

کاربرد مواد مرکب در بهسازی سازه های بتنی

محمدرضا توکلی زاده^۱ و ایرج مهدوی مقدم^۲

۱- استادیار گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

drt@um.ac.ir

چکیده:

در گذشته، از مصالح سنتی جهت بهسازی سازه ها (تقویت یا تعمیر) استفاده می شد. در سال های اخیر با معرفی مواد مرکب در مهندسی عمران، این مصالح با داشتن ویژگی های مکانیکی برتر، تبدیل به گزینه ی مناسبی جهت بهسازی سازه های بتنی شدند. مواد مرکبی که در مهندسی عمران بکار می روند به صورت پلیمرهای مصلح با الیاف (FRP) می باشند. FRP ها مصالحی سبک، با دوام و مقاوم هستند که ضخامت نسبتاً نازک این مواد، کاربرد آنها را بسیار ساده نموده و قابلیت اعمال بر روی بسیاری از سطوح را امکان پذیر می نماید.

۱- پیشگفتار:

استفاده از FRP به منظور بهسازی و تقویت سازه های بتنی در اواسط دهه ۸۰ میلادی در اروپا و ژاپن آغاز شد. کاربرد این مواد، تنها به سازه های بتنی محدود نبوده و در انواع سازه های بنایی، چوبی و فولادی می توان از آنها بهره جست. در این سال ها، پژوهش های زیادی به منظور استفاده بهینه از این مواد و همچنین توسعه کاربرد FRP در سازه ها و زیرساخت ها در شرایط محیطی مختلف انجام شده است که ماحصل آن، تدوین آیین نامه های مختلف در حوزه بهسازی و همچنین طراحی شده است. در ده سال گذشته انجمن مهندسی ژاپن (JSCE) چند گزارش در رابطه با نحوه طراحی سیستم های FRP ارائه داده است. به طور همزمان در اروپا سازمان بین المللی سازه های بتنی (FIB) مجموعه ای برای اصول تقویت و طراحی سازه های بتنی با مصالح FRP ارائه داده است. انجمن استاندارد کانادا (CSA) نیز مجموعه های مشابهی را تدوین نموده است. در ایالات متحده آمریکا این وظیفه به عهده انجمن بتن آمریکا (ACI) واگذار شده که کمیته ۴۴۰، هفت آیین نامه و دستور طراحی تدوین نموده است. در این مقاله، اصول کاربرد مواد FRP در مقاوم سازی سازه های بتنی بر اساس آیین نامه های تدوین شده توسط ACI بررسی می شوند.

۲- کاربرد و محدودیت ها:

از سیستم های FRP برای تعمیر یک عضو سازه ای خسارت دیده، مقاوم بلزی یک عضو سالم، رفع اشکالات اجرایی در سازه های در حال ساخت و همچنین ساخت اعضای سازه ای جدید می توان بهره جست. بهسازی یک سازه به مجموعه فعالیت هایی گفته می شود که در آن رفتار سازه برای تحمل نیروهای وارد بر آن بهبود داده می شود. این بهبود همیشه فقط افزایش مقاومت (مقاوم سازی) نبوده و می تواند شامل افزایش شکل پذیری، جذب انرژی و یا سختی سازه باشد.

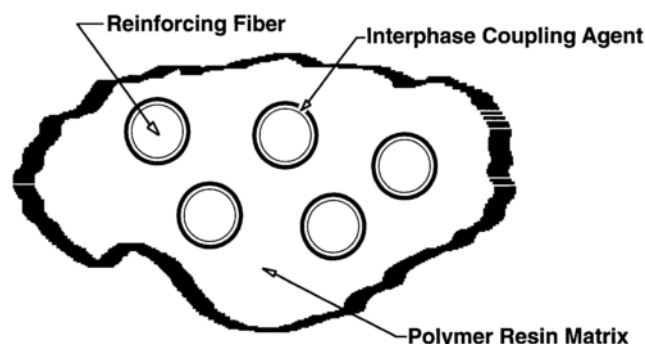
FRP ها نسبت به مصالح سنتی و مرسوم در مهندسی عمران دارای مزایای بسیاری می باشند که شامل: نسبت بالای مقاومت و سختی به وزن و همچنین دوام مناسب آنها در برابر عوامل محیطی و خوردگی می باشد. همین مزایا، در ساخت سازه های جدید نیز مورد توجه قرار گرفته است. در واقع، پژوهش های بر روی چگونگی عملکرد این مواد، در

اعضای سازه ای جدید، و همچنین بهسازی و تقویت اعضای سازه ای موجود، انجام شده است. در مقایسه با مصالح سازه ای سنتی، همچون بتن و فولاد، FRP کاستی‌هایی نیز دارد که شامل هزینه نسبتاً بالا، رفتار ترد، و ضعف آنها در برابر آتش می‌باشد. در کاربری‌های بهسازی و تقویت، هزینه‌های مصالح با صرفه جویی‌های دیگر در زمان ساخت و همچنین کاهش نیروی انسانی جبران می‌شود ولی در حال حاضر در مورد ساخت سازه‌های جدید این چنین نیست. استفاده از FRP در ساخت سازه‌های جدید همانند کاربری بهسازی باید به نحوی صورت گیرد که نقاط ضعف FRP کمترین اثرگذاری را داشته باشد. با توجه به این ملاحظات، می‌توان دریافت که بکارگیری ایده آل FRP در ساخت سازه‌های جدید نیازمند ارضاء معیارهای ذیل می‌باشد:

- برحسب ارزیابی صورت گرفته برای دوره بهره‌برداری، مقرون به صرفه باشد.
- تا حد امکان FRP در مناطقی استفاده شود که تحت کشش قرار گیرد.
- مقاومت در برابر آتش، بحرانی نباشد و یا محافظت کافی از FRP در برابر آتش بعمل آید.

