

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی عمران
گروه عمران - سازه

بررسی تأثیر پدیده خستگی بر عملکرد تیرهای بتن آرمه 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 بتن آرمه 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.

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

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر مهدی گلی		نام و نام خانوادگی : دکترسید مهدی توکلی
			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 محمد (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، اجل 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 الله عزّ و جلّ" از پدر و مادر عزیزم؛ این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یابوری 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 بتن آرمه 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 افراد دسترسی 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 ۵۰۰۰ 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: پلیمر مسلح به الیاف (FRP)	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- ساختار FRP	۵
۱-۲-۱ الیاف شیشه	۶
۲-۲-۱ الیاف کربن	۷
۳-۲-۱ الیاف آرامید	۷
۳-۱- انواع محصولات FRP	۷
۴-۱- مشخصات اساسی محصولات FRP	۸
۱-۴-۱ مقاومت در مقابل خوردگی	۸
۲-۴-۱ مقاومت	۹
۳-۴-۱ مدول الاستیسیته	۹
۴-۴-۱ وزن مخصوص	۹
۵-۴-۱ عایق بودن	۱۰
۶-۴-۱ خستگی	۱۰
۷-۴-۱ خزش	۱۰
۸-۴-۱ چسبندگی با بتن	۱۰
۹-۴-۱ خم شدن	۱۱

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

۱۱-۱-۱	موارد مقاوم سازی با الیاف FRP	۲۴
۱۳-۱-۱	افزایش کرنش ستونهای بتنی با استفاده از دورپیچ های FRP	۲۵
۱۱-۱-۲	تقویت برشی یا افزایش شکل پذیری تیرها یا ستونهای بتنی	۲۵
۱۱-۱-۳	تقویت خمشی و برشی دیوارهای برشی بتنی	۲۶
۱۱-۱-۴	تقویت خمشی و برشی دالها	۲۶
۱۱-۱-۵	تقویت اتصالات	۲۶
۱۱-۱-۶	افزایش مقاومت در برابر عوامل محیطی مانند خستگی، خوردگی، رطوبت و تغییر دما	۲۷
۱۱-۱-۷	ترمیم و افزایش مقاومت مقاطع آسیب پذیر موجود شامل ترک خوردگی، یخ زدگی، کرمو بودن	۲۷
۱۱-۱-۸	افزایش مقاومت، عمر مفید، بهسازی و مقاوم سازی تاسیسات و تجهیزات (سازه های خاص)	۲۸
۱۲-۱	مزایا و معایب استفاده از ورقهای فولادی و پلیمری مسلح	۲۹
فصل دوم: پدیده خستگی ۳۱		
۱-۲	مقدمه	۳۲
۲-۲	چرخه های تنش خستگی	۳۴
۳-۲	منحنی S-N	۳۵
۴-۲	مکانیزم خستگی	۳۶

۳۷	۵-۲- عوامل موثر بر عمر خستگی
۳۸	۶-۲- خصوصیات ساختاری خستگی
۴۱	فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته
۵۰	فصل چهارم: مدل سازی و تحلیل با استفاده از نرم افزار ABAQUS
۵۱	۴-۱- مختصری درباره نرم افزار ABAQUS
۵۲	۴-۱-۱- المانها در ABAQUS
۵۲	۴-۱-۲- اصول ABAQUS
۵۳	۴-۱-۳- محیط نرم افزار ABAQUS
۵۴	۴-۲- مشخصات نمونه ها
۵۶	۴-۳- مشخصات مصالح آزمایشگاهی
۵۷	۴-۴- روند انجام و ابزار آزمایش
۵۸	۴-۵- مدلسازی در نرم افزار ABAQUS
۶۱	۴-۶- مشخصات مصالح
۶۲	۴-۷- اعمال شرایط مرزی و بار
۶۴	۴-۸- مش بندی مدل
۶۵	۴-۹- روش نرم افزار ABAQUS در شبیه سازی پدیده خستگی
۶۶	۴-۱۰- تحلیل نمونه ها
۶۶	۴-۹- صحت سنجی

فصل پنجم: بررسی نتایج و پیشنهادات ۷۱

۷۲ ۱-۵- مشخصات تحلیل

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

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

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

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

۷۸ میلیمتر)

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

۸۰ میلیمتر)

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

۸۴ ۸-۵- تجزیه و تحلیل نتایج

۸۹ ۹-۵- خلاصه نتایج

۹۰ ۱۰-۵- پیشنهادات

۹۱ مراجع

فهرست اشکال

فصل اول: پلیمر مسلح به الیاف (FRP).....	۱
شکل (۱-۱) ساختار FRP.....	۵
شکل (۲-۱) تصویری از ورق FRP.....	۶
فصل دوم: پدیده خستگی.....	۳۱
شکل (۱-۲).....	۳۳
شکل (۲-۲).....	۳۴
شکل (۳-۲).....	۳۷
شکل (۴-۲).....	۳۸
فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته.....	۴۱
فصل چهارم: مدل سازی و تحلیل با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS.....	۵۰
شکل (۱-۴). مقطع تیر و دستگاه آزمایش.....	۵۵
شکل (۲-۴) آرایش CFRP در آزمایش و نرم افزار.....	۵۵
شکل (۳-۴) نمودار تنش- کرنش فولاد.....	۵۶
شکل (۴-۴) نمودار تنش- کرنش فولاد در مقیاس بزرگتر.....	۵۷
شکل (۵-۴) تیر بتن آرمه مدل شده.....	۵۹
شکل (۶-۴) آرماتورهای فوقانی مدل شده.....	۵۹
شکل (۷-۴) آرماتورهای تحتانی مدل شده.....	۵۹
شکل (۸-۴) آرماتورهای برشی مدل شده.....	۶۰
شکل (۹-۴) رزین اپوکسی مدل شده در نرم افزار.....	۶۰
شکل (۱۰-۴) چیدمان ورق CFRP و رزین اپوکسی.....	۶۱
شکل (۱۱-۴) چسبندگی آرماتورها و بتن در نرم افزار.....	۶۱
شکل (۱۲-۴) نمودار تنش- کرنش فشاری بتن.....	۶۲
شکل (۱۳-۴) نمودار تنش- کرنش کششی بتن.....	۶۲
شکل (۱۴-۴) محل اعمال بارگذاری.....	۶۳
شکل (۱۵-۴) 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- تغییر مکان نمونه اول..... ۷۳
- شکل (۵-۳) مقطع نمونه دوم..... ۷۴
- شکل (۵-۴) نمودار بار- تغییر مکان 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- تغییر مکان نمونه پنجم..... ۸۱
- شکل (۵-۱۱) مقطع نمونه ششم..... ۸۲
- شکل (۵-۱۲) نمودار بار- تغییر مکان نمونه ششم..... ۸۳
- شکل (۵-۱۳) نمودار مقایسه‌ای افت مقاومت تحت اثر خستگی در آرایش‌های متفاوت..... ۸۶

