

## میلگرد کامپوزیت (FPR) چیست؟

معرفی میلگرد کامپوزیت و موارد استفاده در صنعت  
پایگاه خبری تحلیل فولاد مرکز آهن

## میلگرد کامپوزیت (FRP) چیست ؟



### معرفی میلگرد کامپوزیت و موارد استفاده در صنعت

بیش از ۱۰۰ سال است که در صنعت ساختمان از میلگرد های فولادی جهت تسلیح اعضای سازه های بتنی استفاده شده است. میلگردهای فولادی علی رغم ویژگی های کاربردی منحصر به فرد خود، به شدت دستخوش شرایط محیطی خشن (رطوبت بالا، محیط های بسیار سرد یا گرم، شرایط قلیایی یا اسیدی، نمک های موجود در هوا و غیره) قرار می گیرند و از این رو به شدت مستعد آسیب های ناشی از خوردگی هستند. حال اینکه عدم توجه به چنین مساله ای می تواند مشکلات مصیبت باری را از نقطه نظر کاربرد این میلگرد ها به عنوان تقویت کننده های سازه های بتنی پیش روی مهندسان و طراحان حوزه عمران و ساختمان سازی قرار دهد.

برای رویارویی با مشکلات این چینی تلاش های گسترده ای در راستای طراحی و ساخت میلگردهای جدید با خواص مطلوب تر انجام گرفته است که در نهایت به پیدایش میلگرد های FRP (میله های کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف) انجام شده است. ویژگی های منحصر به فرد از قبیل امکان استفاده از الیاف با کارایی بالا به عنوان جزء تقویت کننده ساختاری متناسب با حوزه کاربری نهایی مورد نظر و همچنین کاهش وزن نهایی سازه در عین استحکام بسیار بالا، سبب گسترش حوزه های کاربردی این نوع میله های کامپوزیتی شده است.



## مشکل خوردگی میلگرد در سازه های بتنی

سازه های بتنی سنتی، به طور معمول با فولاد پیش تنیده و یا فولاد غیر تنیده مسلح می شوند. پدیده خوردگی نسبتاً کم در جزء فولادی یک سازه بتنی به واسطه وجود اثر قلیایی بتن، دوام عملکرد سازه را تحت تاثیر قرار می دهد. مقایسه رفتار مکانیکی سازه های بتنی قرار گرفته در معرض محیط های مهاجم از قبیل پل های احداث شده روی سطح دریاها و یا پارکینگ هایی که در معرض محیط حاوی نمک های یخ زدا قرار دارند، حاکی از آن است که ترکیب سه عامل رطوبت، افزایش دما و محیط کلریدی اثر قلیایی بتن را کاهش می دهد و در نتیجه سبب خوردگی فولادهای پیش تنیده و میلگردهای حاصل از آن می شود. فرایند خوردگی، در نهایت نیز تخریب کل سازه بتنی را موجب می گردد و قابلیت خدمت پذیری عضو را به شدت کاهش می دهد.

برای حل مشکل خوردگی در این دسته از سازه ها، متخصصان به سمت استفاده از میلگردهایی با پوشش اپوکسی به عنوان جایگزینی مناسب برای میلگرد های معمولی روی آوردند، حال آن که در برخی از موارد کاربردی، اثر بخشی استفاده از میلگردهای پوشش دار در ترمیم استحکام سازه های بتنی، به طوری که مشکل خوردگی فولاد را به طور کامل حل کند همچنان مورد بحث است. در راستای بهبود مقاومت و افزایش استحکام مکانیکی سازه های بتنی، استفاده از مصالح FRP (پلیمرهای تقویت شده با الیاف) جایگاه ویژه ای را به خود اختصاص داده است.

## مواد تشکیل دهنده میلگرد FRP

یک FRP در حقیقت نوعی ماده ترکیبی حاصل از الیاف با کارایی بالا است که در بستری از رزین پلیمری جایگذاری شده باشد. این مواد از نظر الکترومغناطیسی عایق هستند و مشکل خوردگی ندارند از این رو بکارگیری چنین موادی در تقویت سازه های بتنی، مشکل خوردگی آن ها را نیز تا حد زیادی برطرف خواهد کرد. علاوه بر این وجود خصوصیات برتری از قبیل مقاومت کششی بالا در سازه های FRP استفاده از آن ها را به عنوان جزء مسلح کننده سازه های بتنی مناسب می سازد.