۳- مصالح و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

پلیمرهای مسلح از الیاف بسیار نازکی تشکیل شده‌اند که توسط رزین محصور می‌شوند. الیاف دارای جنس‌های متفاوت بوده و به صورت قطعات کوتاه، رشته‌های دراز و پارچه‌های بافته تولید می‌شوند. رزین در FRP نقش محافظت از الیاف و انتقال تنش بین آنها را ایفا می‌کند و الیاف نقش باربری و سخت‌کنندگی دارند. شکل ۱ ساختار میکروسکوپی مصالح FRP را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: ساختار میکروسکوپی مواد مرکب الیافی

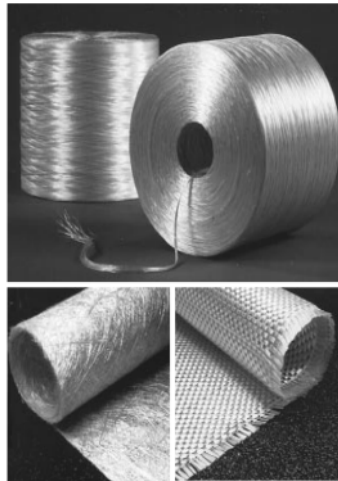
۳-۱: رزین

گونه‌های مختلف پلیمرهای انعطاف پذیر و مقاوم نظیر اپوکسی، واینیل استر و پلی استر برای ساخت FRP مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد باید دارای قابلیت چسبیدن به سطح بتن، مقاومت در برابر تأثیرات محیطی، کارایی، زمان گیرش مناسب و سازگاری حرارتی باشند. مواد زمینه با توجه به غلظت به رزین‌های اشباع‌کننده، رزین‌های چسبناک و خمیر پرکننده طبقه‌بندی می‌شوند.

۳-۲: الیاف

الیاف مورد استفاده در FRP عموماً از جنس کربن، شیشه و یا آرامید بوده که ماده مرکب ساخته شده از آنها به ترتیب CFRP، GFRP و AFRP نامگذاری شده‌اند. امروزه با توجه به دوام، مقاومت و سختی بالای الیاف کربنی

بیشترین کاربرد را در صنعت پیدا نموده‌اند. الیاف شیشه‌ای در محیط‌های خشک کارایی مناسب داشته و از الیاف آرامیدی برای جذب انرژی و ضربه استفاده می‌شود. این الیاف به صورت‌های پارچه‌های بافته شده و یا پارچه با الیاف کوتاه در جهت‌های تصادفی استفاده فراوان دارند. شکل ۲ نمونه‌ی ریسمان‌های الیافی و این دو نوع پارچه‌های الیافی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمونه‌ی ریسمان تاییده شده با الیاف، پارچه‌ی با الیاف کوتاه و پارچه‌ی بافته شده با الیاف

۳-۳: پوشش‌های محافظ

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

۳-۴: ویژگی‌های فیزیکی

مواد FRP بسیار سبک بوده و چگالی آن حدود یک پنجم چگالی فولاد است که این خود مهم‌ترین دلیل برای آسانی کاربرد این مواد در مهندسی عمران می‌باشد. در جدول ۱ جرم حجمی انواع FRP ها ارائه شده است. ضریب انبساط حرارتی مواد FRP بستگی به راستای الیاف آن دارد که در جدول ۲ این مقادیر برای دو راستای طولی و عرضی آورده شده است. افزایش دما فراتر از نقطه نرمی بر روی ضریب کشسانی رزین اثر گذاشته و مقدار آنرا به اندازه قابل توجهی کاهش می‌دهد. نقطه نرمی اکثر پلیمرهای مصرفی بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. این در حالی است که الیاف قابلیت تحمل دمای بسیار بالاتری را دارا می‌باشد. در نتیجه در مواردی که پیوستگی بین FRP و عضو بتنی تعیین کننده است، استفاده در دمای بالاتر از نقطه نرمی پیشنهاد نمی‌شود.

جدول ۱: جرم حجمی مواد FRP و برخی فلزات (g/cm^3)

Steel	Aluminum	GFRP	CFRP	AFRP
7.9	2.7	1.2 to 2.1	1.5 to 1.6	1.2 to 1.5

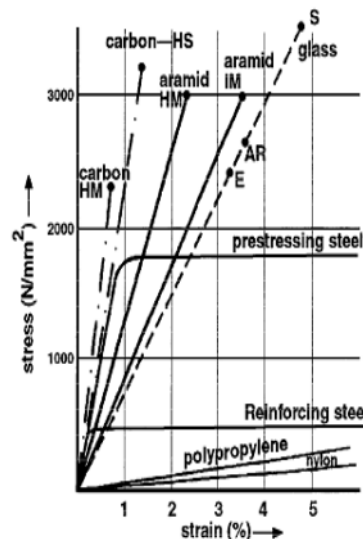
جدول ۲: ضرایب انبساط حرارتی مواد FRP و برخی مواد ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)

Direction	Concrete	Steel	Aluminum	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal, α_L	12	11 to 13	23	6 to 10	-1 to 0	-6 to -2
Transverse, α_T	12	11 to 13	23	19 to 23	22 to 50	60 to 80

۳-۵: ویژگی‌های مکانیکی

مقاومت کششی: ورق‌های FRP در هنگام بارگذاری کششی رفتاری کاملاً کشسان دارند و گسیختگی آنها ناگهانی است. در صورت رسم نمودار تنش-کرنش برای الیاف بکار رفته در آنها، خطوط راستی بدست خواهد آمد که شیب آنها ضریب کشسانی الیاف می‌باشد. ضریب کشسانی اکثر الیاف کوچکتر از فولاد بوده اما در چند سال اخیر الیاف کربنی با ضریب کشسانی بزرگتر از فولاد نیز تولید شده است. شکل ۳ رفتار تنش-کرنش الیاف مختلف در کشش را نمایش می‌دهد.

