. با فرض یک نیروی کششی یکنواخت N_f در FRP، فشار محبوس کنندگی اعمال شده به وسیله مارپیچهای FRP از رابطه زیر بدست می آید:

$$\sigma_{l,h} = \frac{N_f}{b_f R} \quad (24-4)$$

که در آن R انحناى مارپیچ بوده و از رابطه زیر تعیین می شود:

$$R \approx \frac{k^2 + r^2}{r} \quad (25-4)$$

که در آن $k = p/2\pi$ و p گام پیچ بوده و r شعاع آن می باشد. به طریق مشابه، فشار محبوس کنندگی در واحد عرض که به وسیله دورپیچ دایره ای FRP اعمال می شود، از رابطه زیر بدست می آید :

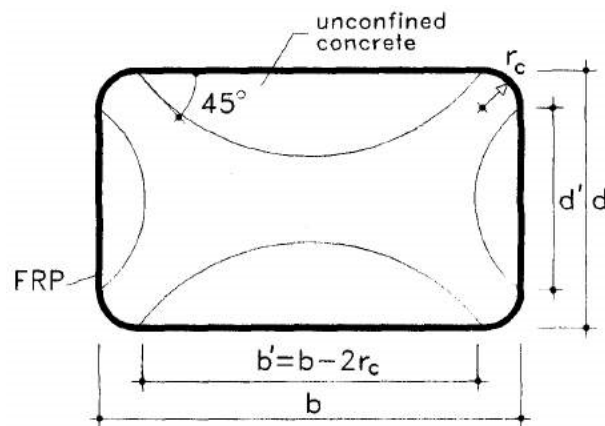
$$\sigma_{l,c} = \frac{N_f}{b_f r} \quad (26-4)$$

براساس روابط (4-24) تا (4-26)، ضریب اثر محبوس کنندگی k_e می تواند به صورت زیر معرفی شود :

$$k_e = \frac{\sigma_{l,h}}{\sigma_{l,c}} = \left[1 + \left(\frac{p}{\pi D} \right)^2 \right]^{-1} \quad (27-4)$$

6-3-2-4: اثر شکل ستون

برای یک سطح مقطع مستطیلی یا مربعی که توسط FRP دورپیچ شده است (شکل 4-8) و گوشه های آن با شعاع r_c گرد شده اند، دوباره عملکرد سهموی برای هسته بتنی فرض می شود که در داخل آن فشار محبوس کنندگی به طور کامل اعمال می شود. برخلاف مقطع دایره ای، که همه هسته بتن به طور کامل محبوس می شود، یک بخش بزرگ از مقطع بدون تاثیر عمل محبوس کنندگی قرار خواهد گرفت.



شکل 4-8: هسته مؤثر محبوس شده از یک مقطع غیر دایره ای

با جمع مساحت زیر سهمی های مختلف، کل سطح غیر محبوس شده از بتن از رابطه زیر بدست می آید :

$$A_u = \sum_{i=1}^4 \frac{(w'_i)^2}{6} = \frac{b'^2 + d'^2}{3} \quad (28-4)$$

که در آن w'_i فاصله بین گوشه های گرد شده می باشد. با ملاحظه نسبت $(A_c - A_u)/A_c$ ، ضریب اثر محبوس کنندگی از رابطه زیر تعیین می شود :

$$k_e = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g(1 - \rho_{sg})} \quad (29-4)$$

مشابه با رابطه (4-19) (سطح مقطع غیر دایره‌ای)، فشار محبوس کنندگی جانبی اعمال شده به وسیله دورپیچ FRP بر روی سطح مقطع مربعی یا دایره‌ای، از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \sigma_{lx} &= K_{confx} \varepsilon_{ju} & \text{with} & & K_{confx} &= \rho_{jx} k_e E_j \\ \sigma_{ly} &= K_{confy} \varepsilon_{ju} & \text{with} & & K_{confy} &= \rho_{jy} k_e E_j \end{aligned} \quad (30-4)$$

که در آن نسبت ρ_{jx} و ρ_{jy} بیان کننده نسبت حجمی تقویت کننده های محبوس کننده عرضی در راستای x و y بوده و از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$\rho_{jx} = \frac{2b_f t_j}{sd} \quad \text{and} \quad \rho_{jy} = \frac{2b_f t_j}{sb} \quad (31-4)$$

S : فاصله مابین نوارهای FRP

b_f : عرض لایه FRP

روابط بالا در حالتی که بیضوی کردن مقطع عملی نیست، قابل استفاده می‌باشند. در مواردی که ستونهای مستطیلی قابل بیضی شدن هستند، پوشش بیضوی دارای یک شعاع متغیر از انحناء در راستاهای بارگذاری مختلف است. در این حالت می‌توان قطر معادل ستون دایره‌ای را از میانگین قطرهای اصلی بیضی بدست آورد. بنابراین ضخامت پوشش براساس روابط مربوط به ستونهای دایره‌ای قابل محاسبه است. در این حالتها، فشار محبوس کنندگی جانبی مؤثر، $\sigma_{l,eff}$ ، برابر است با فشار محبوس کننده جانبی، σ_l ، بدست آمده از رابطه (4-2a) و به طور مشابه ماکزیمم فشار محبوس کنندگی جانبی مؤثر، $f_{l,eff}$ ، برابر است با f_l بدست آمده از رابطه (4-2b).

3-3-6 : ظرفیت تحمل بار

براساس شرایط بارگذاری (بارگذاری محوری، برشی و خمشی)، ظرفیت ستونها باید براساس مدل‌های مناسب ذکر شده در EC2 و MC90 محاسبه شود. ظرفیت مقطع را می‌توان براساس مقاومت نهایی بدست آمده از رابطه (4-16) محاسبه نمود. جهت مدلسازی بتن محبوس شده با FRP، به فصل‌های قبلی مراجعه شود.

4-3-6 : کمانش

براساس (Seible et al. 1995)، برای اطمینان از اینکه کمانش میلگردهای ستون در نواحی مفصل پلاستیک، کنترل کننده گسیختگی خمشی نباشد، لازم است که کنترل‌های اضافی بر روی نسبت تقویت کننده های عرضی پوشش انجام شود، به خصوص برای ستونهای لاغری که $M/(VD) > 4$ (M و V به ترتیب ممان و برش ماکزیمم ستون بوده و D قطر ستون می‌باشد). ضخامت مورد نیاز پوشش کامپوزیتی به طور معکوس متناسب است با مدول پوشش E_f در راستای حلقوی و به طور مستقیم متناسب است با قطر ستون.

6-4: استفاده از اثر محبوس کنندگی در افزایش شکل پذیری در نواحی زلزله خیز

در نواحی زلزله خیز، بیشتر ستونها و پایه های پلها در قدیم بر اساس ضوابط آیین نامه‌هایی طراحی و اجرا شده اند که فقط جنبه مقاومتی را در نظر گرفته و اثر شکل پذیری را که تضمین کننده پایداری سازه است، لحاظ نکرده اند. لذا بیشتر این ستونها و پایه ها نیاز به مقاوم سازی دارند. برای محاسبه ضخامت پوشش لازم برای رسیدن به شکل پذیری جابجایی، μ_{Δ} ، یک روند نسبتا آسان وجود دارد. در ابتدا طول مفصل پلاستیک معادل L_p برای ستون مورد نظر براساس تنش تسلیم و قطر میلگردهای طولی محاسبه می شود. از L_p و μ_{Δ} ، مقدار ضریب شکل پذیری انحناء $\mu_{\Phi} = \Phi_u / \Phi_y$ محاسبه می گردد. انحنای تسلیم، Φ_y ، می تواند از آنالیز ممان - انحناء سطح مقطع بدست آید؛ در حالیکه انحنای مورد نیاز ماکزیمم، Φ_u ، می تواند با آنالیز مجدد سطح مقطع براساس مؤلفه کرنش نهایی بتن بدست آید. بنابراین می توان مقدار لازم ϵ_{cu} را تخمین زده و با کمک یکی از مدل‌های توضیح داده شده در فصلهای قبل، ضخامت لازم FRP را محاسبه نمود.

محققین ژاپنی برای تشخیص و ارزیابی ضریب شکل پذیری جابجایی ستون محبوس شده با FRP راه دیگری را پیشنهاد کرده اند. در این روش، ضریب شکل پذیری می تواند براساس ظرفیت برشی V_u و ظرفیت ممان M_u عضو بعد از ترمیم براساس روابط تجربی به صورت زیر بدست آید:

$$\mu_{\Delta} = \alpha + \beta(V_u a / M_u) \leq 10 \quad (32-4)$$

که در آن a مربوط به اندازه ناحیه برشی و ثابتهای α و β وابسته به نوع الیافها هستند. برای محاسبه افزایش شکل پذیری یک ستون دایره ای با قطر D ، یک روش توسط Monti et al. (2001) ارائه گردیده است. اساس رابطه بر پایه تعریف شاخص مقاوم سازی مقطع $I_{sec}^{tar} = \delta_{sec}^{ava} / \delta_{sec}$ می باشد، که عبارتست از نسبت شکل پذیری مقطعی مورد نظر (که در راستای مقاوم سازی بدست می آید) به شکل پذیری مقطعی اولیه (از ارزیابی مقطع قبل از مقاوم سازی قابل تخمین است). ضریب شکل پذیری انحنای مقطع μ_{Φ} ، از ضریب شکل پذیری جابجایی μ_{Δ} مشابه آنچه در قبل مطرح شد، قابل دستیابی است. رابطه طراحی در نظر گرفته شده برای محاسبه ضخامت پوشش، t_f ، براساس خصوصیات مکانیکی FRP (مقاومت نهایی f_j و کرنش نهایی ϵ_{ju})، مقاومت بتن محبوس شده (با حلقه های فولادی)، f_{cc} ، و کرنش نهایی بتن، ϵ_{cu} ، هنگامی که فقط حلقه های فولادی وجود دارند به صورت زیر ارائه می گردد:

$$t_j = 0.2 D I_{sec}^2 \cdot \frac{f_{cc}^{ava}}{f_j} \cdot \frac{\epsilon_{cu}^{ava^2}}{\sqrt{\epsilon_{ju}^3}} \quad (33-4)$$

$$f_{cc}^{ava} = f_{co} \left(2.254 \sqrt{1 + 7.94 \bar{f}_l} - 2 \bar{f}_l - 1.254 \right) \quad (34-4)$$

که در آن $\bar{f}_l = f_l / f_{co}$ فشار محبوس کنندگی نرمالایز شده است و:

$$f_l = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_y \quad (35-4)$$

که در آن k_e ضریب اثر کمان گره تا گره (tie - by - tie) (معمولا 0.8 فرض می شود) و ρ_{st} نسبت حجمی حلقه های فولادی موجود که دارای مقاومت تسلیم f_y هستند. مقدار کرنش نهایی بتن نیز براساس یک رابطه تجربی به صورت زیر محاسبه می شود :

$$\varepsilon_{cu}^{ava} = 0.004 + \frac{1.4\rho_{st}f_y\varepsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (36-4)$$

که در آن ε_{su} کرنش نهایی حلقه های فولاد است.

فصل هفتم : جزییات اجرایی

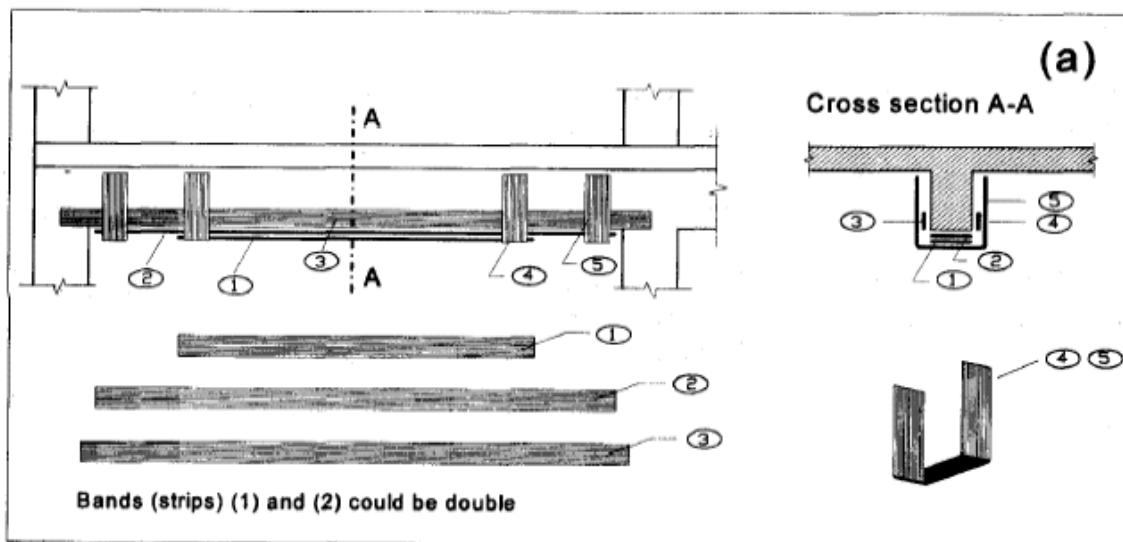
7-1 کلیات

کمیت مقاوم سازی به روش استفاده از FRP برون چسب، مطابق مدل هایی که در فصل های پیشین در مورد آنها صحبت شد، مورد محاسبه قرار می گیرد. قواعد جزیی (Detailing rules) اطلاعات اجرایی و عملی را در زمینه موقعیت، ترکیب و محدودیت های عنصر مقاوم کننده FRP که با توجه به ملاحظات نظیر حداقل شکل پذیری، نیازمندی های کاربردی، مهاربندی کافی، کاربرد مدل های محاسباتی، دوام و پایایی، شرایط محیطی و غیره مورد نیاز می باشد، بیان می کند. در مقام مقایسه با سایر جنبه های مقاوم سازی با استفاده از EBR، نتایج آزمایشات موجود خیلی کمتر به مقوله قواعد جزیی پرداخته است. این جزییات بسیار پر اهمیت می باشند و اگر مورد توجه قرار نگیرند، این قضیه می تواند به شکست ناگهانی سازه مقاوم سازی شده منجر گردد. این مقوله ایست که می بایست در مطالعات و آزمایشات آتی مورد توجه بیشتر قرار گیرد.

7-2 جزییات مربوط به مقاوم سازی با FRP lay - out

7-2-1 مقاوم سازی در برابر خمش

مقاوم سازی خمشی از طریق قرار دادن الیاف و یا نوارهایی که در محل آماده و سر هم می شوند و چسباندن آنها در وجوه تحتانی و فوقانی و حتی جانبی عضو تحت خمش، انجام می گیرد (شکل 7-1) در قسمتهای مهاربندی شده، مقاوم کننده اضافی در جهت عرضی لازم نمی باشد مشروط به اینکه تنشهای چسبندگی قادر به ایجاد مهار کافی باشند و تنش های کششی بتن بتوانند در مقابل کنده شدن debonding مقاومت نمایند.



1-1-2-7 توصیه‌های کلی

توصیه‌های زیر می‌بایست مورد توجه قرار گیرند (Deutsches Institut 1998)

- حداکثر فاصله بین نوارهای FRP $S_{f,max}$:

$S_{f,max} \leq 0.2 l$ (l طول دهانه می‌باشد)

$\leq 5 h$ (h عمق مقطع است)

$\leq 0.4 l_c$ (l_c طول قسمت طره)

- حداقل فاصله تا لبه تیر می‌بایست برابر پوشش بتن روی میلگردهای طولی باشد

- همپوشانی نوارها فقط در قسمت‌هایی از طول تیر مجاز است که حداکثر نیروی کششی در EBR از 60٪ مقدار حداکثر نیروی کششی تجاوز نکند. طول همپوشانی باید مطابق شرایط مهاربندی انتهایی که در فصل 4 بیان شده محاسبه شود. بدین منظور f_{ctm} می‌بایست معادل 10 N/mm^2 باشد. (مقاومت چسبندگی چسب) تنها در شرایط بارگذاری استاتیک اجازه وصله همپوشانی داده می‌شود در غیر این صورت از همپوشانی کردن دو تکه EBR باید اجتناب کرد همپوشانی الزامی هم نیست زیرا FRP در طول‌های مورد نیاز قابل دسترس می‌باشد.

- شعاع‌های مجاز خمیدگی نوارهای می‌بایست در مشخصات تولید آنها داده شده باشد.

- شعاع مجاز خمیدگی برای الیاف نیاز نیست که مشخص شده باشد. هر چند توصیه می‌شود که لبه‌های تیز مقطع قبل از چسبانده شدن FRP، با شعاع حداقل 30 میلیمتر گرد شوند.

- از روی هم گذراندن نوارهای (crossing of strips) مجاز می‌باشد البته باید در سطح مشترک دو نوار عبوری از روی یکدیگر، چسبندگی تامین شود.

