



دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

مقاوم سازی سازه های بتنی با الیاف FRP

تألیف:

دکتر موسی مظلوم

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی

امیر علی صفاری

مرتضی مهروند

سر شناسنامه	: مظلوم، موسی، 1347-
عنوان و نام پدید آور	: مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با الیاف FRP / مؤلفین موسی مظلوم، مرتضی مهروند، امیرعلی صفاری،
مشخصات نشر	: تهران؛ دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، 1392.
مشخصات ظاهری	: 151 ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: 978-600-6594-25-5
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا.
موضوع	: بتن تقویت شده با الیاف
موضوع	: پلاستیک تقویت شده با الیاف
موضوع	: ساختمان‌های بتن مسلح
شناسه افزوده	: مهروند، مرتضی، 1360-
شناسه افزوده	: صفاری، امیرعلی، 1362-
شناسه افزوده	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.
رده بندی کنگره	: TA 444 / م6 1392
رده بندی دیویی	: 624/18341
شماره کتابشناسی ملی	: 3172948



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	: مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با الیاف FRP
تألیف	: دکتر موسی مظلوم (استادیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی)، مرتضی مهروند، امیرعلی صفاری
ویراستار	: شهرام طهماسبی
نوبت چاپ	: اول - پاییز 1392
انتشارات	: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	: نگین سبز
چاپ	: برهان
طراح جلد	: مهندس هادی عارفی
ناظر چاپ	: محمد معتمدی نژاد
کارشناس و صفحه‌آرا	: نیره فیروزی
شمارگان	: 1000 جلد
قیمت	: 4.500 تومان
شابک	: ISBN: 978-600-6594-25-5 978-600-6594-25-5

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفین و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی محفوظ است.
 نشانی: تهران، لویزان - کد پستی 16788-15811 - صندوق پستی 163 - 16785 - تلفن: (2632) 9 - 22970060
 22970070 شماره: 22970003، پست الکترونیکی: Publish@srttu.edu، وب سایت: http://Publish.srttu.edu

پیشگفتار

بتن و ساختمان‌های بتنی از جمله سیستم‌های ساختمانی می‌باشند که در ایران به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دسته از ساختمان‌ها در اثر ضعف سازه، مرور زمان و همچنین اشکالات اجرایی نیاز مبرمی به بهسازی و مقاومسازی پیدا می‌کنند. روش‌های مختلفی برای بهسازی و مقاومسازی این دسته از ساختمان‌ها موجود است و یکی از این روش‌ها استفاده از الیاف FRP می‌باشد.

با توجه به رشد فزاینده بهسازی و مقاومسازی ساختمان‌های موجود بر آن شدیم تا در زمینه مقاومسازی ساختمان‌های بتنی با استفاده از الیاف FRP این کتاب را به رشته تحریر درآوریم. در کتاب حاضر سعی بر آن شده است که با استفاده از روال گام به گام به همراه مثال‌های متنوع، روند مقاومسازی با الیاف FRP شرح داده شود. با این وجود و علیرغم دقت و بررسی‌های فراوانی که صورت گرفته است، ذکر این نکته ضروری است که مسئولیت طراحی پروژه‌های مهندسی تنها بر عهده مهندسین محاسب و طراح می‌باشد.

در فصل اول این کتاب به بررسی اجمالی الیاف FRP و سیستم‌های مختلف آن پرداخته شده است و ضمن معرفی این گونه سیستم‌ها، اطلاعات مفیدی را در اختیار مهندسین قرار می‌دهد. در فصل دوم به صورت ویژه به بررسی ضوابط مقاومسازی خمشی تیرهای بتنی پرداخته شده است و سعی گردیده است که تمامی ضوابط به همراه مثال‌های متعدد در این بخش گنجانده شوند. فصل سوم به بررسی ضوابط مربوط به مقاومسازی برشی تیرهای بتنی پرداخته است. در این فصل نیز همانند فصل دوم، مدل‌های مختلف مقاومسازی و روند آنها به همراه چندین مثال شرح داده شده است. با توجه به اهمیت مقاومسازی ستون‌ها در ساختمان‌های بتن مسلح، در فصل چهارم ضوابط مربوط به بهسازی ستون‌ها ارائه شده است. این بخش نیز شامل مثال‌های متعدد و متنوع می‌باشد. در فصل پنجم به مراحل گام به گام نحوه مدل‌سازی و آنالیز اجزاء محدود یک تیر بتن مسلح و مقاوم‌سازی آن با استفاده از الیاف FRP در نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است.

