دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

عمران- سازه

عنوان:

مقایسه رفتار

تیر بتنی مسلح شده با میلگرد FRP

با تیر بتنی مسلح شده با میلگرد فولادی

نگارش:

کاوه کشمیری

۸۹۰۰۵۱۴

استاد راهنما:

دکتر مصطفی رضوانی شریف

بهمن ۱۳۹۱

فهرست مطالب

۱- مروری بر ادبیات فنی ۱

۱- ۱- مقدمه ۱

۱- ۲- بحث های زیست محیطی ۲

۱- ۳- وسعت کاربرد میلگردFRP ۲

۱- ۴- ساختار کامپوزیت هایFRP ۳

۱- ۴- ۱- اجزاء FRP ۳

۱- ۵- انواع محصولات FRP ۵

۱- ۶- مشخصات محصولاتFRP ۶

۱- ۷- ویژگی های مادهFRP ۱۰

۱- ۸- خواص فیزیکی ۱۰

۱- ۸- ۱- چگالی ۱۰

۱- ۸- ۲- ضریب انبساط حرارتی ۱۱

۱- ۹- خواص و رفتار مکانیکی میلگردFRP ۱۱

۱- ۱۰- پیشینه‌کاربرد ۱۴

۱- ۱۱- ضرورت تحقیق ۱۶

۱- ۱۲- هدف تحقیق ۱۶

۱- ۱۳- فصل بندی ۱۶

۲- طراحی تیرمسلح شده با میلگرد FRP ۱۷

۲- ۱- معرفی ۱۷

۲- ۲- مشخصات میلگرد های FRP ۱۷

۲- ۳- مبانی طراحی بتن مسلح شده با میلگرد FRP ۱۷

۲- ۳- ۱- ضرایب مقاومت ۱۷
۲- ۳- ۱- ۱- ضریب کاهش مقاومت برای تعیین ظرفیت خمشی ۱۹
۲- ۳- ۱- ۲- ضریب کاهش مقاومت برای تعیین ظرفیت برشی ۱۹
۲- ۳- ۱- ۳- تعیین ضرایب مقاومت خمشی ۲۰
۲- ۳- ۲- تعیین مشخصات تضمین شده میلگردFRP ۲۰
۲- ۳- ۳- مشخصات طراحی میلگرد ۲۱
۲- ۴- مقاومت کششی میلگرد در قسمت خم شده ۲۲
۲- ۵- طراحی خمشی تیر با میلگرد FRP ۲۳
۲- ۵- ۱- فلسفه طراحی ۲۳
۲- ۵- ۲- فرضیات مورد استفاده در طراحی ۲۴
۲- ۵- ۳- مقاومت خمشی ۲۴
۲- ۵- ۳- ۱- مود خرابی ۲۴
۲- ۵- ۳- ۲- ظرفیت خمشی اسمی در حالت مقطع زیاد تقویت شده ۲۵
۲- ۵- ۳- ۳- ظرفیت خمشی اسمی در حالت مقطع کم تقویت شده ۲۶
۲- ۵- ۳- ۴- حد اقل میلگرد خمشی ۲۷
۲- ۶- طراحی برای حالت بهره برداری ۲۸
۲- ۶- ۱- ترک خوردگی ۲۸
۲- ۶- ۲- تغییر شکل ها ۳۰
۲- ۶- ۲- ۱- حداقل ضخامت توصیه شده برای طراحی تیر با میلگردFRP ۳۱
۲- ۶- ۲- ۲- ممان اینرسی موثر ۳۲
۲- ۶- ۲- ۳- محاسبه تغییر شکل (روش مستقیم) ۳۳
۲- ۷- گسیختگی خزشی و خستگی ۳۵
۲- ۷- ۱- محدودیت تنش گسیختگی خزشی ۳۶
۲- ۷- ۲- محدودیت های تنش خستگی ۳۶