فهرست جداول

فصل چهارم: مدل سازی و تحلیل با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS.....	۵۰
جدول (۱-۴) مشخصات مصالح آزمایشگاهی.....	۵۶
فصل پنجم: بررسی نتایج و پیشنهادات.....	۷۱
جدول (۱-۵) 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 ورق‌های 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 مهندسين عمران ژاپن (JSCE)، موسسه بتن ژاپن (JCI) و موسسات تحقیقات فنی راه آهن (RTRI) مدارک زیادی مربوط به استفاده از مصالح FRP در سازه‌های بتنی منتشر کرده‌اند. فدراسیون بین‌المللی 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 سازه های بتن آرمه موجود در دنیا در اثر تماس با سولفات ها، کلریدها و سایر عوامل خورنده، دچار آسیب های اساسی شده اند. این مسأله هزینه های زیادی را برای تعمیر، بازسازی و یا تعویض سازه های آسیب دیده در سراسر دنیا موجب شده است. این مساله و عواقب آن گاهی نه تنها به عنوان یک مسأله مهندسی، بلکه به عنوان یک مسأله اجتماعی جدی تلقی شده است. تعمیر و جایگزینی سازه های بتنی آسیب دیده میلیون ها دلار خسارت در دنیا به دنبال داشته است. در امریکا، بیش از ۴۰ درصد پل ها در شاهراه ها نیاز به تعویض و یا بازسازی دارند. هزینه بازسازی و یا تعمیر سازه های پارکینگ در کانادا، ۴ تا ۶ میلیارد دلار کانادا تخمین زده شده است. هزینه تعمیر پل های شاهراه ها در امریکا در حدود ۵۰ میلیارد دلار برآورد شده است؛ در حالی که برای بازسازی کلیه سازه های بتن آرمه آسیب دیده در امریکا در اثر مسأله خوردگی میلگردها، پیش بینی شده که به بودجه نجومی ۱ تا ۳ تریلیون دلار نیاز است. [۱-۳]

از مواردی که سازه های بتن آرمه به صورت سنتی مورد استفاده قرار می گرفته، کاربرد آن در مجاورت آب و نیز در محیط های دریایی بوده است. تاریخچه کاربرد بتن آرمه و بتن پیش تنیده در کارهای دریایی به سال ۱۸۹۶ بر می گردد [۴]. دلیل عمده این مساله، خواص ذاتی بتن و همچنین مقاومت خوب و سهولت در قابلیت کاربرد آن چه در بتن ریزی در جا و چه در بتن پیش تنیده بوده است. با این وجود شرایط آب و هوایی و محیطی خشن و خورنده اطراف سازه های ساحلی و دریایی همواره به عنوان یک تهدید جدی برای اعضاء بتن آرمه محسوب گردیده است. در محیط های ساحلی و دریایی، خاک، آب زیرزمینی و هوا، اکثراً حاوی مقادیر زیادی از نمک ها 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 درجه حرارت های بالا و نیز رطوبت های بالا همراه شده

که نتیجتاً خوردگی در فولادهای به کار رفته در بتن آرمه کاملاً تشدید می‌شود. در مناطق ساحلی خلیج فارس، در تابستان درجه حرارت از ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند، در حالی که گاه اختلاف دمای شب و روز، بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. این در حالی است که رطوبت نسبی اغلب بالای ۶۰ درصد بوده و بعضاً نزدیک به ۱۰۰ درصد است. به علاوه هوای مجاور تمرکز بالایی از دی‌اکسید گوگرد و ذرات نمک دارد [۵]. به همین جهت است که از منطقه دریایی خلیج فارس به عنوان یکی از مخرب‌ترین محیط‌ها برای بتن در دنیا یاد شده است. [۶] در چنین شرایط، ترک‌ها و ریزترک‌های متعددی در اثر انقباض و نیز تغییرات حرارتی و رطوبتی ایجاد شده، که این مساله به نوبه 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 بسیاری از سازه‌های بتن مسلح در نواحی ساحلی ایران نظیر سواحل بندرعباس، در کمتر از ۵ سال از نظر سازه‌ای غیر قابل استفاده گردیده‌اند.

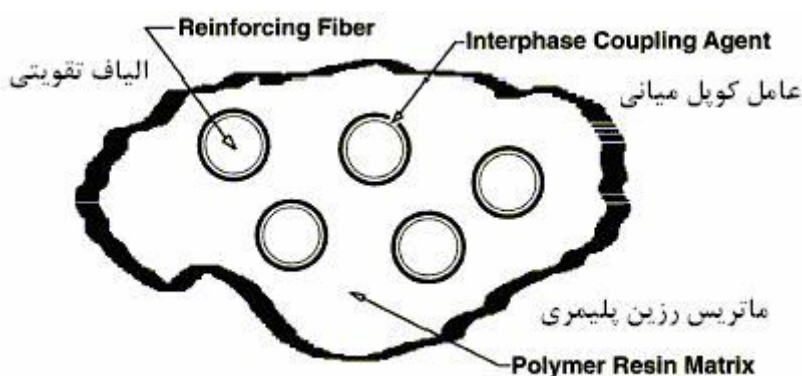
نظیر این مساله برای بسیاری از سازه‌های در مجاورت آب، که در محیط دریایی و ساحلی قرار ندارند نیز وجود دارد. پایه‌های پل، آبگیرها، سدها و کانال‌های بتن آرمه نیز از این مورد مستثنی نبوده و اغلب به دلیل وجود یون سولفات و کلرید، از خوردگی فولاد رنج می‌برند.

تکنیک‌هایی جهت جلوگیری از خوردگی قطعات فولادی الحاقی به سازه و نیز فولاد در بتن مسلح 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 سطوح بتنی و حفاظت کاتدی میلگردها اشاره نمود. با این وجود هر یک از این تکنیک‌ها فقط تا حدودی موفق بوده است. [۱۰] برای حذف کامل مساله، توجه محققین به جانشین کردن قطعات فولادی و میلگردهای فولادی با مصالح جدید مقاوم در مقابل خوردگی، معطوف گردیده است.

FRP^۱ 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.

۲-۱- ساختار FRP

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

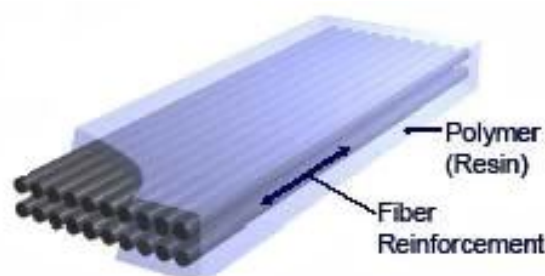


شکل (۱-۱): ساختار FRP

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،

^۱ Fiber Reinforced Polymer

وینیل استر و اپوکسی و به عنوان رزین‌های ترموپلاستیک از پلی‌وینیل کلرید (PVC)^۲ پلی‌اتیلن و پلی پروپیلن (PP)^۳ نام برد. فایبر ممکن است از شیشه، کربن، آرامید و یا وینیلون باشد که در این صورت محصولات کامپوزیت مربوطه به ترتیب به نام‌های GFRP^۴، CFRP^۵، AFRP^۶ و VFRP^۷ شناخته می‌شود. در ادامه شرح مختصری از فایبرهای متداول ارائه خواهد شد.



شکل (۱-۲): تصویری از ورق FRP

۱-۲-۱ الیاف شیشه

فایبرهای شیشه در چهار دسته طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰]:

۱. E-Glass: متداول ترین الیاف شیشه در بازار با محتوای قلیایی کم، که در صنعت ساختمان به کار می‌رود.

۲. Z-Glass: با مقاومت بالا در مقابل حمله قلیائی‌ها، که در تولید بتن الیافی به کار گرفته می‌شود.

۳. A-Glass: با مقادیر زیاد قلیایی که امروزه تقریباً از رده خارج شده است.

۴. S-Glass: که در تکنولوژی هوافضا و تحقیقات فضایی به کار گرفته می‌شود و مقاومت و مدول الاستیسیته بسیار بالایی دارد.

^۲ Polyvinyl Chlorid

^۳ Polypropylene

^۴ Glass Fiber Reinforced Polymer

^۵ Carbon Fiber Reinforced Polymer

^۶ Aramid Fiber Reinforced Polymer

^۷ Vinylon Fiber Reinforced Polymer

۱-۲-۲ الیاف کربن

الیاف کربن در دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند: الیاف کربنی از نوع PAN^۱ سه نوع مختلف هستند. تیپ I که تردترین آن‌ها با بالاترین مدول الاستیسیته محسوب می‌شود. تیپ II که مقاوم‌ترین الیاف کربن است و نهایتاً تیپ III که نرم‌ترین نوع الیاف کربنی با مقاومتی بین تیپ I و II می‌باشد. الیاف با اساس قیری که اساساً از تقطیر زغال سنگ بدست می‌آیند. این الیاف از الیاف PAN ارزان‌تر بوده و مقاومت و مدول الاستیسیته کمتری نسبت به آن‌ها دارند. لازم به ذکر است که الیاف کربن مقاومت بسیار خوبی در مقابل محیط‌های قلیایی و اسیدی داشته و در شرایط سخت محیطی از نظر شیمیایی کاملاً پایدار هستند.