رفتار میلگرد های FRP کاملاً متفاوت از میلگردهای فولادی است. بر این اساس فلسفه طراحی ساختمان های بتنی با استفاده از میلگردهای FRP نیز دارای تغییرات زیادی نسبت به میلگردهای فولادی خواهد بود. رفتار ناهمسانگرد میلگردهای FRP از نقطه نظر مقاومت برشی و همچنین وجود چسبندگی مابین این نوع میلگردها، خواص مکانیکی بتن را تحت تاثیر قرار می دهد. به علاوه مصالح FRP دارای رفتار الاستیک خطی می باشند و مانند فولاد به مرحله پلاستیک وارد نمی شوند.

مجموعه این عوامل، منجر می شود تا طراحی مصالح FRP متناسب با نوع کاربردی نهایی، از نقطه نظر شکل ظاهری و عملکرد فنی قابل قبول، با مشکلاتی مواجه گردد. روش های به کار گرفته شده در طراحی سازه های

مسلح با میلگرد های FRP باید به گونه ای تدوین شوند که محدودیت شکل پذیری این سازه ها را نیز به نحوی موثر برطرف سازند. در این راستا محققان و پژوهشگران کشورهای نظیر ژاپن، کانادا و آمریکا توانسته اند روش های خاصی را برای طراحی و توسعه این دسته از سازه های تقویت شده ایجاد کنند.



#### اهداف کاربردی تقویت کننده های FRP

قبل از مسلح کردن یک سازه بتنی با تقویت کننده میله ای FRP، لازم و ضروری است که خصوصیات جزء تقویت کننده به طور دقیق ملاحظه و ارزیابی گردد تا بتوان قابلیت کاربردی متناسب با مورد مصرف نهایی و سازگار با نظر طراح را فراهم ساخت. مقاومت طبیعی در مقابل خوردگی برای سازه های بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP یک فایده بزرگ برای سازه هایی است که در معرض شدید خوردگی قرار دارند، از قبیل سازه های دریایی، عرشه پل ها و همچنین سازه هایی که در معرض محیط های حاوی نمک یخ زدا هستند. در بخش هایی ام آر آی یا سایر تجهیزات حساس به میدان های الکترومغناطیس، خاصیت غیرمغناطیس بودن FRP مزایای فراوانی را به دنبال دارد.

عدم شکل پذیری میلگرد های FRP علی رغم برخورداری از خواص غیر مغناطیسی سبب می شود تا این نوع از میله های تقویت کننده بیشتر در کاربردهایی مورد استفاده قرار گیرند که در برابر مشکلاتی نظیر خوردگی یا اثرات الکترومغناطیسی به شدت آسیب پذیر هستند. یک نکته قابل توجه در استفاده از میلگردهای FRP این است که نباید به داده های مربوط به مقاومت فشاری آن تکیه کرد. اطلاعات حاضر نشان می دهند که مدول فشاری میلگردهای میلگردهای FRP کمتر از مدول کششی آن هاست.

اثر ترکیبی رفتارهای مکانیکی در رابطه با میلگردهای FRP و نیز پایین بودن مدول آن ها در مقایسه با فولاد، سبب می گردد تا بیشترین سهم تنش فشاری محاسبه شده برای FRP در حالت شکست سازه بتنی تحت فشار، مقداری نسبتاً کوچک باشد، از این رو میلگرد های FRP نباید به عنوان مسلح کننده ستون ها یا سایر اعضای

تحت فشار، استفاده شوند. همچنین این قطعات را نباید به عنوان میلگرد فشاری در تقویت عضوهایی به کار گرفت که تحت تاثیر نیروهای خمشی هستند.

توجه به این نکته الزامی است که استفاده از میلگرد FRP، به علت امکان تغییر در نحوه بارگذاری و جابجایی لنگر خمشی حین بارگذاری، می توانند عملکرد قابل قبولی را به ویژه در برابر نیروهای فشاری ارائه می دهند. اگرچه از مقاومت فشاری میلگرد FRP باید صرف نظر نمود ولی همچنان تحقیقات بیشتری در این زمینه لازم به نظر می رسد.

