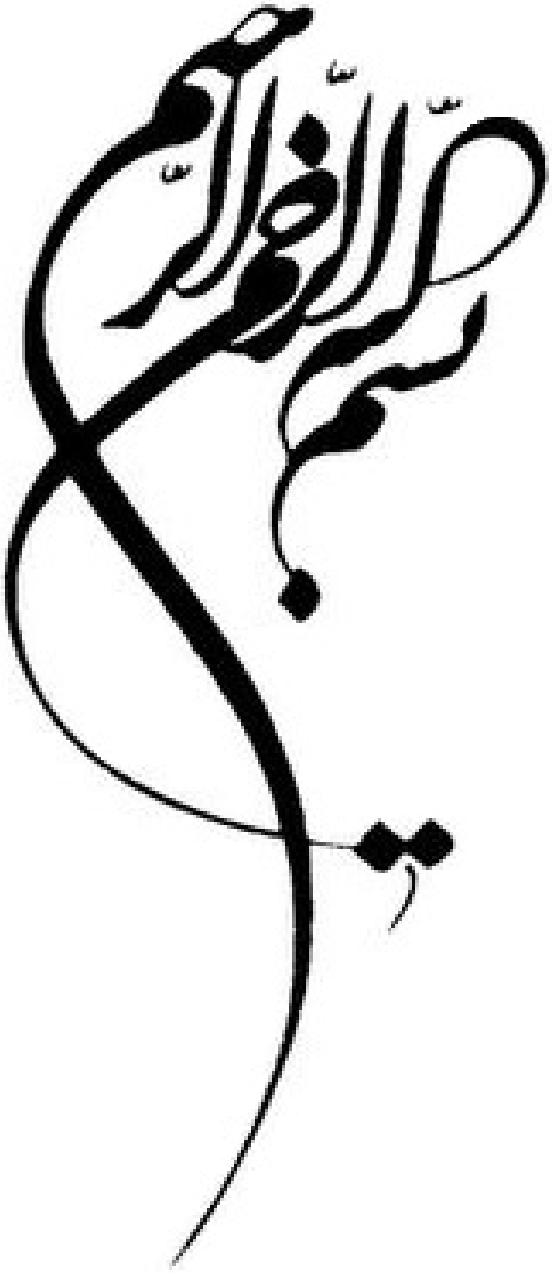

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی عمران
گروه عمران- سازه

بررسی تأثیر پدیده خستگی بر عملکرد تیرهای بتن‌آرمه مقاوم شده با پلیمر مسلح به الیاف (FRP)

دانشجو: وحید خسروی

استاد راهنما

دکتر فرشید جندقی علایی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۳

دانشگاه شاهرود

دانشکده : مهندسی عمران

گروه : عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای وحید خسروی

تحت عنوان:

بررسی تأثیر پدیده خستگی بر عملکرد تیرهای بتن‌آرمه مقاوم شده با پلیمر مسلح به الیاف

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی : **دکتر فرشید جندقی علایی**		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی : **دکترسید مهدی توکلی**		نام و نام خانوادگی : **دکتر مهدی گلی**	
نام و نام خانوادگی : **دکتر وحیدرضا کلاتجاری**			
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمّد (ص) و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر اللّه عزّ و جلّ " از پدر و مادر عزیزم؛ این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده‌اند؛ از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر فرشید جندقی علایی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛ از دوستان عزیزم؛ آقای مهندس نقی‌زاده و سایر دوستان که در طی این تحقیق نهایت مساعدت را داشتند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید .

تعهدنامه

اینجانب **وحید خسروی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **عمران- سازه** دانشکده **عمران** دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی تأثیر پدیده خستگی بر عملکرد تیرهای بتن‌آرمه مقاوم شده با پلیمر مسلح به الیاف (FRP)** تحت راهنمائی **دکتر فرشید جندقی علایی** متعهد می شوم.