۱-۲-۳ الیاف آرامید

آرامید، یک کلمه اختصاری از آروماتیک پلی‌آمید است. آرامید اساساً الیاف ساخته دست بشر است که برای اولین بار توسط شرکت DuPont در آلمان تحت نام کولار Kevlar تولید شد. چهارنوع کولار وجود دارد که از بین آنها کولار ۴۹ برای مسلح کردن بتن، طراحی و تولید شده است. [۱۲]

۱-۳-۳ انواع محصولات FRP

۱. **میل‌های FRP:** میل‌های ساخته شده از FRP هستند که جانشین میلگردهای فولادی در بتن‌آرمه خواهند شد. کاربرد این میل‌ها به دلیل عدم خوردگی، مسأله کربناسیون و کلراسیون را که از جمله مهم‌ترین عوامل مخرب در سازه‌های بتن‌آرمه هستند، به کلی حل خواهند نمود.

۲. **شبکه‌های FRP:** شبکه‌های FRP محصولاتی هستند که از برخورد میل‌های FRP در دو جهت و یا در سه جهت ایجاد می‌شوند. نمونه‌ای از این محصول، شبکه کامپوزیتی دیگر است

^۱ Phenyl Alpha Naphthylamine

که از فایبرهای کربن، شیشه یا آرامید و رزین وینیل استر تولید می‌شود و برای مسلح کردن بتن مناسب است.

۳. کابل، طناب و تاندون‌های پیش‌تنیدگی: محصولات شبیه میله‌های FRP ولی به صورت انعطاف‌پذیر هستند، که در سازه‌های کابلی و بتن پیش‌تنیده در محیط‌های دریایی و خورنده کاربرد دارند. این محصولات در اجزاء پیش‌تنیده در مجاورت آب نیز به کار گرفته می‌شوند.

۴. ورقه‌های FRP: ورقه‌های FRP، ورقه‌های با ضخامت چند میلیمتر از جنس FRP هستند. این ورقه‌ها با چسب‌های مستحکم و مناسب به سطح بتن چسبانده می‌شوند. ورقه‌های FRP پوشش مناسبی جهت ایزوله کردن سازه‌های آبی از محیط خورنده مجاور هستند. همچنین از ورقه‌ها FRP جهت تعمیر و تقویت سازه‌های آسیب‌دیده (ناشی از زلزله و یا ناشی از خوردگی آب‌های یون‌دار) استفاده می‌شوند.

۵. پروفیل‌های ساختمانی: FRP همچنین در شکل پروفیل‌های ساختمانی به صورت I شکل، T شکل، نبشی و ناودانی تولید می‌شوند. چنین محصولاتی می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای قطعات و سازه‌های فولادی در مجاورت آب تلقی شوند.

۱-۴-۴-۱- مشخصات اساسی محصولات FRP

۱-۴-۱- مقاومت در مقابل خوردگی

بدون شک برجسته‌ترین و اساسی‌ترین خاصیت محصولات FRP مقاومت آن‌ها در مقابل خوردگی است. در حقیقت این خاصیت FRP تنها دلیل نامزد کردن آن‌ها به عنوان یک گزینه جانشین برای اجزاء فولادی و نیز میلگردهای فولادی است. به خصوص در سازه‌های بندری، ساحلی و دریایی، مقاومت خوب FRP در مقابل خوردگی، سودمندترین مشخصه میلگردهای FRP است. در قسمت ۵ به صورت مفصل در مورد دوام FRP بحث خواهد شد. [۱۳]

۱-۴-۲ مقاومت

FRP معمولاً مقاومت کششی بسیار بالایی دارد، که از مقاومت کششی فولاد به مراتب بیشتر است. مقاومت کششی بالای میلگردهای FRP کاربرد آن‌ها را برای سازه‌های بتن آرمه، خصوصاً برای سازه‌های پیش‌تنیده بسیار مناسب نموده است. مقاومت کششی مصالح FRP اساساً به مقاومت کششی، نسبت حجمی، اندازه و سطح مقطع فایبرهای بکار رفته در آن‌ها بستگی دارد. مقاومت کششی محصولات FRP برای میله‌های با الیاف کربن ۱۱۰۰ تا ۲۲۰۰ مگاپاسکال، برای میله‌های با الیاف شیشه ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ مگاپاسکال و برای میله‌های با الیاف آرامید ۱۳۵۰ تا ۱۶۵۰ مگاپاسکال گزارش شده است [۱۴]. با این وجود، برای بعضی از این محصولات، حتی مقاومت‌های بالاتر از ۳۰۰۰ مگاپاسکال نیز گزارش شده است. توجه شود که بطور کلی مقاومت فشاری میله‌های FRP از مقاومت کششی آن‌ها کمتر است؛ به عنوان نمونه مقاومت فشاری محصولات ISOROD برابر ۶۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی آن‌ها ۷۰۰ مگاپاسکال است.

۱-۴-۳ مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته محصولات FRP اکثراً در محدوده قابل قبولی قرار دارد؛ اگر چه اصولاً کمتر از مدول الاستیسیته فولاد است. مدول الاستیسیته میله‌های FRP ساخته شده از الیاف کربن، شیشه و آرامید به ترتیب در محدوده ۴۵ تا ۱۰۰ گیگاپاسکال، ۶۰ گیگاپاسکال و ۱۵۰ گیگاپاسکال گزارش شده است. [۱۵]

۱-۴-۴ وزن مخصوص

وزن مخصوص محصولات 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 FRP از مزایای عمده آنها در کاربردهای مسلح کننده بتن محسوب می‌شود.

۱-۴-۵ عایق بودن

FRP خاصیت عایق بودن بسیار عالی دارد. به بیان دیگر، این مواد از نظر مغناطیسی و الکتریکی خنثی بوده و عایق محسوب می‌شوند. بنابراین استفاده از بتن مسلح به میله‌های FRP در قسمتهایی از بیمارستان که نسبت به امواج مغناطیسی حساس هستند و در مسیرهای هدایتی قطارهای شناور مغناطیسی و همچنین در باند فرودگاه‌ها و مراکز رادار بسیار سودمند خواهد بود. [۱۶]

۱-۴-۶ 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 تنش‌های تناوبی قرار دارند، منجر شود. در مقایسه با فولاد، رفتار FRP در پدیده خستگی بسیار عالی است؛ به عنوان نمونه برای تنش‌های کمتر از یک دوم مقاومت نهایی، FRP در اثر خستگی گسیخته نمی‌شوند. [۱۷]

۱-۴-۷ 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 مشکلی بوجود نمی‌آید. در مجموع، رفتار خزشی کامپوزیت‌ها بسیار خوب است؛ به بیان دیگر، اکثر کامپوزیت‌های در دسترس، دچار خزش نمی‌شوند. [۱۸]

۱-۴-۸ چسبندگی با بتن

خصوصیت چسبندگی، برای هر ماده‌ای که به عنوان مسلح‌کننده بتن بکار رود، بسیار مهم تلقی می‌شود. در مورد میله‌های FRP، اگر چه در بررسی بسیار اولیه، مقاومت چسبندگی ضعیفی

برای کامپوزیت‌های از الیاف شیشه گزارش شده بود، تحقیقات اخیر در دنیا مقاومت چسبندگی خوب و قابل قبولی را برای میله‌های FRP گزارش می‌کند.