2-1-2-7 مواردی که از لایه‌های متعدد استفاده شده است:

اگر قرار باشد از چند لایه متعدد استفاده شود، توصیه بر این است که هر لایه بعد از لایه دیگری همپوشانی مورد استفاده قرار گیرد تا اینکه دو لایه دقیقاً روی همان لایه نصب گردد در این حالت بهتر است که بیش سه لایه نوار و یا 5 لایه الیاف که در محل آماده‌سازی می‌شوند استفاده نشود مگر اینکه

توسط شواهد و یافته‌های تجربی اینکار مورد تایید قرار گیرد. در هر حال توصیه‌های تولید کننده EBR باید انجام پذیرد. برای استفاده از چند لایه نوار پیش تنیده بر روی هم، کاهش میزان پیش تنیدگی بدلیل اثر نیروهای پیش تنیده این لایه‌ها بر روی یکدیگر، می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

3-1-2-7 ناحیه مهاربندی شده Anchorage zone

اگر مقاوم‌سازی بر روی تیر دو سر ساده انجام شده، فاصله بین بر تکیه‌گاه و انتهای نوار مقاوم‌کننده نباید از 50 میلیمتر تجاوز کند. اگر از الیاف و یا نوار مقاوم‌کننده به روی تیرهای پیوسته و یا دالها استفاده می‌شود، باید این الیاف و یا نوارها را در قسمت‌های تحت فشار مهاربندی کرد (شکل 2-7 را ببینید، رجوع شود به فصل 4 به روی محاسبه طول مهاربندی)

مهاربندی EBR (خصوصاً اگر نوارها دچار پیچ و تاب هستند) را می‌توان با استفاده از FRP که به صورت U شکل در انتهای نوارهای طولی نصب می‌شوند، انجام داد. استفاده از چنین قیدهایی به شدت توصیه می‌شود. البته این قیدها نقش مقاوم‌کننده برشی ندارند بلکه با نگهداشتن نوارها در موقعیت خودشان از کنده شدن و ورامدن آنها جلوگیری می‌کنند.

2-2-7 مقاوم سازی در برابر برش.

مقاوم سازی برشی می‌تواند به صورتهای زیر انجام گیرد:

- نوارهای CFRP، L شکل که در کارخانه تولید و شکل داده شده‌اند

- ورقه‌های یکسره

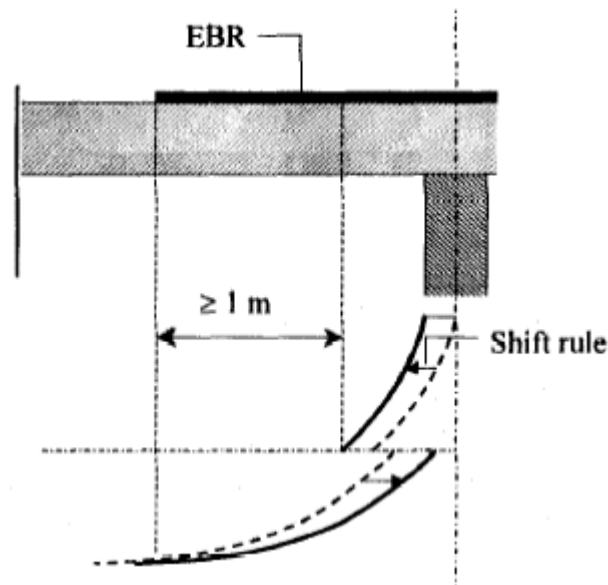
در این مقاوم‌سازی، مصالح مقاوم‌کننده در سه یا چهار وجه المان چسبانده می‌شوند البته مواردی هم وجود دارد که تنها در وجه پوشش داده می‌شود. مهاربندی مناسب به شدت توصیه می‌شود. نکات اجرایی در شکل 2-5 فصل 5 ارائه شده‌اند. در این مقاوم سازی در اصل دو حالت متفاوت وجود دارد:

1- مهاربندی مناسب سیستم مقاوم‌کننده برشی [شکل 2b-5، رابطه (5-4a,c)]

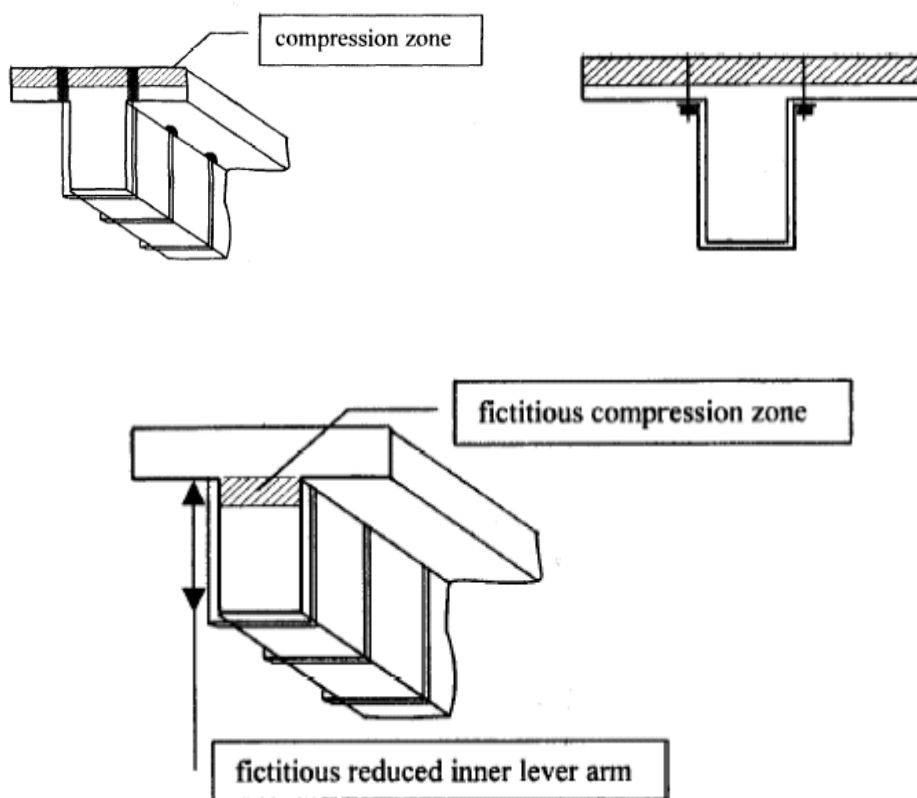
2- سیستم جانبی یا U شکل مقاوم‌سازی برشی [شکل 2a-5، رابطه (5-4b)]

شکست مهاربندی، شکست به حالت debonding و شکست FRP در طراحی با در نظر گرفتن کرنش موثر FRP در بخش 1-5 [رابطه 5-4a تا c] به حساب آورده می‌شود. مهاربندی مناسب به پیچیدن دور تا دور کامل مقطع و یا سیستمی گفته می‌شود که به نحو مناسبی در ناحیه فشاری مهار شده است. این مورد در شکل‌های 3-7 و 4-7 نشان داده شده.

در مواردی که از نظر اجرایی امکان پذیر می‌باشد، توصیه می‌گردد که کل ارتفاع ناحیه فشاری مهاربندی گردد تا در حد امکان از صحت عملکرد مهاربندی اطمینان حاصل آید. استفاده از نوارهای FRP برای مهاربندی در وجوه جانبی تیر به تنهایی توصیه نمی‌شود زیرا وجوه تحتانی و فوقانی یعنی وجوه کششی و فشاری هم به مهاربندی نیاز مبرم دارد.



در مواردی که مهاربندی در ناحیه فشاری به نحو مناسبی انجام نشود، ارتفاع مفید مقطع می‌بایست کاهش داده شود، و به این ترتیب بخشی از مقاومت نهایی خمشی کاهش داده می‌شود. این موضوع در شکل 5-7 نشان داده می‌شود.



7-2-3 محصور کردن

اعضای فشاری را می‌توان به نحو موثری با استفاده از مقاوم کننده برون چسب که الیاف آن افقی و یا مارپیچی در طول المان قرار گرفته‌اند، محصور کرد به کمک آنالیزهای فصل 6 تعداد لایه‌های مورد نیاز (حداکثر 20 تا 25 لایه بنا به توصیه تولیدکنندگان این مصالح) برای محصور کردن بدست خواهد آمد.

در مواردی که شکل ستون مستطیل می‌باشد و یا ستون‌های دیوار مانند که نسبتاً طول به عرض آنها بالا می‌باشد، برای اینکه عملکرد محصور کنندگی مناسبی از EBR بدست آید می‌بایست از پیچ (bolt) و یا پرچ (dowels) برای مقید کردن هر چه بیشتر EBR در طول وجوه طولانی مقطع ستون استفاده کرد تا به این ترتیب فواصل کوچکتری برای محصور کردن بین این پیچ‌ها بوجود آید. در ادامه همچنین می‌توان از ترکیب قرارگیری الیاف در راستای طولی و عرضی جهت افزایش عملکرد محصور کنندگی استفاده نمود.

(Karbhair & Seible 1998)

اگر بارهای فشاری برون مرکز (eccentric) مقادیر بالایی داشته باشند، می‌توان الیاف را بطور مستقیم در راستای طولی هم مورد استفاده قرار داد. در اینصورت لازم است که از الیاف عرضی برای مهار این الیاف در بالا و پایین عضو استفاده شود.

4-2-7 شرحی بودن و رطوبت محیط:

وقتی از یک سیستم FRP استفاده می‌شود، علی‌الخصوص در مواردی که الیاف کل سطح المان را می‌پوشانند، آب و رطوبت ممکن است در محل درز چسبندگی انباشته شود بنابراین در حالت مقاوم‌سازی خمشی تیرها و یا دال‌ها توصیه می‌شود که سوراخ و یا شکافی (gap) تعبیه شود که فضایی جهت انتقال بخار بوجود آید. در حالت مقاوم‌سازی برشی می‌بایست به فاصله هر 300 میلیمتر یک شکاف قرار داده شود. جزئیات بیشتر را می‌توانید در (Mack & Holt 1999) بیابید.

در مورد محصور کردن ستون‌ها، توصیه بر این است که ستون در فاصله‌ای در حدود 30 تا 50 میلیمتر مانده به سطح پی و یا سطح تیر، FRP پیچیده نشود. در واقع ممکن است مقاومت خمشی اضافی در محل تشکیل مفصل پلاستیک در طول ستون، بدلیل ارتباط و پیوستگی پوشش اطراف ستون در محل مفصل پلاستیک و بتن مجاور آن، به صورت ناخواسته سبب بوجود آمدن ممان و نیروی برشی پیش‌بینی نشده در محل پی و یا اتصال تیر و ستون شود. بنابراین فاصله‌ای که در محل اتصال تیر به ستون و یا اتصال به شالوده، FRP پیچیده نشده هم می‌تواند بدین سبب مفید باشد و هم اینکه مسیری را برای خروج آب و رطوبت که بدلیل وجود فضاهای احتمالی مابین FRP و بتن، در زیر پوشش محصور کننده وارد شده، فراهم می‌کند. در مواجهه با مساله مرطوب و شرحی بودن محیط، سازه‌ها از نظر محیط اطراف به سطح تقسیم‌بندی می‌شوند که جدول 1-7 ملاحظه می‌کنید.

Class 0: سازه‌هایی که در محیط خشک و رطوبت کم قرار گرفته‌اند همانند فضای داخل سازه‌ها indoor structures

Class 1: سازه‌هایی که رد معرض یخ‌زدگی - آب شدن و همچنین مقدار نسبتاً ضعیف رطوبت قرار می‌گیرند

همانند سازه‌های خارجی محافظت شده Protected outdoor struc.

Class 2: سازه‌هایی که در محیط شرحی و مرطوب قرار دارند

همانند سازه‌هایی که در تماس مستقیم با آب قرار ندارند و یا در معرض بارندگی زیاد هستند (نمادها و رویه ساختمان‌ها)

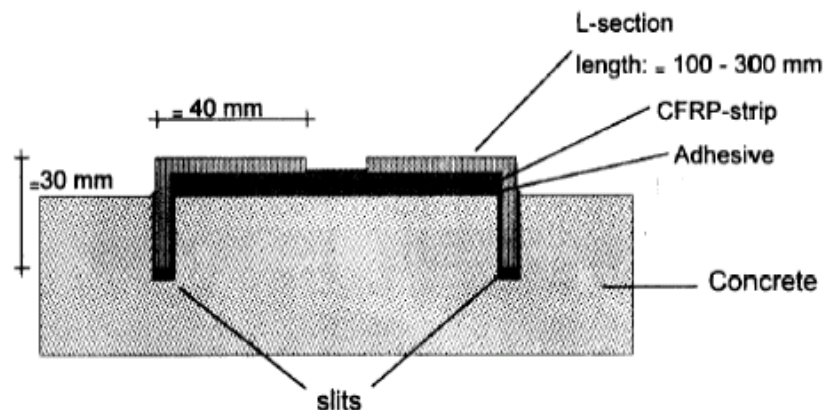
Class3 : سازه‌هایی که در مناطق بسیار شرعی و یا تماس مستقیم با آب و قرار دارند و یا در تماس با درجه حرارت بالا و رطوبت زیاد هستند.
همانند اسکله‌ها، پلها و سدها که در تماس مستقیم با آب قرار دارند.
در مورد سازه‌هایی که در class 0 و class 1 قرار گرفته‌اند می‌توان تمام سطح را با FRP پوشش داد در مورد class توجه بیشتری باید داشت و در مورد class 3 می‌بایست حتماً از پیچیدن کل سطح (full wrapping) اجتناب گردد.

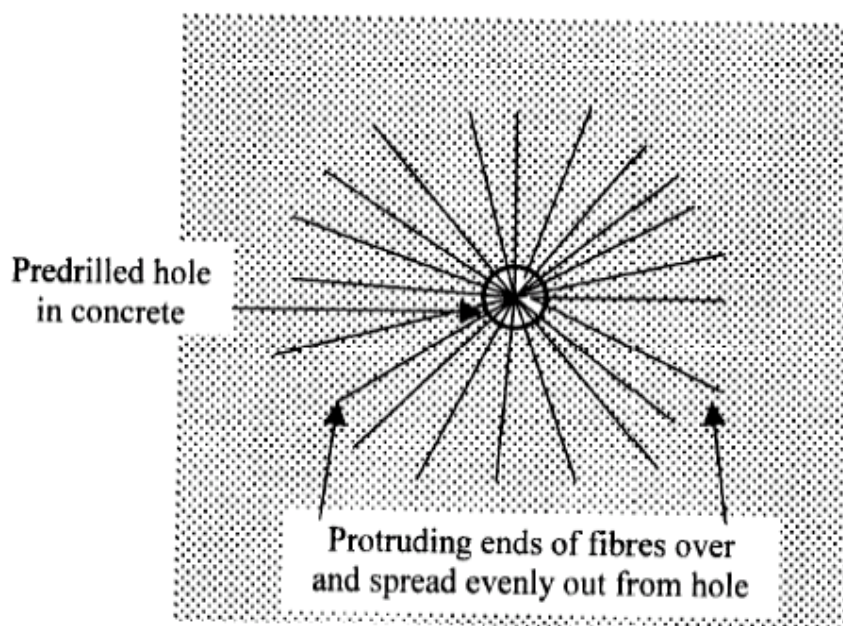
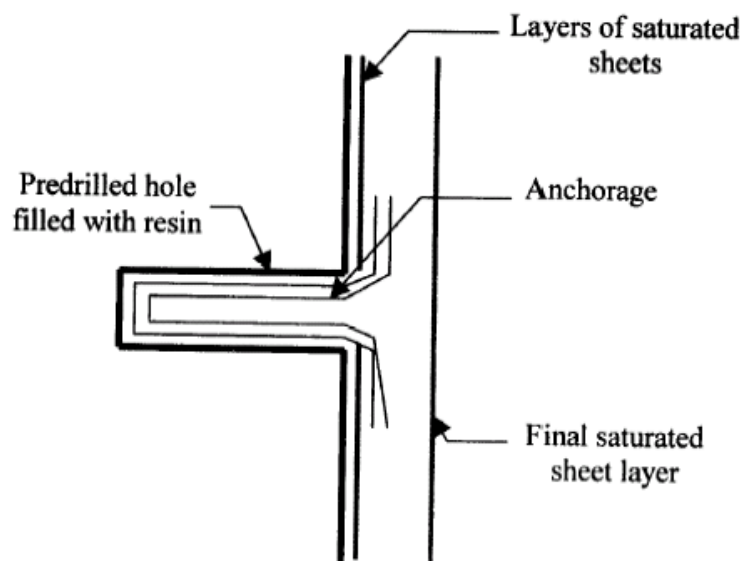
7-3 مهاربندی ویژه

7-3-1 کلیات

توصیه می‌شود از بولتها، ورقه‌های U شکل یا نوارهای L شکل (Meier & Bleibler 1999) برای مهار کردن انتهای لایه EBR که در معرض کنده شدن و تنشهای برشی در مناطقی هستند که این تنشها از γ_m برابر مقاومت کششی بتن تجاوز می‌کنند، استفاده شود.

