

مروری بر آیین‌نامه‌ی تقویت عضوهای بتنی با ورق‌های FRP^۱ (ACI 440.2R-08)

محمدرضا توکلی‌زاده، استادیار گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
امیرصمد قدس، دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد
drt@um.ac.ir

پیشگفتار

تقویت یا بهسازی سازه‌های موجود به منظور تحمل بار بیشتر یا برطرف کردن ضعف سازه و یا افزایش شکل‌پذیری عموماً با استفاده از مصالح سنتی اجرا می‌گردیده است. با معرفی مواد مرکب در مهندسی عمران این مصالح با داشتن ویژگی‌های مکانیکی مناسب گزینه مناسبی برای بهسازی عضوهای بتنی می‌باشند. مواد مرکبی^۲ که در مهندسی عمران بکار می‌روند به صورت پلیمرهای مصلح با الیاف (FRP) می‌باشند. FRP ها مصالحی سبک با دوام و مقاوم هستند که امروزه به راحتی در دسترس مهندسين قرار گرفته‌اند. ضخامت نسبتاً نازک ورق‌های FRP کاربرد آنها را بسیار ساده نموده و قابلیت اعمال بر روی اکثر سطوح را امکان‌پذیر می‌نماید. بیشتر پژوهش‌ها و کاربردهای ورق‌های^۳ FRP در مهندسی عمران در طی بیست سال گذشته محدود به تقویت و تعمیر سازه‌های بتنی یا بنایی بوده و با توجه به عمر کوتاه آن مطالعات بر روی دوام و عملکرد دراز مدت سیستم‌های تقویت شده با FRP در جریان است. لازم به ذکر است که مانند هر مصالحی FRP ها دارای نقاط ضعفی نظیر حساسیت در مقابل آتش و ضعف در تحمل تنش‌های فشاری می‌باشد. نکته مهم دیگر آنکه پیوستگی بین ورق FRP و سطح عضو بتنی در بیشتر موارد حلقه بحرانی در این مجموعه می‌باشد.

^۱ - Fiber Reinforced Polymer

^۲ - Composite Materials

^۳ - Laminates

۱- تاریخچه

استفاده از سیستم‌های FRP برای بهسازی و تقویت سازه‌های بتنی از اواسط دهه ۸۰ میلادی در اروپا و ژاپن آغاز شد. در این ۲۵ سال کاربرد این روش تنها به سازه‌های بتنی محدود نمانده و برای انواع سازه‌های بنایی، چوبی و فولادی بکار رفته است. در این مدت پژوهشگران زیادی در این سه قاره به توسعه کاربرد مواد FRP توجه نموده‌اند که نتیجه زحمات آنها تدوین آیین‌نامه‌های مختلف می‌باشد. در ده سال گذشته انجمن مهندسين ژاپن (JSCE) چند گزارش در رابطه با نحوه طراحی سیستم‌های FRP ارائه داده است. به طور همزمان در اروپا سازمان بین‌المللی سازه‌های بتنی (FIB) مجموعه‌ای برای اصول تقویت و طراحی سازه‌های بتنی با مصالح FRP ارائه داده است. انجمن استاندارد کانادا (CSA) نیز مجموعه‌های مشابهی را تدوین نموده است. در ایالات متحده آمریکا این وظیفه به عهده انجمن بتن آمریکا (ACI) واگذار شده که کمیته ۴۴۰، هفت آیین‌نامه و دستور طراحی تدوین نموده است.

۲- کاربرد و محدودیت‌ها

از سیستم‌های FRP برای بهسازی یک عضو سازه‌ای خسارت دیده و یا مقاوم‌سازی یک عضو سالم و یا رفع اشکالات در حال ساخت بهره گرفته می‌شود. مناسب بودن استفاده از FRP ها در یک پروژه به عهده‌ی مهندسين باتجربه است و برای تصمیم‌گیری مناسب، بررسی^۴ اولیه سازه بسیار اهمیت دارد. این بررسی عموماً شامل تعیین ظرفیت باربری موجود، تعیین کاستی‌ها و دلایل آن و بررسی شرایط سطح خارجی سازه بتنی است. این کار می‌تواند با استفاده از مشاهدات مستقیم، بررسی نقشه‌های طراحی و تاریخچه عملیات نگهداری و مصاحبه با افراد محلی باشد. مقاومت کششی و فشاری عضو بتنی با آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب استاندارد تعیین می‌شود. یکی از اصول مقاوم سازی با مواد FRP قابلیت تحمل بارهای بهره برداری توسط سازه اولیه در صورت خسارت دیدن ورق‌های FRP می‌باشد. این چنین خسارت‌هایی می‌تواند مستقیماً ناشی از ضربه مستقیم و یا آتش سوزی باشد. از دیگر نکته‌های مهم در کاربرد مواد FRP دامنه درجه حرارت مناسب برای پلیمر مصرفی می‌باشد. در صورتیکه درجه حرارت محیط به نقطه نرمی^۵ پلیمر نزدیک شود، پلیمر قابلیت انتقال تنش بین الیاف را

