

معرفی و بررسی مشخصات مصالح FRP و کاربرد آن‌ها در صنعت

مریم ملک محمدی^{1*}، امیرحسین شعبانلو²

1- دانشجوی کارشناسی شیمی کاربردی دانشگاه بوعلی سینا Maryammalakmohammadi79@gmail.com

2- دانشجوی کارشناسی شیمی محض دانشگاه بوعلی سینا Amirhossein.sh13800@gmail.com

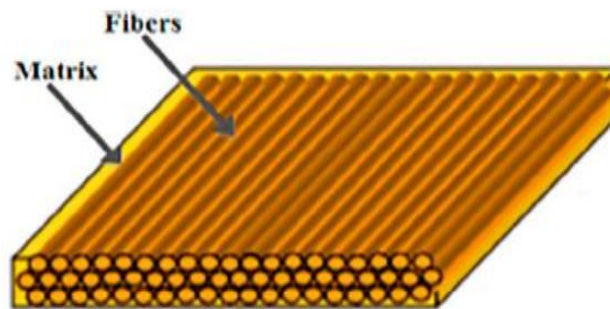
خلاصه

بتن و فولاد از مهم ترین مصالح مورد استفاده در مهندسی عمران می باشند. استفاده از بتن و فولاد هر یک با توجه به شرایط متعدد انتخاب می شود. بتن معمولی به تنهایی از مقاومت فشاری قابل قبولی برخوردار است، اما مقاومت کششی آن به طرز قابل توجهی کمتر می باشد. به همین علت از میلگردهای فولادی در آن استفاده می شود. تاثیر چشم گیر محصولات پلیمری در دانش ساخت بتن‌های مسلح بر همگان آشکار است. محصولات اف آر پی بر کارایی و عمر بهره‌برداری سازه‌ها می‌افزایند و راندمان کاری را چه از نظر اقتصادی و چه از نظر زمانی افزایش می‌دهد. وجود عوامل خارجی در محیط سازه؛ باعث بروز مشکلاتی می‌شود که عمر بهره‌برداری را می‌کاهد؛ عواملی چون گرمای بیش از حد، حملات اسیدی، رطوبت، بارهای ضربه‌ای و... که همگی موجب عدم یکپارچگی بتن شده و جداسازی ناشی از ضعف بتن را به دنبال دارد. با استفاده به جا و مناسب از محصولات اف آر پی می‌توان بر این ضعف‌ها غلبه کرده و نظاره‌گر سازه‌هایی با کاربردهای هماهنگ با محیط‌های مختلف، مقاوم در برابر بار و تهدیدات و سبکی سازه باشیم. زمانیکه از مصالح کامپوزیتی بجای فولادی استفاده شود قطعاً مقاومت سازه بیش از حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد، ولیکن انعطاف سازه، انتقال تنش و توزیع تمرکز تنش افزایش می‌یابد. با توجه به کاهش هزینه‌ها تا حدود ۵۰٪ و حتی کمتر، عملیات اجرایی بسیار سبک‌تر با تجهیزات سبک‌تر، و در نهایت مقاومت سازه بسیار افزایش یافته و عمر سازه را چندین برابر طولانی تر می‌کند. در این مقاله سعی بر معرفی این محصولات و ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها که موجب کارایی‌های خاص می‌شود شده است.

کلمات کلیدی: کامپوزیت، پلیمر، FRP، اف آر پی.