امید است که این کتاب مورد توجه اساتید، دانشجویان و مهندسین محترم قرار گیرد. با وجود سعی و تلاش فراوان و بررسی‌های صورت گرفته، بر این باوریم که کاستی‌ها و نواقصی در این مجموعه وجود دارد. بنابراین از کلیه خوانندگان و مهندسین گرامی تقاضا می‌شود نقطه نظرات و پیشنهادات خود را از طریق ایمیل به اطلاع نویسندگان برسانند.

Mosspoon@yahoo.com , Mazloom@Srttu.edu

Mehrvand@Gmail.com

Saffari.amirali@Gmail.com

دکتر موسی مظلوم

مهندس مرتضی مهروند

مهندس امیرعلی صفاری

فهرست

صفحه	عنوان
فصل اول: آشنایی با FRP	
3	1-1 مقدمه
3	2-1 معرفی سیستم‌های FRP
4	1-2-1 مزایای سیستم‌های FRP
4	2-2-1 معایب سیستم‌های FRP
5	3-1 مشخصات مکانیکی انواع فیبرهای FRP
5	4-1 بررسی دقیق‌تر برخی فیبرهای FRP
6	1-4-1 الیاف شیشه GFRP
6	1-1-4-1 انواع الیاف شیشه و مشخصات آنها
7	2-4-1 الیاف کربن CFRP
8	5-1 روش‌های ساخت و نصب مصالح FRP
9	1-5-1 الیاف
10	2-5-1 خمیر (مواد زمینه)
10	6-1 انواع روش ساخت FRP
10	1-6-1 اشباع الیاف
11	2-6-1 سیستم کیسه خلأ
13	7-1 انواع روش‌های نصب FRP
13	1-7-1 روش نصب تر
14	2-7-1 روش نصب ماشینی
14	3-7-1 روش پیش عمل آوری شده
14	8-1 نکات مهم در نصب
فصل دوم: تقویت خمشی تیرها با FRP	
19	1-2 تقویت خمشی تیر
21	2-2 ضرایب اطمینان یا ضرایب ایمنی جزئی
22	3-2 مودهای شکست خمشی
23	4-2 روابط طراحی تیر مستطیلی با فولاد کششی بر مبنای نشریه 345
25	5-2 روابط طراحی تیر مستطیلی دارای فولاد فشاری بر مبنای نشریه 345
25	6-2 روابط طراحی خمشی مقاطع مستطیل شکل به صورت گام به گام