- **تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .**
- **در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .**
- **مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .**
- **کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .**
- **حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراددسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .**

تاریخ امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- **کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .**
- **استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.**

چکیده

باتوجه به اهمیت مقاوم‌سازی و ترمیم سازه‌ها به ویژه پل‌ها و توسعه روش‌های مقاوم‌سازی با ورق‌های پلیمر مسلح به الیاف (FRP) در عصر حاضر، بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه سازه به سوی ارزیابی این روش مقاوم‌سازی و مقایسه آن با سایر روش‌های نوین گرایش داشته است. همان طور که می‌دانیم پل‌ها همواره تحت اثر بار دینامیکی ناشی از تردد وسایل نقلیه قرار دارند و ازین‌رو پدیده خستگی در شاه‌تیرهای پل تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افت ظرفیت باربری آنها خواهد داشت.

روش مقاوم‌سازی با استفاده از ورق‌های FRP یکی از موثرترین روش‌های مقاوم‌سازی و نیز ترمیم پل‌ها در مقابل پدیده خستگی می‌باشد که در این تحقیق به دنبال آن بوده‌ایم تا تأثیر پدیده خستگی را بر یک تیر بتن‌آرمه با چند آرایش متفاوت ورق پلیمر مسلح به الیاف کربن (CFRP) بررسی کرده و افت مقاومت تیر ناشی از تکرار تناوب‌های بارگذاری و پدیده خستگی را در آرایش‌های متفاوت باهم مورد مقایسه قرار دهیم. نمونه‌ها با ۶ آرایش متفاوت برحسب تعداد لایه‌ها و پهنای ورق، در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی شدند و برای هر نمونه یک تحلیل استاتیکی و یک تحلیل خستگی انجام شد. تحلیل خستگی شامل دو مرحله است. در مرحله اول بارگذاری تناوبی با تعداد ۵۰۰۰۰ سیکل و در مرحله دوم بارگذاری استاتیکی روی نمونه اعمال شد. در پایان نتایج تحلیل استاتیکی و خستگی نمونه‌ها بصورت نمودار بار- تغییرمکان باهم مقایسه گردید. مقایسات انجام شده، تفاوت تأثیر پدیده خستگی را بر تیر بتن‌آرمه مقاوم شده با ورق با تعداد لایه‌های متفاوت و پهنای متفاوت مشخص کرد. یکی از نتایج مبین این امر بود که تأثیر افزایش تعداد لایه‌های ورق CFRP و ضخامت در بهبود مقاومت تیر در برابر خستگی فراتر از تأثیر افزایش پهنای ورق‌ها و سطح تماس آنها در بهبود مقاومت تیر می‌باشد.

واژگان کلیدی: پلیمر مسلح به الیاف، خستگی، مقاوم‌سازی، بارگذاری تناوبی، ظرفیت باربری

فهرست مطالب

فصل اول:پلیمرمسلح به الیاف (FRP) ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ساختارFRP ۵

۱-۲-۱ الیاف شیشه ۶

۱-۲-۲ الیاف کربن ۷

۱-۲-۳ الیاف آرامید ۷

۱-۳- انواع محصولاتFRP ۷

۱-۴- مشخصات اساسی محصولات FRP ۸

۱-۴-۱ مقاومت در مقابل خوردگی ۸

۱-۴-۲ مقاومت ۹

۱-۴-۳ مدول الاستیسیته ۹

۱-۴-۴ وزن مخصوص ۹

۱-۴-۵ عایق بودن ۱۰

۱-۴-۶ خستگی ۱۰

۱-۴-۷ خزش ۱۰

۱-۴-۸ چسبندگی با بتن ۱۰

۱-۴-۹ خم شدن ۱۱

۱-۴-۱۰ انبساط حرارتی ۱۱
÷۱-۵- دوام FRP ۱۱
۱-۵-۱ پیرشدگی فیزیکی ماتریس پلیمر ۱۲
۱-۵-۲ تأثیر رطوبت ۱۳
۱-۵-۳ تأثیر رطوبت بر ماتریس پلیمری ۱۳
۱-۵-۴ تأثیر رطوبت بر فایبرها ۱۴
۱-۵-۵ رفتار عمومی کامپوزیت‌های اشباع شده با آب ۱۵
۱-۵-۶ تأثیرات حرارتی – رطوبتی ۱۵
۱-۵-۷ محیط قلیایی ۱۶
۱-۵-۸ تأثیر دمای پائین ۱۶
۱-۵-۹ تأثیرات سیکل‌های حرارتی در دمای پایین (یخ‌زدن- ذوب شدن) ۱۷
۱-۵-۱۰ تأثیر تشعشع امواج ماوراء بنفش ۱۸
۱-۶- مراحل نصب و اجرا FRP ۱۹
۱-۷- بازرسی و کنترل کیفیت اجرای FRP ۲۰
۱-۸- رزینها ۲۱
۱-۹- خواص رزینهای اپوکسی ۲۱
۱-۱۰- استفاده از FRP به عنوان مسلح کنندهٔ خارجی در سازه‌ها ۲۲
۱-۱۱- مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه با FRP ۲۳