1. مقدمه

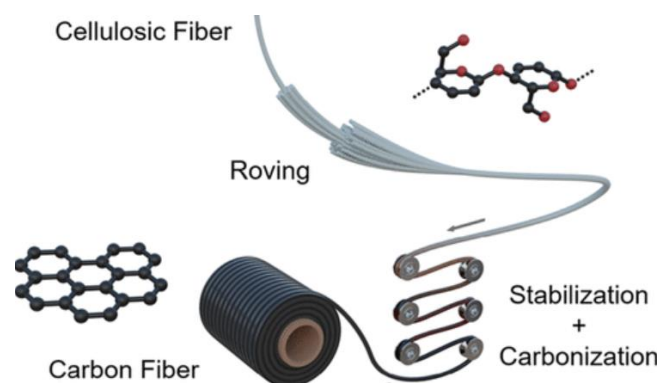
در سال 2007 مهندسين عمران آمريكا (ASCE) و اتحاديه توليدكنندگان كامپوزيت در آمريكا (ACMA) به توافق سه ساله‌اي تحت عنوان، توسعه پيش استاندارددي براي روش طراحي، بارگذاري و مقاومت نهايي (LRFD) براي FRP ها دست يافتند. در آينده انتظار مي‌رود محصولات كامپوزيتي FRP به كمك مهندسين صنايع مختلف برود زيرا استفاده‌ي كامپوزيت‌هاي پالترود FRP در ساختمان‌ها و طراحي‌هاي حمل و نقلي شامل ارائه فوايدي هم چون افزايش استحكام وزني، مقاومت در برابر خوردگي، تعمير و نگهداري پايين و چرخه عمر طولاني زيست محيطي مي‌شود. (ايمان؛ الياسيان-پوريا). FRP در لغت مخفف كلمه Fiber Reinforced Polymer به معني پليمرهاي تقويت شده با فايبر است اف آر پی از دو جزء ماتريس رزين و فايبر تشكيل مي‌شود و کاربردهاي متفاوتي در صنايع مختلف و ساختمان دارد. بيشترين کاربرد اين مصالح در صنعت ساختمان و مقاوم‌سازي سازه‌ها، جهت ترميم، تقويت و مقاوم‌سازي ساختمان‌هاي بتني بوده و در صنعت كامپوزيت جهت ساخت قطعات صنايع مختلف است. الياف FRP با قرار گرفتن و نصب بر روي سطوح بتني از قبيل دال‌ها، تيرها، ستون‌ها، ديوارهاي بتني و فونداسيون بتني مي‌تواند باعث افزايش مقاومت بتن شوند. همچنين اين الياف مي‌تواند در ساختمان‌هايي با کاربري مسكوني، تجاري، اداري، صنعتي، تكيه‌گاه ماشين آلات و تاسيسات سنگين و همچنين سازه‌هاي آبي و دريائي مانند سد و كانال نيز کاربرد داشته باشند. علاوه بر اين از الياف FRP مي‌توان در مقاوم‌سازي زيرساخت‌هاي مهندسي از قبيل پل‌هاي جاده‌اي و ريلي، مخازن آب و مواد شيميايي، سيلوها و برج‌هاي خنك‌كننده نيز استفاده نمود. به صورت كلي اف آر پی تركيبی از دو ماده است. بخش اول آن ماتريس بوده و جز ديگر آن الياف است. ماتريس خود از برخي مواد شيميايي مانند رزين‌هاي اپوكسي و پلي استر تشكيل شده است. اين مواد جهت کاهش قيمت تمام شده و بهبود خواص مكانيكي و شيميايي داراي فيلرها و افزودني‌هاي هستند (توكل زاده و هاشمي، 1398).