۱-۴-۹ خم شدن

چنانچه FRP در بتن مسلح بکار گرفته شوند، به جهت مهار میلگردهای طولی، میلگردهای عرضی و تنگ‌ها، لازم است در انتها خم شوند. با این وجود عمل خم کردن میله‌های FRP بسیار دشوارتر از خم کردن میلگردهای فولادی بوده و در حال حاضر برای مصالح موجود FRP، نمی‌توان خم کردن را در کارگاه انجام داد. اگر چه در صورت لزوم، می‌توان خم میله‌های FRP را با سفارش آن به تولیدکننده، در کارگاه انجام داد.

۱-۴-۱۰ انبساط حرارتی

خصوصیات انبساط حرارتی فولاد و بتن بسیار به هم نزدیک هستند؛ ضریب انبساط حرارتی این دو ماده به ترتیب: $\alpha_{ST} = 12 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$ و $\alpha_C = 10 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$ می‌باشد. ضریب انبساط حرارتی میله‌های FRP اغلب از بتن متفاوت است. به طور خلاصه ضریب انبساط حرارتی FRP با الیاف کربن و شیشه به ترتیب برابر است با $\alpha_{CFRP} = (0.6 - 1) \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$ و $\alpha_{GFRP} = (9 - 10) \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$ می‌باشد. بدترین حالت مربوط به آرامید است که ضریب انبساط حرارتی آن منفی بوده و برابر $\alpha_{AFRP} = ((-6) - (-2)) \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$ می‌باشد. [۱۹]

۱-۵- دوام FRP

FRP شاخه جدیدی از مصالح محسوب می‌شود که دوام آن‌ها دلیل اصلی و اولیه برای کاربرد آن‌ها در محدوده وسیعی از عناصر سازه‌ای شده است. به همین جهت است که از آن‌ها نه تنها در صنعت ساختمان، بلکه در فضاپیما، بال هواپیما، درهای اتومبیل، مخازن محتوی گاز مایع نردبان و حتی راکت تنیس نیز استفاده می‌شود. بنابراین از نقطه نظر مهندسی نه تنها مسأله مقاومت و سختی، بلکه مسأله دوام آن‌ها تحت شرایط مورد انتظار، کاملاً مهم جلوه می‌کند.

مکانیزم‌هایی که دوام کامپوزیت‌ها را کنترل می‌کنند عبارتند از:

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

محیط نقش کاملاً تعیین کننده‌ای در تغییر خواص پلیمرهای ماتریس کامپوزیت دارد. هر دوی ماتریس و فایبر ممکن است با رطوبت، درجه حرارت، نور خورشید و مشخصاً تشعشعات ماوراء بنفش، ازن و نیز حضور بعضی از مواد شیمیایی تجزیه کننده نظیر نمک‌ها و قلیایی‌ها تحت تأثیر قرار گیرند. همچنین تغییرات تکراری دما ممکن است به صورت سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب شدن، تغییراتی را در ماتریس و فایبر باعث گردد. از طرفی تحت شرایط بارگذاری مکانیکی، بارهای تکراری ممکن است باعث خستگی شوند. همچنین بارهای وارده در طول زمان مشخص به صورت ثابت، ممکن است مسأله خزش را به دنبال داشته باشند. مجموعه‌ای از تمام مسائل مطرح شده در بالا، دوام FRP را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

۱-۵-۱ پیرشدگی فیزیکی^۹ ماتریس پلیمر

نقش ماتریس پلیمر و تغییرات آن یکی از جنبه‌های مهمی است که در مسأله دوام کامپوزیت‌ها باید در نظر گرفته شود. نقش اولیه ماتریس در کامپوزیت انتقال تنش بین فایبرها، محافظت از سطح فایبر در مقابل سائیدگی مکانیکی و ایجاد مانعی در مقابل محیط نامناسب است. همچنین ماتریس نقش به سزایی در انتقال تنش برشی در صفحه کامپوزیت ایفا می‌کند. بنابراین چنانچه ماتریس پلیمر خواص خود را با زمان تغییر دهد، باید تحت توجه خاص قرار گیرد. برای کلیه پلیمرها کاملاً طبیعی است که تغییر فوق‌العاده آهسته‌ای در ساختار شیمیایی (مولکولی) خود داشته باشند. این تغییر با محیط و عمدتاً با درجه حرارت و رطوبت کنترل می‌شود. این فرایند تحت نام پیرشدگی نامیده

⁹ Aging

می‌شود. تأثیرات پیرشدگی در اکثر کامپوزیت‌های ترموست متداول، درمقایسه با کامپوزیت‌های ترموپلاستیک، خفیف‌تر است. در اثر پیرشدگی فیزیکی، بعضی از پلیمرها ممکن است سخت‌تر و تردتر شوند؛ نتیجه این مسأله، تأثیر بر خواص غالب ماتریس و من جمله رفتار برشی کامپوزیت خواهد بود. با این وجود در اکثر موارد این تأثیرات بحرانی نیست؛ زیرا نهایتاً روند انتقال بار اصلی از طریق فایبرها رخ داده و تأثیرات پیرشدگی بر فایبرها فوق‌العاده جزئی است.

۱-۵-۲ تأثیر رطوبت

بسیاری از کامپوزیت‌های با ماتریس پلیمری در مجاورت هوای مرطوب و یا محیط‌های مرطوب، با جذب سطحی سریع رطوبت و پخش آن، رطوبت را به خود می‌گیرند. معمولاً درصد رطوبت ابتدا با گذشت زمان افزایش یافته و نهایتاً پس از چندین روز تماس با محیط مرطوب، به نقطه اشباع (تعادل) می‌رسد. زمانی که طول می‌کشد تا کامپوزیت به نقطه اشباع برسد، به ضخامت کامپوزیت و میزان رطوبت محیط بستگی دارد. خشک کردن کامپوزیت می‌تواند 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 تبعیت کرده و با جذر زمان متناسب است. از طرفی سرعت دقیق جذب رطوبت به عواملی همچون میزان خلل و فرج، نوع فایبر، نوع رزین، جهت و ساختار فایبر، درجه حرارت، سطح تنش وارده و حضور ریزترکها بستگی دارد. در ادامه تأثیر رطوبت را به صورت مجزا بر اجزاء کامپوزیت مورد بحث قرار می‌دهیم.

۱-۵-۳ تأثیر رطوبت بر ماتریس پلیمری

جذب آب به توسط رزین ممکن است در مواردی بعضی از خصوصیات رزین را تغییر دهد. چنین تغییراتی عمدتاً در دمای بالای ۱۲۰ درجه ممکن است اتفاق بیفتد و در اثر آن سختی کامپوزیت به شدت کاهش یابد؛ اگر چه چنین وضعیتی عمدتاً در مصارف کامپوزیت‌ها در مهندسی عمران و به خصوص در سازه‌های در مجاورت آب، کمتر پیش می‌آید و مورد توجه نیست. از طرفی

جذب رطوبت یک تأثیر سودمند نیز بر کامپوزیت دارد؛ جذب رطوبت باعث تورم رزین شده که این مسأله به نوبه خود تنش‌های پس‌ماند بین ماتریس و فایبر را که در اثر انقباض ضمن عمل‌آوری کامپوزیت ایجاد شده، کاهش می‌دهد. این مساله باعث آزاد شدن تنش‌های بین ماتریس و فایبر شده و ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. از طرفی گزارش شده است که در کامپوزیت‌هایی که به صورت نامناسب ساخته شده‌اند، در اثر وجود حفره‌ها در سطح بین فایبر و ماتریس و یا در لایه‌های کامپوزیت، نفوذ آب در داخل حفره‌ها و یا در سطح مشترک فایبر و ماتریس ممکن است به سیلان رزین منجر شود. [۲۰] این مساله را می‌توان با انتخاب مناسب مواد رزین و یا آماده‌سازی مناسب سطح فایبرها و نیز بهبود تکنیک‌های ساخت، حذف نمود.