31 7-2 روابط طراحی تیرهای T شکل بر مبنای نشریه 345

35 8-2 روابط طراحی تیر مستطیلی بر مبنای BS

فصل سوم: تقویت برشی تیرها با FRP

45 1-3 مقدمه

45 2-3 انواع حالات شکست برشی تیرهای بتن مسلح

45 3-3 انواع روش‌های تقویت برشی تیرهای بتن مسلح

47 4-3 انتخاب طرح تقویتی برشی مناسب

49 5-3 انواع حالات شکست تیرهای تقویت شده با FRP

49 1-5-3 شکست برشی همراه با گسیختگی مصالح FRP

50 2-5-3 شکست برشی بدون گسیختگی مصالح FRP

50 3-5-3 شکست برشی ناشی از ور آمدن FRP

51 4-5-3 شکست نزدیک به مهاربندی‌های مکانیکی

51 6-3 انواع مدل‌سازی و طراحی جهت تقویت برشی

51 1-6-3 مدل‌سازی شلال و همکاران

52 2-6-3 مدل‌سازی تریانگولار

53 3-6-3 مدل‌سازی برشیو تنگ

53 4-6-3 مدل‌سازی بالاگورا، نانی و جیانکاسپرو

54 1-4-6-3 محدودیت‌های تقویت برشی

54 2-4-6-3 حداکثر فاصله تقویت‌ها

55 7-3 مراحل طراحی

58 8-3 مقاوم‌سازی برشی بر مبنای نشریه 345

60 1-8-3 حداکثر فاصله تقویت‌ها

60 2-8-3 حداکثر تقویت برشی

61 3-8-3 حداقل تقویت برشی

فصل چهارم: تقویت ستونها با FRP

67 1-4 مقدمه

68 2-4 رفتار بتن محصور شده

70 3-4 انواع روش‌های تقویت

70 1-3-4 دورپیچ کردن مقطع ستون

70 2-3-4 پیچیدن الیاف به روش پیچش صنعتی

70 3-3-4 پوشش‌های پیش‌ساخته

71 4-4 رفتار ستون‌های محصور شده با کامپوزیت تحت بار محوری هم محور

71	1-4-4 ستون با سطح مقطع دایره‌ای
73	2-4-4 ستون با سطح مقطع غیر دایره‌ای
74	5-4 رفتار ستون‌های محصور شده با کامپوزیت تحت بار محوری برون محور
78	6-4 بازسازی ستون‌ها برای مقاومت در برابر زلزله
79	7-4 مکانیزم شکست ستون‌های بتن آرمه تحت بار زلزله
79	1-7-4 شکست برشی
80	2-7-4 شکست خمشی به دلیل ایجاد مفصل خمیری
80	3-7-4 شکست در قسمت وصله و همپوشانی آرماتورها
82	8-4 روش‌های تقویت ستون‌های بتن آرمه تحت بار زلزله
83	1-8-4 تقویت برشی
86	2-8-4 محاسبه سهم پوشش FRP در افزایش مقاومت برشی
89	3-8-4 تقویت محل مفصل خمیری
91	4-8-4 تقویت وصله آرماتورهای طولی
91	9-4 تقویت ستون‌ها بر مبنای ضوابط نشریه 345
91	1-9-4 ستون‌های گرد کوتاه تحت فشار خالص
93	2-9-4 ستون‌های مستطیلی کوتاه تحت فشار خالص

فصل پنجم: مدل‌سازی اجزا محدود در نرم‌افزار ABAQUS

99	1-5 مقدمه
99	2-5 مدل‌سازی تیر بتنی با میلگردهای کششی
99	3-5 صورت مسئله
100	4-5 شروع فرآیند مدل‌سازی
104	5-5 تعیین مشخصات مصالح
107	6-5 تعیین نوع مقاطع المان‌ها
109	7-5 مونتاژ المان‌ها
110	8-5 ایجاد قید در نرم‌افزار ABAQUS
112	9-5 بارگذاری و تعیین شرایط تکیه‌گاهی
116	10-5 مش‌بندی
118	11-5 تحلیل مسئله
119	12-5 مشاهده نتایج
120	13-5 شروع روند بهسازی با استفاده از FRP
121	14-5 ساخت المان FRP
121	15-5 تعریف مصالح FRP

124	16-5 مونتاژ نمودن لایه FRP
124	17-5 ایجاد قید بین بتن و لایه FRP
125	18-5 مش بندی لایه FRP
127	19-5 نتیجه گیری
منابع و مراجع	
129	منابع و مراجع
واژه نامه	
131	واژه نامه
فهرست موضوعی	
137	فهرست موضوعی