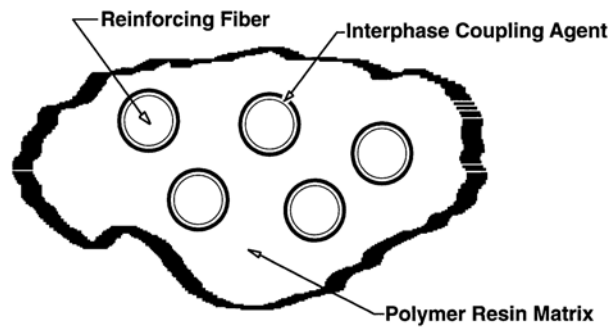
^۴ - Investigation

^۵ - Glass Transition Temperature

از دست می‌دهد و در صورت پایین آمدن بیش از اندازه حرارت تبدیل به ماده‌ای ترد و شکننده می‌شود. سطح بیرونی بتن می‌بایست دارای یک مقاومت حداقل بوده تا در هنگام بارگذاری مشکل قلوه‌کن شدن پیش نیاید. بدین منظور مقاومت کششی و فشاری بتن نباید به ترتیب از ۱/۵ و ۱۷/۰ مگاپاسکال کمتر باشد.

۳- مصالح و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

پلیمرهای مسلح از الیاف بسیار نازکی تشکیل شده‌اند که توسط ماده زمینه^۱ محصور می‌شوند. الیاف دارای جنس‌های متفاوت بوده و به صورت قطعات کوتاه، رشته‌های دراز و پارچه‌های بافته تولید می‌شود. زمینه در FRP ها نقش محافظت از الیاف و انتقال تنش بین آنها را ایفا می‌کند و الیاف نقش باربری دارد. قطعات FRP به روش‌های مختلف صنعتی، نیمه صنعتی و یا دست‌ساز ساخته می‌شود. شکل ۱ ساختار میکروسکوپی مصالح FRP را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: ساختار میکروسکوپی مواد مرکب الیافی

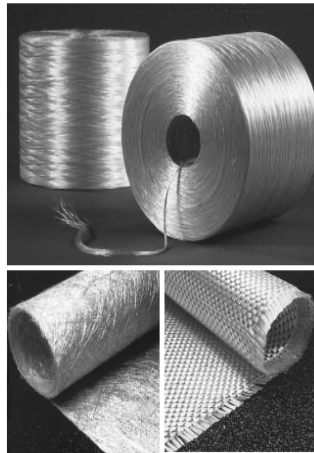
۳-۱- رزین (مواد زمینه)

گونه‌های مختلف پلیمرهای انعطاف پذیر و مقاوم در برابر حرارت نظیر اپوکسی، واینل 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، سازگاری حرارتی

باشد. مواد زمینه با توجه به غلظت به چسب‌های صنعتی^۷، رزین‌های اشباع کننده^۸ و خمیر پرکننده^۹ طبقه بندی می‌شود.

۳-۲-الیاف

الیاف مورد استفاده در FRP ها عموماً از جنس کربن، شیشه و یا آرامید بوده که ماده مرکب ساخته شده از آنها به ترتیب CFRP، GFRP و AFRP نامگذاری شده‌اند. امروزه با توجه به دوام، مقاومت و سختی بالای الیاف کربنی بیشترین کاربرد را 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 ۱ نمونه‌ی ریسمان‌های الیافی^{۱۰} و این دو نوع پارچه‌های الیافی را نشان می‌دهد.



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

Adhesives - ^۷

Saturating Resin - ^۸

Putty Fillers - ^۹

Yarn - ^{۱۰}

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 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 دلیل اساسی سهولت در استفاده در این مواد 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^{۱۱} بین FRP و عضو بتنی تعیین کننده است، استفاده در دمای بالاتر از نقطه نرمی پیشنهاد نمی‌شود.