مقاومت مصالح FRP بستگی به نسبت حجمی الیاف در آنها دارد. از آنجایی که مقاومت کششی الیاف بسیار بالاتر از مقاومت پلیمرها است با افزایش درصد الیاف مقاومت مصالح FRP افزایش چشمگیری خواهد داشت. بر مبنای آیین‌نامه، ضریب کشسانی مصالح FRP به صورت وتری تعیین شده و در تعیین مقاومت مجاز احتمال شکست ۰/۱۳ درصدی ملاک قرار گرفته شده است. از آنجایی که در طراحی سیستم‌های تقویتی با FRP پیش از اجرا، ضخامت ورق دقیقاً مشخص نمی‌باشد و مقاومت کششی به مقدار ضخامت لایه وابسته است، در بیشتر موارد ظرفیت کششی لایه بر حسب نیروی کششی بر واحد عرض ملاک محاسبات قرار می‌گیرد که در جدول ۳ نمونه‌هایی از آن آورده شده است.



شکل ۳: رفتار تنش-کرنش الیاف مختلف در کشش

جدول ۳: ظرفیت کششی نهایی برخی ورق‌های FRP تجاری موجود

FRP System Description (Fiber Type/Saturating Resin/Fabric Type)	Fabric Weight (g/m ³)	Ultimate Capacity (kN/mm)
General Purpose Carbon/Resin/Unidirectional Sheet	200	500
	400	620
High Strength Carbon/Resin/Unidirectional Sheet	230	320
	300	700
	620	960
High Modulus Carbon/Resin/Unidirectional Sheet	300	600
General Purpose Carbon/Resin/Balanced Sheet	300	180
E-Glass/Resin/Unidirectional Sheet	900	720
	350	230
E-Glass/Resin/Balanced Sheet	300	120
Aramid/Resin/Unidirectional Sheet	420	700
High Strength Carbon/Resin/Pre-cured Unidirectional Sheet	2380	3300
E-glass/Vinyl ester/Pre-cured Unidirectional Sheet	1700	1580

مقاومت فشاری: ورق FRP که از خارج به سطوح بتنی چسبانده می‌شود، قابلیت تحمل نیروی فشاری را ندارد. پژوهشگران در آزمایش‌های متعدد نشان داده‌اند که ظرفیت فشاری FRP‌های کربنی، شیشه‌ای و آرامیدی به ترتیب در حدود ۸۰، ۵۰ و ۲۰ درصد ظرفیت کششی آنهاست. این کاهش ظرفیت به دلیل کماتش موضعی الیاف در داخل FRP است. ضریب کشسانی مصالح FRP در فشار بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد مصالح در کشش می‌باشد.

رفتار تابع زمان: خزش و خستگی دو ویژگی مهم تابع زمان مصالح هستند که می‌بایست در طراحی در نظر گرفته شوند. الیاف کربنی کمترین حساسیت را نسبت به بارهای دائمی نشان می‌دهند. اما الیاف شیشه‌ای و آرامید در مقابل این گونه بارگذاری‌ها نسبتاً ضعیف عمل می‌کنند. در مورد خستگی و فروپاشی ناشی از آن FRP‌های کربنی عملکرد بسیار مناسبی داشته‌اند در حالیکه FRP‌های شیشه‌ای و کربنی حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که پلیمر در FRP و رزین‌های مصرفی دارای خزش می‌باشند و رفتار نهایی سازه‌های تقویت شده با ورق‌های FRP تحت اثر بارهای دائم بسیار پیچیده می‌باشد.

دوام: ویژگی‌های مکانیکی بسیاری از مواد FRP در صورت مجاورت با عوامل محیطی نظیر رطوبت، مواد شیمیایی و دمای بالا کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که بیشتر اطلاعات داده شده توسط تولیدکنندگان FRP در شرایط آزمایشگاهی بوده و وظیفه در نظر گرفتن اثر شرایط محیطی به عهده طراح و مشاور طرح مقاوم‌سازی می‌باشد. این اثر در طراحی‌ها بوسیله ضرایب کاهش محیطی بر اساس آیین‌نامه‌ها اعمال می‌شود. ضریب کشسانی ورق‌های FRP به عنوان نسبت تنش به کرنش عموماً ثابت بوده و تغییر نمی‌کند. در صورتیکه طراح تشخیص دهد که محیط طراحی مخرب نبوده و یا با استفاده از پوشش‌های محافظتی از اثرات مخرب محیطی جلوگیری کند در صورت انجام آزمایش‌های دوام می‌تواند ضرایب آیین‌نامه‌ای را تعدیل نماید. نکته مهم در این امر اطمینان از بین نرفتن پوشش در طول عمر سازه و انجام آزمایش‌های دوام می‌باشد.

۴- فلسفه‌ی طراحی:

روش طراحی برای بهسازی سازه‌های بتنی با ورق‌های FRP بر پایه اصول آیین‌نامه‌ی طراحی سازه‌های بتنی ACI318 و با در نظر گرفتن رفتار مکانیکی مواد مرکب می‌باشد. ورق‌های FRP به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا ضمن برقراری سازگاری کرنشی با بتن، نیروهای کششی را تحمل کنند. اعمال نیروی فشاری به مصالح FRP مشکلی در طراحی بوجود نمی‌آورد ولی باید از ظرفیت فشاری آن صرف‌نظر نمود. فلسفه طراحی بر اساس اصول طراحی حالت حدی است و بطور همزمان سطح ایمنی قابل قبولی را برای بهره‌برداری و حد نهایی در نظر می‌گیرد. به عبارت دیگر تمام ضرایب افزایش بار و کاهش مقاومت بصورت مشابه با گذشته قابل اعمال است. ضرایب مذکور در آیین‌نامه به گونه‌ای انتخاب شده تا شاخص قابلیت اطمینان بیشتر از ۳/۵ را برای طراحی محقق سازد.

از آنجایی که فروپاشی عضو تقویت شده با FRP می‌تواند به دلیل خسارت، خرابکاری و یا دلایل دیگری صورت گیرد، برای اطمینان، عضو سازه‌ای تقویت نشده می‌بایست قابلیت تحمل بخشی از بارها را داشته باشد تا در صورت بروز هر مشکلی برای ورق‌های FRP از فروریختن سازه جلوگیری شود. بنابراین حداقل ظرفیت سازه تقویت نشده می‌بایست با معادله (۱) مطابقت داشته باشد. در مواردی که بار زنده به صورت مداوم اعمال شود ضریب بار زنده در رابطه فوق باید واحد در نظر گرفته شود.