در مورد سیستم مهاربندی با بولت باید توجه شود که در مورد مصالح مرکبی که الیاف آنها تنها در یک راستا قرار دارند، این روش سودمند نمی‌باشد و علاوه بر آن باعث ضعیف شدن نوار مقاوم کننده هم خواهد شد. در این شرایط تک راستایی بودن الیاف باعث می‌شود که نیروهای موجود در آنها به نحو موثر به بولتها منتقل نشود. اما در صورتیکه الیاف مصالح FRP EBR چند راستایی (Multi directional) باشند می‌توان از بولتها برای مهار آنها استفاده کرد زیرا در این حالت به نحو موثری نیروهای موجود در الیاف به بولتها منتقل می‌شود. (Matthys & Blontrock 2000) بولتها می‌بایست از یکدیگر فاصله مناسبی داشته باشند و تا بالای آرماتورهای داخل مقطع بتن مسلح، در بتن فرو برده شوند. برای بولتها می‌بایست از واشرهای بزرگ استفاده شود و آنها را تا حد معینی سفت کرد تا به مصالح کامپوزیت صدمه وارد نشود. در مجموع، وسایل و روشهای مهاربندی که بروی پیوستگی سیستمهای مقاوم کنند، تاثیر منفی می‌گذارند، توصیه نمی‌شوند. مثلاً در محل سوراخهایی که برای عبور بولتها ایجاد می‌شوند ممکن است در نوارهای FRP پارگی لایه‌ای (interlaminar) و یا زمینه ایجاد شکاف بوجود آید. علاوه بر آن سوراخها باعث کاهش سطح مقطع خالص نوار مقاوم کننده می‌شوند.





7-3-2 اسباب مهاربندی نوارهای CFRP

در شکل صفحه قبل طرح کلی آزمایش‌های انجام گرفته بر روی سیستم مهاربندی نوارهای CFRP نشان داده شده است. با این مهاربندی، افزایش قابل ملاحظه‌ای در نیروی کششی قابل مهار توسط سیستم، حاصل می‌آید. از این روش می‌توان هنگام مقاوم‌سازی دال‌ها استفاده کرد (جایی که نیاز به پیچیدن نوار دور تا دور مقطع نباشد) حداقل پوشش بتن می‌بایست در حدود 20 میلیمتر باشد.

7-3-3 سیستم مهاربندی برای مصالح مقاوم کننده ورقه‌ای شکل

آنچه در شکل‌های بالا ملاحظه می‌شود راهی است که برای چسباندن و اتصال کامپوزیت به بتن، علاوه بر چسبی که به صورت نرمال می‌بایست استفاده شود، پیشنهاد شده است (Neuner & Falabella 1996). سوراخی در بتن ایجاد می‌شود سپس ذرات و اضافه‌ها از داخل حفره بیرون کشیده

شده و چسب اپوکسی به داخل سوراخ تزریق می شود سپس یک لایه مقاوم کننده که با رزین اپوکسی آغشته شده بر روی این ناحیه چسبانده می شود. بعد از آن یک سری زبانه (زائده) با عبور از لایه مقاوم کننده به داخل سوراخ که از قبل ایجاد شده بود رانده می شود و انتهای آنها پخ می خورد (خم می شود) به گونه ای که از روبرو این قسمتهای خم شده تشکیل یک سطح دایره مانند بدهند (یعنی در تمام جهات پخش شده باشند). سپس لایه های بعدی مقاوم کننده همانند قبل با کمک رزین اپوکسی بر روی لایه اولیه چسبانده می شوند. نمونه های بتنی با سیستم مهاربندی و بدون مهار هر دو تحت آزمایش قرار گرفتند. در هر دو حالت شکست در بتن رخ داد با این تفاوت که نمونه های مهاربندی شده مقاومت برشی در حدود 2 برابر نمونه مهاربندی نشده از خود نشان دادند (Neuner & Falabella 1996)

فصل هشتم : موارد اجرایی و کنترل کیفیت

1-8 تکنیک ها:

تکنیک مقاوم سازی در ارتباط با استفاده از FRP به صورت یک عنصر مقاوم کننده که به اعضای سازه های موجود چسبانده می شوند (البته در اینجا تنها به استفاده از آن بر روی بتن پرداختیم ولی امکان استفاده از آن بر روی چوب، فولاد، مصالح بنایی، آلومینیوم و حتی سنگ طبیعی هم وجود دارد) تحت عنوان «مصالح مقاوم کننده FRP و روشها» در فصل 2 مورد بررسی قرار گرفت. این روشها را می توان تحت شرایط گوناگون و در مکان های مختلف مورد استفاده قرار داد و البته در نظر گرفتن ملاحظات که در این فصل بدان اشاره خواهد شد.

1-1-8 تکنیک پایه (دستی)

تکنیک پایه استفاده از FRP EBR برای مقاوم سازی به اجرای دستی مقاوم سازی بر روی یک عضو بتنی اشاره دارد. عمل چسباندن و پیوند با استفاده از مواد پلیمری بین دو قسمت و پس از آن عمل آوری سرد آنها انجام می گیرد. تمام مشخصات و ملزومات عنوان شده در بخشهای بعدی می بایست مد نظر قرار گیرند.

سه المان فعال در تکنیک پایه عبارتند از:

1- مصالح زمینه: این مصالح اشاره به نوع مصالحی که برای ساختن سازه از آن استفاده شده و FRP باید بر روی آن چسبانده شود دارد. اگر چه مصالح مقاوم کننده FRP را می توان بر روی مصالح مختلفی استفاده کرد اما بحث ما در اینجا تنها در ارتباط با بتن می باشد. شرایط اولیه بتن و سطح بتنی از نظر مقاومت، کربناتاسیون، Carbonation، ناصافی، ترکها، نوع و امکان خوردگی فولاد داخل بتن، رطوبت، میزان یونهای کلراید و سولفات و سایر موارد می بایست مشخص باشد.

2- چسب یا رزین: عبارت است از یک عامل مناسب برای مقاوم سازی با FRP که تمام شرایط لازمه را دارد. بسته به نوع FRP، عامل چسباننده نه تنها برای چسباندن لایه مقاوم بر روی بتن به کار می رود بلکه در روش اجرا wet lay up برای آغشته کردن و قرار دادن الیافها در کنار یکدیگر و تشکیل لایه مقاوم کننده FRP هم مورد استفاده می باشند.

3- FRP reinforcement

مصالح مقاوم کننده برون چسب FRP (FRP EBR) یک کامپوزیت پیشرفته (advanced) می باشد که در فصل 2 در مورد آن صحبت شد. از نقطه نظر اجرا و استفاده از این مصالح دو روش عمده وجود دارد:

- ورقه ها و یا نوارهای پیش ساخته یا پیش عمل آوری شده : pre – cured
- این نوارها، شکل، مقاومت و سختی نهایی خود را کسب کرده اند و اغلب به صورت نوارها یا ورقه های نازک (ضخامت در حدود 1 میلیمتر تا 1/5 میلیمتر) در دسترس می باشند. برای این دسته از مقاوم کننده های FRP، چسب تنها به عنوان عاملی برای پیوند با بتن می باشد.
- ورقه ها یا الیاف wet lay up یا عمل آوری شده در محل cured in situ:

در این نوع، قبل از استفاده و اجرا هیچ چسب و رزینی برای الیاف استفاده نشده است. یا مقدار بسیار اندکی رزین داخل ورقه ها (sheets) وجود دارد که برای اجرا کافی نیست (مراجعه به فصل 2 بخش 4-3-2) در این حالت استفاده از رزین هم برای چسباندن ورقه ها و الیاف بر روی بتن و هم برای آغشته کردن (impregnate) الیاف و ورقه ها می باشد. در جدول 1-8 مشخصات کلی اجرای این دو روش برای مصالح FRP EBR آورده شده است. جزییات کاملتر در فصل 2 ارائه شده بود.

Table 8-1

	PREFAB	WET LAY - UP
شکل	نوار یا لایه (چند لا) (laminate)	الیاف یا ورقه (sheets)
ضخامت	حدود 1 میلیمتر تا 1/5 میلیمتر	حدود 0/1 میلیمتر تا 0/5 میلیمتر
استفاده	چسباندن ساده المانهای کارخانه ساز بر روی بتن با استفاده از چسب	چسباندن و آغشته سازی ورقه های و الیاف ها با کمک رزین (شکل دهی و عمل آوری در محل)
جنبه های معمول اجرایی	- اگر از قبل شکل داده نشده اند برای سطوح صاف به کار می روند.	- بدون توجه به شکل، گوشه های تیز باید قبل از اجرا گرد شوند.
	- استفاده از چسب Thixotropic برای چسباندن	- استفاده از رزین با ویسکوزیته پایین برای چسباندن و اشباع سازی الیاف
	- به صورت نرمال 1 لایه استفاده می شود اگر چه چند لا هم ممکن است بکار رود.	- اغلب به صورت چند لایه استفاده می شود
	- سختی نوارها و استفاده از چسب تیکسوتروپ امکان استفاده از آنرا در سطوح تا حدی ناصاف می دهد.	- در سطوح ناصاف برای جلوگیری از جدا شدن از بتن اغلب نیاز به آستر یا بتونه می باشد.
	- سهولت استفاده، تضمین بالاتر	- بسیار انعطاف پذیر از نظر کاربرد - نیازمند به کنترل کیفیت دقیق و موشکافانه

بر اساس تکنیک پایه، روشهای اجرایی دیگری نیز بوجود آمده‌اند که برخی جزئیات و نمونه‌های آن در فصل 2 بخش 3-2 ارائه شده‌اند. شرایط خاص و نیازمندیهای این تکنیک‌ها در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار نمی‌گیرد. آنها می‌بایست توسط تمام بخشهای مربوط به اجرای این روشها مورد بحث و تبادل نظر قرار گیرند به شدت توصیه می‌شود که آزمایشات دقیق و مناسب توسط آزمایشگاه‌ها و افراد مستقل بر روی این تکنیک‌ها صورت پذیرد.

2-8 نیازمندیهای کلی:

تکنیک مقاوم‌سازی با استفاده از FRP EBR می‌تواند تحت شرایط زیر انجام پذیرد:

1- بر روی المانهای سازه‌ای در محیط‌های خشک یا مرطوب می‌بایست شرایط ویژه‌ای برای تامین چسبندگی مناسب در این دو گروه محیط لحاظ گردد. علاوه بر آن در محیط‌های شرجی باید اطمینان حاصل شود که رطوبت داخلی سازه اثر منفی بر روی مصالح مقاوم کننده چسبانده شده نداشته باشد و بالعکس در محیط‌های دیگر (نظیر زیر آب و یا مصالحی که مداوم با آب خیس می‌شود) استفاده از این روش برای مقاوم سازی مشروط به بررسی ویژه رفتار چسبندگی می‌باشد.

حتی اگر خود چسب هم بتواند در محیط مرطوب چسبندگی مناسب را تامین کند، نم و رطوبت سازه همچنان می‌تواند اثرات منفی دیگری همچون خوردگی فولاد و خراب شدن و کنده شدن پوشش بتن، یخ زدن و آب شدن مخرب بتن و غیره داشته باشد.

2- دمای قسمت‌های مقاوم سازی شده سازه در شرایط سرویس نباید از دمای مرحله (glass glass transition temp) یعنی T_g مربوط به چسب یا رزین، فراتر رود. این شرایط در بخش 2-1-4-8 شماره 2 بیان شده است. بنابر prEN 1504-4 (CEN 2001a)، شرایط مذکور $T_g \geq 45^\circ\text{C}$ و یا حداکثر دمای محیط در حالت سایه (بدون آفتاب) $+20^\circ\text{C}$ ، هر کدام که بیشتر است را مد نظر قرار می‌دهد.

3- می‌بایست ملاحظات دقیقی نسبت به مواردی مانند: اختلاف دمای بالا مابین FRP EBR و مصالح مورد تقویت در شرایط سرویس، حفاظت در مقابل آتش، حفاظت در برابر UV، صدمات و آسیب‌های احتمالی، تخریب و غیره صورت گیرد.

4- استفاده از FRP EBR نباید علاوه بر مقاوم سازی به قصد محدود کردن و کاهش دادن صدمات و معایب مقطع صورت گیرد بلکه باید این معایب و صدمات موجود ابتدا با روشهای مناسب آنگونه که در بخش 1-3-8 هم مورد بحث قرار گرفته، بر طرف شوند و سپس مقاوم‌سازی انجام گیرد.

5- می‌بایست علاوه بر توصیه‌ها و مواردی که تاکنون بیان شده و در ادامه هم اضافه خواهد شد، به دستورالعمل استفاده و مشخصات ارائه شده توسط کارخانه سازنده چسب و رزین و FRP توجه کافی شود. علاوه بر آن کنترل کیفیت مطابق آنچه در بخش 4-8 بیان شده، باید صورت گیرد و تمام مفروضات و اطلاعات طراحی می‌بایست بر اساس نتایج به ثبت رسیده در آزمایشات کنترل کیفیت صورت پذیرد. برای استفاده و نصب FRP EBR باید از کارگران آموزش دیده استفاده شود. (ترجیحاً سیستم FRP EBR و خود اپراتورها توسط یک واحد مستقل دیگر مورد تأیید قرار گیرند).

3-8 Practical Execution

استفاده از FRP EBR می‌بایست مطابق با توصیه‌ها و مشخصات ارائه شده توسط تولیدکنندگان چسب و FRP باشد مگر آنکه نتایج بررسی‌ها و تحقیقات کافی نشان دهد که استفاده از این مصالح در شرایط متفاوت با توصیه‌های ارائه شده، قابل قبول می‌باشد. در ارتباط با تکنیک پایه در بخش 1-8-1 نکات اجرایی بیان شد همچنین در بخش 4-8 هم در این مورد مطالبی ارائه شده است. مراحل اجرایی استفاده از مقاوم کننده برون چسب FRP بستگی به نوع آن از نظر شکل یعنی «پیش ساخته» یا «wet lay-up» در جدول ذیل با دید کلی بر گامهای ابتدایی استفاده از FRP EBR ملاحظه می‌شود.