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

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

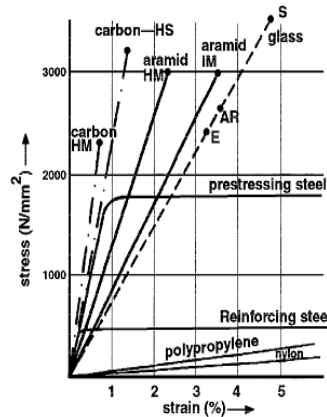
جدول ۲: ضرایب انبساط حرارتی مواد FRP و فولاد ($10^{-6} / ^\circ\text{C}$)

Direction	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal, α_L	6 to 10	-1 to 0	-6 to -2
Transverse, α_T	19 to 23	22 to 50	60 to 80

۳-۴-ویژگی های مکانیکی

۳-۴-۱-رفتار کششی

ورق های FRP در هنگام بارگذاری کششی رفتاری کاملاً کشسان دارند و گسیختگی آنها ناگهانی است. در صورت رسم نمودار تنش-کرنش برای الیاف بکار رفته در آنها، خطوط راستی بدست خواهد آمد که شیب آنها ضریب کشسانی الیاف می باشد. ضریب کشسانی اکثر 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 می دهد. مقاومت مصالح FRP بستگی به نسبت حجمی الیاف^{۱۲} در آنها دارد. از آنجایی که مقاومت کششی الیاف بسیار بالاتر از مقاومت پلیمرها است با افزایش درصد الیاف مقاومت FRP افزایش چشمگیری خواهد داشت. ضریب کشسانی مصالح FRP به صورت وتری تعیین شده و در تعیین مقاوت مجاز احتمال شکست ۰/۱۳ درصدی ملاک است. در جداول ۳ و ۴ به ترتیب ویژگی های مکانیکی کششی الیاف های مورد استفاده در سیستم FRP و ویژگی های مکانیکی کششی ورق های FRP ارائه شده است. از آنجایی که در طراحی سیستم های تقویتی با FRP پیش از اجرا، ضخامت ورق دقیقاً مشخص نمی باشد و مقاومت کششی به مقدار ضخامت لایه وابسته است، در بیشتر موارد ظرفیت کششی لایه بر حسب نیروی کششی بر واحد عرض ملاک محاسبات قرار می گیرد. این مقادیر برای چند محصول تجاری در جدول ۵ آمده است.



شکل ۳: رفتار تنش-کرنش الیاف مختلف در کشش

جدول ۳: ویژگی‌های کششی الیاف مصرفی در FRP

Fiber Type	Elastic Modulus (GPa)	Ultimate Strength (MPa)	Minimum Rupture Strain (%)
Carbon			
General Purpose	220 to 240	2050 to 3790	1.2
High Strength	220 to 240	3790 to 4820	1.4
Ultra High Strength	220 to 240	4820 to 6200	1.5
High Modulus	340 to 250	1720 to 3100	0.5
Ultra High Modulus	520 to 690	1380 to 2400	0.2
Glass			
E-Glass	69 to 72	1860 to 2680	4.5
S-Glass	86 to 90	3440 to 4140	5.4
Aramid			
General Purpose	69 to 83	3440 to 4140	2.5
High Performance	110 to 124	3440 to 4140	1.6

جدول ۴: ویژگی‌های کششی برخی ورق‌های FRP با حجم الیاف ۴۰ تا ۶۰ درصد

FRP System Description (Fiber Orientation)	Elastic Modulus (GPa)		Ultimate Strength (MPa)		Rupture Strain (%)
	0 Degree	90 Degree	0 Degree	90 Degree	0 Degree
High Strength Carbon/Epoxy					
0	100 to 140	2 to 7	1020 to 2080	35 to 70	1.0 to 1.5
0/90	55 to 76	55 to 75	700 to 1020	700 to 1020	1.0 to 1.5
+45/-45	14 to 28	14 to 28	180 to 280	180 to 280	1.5 to 2.0
E-Glass/Epoxy					
0	20 to 40	2 to 7	20 to 1400	35 to 70	1.5 to 3.0
0/90	14 to 34	14 to 3	20 to 1020	520 to 1020	2.0 to 3.0
+45/-45	14 to 21	14 to 20	180 to 280	180 to 280	2.5 to 3.5
High Performance Aramid/Epoxy					
0	48 to 68	2 to 7	700 to 1720	35 to 70	2.0 to 3.0
0/90	28 to 34	28 to 35	280 to 550	280 to 50	2.0 to 3.0
+45/-45	7 to 14	7 to 14	140 to 210	140 to 210	2.0 to 3.0