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (1.1S_{DL} + 0.75S_{LL})_{new} \quad (1)$$

سازه های بتن مسلح در برابر آتش مقاومت مناسبی از خود نشان می‌دهند. زمانی که چنین عضوهایی با ورق‌های FRP تقویت می‌شوند، نقطه نرمی رزین بکار رفته در FRP بسیار تعیین کننده خواهد بود. دمایی که باعث ایجاد ضعف در ورقه FRP می‌شود بستگی زیادی به جنس رزین مصرفی دارد و در حالت کلی بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. صرف نظر از ضعف مصالح FRP در دماهای بالا، سازه های بتنی می‌توانند محافظ مناسبی برای جلوگیری از رسیدن آتش به این مواد باشد. در صورت نیاز با استفاده از پوشش های تأخیر دهنده و منبسط شونده می‌توان مدت زمان مجاز برای مواجهه با آتش را افزایش داد. با کمک گیری از ایده‌ی در نظر گرفته شده در آیین‌نامه‌ی ACI 216 ظرفیت عضو در درجه حرارت های بالا را می‌توان بر اساس معادله (۲) به مجموع تنش های حاصل از بارهای مرده و زنده بدون احتساب ضرایب افزایش بار محدود کرد. در کاربردهای مواد مرکب برای مواجهه با این مشکل می‌توان از پلیمرهایی با درجه نرمی بالا و یا پوشش های محافظتی ضد آتش استفاده نمود.

$$R_{n\theta} \geq S_{DL} + S_{LL} \quad (2)$$

در حالیکه استفاده از ورق های FRP بر ای افزایش مقاومت خمشی، مقاومت برشی و محصور شدگی بسیار مؤثرند، در برابر پدیده‌هایی نظیر ظرفیت باربری پی، برش در دال ها و اتصالات اثر گذاری بسیار محدودی دارند. بنابراین در یک طرح مقاوم سازی جامع همراه با افزایش ظرفیت باربری عضوهای سازه با ورق های FRP، می‌بایست با استفاده از روش های دیگر از سایر حالت های شکست جلوگیری شود. در بهسازی لرزه ای بیشترین کارایی با ایجاد محصور شدگی و افزایش شکل پذیری ستون‌ها می‌باشد. از آنجایی که در ارتباط با بهسازی لرزه‌ای قاب ها مطالعات پژوهشی در حال انجام است در طراحی می‌بایست به گونه‌ای انجام شود که مفصل های مومسانی در محل اتصالات رخ ندهند.

۵- انتخاب مصالح مناسب:

شرایط محیطی در انتخاب نوع FRP اهمیت بالایی دارد. ویژگی های مکانیکی مصالح FRP در شرایط تماس با محیط های قلیایی، نمک ها ، مواد شیمیایی، تابش فرابنفش، دمای بالا، رطوبت و چرخه‌های یخ زدن کاهش می‌یابد. در محیط های قلیایی مرطوب FRP های شیشه‌ای ویژگی های خود را بشدت از دست می‌دهد و در چنین محیط‌هایی استفاده از FRP های کربنی پیشنهاد می‌شود. انبساط حرارتی ورقهای FRP با بتن متفاوت است. الیاف کربنی دارای ضریب انبساط حرارتی بسیار کم و الیاف شیشه ای دارای ضریبی مشابه با بتن می‌باشد. این در حالی است که ضریب انبساط حرارتی بیشتر پلیمرها حدود پنج برابر بتن است. تخمین ضریب انبساط حرارتی ورق FRP با توجه به امتداد و چیدمان لایه ها بحث پیچیده ای است اما تجربه نشان می‌دهد که این پدیده با تغییر درجه حرارت در بازه ± 30 درجه مشکل ساز نخواهد بود.

FRP های کربنی رسانا بوده در حالیکه انواع شیشه ای و آرامیدی عایق در برابر هدایت جریان الکتریکی هستند. هادی بودن ورق های FRP کربنی می‌تواند سبب ایجاد خوردگی فولاد در مجاورت با آنها شود. این مسئله در طراحی و اجرا می‌بایست در نظر گرفته شود. پژوهش های پیشین نشان می‌دهد که با استفاده از یک لایه نازک محافظ GFRP می‌توان از بروز چنین مشکلی جلوگیری نمود.

نوع بارگذاری عامل مهم دیگری در انتخاب نوع FRP است. FRP شیشه ای و آرامیدی در برابر بارهای ضربه های مقاومت مناسبی از خود نشان می‌دهند. FRP های کربنی در مقابل خستگی و خزش بسیار مقاوم هستند، در حالیکه مواد مرکب شیشه ای حساسیت بیشتری را در این موارد از خود نشان می‌دهند. مسئله دوام در محیط‌های مرتبط

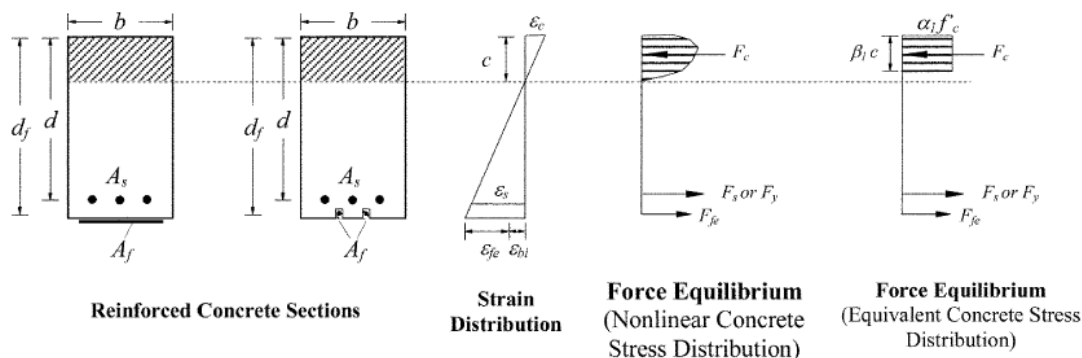
با مهندسی عمران موضوع بسیاری از پژوهش‌های جاری است. نتایج آزمایش‌های دوام دراز مدت در محیط‌هایی که طراح برای عضو مورد نظر ضروری می‌داند می‌بایست از شرکت تولید کننده مصالح درخواست شود. در انتخاب پوشش‌های محافظ، شرایط محیطی سازه می‌بایست مد نظر قرار گیرد. این در حالی است که سازگاری فیزیکی و شیمیایی لایه محافظ با ورق FRP را می‌توان از تولید کنندگان این چنین محصولاتی جویا شد.