۱-۱۱-۱ موارد مقاوم‌سازی با الیاف FRP ۲۴

۱-۱۳-۱-۱ افزایش کرنش ستونهای بتنی با استفاده از دورپیچ‌هایFRP ۲۵

۱-۱۱-۱-۲ تقویت برشی یا افزایش شکل پذیری تیرها یا ستونهای بتنی ۲۵

۱-۱۱-۱-۳ تقویت خمشی و برشی دیوارهای برشی بتنی ۲۶

۱-۱۱-۱-۴ تقویت خمشی و برشی دالها ۲۶

۱-۱۱-۱-۵ تقویت اتصالات ۲۶

۱-۱۱-۱-۶ افزایش مقاومت در برابر عوامل محیطی مانند خستگی، خوردگی، رطوبت و تغییر دما ۲۷

۱-۱۱-۱-۷ ترمیم و افزایش مقاومت مقاطع آسیب پذیر موجود شامل ترک خوردگی، یخ زدگی، کرمو بودن ۲۷

۱-۱۱-۱-۸ افزایش مقاومت، عمرمفید، بهسازی و مقاومسازی تاسیسات و تجهیزات (سازه های خاص) ۲۸

۱-۱۲- مزایا و معایب استفاده از ورقهای فولادی و پلیمری مسلّح ۲۹

فصل دوم: پدیده خستگی ۳۱

۲-۱- مقدمه ۳۲

۲-۲- چرخه های تنش خستگی ۳۴

۲-۳- منحنیS-N ۳۵

۲-۴- مکانیزم خستگی ۳۶

۲-۵- عوامل موثر برعمر خستگی ۳۷

۲-۶- خصوصیات ساختاری خستگی ۳۸

فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته ۴۱

فصل چهارم: مدل‌سازی و تحلیل با استفاده از نرم افزار ABAQUS ۵۰

۴-۱- مختصری درباره نرم افزار ABAQUS ۵۱

۴-۱-۱- المانها در ABAQUS ۵۲

۴-۱-۲- اصول ABAQUS ۵۲

۴-۱-۳- محیط نرم افزار ABAQUS ۵۳

۴-۲- مشخصات نمونه ها ۵۴

۴-۳- مشخصات مصالح آزمایشگاهی ۵۶

۴-۴- روند انجام و ابزار آزمایش ۵۷

۴-۵- مدلسازی در نرم افزار ABAQUS ۵۸

۴-۶- مشخصات مصالح ۶۱

۴-۷- اعمال شرایط مرزی و بار ۶۲

۴-۸- مش بندی مدل ۶۴

۴-۹- روش نرم افزار ABAQUS در شبیه سازی پدیده خستگی ۶۵

۴-۱۰ - تحلیل نمونه ها ۶۶

۴-۹- صحت سنجی ۶۶

فصل پنجم: بررسی نتایج و پیشنهادات ۷۱

۵-۱- مشخصات تحلیل ۷۲

۵-۲- نمونه اول (تیر بتن آرمه مقاوم شده با یک ورق سرتاسری تک لایه ایCFRP) . ۷۲

۵-۳- نمونه دوم: (تیر بتن آرمه مقاوم شده با یک ورق سرتاسری دو لایه ایCFRP) . ۷۴

۵-۴- نمونه سوم: (تیر بتن آرمه مقاوم شده با یک ورق سرتاسری سه لایه ایCFRP) ۷۶

۵-۵- نمونه چهارم: (تیر بتن آرمه مقاوم شده با دونوار تک لایه ای CFRP با پهنای ۵۰ میلیمتر) ۷۸