جدول ۵: 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

۲-۴-۳- رفتار فشاری

ورق‌های FRP که از خارج به سطوح بتنی چسبانده می‌شود^{۱۳} قابلیت تحمل نیروی فشاری را ندارد. پژوهشگران در آزمایش‌های متعدد نشان داده‌اند که ظرفیت فشاری FRP های کربنی، شیشه‌ای و آرامیدی به ترتیب در حدود ۸۰، ۵۰ و ۲۰ درصد ظرفیت کششی آنهاست. این کاهش ظرفیت به دلیل کمانش موضعی الیاف در داخل FRP است. ضریب کشسانی مصالح FRP در فشار بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد مصالح در کشش می‌باشد.

۳-۴-۳- رفتار تابع زمان^{۱۴}

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^{۱۵} نشان می‌دهند. اما

^{۱۳} - Externally Bonded

^{۱۴} - Time Dependent

^{۱۵} - Sustain Loads

الیاف شیشه و آرامید در مقابل این گونه بارگذاری‌ها نسبتاً ضعیف عمل می‌کنند. در مورد خستگی و فروپاشی ناشی از آن FRP های کربنی عملکرد بسیار مناسبی داشته در حالیکه FRP های شیشه‌ای و کربنی حساسیت بیشتری نشان می‌دهند.

۴-۴-۴- دوام^{۱۶}

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 مقاوم سازی می‌باشد.

۴-۵- نگهداری و جابجایی

مصالح FRP به تنهایی خطر سلامتی برای کاربران بوجود نمی‌آورند. این در حالی است که مصالح تشکیل دهنده آنها (الیاف و چسب‌های صنعتی) می‌توانند نگرانی‌های زیست محیطی ایجاد نماید. پس برای نگهداری و جابجایی این مواد و در صورت نیاز برای معدوم کردن مصالح اضافی می‌بایست برگه‌های اطلاعات ایمنی مصالح (MSDS)^{۱۷} که عموماً به همراه مصالح وارد کارگاه می‌شود با دقت مطالعه و در صورت بروز هر مشکل بر طبق آنها عمل گردد. در هنگام نصب ورق‌های FRP و استفاده از چسب‌های صنعتی و دیگر مواد شیمیایی استفاده از پوشش‌های مناسب و جلوگیری از تماس این مواد با پوست و تنفس گازهای منتشر شده می‌تواند اقدام پیشگیرانه مناسبی تلقی شود.

^{۱۶} - Durability

^{۱۷} - Material Safety Data Sheet

۵-نصب^{۱۸}، ارزیابی و نگهداری

۵-۱-نصب

گام‌های مورد نیاز برای نصب ورق‌های FRP عموماً توسط تولید کننده الیاف و رزین ارائه می‌شود. این گام‌ها با توجه به کاربرد و شرایط محیطی در هنگام کار می‌تواند تفاوت داشته باشد. پس از طراحی روش مقاوم‌سازی توسط مهندسين با تجربه نیاز به پیمانکاری است که تجربه و مهارت کافی به اصول ترمیم بتن، آماده سازی سطح و اعمال پوشش‌های صنعتی را داشته باشند. در هنگام نصب می‌بایست به خیس نبودن سطح بتن، رطوبت و دمای محیط توجه داشت. بسیاری از چسب‌های صنعتی بر روی سطوح خیس چسبندگی مناسب ندارند. عموماً پلیمرها و چسب‌های صنعتی در دماهای بالا گیرش سریعتر و در نتیجه کارگران زمان کوتاه‌تری را برای عملیات نصب در اختیار دارند. از طرف دیگر در درجه حرارت‌های پایین سرعت سخت شدن چسب کاهش یافته و مدت طولانی‌تری از ورق FRP عمل آوری نشده می‌بایست محافظت کرد.

تجهیزات مورد نیاز برای عملیات نصب بسیار ساده بوده و به بالابرها، سبک، همزن‌های برقی و کاردک و غلتک دستی محدود می‌باشد.