۶- کاربردهای مواد مرکب

سازه‌ها بر اثر عوامل متعددی مانند اشتباهات طراحی و یا محاسبه‌ای، عدم اجرای مناسب، تغییر کاربری سازه‌ها، آسیب دیدگی ناشی از اعمال بارهای تصادفی، از هم پاشیدگی، خوردگی، خزش، آبرفتگی و شرایط محیطی استحکام خود را از دست می‌دهند. ضمناً تغییر آیین‌نامه‌های طراحی که باعث تغییر شرایط بارگذاری و ضرایب اطمینان می‌شود منجر به ارزیابی و بازنگری مجدد طرح سازه می‌گردد تا در صورت لزوم، بهسازی یا تقویت شود. در سال‌های اخیر، کاربرد ورق‌های FRP برای تقویت سازه‌های بتنی و بنایی در عرصه مهندسی سازه پدیدار شده که به عنوان یک جانشین برای روش‌های سنتی از قبیل اتصال صفحات فولادی، افزایش سطح مقطع عضو با بتن‌ریزی مجدد، جایگزینی اعضا، پیش‌تنیدگی بیرونی و ایجاد پیوستگی - که دارای کاستی‌هایی مانند بازدهی کم، زمان اجرای طولانی و نیاز به تجهیزات خاص است - می‌باشد. امروزه روش‌های بهسازی با استفاده از FRP توسعه روز افزون یافته به طوری که محدودیت استفاده و کاربرد آن در مهندسی ساختمان، به هزینه‌ی بالایی اولیه و ضعف در برابر آتش آن برمی‌گردد. استفاده از FRP در زمینه بهسازی و تعمیر سازه‌ها - هر چند که هزینه‌ی اولیه‌ی بالایی در بردارد - با توجه به کاهش زمان اجرا و عدم نیاز به نگهداری در برابر عوامل محیطی، با صرفه‌ترین و مؤثرترین راه بهسازی سازه‌های بتنی به شمار می‌رود. برخی از کاربردهای FRP در بهسازی سازه‌های بتنی به صورت زیر می‌باشد:

۶-۱: افزایش ظرفیت خمشی

پژوهشگران بسیاری در ۲۰ سال گذشته، استفاده از ورق‌های FRP را برای افزایش ظرفیت خمشی تیرها، دال‌ها و دیوارهای بتنی مورد بررسی قرار داده و نتایج چشمگیری گرفته‌اند. نتایج منتشر شده از پژوهشگران، افزایش ظرفیت خمشی بین ۱۰ تا ۱۶۰ درصدی را نشان می‌دهد. در عمل، و با توجه به محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای برای شکل پذیری و جلوگیری از شکست‌های ناگهانی، افزایش ظرفیت حدود ۴۰٪ دست‌یافتنی است.



شکل ۴: توزیع تنش و کرنش برای مقطع مستطیلی تحت خمش در حالت حدی نهایی

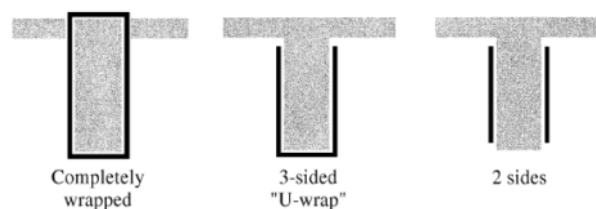
اساس این روش بر افزودن ورق‌های FRP به سطح کششی عضو و در نظر گرفتن سازگاری کرنش‌ها در مقطع است که در شکل ۴ نشان داده شده است. روش طراحی در حالت حدی در آیین‌نامه توصیه شده و ضرایب افزایش بار، کاهش ظرفیت بتن و ورق FRP در نظر گرفته می‌شود. توجه به این نکته لازم است که ضرایب کاهش ظرفیت FRP با توجه به رفتار کشسان و ترد این مواد، با ضرایب مربوط به بتن و یا فولاد متفاوت است.

گفتنی است که گسیختگی در عضو تقویت شده به گونه‌های متفاوتی می‌تواند پدیدار شود. گسیختگی می‌تواند به صورت خردشدن بتن در فشار، گسیختگی ورق‌های FRP، جدا شدن FRP از سطح و جدایی لایه بتن پوشش باشد. گسیختگی FRP و یا جدا شدن ورق به صورت ناگهانی رخ می‌دهد و می‌بایست از آن پرهیز شود. جدا شدن ورق‌های FRP در خمش از دو انتها آغاز شده که دلیل آنرا می‌توان تمرکز تنش‌های برشی و ایجاد تنش‌های قائم کششی دانست. برای جلوگیری از اینچنین شکست‌هایی، استفاده از مهارهای مکانیکی و دورپیچ کردن عضوی تواند چاره ساز باشد. ضریب کاهش ظرفیت، Φ ، از مقدار ۰/۹ برای مقاطع شکل پذیر و ۰/۶۵ برای مقاطع ترد متغیر است. همانطور که در رابطه ۳ مشاهده می‌شود، ظرفیت لنگر خمشی اسمی مقطع، از دو بخش سهم میلگردهای فولادی و ورق‌های FRP تشکیل می‌شود. برای اطمینان از عدم گسیختگی ورق FRP، ضریب تقلیل ظرفیت اضافی، Ψ_f ، ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$M_n = A_f f_s \left(d \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (۳)$$