شکل 1: نمایش الياف و ماتريس در كامپوزيت اف آر پی

2. الیاف فیبر کربن

الیاف کربن یکی از پرکاربردترین الیاف در صنعت است؛ و در تولید انواع کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. این الیاف ضریب الاستیک نسبتاً بالایی درمقایسه با الیاف شیشه و کولار دارند. ضریب انبساط گرمایی این نوع الیاف‌ها در دماهای متفاوت کم می‌باشد که این مسئله باعث پایداری طولی و اندازه الیاف کربن در دماهای مختلف می‌گردد. الیاف کربن از فیبرهایی با قطری در حدود ۵ تا ۱۰ میکرومتر قطر تشکیل شده‌اند. نخ الیاف کربن با چگالی خطی (وزن در طول واحد؛ یعنی ۱ گرم در ۱۰۰۰ متر = ۱) یا بر پایه تعداد رشته‌ها در هر نخ، است؛ بنابراین چگالی این الیاف می‌تواند حدود ۱.۰۸ تا ۲ g/m^3 باشد. فیبر کربن عنصری با چگالی‌ای به‌طور متوسط در حدود ۱.۹ g/m^3 گرفته شود و اشکال بلوری مختلفی دارد. رشته الیاف کربن که از فیبرهای کربن تشکیل می‌گردد، به مراتب نازکتر از موی انسان در قطر بین ۶ تا ۱۰ میکرومتری می‌باشند. علیرغم حجم بالای استفاده از آن‌ها، قیمت الیاف کربن هنوز نسبتاً بالا است. این مسئله باعث محدودیت فروش الیاف کربن می‌گردد. فیبر و الیاف کربن در مدول‌های الاستیسیته و مقاومت‌های کششی مختلف و با بافت‌های مختلف شامل الیاف کربن تک جهت و الیاف دو جهت کربن برای تولید مصالح کامپوزیتی صنایع مختلف و مقاوم‌سازی انواع سازه‌های بتنی عرضه می‌گردند. با توجه به نیاز صنعت‌های مختلف کشور ایران، الیاف کربن در طیف گسترده‌ای از انواع فیبر از ۳ تا ۵۰K و با وزن‌های مختلف و عرض‌های مختلف ارائه می‌شوند. معمولاً دسته‌بندی الیاف کربن بر مبنای وزن آن‌ها انجام می‌گیرد. برای مثال الیاف کربنی که با عنوان UD200 نام گذاری می‌شود، وزنی برابر ۲۰۰ گرم در هر متر مربع دارد (بوگاری و همکاران، 2011).



شکل 2: تصویر شماتیک فیبر و نوار کربنی



شکل 3: کامپوزیت فیبر کربنی

3. مشخصات و ساخت فیبر کربن

الیاف کربن نخستین بار در سال ۱۸۷۹ میلادی زمانی که ادیسون از این ماده به عنوان رشته پر مقاومت در ایجاد روشنایی الکتریکی استفاده کرد، پای به عرصه علم گذاشت. کربن یکی از پروژه های شکست خورده ادیسون بود. الیاف کربن رسانای الکتریکی بود. همچنین تحمل حرارت بسیار بالایی داشت و نور و گرما تولید میکرد ولی نور بسیار کمی تولید میکرد و قیمت بالایی داشت. برای همین تبدیل به یکی از پروژه های شکست خورده توماس ادیسون شد. ولی او ناامید نشد به راه خود ادامه داد. در آغاز دهه ۱۹۶۰ بود که تولید موفق تجاری الیاف کربن، با اهداف نظامی و برای کاربرد در هواپیمای جنگی آغاز شد. آمریکا نزدیک به ۶۰ درصد تولید جهانی این الیاف را به مصرف می رساند. در حالی که ژاپن تلاش می کند به میزان مصرفی برابر با ۵۰ درصد تولیدات جهانی این محصول دست یابد. ژاپن به واسطه شرکت صنعتی توری، خود بزرگترین تولیدکننده الیاف کربن در جهان است. هم چنین عمده ترین تولیدکننده الیاف کربن با استفاده از پیش زمینه قیر، ژاپن است (بوگاری و همکاران، ۲۰۱۱).