۵-۱-۱- آماده سازی سطح^{۱۹}

از آنجایی که کارایی مصالح FRP به چسبندگی به سطح بتن مقاوم بستگی دارد، بر طرف کردن معایب سطح بتنی و زبر کردن و تمیز کردن آن پیش از نصب اهمیت زیادی دارد. آماده سازی سطح عموماً با جدا کردن تمام قطعه‌های لق و سپس زبر کردن سطح اولیه با ماسه پاشی و یا فشار آب انجام می‌شود. در صورت مشاهده میلگردهای اکسید شده تمام مواد اکسید می‌بایست از میلگردها زدوده و سطح آن با مواد محافظ در برابر خوردگی^{۲۰} پوشانده شود. در این عملیات ترک‌هایی با عرض بزرگتر از ۰/۳ میلی‌متر می‌بایست توسط مصالح مناسب پر شود.

^{۱۸} - Installation

^{۱۹} - Surface Preparation

^{۲۰} - Corrosion Inhibitor

سه کاربرد اساسی در مقاوم سازی با ورق های FRP وجود دارد که در کاربرد اول که به کاربرد نیازمند به پیوستگی^{۲۱} معروف است، نه تنها سطح بتن می بایست برای چسبندگی بهتر با FRP آماده شود بلکه هیچ خروج از مرکزی که باعث جدا شدن FRP از سطح در اثر تنش های کششی شود، وجود نداشته باشد. در این کاربردها تنش از سطح به صورت تنش برشی به FRP انتقال می یابد.

در کاربرد دوم که نیازمند به تماس^{۲۲} نامیده می شود، می بایست از در تماس بودن FRP و سطح اطمینان حاصل شود. بنابراین در این کاربردها آماده سازی سطح نقش بسیار مهمی نداشته و سعی در آن است که از ایجاد فضای خالی بین قطعه و FRP جلوگیری گردد. در کاربرد سوم که به روش نصب نزدیک سطح (NSM)^{۲۳} نامیده می شود، مصالح FRP می بایست در داخل شیارهای از پیش تعبیه شده در سطح قرار گیرد. در این کاربرد تمیزی سطوح داخل شیار و خشک بودن قبل از نصب اهمیت زیاد دارد. انتقال تنش از بتن به FRP در این کاربرد با کارایی بالا اتفاق می افتد.

۵-۱-۲- روش های نصب

۵-۱-۲-۱- روش نصب تر^{۲۴}

پس از مخلوط کردن رزین که عموماً یک چسب صنعتی دو بخشی است سطح بتن در صورت نیاز با ماده آماده ساز که قابلیت نفوذ در بتن را دارد پوشانده می شود. در صورت وجود حفره ها و تورفتگی های بزرگ این فضاها می بایست توسط خمیری پرکننده شود. اگر از پارچه های الیافی برای ساختن FRP در محل استفاده شود- که به آن نصب تر گفته می شود- پارچه الیافی آغشته شده به رزین بر روی سطح گسترده شده و به بوسیله کاردک و غلتک های دستی هوای محبوس شده به بیرون رانده می شود. در صورت نیاز در پایان یک لایه اضافی بر روی سطح خارجی اعمال می شود.

^{۲۱} - Bond Critical Application

^{۲۲} - Contact Critical Application

^{۲۳} - Near Surface Mounted

^{۲۴} - Wet Layup

۵-۱-۲-۲-روش نصب ماشینی

در این روش یک دسته الیاف ابتدا به رزین آغشته شده و به صورت خودکار به دور عضو پیچانده می‌شود. این دسته نوار را می‌توان به صورت افقی و یا مایل به دور عضو پیچاند. عمل آوری برخی از این نوارها با حرارت و یا اشعه فرا بنفش صورت می‌گیرد.

۵-۱-۲-۳-روش پیش عمل آوری شده^{۲۵}

در این روش ورق FRP که به صورت های گوناگون در کارخانه آماده می‌شود، با چسب صنعتی به سطح بتن چسبانده می‌شود. در این روش نیز می‌بایست دقت شود تا حباب‌های هوای محبوس از سطح تماس FRP و بتن بیرون رانده شود.

۵-۱-۲-۴-روش نصب نزدیک سطح

در این روش میله‌های FRP با مقطع چهار گوش و یا دایره شکل در داخل شیارهای از پیش تعبیه شده بوسیله چسب‌های صنعتی نصب می‌شود. کاربرد این روش بیشتر در مواردی است که سطح فوقانی تیر یا دال بتنی نیاز به تقویت دارد تا سایش و ضربه‌های ناشی از رفت و آمد به مرور زمان سیستم‌های تقویتی را بی‌اثر نکند.