۳- صحت سنجی مدل سازی انجام شده در این تحقیق ۳۸
۳- ۱- معرفی ۳۸
۳- ۲- مشخصات مصالح ۳۹
۳- ۳- فرآیند آزمایش ۳۹
۳- ۴- نتیجه آزمایش ۴۰
۳- ۵- مدل سازی غیر خطی ۴۰
۳- ۵- ۱- سختی خمشی مقطع ترک خورده ۴۱
۳- ۵- ۱- ۱- سختی موثر اولیه ۴۱
۳- ۵- ۲- تحلیل ممان – انحناء مقطع ۴۱
۳- ۵- ۳- روش مورد استفاده درSAP2000 برای ترسیم منحنی ممان- انحناء ۴۳
۳- ۵- ۳- ۱- تعداد نقاط موجود روی منحنی ممان انحناء ۴۴
۳- ۵- ۳- ۲- انحناهای در نظر گرفته شده توسط برنامه برای ترسیم منحنی ۴۴
۳- ۵- ۴- مشخصات بتن برای تحلیل ممان- انحناء ۴۵
۳- ۵- ۴- ۱- منحنی تنش- کرنش برای بتن محصور شده ۴۵
۳- ۵- ۴- ۲- منحنی تنش- کرنش برای بتن محصور شده ۴۷
۳ - ۵- ۴- ۲- ۱- مقاومت فشاری بتن محصور شده ۴۸
۳ - ۵- ۴- ۲- ۲- تعیین کرنش نهایی بتن محصور شده ۵۰
۳- ۵- ۵- ایده آل سازی۲ خطی منحنی ممان- انحناء ۵۲
۳- ۵- ۶- مدل سازی با SAP2000 ..... ۵۴
۴- مقایسه رفتار تیر بتنی مسلح شده با میلگردFRP با تیر بتنی مسلح شده با میلگرد فولادی ۵۷
۴- ۱- مشخصات مصالح ۵۷
۴- ۲- برنامه نویسی انجام شده برای طراحی تیرها ۵۸
۴- ۳- تیرهای مورد بررسی در این تحقیق ۵۸
۴- ۳- ۱- تیر دو سر ساده با میلگرد FRP و بارگذاری متمرکز در وسط دهانه ۵۸

۴- ۳- ۱- ۱- تیر با میلگرد FRP با طول دهانه۲ متر ۵۸
۴- ۳- ۱- ۲- تیر با میلگرد FRP با طول دهانه۳ متر ۶۰
۴- ۳- ۱- ۳- تیر با میلگرد FRP با طول دهانه۴ متر..... ۶۲
۴- ۳- ۱- ۴- تیر با میلگرد F با طول دهانه ۵ متر ۶۳
۴- ۳- ۱- ۵- تیر با میلگرد FRP با طول دهانه۶ متر ۶۵
۴- ۳- ۲- تیرهای دو سر ساده با میلگرد S340 و بارگذاری متمرکز در وسط دهانه..... ۶۵
۴- ۳- ۲- ۱- تیر با میلگرد S340 با طول دهانه۲ متر ۶۶
۴- ۳- ۲- ۲- تیر با میلگرد S340 با طول دهانه۳ متر ۶۷
۴- ۳- ۲- ۳- تیر با میلگرد S340 با طول دهانه۴ متر ۶۹
۴- ۳- ۲- ۴- تیر با میلگرد S340 با طول دهانه ۵ متر ۷۰
۴- ۳- ۲- ۵- تیر با میلگرد S340 با طول دهانه۶ متر ۷۱
۴- ۳- ۳- مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان تیرها..... ۷۱
۴-۳-۳- ۱- نمودار بار-تغییر مکان تیرهای با دهانه ۲ متر..... ۷۲
۴-۳-۳- ۲- نمودار بار-تغییر مکان تیرهای با دهانه ۳ متر..... ۷۲
۴-۳-۳- ۳- نمودار بار-تغییر مکان تیرهای با دهانه ۴ متر..... ۷۳
۴-۳-۳- ۴- نمودار بار-تغییر مکان تیرهای با دهانه ۵ متر..... ۷۳
۴-۳-۳- ۵- نمودار بار-تغییر مکان تیرهای با دهانه ۶ متر..... ۷۴
نتیجه گیری ۷۵
پیشنهادات برای مطالعات آینده..... ۷۶
مراجع..... ۷۷
پیوست الف: نتایج برنامه‌های طراحی ۷۸

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ : آرماتورهای GFRP در ساخت عرشه پل Crowchild در کالگری، آلبرت.....۱۴