۱-۵-۴ تأثیر رطوبت بر فایبرها

اعتقاد عمومی بر آن است که فایبرهای شیشه چنانچه به صورت طولانی مدت در کنار آب قرار گیرند، آسیب می‌بینند. دلیل این مساله آن است که شیشه از سیلیکا ساخته شده که در آن اکسیدهای فلزات قلیایی منتشر شده‌اند. اکسیدهای فلزات قلیایی هم جاذب آب بوده و هم قابل هیدرولیز هستند. با این وجود، در اکثر موارد مصرف در مهندسی عمران، از E-glass و S-glass استفاده می‌شود که فقط مقادیر کمی از اکسیدهای فلزات قلیایی را داشته و بنابراین در مقابل خطرات ناشی از تماس با آب، مقاوم هستند. در هر حال کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف شیشه باید به خوبی ساخته شده باشند، بصورتی که از نفوذ آب به مقدار زیاد جلوگیری کنند؛ زیرا حضور آب در سطح الیاف شیشه انرژی سطحی آن‌ها را کاهش می‌دهد که می‌تواند رشد ترک خوردگی را افزایش دهد. از طرفی الیاف آرامید نیز می‌توانند مقادیر قابل توجهی از آب را جذب کنند که منجر به باد کردن و تورم آن‌ها می‌شود. با این وجود اکثر الیاف با پوششی محافظت می‌شوند، که پیوستگی خوب با ماتریس داشته و نیز حفاظت از جذب آب را به همراه دارد. لازم به ذکر است که تحقیقات متعدد، نشان می‌دهد که رطوبت هیچ‌گونه تأثیرات سوء شناخته‌شده‌ای را بر الیاف کربن به دنبال ندارد. [۲۱]

۱-۵-۵ رفتار عمومی کامپوزیت‌های اشباع شده با آب

کامپوزیت‌های با آب اشباع شده معمولاً کمی افزایش شکل‌پذیری در اثر نرم‌شدگی ماتریس از خود نشان می‌دهند. این مسأله را می‌توان یک جنبه سودمند از جذب آب در کامپوزیت‌های پلیمری برشمرد. همچنین افت محدود مقاومت و مدول الاستیسیته می‌تواند در کامپوزیت‌های با آب اشباع شده اتفاق بیفتد. چنین تغییراتی معمولاً برگشت‌پذیر بوده و بنابراین به محض خشک شدن کامپوزیت، ممکن است اثر خواص از دست رفته مجدداً جبران شود.

شایان توجه است که افزایش فشار هیدرواستاتیک (مثلاً در مواردی که کامپوزیت‌ها در مصارف زیر آب و یا در کف دریا به کار می‌روند)، لزوماً به جذب آب بیشتر توسط کامپوزیت و افت خواص مکانیکی آن منجر نمی‌شود. بدین ترتیب انتظار می‌رود که اکثر سازه‌های پلیمری زیر آب، دوام بالایی داشته باشند. درحقیقت، تحت فشار هیدرواستاتیک، جذب آب به دلیل بسته شدن ریزترک‌ها و ضایعات بین سطحی، کمی کاهش می‌یابد. [۲۲] لازم به ذکر است که جذب آب بر خواص عایق بودن کامپوزیت‌ها اثر می‌گذارد. حضور آب آزاد در ریزترک‌ها می‌تواند خاصیت عایق بودن کامپوزیت را به شدت کاهش دهد.

۱-۵-۶ تأثیرات حرارتی - رطوبتی

درجه حرارت، نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیزم جذب آب کامپوزیت‌ها و تأثیرات متعاقب برگشت‌ناپذیر آن بازی می‌کند. درجه حرارت، بر توزیع آب، میزان آن و سرعت جذب آن، تأثیر می‌گذارد. با افزایش دما، مقدار و سرعت جذب آب سریعاً افزایش می‌یابد. تحقیقات نشان داده است که ضایعات ناشی از قرار دادن کامپوزیت، در آب جوش به مدت چند ساعت، معادل جداشدن اجزاء کامپوزیت، و ترک‌خوردگی آن در اثر قرار گرفتن آن در آب با دمای ۵۰ به مدت ۲۰۰ روز می‌باشد. در دمای معمولی اطاق، نمونه‌های کامپوزیت هیچ‌گونه خرابی و آسیبی را بروز نداده‌اند. چنین مشاهداتی به توسعه تکنیک‌هایی برای آزمایشات تسریع شده پیرشدگی کامپوزیت‌ها منجر شده است. [۲۳]

۱-۵-۷ محیط قلیایی

در کاربرد کامپوزیت‌های با الیاف شیشه در محیط قلیایی، ضروری است که از الیاف شیشه با مقاومت بالای قلیایی استفاده نمود؛ زیرا محلول قلیایی با الیاف شیشه واکنش داده و ژل انبساطی سیلیکا تولید می‌کند. این نکته به خصوص در کاربرد کامپوزیت‌های با الیاف شیشه به عنوان میلگردهای مسلح‌کننده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. امروزه علاقه به استفاده از میلگردهای FRP از جنس شیشه در رویه‌های بتنی، به عنوان جانشین میلگردهای فولادی که با نمک‌های یخ‌زدا خورده می‌شوند و نیز در سازه‌های در مجاورت آب افزایش یافته است. با این وجود در فرآیند هیدراسیون سیمان، محلول آب با قلیائیت بالا ($PH > 12$) شده، ایجاد می‌شود. این محلول قلیایی شدید، می‌تواند بر الیاف شیشه تأثیر گذاشته و دوام میلگردهای FRP ساخته شده با الیاف شیشه را کاهش دهد. الیاف شیشه از جنس E-glass که اکثراً ارزان بوده و به کار گرفته می‌شوند، ممکن است مقاومت کافی در مقابل حمله قلیایی‌ها را نداشته باشند. استفاده از رزین وینیل استر با ایجاد یک مانع مؤثر، تا حدودی حمله قلیایی‌ها را کاهش می‌دهد. مقاومت در مقابل حمله قلیایی‌ها را می‌توان با طراحی عضو سازه‌ای برای تحمل سطح تنش‌های کمتر، بهبود داد. همچنین می‌توان برای بهبود دوام، از الیاف شیشه با مقاومت بسیار خوب در مقابل قلیا استفاده نمود.

شایان ذکر است که FRP های ساخته شده از الیاف کربن و آرامید، مطلقاً در مقابل محیط‌های قلیایی از خود ضعفی نشان نمی‌دهند.

۱-۵-۸ تأثیر دمای پائین

تغییرات شدید دما بر کامپوزیت‌ها چندین اثر عمده به دنبال دارد. اکثر مواد با افزایش دما انبساط پیدا می‌کنند. در FRP با ماتریس پلیمری، ضریب انبساط حرارتی ماتریس معمولاً در رتبه بالاتری از ضریب انبساط حرارتی الیاف قرار دارد. کاهش دما ناشی از سرد شدن در ضمن مرحله ساخت و یا شرایط عملکرد کامپوزیت در دمای پایین، باعث انقباض ماتریس خواهد شد. از طرفی

انقباض ماتریس با مقاومت الیاف نسبتاً سخت که در مجاورت ماتریس قرار گرفته‌اند، روبرو می‌شود؛ که این مساله تنش‌های پس‌ماندی را در ریز ساختار ماده به‌جای می‌گذارد. بزرگی تنش‌های پس‌ماند با اختلاف دما در شرایط عمل‌آوری و شرایط عملکرد کامپوزیت متناسب خواهد بود. با این وجود، مگر در محیط فوق‌العاده سرد، تنش‌های پس‌ماند ایجاد شده چندان قابل توجه نخواهد بود. در جایی که تغییر دمای بسیار شدید وجود دارد (مثلاً نواحی نزدیک به قطب شمال و قطب جنوب) ممکن است تنش‌های پس‌ماند بزرگی ایجاد شود که منجر به ایجاد ریزترک در ماده می‌گردد. چنین ریزترکهایی به نوبه خود سختی کامپوزیت را کاهش داده و نفوذپذیری و ورود آب از طریق لایه مرزی ماتریس و الیاف را افزایش می‌دهند و بدین ترتیب در فرآیند تجزیه کامپوزیت شرکت می‌کنند.