کربن رشته الیافی است که از حرارت دادن مواد آلی که قسمت عمده ی آن کربن می باشد در محیط گاز های بی اثر به دست می آید. فیبر کربن به الیافی گفته می شود که دست کم دارای ۹۰ درصد کربن هستند و از پیرولیز کنترل شده الیافی ویژه به دست می آیند. فیبر کربن مشکی رنگ، غیر حلال در آب و بدون بو بوده که مقاومت بسیار بالایی در برابر مواد خورنده مثل اسیدها، بازها و مواد عالی دارا می باشند. این الیاف به صورت های مختلفی تولید می شوند از جمله:

- بافتن رشته ها به هم یا Filament winding الیاف یا رشته های پیوسته به صورت نوارهای موازی به دور سیلندر پیچانده شده و رشته های فیبر به دور آن تابیده می شود. در این حین ماتریس رزین پلی استرونیل استر یا اپوکسی به درون سیلندر دوار دمیده شده و با فیبرها ترکیب می شود تمامی این فرایند برای بدست آمدن FRP با کیفیت مناسب با کامپوزتر کنترل می شود.

موارد مصرف FRP تولیدی به این روش ۱- در لوله سازی ۲- ساخت لوله های تحت پیچش ۳- بدنه وجداره موشک ۴- بطری ها و شیشه های تحت فشار ۵- تانکهای ذخیره ۶- فیوز تأخیری هواپیما و... می باشد.

- فرایند پالتروژن (Pultrusion) در این روش لمینیت ها یا ورق های پوششی با مقطع عرضی و طول معین ساخته می شود. در حین کشیدن نوار فیبر، ماتریس که معمولاً پلی استر یا وینیل استر می باشد با گرمای الکتریکی به کمک روغن داغ به فیبر اضافه می شود و اتاقلک پیش گرمایشی فرکانس رادیویی برای کنترل ضخامت در زمان عمل آوری وجود دارد.
- روند تولید از طریق فرآیند فشرده سازی در خلأ، در این روش وزن هوای بین لایه های FRP (اف ار پی) مانع از تشکیل آن می گردد بنابراین بر اثر پرس و فشار اعمالی بایستی هوای محبوس خارج شود تا ورق پوشی FRP یا لمینیت شکل گیرد. یک یا چند لایه با ضخامت مختلف روی فیلم یا غشا قابل گسترش قرار داده شده، سپس تحت پرس و فشار قرار می گیرند تا هوای بین لمینیت خارج شده و ماتریس رزین به یکی از روش های موجود حرارت داده شده و به لایه فیبر تزریق می شود (ناصر و همکاران، 2019).

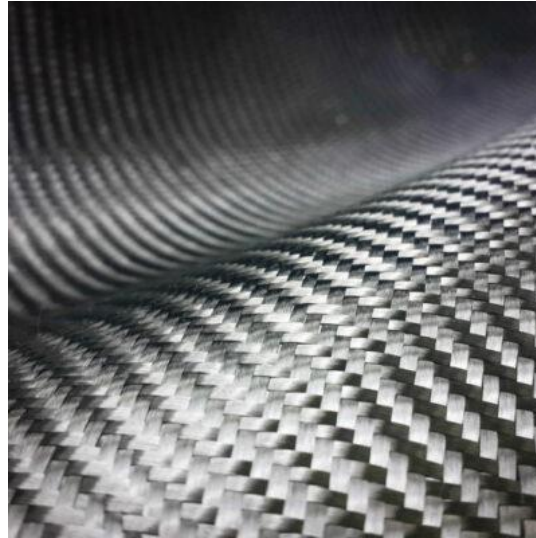
این الیاف به صورت:

- تک جهته - که در آن فیبر کربن موازی با راستای صفر درجه
- دو جهته - که در آن فیبر کربن به صورت دو راستای صفر و عمود بر آن (۹۰ درجه) قرار گرفته اند
- چاپد - که به صورت رشته های ۵ تا ۱۰ میلیمتری خرد شده

موجود می باشد. که البته الیاف دو جهته بافته شده دارای بافت های متنوعی می باشد مثل:

- بافت ساده plain
- بافت کجراه towil
- بافت سبیدی ۴ تاره
- بافت سبیدی ۶ تاره
- بافت سبیدی ۸ تاره
- بافت جناغی

که عمده ترین مصرف الیاف کربن با بافت ساده و کج راه می باشد.