شکل ۱-۲ : آرماتورهای GFRP مورد استفاده در کارخانه ای در بریتیش کلمبیا ۱۴

شکل ۱-۳: عرشه مسلح ساخته شده در لیما، اوهایو ۱۵

شکل ۱-۴:میله های GFRP مورد استفاده در پلی در اوهایو ۱۵

شکل ۱- ۵: نمای عرضی میله های GFRP درعرشه پل Sierrita de la Cruz Creek ۱۵

شکل ۲-۱: میلگرد GFRP قبل و بعد از آزمایش کشش.....۱۸

شکل۲-۲: نمودار تنش-کرنش انواع میلگرد FRP.....۱۸

شکل ۲-۳: میلگردهای دارای خم ۲۳

شکل ۲-۴ : خرابی تیر با مقطع زیاد تقویت شده.....۲۵

شکل ۲-۶ : توزیع تنش و کرنش برای مقطع کم تقویت شده.....۲۵

شکل ۲-۷: محاسبه β در مقطع ۲۶

شکل ۲-۸: توزیع تنش وکرنش الاستیک.....۳۰

شکل ۳-۱: جزئیات تیر مورد آزمایش ومقطع آن.....۳۶

شکل ۳-۲: چیدمان آزمایش.....۳۸

شکل ۳-۳: نمودار بار- تغییر مکان حاصل از کار آزمایشگاهی.....۳۹

شکل ۳-۴ : مدل رفتاری مورد استفاده در FEMA356.....۴۰

شکل ۳-۵:توزیع تنش و کرنش در مقطع تحت خمش.....۴۰

شکل۳-۶ :تصاعد حسابی مورد استفاده توسط برنامه ۴۲

شکل ۳-۷: منحنی تنش – کرنش بتن در فشار بر اساس مدل مندر.....۴۵

شکل۳-۸: منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده.....۴۶
شکل ۳-۹: منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده.....۴۷
شکل ۳-۱۰:تعیین مقاومت فشاری بتن محصور شده با استفاده از تنش های محصور.....۴۹
شکل ۳-۱۱: منحنی تنش -کرنش بتن محصور شده و مح.....۵۱
شکل ۳-۱۲: منحنی ممان - انحناء.....۵۳
شکل ۳-۱۳: قسمت اولیه منحنی ممان - انحناء.....۵۳
شکل ۳-۱۴: نمودارحاصل از تحلیل ممان- انحناء مقطع.....۵۴
شکل ۳-۱۵: مشخصات مفصل پلاستیک.....۵۴
شکل ۳-۱۶: نمودار بار- تغییر مکان در نقطه وسط تیر.....۵۵
شکل ۳-۱۷: مقایسه نتایج حاصل از تحلیل با نتایج آزمایشگاهی.....۵۶
شکل۴-۱:نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۲ متری با میلگرد FRP.....۵۸
شکل ۴-۲: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۲ متر با میلگرد FRP.....۵۹
شکل۴-۳:نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۳ متری با میلگرد FRP.....۶۰
شکل ۴-۴: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۳ متر با میلگرد FRP.....۶۱
شکل۴-۵:نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۴ متری با میلگرد FRP.....۶۱
شکل ۴-۶: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۴ متر با میلگرد FRP.....۶۲
شکل۴-۷:نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۵ متری با میلگرد FRP.....۶۳
شکل ۴-۸: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۵ متر با میلگرد FRP.....۶۳
شکل۴-۹:نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۶ متری با میلگرد FRP.....۶۴
شکل ۴-۱۰: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۶ متر با میلگرد FRP.....۶۵

شکل۴-۱۱: نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۲ متری با میلگرد S340.....۶۵

شکل ۴-۱۲: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۲ متر با میلگرد S340.....۶۶

شکل۴-۱۳ : نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۳ متری با میلگرد S340.....۶۷

شکل ۴-۱۴: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۳ متر با میلگرد S340.....۶۷

شکل۴-۱۵: نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۴ متری با میل.....۶۸

شکل ۴-۱۶: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۴ متر با میلگر.....۶۸

شکل۴-۱۷:نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۵ متری با میلگرد S340.....۶۹

شکل ۴-۱۸: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۵ متر با میلگر.....۷۰

شکل۴-۱۹: نمودار ایده‌آل‌سازی شده ممان-انحناء مقطع تیر ۶ متری با میلگرد S340.....۷۰

شکل ۴-۲۰: نمودار ممان- دوران مقطع تیر با طول دهانه ۶ متر با میلگرد S340.....۷۱

شکل۴-۲۱: نمودار بار-تغییرمکان تیرهای ۲ متری.....۷۲

شکل۴-۲۲: نمودار بار-تغییرمکان تیرهای ۳ متری.....۷۲

شکل۴-۲۳: نمودار بار-تغییرمکان تیرهای ۴ متری.....۷۳

شکل۴-۲۴: نمودار بار-تغییرمکان تیرهای ۵ متری.....۷۳

شکل۴-۲۵: نمودار بار-تغییرمکان تیرهای ۶ متری.....۷۳

فصل اول

مروری بر ادبیات فنی

۱-۱- مقدمه :

ویژگی های خاص مواد FRP[1] موجب افزایش کاربرد این مصالح شده است. در ابتدا به عنوان مواد مورد استفاده در تقویت خمشی پل های بتن آرمه و همچنین به شکل دورپیچ برای محصور[2] کردن ستون های بتن آرمه مورد استفاده قرار می گرفتند، به دنبال تلاش های تحقیقاتی اولیه، از اواسط دهه ۱۹۸۰ توسعه بسیار زیادی در زمینه استفاده از این مواد در مقاوم سازی سازه های مختلف به وجود آمد، به طوری که دامنه کار بردهای آن به سازه هایی با مصالح بنایی، چوبی و حتی فلزی نیز گسترش یافته است. موارد کاربرد این مواد در مقاوم سازی، تعمیر و یا بهسازی سازه ها از چند مورد محدود در دهه گذشته، به هزاران مورد درحال حاضر رسیده است. اجزاء سازه ای مختلفی شامل تیر، دال، ستون ، دیوارهای برشی، اتصالات، دودکش، طاق، گنبد و خرپا تا کنون توسط این مواد مقاوم شده اند.مقاومت در برابر خوردگی یکی از ویژگی‌های مهم آن است که باعث کاربرد آن در سازه‌هایی شده‌است که در معرض خوردگی قرار دارند.در سازه‌های حساس به تداخل میدان مغناطیسی همچون اتاق MRI بیمارستان نیز خاصیت غیر مغناطیسی این میلگردها باعث کاربرد منحصر به فرد آن‌ها شده‌است.در سال ۱۹۸۳، اولین پروژه توسط وزارت حمل و