۲-۶: افزایش ظرفیت برشی

گروهی دیگر از پژوهشگران مشغول مطالعه روی چگونگی افزایش ظرفیت برشی عضوهای بتنی باورق‌های FRP بودند که نتایج تلاش‌های آنها مبنای آیین‌نامه‌های طراحی می‌باشد. برای تقویت برشی، راستای الیاف مواد مرکب می‌بایست به صورت عرضی و یا عمود بر راستای ترک‌های برشی احتمالی باشد. به این منظور، ورق‌های FRP با سه آرایش متفاوت بر سطوح جانبی تیرها چسبانده می‌شود که در شکل ۵ نشان داده شده است. واضح است که در بیشتر موارد، تقویت خمشی و برشی همزمان اجرا شده تا کارایی طرح بهسازی را افزایش دهند. ظرفیت خمشی عضو تقویت شده مطابق رابطه ۴، از سه بخش ظرفیت بتن، فولاد، و FRP تشکیل می‌شود.



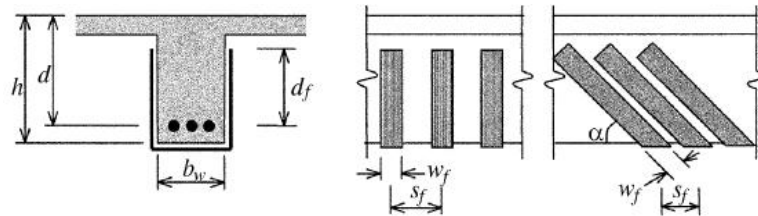
شکل ۵: آرایش‌های متفاوت برای تقویت برشی تیرها با ورق‌های FRP

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (۴)$$

از آنجاییکه نحوه آرایش ورق‌ها بر رفتار برشی تیر بتنی اثرگذار است، ضریب کاهش ظرفیت ورق FRP، Ψ_f ، متفاوت در نظر گرفته می‌شود. برای تیرها با دورپیچ کامل، این ضریب ۰/۹۵، و برای دو آرایش دیگر ۰/۸۵ می‌باشد. واضح است که ظرفیت برشی ورق‌های FRP علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی ورق FRP مصرفی، به چیدمان هندسی ورق‌های FRP بستگی دارد که در شکل ۶ و رابطه ۵ براحتی نمایان است. کرنش موثر نهایی در ورق FRP با توجه به

نحوه آرایش ورق FRP بستگی دارد که برای روش دورپیچ کامل، 0.75 کرنش نهایی، و در مورد روش‌های دیگر، با ضریب کاهش پیوستگی، K_v ، محاسبه می‌شود که تابعی از مقاومت بتن، طول پیوستگی موثر، و چیدمان هندسی خواهد بود.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (5)$$



شکل ۶: متغیرهای مورد نیاز در محاسبه تقویت برشی با استفاده از نوارهای FRP

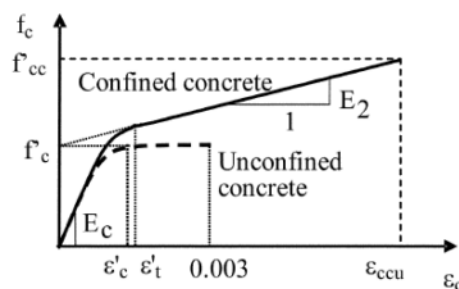
۳-۶: افزایش ظرفیت محوری

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای بالابردن توانایی باربری ستون‌های بتنی، محصورنمودن ستون به وسیله دورپیچ FRP می‌باشد. پژوهشگران نشان داده‌اند که دورپیچ‌های FRP قابلیت ایجاد محصورشدگی مطلوب را برای افزایش ظرفیت و شکل‌پذیری ستون فراهم می‌کند. از آنجایی که در این روش، محصور شدگی از سطح بیرونی آغاز می‌شود، بیشترین کارایی را نسبت به دورپیچ‌های داخل ستون (تنگ‌ها) داراست. رابطه ۶ چگونگی محاسبه ظرفیت نهایی یک ستون را نمایش می‌دهد. دورپیچ مذکور قابلیت افزایش ظرفیت برشی را نیز داشته و در صورت نیاز، تقویت خمشی نیز به راحتی می‌تواند به طرح افزوده شود. بتن محصور شده دارای مقاومت فشاری بالاتر و شکل‌پذیری مطلوب‌تر می‌باشد.

$$\phi P_n = 0.85 \phi [0.85 f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (6)$$

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، کرنش و تنش نهایی بتن محصور شده با بتن محصور نشده تفاوت محسوسی دارد که برای تعیین مقاومت نهایی بتن محصور شده، بر اساس رابطه ۷ ضریب کاهش ظرفیت، Ψ_f ، 0.95 ، و ضریب کارایی، K_a ، که به شکل مقطع بستگی دارد، در نظر گرفته می‌شوند. مقاومت بتن محصور شده به شکل عضو فشاری نیز وابسته است. برای مقاطع دایروی ضرایب کارایی برابر واحد در نظر گرفته شده، و برای دیگر مقاطع، مقادیر کوچکتری بر اساس آیین‌نامه استفاده می‌شود. کرنش موثر در FRP بعنوان مصالح محصورکننده، با استفاده از ضریب کارایی، K_ε ، 0.55 محاسبه می‌شود.