۵-۶- نمونه پنجم: (تیر بتن آرمه مقاوم شده با دو نوار دو لایه ای CFRP با پهنای ۵۰ میلیمتر) ۸۰

۵-۷- نمونه ششم (تیر بتن آرمه مقاوم شده با ورق تک لایه ای U شکل) ۸۲

۵-۸- تجزیه و تحلیل نتایج ۸۴

۵-۹- خلاصه نتایج ۸۹

۵-۱۰- پیشنهادات ۹۰

مراجع.....۹۱

فهرست اشکال

فصل اول: پلیمر مسلح به الیاف (FRP)..... ۱

شکل (۱-۱) ساختار FRP..... ۵

شکل (۱-۲) تصویری از ورق FRP..... ۶

فصل دوم: پدیده خستگی..... ۳۱

شکل (۲-۱)..... ۳۳

شکل (۲-۲)..... ۳۴

شکل (۲-۳)..... ۳۷

شکل (۲-۴)..... ۳۸

فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته..... ۴۱

فصل چهارم: مدل‌سازی و تحلیل با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS..... ۵۰

شکل (۴-۱). مقطع تیر و دستگاه آزمایش..... ۵۵

شکل (۴-۲) آرایش CFRP در آزمایش و نرم‌افزار..... ۵۵

شکل (۴-۳) نمودار تنش-کرنش فولاد..... ۵۶

شکل (۴-۴) نمودار تنش- کرنش فولاد در مقیاس بزرگتر..... ۵۷

شکل (۴-۵) تیر بتن‌آرمه مدل شده..... ۵۹

شکل (۴-۶) آرماتورهای فوقانی مدل شده..... ۵۹

شکل (۴-۷) آرماتورهای تحتانی مدل شده..... ۵۹

شکل (۴-۸) آرماتورهای برشی مدل شده..... ۶۰

شکل (۴-۹) رزین اپوکسی مدل شده در نرم افزار..... ۶۰

شکل (۴-۱۰) چیدمان ورق CFRP و رزین اپوکسی..... ۶۱

شکل (۴-۱۱) چسبندگی آرماتورها و بتن در نرم‌افزار..... ۶۱

شکل (۴-۱۲) نمودار تنش- کرنش فشاری بتن..... ۶۲

شکل (۴-۱۳) نمودار تنش- کرنش کششی بتن..... ۶۲

شکل (۴-۱۴) محل اعمال بارگذاری..... ۶۳

شکل (۴-۱۵) نمودار بارگذاری تناوبی..... ۶۳

شکل (۴-۱۶) تیر مش بندی شده..... ۶۴
شکل (۴-۱۷) نمودار تنش-تعداد سیکل بتن در نمونه آزمایشگاهی..... ۶۷
شکل (۴-۱۸) مقایسه نتایج تحلیل نمونه اول و نتایج آزمایشگاهی..... ۶۷
شکل(۴-۱۹) نمودار تنش-تعداد سیکل فولاد در نمونه آزمایشگاهی..... ۶۸
شکل(۴-۲۰) مقایسه نتایج تحلیل نمونه اول و نتایج آزمایشگاهی..... ۶۹
شکل(۴-۲۱) نمودار تنش-تعداد سیکل ورق CFRP در نمونه آزمایشگاهی..... ۶۹
شکل(۴-۲۲) مقایسه نتایج تحلیل نمونه اول و نتایج آزمایشگاهی..... ۶۹

فصل پنجم: بررسی نتایج و پیشنهادات..... ۷۱

شکل (۵-۱) مقطع نمونه اول..... ۷۲
شکل (۵-۲) نمودار بار- تغییرمکان نمونه اول..... ۷۳
شکل (۵-۳) مقطع نمونه دوم..... ۷۴
شکل (۵-۴) نمودار بار- تغییرمکان نمونه دوم..... ۷۵
شکل (۵-۵) مقطع نمونه سوم..... ۷۶
شکل (۵-۶) نمودار بار- تغییر مکان نمونه سوم..... ۷۷
شکل (۵-۷) مقطع نمونه چهارم..... ۷۸
شکل (۵-۸) نمودار بار- تغییر مکان نمونه چهارم..... ۷۹
شکل (۵-۹) مقطع نمونه پنجم..... ۸۰
شکل (۵-۱۰) نمودار بار- تغییرمکان نمونه پنجم..... ۸۱
شکل (۵-۱۱) مقطع نمونه ششم..... ۸۲
شکل (۵-۱۲) نمودار بار- تغییرمکان نمونه ششم..... ۸۳
شکل (۵-۱۳) نمودار مقایسه‌ای افت مقاومت تحت اثر خستگی در آرایش‌های متفاوت..... ۸۶