[1] -Fiber reinforced polymer
[2] -confinement

نقل آمریکا در" انتقال فناوری کامپوزیت به طراحی وساخت پل ها " تامین مالی شد.شرکت مارشال-وگا از بانیان توسعه اولیه مسلح سازی با GFRP [1] در ایالات متحده بود.در ابتدا این میله‌ها یک جایگزین مناسب برای فولاد به عنوان مسلح کننده در بتن به دلیل ویژگی ناسازگاری انبساط حرارتی بین بتن و فولاد در نظر گرفته شد.بازار دهه ۱۹۸۰ خواستار آرماتور غیر فلزی برای فناوری‌های پیشرفته خاص بود. بیشترین تقاضا برای آرماتور غیر هادی در مراکز دارای تجهیزات پزشکی MRI [2] بود. بدین ترتیب آرماتور FRP، آرماتور استاندارد در ساخت این نوع سازه ها شد. سایر کاربردهای این میلگردها همچنان که مزایای استفاده از این آرماتورها بهتر شناخته می شد و به طور خاص در سازه های دریایی، باند فرودگاه و آزمایشگاه الکترونیک توسعه یافت. علاوه بر این با مشاهده خوردگی درآرماتورها با پوشش اپوکسی، انگیزه برای یافتن روش های جایگزین برای جلوگیری از خوردگی را افزایش داد.

۱-۲ - بحث های زیست محیطی

یکی ازموضوعات مهم در خصوص تاثیر سازه های کامپوزیتی بر محیط زیست، امکان بازیافت این سازه ها می باشد.موانعی در برابر بازیافت کامپوزیت ها وجود دارند که از آن جمله می توان به عدم وجود بازار مناسب برای کامپوزیت های بازیافتی ، هزینه بازیافت نسبتا بالا و همچنین عدم وجود زیر ساخت های لازم در بخش بازیافت اشاره کرد.

۱-۳- وسعت کاربرد میلگرد FRP

استفاده از این میلگردها برای مسلح سازی بتن در حال گسترش است.از ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ مطالعاتی بر روی امکان استفاده از این میلگردها در ساخت اعضای سازه‌های بتنی انجام شد که منجر به استفاده از این میلگردها با قطر کم (حدود ۶ میلی متر) از جنس میلگردهای شیشه‌ای شد.در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلگردهای شیشه‌ای به منظور کاربرد در مهندسی سازه به تولید انبوه رسید.در اواخر دهه ۱۹۸۰ استفاده از این میلگردها در ساخت عرشه پل های بزرگراه ها گسترش بیشتری یافت.ACI اولین راهنما برای طراحی سازه

[1] -Glass Fiber Reinforced Polymer
[2] -Magnetic Resonance Iimaging

های بتن مسلح با استفاده از میلگرد FRP را در سال ۲۰۰۱ تحت عنوان ACI440.1R منتشر کرد.این راهنما در سال ۲۰۰۳ مورد ویرایش قرار گرفت و در حال حاضر جدیدترین ویرایش این راهنما ACI440.1R-06 است که در سال ۲۰۰۶ منتشر شده است.همزمان با استفاده از این میلگردها در ایالات متحده آمریکا تلاش هایی در ژاپن نیز در حال انجام بود که نتیجه آن تولید شبکه هایی موسوم به NEFMAC[۱] بود.

۱-۴- ساختار کامپوزیت های FRP

مواد FRP از قرار گرفتن الیاف[۲] های متوالی و متعدد در یک ماتریس رزین[۳] ساخته می شوند.

۱-۴-۱- اجزاء FRP

این مواد از دو جزء اساسی یعنی الیاف و ماتریس رزین (ماده چسبانده) تشکیل می‌شوند. الیاف ها که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند،جزء اصلی بار بر در این ماده محسوب می شوند. بسته به نوع الیاف، قطر این الیاف ها در محدوده ۵ تا ۲۵ میکرون متغیر است.

الیاف ممکن است از جنس شیشه، کربن، آرامید و یا ویلیون باشد که در این صورت محصولات کامپوزیت مربوطه به ترتیب به نام های GFRP[۴]،CFRP[۵]،AFRP[۶]،VFRP[۷] شناخته می شود.