مزایا	معایب
بالا بودن استحکام کششی سازه در راستای طولی (مقدار استحکام این نوع سازه ها بسته به جهت و راستای اعمال نیرو، متغیر است)	استحکام عرضی کم (بسته به جهت و راستای اعمال نیرو، این مقدار استحکام متغیر است)
مقاوم در برابر خوردگی (بدون وابستگی به نوع ماده‌ی پوشش دهنده‌ی سازه)	مدول الاستیسیته‌ی پایین (بسته به نوع و خواص الیاف تقویت کننده، متغیر است)
فاقد خواص الکترومغناطیس	مستعد شکست و جدایش کامل لیف و رزین پلیمری در معرض قرارگیری تابش اشعه‌ی فرابنفش
استحکام خستگی بالا (بسته به نوع و خواص الیاف تقویت کننده، متغیر است)	دوام کم الیاف شیشه در شرایط محیطی مرطوب
وزن کم (در حدود یک پنجم تا یک چهارم چگالی فولاد)	دوام کم برخی از انواع الیاف شیشه و آرامید در محیط‌های قلیایی
هدایت گرمایی و الکتریکی پایین (در صورت استفاده از الیاف شیشه یا آرامید)	ضریب انبساط گرمایی بالای در جهت عرضی نسبت به بتن مستعد به آتش گرفتن، بسته به نوع ماتریس پلیمری و ضخامت لایه‌ی پوشش دهنده‌ی بتن

### تاریخچه رشد و توسعه تقویت کننده های FRP

پیشینه طراحی و توسعه تقویت کننده های FRP را می توان به زمان گسترش استفاده از کامپوزیت ها بعد از جنگ جهانی دوم نسبت داد. مزایایی از قبیل مقاومت بالا و وزن سبک مصالح کامپوزیتی، از جمله مهمترین مواردی هستند که در صنایع نظامی به خصوص در صنعت هوا فضا، توجه ویژه ای را به خود معطوف داشته اند.

بر همین اساس استفاده از مواد کامپوزیتی در خلال جنگ های سرد، در صنایع نظامی و هوا فضا افزایش چشمگیری یافت. به علاوه مواجه بودن با شرایط رشد سریع اقتصادی در ایالات متحده، آن زمان موجب می گردید تا پاسخ گویی به تقاضای مشتریان طالب مصالح غیر کامپوزیتی نسبتا گران تمام شود.

به همین دلیل، استفاده از سازه های کامپوزیتی در حوزه های کاربردی و صنعتی، به سرعت مورد توجه قرار گرفت. در این زمان، پالتروژن به عنوان یک روش سریع و اقتصادی برای ساخت قطعاتی با پروفایل های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. گزارش ها حاکی از آن است که روش ساخت کامپوزیت های پالترود شده، اولین بار در طراحی و تولید چوب گلف و قلاب ماهیگیری به کار گرفته شد.

نکته نگران کننده دیگر در ارتباط با ساخت قطعات کامپوزیتی آن زمان، استفاده از میلگردهای فولادی به خصوص در توسعه و ساخت سازه های دریایی بود، چراکه این سازه ها در تماس با نمک های موجود در آب دریا، به شدت در معرض پدیده خوردگی قرار می گرفتند و پس از گذشت مدت زمانی نه چندان طولانی، از عملکرد آن ها کاسته می شد. به منظور رفع این مشکل، راه حل های مختلفی از قبیل استفاده از پوشش های گالوانیزه، بکارگیری بتن های آغشته با مواد پلیمری، پوشاندن سطح قطعات با پوشش اپوکسی و همچنین کاربرد میلگرد های تقویت شده از نوع GFRP مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج بررسی ها حاکی از آن بود که در بین تنوعی از راه حل های پیشنهادی، استفاده از فولاد تقویت شده با الیاف شیشه همراه با پوشش اپوکسی می تواند بهترین شرایط عملیاتی را هم به لحاظ دوام و هم از نقطه نظر صرفه اقتصادی فراهم سازد.



جهت ارتباط با کارشناس  
فروش انواع میلگرد

۰۳۱ ۳۵۱۵۵  
داخلی ۱۰۲-۱۱۵

@Markazeahan

میلگردهای FRP موجود در بازار

امروزه عمده میلگردهای FRP موجود در بازار، حاصل از الیاف ممتد با کارایی بالا نظیر شیشه، کربن و آرامید هستند که به واسطه روش های مختلف تولید کامپوزیت درون یک بستر پلیمری جایگذاری می شوند. تقویت

کننده های FRP عموماً در اشکال مختلفی به صورت شبکه ها، میلگردها، منسوج ها و یا کابل ها مورد استفاده قرار می گیرند. میلگردهای FRP دارای سطح مقطع های مختلفی به شکل مربع یا دایره هستند که در دو نوع توپر و توخالی موجود می باشند. سطح ظاهری یک میلگرد FRP نیز می تواند در اشکال مختلفی تولید گردد.