۵-۱-۳-نکات تکمیلی

پس از نصب مواد FRP در صورت نیاز می‌توان لایه‌های پوششی مناسب را بر روی مصالح قرار داد. این پوشش‌ها می‌بایست با پلیمر مورد استفاده در FRP سازگاری داشته باشد. کارایی مصالح FRP نسبت مستقیم با درصد حجمی الیاف موجود در آن دارد. در صورتیکه تمامی الیاف در یک جهت مشخص و مطلوب قرار گیرد (یک جهته^{۲۶}) ماده بیشترین کارایی را از نظر مقاومت و ضریب کشسانی داراست. در حالیکه در مصالح FRP با الیاف در راستاهای تصادفی^{۲۷}

^{۲۵} - Precured

^{۲۶} - Unidirectional

^{۲۷} - Random Oriented

کمترین کارایی سازه‌ای حاصل می‌شود. کارایی ورق‌های FRP در دو راستای عمود بر هم (دو جهته)^{۲۸} بین کارایی دو ماده ذکر شده می‌باشند. شکل ۴ شمای تقریبی از کارایی مصالح مرکب را نشان می‌دهد.

از دیگر نکات مهم در نصب مواد FRP دقت در نصب FRP در راستای مورد نظر می‌باشد. راستای الیاف در لایه‌های مختلف در چیدمان FRP نقش مهمی در رفتار آن خواهد داشت. مطالعات نشان می‌دهد که اختلاف حدود ۵ درجه از راستای مطلوب می‌تواند اثرات مخربی در رفتار FRP داشته باشد. همچنین در مواردی که از چندین لایه از FRP برای مقاوم‌سازی استفاده می‌شود هم‌پوشانی مناسب برای ایجاد پیوستگی برای لایه‌ها بسیار اهمیت دارد. در پایان عمل‌آوری رزین و یا چسب صنعتی می‌بایست با توجه به پیشنهادهای سازندگان مواد صورت گیرد. در صورت مجاز بودن می‌توان از عملیات حرارتی برای سرعت بخشیدن در عمل‌آوری استفاده نمود. در دوران عمل‌آوری می‌بایست FRP را از گزند باران، غبار، تابش خورشید، تماس مستقیم و تغییرات دما محافظت نمود. پیش از اعمال بارگذاری بر سازه می‌بایست از عمل‌آوری کامل FRP اطمینان حاصل نمود.

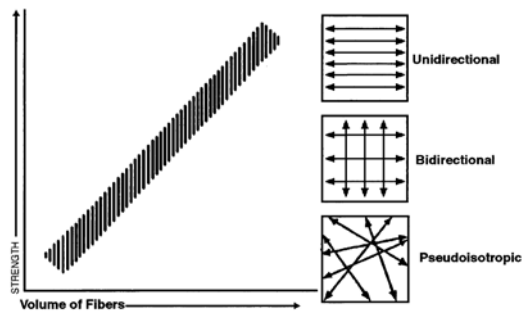
۵-۲-بازرسی^{۲۹}

کنترل کیفیت و یا تضمین کیفیت در رابطه با چگونگی اجرای مواد FRP اهمیت بالایی دارد. این کیفیت بوسیله مجموعه‌ای از بازرسی‌ها و آزمایش‌های استاندارد انجام پذیر است. در هنگام بازرسی نکات مهمی نظیر رطوبت، دما، خشکی سطح، نحوه آماده سطوح، وضعیت ترک‌های موجود، نوع الیاف و ورق مصرفی، رعایت گام‌های پیشنهادی توسط تولید کننده و اندازه و محل افتادگی‌ها^{۳۰} اهمیت زیادی دارد.

^{۲۸} - Bidirectional

^{۲۹} - Inspection

^{۳۰} - Debonding



شکل ۴: رابطه‌ی بین مقاومت و راستای الیاف

۵-۳-ارزیابی^{۳۱}

مورد قبول بودن نتیجه نصب ورق‌های FRP می‌بایست با توجه به رواداری‌های^{۳۲} پیشنهادی صورت پذیرد. عموماً در هنگام نصب ورق‌های FRP نمونه‌ای به عنوان شاهد تهیه شده تا در زمان دیگری مورد آزمایش قرار گیرد. از این نمونه برای تعیین مقاومت کششی، ضریب کشسانی، مقاومت وصله و نقطه نرمی استفاده می‌شود. شیوه و چگونگی آزمایش‌های مربوطه با توجه به استانداردهای موجود صورت می‌گیرد. راستای الیاف نمی‌بایست بیش از پنج درجه یا ۸۰ میلیمتر بر متر با راستای مورد نظر طراح اختلاف داشته باشد.