نقش اصلی ماتریس عبارت است از:

- انتقال برش ازالیاف به ماده مجاور
- محافظت از الیاف در شرایط محیطی
- جلوگیری از خسارات مکانیکی وارد بر الیاف

[1] - New Fiber Composite Material For Reinforced Concrete
[2] -Fiber
[3] -Resin Matrix
[4] -Glass Fiber reinforced polymer
[5] -Carbon Fiber reinforced polymer
[6] -Aramid Fiber reinforced polymer
[7] -Vinyl Fiber reinforced polymer

- کنترل کمانش موضعی الیاف تحت فشار

به طور کلی FRP ها بر اساس الیاف تشکیل دهنده آنها به ۳ دسته زیر تقسیم می شوند:

- CFRP با الیاف از جنس کربن
- GFRP با الیاف از جنس شیشه
- AFRP با الیاف از جنس آرامید

مزایای استفاده ازFRP:

۱- وزن کم (چگالی آن در حدود ۲۰٪ فولاد است)

۲- مقاومت در برابر خوردگی

۳- نفوذ ناپذیری مغناطیسی

۴- امکان تقویت به صورت خارجی

۵- حمل و نقل آسان و سرعت اجرای بالا به دلیل وزن کم

الیاف های شیشه درچهار دسته طبقه بندی می شوند :

- E-GLASS : متداول ترین الیاف شیشه در بازار با محتوای قلیایی کم، که در صنعت ساختمان به کار می رود.
- Z-GLASS : با مقاومت بالا در مقابل حمله قلیایی ها، که در تولید بتن الیافی به کار گرفته می شود.
- A-GLASS : با مقادیر زیاد قلیایی که امروزه تقریباً از رده خارج شده است.
- S-GLASS : در تکنولوژی هوا فضا و تحقیقات فضایی به کار گرفته می شود.دارای مقاومت و ضریب ارتجاعی بسیار بالایی است.

الیاف کربن در دو دسته طبقه بندی می شوند:

- الیاف کربنی از نو PAN[1]

در سه نوع مختلف هستند. تیپ ۱ که تردترین نوع است و دارای بالاترین ضریب ارتجاعی است.

تیپ ۲ که مقاوم ترین نوع الیاف کربن است و نهایتاً تیپ ۳ که نرمترین نوع الیاف کربنی با مقاومتی بین تیپ ۱ است..

- الیاف با اساس قیری[2]

اساساً از تقطیر زغال سنگ حاصل می شود. این الیاف از نوع PAN ارزان تر بوده و مقاومت و ضریب ارتجاعی کمتری نسبت به آنها دارد.الیاف کربن مقاومت بسیار خوبی در مقابل محیط های قلیایی و اسیدی داشته و در شرایط سخت محیطی از نظر شیمیایی کاملاً پایدار هستند.

الیاف آرامید

آرامید، یک کلمه اختصاری ازآروماتیک پلی آمید است. آرامید اساساً الیاف ساخته دست بشر است که برای اولین بار توسط یک شرکت آلمانی تحت نام کولار[3] تولید شد. چهار نوع کولار وجود دارد که از بین آنها کولار ۴۹ برای مسلح کردن بتن مناسب است.

۱-۵- انواع محصولات FRP

- میله های کامپوزیتی: میله های ساخته شده از کامپوزیت های FRP هستند که در مسلح سازی سازه‌های بتنی استفاده می‌شود.کاربرد این میله ها به دلیل عدم خوردگی، مساله کربناسیون و کلراسیون را که از جمله مهمترین عوامل مخرب در سازه های بتن آرمه هستند، به کلی حل خواهند نمود.

[1] -Poly Acrylo Nitrile
[2] -pitch based
[3] -Kevlar

- شبکه های کامپوزیتی: شبکه های کامپوزیتی محصولاتی هستند که از تقاطع میله های FRP در دو و یا در سه جهت ایجاد می شوند. نمونه ای از این محصول شبکه کامپوزیتی NEFMAC است که از الیافهای کربن، شیشه یا آرامید و رزین وینیل استر تولید می شود و برای مسلح کردن بتن مناسب است.
- کابل، طناب و تاندن های پیش تنیدگی: محصولاتی شبیه میله های کامپوزیتی FRP ولی به صورت انعطاف پذیر هستند، که در سازه های کابلی و بتن تنیده در محیط های دریایی و خورنده کاربرد دارند. این محصولات در اجزاء پیش تنیده در مجاورت آب نیز بکار گرفته می شوند.
- ورقه‌های کامپوزیتی: ورقه های با ضخامت چند میلیمتر از جنس FRP هستند. این ورقه ها با چسب های مستحکم و مناسب به سطح بتن چسبانده می شوند. ورقه های FRP پوشش مناسبی جهت ایزوله کردن سازه های آبی از محیط خورنده مجاور هستند. همچنین از ورقه های کامپوزیتی FRP جهت تعمیر و تقویت سازه های آسیب دیده (ناشی از زلزله و یا ناشی از خوردگی آب های یون دار) استفاده می شوند.