تأثیر بسیار مهم دیگر درجه حرارت‌های پایین‌تر، تغییر متناظر در مقاومت و سختی ماتریس است. اکثر مواد رزین ماتریس، با سرد شدن، سخت‌تر و مقاوم‌تر می‌شوند. چنین تغییراتی بر وضعیت شکست اثر می‌گذارد. برای مثال، نشان داده شده است که شکست فشاری نمونه‌های استوانه‌ای کامپوزیت با قطر ۳۸ میلیمتر در دمای ۵۰ نسبت به شکست نمونه‌های مشابه در دمای اطاق با ۱۷/۶ درصد افزایش در مقاومت فشاری ولی شکست به صورت تردتر، همراه است. [۲۴] بدین ترتیب جذب انرژی قبل از شکست در دمای پایین‌تر نسبت به دمای اطاق، بیشتر خواهد بود. این جنبه ویژه از نظر آزاد شدن انرژی زیاد در لحظه شکست، در طراحی کامپوزیت‌هایی که تحت بارهای ضربه‌ای و در دمای پایین قرار می‌گیرند، باید در نظر گرفته شود.

۱-۵-۹ تأثیرات سیکل‌های حرارتی در دمای پایین (یخ‌زدن - ذوب شدن)

به جز در مواردی که کامپوزیت درصد قابل توجهی حفره‌های متصل به یکدیگر پر از آب داشته باشد، تأثیرات یخ‌زدن و ذوب شدن در محدوده دمایی متداول (۳۰ تا -۲۰) بر مقاومت، جزئی بوده و حائز اهمیت نیست. کامپوزیت‌های ساخته شده از فایبرهای شیشه که به طور متداول در دسترس

هستند، در حدود ۰/۴ درصد حفره دارند که اجازه یخزدگی قابل توجهی را نداده و امکان هیچ‌گونه آسیب جدی را فراهم نمی‌کند.

با این وجود، سیکل‌های حرارتی در دمای پایین اثرات دیگری را بر کامپوزیت‌ها می‌گذارد. تنش‌های پس‌ماند در موارد کامپوزیت، بدلیل تفاوت‌های موجود در ضرائب انبساط حرارتی اجزاء موجود در ریز ساختار ماده، ایجاد می‌شود. در شرایط دمایی بسیار پایین، چنین تنش‌هایی می‌تواند منجر به تشکیل ریزترک‌ها در رزین ماتریس و یا در سطح مشترک رزین و فایبر شود. تغییرات رشد ریزترک در محدوده متداول دمای بهره‌برداری (از ۳۰+ تا ۲۰-)، معمولاً جزئی و یا حاشیه‌ای است؛ با این وجود تحت شرایط سیکل‌های حرارتی شدید، مثلاً بین ۶۰+ تا ۶۰-، ریزترک‌ها امکان رشد و بهم پیوستن پیدا کرده که منجر به تشکیل ترک در ماتریس و انتشار آن در ماتریس و یا در اطراف سطح مشترک ماتریس و فایبر می‌شود. [۲۵] چنین ترک‌هایی تحت سیکل‌های حرارتی طولانی مدت، از نظر تعداد و اندازه رشد کرده که می‌تواند منجر به زوال سختی و یا زوال سایر خواص وابسته به ماتریس گردد. همچنین مشاهده شده است که در دمای بسیار پایین، مقاومت کششی کلیه کامپوزیت‌های پلیمری در جهت الیاف، تمایل به کاهش دارد؛ اگر چه مقاومت‌های کششی در سایر جهات و من جمله در جهت متعامد، افزایش می‌یابد. چنین نتایجی با سخت شدن ماتریس پلیمری در دمای پایین توجیه می‌شود. از طرفی سیکل‌های حرارتی بین دمای حداکثر و حداقل در زمان طولانی، همچنین زوال مقاومت و سختی در کلیه جهات را در پی دارد. چنین تغییرات خصوصیت برای طراحی سازه‌ای در مناطق سرد، مهم تلقی می‌شوند.

۱-۵-۱۰ تأثیر تشعشع امواج ماوراء بنفش

تأثیر نور ماوراء بنفش بر ترکیبات پلیمری کاملاً شناخته شده است. تحت تابش طولانی مدت نور خورشید، ممکن است ماتریس سخت و یا بی‌رنگ شود. این مساله را عموماً می‌توان با بکارگیری یک پوشش مقاوم در مقابل اشعه ماوراء بنفش بر کامپوزیت، برطرف نمود. در همین ارتباط از جمله

مسائل بسیار قابل توجه، زوال فایبرهای پلیمری مسلح کننده نظیر آرامید است. به عنوان مثال برای آرامید ساخته شده از الیاف نازک پس از پنج هفته قرار گرفتن در نور آفتاب فلوریدا، ۵۰ درصد افت مقاومت گزارش شده است. با این وجود این اثر معمولاً سطحی است؛ بنابراین در کامپوزیت‌های ضخیم‌تر، تأثیر این زوال بر خصوصیات سازه‌ای جزئی است. در مواردی که خواص سطحی نیز مهم تلقی شوند، لازم است ملاحظات را جهت کاهش ترک خوردگی سطحی تحت اشعه خورشید، منظور نمود. [۲۶]

۱-۶- مراحل نصب و اجرا FRP

- ۱- آماده سازی مواد: باید از مواد استاندارد و کنترل شده استفاده شود.
- ۲- آماده سازی سطح: میبایستی با وسایل مختلف و فشار باد، سطح زیر بتن صاف و کثیفی‌ها و آلودگی‌ها پاک شوند و نیز میبایستی گوشه‌های تیز به صورت قوسی شکل با شعاع بزرگتر از ۳ سانتی متر شکل داده شوند.
- ۳- پر نمودن ترکها: استفاده از درزگیرها و یا رزین جهت پر نمودن ترکها و تسطیح سطح کار
- ۴- اعمال پرایمر: بعد از اطمینان حاصل کردن از خشک بودن سطح کار، پرایمر و سخت کننده به نسبت مشخص با هم ترکیب شده و با استفاده از برس‌های غلطکی به صورت یکنواخت بر روی سطح اعمال می شود. زمان لازم برای خشک شدن پرایمر در حدود ۳ الی ۱۲ ساعت می باشد.
- ۵- تسطیح سطح: خمیر رزین اولیه و سخت کننده به نسبت مشخص با هم ترکیب شده و بعد از خشک شدن پرایمر، بر روی نقاط ضعیف کشیده شده و با استفاده از ابزارهای مختلف سطح کار صاف می شود.
- ۶- چسباندن الیاف FRP: الیاف به اندازه‌های دلخواه بریده شده و با استفاده از برس‌های غلطکی، رزین به صورت یکنواخت بر روی سطح اعمال می شود و سپس الیاف بر روی سطح

قرار داده شده و بر روی آن صاف شده و با استفاده از برس غلطکی که به صورت رفت و برگشت و در جهت الیاف بر روی آن حرکت داده می‌شود، به رزین چسبانده و حباب‌های هوا خارج می‌شوند و سپس مجدداً یک لایه رزین بر روی سطح کشیده می‌شود.