فهرست جداول

فصل چهارم: مدل‌سازی و تحلیل با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS.....۵۰

جدول (۴-۱) مشخصات مصالح آزمایشگاهی.....۵۶

فصل پنجم: بررسی نتایج و پیشنهادات.....۷۱

جدول (۵-۱) خلاصه نتایج نرم افزار ABAQUS.....۸۹

فصل اول

پلیمر مسلح به الیاف (FRP)

۱-۱- مقدمه

سیستم‌های FRP به صورت پوشش‌های بیرونی و به منظور افزایش مقاومت و بهسازی سازه‌های بتنی موجود از اواسط دهه ۱۹۸۰ تا کنون در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعداد پروژه‌هایی که در ارتباط با سیستم FRP در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفته به طور چشم‌گیری افزایش یافته است، به طوری که طی ۱۰ سال گذشته از تعداد اندک به چندین هزار پروژه در حال حاضر رسیده است. اعضای سازه‌های تقویت شده با سیستم FRP به صورت پوشش بیرونی عبارتند از: تیرها، دال‌ها، ستون‌ها، دیوارها، اتصالات، دودکش‌ها، طاق‌های گنبدی شکل، تونل‌ها، سیلوها، لوله‌ها و خرپاها. پوشش‌های FRP هم‌چنین به منظور مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی، چوبی، فولادی و چدنی نیز به کار می‌روند. پوشش‌های FRP به عنوان جایگزینی به جای روش‌های دیگر، مانند استفاده از صفحات فولادی، غلاف‌های دور ستون‌های بتنی یا فلزی، بوجود آمده‌اند. روکش‌های پلیمری FRP به منظور بهسازی سازه‌های بتنی اولین بار در دهه ۱۹۸۰ در اروپا و ژاپن توسعه یافت. در اروپا صفحات فولادی به عنوان جایگزین صفحات فولادی مورد استفاده قرار گرفت. اتصال ورق های فولادی به قسمت کششی اعضای بتنی توسط رزین‌های اپوکسی به منظور افزایش مقاومت خمشی به عنوان روش مطرح و بادوام مرسوم می‌باشد. این روش برای مقاوم‌سازی تعداد زیادی از پل‌ها و ساختمان‌ها در جهان مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که صفحات فولادی دچار خوردگی می‌شوند و فرسودگی آنها باعث تخریب اتصال صفحه فولادی با بتن می‌شود و از طرف دیگر نصب آنها مشکل و با ماشین آلات نسبتاً سنگین انجام می‌گیرد، محققان به دنبال جایگزینی مواد FRP به جای فولاد شدند.

توسعه آیین نامه‌ها و استانداردها برای سیستم‌های FRP به عنوان پوشش‌های مقاوم کننده، در اروپا، ژاپن، کانادا و ایالات متحده ادامه دارد. طی ۱۰ سال گذشته ، انجمن مهندسین عمران ژاپن(JSCE)، موسسه بتن ژاپن(JCI) و موسسات تحقیقات فنی راه آهن (RTRI) مدارک زیادی مربوط به استفاده از مصالح FRP در سازه های بتنی منتشر کرده‌اند. فدراسیون بین المللی سازه‌های بتنی (FIB) اخیراً اقدام به چاپ نشریه دستورالعمل طراحی روکش‌های تقویت کننده FRP برای سازه‌های بتن‌آرمه

نموده است (fib 2001). اداره استاندارد کشور کانادا ISIS، در توسعه و تدوین دستورالعمل برای سیستم های FRP فعال می باشد. در ایالات متحده راهنمای ACI 440.2R به عنوان راهنمای طراحی و اجرای تقویت ساختمان های بتنی با سیستم FRP منتشر شده است.