۱-۶- مشخصات محصولات FRP

- مقاومت

مصالح FRP معمولاً مقاومت کششی بسیار بالایی دارند، که از مقاومت کششی فولاد به مراتب بیشتر است. مقاومت کششی بالای میلگرد های FRP کاربرد آنها را برای سازه های بتن آرمه، خصوصاً برای سازه های پیش تنیده بسیار مناسب نموده است. مقاومت کششی مصالحFRP اساساً به مقاومت کششی، نسبت حجمی، اندازه و سطح مقطع الیاف های بکار رفته در آنها بستگی دارد. مقاومت کششی محصولات FRP برای میله های با الیاف کربن ۱۱۰۰ تا ۲۲۰۰ مگا پاسکال ، برای میله های با الیاف شیشه ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ مگاپاسکال و برای میله های با الیاف آرامید ۱۳۵۰ تا ۱۶۵۰ مگا پاسکال گزارش شده است، با این وجود برای بعضی از این محصولات حتی مقاومت های بالاتر از ۱۶۵۰مگا پاسکال نیز گزارش شده است. توجه شود که به طور کلی مقاومت فشاری میله های کامپوزیتیFRP از مقاومت کششی آنها کمتر است.

- مدول ارتجاعی

مدول ارتجاعی محصولات FRP اکثراً در محدوده قابل قبولی قرار دارد،اگر چه اصولاً کمتر از مدول ارتجاعی فولاد است.

- وزن مخصوص

وزن مخصوص محصولات کامپوزیتی FRP به مراتب کمتر از وزن مخصوص فولاد است، به عنوان نمونه وزن مخصوص کامپوزیتهای CFRP یک سوم وزن مخصوص فولاد است. نسبت بالای مقاومت به وزن در کامپوزیت های FRP از مزایای عمده آنها در کار بردشان به عنوان مسلح کننده بتن محسوب می شود.

- عایق بودن

مصالح FRP خاصیت عایق بودن بسیار عالی دارند. به بیان دیگر، این مواد از نظر مغناطیسی و الکتریکی خنثی بوده و عایق محسوب می شوند. بنابر این استفاده از بتن مسلح به میله های FRP در قسمت هایی از بیمارستان که نسبت به امواج مغناطیسی حساس هستند و در مسیرهای هدایتی قطارهای شناور مغناطیسی، و همچنین در باند فرودگاه ها و مراکز رادار بسیار سودمند خواهد بود.

- خستگی

خستگی خاصیتی است که در بسیاری از مصالح ساختمانی وجود داشته و در نظر گرفتن آن ممکن است به شکست غیر منتظره خصوصاً در اجزایی که در معرض سطوح بالایی از بارها و نقش های تناوبی قرار دارند، منجر شود.

در مقایسه با فولاد، رفتار مصالح FRP در پدیده خستگی بسیار عالی است، به عنوان نمونه برای تنش های کمتر از یک دوم مقاومت نهایی، مواد FRP در اثر خستگی گسیخته نمی شوند.

- خزش

پدیده گسیختگی ناشی از خزش اساساً در تمام مصالح ساختمانی وجود دارد، با این وجود چنانچه کرنش ناشی از خزش جزء کوچکی از کرنش الاستیک باشد، عملاً بوجود نمی آید. در مجموع رفتار خزش کامپوزیت ها بسیار خوب است، به بیان دیگر، اکثر کامپوزیت های در دسترس، دچار خزش نمی شوند.

- چسبندگی با بتن

خصوصیت چسبندگی برای هر ماده ای که به عنوان مسلح کننده بتن بکار رود، بسیار مهم تلقی می شود. در مورد میله های کامپوزیتی FRP اگر چه در بررسی اولیه، مقاومت چسبندگی ضعیفی برای کامپوزیت های از الیاف شیشه گزارش شده بود، تحقیقات اخیر در دنیا ، مقاومت چسبندگی خوب و قابل قبولی را برای میله های کامپوزیتی FRP گزارش می کند.

- **خم شدن**

چنانچه کامپوزیت‌های FRP در بتن مسلح بکار گرفته شوند، به جهت مهار میلگردهای طولی، میلگردهای عرضی و تنگ ها، لازم است در انتها خم شوند. با این وجود عمل خم کردن میله های FRP بسیار دشوارتر از خم کردن میلگردهای فولادی بوده و در حال حاضر برای مصالح موجود FRP نمی توان خم کردن را در کارگاه انجام داد.