بازرسی جدا افتادگی‌ها می‌بایست با روش‌هایی انجام شود که قابلیت شناسایی مساحت بیشتر از ۱۳۰۰ میلیمتر مربع یا بیشتر را داشته باشد. در مواردی که میزان جدا افتادگی‌ها با مساحت کمتر از مقدار فوق از ۵ درصد کل مساحت FRP تجاوز نکند، اجرا قابل قبول بوده و در صورتیکه مساحت جدا افتادگی از ۱۶۰۰۰ میلیمتر مربع فراتر رود ناحیه معیوب می‌بایست با رعایت اصول همپوشانی جایگزین گردد. جدا افتادگی‌های میان دو مقدار ذکر شده می‌تواند بوسیله تزریق رزین و یا جایگزینی FRP اصلاح شود. عمل آوری رزین با توجه به شرایط محیطی و توصیه‌های تولید کننده مورد بررسی قرار گرفته و در صورت مطابقت مورد تأیید قرار گیرد.

^{۳۱} - Evaluation

^{۳۲} - Tolerance

در کاربردهای نیازمند به پیوستگی، مقاومت چسبندگی FRP به سطح با مغزه‌گیری^{۳۳} و انجام آزمایشهای استاندارد صورت می‌گیرد. مقاومت چسبندگی کششی می‌بایست از ۱/۴ مگاپاسکال بیشتر بوده و گسیختگی در بتن رخ دهد. ضخامت FRP عمل‌آوری شده توسط مغزه‌گیری و اندازه‌گیری مستقیم در چند نقطه صورت می‌گیرد. این عملیات در محل‌های همپوشانی و وصله‌ها نیز می‌بایست صورت گیرد. نقاط مغزه‌گیری شده می‌تواند با رزین یا وصله پوشانده شود.

۵-۴-نگهداری

همچنان که در هر پروژه پس از اجرا و در هنگام بهره‌برداری کارایی سازه زیر نظر قرار گرفته می‌شود. این فرآیند تضمین‌کننده تشخیص ضعفها و جلوگیری از خسارات جبران‌ناپذیر بعدی می‌باشد. یافتن این کاستی‌ها در زمان بهره‌برداری با مشاهدات مستمر و دقیق و در صورت نمایان شدن مشکل بوسیله انجام آزمایش‌های مخرب و یا غیر مخرب انجام می‌شود. چگونگی تعمیر بخش‌های خسارت دیده بسته به جنس مصالح مصرفی، عضو سازه‌ای و شرایط محیطی آن دارد. در مواردی که از لایه‌های پوششی سطحی برای محافظت از ورق FRP استفاده می‌شود، بازرسی مداوم و جایگزینی پوشش در صورت بروز عیب اجتناب‌ناپذیر است.

۶-توصیه‌های طراحی

روش طراحی برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با ورق‌های FRP بر پایه اصول آیین‌نامه 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^{۳۴} 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 قابل اعمال است. ضرایب مذکور

^{۳۳} - Coring

^{۳۴} - Limit State Design

در آیین‌نامه به گونه‌ای انتخاب شده تا شاخص قابلیت اطمینان^{۳۵} 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 FRP از انهدام سازه جلوگیری شود. بنابراین حداقل ظرفیت سازه تقویت نشده می‌بایست با معادله (۱) مطابقت داشته باشد.

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

در مواردی که بار زنده به صورت مداوم اعمال شود ضریب بار زنده در رابطه فوق باید واحد در نظر گرفته شود.