بسیاری از سازه‌های بتن‌آرمهٔ موجود در دنیا در اثر تماس با سولفات‌ها، کلریدها و سایر عوامل خورنده، دچار آسیب‌های اساسی شده‌اند. این مسأله هزینه‌های زیادی را برای تعمیر، بازسازی و یا تعویض سازه‌های آسیب‌دیده در سراسر دنیا موجب شده است. این مساله و عواقب آن گاهی نه تنها به عنوان یک مسالهٔ مهندسی، بلکه به عنوان یک مسالهٔ اجتماعی جدی تلقی شده است. تعمیر و جایگزینی سازه‌های بتنی آسیب‌دیده میلیون‌ها دلار خسارت در دنیا به دنبال داشته است. در امریکا، بیش از ۴۰ درصد پل‌ها در شاهراه‌ها نیاز به تعویض و یا بازسازی دارند. هزینهٔ بازسازی و یا تعمیر سازه‌های پارکینگ در کانادا، ۴ تا ۶ میلیارد دلار کانادا تخمین زده شده است. هزینهٔ تعمیر پل‌های شاهراه‌ها در امریکا در حدود ۵۰ میلیارد دلار برآورد شده است؛ در حالی‌که برای بازسازی کلیهٔ سازه‌های بتن‌آرمهٔ آسیب‌دیده در امریکا در اثر مسالهٔ خوردگی میلگردها، پیش‌بینی شده که به بودجهٔ نجومی ۱ تا ۳ تریلیون دلار نیاز است. [۱-۳]

از مواردی که سازه‌های بتن‌آرمه به صورت سنتی مورد استفاده قرار می‌گرفته، کاربرد آن در مجاورت آب و نیز در محیط‌های دریایی بوده است. تاریخچه کاربرد بتن‌آرمه و بتن پیش‌تنیده در کارهای دریایی به سال ۱۸۹۶ بر می‌گردد [۴]. دلیل عمدهٔ این مساله، خواص ذاتی بتن وهمچنین مقاومت خوب و سهولت در قابلیت کاربرد آن چه در بتن‌ریزی در جا و چه در بتن پیش‌تنیده بوده است. با این وجود شرایط آب و هوایی و محیطی خشن و خورندهٔ اطراف سازه‌های ساحلی و دریایی همواره به عنوان یک تهدید جدی برای اعضاء بتن‌آرمه محسوب گردیده است. در محیط‌های ساحلی و دریایی، خاک، آب زیرزمینی و هوا، اکثراً حاوی مقادیر زیادی از نمک‌ها شامل ترکیبات سولفور و کلرید هستند. در یک محیط دریایی نظیر خلیج فارس، شرایط جغرافیایی و آب و هوایی نامناسب، که بسیاری از عوامل خورنده را به دنبال دارد، با درجهٔ حرارت‌های بالا و نیز رطوبت‌های بالا همراه شده

که نتیجتاً خوردگی در فولادهای به کار رفته در بتن‌آرمه کاملاً تشـدید می‌شـود. در مناطق سـاحلی خلیج فارس، در تابسـتان درجهٔ حرارت از ۲۰ تا ۵۰ درجهٔ سـانتی‌گراد تغییر می‌کند، در حالی‌که گاه اختلاف دمای شـب و روز، بیش از ۳۰ درجهٔ سـانتی‌گراد متغیر اسـت. این در حالی اسـت که رطوبت نسـبی اغلب بالای ۶۰ درصـد بوده و بعضـاً نزدیک به ۱۰۰ درصـد اسـت. به علاوه هوای مجاور تمرکز بالایی از دی‌اکسـید گوگرد و ذرات نمک دارد [۵]. به همین جهت اسـت که از منطقهٔ دریایی خلیج فارس به عنوان یکی از مخرب‌ترین محیط‌ها برای بتن در دنیا یاد شـده اسـت.[۶] در چنین شـرایط، ترک‌ها و ریزترک‌های متعددی در اثر انقباض و نیز تغییرات حرارتی و رطوبتی ایجاد شـده، که این مساله به نوبهٔ خود، نفوذ کلریدها و سولفات‌های مهاجم را به داخل بتن تشدید کرده و شرایط مستعدی برای خوردگی فولاد فراهم می‌آورد [۷-۹]. به همین جهت بسـیاری از سـازه‌های بتن مسـلح در نواحی ساحلی ایران نظیر سواحل بندرعباس، در کمتر از ۵ سال از نظر سازه‌ای غیر قابل استفاده گردیده‌اند.