فصل اول

آشنایی با FRP

- 1-1 مقدمه
- 2-1 معرفی سیستم‌های FRP
- 1-2-1 مزایای سیستم‌های FRP
- 2-2-1 معایب سیستم‌های FRP
- 3-1 مشخصات مکانیکی انواع الیاف FRP
- 4-1 بررسی دقیق‌تر برخی الیاف FRP
- 1-4-1 الیاف شیشه GFRP
- 1-1-4-1 انواع الیاف شیشه
- 2-1-4-1 مشخصات الیاف شیشه
- 2-4-1 الیاف کربن CFRP
- 5-1 روش‌های ساخت و نصب مصالح FRP
- 1-5-1 الیاف
- 2-5-1 چسب (مواد زمینه)
- 6-1 انواع روش‌های ساخت FRP
- 1-6-1 اشباع الیاف
- 2-6-1 سیستم کیسه خلأ
- 7-1 انواع روش‌های نصب
- 1-7-1 روش نصب تر
- 2-7-1 روش نصب ماشینی
- 3-7-1 روش پیش عمل‌آوری شده
- 8-1 نکات مهم در نصب

1-1 مقدمه

مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها در کشور ایران که بر روی گسل‌های زلزله واقع است امری مهم و اجتناب ناپذیر می‌باشد. استفاده از فناوری‌های جدید در بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها به عنوان رویکرد نوین باید در نظر مهندسان سازه قرار داشته باشد.

از ویژگی‌های اصلی کامپوزیت‌های پلیمری می‌توان مقاومت مناسب در برابر خوردگی، سادگی اجرا در محل نصب و سبکی آنها را برشمرد. عامل دیگر در گسترش کاربری مصالح FRP روند کاهش قیمت این مصالح می‌باشد.

استفاده از مصالح FRP در صنعت ساختمان در مقیاس جهانی سابقه طولانی ندارد و توسعه این فناوری در صنعت ساختمان به حدود سه دهه پیش برمی‌گردد. سابقه استفاده از مصالح FRP در صنعت ساختمان کشور ایران نیز به حدود یک دهه می‌رسد اما امروزه استفاده از کامپوزیت‌های با زمینه پلیمری در بهسازی سازه‌های بتن آرمه از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است که دلیل اصلی آن نیاز به افزایش عمر بهره‌برداری و ارتقای اساسی زیرساخت‌ها در تمامی نقاط دنیا می‌باشد.

1-2 معرفی سیستم‌های FRP

سیستم‌های FRP برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی از اواسط دهه 1980 مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اعضای سازه‌ای که توسط FRP مقاوم می‌گردند [1]، عبارتند از:

- تیرها
- ستون‌ها
- دال‌ها
- اتصالات
- ساختمان‌های بتنی
- ساختمان‌های چوبی

یک سؤال ممکن است در این مرحله به ذهن خواننده خطور نماید، سؤال این است که به طور کل ایده FRP از کجا شروع شده است؟

تقویت سازه‌های بتنی با افزایش مقطع بتنی با استفاده از پوشش بتنی جدید و همچنین استفاده از صفحات فولادی متداول بوده است، ایده سیستم‌های FRP جایگزینی به جای روش‌های تقویتی دیگر از جمله صفحات فولادی و یا پوشش‌های بتنی می‌باشد.

1-2-1 مزایای سیستم‌های FRP

- مقاومت کششی بالا
- مقاومت و دوام در برابر عوامل شیمیایی
- مقاومت مناسب در حرارت‌های بالا
- وزن کم
- هزینه اجرای مناسب
- امکان استفاده از ترکیب چند نوع FRP جهت بهبود خواص هر کدام از آنها (برای مثال بهبود شاخص‌های مقاومت، خستگی و ضریب ارتجاعی در GFRP با به اضافه نمودن لایه‌هایی از CFRP) [2,3].

1-2-2 معایب سیستم‌های FRP

- هزینه اجرا و حمل این مصالح پایین می‌باشد، ولی قیمت مصالح FRP یکی از عوامل محدود کننده استفاده از آن محسوب می‌گردد [2].
- پایین بودن ضریب ارتجاعی
- مقاومت کم در برابر پدیده خستگی
- ایجاد پدیده ترد شکنی
- حساسیت به خراش و ساییدگی در هنگام نصب

سیستم‌های FRP از اجزای مشخصی ساخته شده می‌شوند این اجزا عبارتند از:

1- الیاف مسلح کننده (الیاف FRP)

وظیفه اصلی الیاف فراهم نمودن سختی و مقاومت در عضو تقویت شده می‌باشد.