سازه‌های بتن مسلح در برابر آتش مقاومت مناسبی از خود نشان می‌دهند. زمانی که چنین عضوهایی با ورق FRP تقویت می‌شوند، نقطه نرمی 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 درجه سانتیگراد می‌باشد. صرفنظر از ضعف مصالح FRP در دماهای بالا سازه‌های بتنی می‌توانند محافظ مناسبی برای جلوگیری از رسیدن آتش به این مواد باشد. در صورت نیاز با استفاده از پوشش‌های تأخیر دهنده^{۳۶} و منبسط شونده می‌توان مدت زمان مجاز برای مواجهه با آتش را افزایش داد. با کمک گیری از ایده در نظر گرفته شده در آیین‌نامه ACI 216 ظرفیت عضو در درجه حرارت های بالا را می‌توان بر اساس معادله (۲) به مجموع تنش‌های حاصل از بارهای مرده و زنده بدون احتساب ضرایب افزایش بار محدود کرد.

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

Reliability Index - ^{۳۵}

Fire Retardant - ^{۳۶}

در کاربردهای مواد مرکب برای مواجهه با این مشکل می‌توان از پلیمرهایی با درجه نرمی بالا و یا پوشش‌های محافظتی ضد آتش استفاده نمود. در حالیکه استفاده از ورق‌های FRP برای افزایش مقاومت خمشی، مقاومت برشی و محصور شدگی^{۳۷} بسیار مؤثرند در برابر پدیده‌هایی نظیر ظرفیت باربری پی و برش در دال‌ها و اتصالات اثر گذاری بسیار محدودی دارند. بنابراین در یک طرح مقاوم‌سازی جامع همراه با افزایش ظرفیت‌های عضوهای سازه با ورق‌های FRP با استفاده از روش‌های دیگر از سایر حالت‌های شکست جلوگیری شود. در بهسازی لرزه‌ای بیشترین کارایی با ایجاد محصور شدگی در افزایش شکل‌پذیری^{۳۸} ستون‌ها می‌باشد. از آنجایی که در ارتباط با بهسازی لرزه‌ای قاب‌ها مطالعات پژوهشی در حال انجام است در طراحی می‌بایست به گونه‌ای انجام شود که مفصل‌های مومسانی در محل اتصالات رخ ندهند.

۶-۱- انتخاب FRP مناسب

شرایط محیطی در انتخاب نوع FRP اهمیت بالایی دارد. ویژگی‌های مکانیکی مصالح FRP در شرایط تماس با محیط‌های قلیایی، آب شور، مواد شیمیایی، تابش فرابنفش، دمای بالا، رطوبت و چرخه‌های یخ‌زدن کاهش می‌یابد. در محیط‌های قلیایی مرطوب FRP های شیشه‌ای ویژگی‌های 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 شیشه‌ای 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 لایه‌ها بحث پیچیده‌ای 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 شیشه‌ای و آرامیدی عایق در برابر هدایت جریان الکتریکی هستند. هادی بودن ورق‌های FRP کربنی می‌تواند سبب ایجاد خوردگی فولاد در مجاورت با آنها شود. این مسئله در طراحی و اجرا می‌بایست در نظر گرفته شود. نوع بارگذاری عامل مهم دیگری در انتخاب نوع FRP است. FRP شیشه‌ای و آرامیدی در برابر بارهای ضربه‌های مقاومت مناسبی از خود نشان می‌دهند. FRP های کربنی در مقابل خستگی

^{۳۷} Confinement -

^{۳۸} Ductility -

و خزش بسیار مقاومند در حالیکه مواد مرکب شیشه‌ای 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.

۶-۲- ویژگی‌های طراحی مصالح

ویژگی‌های مصالح که توسط تولید کننده گزارش می‌شود عموماً بدون در نظر گرفتن شرایط محیطی در دراز مدت می‌باشد. از آنجایی که رطوبت، نمک و برخی مواد شیمیایی اثر کاهنده‌ای بر روی مقاومت نهایی و کرنش نهایی مصالح FRP دارند در طراحی مقادیر کاهش یافته تنش و کرنش نهایی مطابق رابطه ۳ و رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (۳)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (۴)$$

مقدار ضریب C_E که ضریب کاهش محیطی نامیده می‌شود برای انواع سیستم‌های FRP در جدول ۶ ارائه شده شده است.

جدول ۶: ضرایب کاهش محیطی برای مواد FRP در شرایط مختلف

Exposure Condition	Fiber Type	Environmental Reduction Factor C_E
Interior Exposure	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exterior Exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garage)	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Aggressive Environment (chemical and wastewater treatment plants)	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

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.

۷-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 440, 2008, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (440.R-96)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- 3- ACI Committee 440, 2008, "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (440.3R-04)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- 4- ACI Committee 440, 2005, "Building Code Requirements for Structural Concrete (318R-05)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.