### تاریخچه کاربرد میلگردهای FRP

همان گونه که پیش تر اشاره گردید استفاده از میله ها و میلگردهای FRP در تقویت سازه های بتنی تقریباً از دهه ۱۹۸۰ گسترش یافت. تا اواسط دهه ۱۹۹۰، شرکت های ژاپنی بیشترین مورد مصرف این نوع سازه ها را به خود اختصاص داده اند به طوری که بیش از ۱۰۰ پروژه اجرایی و بازرگانی در رابطه با استفاده از میلگردهای FRP در رزومه کاری آن ها به چشم می خورد.

استفاده از تقویت کننده FRP در سازه های اروپایی نیز از کشور آلمان و با ساخت یک پل بزرگراهی به سال ۱۹۸۶ آغاز گردید. از زمان ساخت این پل، برنامه های تحقیق و توسعه در راستای افزایش کاربرد این نوع تقویت کننده ها در طراحی و ایجاد سازه های مهندسی پیشرفته در اروپا به طور جدی ادامه پیدا کرد. مهندسان کانادایی فعال در حوزه عمران و راهسازی نیز، در برخی از پروژه های ساخت بزرگراه ها از میلگردهای FRP استفاده کرده اند.

به عنوان مثال جهت طراحی و ساخت پل هدینگلی واقع در مانیتوبا، که نمونه ای از پروژه های عمرانی اروپایی در رابطه با قطعات FRP است، از دو نوع میلگرد CFRP و GFRP استفاده شد. در کشورهای آسیایی نظیر بانکوک و دهلی نو نیز، علاوه بر تقویت عرشه پل ها و دیواره های ساختمانی، از میلگردهای تقویت کننده نوع FRP به طور خاص در استحکام بخشی دیواره های تونل ها استفاده می شود.

### نحوه کاربرد میلگردهای FRP در تقویت نمونه ای از عرشه یک پل

پیش از این در رابطه با موارد کاربردی میلگردهای FRP مطالبی ارائه گردید. با توجه به حوزه های کاربردی خاص این نوع میلگردها، شناخت خواص و رفتار مکانیکی این نوع سازه ها در شرایط محیطی متغیر و طی بارگذاری های مختلف بسیار حائز اهمیت است. لذا در این بخش خواص مکانیکی و فیزیکی میلگردهای FRP به تفصیل مورد بحث قرار داده خواهد شد تا بتوان رفتار آن ها را به هنگام قرارگیری در ساختارهای بتنی به طور اساسی درک کرد. علاوه بر این، تاثیر عوامل مختلفی از قبیل شرایط و چگونگی بارگذاری، مدت زمان بارهای اعمال شده بر روی سازه، دما و رطوبت محیط نیز بر خواص میلگردهای FRP تشریح می گردد.

میلگردهای FRP ذاتاً ناهمسانگرد هستند و امکان ساخت آن ها با استفاده از فناوری های متفاوتی از قبیل پالترژن، بریدینگ و نیز فرایند بافندگی تار پودی فراهم می باشد. عواملی از قبیل کسر حجمی الیاف، نوع الیاف، نوع رزین، جهت گیری الیاف، اثرات ابعادی و نیز کنترل کیفیت در حین تولید، همه و همه نقش اساسی

در تعیین خصوصیات میلگردهای FRP را بر عهده دارند. البته باید توجه داشت که تمامی خواص مطرح شده در این بخش، جنبه عمومی دارد و ممکن است نتوان موارد مطرح شده را به همه محصولات FRP تعمیم داد.



### خواص تقویت کننده های FRP

به منظور اندازه گیری خواص و ویژگی های مربوط به یک سازه تقویت کننده از نوع FRP، استانداردهای متفاوتی ایجاد شده است اما باید توجه داشت که اجماع روش های مطرح شده برای اندازه گیری خواص این دسته از قطعات بیشتر مبنی بر تقویت کننده های FRP با هدف کاربرد در استحکام بخشی سازه های بتنی است.