$$f'_{cc} = f'_c = \psi_f 3.3 K_a f_l \quad (7)$$

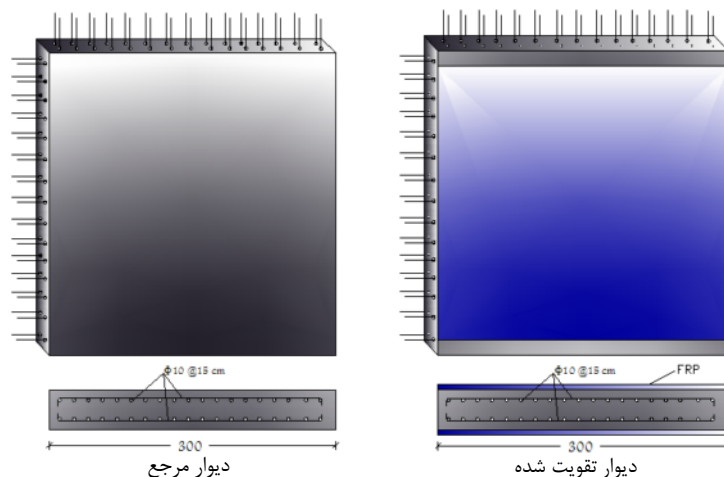


شکل ۷: مدل رفتار بتن محصور شده با ورق FRP

۴-۶: افزایش ظرفیت در برابر انفجار و ضربه

امروزه تحلیل و طراحی سازه‌های با اهمیت نظیر ساختمان‌های نظامی، دولتی، خدماتی و پر رفت و آمد در برابر بارگذاری انفجاری و ضربه یک ضرورت به شمار می‌رود. بارگذاری انفجاری به دو پارامتر زمان و مکان وابسته است. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مصالح شکل پذیر حتی با مقاومت کمتر عملکرد بسیار بهتری در برابر بارهای انفجاری دارند. به منظور بهسازی ساختمان‌های حساس در برابر چنین بارگذاری‌هایی، می‌توان از چسباندن ورق یا نوارهای FRP بر روی سطوح دیوارهای محافظ استفاده نمود. در این روش، برای افزایش قابلیت جذب انرژی می‌بایست از مصالحی با توانایی مناسب استفاده شود. استفاده از الیاف آرامید و یا FRP‌های ترکیبی مفید خواهد بود.

این شیوه در حال حاضر در مراحل پژوهشی است و کاربردی شدن آن نیاز به مطالعات بیشتری دارد. نتایج یک پژوهش عددی که اثر تقویت یک دیوار بتنی با ورق‌های FRP را مورد بررسی قرار داده است، بسیار امیدوار کننده می‌باشد. در این پژوهش، همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده، یک دیوار بتنی مسلح با تکیه‌گاه‌های مفصلی به ابعاد $۰/۳ \times ۳ \times ۳$ متر با ورق‌های مختلف FRP تقویت شده و رفتار آن با دیوار تقویت نشده مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۸: ابعاد و جزئیات مقطع دیوار بتنی مسلح مرجع و تقویت شده

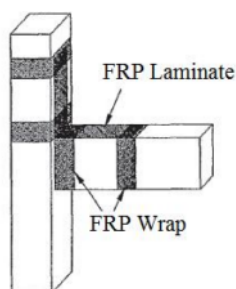
انواع مختلف FRP نیز به دلیل دارا بودن ویژگی‌های متفاوت علی‌رغم اثرات مقاوم‌سازی از نظر شدت و مقدار مقاوم‌سازی اختلافات قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر دارند. CFRP‌ها بیشترین کارایی را در تقویت دیوارها دارند، به صورتی که با چسباندن یک ورق ۶ میلیمتری از آن میزان تغییر مکان بیشینه دیوار از ۹۵ میلیمتر به ۰/۵ میلیمتر کاهش یافته است. از طرف دیگر GFRP‌ها کمترین اثرگذاری را در تقویت دیوارها دارند، به صورتی که با چسباندن یک ورق ۹ میلیمتری از آن میزان تغییر مکان بیشینه دیوار حدود ۴۲ درصد دیوار مرجع کاهش می‌یابد. برای ورق‌های FRP مختلف با یک ضخامت یکسان (برای نمونه ۱/۵ میلیمتر) ورق‌های کربنی، آرامیدی و شیشه‌ای به ترتیب سبب کاهش تغییر مکان بیشینه در دیوار به میزان‌های ۶۳، ۲۵ و ۷ درصد می‌گردد.

میزان تخریب ایجاد شده در دیوارهای تقویت شده، مشابه تغییر مکان با ضخامت ورق FRP نصب شده، نسبت معکوس دارد و با افزایش آن میزان تخریب به صورت مشهودی کاهش می‌یابد. تخریب گزارش شده برای دیوار بتنی مرجع برابر ۸۳ درصد می‌باشد که می‌توان آن را یک تخریب کامل در نظر گرفت درحالی‌که با استفاده از ورق‌های FRP این میزان تخریب را می‌توان تا مقدار نسبتاً اندک ۱۹ درصد کاهش داد.

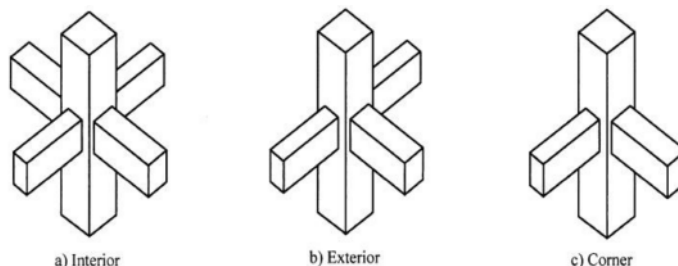
۶-۵: افزایش شکل پذیری و ظرفیت اتصالات

در بسیاری از سازه های خسارت دیده و یا ساختمان هایی که نیاز به بهسازی دارند، توجه به رفتار اتصالات اهمیت بسزایی دارد. بهسازی اتصالات سازه های بتنی در ۲۰ سال گذشته شاهد پیشرفت های چشمگیری بوده است. ایجاد پس کشیدگی خارجی و استفاده از پوشش های بتنی و فولادی نتایج مطلوبی را بدست دادند. همانطور که در شکل ۹ نمایش داده شده است، یکی از چالش های اساسی در تقویت اتصالات، نبودن فضای کافی برای دسترسی به اتصال و شکل هندسی پیچیده ی آنها می باشد.