- انبساط حرارتی

خصوصیات انبساط حرارتی فولاد و بتن بسیار به هم نزدیک هستند. ضریب انبساط حرارتی میله های FRP اغلب از بتن متفاوت است . بدترین حالت مربوط به آرامید است که ضریب انبساط حرارتی آن منفی است.

- دوام کامپوزیت های FRP

کامپوزیت های FRP شاخه جدیدی از مصالح محسوب می شوند که دوام آنها دلیل اصلی و اولیه برای کاربرد آنها در محدوده وسیعی از عناصر سازه ای شده است. به همین جهت است که از آنها نه تنها در صنعت ساختمان، بلکه در فضا پیما، بال هواپیما، درهای هواپیما، درهای اتومبیل، مخازن محتوی گاز مایع،

نردبان و حتی راکت تنیس استفاده می شود. بنابراین از نقطه نظر مهندسی نه تنها مساله مقاومت و سختی، بلکه مساله دوام آنها تحت شرایط مورد انتظار کاملاً مهم جلوه می کند.

مکانیزم هایی که دوام کامپوزیت ها را کنترل می کند عبارتند از:

- تغییرات شیمیایی یا فیزیکی ماتریس پلیمر
- از دست رفتن چسبندگی بین الیاف و ماتریس
- کاهش در مقاومت و سختی الیاف
- پیر شدگی فیزیکی ماتریس پلیمر

نقش ماتریس پلیمر و تغییرات آن یکی از جنبه های مهمی است که باید در مساله دوام کامپوزیت ها باید در نظر گرفته شود. نقش اولیه ماتریس در کامپوزیت انتقال بین الیاف ها، محافظت از سطح الیاف در مقابل ساییدگی مکانیکی و ایجاد مانعی در مقابل محیط نا مناسب است. همچنین ماتریس نقش به سزایی در انتقال تنش برشی در صفحه کامپوزیت ایفا می کند. بنابراین چنانچه ماتریس پلیمر خواص خود را با زمان تغییر دهد، باید مورد توجه قرار گیرد. برای کلیه پلیمرها کاملاً طبیعی است که تغییر فوق العاده آهسته ای در ساختار شیمیایی (مولکولی) خود داشته باشند. این تغییر با محیط و بیشتر با درجه حرارت و رطوبت کنترل می شود. این پروسه تحت نام پیر شدگی نامیده می شود. تاثیرات پیر شدگی در اکثر کامپوزیت های ترموالاستیک متداول، در مقایسه با کامپوزیت های ترموپلاستیک خفیف تر است. در اثر پیر شدگی فیزیکی، بعضی از پلیمر ها ممکن است سخت تر و تردتر شوند. نتیجه این مسئله تاثیر در خواص غالب ماتریس و از جمله رفتار برشی کامپوزیت خواهد بود. با این وجود در اکثر موارد این تاثیرات بحرانی نیست، زیرا در نهایت روند انتقال بار اصلی از طریق الیاف ها رخ داده و تاثیرات پیر شدگی بر الیاف ها فوق العاده جزیی است.

- تاثیر رطوبت

بسیاری از کامپوزیت های با ماتریس پلیمری در مجاورت هوای مرطوب و یا محیط های مرطوب، با جذب سطحی سریع رطوبت و پخش آن، رطوبت را به خود می گیرند. معمولاً درصد رطوبت ابتدا با گذشت زمان افزایش یافته و در نهایت پس از چندین روز تماس با محیط مرطوب به نقطه اشباع(تعادل) می رسد. زمانی

که طول می کشد تا کامپوزیت به نقطه اشباع برسد به ضخامت کامپوزیت و میزان رطوبت محیط بستگی دارد. خشک کردن کامپوزیت می تواند این روند را معکوس کند. اما ممکن است منجر به حصول کامل خواص اولیه نگردد. جذب آب به وسیله کامپوزیت از قانون عمومی انتشار فیک[1] تبعیت کرده و با جذر زمان متناسب است. از طرفی سرعت دقیق جذب رطوبت به عواملی همچون میزان خلل و فرج، نوع الیاف، نوع رزین، جهت و ساختار الیاف. درجه حرارت، سطح نقش وارده و حضور ریزترک ها بستگی دارد.

۱-۷- ویژگی های مادهFRP

در این قسمت خواص فیزیکی و مکانیکی میله های FRP مسلح کننده به منظور درک بنیادین از رفتار این میله ها و ویژگی هایی که استفاده از آنها در سازه های بتنی را تحت تاثیر قرار می دهد، ارائه می شود. علاوه بر این، اثرات عواملی همچون تاریخچه و طول مدت بارگذاری ، درجه حرارت و رطوبت روی خواص میله های FRP مورد بحث قرار می گیرد.عواملی مانند حجم فیبر، نوع الیاف، نوع رزین، جهت فیبر،اثرات ابعادی و کنترل کیفیت در طول ساخت نقش عمده ای در تعریف ویژگی های میلهFRP دارند. ویژگی های ماده ذکر شده در این قسمت به عنوان ویژگی‌های عمومی FRP می باشد و ممکن است در مورد تمام محصولات تجاری موجود در بازار یکسان نباشد.