- 1- آماده‌سازی و پرداخت سطح
- 2- بتن
- 3- برداشتن زوائد و قسمتهای ضعیف روی سطح بتن، صاف کردن سطح، گرد کردن گوشه‌های تیز، زدودن گرد و غبار
- 4- کنترل مواردی چون مقاومت کششی، ناصاف‌های سطح، نقص‌ها، خوردگی، رطوبت و غیره تعمیرات اگر لازم باشد
- 5- مصالح مقاوم کننده برون چسب FRP (FRP EBR)
- 6- اگر برای استفاده آماده نشده و یا لایه محافظ ندارند، اگر لازم باشد استفاده از Sand paper و تمیز کردن سطح آن
- 7- بریدن به ابعاد مورد نیاز و چک کردن عدم وجود نقص یا مشکل در آن
- 8- استفاده و چسباندن FRP
- 9- نوع پیش ساخته یا پیش عمل‌آوری شده
- 10- استفاده از رزین (تیکستوتروپیک) بر روی بتن
- 11- استفاده از رزین بر روی FRP
- 12- نصب FRP بر روی سطح بتن (با فشار اندک، رزین اضافی بیرون می‌زند)
- 13- نوع wet lay up یا عمل‌آوری در محیط
- 14- آستر و بتونه کاری سطح تقریباً وجود ناهمواری مورد قبول نیست
- 15- استفاده از رزین با ویسکوزیته پایین بر روی سطح (زیر پوشانی)
- 16- استفاده از FRP بر روی سطح
- 17- اشباع و آغشته سازی FRP (رو پوشانی)
- 18- کنترل کیفی (قبل، در جریان و بعد از نصب FRP)
- 19- بر روی مصالح تولید شده (آزمایش استاندارد FRP و چسب)
- 20- بر روی شرایط اجرا (شرایط سطح بتن، شرایط محیطی، استحکام بتن و غیره)
- 21- در حین و پایان مقاوم‌سازی (راستای الیاف، ابعاد و اندازه، ناصافی‌ها، چسبندگی و غیره)
- 22- مرحله پایانی (انتخابی است)
- 23- رنگ زدن، شاتکریت بتن و غیره (عایق صوتی، U.V، محافظ آتش)

8-3-1 تعمیرات اولیه

در حالت کلی FRP EBR مشکلاتی نظیر خوردگی فولاد، نشت و تراوش آب وجود مقادیر کلرید و غیره را متوقف نمی‌کند. پتانسیل و آمادگی برای بروز مشکلاتی نظیر خوردگی فولاد باید پایین باشد و بتن مستحکم و سالم باشد. این موارد قبل از انجام مقاوم‌سازی به کمک FRP می‌بایست مشخص شود. و در صورت لزوم قبل از مقاوم‌سازی، بتن تعمیر شده و یا تکنیک‌های مناسب برای جلوگیری از خوردگی فولاد (FIB 1991) به کار گرفته شود. موارد و جنبه‌های زیر می‌بایست مد نظر قرار گیرد:

- استحکام بتن مطابق مشخصات بند 4-8-3-4 به اثبات برسد. حداقل مقاومت کششی بتن می‌بایست بزرگتر از $1.5 \frac{N}{mm^2}$ باشد. اگر صدمات و تخریب بتن به حدی رسیده که با تعمیرات جزئی و سطحی برطرف نمی‌شود، جایگزین کردن قسمت معیوب و صدمه دیده با بتن جدید و سالم می‌بایست مد نظر قرار گیرد. - هر چند استفاده از عامل مقاوم کننده خارجی بر روی مقطع تا حدودی در مقاوم‌سازی فولاد هم نقش دارد اما خوردگی فولاد می‌بایست متوقف شود تا به بتن اطراف آن هم آسیب نرسد. چنین صدماتی می‌تواند باعث ضعف و کاهش قدرت چسبندگی بتن و FRP شده و آسیب پذیری در مقابل یخ زدن - آب شدن را افزایش دهد. در زمینه خوردگی فولاد می‌بایست عمق کربناتاسیون و مقدار کلراید در بتن مشخص شود. در کل اگر مقدار کلراید بزرگتر از 0/3٪ وزن سیمان باشد، خطرناک تشخیص داده شده. - جهت کاهش خطر خوردگی فولاد، نشت آب، جلوگیری از کاهش مقاومت چسبندگی و غیره بهتر است ترک خوردگی‌ها به روش تزریق رزین پوشانده شود. هر ترک یا درز اجرایی عریض‌تر از 0/2 میلیمتر می‌بایست با استفاده از رزین مناسب و با ویسکوزیته پایین پر شود

8-3-2- آماده کردن سطح

8-3-2-1- سطح بتن

جهت حصول به چسبندگی مناسب FRP با بتن، سطح بتن باید در ابتدا آماده شود

1- سطح می‌بایستی زیر و خشن (roughened) شده و از آلودگی‌ها پاک گردد. در چنین حالتی کیفیت بتن در بهینه‌ترین حالت مورد استفاده خواهد گرفت. این امر با استفاده از بلاست کردن پر فشار سطح (آب، ماسه، و سنگ ریزه) ترجیح داده می‌شود. در صورت blasting بلاست کردن، سطح بتن می‌بایست شبیه ورقه‌ای از ماسه درشت (coarse sand paper) با حالت ضعیفی از نمای دانه بندی بتن، شود. اغلب سیستم‌های wet lay up نیازمند سطح صاف‌تری هستند بنابراین در این حالت شاید سائیدن (grinding) سطح مناسب تر باشد یا اینکه اگر سطح بلاست شد قبل از چسباندن FRP یک لایه بتونه یا آستر (putty) انجام شود. اگر بلاست کردن سطح بتن با فشار آب انجام شود می‌بایست تا خشک شدن سطح بتن، استفاده از FRP EBR به تعویق افتد. روش‌های مکانیکی (همانند scabbing و غیره) که ممکن است سبب لطمه زدن به کیفیت سطح خارجی بتن گردد مجاز نمی‌باشد (مگر اینکه اثرات منفی آن از طریق کاهش دادن مقاومت کششی و چسبندگی، در طراحی به حساب آورده شود). صرفنظر از روش انتخابی، اجرای مقاوم‌سازی نباید به بتن لطمه بزند.

2- بتن می‌بایست سالم و به دور از معایب و صدمات باشد (خوردگی فولاد، ترک‌های عریض و غیره) همانگونه که در بخش 8-3-1 هم بیان شد.

3- میزان ناصافی (unevenness) مجاز، بستگی به نوع FRP EBR دارد. نوارها اغلب سختی نهایی خود را قبل از استفاده کسب کرده‌اند و آنها را با چسبهای با ویسکوزیته بالا استفاده می‌کنند. بدین جهت آنها حساسیت کمتری نسبت به ناصافی سطح دارند. الیاف و ورقه‌هایی که خیلی انعطاف پذیر می‌باشند، خود به شکل ناصافی سطح در می‌آیند بنابراین حساسیت در این زمینه در مورد آنها بیشتر است. مقادیر مجاز ناصافی در جدول صفحه بعد ارائه شده است. محدودیتهای ناصافی پس از استفاده FRP EBR در بخش 3-3-8 مورد بحث قرار می‌گیرد. بدلیل محدودیت ناصافی سطح بتن، عموماً یک لایه آستر putty همراه با رزین اولیه برای نوع wet lay – up، بر روی سطح بتن زده می‌شود. آستر مورد استفاده باید تمام شرایط لازم برای موادی که جهت تعمیر بتن بکار می‌روند، داشته باشد. علاوه بر آن سازگار بودن رزین با آستر مورد استفاده می‌بایست به اثبات برسد. پس از آماده کردن سطح (از نظر زبری و ناصافی و...) می‌بایست دوباره زدودن گرد و غبار از سطح انجام شود. می‌توان این کار را با جاروی برقی و یا پمپ باد انجام داد.

4- درصد رطوبت مجاز سطح توسط تولید کنندگان چسب و FRP تعیین می‌شود. لازم به یادآوری است که در محیط‌های نمناک و شرجی، تنها انواع خاصی از چسب‌ها مجاز به استفاده هستند. مشخصات این چسبها در جدول 1-8-4 ارائه شده است. تحت هیچ شرایطی سطح بتن نباید خیس باشد. دمای سطح بتن می‌بایست 5 درجه سانتیگراد (بسته به میزان رطوبت هوا) بالاتر از حالت شب‌نم زدگی (dew) باشد. در غیر این صورت می‌بایست از دستگاه‌های حرارتی و یا رطوبت زدا استفاده شود.

5- می‌بایست در نقاطی از سطح بتن که قرار است FRP EBR چسبانده شود، علامت گذاری کرد. در مواردی که لازم است از الیاف و ورقه‌ها بر روی لبه‌های تیز مقطع بتنی استفاده شود می‌بایست ابتدا این لبه‌ها را با شعاعی که در جزییات طراحی مشخص شده، گرد کرد اگر لازم است که از مهاربندی مکانیکی استفاده شود باید تمام مقدمات کار به درستی انجام شود.

6- استفاده از لایه آستر primer در حالت معمول، الزامی نیست. اما گاهی ممکن است که زدن لایه آستری توسط تولید کنند چسب توصیه شود. استفاده از آستر همچنین ممکن است که قبل از استفاده از بتونه putty توصیه شده باشد که عموماً جهت حصول به سطح صاف بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

Type of FRP EBR		
	Permissible unevenness on a 2.0 m base (mm)	Permissible unevenness on a 0.3 m base (mm)
"Prefab", thickness > 1 mm	10	4
"Prefab", thickness < 1 mm	6	2
"Cured in situ"	4	2

FRP EBR 8-3-2-2

- نوارها و لایه‌های FRP (نوع پیش ساخته prefab): این نوارها در عرض‌های مشخص به محل اجرا برده شده و طبق طول‌های لازم طراحی بریده می‌شوند. قبل از استفاده می‌بایست آنها را از هر گونه آلودگی نظیر روغن و چربی، گرد و غبار، غبار کربن و غیره پاک کرد. برای نوارهایی که حالت بر چسب

گونه دارند، لایه رویی فقط باید در لحظه استفاده کننده شود و قسمت داخلی با دست تماس پیدا نکند. اگر این نوارها، لایه بر چسب ندارند می‌بایست استفاده از آنها با دقت کافی صورت گیرد تا سطح آنها در لحظه چسباندن کثیف نشود. تمیز کردن نوارها می‌بایست مطابق دستورالعمل استفاده از آنها، صورت گیرد. می‌بایست قبل از مصرف از بروز هر گونه آسیب دیدگی و مشکلی در نوارها که در اثر حمل و نقل، بریدن نامناسب و کارکردن و دستکاری روی آنها، ممکن است بوجود آید، مطمئن شویم. این نوارها و لایه‌ها نباید قبل از مصرف پیچ خورده و یا تاب داشته باشند.

- الیاف و صفحات (نوع wet lay-up) :

آنها را مطابق مشخصات طراحی به ابعاد سطح مورد نیاز می‌برند. هنگام استفاده می‌بایست از هر گونه صدمات احتمالی و آلودگی در حین بریدن و یا نقل و انتقال آنها جلوگیری شود فویل محافظتی (foil) و یا لایه بر چسبی آنها فقط باید در لحظه استفاده کننده شود. برای استفاده از آنها می‌بایست مطابق دستورالعمل تولید کننده، اقدام گردد. این الیاف و یا صفحات می‌بایست پیچ و تاب نداشته باشند و یا الیاف غیر هم راستا در میان آنها نباشد.

3-3-8 استفاده از FRP EBR

استفاده از آنها بستگی به نوع این مصالح دارد. اگر نوع پیش ساخته باشند که فقط برای چسباندن از چسب استفاده می‌شود. چسب مورد استفاده هم معمولاً ویسکوزیته بالایی دارد. اما برای نوع wet lay-up از رزین هم برای چسباندن و هم برای آغشته کردن الیاف و تشکیل لایه مقاوم کننده استفاده می‌گردد. معمولاً رزین مورد استفاده در آنها، ویسکوزیته پایینی دارد. استفاده از FRP EBR باید مطابق توصیه‌های انجام شده و همگام با معیارهای کیفی، آنگونه که در بخش 4-8 تعریف می‌شود، باشد. علاوه بر آن مواردی نظیر دمای مجاز رطوبت، نسبت و زمان مخلوط کردن (mixing time)، زمان گیرش چسب، pot life، دوران انبارداری (shelf life)، موارد ایمنی و توصیه‌ها، موارد مربوط به عوامل و صدمات محیطی، زمان و طول مدت عمل آوری و غیره که توسط تولید کننده مشخص می‌شود، مد نظر قرار گیرد. دما و رطوبت محیط می‌بایست مطابق حدودی باشد که توسط تولید کننده چسب و رزین پیشنهاد شده است. عملیات اجرایی می‌بایست در مدت زمانی معادل 80٪ زمان تعیین شده برای مصرف چسب (pot life) و زمان گیرش (open time) تکمیل شود پس از استفاده و عمل آوری، سطح FRP می‌بایست صاف و مستقیم باشد (سطح مقعر می‌تواند موجب ویرامدن FRP شود). عمق ناصافی سطح در یک طول مبنای 0/3 میلیمتر برای نوع پیش ساخته FRP به 4 میلیمتر و برای سیستم‌های wet lay up به 2 میلیمتر محدود شده است.

1-3-3-8 نوع پیش ساخته (نوار یا لایه laminates)

پس از مخلوط کردن چسب و به هم زدن آن یک لایه نازک بر روی سطح بتن زده می‌شود. سپس بر روی FRP چسب زده می‌شود. این عمل به شکل dome صورت می‌گیرد. (100 متر عرض صفحه: حداکثر 5 میلیمتر بلندی). تا حدودی ضخامت در طول خط مرکزی ناحیه چسب زده شده بیشتر است این باعث کاهش احتمال شکل گیری حباب‌ها و فضاهای خالی در زیر نوار به همگام چسباندن بر روی بتن می‌شود. نوار با استفاده از یک غلطک لاستیکی بر روی بتن فشار داده می‌شود تا تماس اولیه مناسب حاصل شود. چسب اضافی که از لبه‌ها بیرون می‌زند باید پاک شود. فشار آوردن روی نوار می‌بایست به گونه‌ای صورت گیرد که در زیر نوار حباب ایجاد نشود و هوا کاملاً خارج شود. (جهت حرکت دادن غلطک باید از وسط به طرفین باشد) ضخامت نهایی درز چسبندگی می‌بایست در همه جا یکنواخت باشد و حداقل ضخامت چسب به $1/5$ میلیمتر تا 2 میلیمتر در سطح مشترک نوار FRP و بتن برسد. معمولاً نوارها به صورت یک لایه‌ای استفاده می‌شوند. در غیر این صورت استفاده از چند لایه (در صورت لزوم) می‌بایست مطابق مشخصات فصل 7 باشد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که به جای استفاده از چسب بر روی هر دو سطح بتن و FRP می‌توان تنها بر روی یک سطح چسب زد و به همان نتیجه چسبندگی دست یافت. در محل‌های تقاطع (crossings) تغییر ضخامت لایه چسب می‌بایست تدریجی انجام شود و مطابق مشخصات جدول 2-8 باشد. اگر از masking tape بر روی بتن و سطح نوار قبل از عمل چسباندن استفاده شده باشد، بر داشتن و پاک کردن چسب اضافی ساده‌تر خواهد شد. بطور نرمال هیچ عامل اضافی، در طول مدت عمل‌آوری جهت فشار آوردن بر روی لایه چسبانده شده نیاز نمی‌باشد.

2-3-3-8 نوع wet lay – up

برای رسیدن به سطح صاف بتن معمولاً توصیه می‌شود که از آستر و بتونه (primer & putty) بر روی سطح بتن استفاده شود. پس از آن یک لایه چسب با ویسکوزیته پایین بر روی سطح بتن زده می‌شود. ضخامت این چسب می‌بایست یکنواخت باشد. این مرحله زیر سازی یا Under coating نامیده می‌شود. سپس الیاف همراه با فشرده شدن بر روی چسب قرار می‌گیرد به گونه‌ای که هیچ حبابی در مخلوط چسب و الیاف بوجود نیاید. سپس با کمک یک غلطک (roller brush) لایه دیگری از چسب بر روی این الیاف یا ورقه‌ها کشیده شده و فشرده می‌شود تا اشباع سازی (impregnation) صورت پذیرد. این مرحله رو سازی یا رو پوشانی (over coating) نام دارد سطح نهایی آماده شده می‌بتیست بدون ناهمواری باشد و در همه جا ضخامت یکسانی داشته باشد.

جهت افزایش سطح کیفی، می‌توان الیاف یا ورقه‌ها را ابتدا توسط یک دستگاه مخصوص با رزین کاملاً آغشته کرد. این باعث می‌شود که کنترل بهتری بر روی مقدار رزین مصرف شده بر روی الیاف و ورقه‌های FRP EBR داشته باشیم. آنگاه این الیاف را بر روی سطح زیر سازی شده قرار می‌دهیم. اغلب لازم می‌شود که برای این نوع از FRP، از چند لایه استفاده کنیم. اجرای لایه بعدی می‌بایست قبل از اتمام عمل‌آوری لایه قبل صورت پذیرد. مگر در مواردی که به اثبات برسد، حداکثر تعداد لایه‌ها

و ضخامت مجموع آنها می‌بایست مطابق مندرجات فصل 7 باشد. معمولاً هیچ وسیله اضافی جهت پرس کردن لایه چسبانده شده، لازم نیست.

4-3-8 مرحله پایانی Finishing

ممکن است جهت اهداف زیباسازی نیاز به عملیات پایانی باشد. در موارد محافظت در برابر آتش، بروز خطرات احتمالی، محافظت در برابر امواج UV، لایه نهایی برای بقا و دوام طولانی مدت عضو مقاوم‌سازی شده، حیاتی می‌باشد. انواع گوناگونی از اقدامات می‌تواند به عنوان مرحله نهایی انجام شود نظیر رنگ کردن، بتن پاشی shot concrete و پانل‌های ضد حریق. انجام این اقدامات باید بنابر توصیه‌های تولیدکنندگان صورت پذیرد. و سازگاری لایه مقاوم کننده و لایه پایانی می‌بایست مشخص شده باشد. اگر اجرای لایه پایانی همراه با حرارت دهی توأم می‌باشد، باید مراقب صدمه دیدن چسبندگی بتن و FRP بود.

4-8 کنترل کیفی

موارد ارائه شده در این بخش تنها در ارتباط با FRP EBR و استفاده از آن می‌باشد. در مواردی نظیر محافظت از خوردگی فولاد و تعمیر بتن می‌بایست به منابع و مراجع مربوطه، مراجعه کرد.