شکل 4: الیاف کربن با بافت کجراه

کربن رشته‌ای معمولاً روی فلزات از جمله آهن، کبالت و نیکل تشکیل می‌شود. هیدروژن نیز برای تشکیل کربن رشته‌ای مورد نیاز است. با این حال، آنها همچنین بر روی آلیاژهای این فلزات تشکیل می‌شوند. آهن ماده بهتری برای تشکیل کربن رشته‌ای نسبت به نیکل است. به عنوان مثال، در حضور متانول، در فشار ۷ کیلو پاسکال و دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد (۹۳۲ درجه فارنهایت)، کربن رشته‌ای روی آهن رشد می‌کند، اما روی نیکل رشد نمی‌کند. تشکیل مواد روی آن فلزات معمولاً در دمای بین ۳۲۷ درجه سانتی گراد و ۱۰۲۷ درجه سانتی گراد رخ می‌دهد. همچنین زمانی تشکیل می‌شود که کروم به عنوان کاتالیزور برای تجزیه استیلن استفاده شود. کربن رشته‌ای نیز یکی از هفت آلوتروپ کربن است که در طی تشکیل کک روی لوله‌های راکتور و کاتالیزورها تشکیل می‌شود. آلوتروپ توانایی تخریب ساختارهای پشتیبانی کاتالیزور را دارد و در نتیجه راکتورها را مسدود می‌کند. همچنین در طول اصلاح جریان، همراه با انواع دیگر کربن تشکیل می‌شود (شمیم و همکاران، 2011).

کربن رشته‌ای را می‌توان با شکستن متان نیز سنتز کرد. سپس محصول توسط هیدروژن تبدیل به گاز می‌شود. در آزمایشی که این موضوع را کشف کرد، از یک ذره نیکل به عنوان ذره فلزی رشته استفاده شد. رشته در «سمت حمایت» ذره نیکل رسوب می‌کند. هنگامی که استیلن بر روی لایه‌های پالادیم و دی‌اکسید سیلیکون تجزیه می‌شود، کربن رشته‌ای نیز می‌تواند تشکیل شود. با این حال، اگر لایه‌های پالادیوم و دی‌اکسید سیلیکون از قبل با هیدروژن در دمای ۵۹۷ درجه سانتی‌گراد گرم شوند، کربن رشته‌ای تشکیل نمی‌شود. این به این دلیل است که در آن شرایط، پالادیوم و دی‌اکسید سیلیکون واکنش می‌دهند و سیلیسید پالادیوم را تشکیل می‌دهند. آهن و دی‌اکسید سیلیکون با هم به عنوان یک کاتالیزور برای تشکیل ساختارها عمل می‌کنند. گاهی در طی این واکنش سیلیکات آهن تشکیل می‌شود هنگامی که کلروبنزن روی نیکل و سیلیس هیدرودکلر می‌شود، ساختارهای بسیار منظمی از کربن رشته‌ای تشکیل می‌شود. هنگامی که پتاسیم و برم وجود دارد، این واکنش می‌تواند در دمای پایین ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد رخ دهد. این به این دلیل است

که پتاسیم و برم به بازسازی مکان‌های فعال کمک می‌کنند، بنابراین باعث جذب شیمیایی مخرب واکنش‌دهنده و همچنین تشکیل رسوب کربن می‌شوند. افزودن هیدروکسید پتاسیم به مخلوط نیکل و سیلیس در واکنش، تغییر کمی در بازده واکنش ایجاد کرد. با این حال، افزودن بروماید پتاسیم به طور قابل توجهی باعث افزایش عملکرد شد. سایر برمیدهای فلز قلیایی نیز اجازه می‌دهند تا واکنش و تشکیل کربن رشته‌ای رخ دهد. از جمله برومیدهای فلز قلیایی می‌توان به برومید سزیم اشاره کرد.