### خواص فیزیکی میلگرد کامپوزیت

#### • چگالی

چگالی میلگردهای FRP به طور کلی در محدوده از ۱٫۲۵ تا ۲٫۱ گرم بر سانتی متر مربع، متغیر است. مقایسه مقادیر مربوط به چگالی میلگردهای FRP با میله های فولادی، حاکی از کاهش وزنی فوق العاده بالای این قطعات در محدوده ۷۵ تا ۸۳ درصد نسبت به فولاد می باشد. پایین بودن وزن این نوع سازه های تقویت کننده منجر به کاهش هزینه های انتقال و جابجایی قطعات و همچنین افزایش راحتی کار با آن ها در حین انجام پروژه های ساخت و ساز خواهد شد. در جدول نتایج مربوط به مقایسه مقادیر چگالی مابین میلگردهای FRP تقویت شده با الیاف مختلف و میلگردهای فولادی داده شده است.

میلگرد فولادی	میلگرد GFRP	میلگرد CFRP	میلگرد AFRP
۷/۹۰	۲/۱۰ - ۱/۲۵	۱/۶۰ - ۱/۵۰	۱/۴۰ - ۱/۲۵



- ضریب انبساط حرارتی

روند تغییرات ضریب انبساط حرارتی میلگردهای FRP در هر دو راستای طولی و عرضی، وابستگی شدیدی به نوع الیاف تقویت کننده، رزین مصرفی و مقدار کسر حجمی الیاف دارد. ضریب انبساط حرارتی در راستای طولی، به وسیله خصوصیات الیاف مشخص می شود، در مقابل نیز ضریب انبساط حرارتی عرضی به واسطه خصوصیات رزین تعیین می گردد. جدول زیر ضرایب انبساط طولی و عرضی را برای انواع میلگردهای FRP و فولادی فهرست می کند. مقادیر منفی ضریب انبساط حرارتی نشان می دهد که با افزایش دما ماده دچار انقباض می شود و در اثر کاهش دما، ماده منبسط می گردد. برای تعیین ضریب انبساط حرارتی مواد مختلف، می توان از ضریب انبساط بتن به عنوان یک مرجع استفاده کرد.

استفاده از میلگردهای FRP در ساخت سازه هایی با قابلیت مقاومت در برابر احتراق توصیه نمی شود. هرچند که میلگردهای FRP در داخل بتن جایگذاری می شوند و به دلیل عدم حضور اکسیژن امکان آتش گرفتن آن ها به شدت پایین است اما اعمال گرمای بیش از حد به سازه، سبب نرم شدن رزین پلیمری خواهد شد. درجه حرارتی که تحت آن جزء پلیمری میله تقویت کننده FRP نرم می شود را به عنوان دمای شیشه ای شدن می نامند. در دمای بالاتر به دلیل بروز تغییراتی در ساختار ملکولی ماده، مدول الاستیسیته پلیمر به شدت کاهش می یابد و همین امر در نهایت به تخریب سازه منتهی می گردد.

- خواص مکانیکی

خواص مکانیکی کامپوزیت ها، عمدتاً از نقطه نظر رفتار عملکردی آن ها در حین اعمال بارگذاری های مکانیکی بررسی می شود. تعیین رفتار کششی، فشاری، خمشی و برشی، از جمله مهمترین اطلاعاتی است که طراحان و مهندسان حوزه ساخت مواد کامپوزیتی به طور کلی در پی یافتن آن هستند. عوامل دیگری نظیر سطح مشترک بین لیف و رزین پلیمری که تعیین کننده میزان قابلیت انتقال بار از ماتریس به تقویت کننده است، نیز می تواند عملکرد مکانیکی سازه کامپوزیتی نهایی را تحت تاثیر قرار دهد. با توجه به اهمیت استفاده از تقویت کننده های FRP به عنوان گروهی از کامپوزیت های پیشرفته، در ساخت سازه های مهندسی حوزه های فنی به ویژه عمران و راه سازی، در اختیار داشتن اطلاعاتی در زمینه رفتار مکانیکی این دسته از سازه ها حائز اهمیت است.