1-4-8 توصیف ویژگی‌ها و کنترل کیفی مصالح مقاوم کننده

1-1-4-8 کلیات

FRP EBR و چسب مصرفی می‌بایست مشخصاتی مطابق آزمایش استاندارد دارا باشند، خصوصیتی که توسط تولید کننده تهیه می‌شوند می‌بایست تحت آزمایشات استاندارد انجام شده در لابراتوار مستقل قابل تایید باشند. علاوه بر آن تولید کننده می‌بایست مراحل کنترل کیفیت کافی را در طول تولید تضمین نماید. علاوه بر آن آزمایش کنترل کیفیت در طول مراحل اجرا هم می‌بایست انجام شود (مطابق مندرجات بند 3-4-8-4 تولیدات می‌بایست در شرایطی مطابق با آنچه در بند 1-4-8-3 نام برده شده، تحویل گردند. در صورت امکان تعیین مشخصات مواد (مطابق روش‌های آزمایشاتی استاندارد و انجام گرفته توسط آزمایشگاه‌های مستقل) می‌بایست به تایی یک انجمن یا ارگان (body) برسد و مدرک کیفیت دریافت کند. البته روش‌های استاندارد می‌تواند مختص تعیین مشخصات FRP EBR باشند، کم می‌باشند و در آینده احتمالاً بر تعداد فعلی آنها افزوده خواهد شد.

2-1-4-8 عامل ایجاد چسبندگی

(1) کلیات

چسب مورد استفاده برای FRP از بخش رزین و سخت کننده (hardner) تشکیل شده است. پایه این چسب بر اساس اپوکسی دوام خوبی در کاربردهای مهندسی عمران چیزی بیش از 30 سال، از خود نشان داده‌اند و این پایداری آنها را ثابت می‌کند. مشخصات چسبهایی که برای چسباندن المانهای سازه‌ای بکار می‌روند در (CEN 2001) prEN 1504-4 مشخص شده است.

1 مشخصات فیزیکی:

ویسکوزیته و تیکستوتروپی: عامل پلیمری چسباننده می‌بایست پس از مخلوط کردن، مطابق دستورالعمل تولید کننده، قابل استفاده باشد. چسب می‌بایست با حداقل مشخص شده برای ضخامت خط چسبندگی (بخش 2-3-8) و لایه‌هایی مطابق مشخصات مصرف چسب و از طریق آغشته کردن دو طرف که باید بهم بچسبند مورد استفاده قرار گیرد. ویسکوزیته چسب باید مقداری « بهینه » باشد و مشخصاً در حالت استفاده از نوع پیش ساخته FRP با ویسکوزیته در حالت استفاده از نوع wet lay up متفاوت می باشد. تیکستوتروپی چسب وقتی نیاز می‌شود که لازم باشد چسب با ویسکوزیته بالا در هنگام پهن شدن و آغشته سازی سطح، حالت نمناکی خود را حفظ کند (خشک نشود). همچنین با توجه به درجه حرارت‌های متفاوت محیط کار، ممکن است که درجات مختلف چسب تولید و در دسترس قرار گیرد. ویسکوزیته باید با توجه به (EN ISO 3219, CEN 1995) (ISO 3219 (ISO 1993a) مشخص شود. میزان مفید بودن برای استفاده بر روی سطوح افقی، قائم و مطابق (CEN 1799 (En 1998a) مشخص می‌شود. شرایط عمل‌آوری و خشک شدن آب: چسب بایستی تحت شرایط بحرانی عمل‌آوری از نظر رطوبت و گرما، قادر به رسیدن به مقاومت مور نیاز باشد. شرایط بحرانی (extreme) برای هر چسب توسط تولید کننده آن مشخص می‌شود. حداکثر دما با توجه به ویسکوزیته و pot life تعیین می‌شود. حداقل دمایی که می‌توان در آن عمل‌آوری را انجام داد معمولاً 5 درجه سانتیگراد می‌باشد. حداکثر رطوبت که بیش از آن چسبندگی لازم بدست نخواهد آمد اغلب 80٪ در نظر گرفته می‌شود. در زمان عمل‌آوری بنابر آنچه در prEN 12617-3 (CEN 2001b) تعیین شده انقباض چسب می‌بایست کمتر از 0/1٪ باشد.

- دوره انبارداری، زمان گیرش، مدت مجاز برای استفاده از چسب قبل از سفت شدن : پس از مخلوط کردن و بهم زدن چسب و مدت آماده کردن سطح بتن pot life چسب می‌بایست در دمای 20 درجه سانتیگراد، بیش از 40 دقیقه باشد. این مقدار با توجه به prEN 14022 (CEN 2001) مشخص می‌شود زمان گیرش چسب (پس از آغشته کردن سطوح) که در طی آن اتصال حاصل می‌شود می‌بایست بیش از 20 دقیقه در دمای محیطی 20 درجه سانتیگراد باشد طول این زمان در EN 12189 (CEN 1999a) مشخص شده است. دوران انبارداری تمام اجزاء تشکیل دهنده چسب، درون ظروف اصلی خود و در دمای بین 5 درجه سانتیگراد تا 25 درجه سانتیگراد می‌بایست بیش از 6 ماه باشد. اگر هر کدام از زمانهای گیرش، دوره مجاز انبار کردن و زمان قبل از مصرف آن از حدود عنوان شده گذشته باشد نباید از آن چسب استفاده کرد.

- دمای موقت سفت شدن (شیشه شدگی) Glass transition temperature

این دما که آنرا با Tg نشان می‌دهیم نسبت به دمای حالت سرویس، می‌بایست بطور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر باشد. Tg می‌بایست بزرگتر مساوی 45 درجه سانتیگراد و یا دمای هوای غیر آفتابی سرویس به اضافه 20 درجه هر کدام که بزرگتر است، باشد. یعنی بزرگتر مساوی ماکزیمم این دو حالت باشد. مشخصات مربوط به این پارامتر در prEN 12614 (CEN 2001d) می‌باشد.

- مقاومت رطوبتی: مقدار رطوبت انتقال یافته از میان لایه چسب می‌بایست به حداقل برسد. ماکزیمم جذب آب آن در تست غوطه‌وری در آب، مطابق prEN 13580 (CEN 2001e) نباید از 3٪ وزنی آن، فراتر رود.

- مشخصات فیلر (Filler) :

فیلر مورد استفاده با چسب یک ماده غیر هادی مقاوم در برابر رطوبت و قادر به تحمل دما تا 120 درجه سانتیگراد بدون اینکه افت کیفیت پیدا کند، باشد و همچنین ماکزیمم اندازه ذرات آن 0/5 میلیمتر باشد.

2 خصوصیات مکانیکی کوتاه مدت چسب عمل آوری شده:

- مدول الاستیسیته در خمش: این مدول مطابق آنچه در ISO 778 (ISO 1993b) مشخص شده، می‌بایست در محدود N/mm^2 1500 تا 2000 باشد. حد پایین در این محدوده برای محدود کردن خیز و حد بالا برای به حداقل رساندن تمرکز تنش می‌باشد.
- مقاومت برشی: حداقل مقدار مورد نیاز آن در دمای مبنای 20 درجه سانتیگراد برابر N/mm^2 12 مطابق آنچه در EN 12188 (CEN 1999b) تعیین شده، می‌باشد.
- مقاومت چسبندگی: مقاومت چسبندگی، عامل چسباننده مطابق EN 12188 (CEN 1999b) باید بزرگتر از N/mm^2 15 در دمای 20 درجه سانتیگراد باشد.
- مقاومت فشاری: مقاومت فشاری باید مطابق EN 12190 (CEN 1998b) تعیین شود.

3 دوام و خصوصیات دراز مدت چسب عمل آوری شده:

از طریق انجام آزمایشات شتاب داده شده (accelerated) دوام پذیری چسب باید تایید شود همچنین می‌توان با انجام آزمایش و بررسی درازمدت در یک دوره حداقل 15 ساله و تحت شرایطی مشابه شرایط استفاده، دوام و پایداری چسب را به اثبات رسانید. مراجع مورد اشاره در زمینه‌های دوام، خستگی و خیز چسب تحت آزمایشات بارگذاری عبارتند از prEN 13894-2 (CEN 2001i), prEN 13584-1 (CEN 2001 f), prEN 13733 (CEN 2001g), prEN 13894-1 (CEN 2001h). این آزمایشات ممکن است با توجه به نوع FRP EBR متفاوت باشد.

FRP EBR 8-4-1-3

کلیات

FRP EBR بر اساس نوع الیاف، راستای الیاف، رزین نگهدارنده و نسبت حجمی الیاف تشکیل دهنده، تعریف می‌شود. اکثراً FRP EBR مورد استفاده بر اساس الیاف کربن و رزین اپوکسی ساخته شده است. اگرچه انواع دیگری مثلاً با الیاف glass یا آرامید هم مورد استفاده قرار می‌گیرند یا رزین غیر از اپوکسی استفاده می‌شود. راستای قرارگیری الیاف می‌تواند در یک جهت یا چند راستا باشد در تمام حالات الیاف باید پیوسته باشند نه منقطع.

نوع FRP EBR و مشخصات هندسی:

منظور از نوع FRP، پیش ساخته بودن prefab در اشکال نوار و یا لایه و نوع wet lay up در اشکال الیاف یا صفحه می‌باشد. همچنین نوع الیاف نوع رزین، راستای الیاف، عرض، طول و ضخامت FRP جز مشخصات هندسی آن محسوب می‌گردند ضخامت کلی globxl thickaess و ضخامت حالت خشک آن یعنی dry-fiber thicknex می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. در بخش 5-1-2 فصل 2 در این ارتباط

صحبت کرده‌ایم ضخامت معادل در حالت الیاف خشک dry fiber در صفحاتی که الیاف آنها چند جهته می‌باشند، بستگی به جهت الیاف دارد.

مشخصات فیزیکی :

- نسبت الیاف: نسبت وزنی الیاف، نسبت حجمی الیاف و یا وزن واحد سطح الیاف برای هر راستای قرار گرفتن الیاف می‌بایست مشخص باشد.

- میزان رزین مصرف شده برای آغشته کردن و اشباع الیاف: حداقل مقدار رزین، در واحد سطح برای الیاف یا صفحاتی که در محل عمل آوری و تولید می‌شوند یعنی غیر پیش ساخته، بایستی مشخص باشد.

- ضریب انبساط حرارتی: این ضریب با توجه به EN 1770 (CEN 1998c) تعیین می‌گردد.

- دمای گذر از حالت Glass transition temp glass

دمای مذکور برای نوع پیش ساخته FRP معمولاً بیشتر از (ناشی از مراحل ساخت کارخانه‌ای) مقدار این دما در عامل چسبندگی می‌باشد. در نوع wet lay up مقدار این دما با توجه به رزین مورد استفاده برای چسباندن و آغشته سازی الیاف تعیین می‌گردد.

- میزان جذب رطوبت و پایداری شیمیایی:

همانگونه که در مورد چسب هم این مشخصه محدود نشده بود، در مورد FRP هم می‌بایست برای آن یک حد مشخص کرد. عموماً پایداری شیمیایی FRP خوب است، اما لازم است که عوامل موثر محیطی که با آن در تماس هستند، مدنظر قرار گیرد.

مشخصات مکانیکی کوتاه مدت FRP

- مقاومت کششی، مدول الاستیک و کرنش کششی نهایی مشخصات اصلی صفحات FRP می‌بایست با آزمایش کششی مشخص شود. کرنش کششی و مدول الاستیسیته مماسی و مدول سکانت آن (که در حدود 20 تا 60٪ بار نهایی تعریف می‌شود) و کرنش شکست آن می‌بایست تعیین شود. هیچ روش استاندارد شده‌ای برای آزمایش این خصوصیات وجود ندارد. اما ملاک ما روش استفاده شده در EN 527-5 (ISO 1997), EN 2561 (CEN 1996), ASTM (1995) / ASTM D 3039 می‌باشد. در آزمایش تعیین مقاومت کششی و مدول الاستیسیته باید ذکر شود که کدام ضخامت در محاسبات منظور شده است. (ضخامت کلی، ضخامت در حالت الیاف خشک و) در صفحات FRP که الیاف آن چند جهته می‌باشد، مشخصات بدست آمده باید با توجه به هر جهت تعیین شود.

دوام و خصوصیات درازمدت:

FRP باید مقاومت خوبی در برابر رطوبت، مواد شیمیایی و تشعشع UV داشته باشد و یا اینکه با لایه‌های محافظتی در مقابل این عوامل، حفظ شود. خصوصیات خیز FRP ممکن است برای طراحی لازم باشد در فصل 9 در ارتباط با این مقوله و سایر ملاحظات ویژه در طراحی صحبت خواهیم کرد.

4-1-8 عملکرد کامپوزیت بین FRP EBR، عامل چسبندگی و بتن

- 1- کلیات موفقیت آمیز بودن مقاوم سازی با استفاده از FRP EBR تا حدود بسیار زیادی بستگی به کیفیت و چگونگی بین سه عامل فعال در این موضوع دارد : FRP EBR، چسب و بتن عملکرد مناسب چسبندگی از نظر دوام و همچنین تحت شرایط حاد باید تضمین شده باشد.
- 2- چسبندگی بین FRP، عامل ایجاد چسبندگی و بتن: انواع مختلفی از آزمایشات در این زمینه می تواند انجام گیرد. توصیه می شود که آزمایشی انجام شود که کاربرد چسب در شرایط مشخص شده مورد بررسی قرار گیرد و عملکرد آن به اثبات برسد.

آزمایش عملکردی: Applicability test

FRP EBR مطابق مراحل که در بند 3-8 عنوان شد بر روی بتن چسبانده می شود طول این لایه 1 متر و عرض آن متناسب با شرایط معمول استفاده از FRP می باشد. ضخامت آن هم برابر ضخامت ماکزیمم تعداد لایه های مجاز می باشد. سطح دال بتنی که FRP بر روی آن (طی این آزمایش) چسبانده می شود به حالت افقی و در ارتفاع 2 متر سطح زمین ثابت شده است. آزمایش تحت محیط کنترل شده از نظر میزان رطوبت، حداقل و حداکثر دما انجام می پذیرد. تمام مصالح می بایست به مدت 24 ساعت قبل از شروع آزمایش در شرایط معین و مشخص نگهداری شده باشند. سطح دال بتنی می بایست با توجه به ابعاد FRP به میزان کافی بزرگ باشد و حداقل ضخامتی برابر 40 میلیمتر داشته باشد. کیفیت بتن در حدی است که حداقل مقاومت کششی آن $3 \frac{N}{mm^2}$ باشد. بسته به شرایط اجرای واقعی، سطح بتن می تواند معمولی یا تعمیر شده باشد. در حالتی که می خواهیم آزمایش بروی بتن تعمیر شده انجام پذیرد، یک لایه اضافه ملات به ضخامت 10 میلیمتر بر روی سطح بتن به کار می رود. دال مقاوم سازی شده در شرایط ویژه (تعریف شده speci fied) به مدت 7 روز و اضافه بر آن 7 روز هم تحت شرایط آزمایشگاهی در دمای 20 درجه عمل آوری می شود. ارزیابی لایه اجرا شده FRP بر روی بتن از نظر ناهمواری، ضخامت، درز چسبندگی و وجود خلاء یا حباب هوا در زیر لایه، پس از اتمام کار صورت می گیرد. (مراجعه به بخش 3-4-8). به علاوه پس از مدت 3 - 7 و 14 روز از بتن مقاوم سازی شده کر گیری می شود. قطر این نمونه ها $\Phi 50mm$ می باشد. این کر گیری در ارزیابی عملکرد چسبندگی به کار می رود (در ادامه توضیح داده خواهد شد) شرایط فوق الذکر آزمایش مربوط به محیط خشک است. اگر نوع چسب قابل استفاده در محیط مرطوب باشد، دال بتنی به مدت 7 روز در آب غوطه ور خواهد شد و ارزیابی ها پس از اینکه 2 ساعت از بیرون کشیدن دال بتنی از آب گذشت و سطح آنرا خشک کردند، انجام خواهد شد.

- عملکرد چسبندگی در کشش مستقیم: می توان عملکرد چسبندگی را با استفاده از آزمایش تنش مستقیم نمونه بتن، عامل چسباننده و FRP EBR مورد ارزیابی قرار داد. نمونه های مورد آزمایش از طریق کر گیری بدست می آیند. آزمایش بر روی نمونه ها پس از مدت 7 روز و 14 روز عمل آوری در شرایط معین انجام می گیرد. علاوه بر آن بر روی این نمونه ها آزمایش مداوم و مواجهه با شرایط محیطی هم باید صورت پذیرد. شکست نمونه ها می بایست در داخل بتن رخ دهد. روش انجام این آزمایشات در EN 1542 (CEN 1999c) تعریف شده است.

آزمایش دوام: ارزیابی این مشخصه از طریق انجام آزمایش کشش مستقیم پس از سیکل یخ زدن و آب شدن نمونه‌ها و یا پس از گذشت مدت زمانی در معرض محیط بیرون بودن، صورت می‌گیرد. نمونه‌هایی که عمل‌آوری شده‌اند می‌بایست پس از ده سیکل یخ زدن آب شدن مورد آزمایش کششی مستقیم قرار بگیرند. سیکلها بدین صورت است که نمونه‌ها 4 ساعت در دمای منفی 20 درجه و 4 ساعت در دمای مثبت 60 درجه و 16 ساعت در آب 20 درجه نگهداری می‌شوند. نمونه‌هایی که در معرض هوای آزاد قرار داده می‌شوند، باید حداقل 1 سال مطابق شرایط prEB 13733 (CEN 2001g) در فضای آزاد نگهداری شوند.