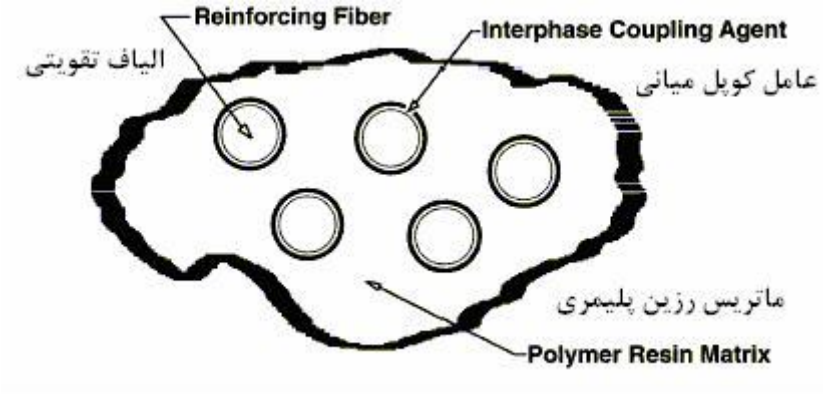
نظیر این مسـاله برای بسـیاری از سازه‌های در مجاورت آب، که در محیط دریایی و ساحلی قرار ندارند نیز وجود دارد. پایه‌های پل، آبگیرها، سـدها و کانال‌های بتن‌آرمه نیز از این مورد مستثنی نبوده و اغلب به دلیل وجود یون سولفات و کلرید، از خوردگی فولاد رنج می‌برند.

تکنیک‌هایی جهت جلوگیری از خوردگی قطعات فولادی الحاقی به سـازه و نیز فولاد در بتن مسـلح توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است که از بین آن‌ها می‌توان به پوشش اپوکسی بر قطعات فولادی و میلگردها، تزریق پلیمر به سـطوح بتنی و حفاظت کاتدی میلگردها اشاره نمود. با این وجود هر یک از این تکنیک‌ها فقط تا حدودی موفق بوده اسـت. [۱۰] برای حذف کامل مسـاله، توجه محققین به جانشـین کردن قطعات فولادی و میلگردهای فولادی با مصـالح جدید مقاوم در مقابل خوردگی، معطوف گردیده است.

FRP[1] موادی بسیار مقاوم در مقابل محیط‌های خورنده همچون محیط‌های نمکی و قلیایی هستند. به همین دلیل امروزه FRP موضوع تحقیقات توسعه‌ای وسیعی به عنوان جانشین قطعات و میلگردهای فولادی و کابل‌های پیش‌تنیدگی شده است. چنین تحقیقاتی به خصوص برای سازه‌های در مجاورت آب و بالأخص در محیط‌های دریایی و ساحلی، به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند.

۱-۲- ساختار FRP

FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ فایبر (الیاف) و رزین (مادهٔ چسباننده). فایبرها که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع فایبر، قطر آن در محدودهٔ ۵ تا ۲۵ میکرون می‌باشد. [۱۱]



شکل (۱-۱): ساختار FRP

رزین اصولاً به عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند، که فایبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد. با این وجود، ماتریس‌های با مقاومت کم به صورت چشمگیر بر خواص مکانیکی کامپوزیت نظیر مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی آن اثر نمی‌گذارند. ماتریس (رزین) را می‌توان از مخلوط‌های ترموست و یا ترموپلاستیک انتخاب کرد. ماتریس‌های ترموست با اعمال حرارت سخت شده و دیگر به حالت مایع یا روان در نمی‌آیند؛ در حالیکه رزین‌های ترموپلاستیک را می‌توان با اعمال حرارت، مایع نموده و با اعمال برودت به حالت جامد درآورد. به عنوان رزین‌های ترموست می‌توان از پلی‌استر،

[1] Fiber Reinforced Polymer