2- چسب‌های پلیمری

وظیفه چسب‌ها فراهم نمودن شرایط انتقال تنش و تغییر شکل بین الیاف، افزایش مقاومت در برابر شرایط محیطی و ایجاد سطح محافظ در مقابل سایش و خراشیدگی را برآورده می‌کنند. نکته: برای رسیدن به حداکثر حالت کارایی یا Performance در مقطع تقویت شده باید سطح الیاف یا FRP به طور کامل با چسب آغشته شده و به سطح بتن چسبانده شود. به طور معمول از سه نوع الیاف مسلح کننده استفاده می‌گردد که عبارتند از:

- الیاف شیشه¹
- الیاف کربن²
- الیاف آرامید³

نکته: وظیفه اصلی الیاف ایجاد مقاومت اضافی در برابر بخش عمده باری می‌باشد که بر روی سیستم مقطع مقاوم‌سازی شده وارد می‌شود. تاکنون از هر سه نوع الیاف فوق در مقاصد عملی بهسازی لرزه‌ای استفاده شده است [5,4]، در ادامه مشخصات مکانیکی انواع معمول هر کدام از الیاف در جدول 1-1 ذکر شده است:

1-3 مشخصات مکانیکی انواع الیاف FRP

جدول 1-1 مشخصات مکانیکی انواع الیاف FRP

انواع الیاف	چگالی (kg/m ³)	ضریب ارتجاعی (Gpa)	مقاومت کششی (Mpa)
الیاف شیشه	1600-2000	20-55	400-1800
الیاف کربن	1600-1900	120-250	1200-2250
الیاف آرامید	1050-1250	40-125	1000-1800

نکته: البته مقادیر فوق در نهایت به جهت قرارگیری رشته‌های الیاف، ضخامت لایه‌های الیاف و بسیاری از پارامترهای دیگر بستگی خواهد داشت.

نکته: در زمینه تقویت‌های بهینه می‌توان از دو نوع یا چند نوع از FRP های موجود بهره برد تا به مشخصات مورد نظر در مقطع تقویت شده دست پیدا نمود. برای مثال برخی از مشخصه‌های GFRP مانند ضریب ارتجاعی، مقاومت و خستگی با بکار بردن همزمان الیاف CFRP بهبود پیدا می‌کند، به‌طور مشابه می‌توان انرژی ضربه پذیری الیاف CFRP را با افزودن الیاف شیشه آرامید بهبود بخشید.

1-4 بررسی دقیق تر برخی الیاف FRP

همانطور که ذکر شد الیافی که به‌طور معمول در بهسازی، مقاوم‌سازی و صنعت استفاده می‌گردند عبارتند از:

- 1- GFRP or Glass Fiber Reinforced Polymers
- 1- CFRP or Carbon Fiber Reinforced Polymers
- 2- AFRP or Aramid Fiber Reinforced Polymers

- 1- الیاف شیشه¹
- 2- الیاف کربن²
- 3- الیاف آرامید³
- 4- الیاف بازالت⁴

در این قسمت به بررسی دقیق‌تر مشخصات برخی از انواع الیاف پرداخته خواهد شد.

1-4-1 الیاف شیشه GFRP

این نوع از الیاف FRP بیشترین کاربرد را در صنعت کامپوزیت به خود اختصاص داده‌اند. از مزایای این نوع الیاف می‌توان به قیمت پایین، مقاومت کششی بالا، مقاومت در برابر عوامل شیمیایی، مقاومت خوب در برابر حرارت‌های بالا و ... اشاره نمود. این نوع از الیاف معایبی نیز دارند که برخی از آنها عبارتند از: پایین بودن ضریب ارتجاعی، حساسیت شدید به خراش در هنگام نصب، مقاومت کم در برابر پدیده خستگی در بارگذاری‌های متناوب، افزایش احتمال پدیده ترد شکنی و