عملکرد چسبندگی در برش: هیچ روش استاندارد برای این آزمایش در دست نیست البته برای این آزمایش مطابق IMR ConFibre Crete, fib TG9.3 اقدام می‌شود.

کار آزمودگی و مهارت کارگران

تکنیک مقاوم سازی که شاید همراه با تعمیر اولیه سطح بتن هم باشد، می‌بایست توسط افراد با تجربه انجام پذیرد. رئیس تیم کارگران باید برای تمام روشها و تکنیک‌های مقاوم‌سازی آموزش دیده باشد و در تمام مدت اجرا، در محل حضور داشته باشد. آموزش مطابق بند 3-1-8-4 می‌تواند صورت پذیرد.

8-4-3 کنترل کیفی اجراء

8-4-3-1 نکات کلی

تولید مصالح باید همراه با ارائه اطلاعات زیر باشد:

- نام، نوع و کاربرد محصول، اجزا تشکیل دهنده، نام و آدرس تولید کننده شماره سریال batch no و تاریخ انقضاء

- بنا به درخواست، اطلاعاتی در ارتباط با خصوصیات و مشخصات مصالح با توجه به روشهای استاندارد آزمایش (بخش 1-4-8)

- اطلاعاتی در ارتباط با استفاده، حمل و نقل و نگهداری محصولات همانند pot life زمان گیرش زمان مجاز نگهداری و انبار نسبت‌های اختلاط، مواد مورد نیاز برای مخلوط شرایط نگهداری شرایط اجرا راهنمای مصرف زمان عمل‌آوری مابین آستر و بتونه کاری و غیره

- نکات ایمنی همانند سمی بودن، قابلیت اشتعال، موارد محیطی زیست و غیره

اجزا تشکیل دهنده عوامل چسباننده (چسب، بتونه، آستر) باید جداگانه تهیه شده و مطابق نسبت اختلاط آنها، با هم ترکیب گردند. معمولاً یکی از اینها به جزء دیگر اضافه می‌شود. سرعت اضافه کردن و مخلوط کردن این اجزا باید تا حد کافی کم باشد تا از بروز حباب هوا در مخلوط جلوگیری شود. هم زدن و مخلوط کردن باید تا آنجایی ادامه یابد که رنگ و حالت یکنواختی در تمام ظرف حاصل شود.

دقت خاصی باید صرف شود تا در حین مراحل نقل و انتقال استفاده و انبار کردن FRP EBR، صدمه و خدش‌های به آن وارد نشود. بریدن FRP EBR مطابق اندازه‌های طراحی می‌بایست در محل اجرا صورت گیرد. در هنگام بریدن هم باید مراقب بود صدمه‌ای به مصالح وارد نشود.

8-4-3-2 کنترل کیفی مصالح

نمونه‌های آزمایشی متعددی از مصالح فراهم شده باید تهیه شود. تعداد آزمایشات کیفی بستگی به اهمیت کار دارد (سطحی که باید مقاوم‌سازی شود، سختی احتمالی مقاوم‌سازی و اینکه مصالح مورد نیاز یکجا تامین شده و غیره). حداقل 3 آزمایش کششی بر روی FRP و 6 آزمایش فشاری برای عامل چسبندگی مطابق 1-4-8-1 و 1-4-8-2 می‌بایست انجام شود مگر اینکه کیفیت مصالح توسط یک عامل مستقل مورد تایید قرار گرفته باشد.

3-4-8 کنترل بر شرایط اجرا

باید قبل و بعد از انجام تعمیرات بر روی سطح بتن، از مطلوب بودن شرایط برای چسبندگی مطمئن شویم، کیفیت بتن با مقاومت کششی آن که با آزمایش کششی (pull off) مطابق EN 1542 (CEN 1999c) تعیین می‌شود، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مقاومت بدست آمده باید مساوی مقاومت کششی توده بتنی (مکان وقوع شکست تماماً در داخل بتن می‌باشد) مگر اینکه در ملاحظات طراحی به حساب آمده باشد. مینیمم مقاومت کششی می‌بایست $1/5 \frac{N}{mm^2}$ باشد. ثانیاً حدود مجاز ناهمواری سطح بتن (تعمیر شده) در جدول 2-8 مشخص شده است. علاوه بر آن رطوبت هوا، درجه حرارت و رطوبت سطح بتن برای ارزیابی وضعیت محیطی مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. (محیط خشک یا مرطوب حداکثر میزان رطوبت مجاز، محدودیتهای درجه حرارت برای استفاده از چسب و غیره)

4-4-8 کنترل کیفیت مراحل استفاده از FRP

در طول مدت اجرا و کنترل نهایی مواردی باید مورد توجه قرار گیرد که حصول به کیفیت خود مقاوم‌سازی بدست آید:

- کنترل اینکه FRP EBR پس از اجرا و همچنین کنترل درز چسبندگی
- کنترل کیفی سطح چسبندگی آنچنان که در بخش 4-4-8 مشخص خواهد شد.

4-4-8 کیفیت چسبندگی پس از اجرا

آزمایشات اضافی تر بر روی سطح چسبندگی (وجود خلاء یا نقص، مقاومت چسبندگی) ممکن است لازم نباشد مشروط بر آنکه از نقش سطح چسبندگی در انتقال تنش بین FRP و بتن صرفنظر شده باشد (مثلاً در محصور کردن ستونها). در اغلب حالات لازم است کنترل کیفی سطح چسبندگی انجام شود. کنترل کیفی چسبندگی می‌تواند با انجام آزمایش غیر تخریبی (Non Destrvtiv) یعنی NDT و آزمایش نیمه تخریبی PDT (Partially Destrvtive Testing) صورت پذیرد. آزمایش NDT برای سطوحی که مقاوم‌سازی FRP در آنجا نقش کلیدی و اساسی دارد ترجیح داده می‌شود. جهت کنترل کیفی، در طول اجرا مناطق جداگانه‌ای برای آزمایش انتخاب می‌شود. این مناطق می‌بایست دقیقاً تحت شرایط واقعی اجرای FRP EBR مقاوم‌سازی شوند تا نتایج آزمایش قابل عمومیت بخشیدن به کل کار باشد. توصیه می‌گردد که حداقل 3 آزمایش چسبندگی در 3 روز و 7 روز پس از اجرا و در نقاط بحرانی چسبندگی که امکان وجود خلاء یا نقض در آنها بیشتر، انجام گیرد.

1-4-4-8 روشهای نیمه تخریبی:

- کنترل چسبندگی با آزمایش کشش مستقیم: انجام این آزمایش از طریق کر گیری در FRP EBR، تا 5 داخل بتن صورت می گیرد. یک صفحه گرد (دیسک) بر روی FRP EBR چسبانده می شود و پس از اتمام عمل آوری و سفت شدن، آزمایش کشش مستقیم انجام می شود. این آزمایش مطابق مشخصات مندرج در EN 1542 (CEN 1999c) انجام می شود.

- کنترل چسبندگی با آزمایش برشی: در این آزمایش قسمتی از نوار FRP که در نزدیکی لبه مقطع بتنی چسبانده شده، در صفحه هم سطح خود کشیده می شود تا آنجا که جدایی نوار از روی بتن در اثر برش اعمال نشده، رخ دهد. در این آزمایش مقاومت چسبندگی با توجه به نیروی برشی که به آن اعمال می شود، ارزیابی می گردد.

- کنترل چسبندگی با آزمایش پیچش:

پس از کر گیری تا عمق 5 میلیمتری بتن و چسباندن یک حلقه بر روی این قسمت و پیچاندن آن، FRP در معرض پیچش و جدایی از روی سطح بتن قرار می گیرد. در این آزمایش، چسبندگی با وارد کردن یک گشتاور پیچشی، مورد ارزیابی قرار می گیرد.

2-4-4 روشهای آزمایشی غیر تخریبی:

برای اطمینان از اینکه حفره های بزرگ در زیر سطح چسبندگی وجود ندارد، آزمایشات زیر می تواند مورد استفاده قرار گیرد:

- ضربه زدن (Tapping): در این روش با نواختن ضربات ملایم با استفاده از میله فولادی که نوک آن گرد شده است و حداقل قطر آن 5 میلیمتر می باشد، می توان به وجود فضاهای خالی و حفره پی برد

- تکنیک های آلتراسونیک (Ultrasonic pulsed echo)

با استفاده از اشعه آلتراسونیک فرکانس بالا برای اسکن کردن سطح چسبندگی بتن و FRP می توان وجود نقاط ضعف و اشکالات را مشخص کرد. در این نقاط امپرانس صوتی با سایر نقاط متفاوت است و این باعث متمایز شدن آنها می گردد. به کمک این روش وجود حباب و قسمتهای جدا (غیر چسبیده) در زیر لایه FRP که در مجاورت لبه ها و یا نقاط انحنا با شعاع کم، چسبانده شده اند را نمی توان به نحو مناسبی با این روش تست کرد. از آنجاییکه این روش آزمایش به مدت زمان طولانی نیاز دارد. قویاً توصیه می شود که تنها برای قسمتهایی که مقاوم سازی در آنها بسیار حساس و مهم است. مورد استفاده قرار گیرد.

- تکنیک اسلاید آلتراسونیک : Ultrasonic transparency

در این روش از اشعه فرکانس پایین آلتراسونیک برای اسکن کردن در راستای عمود بر سطح مقاوم سازی شده و از طریق قرار دادن یک transducer در یک وجه و transducer دیگر در وجه مقابل المان بتنی، کنترل کیفی صورت می گیرد. زمان و میزان ضعیف شدن امواج عبوری از میان دو transducer قرار داده شده بر روی المان، ثبت می گردد. این تنها زمانی مورد استفاده قرار می گیرد که هم سطح مقاوم سازی شده و هم وجه مقابل آن قابل دسترسی باشد. این روش هم وقت گیر است و توصیه بر استفاده از آن در نقاط حساس و خاص می باشد.

- ترموگرافی Thermography: این روش NDT (غیر تخریبی) به صورت موفقیت آمیزی برای کنترل چسبندگی به کار رفته است. این آزمایش می‌بایست در شرایط تعادل حرارتی صورت گیرد. در این روش سطح FRP به صورت یکنواخت گرمادهی یا سرمادهی می‌شود و دمای سطح آن در طول انتقال گرما با یک سیستم تصویر برداری مادون قرمز ثبت می‌شود. اشکالات و نقض‌های احتمالی به صورت نقاطی گرم یا سرد از سایر نقاط متمایز شوند زیرا خصوصیات حرارتی متفاوتی نسبت به سایر نقاط دارند. برای استفاده از این روش در مواردی که چند لایه FRP استفاده شده و یا اینکه از مصالح با هدایت گرمایی بالا نظیر CFRP مورد استفاده قرار گرفته، با محدودیت‌های جدی مواجه هستیم. استفاده از این روش بسیار توصیه می‌گردد اما می‌بایست دقت نظر بالایی در محاسبات جهت یافتن کوچکترین نقاط ضعف مبذول داشت محاسبات بر پایه استفاده از مدل ترمودینامیک برای مقاوم‌سازی انجام می‌گیرد.

- روشهای دینامیک دیگر: در حال حاضر ارائه روشهایی دیگر، بر اساس آنالیز طیف ضربه و نیز انتشار امواج صوتی در سطح، تحت بررسی و ارزیابی می‌باشد.

3-4-8 اصلاحات نقاط ضعف و اشکالات چسبندگی

اگر مقادیر فضاهای خالی و حبابها در زیر FRP، قابل توجه می‌باشند لازم است FRP کنده شده و لایه جدید چسبانده شود. یا اینکه به روش خاصی، رزین در این مناطق تزریق شود در این صورت کاهش مقطع FRP و فشار موضعی در نقاط تزریق رزین و سایر اثرات منفی این روش می‌بایست به حساب آورده شوند تا مشخص شود که هنوز نیازها و ضروریات طراحی رعایت شده است یا خیر.

5-4-8 بازرسی و نگهداری در طول زمان سرویس

لازم است یک برنامه جهت بازرسی و نگهداری قسمت‌های تعمیر شده و مقاوم‌سازی شده سازه، تهیه شود و در اختیار کارشناسان مربوطه قرار داده شود.

فصل نهم: ملاحظات خاص طراحی و اثرات محیطی

1-9 کلیات:

در صورت استفاده مناسب، سیستمهای مقاوم‌سازی FRP در مقایسه با سایر سیستمهای مقاوم‌سازی، هزینه و طول عمر مشابه و با بهتری دارد. هر چند به صورت جداگانه، دوام و پایداری FRP و بتن کاملاً به اثبات رسیده است اما در مورد پایداری و دوام سیستم مرکب این دو مصالح می‌بایست ملاحظات خاصی مد نظر قرار گیرد. سطح مشترک تماس FRP و بتن یک قسمت حیاتی و مهم استفاده از FRP برای مقاوم‌سازی المانهای بتنی در سازه‌ها می‌باشد زیرا انتقال تنشها بین این دو مصالح در این محل رخ می‌دهد. تجربیات موجود نشان می‌دهد که چسبندگی FRP و بتن همیشه هم قابل اطمینان نمی‌تواند باشد کیفیت چسبندگی تحت تاثیر عوامل گوناگونی نظیر شرایط سطح بتن، آماده‌سازی سطح بتن، کیفیت و چگونگی استفاده از FRP و کیفیت خود FRP و دوام رزین آن قرار دارد. در ادامه مقوله دوام بیشتر از سایر عوامل وابسته به مقاوم‌سازی FRP مورد توجه قرار گرفته است.

2-9 glass transition temperature

این دما (Tg)، دمایی است که گرمای بیش از آن عملکرد FRP را تا حدود زیادی تنزل می‌بخشد. انرژی گرمایی در دمای بالاتر از Tg باعث حرکت پیوندهای رزین شده و آنرا انعطاف پذیرتر و نرمتر می‌کند و این سبب کاهش ظرفیت و قدرت چسبندگی می‌گردد. علاوه بر آن موجب می‌شود که سهم باربری و شرکت رزین و تحمل نیروهای وارده کاهش یافته و این مقدار به بار منتقل شده بر روی الیافها (آنها که طول کوتاهتری دارند) افزود می‌گردد. بدلیل اینکه توازن و تعادل نیرو در گروه الیافها به هم می‌خورد، بارهای وارده اضافی بر روی برخی از الیافها از حد قابل تحمل آنها می‌گذرد و باعث گسیختگی آنها می‌شود و به ناچار سهم باربری آنها به گروه دیگری از الیافها اضافه می‌شود و آنها هم ممکن است در حالات بحرانی حتی در حدود 30٪ تا 40٪ کاهش یابد. (Kelley et al. 1999)

برای جلوگیری از خراب شدن ناگهانی چسبندگی بدلیل افزایش حرارت بیش از حد، ماکزیمم دما در حالت سرویس می‌بایست کوچکتر از دما glass transition (Tg) مربوط به رزین و چسب مصرفی باشد. البته Tg ممکن است در طول زمان بدلیل پارامترهای متعدد محیطی نظیر درجه حرارت، رطوبت و غیره تغییر کند. دمای بالا همانند عمل آوری مجدد بر روی مصالح می‌باشد و باعث افزایش Tg می‌شود. جذب رطوبت توسط رزین باعث کاهش Tg خواهد شد (رجوع به بخش 4-9). ضوابط مربوط به این مورد در فصل 8 بخش 2-4-8-1 ارائه شده است. علاوه بر آن جمع آثار کلاسیک شامل اثرات دما می‌بایست مطابق EC2 مد نظر قرار گیرد. اگر عضو مقاومسازی شونده در معرض دماهای بالا قرار خواهد گرفت باید از چسب مناسب با Tg بالا استفاده کنیم. در این مورد دو حالت امکان پذیر است: یا از رزین نوع عمل آوری سرد و Tg اولیه بالا استفاده گردد یا با عمل آوری مجدد post wrig بر روی چسب و رزین، مقدار Tg را افزایش دهیم.

3-9 طراحی در مقابل حریق و محافظت:

1-3-9 کلیات

اگر هیچ عامل خاصی در نظر گرفته نشده باشد، در طی آتش سوزی احتمالی، لایه مقاوم‌کننده برون چسب، بدلیل از بین رفتن یا ضعیف شدن چسب و رزین، از میان خواهد رفت. در چنین شرایطی، حالت تصادفی طراحی برای عضو بدون در نظر گرفتن مقاومسازی می‌بایست انجام شود (فصل 3). همچنین مقاومت بتن در مقابل آتش سوزی می‌بایست ارزیابی شده باشد یک آنالیز کلی برای سازه با در نظر گرفتن تمام اثرات غیر مستقیم افزایش درجه حرارت نظیر تغییرات طولی، مقاومتی و غیره می‌بایست انجام شود. وقتی آنالیزها به صورت منفرد و جداگانه به ارزیابی المانهای بتنی می‌پردازد (المانهای گروه F60، F30 و...) اثرات غیر مستقیم حرارتی نباید مدنظر قرار گیرد.