۱-۸- خواص فیزیکی

۱-۸-۱- چگالی

چگالی میله های FRP همانطور که در جدول۱-۱ مشاهده می شود بین ۱/۲۵ تا ۲/۱ گرم بر سانتی متر مکعب یعنی معادل یک ششم تا یک چهارم چگالی فولاد است. وزن کمترFRP نسبت به فولاد سبب کاهش هزینه حمل و نقل و سهولت جابه جایی میله های FRP در محل انجام پروژه می شود.

[1] - Fick’s Law

واحد	AFRP	CFRP	GFRP	فولاد
گرم بر سانتی متر مکعب	۱/۴-۱/۲۵	۱/۶ - ۱/۵	۲/۱-۱/۲۵	۷/۹

جدول۱-۱: چگالی انواع میله های مسلح کننده

۱-۸-۲ ضریب انبساط حرارتی

ضریب انبساط حرارتی میله های FRP در جهت طولی و عرضی بسته به نوع الیاف، رزین، و نسبت حجمی فیبر متفاوت است. ضریب انبساط حرارتی طولی تحت تاثیر خواص الیاف است در حالی که ضریب انبساط حرارتی عرضی تحت تاثیر خواص رزین است.باید توجه داشت که ضریب انبساط حرارتی منفی نشان می دهد که ماده با افزایش دما منقبض می شود و با کاهش دما انبساط می یابد. ضرایب انبساط حرارتی طولی و عرضی میله های مسلح کننده در جدول ۱-۲ آمده است.

جهت	فولاد	GFRP	CFRP	AFRP	واحد
ضریب انبساط حرارتی طولی	۱۱/۷	۶ تا ۱۰	۹- تا ۰	۶- تا ۲-	$10^{-6}/°C$
ضریب انبساط حرارتی عرضی	۱۱/۷	۲۱ تا ۲۳	۷۴ تا ۱۰۴	۶۰ تا ۸۰	$10^{-6}/°C$

جدول ۱-۲: ضرایب انبساط حرارتی طولی و عرضی میله های مسلح کننده

۱- ۹- خواص و رفتار مکانیکی میلگرد FRP

رفتار کششی: هنگامی که میله FRP در کشش بارگذاری می شود، هیچ گونه رفتار پلاستیک (تسلیم) تا قبل از گسیختگی نشان نمی دهد. رفتار کششی میله های FRP یک رابطه تنش کرنش الاستیک خطی تا لحظه شکست می باشد .خواص کششی برخی از میله های FRP معمول در جدول ۱-۳ آمده است.

	فولاد	GFRP	CFRP	AFRP
تنش تسلیم اسمی (MPa)	۲۷۶ تا ۵۱۲	–	–	–
مقاومت کششی (MPa)	۴۸۳ تا ۶۹۰	۴۸۳ تا ۱۶۰۰	۱۶۰۰ تا ۳۶۹۰	۱۷۲۰ تا ۲۵۴۰
مدول ارتجاعی (GPa)	۲۰۰	۳۵ تا ۵۱	۱۲۰ تا ۵۸۰	۴۱ تا ۱۲۵
کرنش تسلیم %	۰/۱۴ تا ۰/۲۵	–	–	–

جدول ۱-۳: مشخصات کششی میله های مسلح کننده

مقاومت کششی و سختی میله FRP وابسته به عوامل متعددی است. از آنجا که در میله FRP جزء اصلی باربر الیاف است، نسبت حجم فیبر به حجم کلی FRP به طور قابل توجهی خواص کششی میله FRP را تحت تاثیر قرار می دهد. تنوع سختی و مقاومت در میله با نسبت فیبر به حجم مختلف ، حتی در میله ها با قطر، ظاهر و ترکیبات یکسان رخ می دهد. همچنین سرعت گیرش،فرآیند تولید و کنترل کیفیت تولید در خصوصیات مکانیکی میله تاثیرگذار است.

بر خلاف فولاد، مقاومت کششی میلگرد FRP می تواند بر حسب قطر متفاوت باشد . به عنوان مثال میله های GFRP تولید شده مختلف نشان می دهد همچنانکه *قطر* از ۹.۵ تا ۲۲،۲ میلی متر افزایش می یابد مقاومت کششی تا ۴۰٪ کاهش می یابد. از سوی دیگر به نظر می رسد تغییرات سطح مقطع مقاومت رشته های به هم پیچیده CFRP را تحت تاثیر قرار دهد. نشان داده شده است که حساسیت میله های AFRP به