الیاف شیشه به وسیله ذوب سیلیکات‌ها به همراه پتاس یا اکسیدهای فلزی مختلف تولید می‌گردند. حجم مذاب فوق از غلاف یا پوسته‌ای بسیار ریز عبور می‌کند و سپس به سرعت سرد می‌گردد تا تارهای الیاف شیشه در محدوده قطر $5-24 \mu\text{m}$ تولید گردند. سپس رشته‌های تولید شده به یکدیگر به صورت بسیار فشرده بافته می‌شوند [6,2].

در حین انجام این پروسه، الیاف به صورت متناوب با مواد پوشش دهنده چسبناکی کاور می‌شوند تا مسأله سایش در رشته‌های الیاف شیشه به حداقل نزدیک گردد.

1-4-1-1 انواع الیاف شیشه و مشخصات آنها

- 1- الیاف شیشه الکتریکی⁵
- 2- الیاف شیشه سازه‌ای⁶
- 3- الیاف شیشه شیمیایی⁷
- 4- الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیایی¹

1 - GFRP
 2- CFRP
 3- AFRP
 4- Basalt
 5- Electrical Glass Fiber or E-Glass
 6- Structural Fiber Glass or S-Glass
 7 - Chemical Fiber Glass or C-Glass

در بین انواع الیاف شیشه، نوع E-Glass بیشتر از بقیه کاربرد دارد و اقتصادی‌تر از انواع دیگر الیاف شیشه می‌باشد. در صنعت برق به عنوان مقاومت‌های الکتریکی از این نوع الیاف شیشه استفاده می‌گردد.

الیاف S-Glass بیشترین مقاومت کششی را در بین الیاف شیشه دارا می‌باشد و بیشتر برای پوشش موشک‌ها و قطعات هواپیمایی استفاده می‌گردد.

الیاف C-Glass دارای آهک سوددار به همراه بور و سیلیکات می‌باشد و در محیط‌هایی که دارای مواد شیمیایی خورنده می‌باشد کاربرد فراوان دارد. این نوع الیاف در مقابل خوردگی اسیدی مقاومت بسیار خوبی را فراهم می‌کنند و کاربرد اصلی آنها در:

- پوشش سطحی در خطوط لوله

- پوشش سطحی در مخازن

به صورت ویژه برای استفاده در بتن‌ها الیاف AR-Glass را می‌توان استفاده نمود. این نوع الیاف از آلکالی - زیرکونیوم سیلیکات تشکیل شده‌اند و در هنگامی که نیاز به مقاومت در برابر محیط‌های قلیایی باشد، می‌توان این نوع از الیاف FRP را استفاده نمود. مشخصات الیاف شیشه به اختصار در جدول 1-2 قید شده است.

جدول 1-2 مشخصات انواع الیاف شیشه

نام	چگالی gr/cm ³	مقاومت کششی Mpa	ضریب ارتجاعی Gpa	افزایش طول %
E-Glass	2.6	3445	72.4	4.8
S-Glass	2.49	4585	86.9	5.4
C-Glass	2.56	3310	68.9	4.8
AR-Glass	2.7	3241	73.1	4.4

1-4-2 الیاف کربن CFRP

الیاف کربن دارای ضریب ارتجاعی بالایی هستند از این رو استفاده از آنها جهت مقاصد بهسازی سازه‌ها پیشنهاد می‌گردد. ضریب ارتجاعی الیاف کربن از تمامی انواع الیاف FRP دیگر بالاتر می‌باشد. الیاف کربن دارای مقاومت بالا در برابر خستگی می‌باشند، علاوه بر آن ضریب انبساط گرمایی خطی این نوع الیاف در دماهای بالا و پایین بسیار کم می‌باشند که این مسأله باعث پایداری ابعادی الیاف کربن در دماهای متفاوت می‌گردد. از دیگر مزیت‌هایی که الیاف کربن دارند، نسبت بالای مقاومت کششی به وزن آنها می‌باشد [7، 6، 2].