- رفتار کششی

زمانی که یک میلگرد کامپوزیتی تقویت شده از نوع FRP تحت بارگذاری کششی قرار می گیرد، تا قبل از رسیدن به نقطه تسلیم، هیچ رفتار پلاستیک در نمونه مشاهده نمی شود. رفتار کششی میلگردهای FRP متأثر از نوع

الیاف و متناسب با رفتار تنش - کرنش آن ها تا لحظه پارگی است. در جدول مقایسه ای مابین خواص کششی میلگردهای تقویت شده FRP و میلگردهای فلزی انجام شده است. با توجه به این که کسر حجمی الیاف، اثر قابل ملاحظه ای بر رفتار کششی کامپوزیت ها خواهد داشت لذا نتایج ارائه شده در جدول مربوط به نمونه هایی با کسر حجمی مشابه و در حدود ۰.۵ است.

سختی و استحکام کششی میلگردهای FRP به چندین عامل بستگی دارد. به دلیل این که در میلگردهای FRP، تحمل نیرو اساساً توسط الیاف تقویت کننده صورت می گیرد، لذا نوع و کسر حجمی الیاف مصرفی و از همه مهمتر راستای جهت گیری الیاف، به شدت خصوصیات کششی حاکم بر میلگردهای FRP را تحت تاثیر قرار می دهد. تغییرات استحکام و سختی این دسته از ساختارهای کامپوزیتی، در میله هایی با کسر حجمی متفاوتی از الیاف تقویت کننده رخ می دهد. این در حالی است که سایر ویژگی های میلگردها از قبیل قطر، شکل ظاهر و نوع اجزای تشکیل دهنده یکسان است. نرخ عملیات پخت کامپوزیت، نوع فرایند تولید و کنترل کیفیت در نظر گرفته شده حین ساخت قطعات از جمله دیگر عواملی هستند که بر خصوصیات مکانیکی میلگردها تاثیر گذارند.

برخلاف میلگردهای فولادی، استحکام کشش میلگردهای تقویت شده FRP می تواند متناسب با قطر سازه تغییر کند. به عنوان مثال مقایسه خواص کششی سه نوع متفاوت از میلگردهای FRP تقویت شده با الیاف شیشه حاکی از روند کاهشی ۴۰ درصدی در مقاومت کششی میلگردها با افزایش نسبی قطر آن ها از ۹.۵ تا ۲۲.۲ میلی متر است. در رابطه با میلگردهای تقویت شده با الیاف کربن، ادعا شده است که ایجاد تغییر در سطح مقطع میلگرد، تاثیر قابل ملاحظه ای بر مقاومت کششی آن نخواهد داشت. حساسیت میلگردهای تقویت شده از نوع AFRP نسبت به تغییرات سطح مقطع، از یک محصول به محصول دیگر متغیر است.

تعیین مقاومت میلگردهای FRP توسط روش و فرایندهای آزمایشگاهی تا حدودی مشکل است، به این دلیل که تمرکز تنش در نقاط لنگرگاه مربوط به نمونه میلگرد آزمایشی و همچنین توزیع تنش در اطراف این نقاط، سبب شکست نهایی سازه می شود. در حال حاضر هیچ تولید کننده ای از استانداردهای کافی و مناسب جهت تعیین مقاومت کششی و سختی میلگردهای FRP به صورت آزمایشگاهی برخوردار نیست. در حین آزمایشات کشش محوری اعمال شده بر روی نمونه میلگردهای تقویت شده، گیره آزمایش باید بتواند امکان شکست میله را از نقطه ای در وسط نمونه فراهم سازد.

خصوصیات کششی میلگردهای FRP را به طور خاص باید از تولیدکنندگان آن ها جویا شد. برای اندازه گیری و تعیین خواص کششی این نوع میله ها باید فرض کرد که تمامی داده ها دارای یک توزیع نرمال هستند. بهره گیری از مقادیر گزارش شده حدود اطمینان مربوط به استحکام کششی، کرنش پارگی و مدول کششی مخصوص برای نمونه میلگردهای تقویت شده FRP، قابلیت عملکردی سازه نهایی را تعیین می کند.