کربن رشته‌ای همچنین می‌تواند با تجزیه کاربید کروم در ۱۰۰ تا ۲۰۰ مگا پاسکال و ۳۵۰ درجه سانتی گراد تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد سنتز شود. همچنین با کاتالیزور کبالت و فسفات آلومینیوم در ۲ مگا پاسکال و ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده‌است. وجود روتنیم در این واکنش باعث کاهش بازده کربن رشته‌ای می‌شود. در جدول 1 الیاف کربن با سایر الیاف‌ها مقایسه شده است (شمیم و همکاران، 2011).

جدول 1: مقایسه الیاف کربن با سایر الیاف‌ها

نوع الیاف	نقطه ذوب (°C)	چگالی	تغییر طول (%)	مدول بانگ (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
فولاد	۱۳۷۰	۷/۸	۰/۵ - ۳۵	۲۰۰	۲۰۰ - ۲۷۶۰
شیشه	۸۶۰	۲/۵ - ۲/۷	۱/۵ - ۳/۵	۷۲	۱۰۳۴ - ۳۷۹۲
پلی اتیلن	۱۴۱/۴	۰/۹۵	۱۰	۰/۱۴ - ۰/۴۱	690
پلی پروپیلن	۱۷۰	۰/۹	۲۵	۳/۴۵	552 - 690
پلی ونیل الکل	۲۲۰ - ۲۴۰	۱/۳	۶ - ۷	۲۲ - ۴۲	۱۰۰۰ - ۱۶۰۰
بازالت	۱۵۰۰ - ۱۷۰۰	۲/۸	۳/۱۵	۴۰ - ۸۹	۸۷۲ - ۲۸۰۰
کربن	بیش از ۳۰۰۰	۱/۸	۲/۵ - ۳/۲	۱۵۹ - ۹۶۵	۱۵۵۰ - ۶۹۶۰
نایلون	۲۳۱ - ۲۵۲	۱/۱۴	۱۵ - ۳۰	۲/۵ - ۵/۱۷	۷۵۰ - ۱۰۰۰
کنف		۱/۳ - ۱/۴۵	۱/۸	۱۳ - ۲۶/۵	۴۰۰ - ۸۰۰

4. اشکال و کاربرد FRP

انواع محصولات FRP عبارتند از:

- ورقه های FRP
- پارچه FRP
- میلگردهای FRP
- شبکه کامپوزیتی FRP
- پروفیل‌های ساختمانی FRP

همچنین کاربردهای FRP عبارتند از:
افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری ستون‌ها در ساز تیرها، دال ها و اتصالات بتن آرمه، تقویت
مخازن، مقاوم سازی لوله‌ها، مقاوم‌سازی پل‌ها و انواع سازه‌های دیگر.

5. مراجع

- 1) توکلی زاده، م. و فاضلی پور، م. (1389). بهسازی خمشی اعضای بتنی با پلیمر های مسلح با الیاف "FRP". چهارمین همایش بتن شرق کشور. مشهد: مجتمع آموزش عالی صنعت آب و برق خراسان رضوی .
- 2) سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. (1385). نشریه شماره 345: راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی مصالح تقویتی FRP. ایران، تهران: معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله.
- 3) ACI Committee 440. (2008). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (440.2R-08)*. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute.
- 4) Bouguerra, K., Ahmed, E. A., El-Gamal, S., & Benmokrane, B. (2011). Testing of full-scale concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. *Construction and building materials*, 25(10), 3956-3965.
- 5) Carolin A. —Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements|. Luleå tekniska universitet;
- 6) Naser, M. Z., Hawileh, R. A., & Abdalla, J. A. (2019). Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Engineering Structures*, 198, 109542.
- 7) Shamim, A., Sheikh, A., & and Yau, G. (2002). Seismic Behavior of Concrete Columns Confined With Steel and Fiber Reinforced Polymers. *ACI Structural Journal*, 72-80.