البته از معایب این نوع الیاف نیز باید به مقاومت کم در برابر ضربه و قیمت بالای آن‌ها اشاره نمود.

الیاف کربن در مقادیر تجاری از سه ماده اولیه زیر ساخته می‌شوند.

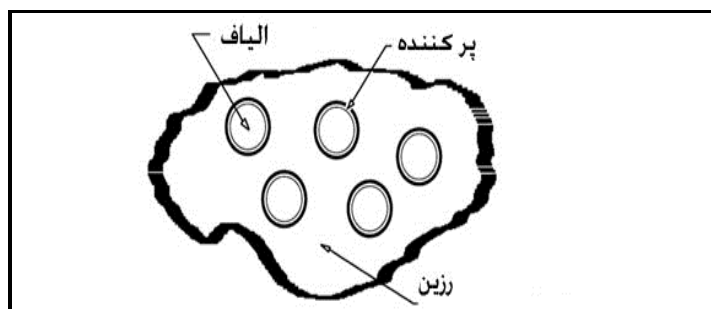
- 1- ابریشم مصنوعی¹
- 2- پلی‌اکریلونیتریل²
- 3- قیر حاصل از پالایش نفت خام³

نکته: ابریشم مصنوعی از مواد اولیه سلولزی ساخته می‌شود. پلی‌اکریلونیتریل PAN به عنوان یک ماده اولیه دارای بیشترین مقاومت کششی در بین مواد تشکیل دهنده الیاف کربن می‌باشند.

الیاف کربن با توجه به درصد مواد متشکله آنها دارای انواع زیادی بر حسب ضریب کششی می‌باشند، اگر چه ضریب‌های کششی بسیار بالا در الیاف کربن کاربردهای زیادی ندارند ولی طیف مربوط به ماژول کششی این نوع الیاف می‌تواند از 207 Gpa تا حدود 1035 Gpa متغیر باشند. مقادیر معمول مورد استفاده در پروژه‌های مقاوم‌سازی به‌طور معمول کمتر از 440 Gpa می‌باشد.

1-5 روش‌های ساخت و نصب مصالح FRP

همان‌طور که ذکر شد مصالح FRP از دو قسمت اصلی الیاف و چسب و نیز ماده‌ای کم وزن به نام پرکننده تشکیل شده که در این میان، الیاف جهت تحمل بار و چسب برای چسباندن الیاف و عملکرد یکنواخت آنها به کار برده می‌شوند.

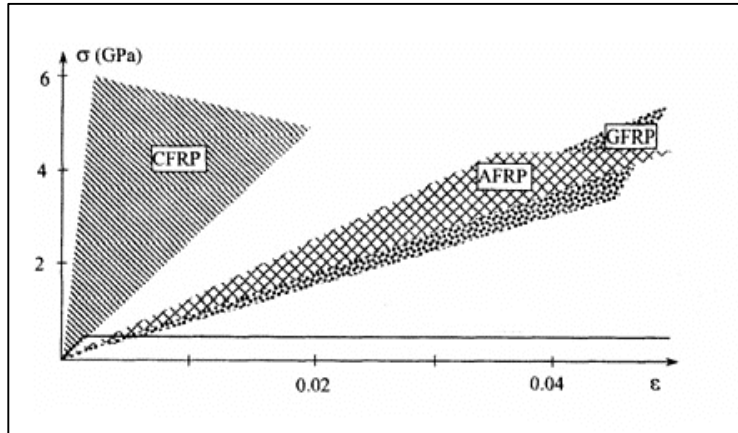


شکل 1-1 قسمت‌های تشکیل دهنده مصالح FRP

- 1- Rayon
- 2- Polyacrylonitrile
- 3- Petroleum Pitch

1-5-11 الیاف

متداول‌ترین نوع الیاف مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌ها، الیاف کربن، شیشه و آرامید می‌باشند. این الیاف دارای مقاومت کششی بسیار بالایی بوده و رفتار تنش- کرنش این الیاف به صورت خطی می‌باشد [8].