2-3-9 مقاومسازی المانها بدون محافظت در برابر حریق

در این حالت، مقاومسازی المان بتنی خیلی سریع در برابر حریق از بین می‌رود زیرا حرارت زیاد چسب بین لایه مقاوم‌کننده و بتن را ضعیف می‌نماید. مقاومت یک المان در برابر آتش سوزی را می‌توان با آنالیز تصادفی مقطع بتنی بدون در نظر گرفتن مقاومسازی خارجی، ارزیابی کرد. ضوابط مربوط به المانهای بتنی مسلح و پیش تنیده در بخش 2-2 آیین نامه EC2 تعریف شده‌اند: ممکن است طراحی

ضد حریق سازه‌ای هم بکار رود. مقاومت در برابر آتش سوزی را می‌توان با رعایت مواردی مشخص شده نظیر حداقل ابعاد، حداقل کاور برای المانهای مختلف بتنی و یا با استفاده از روش‌های محاسباتی ساده‌سازی شده نظیر آنالیز حرارتی و مکانیکی (که در آنها مشخصات مصالح نظیر مقاومت، کاهش وارد شده) و یا از طریق روشهای محاسباتی عمومی (با منظور کردن وابستگی و ارتباط بین خصوصیات مصالح با حرارت) مورد ارزیابی و بررسی قرار داد. عضو مقاوم‌سازی شده، در شرایط بروز حریق می‌بایست تحت بارگذاری مطابق بارگذاری تصادفی accidental load عضو مقاوم‌سازی شده، ارزیابی شود.

3-3-9 المانهای مقاوم‌سازی شده همراه با محافظت در برابر حریق

وقتی عضو مقاوم‌سازی شده در شرایطی واقع شده که در برابر آتش آن را محافظت می‌کند، محاسبات مربوط به مقاومت آن در برابر آتش باید با استفاده از روشهای محاسباتی پالایش شده (refined method) انجام پذیرد. آنالیز آنها شامل یک آنالیز پخش و انتقال حرارت در المان و سپس آنالیز مکانیکی المان که ارتباط خواص مصالح با تغییرات درجه حرارت در آن لحاظ شده می‌باشد. یکی از مهمترین مواردی که در مقوله ضد حریق بودن عضو مقاوم‌سازی شده باید مورد توجه قرار گیرد، محدود کردن افزایش دما در لایه چسب که ضعیف‌ترین قسمت سطح مقطع مقاوم‌سازی شده در برابر آتش می‌باشد، است. این حد دمایی وابسته به نوع چسب مورد استفاده می‌باشد و معمولاً بین 50 تا 100 درجه سانتیگراد می‌باشد.

4-9 رطوبت

1-4-9 اثر جذب آب روی FRP

وجود رطوبت یک پارامتر محیطی ناخوشایند و ناهنجار برای تمام مصالح سازه‌ای می‌باشد. فولاد زنگ می‌زند، بتن کربناتی (carbonate) می‌شود، چوب می‌پوسد، زنجیره رزین (resin chains) جدا می‌شود و شیشه مقاومت کششی خود را از دست می‌دهد. در مورد FRP، اولین مورد این است که چگونه شبکه رزین آن در برابر تماس طولانی مدت با آب چه خالص و چه همراه با نمک و املاح، مقاومت می‌کند. مشاهداتی که از قایق‌ها و صنایع نظامی بدست آمده این است که اثر رطوبت در یک زمان نسبتاً طولانی اتفاق می‌افتد (Lubin & Donohve 1980) رزین تشکیل دهنده لایه FRP، آب را جذب می‌کند و مقدار جذب آب بستگی به نوع رزین و دمای آب دارد. دو اثر فوری جذب آب رزین، یکی کاهش T_g (glass transition) و دیگری سخت شدن رزین می‌باشد. هر دو اثر تا حدی پس از خشک شدن رزین، برگشت پذیر می‌باشند. در مورد پلی استر و ونیل استر (vinylesters) تغییرات فوق‌الذکر با توجه به زمان تماس و دمای آب می‌توانند برگشت پذیر باشند و یا نباشند. اپوکسی‌ها پیوندهای استری (ester) ندارد و بنابراین زنجیره پلیمری سادگی هیدرولیز می‌شود. ماکزیمم جذب آب در حدود 3٪ وزنی به صورت نرمال برای چسبهای سازه‌ای، تعیین شده است. (Blaschko et al 1998) صدمات وارده به مصالح مرکب FRP که از ترکیب الیاف و رزین تشکیل شده‌اند می‌تواند به سبب برهم زدن و ایجاد اختلال در ارتباط بین رزین و الیاف توسط رطوبت باشد. این اختلال می‌تواند به صورت شکستن اتصال و

پیوند بین الیاف و عامل چسبندگی شود علاوه بر آن وجود رطوبت می‌تواند سبب جدا شدن «سدیم» و سایر یونهای فلزی از glass شده و این موجب کاهش مقاومت در طول زمان خواهد شد. رطوبت از طرق زیر می‌تواند به کامپوزیت دسترسی داشته باشد:

- خاصیت موئینگی در طول محور الیاف یا در مرز مشترک الیاف و رزین.

- انتقال از طریق ترکها و خلاءهای (voids) موجود در سازه.

- انتشار و گسترش از طریق matrix (احتمالاً منظور شبکه رزین و الیاف می‌باشد - مترجم)

الیاف «آرامید» تا 13٪ وزنی، قادر به جذب رطوبت هستند که این می‌تواند اثر سویی بر روی مقاومت کششی باقی گذارد و نیز ارتباط الیاف و رزین را تحت تاثیر قرار دهد. الیاف کربن با آب واکنشی ندارند و در نتیجه رطوبت تنها می‌تواند در CFRP بر روی شبکه رزین (resin matrix) تاثیر بگذارد.

2-4-9 دوام یک سیستم بتن FRP

برای اطمینان از کیفیت چسبندگی و دوام سیستم مرکب بتن و FRP، تشخیص درست وضعیت موجود المان بتنی (شامل وضعیت فولاد داخل مقطع هم می‌شود) قبل از انجام مقاومسازی بسیار ضروری و مهم است. مشکلات اساسی مقطع بتنی می‌بایست قبل از نصب FRP بر روی مقطع بر طرف شوند یا تعمیر گردند در غیر این صورت روند تخریبی بتن حتی پس از اضافه شدن FRP به مقطع می‌تواند ادامه داشته باشد و آب و سایر مواد شیمیایی مقطع بتنی را مستعد خرابی و مواردی نظیر ورآمدن و کند شدن FRP در اثر تمرکز تنشها و یا بالا رفتن نیروها کنند. در شکل 1-9 (kabhari & Howie 1997) سطوح مختلف اندرکنش سیستم نشان داده شده است. فشار منفذی داخلی (internal pore press) عامل مهم دیگری در ارتباط با خصوصیات ضد رطوبتی FRP می‌باشد. بدلیل اینکه سیستم مقاومسازی FRP یک اثر ثانویه در بستن و پوشاندن بتن دارد، این فشار منفذی به صورت موضعی انباشته می‌شود. قسمتهایی از FRP که بر روی بتن نچسبیده‌اند می‌توانند خود عاملی برای عبور دادن رطوبت در زیر لایه و آثار مخرب آن بر روی مصالح بتن و FRP باشند.

در موارد استفاده در فضاهای داخلی و آب و هوای ملایم که بتن هم به نحو مناسبی آماده‌سازی شده‌است، اثرات ضد رطوبت (ضد بخار) لایه پوشاننده FRP به حداقل تاثیر خود می‌رسد. در مواردی که اثرات مخرب محیطی شدیدتر است (نظیر سازه‌های دریایی و یا ساحلی، محیطهای شیمیایی و غیره) کامل پوشاندن یک المان بتنی با FRP موجب افزایش طول عمر آن خواهد شد. البته باید متذکر شد اگر شرایط سطح بتن به خوبی آماده‌سازی شده باشد و اجرای FRP بر روی بتن با دقت و کیفیت مناسب صورت نگیرد این عمل یعنی پوشاندن بتن با کمک FRP می‌تواند در جهت عکس عمل کرده و حتی موجب شود که بتن در معرض رطوبت بسیار زیاد و یا اثرات مخرب بسیار شدید محیطی قرار گیرد. در شرایطی که استفاده از FRP، المان بتنی را با خطر آب گرفتگی و جمع شدن رطوبت پیرامون آن مواجه می‌کند، نباید کل مقطع توسط FRP پوشانده شود.

سایر موارد نظیر: شرایط مناسب داخلی و سطحی بتن موجود، آماده‌سازی مناسب سطح بتن و سیستم مناسب FRP و اجرای درست و با کیفیت آن، می‌تواند این ریسک را پایین آورد.

(Kelley et al. 1999)

1-5-9 یخ زدن - آب شدن

به دلیل آنکه FRP بر روی سازه‌های موجود، اجرا می‌شود ممکن است پیش از استفاده از آن المانهای سازه‌ای دچار ترک خوردگی شده باشند ممکن است چسبندگی FRP با بتن کامل نباشد و قسمتهای به صورت خلاء در سطح مشترک آن با بتن وجود داشته باشند. راهیابی آب به داخل این ترکها و یا فضاهای خالی در زیر لایه FRP و یخ زدن آن در سرمای محیط موجب بروز مشکلاتی در چسبندگی FRP و بتن خواهد شد. بنابراین باید اثرات یخ زدن و آب شدن را بر روی سازه مقاوم‌سازی شده در نظر گرفت. (Kaiser 1989) مطالعاتی را بر روی تیرهای مقاوم‌سازی شده‌ای که در معرض 100 سیکل یخ زدن و آب شدن (با آب 20 درجه) در دمایی بین 25- درجه و 25+ درجه سانتیگراد قرار گرفته بودند، انجام داد. هم تیرهای دچار ترک خوردگی و هم تیرهای ترک نخورده در این آزمایش پس از انجام مقاوم‌سازی مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته بودند. وی هیچگونه اثر منفی از یخ‌زدگی و آب شدن بر روی رفتار المانهای مورد آزمایش در مقایسه با رفتار المانهای اصلی، مشاهده نکرد.

(Tysl et al 1998) با ایجاد مقداری خلاء و عدم چسبندگی در زیر لایه چسبانده شده، سعی کرد تاثیرات یخ زدن و آب شدن را در صورت وجود چنین نقایصی در مقاوم‌سازی، مورد بررسی قرار دهد. ولی او هم هیچ اثر خاصی را در عملکرد چسبندگی، که ناشی از یخ زدن و آب شدن باشد، نیافت. (Yagi et al 1998) اینگونه نتیجه‌گیری کرد که سیکلهای تکراری یخ زدن و آب شدن تاثیر ناچیز بر روی سیستم FRP دارند و یا اصلاً بدون تاثیرند مشروط بر آنکه کیفیت اجرا و FRP خوب باشد و از اپوکسی مقاوم در برابر رطوبت استفاده شده باشد (Yagi et al 1997).

بر خلاف این نتایج (sovdki & Green 1997) اینطور اعلام کردند که آزمایشات یخ زدن و آب شدن بر روی نمونه‌های بتنی آنان که با FRP دور پیچ شده بودند، تاثیر منفی قابل ملاحظه‌ای را بر روی شکل پذیری و مقاومت نمونه‌ها، گذشته است. (Toutanji & Balag 1998) اظهار داشت که سیکل‌های یخ زدن و آب شدن در شرایطی که کیفیت بتن پایین باشد، می‌تواند مشکلاتی را در سیستم مقاوم‌سازی بوجود آورد. بنابراین این آزمایشات بیش از آنکه مقاومت در برابر یخ زدن و آب شدن مربوط به کل سیستم مرکب FRP بتن را مشخص کند، در پی چک کردن عملکرد FRP بر روی بتن‌های با کیفیت پایین می‌باشد. در آزمایشات دیگر اجازه داده شد که آب بر روی سطح پوشانده نشده المان بتنی مقاوم‌سازی نشده نفوذ کند. نتایج حاصله بیان کننده آسیب بیشتر سطح پوشانده نشده بتن (در اثر سیکلهای یخ زدن و آب شدن) در قیاس با سطحی است که با FRP محفوظ شده است. (Toutanji & Balaguru 1998)

2-5-9 رفتار چسبندگی در درجه حرارتهای بالا و پایین.

به خوبی مشخص شده است که وقتی مصالح FRP به همراه بتن جهت تشکیل یک المان مرکب به کار می‌روند، پیوستگی و چسبندگی بین این دو نه تنها به خصوصیات هر کدام از این مصالح به صورت جداگانه ارتباط دارد، بلکه به خصوصیات و چگونگی سطح تماس چسب با بتن و چسب با لایه FRP هم بستگی دارد. در شرایط سخت آب و هوایی که در قسمت‌هایی از دنیا نظیر قطبها و مناطق استوایی وجود دارد، رفتار و پیوستگی اتصال میان این دو مصالح بیشتر به خصوصیات هر کدام از آنها بستگی دارد تا به خصوصیات سطوح تماس. در مجاورت دماهای بالا، رفتار بیشتر تحت تاثیر خصوصیات چسب متصل کننده FRP به بتن می‌باشد در حالیکه در دمای پایین رفتار تا حدود زیادی تحت تاثیر خصوصیات رزین شبکه (matrix's resin) قرار دارد.

Pantuso (2000) آزمایشاتی را بر روی رفتار نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با دو نوع نوار تک راستایی CFRP (یکی با $E=175$ Gpa و دیگری با $E=300$ Gpa) انجام داد. این ارزیابی‌های در سه درجه حرارت متفاوت 100-، 30- و 40+ درجه سانتیگراد بر روی نمونه‌هایی بدون فولاد مسلح کننده مقطع بتنی انجام گرفت. نمونه‌های آزمایشی که به کمک نوار CFRP با مدول الاستیسیته بالا مقاوم‌سازی شده بودند، کاهش بیشتری را در مقدار نیروی چسبندگی خود در مقایسه با سایر نوارها، بروز دارند. نمونه‌های آزمایشی که در دماهای 30-، 100- درجه سانتیگراد بارگذاری شده بودند، در دیاگرام بار - خیز آنها افت ناگهانی در مقدار بار مشاهده می‌شد. در عوض نمونه‌هایی که در دمای 40+ درجه سانتیگراد بارگذاری می‌شدند، رفتار یکنواخت‌تری را از خود نشان دادند. علاوه بر اینها نمونه‌های آزمایشی همزمان با تغییر درجه حرارت محیط، مد شکست متفاوتی را نشان دادند. در دمای 40+ درجه سانتیگراد، شکست چسبندگی در ضخامت لایه چسب رخ داد (conhesive failure). نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با نوارهای مدول الاستیسیته زیاد که در دمای 30- درجه سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفتند دچار پارگی ورقه‌ای یا لایه‌ای شدند. (laminar) در همین دما نمونه‌های با لایه مقاوم‌کننده ضعیف‌تر (مدول الاستیسیته پایین) دچار شکست برشی در بتن شدند. این بررسی‌ها نشان داد که نمونه‌های آزمایشی در دمای خیلی کم یا بالا، نه تنها در مقدار نیروی نهایی چسبندگی، وضعیت متفاوتی خواهند داشت بلکه در شکل و طبیعت شکست هم تفاوت‌های اساسی را نشان می‌دهند.

2-6-9 در معرض اشعه UV light expositive UV

1-6-9 کلیات

مواد پلیمری وقتی در معرض اشعه UV-A (با طول موج بین 315 تا 400 میلیمتر) و اشعه UV-B (با طول موج بین 280 تا 315 میلیمتر) قرار بگیرند، دچار افت و تنزل سطح کیفی (degradation) خواهند شد که این می‌تواند سبب جدا شدن پیوندهای شیمیایی گردد. متعاقب آن فعل و انفعال با اکسیژن موجود در هوا می‌تواند سبب اکسیداسیون و قطع شدن پیوندها، هیدروایز و یا از بین رفتن دیگر مولکولهای کوچک شود.