۷- نگهداری: مدت زمان نگهداری باید بیشتر از ۲۴ ساعت بوده و باید دقت شود تا پوشش

پلاستیکی که جهت جلوگیری از تماس گرد و غبار و آب باران با الیاف به کار می‌رود، با سطح کار تماس نداشته باشد.

۷-۱- بازرسی و کنترل کیفیت اجرای FRP

بعد از اتمام عملیات مقاوم سازی با مواد FRP می‌بایستی به روس‌های زیر کنترل کیفیت انجام شود:

بازرسی چشمی: بازرسی کلی تمام سطح کار الزامی می‌باشد. در این بازرسی نباید آثاری نظیر لایه لایه شدگی، فاصله، اعوجاج و فضای خالی دیده شود. در صورت مشاهده ترک و فضای خالی می‌بایستی آنها را با رزین پر نمود.

تست ضربه چکش: سه روز بعد از اتمام کار باید کل سطح کار مورد بازرسی قرار گیرد. بدین گونه که بوسیله چکش آهنی به آرامی روی سطح ضربه زده می‌شود و با نوع صدای ایجاد شده تمامی فضاهای خالی مشخص می‌شود.

تست سختی: برای هر ۲۵۰ متر مربع می‌بایستی حداقل یک تست انجام شود.

تست بیرون کشیدن در محل: برای هر ۵۰ متر مربع می‌بایستی حداقل یک تست انجام شود. نتیجه صفحه گسیختگی این تست می‌بایستی گسیختگی بتن باشد و مقاومت بر کنش نتایج مثبت ارزیابی شده، بزرگتر از ۲۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع باشد. در صورت منفی بودن نتایج می‌بایستی در فاصله ۳۰ سانتیمتری نقطه تست شده، تست‌های بیشتری صورت گیرد تا نتیجه مثبت حاصل شود. در صورت منفی بودن مجدد نتایج می‌بایستی تخریب و مجدداً اجرا شود. [۲۷]

۱-۸- رزین‌ها

طیف گسترده‌ای از رزین‌های پلیمری شامل اندودها، خمیرها، پرکننده‌ها، بتونه‌ها و چسب‌ها در سیستم‌های FRP استفاده می‌شوند. از جمله متداول‌ترین رزین‌ها می‌توان به اپوکسی‌ها، وینیل استرها و پلی استرها اشاره کرد که در گستره وسیعی از شرایط محیطی به کار می‌روند. در تولید رزین خواص زیر مورد توجه قرار می‌گیرد:

۱- سازگاری و چسبندگی به سطح بتنی

۲- سازگاری و چسبندگی با سیستم FRP

۳- مقاومت در برابر عوامل محیطی نظیر رطوبت، شوری آب، دمای بالا و محیط‌های شیمیایی در مجاورت بتن نمایان

۴- قابلیت پرکنندگی

۵- کارایی

۶- مدت زمان ماندگاری مواد اختلاط شده متناسب با شرایط اجرایی

۷- سازگاری و چسبندگی با الیاف مسلح کننده

۸- ایجاد خصوصیات مکانیکی مناسب برای کامپوزیت FRP [۲۸]

۱-۹- خواص رزین‌های اپوکسی

رزین اپوکسی مایعی است بی‌رنگ، متمایل به زرد، فرّار و سمّی که در دمای اتاق بخار می‌شود. برخی از خواص آن عبارتند از:

۱- مقاومت در برابر خوردگی بسیار زیاد

۲- زمان پخت کم

۳- زمان کم برای رسیدن به استحکام ساختمانی

۴- چسبندگی خیلی خوب به سطوح فلزی

۵- مقاومت سایشی بالا

- ۶- استحکام مکانیکی بالا
- ۷- مقاومت در برابر مواد شیمیایی مخرب
- ۸- چروکیدگی کم در حین پخت
- ۹- عدم تولید محصولات فرار جانبی در واکنش پخته شدن
- ۱۰- حفظ خواص و سازگاری حرارتی با فولاد در محدوده دمایی ۳۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد

۱-۱۰- استفاده از FRP به عنوان مسلح کننده خارجی در سازه‌ها

به دنبال فرسوده شدن سازه‌های زیربنایی و نیاز به تقویت سازه‌ها برای برآورده کردن شرایط سخت‌گیرانه طراحی، طی دو دهه اخیر تأکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم‌سازی سازه‌ها در سراسر جهان، صورت گرفته است. از طرفی، بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها به‌خصوص در مناطق زلزله خیز، اهمیت فراوانی یافته است. در این میان تکنیک‌های استفاده از FRP به‌عنوان مسلح‌کننده خارجی به دلیل خصوصیات منحصر به فرد آن، از جمله مقاومت بالا، سبکی، مقاومت شیمیایی و سهولت اجرا، در مقاوم‌سازی و احیاء سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. از طرف دیگر، این تکنیک‌ها به دلیل اجرای سریع و هزینه‌های کم جذابیت ویژه‌ای یافته‌اند.

FRP در ابتدا به‌عنوان مواد مقاوم‌کننده خمشی برای پل‌های بتن‌آرمه و هم‌چنین به‌عنوان محصورکننده در ستون‌های بتن‌آرمه مورد استفاده قرار می‌گرفتند؛ اما به دنبال تلاش‌های تحقیقاتی اولیه، از اواسط دهه ۱۹۸۰ توسعه بسیار زیادی در زمینه استفاده از FRP در مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ بطوری‌که دامنه کاربردهای آن به سازه‌هایی با مصالح بنایی، چوبی و حتی فلزی نیز گسترش یافته است. تعداد موارد کاربرد FRP در مقاوم‌سازی، تعمیر و یا بهسازی سازه‌ها از چند مورد در ۱۰ سال پیش، به هزاران مورد در حال حاضر رسیده است. اجزاء سازه‌ای مختلفی شامل تیرها، دال‌ها، ستون‌ها، دیوارهای برشی، اتصالات، دودکش‌ها، طاق‌ها، گنبدها و خرپاها تاکنون توسط مواد FRP مقاوم شده‌اند.

۱-۱۱- مقاومت سازی سازه های بتن آرمه با FRP

FRP دامنه وسیعی از کاربردها را برای مقاومت سازی سازه های بتن آرمه در مواردی که تکنیک های مرسوم مقاومت سازی ممکن است مسئله ساز باشند، به خود اختصاص داده است. برای نمونه، یکی از معمول ترین تکنیک ها برای بهسازی اجزاء بتن آرمه، استفاده از ورق های فولادی است که از بیرون به این اجزاء چسبانده می شود. این روش، روشی ساده، مقرون به صرفه و کارا است؛ اما از جهات زیر مسئله ساز است:

- زوال چسبندگی بین فولاد و بتن که از خوردگی فولاد ناشی می شود
- مشکلات ساخت صفحات فولادی سنگین در کارگاه ساختمان
- نیاز به نصب داربست
- محدودیت طول در انتقال صفحات فولادی به کارگاه ساخت (در مورد مقاومت سازی خمشی

اجزاء بلند)

نوارها یا صفحات FRP می توانند جایگزینی برای صفحات فولادی باشند. FRP برخلاف فولاد، تحت تأثیر زوال الکتروشیمیایی قرار نمی گیرد و می تواند در مقابل خوردگی اسیدها، بازها و نمک ها و مواد مهاجم مشابه در دامنه وسیعی از دما مقاومت کند. در نتیجه نیاز به سیستم های حفاظت از خوردگی نمی باشد و آماده کردن سطوح اعضاء قبل از چسباندن صفحات FRP و نگهداری از آنها بعد از نصب، از صفحات فولادی آسان تر است. علاوه بر این، الیاف مسلح کننده در FRP می توانند در موضع معین و در نسبت حجمی و جهت خاصی درون ماتریس قرار گیرند تا بیشترین کارایی به دست آید. مواد حاصله تنها با درصدی از وزن فولاد، مقاومت و سختی بالایی در جهت الیاف دارند. آنها همچنین حمل و نقل آسان تری داشته، نیازمند داربست کمتری برای نصب می باشند و می توانند برای مکان هایی که دارای دسترسی محدود هستند، مورد استفاده قرار گیرند؛ و پس از نصب، بار اضافی قابل توجهی را به سازه تحمیل نمی کنند.