ورق های FRP براحتی می توانند تنش های ناشی از لنگر خمشی و نیروی برشی را تحمل نموده و با قابلیت شکل گیری بالا بصورت دورپیچ برای محصور نمودن بتن این چنین نقاطی راهگشا باشند. تنوع در آرایش الیاف و چیدمان لایه ها در کارا بودن روش نقش مهمی ایفا می کند. در دهه ی اخیر، پژوهشگران مطالعه روی تقویت اتصالات قاب های بتنی با استفاده از نوارهای FRP را آغاز نموده اند. گزارش های نتایج پژوهش های نظری و آزمایشگاهی حاکی از افزایش ۶۰ درصدی ظرفیت خمشی و ۴۰ درصدی شکل پذیری در برخی از نمونه ها است. مهار نمودن ورق ها برای بکار گرفتن بهینه ی آنها و جلوگیری از جدا شدن آنها بسیار مهم است. بدین منظور از مهار های مکانیکی و یا دورپیچ نمودن انتهای ورق ها استفاده می شود. شکل ۱۰ یک نمونه ی ساده از تقویت یک اتصال را نمایش می دهد. از آنجایی که بهسازی اتصالات با FRP هنوز در هیچ آیین نامه ای وارد نشده اند، مهندسين برای بکارگیری این روش باید دقت کافی لحاظ نموده و بدون مشورت با متخصصین، از ارائه طرح های نامطمئن خودداری نمایند.



شکل ۱۰: نمونه ی اتصال تقویت شده با FRP



شکل ۹: نمونه هایی از شکل های هندسی پیچیده ی اتصالات قاب های ساختمانی

۷: جمع بندی

با توجه به وضعیت نگران کننده سازه ها و زیرساخت های کشور و محدود بودن امکانات، اقدام به بهسازی به جای تخریب و بازسازی در بسیاری از موارد انتخاب عاقلانه تری است. مواد مرکب به عنوان مصالح برتر در حل بسیاری از مشکلات می توانند راهگشا باشند. کاربرد این مواد به تیر، دال و ستون های بتنی محدود نمی شود. در بسیاری از پروژه های مهم از FRP برای بهسازی و ترمیم سازه های بنایی، فولادی و چوبی نیز استفاده شده است. همچنین برای تقویت و تعمیر لوله های انتقال آب، شبکه جمع آوری فاضلاب، تونل ها، مخازن نگهداری آب و محلول های شیمیایی می توان از این مصالح سود جست.

نکته قابل توجه دیگر آن که برای کاربردهایی که در گذشته مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته اند، می بایست دقت نظر بیشتری اعمال نمود. هر کاربرد جدید برای این مصالح، حکم یک پروژه پژوهشی را دارد و تا زمانی که بانک اطلاعاتی کامل و آیین نامه ای برای کاربردهای مختلف تدوین نشده، مهندسين می بایست از حدس و گمان در مورد موفق

بودن چنین روش‌هایی خودداری نمایند. به سخن دیگر، در مواردی که آیین‌نامه‌ی مدونی برای کاربرد مواد و یا روش‌های نوین در دست نباشد، مشاوره با پژوهشگران و متخصصین مجرب از احتمال بروز اتفاق‌های نامطلوب جلوگیری می‌کند.

۸- مراجع

- 1- ACI Committee 440, 2008, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (440.2R-08)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- 2- ACI Committee 318, 2005, "Building Code Requirements for Structural Concrete (318R-05)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- 3- Hollaway, L., 1993, "Polymer Composites for Civil and Structural Engineering", London
- 4- Buchan, P. A. & Chen, J.F., (2007), "Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures – A state-of-the-art review", Composites: Part B, Engineering, 38(5-6), 509-522
- 5- Buell, T. W. and Saadatmanesh, H., (2005), "Strengthening Timber Bridge Beams Using Carbon Fiber", Journal of Structural Engineering, ASCE, 131(1), 173-187
- 6- Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., (2004), "Environmental Effects on Tensile Properties of FRP Laminates Made Using Wet-Lay-UP Method", Proc. ACIC-04, Surrey, England, 20-22 April 2004
- 7- Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., (2003), "Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber Reinforced Polymers sheets", Journal of Structural Engineering, ASCE, 129(1), 186-196
- 8- Tang, T. and Saadatmanesh, H., (2003), "Behavior of Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Laminates under Impact Loading", Journal of Composites for Construction, ASCE, 7(3), 209-218
- 9- Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., (2001), "Galvanic Corrosion of Carbon and Steel in Aggressive Environments", Journal of Composites for Construction, ASCE, 5(3), 200-210
- 10- Velazquez-Dimas, J.I., Ehsani, M.R., and Saadatmanesh, H. (2000), "Out-of-Plane Behavior of Brick Masonry Walls Strengthened with Fiber Composites", ACI Structural Journal, 97(3), 377-387.
- 11- Mosallam, A. S., (2000), "Strength and Ductility of Reinforced Concrete Moment Frame Connections Strengthened with Quasi-isotropic Laminates", Composites: Part B, Engineering, 31(6-7), 481-497

۱۲- قاسمی ، شهریاری و توکلی زاده ، "تحلیل عددی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با مواد کامپوزیتی با استفاده از روش اجرا محدود" ، اولین کنفرانس بین المللی مقاوم سازی لرزه ای ، تبریز ، ایران ، مهر ۱۳۸۷

۱۳- توکلی زاده و یعقوبی ، "مبانی بهسازی لرزه ای و کاربرد مواد مرکب در مهندسی عمران" ، نخستین همایش ملی اصلاح الگوی مصرف در صنعت ساختمان ، مرکز تربیت معلم شهید بهشتی ، مشهد، ایران ، مهر ۱۳۸۸

۱۴- توکلی زاده و قدس، "مروری بر آیین نامه ی تقویت عضوهای بتنی با ورق های FRP (ACI 440.2R-08)" ، سومین همایش بتن شرق کشور، سالن اجتماعات صدا و سیما، مشهد، ایران، آذر ۱۳۸۸

۱۵- توکلی زاده، مجتهدپور و فاضلی پور، "مقاوم سازی دیوارهای بتنی یکطرفه با ورق های FRP در برابر بار انفجاری عمود بر دیوار" ، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، اردیبهشت ۱۳۸۹