شکل 1-2 نمودار تنش- کرنش الیاف [7].

مهم‌ترین خواص الیاف کربن عبارتند از: مقاومت و سختی خیلی بالا، مقاومت بسیار عالی در برابر مواد شیمیایی و رطوبت، مقاومت بالا در برابر خستگی و گسیختگی در اثر خزش. در ضمن این مواد رسانا و مستعد خوردگی می‌باشند [8].

خواص الیاف شیشه عبارتند از: مقاومت بالا، سختی کم، حساس در برابر قلیایی‌ها و رطوبت، مقاومت اندک در برابر خستگی و گسیختگی در اثر خزش، عایق بسیار خوب. قابلیت افزایش طول زیاد نیز از دیگر مزایای این الیاف هستند [8].

خواص الیاف آرامید عبارتند از: مقاومت بالا، مقاومت بسیار عالی در برابر مواد شیمیایی، مقاوم در برابر خستگی و گسیختگی در اثر خزش، مقاومت بسیار عالی در برابر ضربه، رسانایی اندک. این الیاف به رطوبت و اشعه ماوراء بنفش حساس هستند [8].

1-5-2 خمیر (مواد زمینه)¹

برای چسباندن و عملکرد یکنواخت الیاف یا تارها، از یک خمیر چسباننده استفاده می‌شود. این ماده معمولاً دارای سختی و مقاومت کمتری نسبت به الیاف می‌باشد ولیکن اختلاط الیاف و یا تارها با این ماده منجر به تشکیل یک محصول جدیدی می‌گردد، که علاوه بر چگالی کم، از مقاومت بالایی نیز برخوردار است. وظیفه اصلی خمیرهای چسباننده عبارتند از:

- نگهداری الیاف در کنار هم و انتقال نیروها بین الیاف
 - محافظت الیاف در برابر عوامل محیطی و شیمیایی
 - تحمل برخی از بارها مخصوصاً بارهای عرضی و تنش‌های برشی بین لایه‌های خمیرهای چسباننده به دو دسته کلی ترموست و ترموپلاستیک تقسیم می‌شوند. خمیرهای چسباننده ترموست دارای ویسکوزیته پایین، هزینه اندک، استفاده آسان و جمع‌شدگی کمتر می‌باشند. این خمیرهای چسباننده شامل اپوکسی، ونیل استر و پلی‌استر می‌باشند. اما خمیرهای چسباننده ترموپلاستیک دارای ویسکوزیته بالا بوده که باعث می‌شود نتوان الیاف را توسط خمیر چسباننده به خوبی به هم اشباع نمود و به این دلیل کمتر کاربرد دارد [9].
- مواد زمینه با توجه به غلظت به چسب‌های صنعتی² چسب‌های اشباع کننده³ و خمیر پرکننده⁴ طبقه‌بندی می‌شود [9].

1-6-1 انواع روش ساخت FRP

1-6-1-1 اشباع الیاف

در بسیاری از موارد، کامپوزیت‌های FRP با استفاده از تکنیک اشباع الیاف ساخته می‌شوند. به این روش اشباع دستی نیز می‌گویند. این فرایند شامل قراردادن لایه‌های پی در پی از الیاف‌های آغشته به چسب بر روی هم با دست است. در مرحله بعد به وسیله کاردک و یا غلطک‌های مخصوص نیرویی به الیاف آغشته به چسب وارد می‌شود تا هوای مخلوط مانده خارج گردد [9].

بنا به دلایلی این روش به روشی مرسوم در صنعت کامپوزیت‌ها تبدیل شده است. از جمله این دلایل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

اولاً اصول این روش جهت آموزش و یادگیری آسان است و سالیان زیادی است که از آن استفاده می‌شود، ثانیاً این روش اقتصادی است و نیازی به تجهیزات بزرگ و گران قیمت ندارد،

1- Matrix

2- Adhesives

3- Saturating Resin

4- Putty Fillers