بعد از اتمام فرایند تولید، یک میله FRP را نمی توان به سادگی خم کرد، چرا که این نوع میلگردهای عمدتاً با رزین های گرما سخت تولید می شوند. البته این استثنا نیز وجود دارد که در صورت استفاده از رزین های گرمانرم و با اعمال دما و فشار بیشتر، بتوان شکل جدید را به میله تولید شده القا کرد. در صورتی که یک میله FRP با شکل ظاهری خمیده مورد نیاز باشد، به راحتی می توان منسوج تقویت کننده این سازه را در حالت خم تولید کرد. در میلگردهای FRP خمیده، یک روند کاهشی ۴۰ تا ۵۰ درصدی در استحکام کششی نسبت به میله های صاف مشاهده خواهد شد که دلیل اصلی آن، وجود تمرکز تنش در نواحی متشکل از الیاف با پیکربندی خمیده است.



#### • رفتار فشاری

به طور کلی، تکیه بر مقادیر مربوط به مقاومت فشاری نمونه میلگردهای FRP توصیه نمی شود چراکه رفتار فشاری این دسته از سازه های کامپوزیتی در برابر مقاومت کششی، به واسطه مقاومت کم الیاف شیشه در برابر نیروهای جانبی، قابل نظر کردن است. به طور کلی می توان به این واقعیت اشاره کرد که صرف نظر از نوع شکست ایجاد شده در یک سازه کامپوزیتی قرار گرفته در معرض نیروی فشاری، حالت شکست به عواملی همچون نوع الیاف تشکیل دهنده، کسر حجمی لیف و نوع رزین بستگی دارد. گزارش شده است که مقدار مقاومت فشاری میلگردهای GFRP، CFRP و AFRP به ترتیب برابر با ۵۵، ۷۸ و ۲۰ درصد از مقدار استحکام کششی آن هاست.

در حالت کلی میلگردهایی با استحکام کششی بالا، از مقاومت بیشتری نیز در برابر نیروهای فشاری برخوردار هستند. لازم به ذکر است که این اصل در رابطه با میلگردهای AFRP استثنا است به طوری که حتی در برابر

اعمال تنش های فشاری نسبتا پایین الیاف آرامید موجود در ساختار کامپوزیت رفتاری غیر خطی از خود نشان می دهند.

- رفتار برشی

طی پدیده برش درون لایه ای کامپوزیت ها، به ویژه در جایی که رزین تقویت نشده مابین لایه هایی از الیاف تقویت کننده قرار گرفته است، اغلب میلگردهای FRP عملکردی نسبتا ضعیف از خود ارائه می دهند. به دلیل اینکه معمولا هیچ گونه لایه عرضی تقویت کننده در ساختار میلگردهای FRP وجود ندارد، مقاومت برشی درون لایه ای به وسیله زمینه نسبتا ضعیف پلیمری کنترل می شود.

- دوام

به طور کلی، مقاومت و سختی میلگردهای FRP به شرایط محیطی قبل و بعد از فرایند ساخت به شدت حساس هستند. این شرایط محیطی می توان شامل رطوبت، اشعه ماورای بنفش، دمای بالا، محلول های قلیایی، اسیدی یا نمک دار باشد. مقاومت و سختی این نوع میلگردها بسته به جنس مصالح به کار گرفته شده و شرایط موجود، می تواند افزایش یا کاهش یافته و یا ثابت باقی بماند.

در این زمینه، خصوصیات چسبندگی و مقاومت کششی میلگردهای FRP، از جمله پارامترهای مهمی برای سازه های بتن آرمه به شمار می روند. شرایط محیطی به طور وسیع محققان را علاقه مند به تحقیق درباره رفتار میلگردهای FRP در محیط های مرطوب با اثرات قلیایی شدید نموده است. در اکثر تحقیقات موجود، میلگردهای FRP به تنهایی و بدون قرارگیری در بتن تحت محیط خورنده و بدون اعمال بارگذاری قرار گرفته اند. عملکرد میلگردهای FRP جایگذاری شده در بتن، می تواند تحت تاثیر عوامل متغیر زیادی قرار گیرد.

به طور کلی تغییرات PH محیط به عنوان مقیاسی برای کاهش مقاومت و سختی کششی میلگردهای GFRP شناخته می شوند. در این رابطه نتایج متغیری را می توان از آزمایشات متعدد به دست آورد. هرچند در تمامی موارد، افزایش دما و افزایش زمان قرارگیری در محیط مساله کاهش مقاومت و استحکام میلگردهای FRP را تشدید می کند. رزین مورد استفاده می توان الیاف شیشه را از نفوذ یون های مضر و محیط قلیایی باز دارد.