تغییرات لایه رویی در مواد کامپوزیت به دلیل نور آفتاب می‌تواند اولین نشانه‌های در معرض عوامل محیطی قرار گرفتن باشد. نور آفتاب و خصوصاً اشعه ماورابنفش آن می‌تواند سبب تغییر رنگ و کاهش قابلیت انتقال نور مواد کامپوزیت گردد. همچنین می‌تواند بر روی خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌ها، اثر بگذارد. تغییر رنگ و رنگ پریدگی از نظر عموم نشانه‌ای از عدم کیفیت و کاهش مقاومت قلمداد می‌شود هر چند در واقع این فقط یک تغییر کوچک سطحی است و تاثیر چندانی بر مقاومت و پیوستگی سازه‌ای ندارد. دلیل اصلی تغییر رنگ تاثیراتی است که اشعه UV بر روی رزین دارد. الیاف کربن و glass تا حد بالایی تحت تاثیر اشعه UV قرار نمی‌گیرند. الیاف آرامید هم اگر بر رویشان یک لایه محافظتی قرار گیرد، در حد بسیار کمی تحت تاثیر اشعه UV قرار می‌گیرند (Ahmad & plecnik 1989)

در کل می‌توان نتیجه‌گیری کرد که خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌ها تنها در حد بسیار کمی تحت تاثیر اشعه ماوراء بنفش (UV) قرار می‌گیرد. میزان این تاثیر هم بستگی به نوع رزین مصرفی و جهت الیاف دارد.

■ نوع رزین

عموماً رزین‌های پلی استر در مقابل مضرّات اشعه UV نسبت به رزین‌های اپوکسی، بیشتر مستعد صدمه و آسیب هستند البته مواردی هم پیش می‌آید که هر دو آنها پس از اینکه در معرض نور ماوراء بنفش قرار گرفتند، بطور مشابهی دچار کاهش مقاومت می‌شوند. این کاهش مقاومت می‌تواند سبب شود که شبکه رزین و الیاف کامپوزیت دچار ترک یا شکاف شده یا تا حدی خود را ول کند (ترکهای ریز در روی سطح یا زیر آن) این می‌تواند سبب مشکلات دیگری نظیر افزایش جذب رطوبت یا آسیب‌پذیری در مقابل عوامل؟ شیمیایی محیط گردد.

■ توده الیاف و راستای آنها: Fiber stacking & Orientation

اهمیت جهت و راستای الیاف در کامپوزیت‌ها مرتبط با شبکه رزین (resin matrix) می‌باشد. سایر خصوصیات الیاف که در میزان مقاومت خمشی و کششی کامپوزیت‌ها موثر می‌باشند، وقتی در معرض اشعه ماوراء بنفش قرار بگیرند، تغییر اندکی پیدا می‌کنند پس در واقع نقش الیاف در قبال تغییرات در اثر ماوراء بنفش بیشتر به راستا و جهت آنها بر می‌گردد. خصوصیات ماتریکس نظیر مقاومت برشی بطور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر کاهش مقاومت رزین قرار می‌گیرد.

2-6-9 روش آزمایش

سه گروه آزمایشات وجود دارند:

- در فضای آزاد
- در فضای آزاد و شتاب داده شده (accelerated)
- در محیط آزمایشگاهی و شتاب داده شده

روشهای کنونی آزمایش با تعداد زیادی از متغیرها و مجهولات همراه می‌باشد:

- آزمایشات فضای آزاد: متغیر بودن وضعیت آب و هوا در یک محل و نسبت به سایر مکانها انجام آزمایشات در مواقع گوناگون سال و در سال‌های گوناگون

- آزمایشات درون آزمایشگاه: اغلب مشابه سازی شرایط واقعی محیط بیرون در فضای آزمایشگاهی ضعیف و دشوار می باشد:

در اغلب بررسی ها، اثرات UV به طور کامل از اثرات hygrothermal جدا نشده اند. بنابراین مشکل بتوان فقط تغییرات ایجاد شده در اثر اشعه UV را توصیف کرد. برای مثال ASTM G 53 اثرات مخرب ایجاد شده در اثر آب ناشی از باران یا شبنم و انرژی ماوراء بنفش موجود در نور خورشید را شبیه سازی کرده است. نمونه های آزمایشی به صورت متناوب در معرض اشعه ماوراء بنفش و سپس در معرض تقطیر (condensation) در خلال یکسری سیکل های تکراری قرار گرفتند. (ASTM G53 1996) نتایج آزمایش به این روش بر روی نمونه هایی که از الیاف glass رزین اپوکسی تهیه شده بودند (Steckel et al 1998) هیچ افت کیفیتی را میان این نمونه ها و نمونه هایی که در معرض 100 سیکل (به صورت 4 ساعت تاباندن اشعه UV در دمای 60 درجه سانتیگراد و سپس 4 ساعت تقطیر در دمای 40 درجه) قرار داشتند، نشان نداد. ارزیابی بر روی این نمونه ها از نظر مدول یانگ، مقاومت کششی، کرنش شکست و مقاومت برشی صورت گرفت بود. انجام این آزمایشات بر روی الیاف کربن و رزین اپوکسی افت کیفیت بسیار کمی را نشان داد. از آنجاییکه محیط طبیعی اطراف با توجه به تغییرات توپوگرافی و جغرافیایی و دوره های مختلف آب و هوایی، متغیر است بنابراین اثرات محیطی که بر روی خصوصیات نمونه ها تاثیر گذار است هم متفاوت است. ASTM G23 این مورد را با در نظر گرفتن اصول خاصی و انجام مراحل خاص آزمایشی مد نظر قرار داده است. در این سری آزمایشات در معرض نور بودن نمونه ها با استفاده از یک منبع نور قوس کربن (Carbon – arc) و همراه با یا بدون ذرات آب شبیه سازی می گردد. مراحل اجرای این آزمایش به صورت زیر می باشد:

- در معرض دائم نور بودن و در معرض اسپری آب بودن به صورت متناوب
- مواجهه متناوب با نور و تاریکی و مواجهه متناوب با اسپری آب
- مواجهه پیوسته با نور و تاریکی بدون اسپری آب

آزمایشات انجام شده مطابق نخستین روش (Pereg 1996) نشان داد که هیچگونه کاهشی در مقاومت کششی لایه های FRP تهیه شده از الیاف glass و رزین اپوکسی پس از 2000 ساعت در معرض تابش بودن مشاهده نشد.

3-6-9 محافظت

اغلب توصیه می شود که نوعی لایه محافظ مانند رنگ کاری برای حفاظت FRP در برابر اثرات سوء اشعه ماوراء بنفش اجرا شود. برای محافظت در برابر UV، می توان از رنگ هایی که پایه « آکریلیک » acrylic یا پلی اورتان polyurethane دارند، استفاده کرد رنگ زدن م بایست در کمتر از 72 ساعت پس از اجرای FRP و در حالیکه رزین هنوز کاملاً خشک نشده انجام شود. اگر رزین کاملاً خشک شده باشد و عمل آوری آن کاملاً اتمام یافته باشد، قبل از رنگ زدن، یک مرحله بلاست کردن (blasting) سبک و یا سائیدن سطح می بایست انجام نشود. رنگ های روشن (سفید یا خاکستری رنگ بتن) مقدار بیشتری از حرارت را منعکس می کنند. معمولاً دو لایه رنگ کاری لازم است. به عنوان مثال دپارتمان حمل و نقل ایالات کالیفرنیا (USA) اطلاعاتی را ارائه کرده است که بر طبق آن لایه رنگ می بایست در مقابل اشعه

UV با شدت $0.47 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ اندازه‌گیری شده از 310 میلیمتر که حداقل 38 سیکل تابانده می‌شود، مقاومت کند. یک سیکل شامل 4 ساعت در معرض اشعه ماوراء بنفش بودن و در دمای 60 درجه و نیز 4 ساعت در معرض تقطیر condensate بودن در دمای 40 درجه است.

7-9 خاصیت قلیایی / خاصیت اسیدی

عملکرد معلوم کننده FRP در طول زمان در محیط‌های اسیدی یا قلیایی هم بستگی به نوع الیاف‌ها هم رزین مصرفی دارد. الیاف کربن در مقابل اسیدها و بازها مقاوم است در حالیکه الیاف glass در این محیط‌ها دچار افت کیفیت (degrade) می‌شود. البته استفاده مناسب از رزین می‌تواند الیاف‌ها را محافظت کرده و از محیط اسیدی و قلیایی جدا کند و آسیب دیدگی آنها را به تعویق اندازد. در غیر این صورت سازه‌های بتن مسلح (RC) در محیط‌های اسیدی، قلیایی و یا نسبتاً شرجی می‌بایست با استفاده از الیاف کربن مقاوم‌سازی شوند (Kelley et al. 1999)

8-9 خیز، گسیختگی تحت تنش و خوردگی در اثر تنش (stress Corrosion)

اجزا تشکیل دهنده المانهای بتنی مسلح، درجات مختلفی از خیز و افت را تحت تاثیر بارهای ثابت اعمال شونده، از خود بروز می‌دهند. CFRP دچار خیز نمی‌شود یعنی خیز آن قابل چشم پوشی است ولی خیز در AFRP قابل صرف‌نظر کردن نمی‌باشد. بنابراین در سیستم مرکب CFRP بتن مسلح (RC) رفتار خیز و تغییر شکل دادن، تحت کنترل خیز در قسمت فشاری مقطع بتنی است. (Plvris & Triantafillou 1994) اما بدلیل اینکه AFRP خود دچار خیز می‌شود، در طولانی مدت المانهای مقاوم‌سازی نشده با AFRP دچار تغییر شکل نسبتاً زیاد خواهد شد.

باید خاطر نشان کرد که خیز مقطع را بندرت می‌توان به کمک مقاوم‌سازی با FRP تحت کنترل در آورد مگر اینکه المان تحت مقاوم‌سازی، نسبتاً جدید باشد و هنوز خیز و تغییر شکل کامل بتن انجام نشده باشد که این موضوع در مورد بتن‌های قدیمی صادق نمی‌باشد. یکی دیگر از موارد مربوط به اثرات طولانی مدت زمانی، عملکرد GFRP تحت بارگذاری ثابت می‌باشد. الیاف glass تحت تنشهای ادامه دار (پایا) دچار گسیختگی ناگهانی می‌شوند. این پدیده را گسیختگی تنشی (stress rupture) می‌نامند. می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که مقاومت کششی GFRP در شرایطی که تحت اثر تنش دائمی قرار می‌گیرد، دچار افت شدید می‌گردد (تا حد 20٪ مقدار اولیه) خوردگی تنشی (stress corrosion) موقعی اتفاق می‌افتد که عوامل ثابت محیطی خاصیت خوردگی دارند اما نه تا حدی که به تنهایی سبب خوردگی و از بین رفتن مصالح FRP گردند اما وقتی که تنش نسبتاً بالا و دائمی بر FRP وارد آید این عوامل محیطی به کمک این تنش‌ها قادر به صدمه زدن به الیاف شبکه رزین می‌شوند و در مجموع باعث خواهند شد که FRP در تنش کمتر از میزان مورد انتظار تنش نهایی خود دچار شکست شوند.

الیاف کربن تقریباً دچار این پدیده یعنی خوردگی با کمک تنش، نمی‌شوند و تا 80٪ مقاومت نهایی خود را حفظ می‌کنند. اما الیاف آرامید و glass تا حدی مستعد برای این گونه خوردگی می‌باشند کیفیت رزین مصرفی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر زمان و سطح تنشهایی که به خوردگی کمک می‌کنند، می‌گذارد در کل ترکیب نوع الیاف رزین به صورت کربن اپوکسی آرامید و نیل استر glass پلی استر باعث افزایش آسیب پذیری و ضعف در برابر هر دو پدیده خوردگی به کمک تنش و گسیختگی در اثر

نتیجه‌گیری کرد که با توجه به ضعف GFRP در برابر گسیختگی تحت تنش‌های ثابت دائمی و عملکرد ضعیف AFRP در مورد خیز و تغییر شکل‌های دراز مدت، بهتر است در مواردی که المان مورد نظر برای مقاوم‌سازی تحت بارهای دائمی نسبتاً بزرگ قرار می‌گیرد، استفاده از الیاف کربن، انتخاب اول طراحان باشد. اثرات دما و درجه حرارت بر چگونگی افت و تغییر شکل چسب، ما را وادار می‌سازد که هنگام مقاوم‌سازی با FRP در محیط‌های با درجه حرارت نسبتاً بالا، تنها از چسب‌های با فرمولاسیون مناسب استفاده کنیم و دست آخر اینکه، در مورد بتن‌های پیش تنیده می‌بایست اطمینان حاصل کنیم که جابجایی تنش‌ها در اثر بروز خیز در المان سبب بوجود آمدن نیروهای نسبتاً بزرگ در FRP نگردد.

9-9 خستگی

کامپوزیت‌های پیشرفته همانند CFRP عملکرد بسیار بهتری نسبت به عملکرد فولاد در برابر پدیده خستگی، از خود نشان می‌دهند. تحقیقات اولیه در EMPA (... Kaiser 1989) و پس از آن آزمایشات جدیدتر (همانند Barnes & Mays 1999) نشان داده اند که عامل محدود کننده در خستگی تیرهای بتنی مقاوم‌سازی شده با FRP ناشی از وجود فولاد داخل مقطع می‌باشد بنابراین محدودیت خستگی در تیرهای مقاوم‌سازی شده با CFRP همان محدودیت تیرهای بتنی مقاوم‌سازی نشده است زیرا باید وضعیت فولاد را مدنظر داشت.

9-10 ضربه

دانش و آگاهی ما در مورد عملکرد المانهای بتن مسلح (RC) مقاوم‌سازی شده با FRP در مقابل ضربه، محدود می‌باشد. در مطالعات اخیر Erki & Merier 1999 عکس‌العمل ضربه‌ای چهار تیر دو سر ساده به طول 8 متر را که دو تا از آنها برای خمش با استفاده از لایه‌های CFRP و دو تای دیگر با استفاده از صفحات فولادی مقاوم‌سازی شده بودند، مورد مطالعه و بررسی قرار دادند.

بارگذاری ضربه‌ای آنها بدین صورت بود که یک انتهای تیر را بلند می‌کردند و از ارتفاع معینی آنرا رها می‌کردند. مقدار کرنش ایجاد شده در CFRP حداقل سه برابر بزرگتر از مقدار کرنش بدست آمده در آزمایش کششی CFRP تحت بارگذاری ضربه‌ای عملکرد خوبی داشتند هر چند آنها نتوانستند همان میزان جذب انرژی را داشته باشند که تیرهای مقاوم‌سازی شده با صفحات فولادی داشتند. همچنین مهاربندی اضافی حداقل در دو انتهای لایه چسبانده شده مقاوم کننده می‌تواند تکمیل کننده چسبندگی اپوکسی باشد و از جدا شدن ناگهانی CFRP جلوگیری کند و به این ترتیب عملکرد و تیر مقاوم‌سازی شده RC را تحت ضربه بهبود بخشد.

9-11 صاعقه، خوردگی گالوانیک galvanic

GFRP و AFRP عایق هستند. حرارت و برق مستقیم ناشی از صاعقه می‌تواند سبب بروز مشکلاتی (سوختن و دود زدگی) شود اما کلاً اینها مسایل مهمی نیست اگر ساختمان به زمین متصل نشده باشد (سیم ارت) CFRP رسانا می‌باشد اما مقاومت نسبتاً زیادی دارد که باعث می‌شود در صورت عبور جریان از میان آن، گرمای زیادی تولید شود. مطالعات انجام شده در صنایع هوانوردی نشان می‌دهد که دو اثر عمده بر روی CFRP که محافظت نشده است، دارد:

اول اینکه : خصوصیات سازه‌ای CFRP پس از اینکه کربن درون آن سرد شد تغییر خواهد کرد (Meier 1995) مقاومت کششی خیلی تغییر نمی‌کند ولی مقاومت برشی لایه‌ای و فشاری آن از دست می‌رود. در صنایع هوایی از شبکه‌های آلومینیومی برای محافظت لایه‌های بیرونی کامپوزیت استفاده می‌شود. به خوبی اثبات شده که صاعقه به موردی که داخل قفسه فلزی قرار گرفته حمله نمی‌کند. در بسیاری از کاربردهای مقاوم‌کننده FRP، کامپوزیت‌ها در معرض خطر صاعقه زدگی نیستند زیرا یا در فضاهای داخلی و یا در شاه تیرهای جعبه‌ای شکل (box girder) به کار رفته‌اند. کامپوزیت‌های بکار رفته برای مقاوم‌سازی پلها یا در وجه زیرین تیرها متصل می‌شود که در این حالت صاعقه به آن دسترسی ندارد و یا برای محصور کردن ستونها استفاده شده‌اند که البته در این صورت باید از آنها محافظت به عمل آید. در چنین شرایطی که خطر صاعقه زدگی وجود دارد، باید کامپوزیت‌ها را به کمک شبکه‌های فلزی محافظت کرد. در آخر اینکه، برای از بین بردن پتانسیل خوردگی گالوانیک (در اثر برق) فولاد مسلح کننده مقطع بتنی، نباید از FRP که پایه کربن دارد در تماس مستقیم با فولاد استفاده شود.