روش مرسوم دیگر در مقاومسازی اعضای بتن آرمه، استفاده از پوشش‌هایی از نوع بتن آرمه، بتن پاشیدنی و یا فولاد می‌باشد. این روش تا جایی که مربوط به مقاومت، سختی و شکل پذیری می‌شود، کاملاً مؤثر است؛ اما باعث افزایش ابعاد مقاطع و بار مرده سازه می‌شود. همچنین این شیوه نیازمند عملیات پردردسر و تخلیه ساکنین است و به صورت بالقوه باعث افزایش نامطلوب سختی اعضای بتن آرمه می‌شود. به عنوان یک جایگزین، صفحات FRP می‌توانند به دور اجزاء بتن آرمه پیچیده شوند و افزایش قابل توجه مقاومت و شکل پذیری را به دنبال داشته باشند؛ بدون آن که تغییر زیادی در سختی ایجاد نمایند. یک نکته مهم در ارتباط با مقاومسازی اعضا با استفاده خارجی از FRP آن است که باید درجه مقاومسازی (نسبت ظرفیت نهایی عضو مقاوم شده به ظرفیت نهایی عضو مقاوم نشده) را محدود کنیم تا حداقل سطح ایمنی در حوادثی مانند آتش‌سوزی که منجر به از دست رفتن کارایی FRP می‌شوند، حفظ گردد.

۱-۱۱-۱ موارد مقاومسازی با الیاف FRP

از جمله موارد مقاوم سازی با الیاف پلیمری بدین شرح می باشد:

- افزایش کرنش ستونهای بتنی با استفاده از دورپیچ های FRP
- تقویت خمشی تیرهای بتنی
- تقویت برشی یا افزایش شکل پذیری تیرها یا ستونهای بتنی
- تقویت خمشی و برشی دیوارهای برشی بتنی
- تقویت خمشی و برشی دالها
- تقویت اتصالات
- افزایش مقاومت در برابر عوامل محیطی مانند خستگی، خوردگی، رطوبت، تغییر دما و....
- افزایش مقاومت، عمر مفید، بهسازی و مقاوم سازی تاسیسات و تجهیزات (سازه های خاص)
- تقویت عرشه پل با استفاده از الیاف کربن

۱-۱۳-۱ افزایش کرنش ستون‌های بتنی با استفاده از دورپیچ‌های FRP

هنگامی که ستون یا یک عضو فشاری تحت اثر بارهای لرزه‌ای قرار می‌گیرد، مسئله ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری ستون اهمیت می‌یابد، بنابراین لازم است مقاوم‌سازی و بهسازی ستون همراه با افزایش شکل‌پذیری باشد.

با افزایش میزان بار وارده بر ستون، بتن تمایل دارد در جهت عمود بر جهت اعمال بار از هم باز شود. محصور کردن عرضی بتن (دورپیچ کردن) توسط افزودن لایه‌هایی از الیاف شیشه مقاومت نهایی ستون را دو برابر افزایش می‌دهد و البته تأثیر مهم‌تر این الیاف در افزایش پنج برابری در ظرفیت تغییر شکل بتن است.

تقویت خمشی تیرهای بتنی با توجه به اینکه الیاف FRP مقاومت کششی بسیار بالایی نسبت به ورق‌های فولادی دارند (در حدود ۷ برابر)، استفاده از این الیاف برای تقویت خمشی تیرهای بتنی گزینه مناسبی است. با چسباندن صفحات FRP به قسمت تحتانی تیر بتنی (بخشی که به کشش می‌افتد) که تحت نیروی خمشی قرار گرفته، مقاومت خمشی تیر به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج آزمایشات مختلف نشان می‌دهد که سختی تیرهای تقویت شده با این الیاف، بعد از ترک خوردگی بسیار بیشتر از سختی تیرهای تقویت نشده بعد از ترک خوردگی است که این مسئله در هنگام زلزله بسیار کار آمد و مفید است.

۱-۱۱-۲ تقویت برشی یا افزایش شکل‌پذیری تیرها یا ستون‌های بتنی

هنگامی که عضوی را برای افزایش مقاومت خمشی با استفاده از الیاف FRP تقویت می‌کنیم، آن عضو باید تحمل نیروی برشی اضافی بوجود آمده به علت افزایش مقاومت خمشی را داشته باشد. باید توجه داشته باشیم که افزایش تقویت داخلی تیرها (خاموت‌ها) به منظور بالابردن ظرفیت برشی و مقاومت نهایی تیر بتنی، بیش از یک مقدار مشخص امکان‌پذیر نیست. لذا لایه‌های FRP را با هدف افزایش مقاومت برشی، به صورت عرضی روی جان تیر مورد نظر می‌چسبانیم. همچنین سیستم‌های

FRP با دور پیچ کردن ستون‌ها باعث بهبود ظرفیت فشاری بتن، کاهش طول وصله‌ها و افزایش مقاومت برشی در آنها می‌گردند.

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

دیوار برشی روشی مطمئن برای مقابله با نیروهای جانبی در سازه‌های بتنی است. هم اکنون بسیاری از ساختمانهای دارای دیوار برشی در صورت وقوع زلزله دچار آسیب دیدگی جدی و حتی انهدام می‌شوند، زیرا دانش امروز نشان داده که بسیاری از دیوار برشی‌های حادث شده در سال های قبل به دلیل کمبود مقاومت خمشی یا برشی و بخصوص شکل پذیری، آسیب پذیر و ناکارآمد هستند. به همین جهت بسیاری از این ساختمان‌ها به پایان عمر مفید خود نزدیک شده‌اند.

اخیراً استفاده از الیاف FRP با توجه به خصوصیات برتر مکانیکی و راحتی در حمل و نقل به عنوان روش جایگزین مناسب در مقابل روش‌های متداول سنتی جهت تقویت برشی و خمشی و افزایش شکل پذیری دیوارهای برشی دانست.

۱-۱۱-۴ تقویت خمشی و برشی دال‌ها

اگر طراحی اولیه دال نامناسب باشد و یا دال به دلایلی احتیاج به تقویت داشته باشد، می‌توان با استفاده از الیاف FRP به شکل موثری دال‌ها را تقویت کرد. افزایش ظرفیت خمشی مثبت و منفی دال‌ها و کنترل ترک‌ها و تغییر شکل دال‌ها، از کاربردهای FRP در تقویت دال‌هاست.

۱-۱۱-۵ تقویت اتصالات

اتصالات آسیب پذیرترین قسمت سازه بوده و در عین حال سخت‌ترین جز سازه جهت تقویت می‌باشند. بسیاری از اتصالات موجود در سازه‌ها که بر اساس آیین نامه‌های قدیمی طراحی و اجرا شده‌اند، نمی‌توانند جوابگوی نیازهای امروزی باشند و در هنگام وقوع زلزله بسیار ضعیف عمل کرده و رفتار مناسبی از خود نشان نمی‌دهند.

شکل پذیری اتصالات از مهم ترین عوامل موثر در رفتار سازه های بتن آرمه می باشد. با استفاده از الیاف FRP می توان شکل پذیری اتصالات را به طور قابل ملاحظه ای (۷۷٪) افزایش داد. همچنین در نتیجه استفاده از این الیاف، مقاومت خمشی اتصالات افزایش چشم گیری خواهند داشت.

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

تغییر دما

استفاده از الیاف FRP به جای فولاد در دهه اخیر در دنیا به شدت مورد علاقه واقع شده است. مهم ترین حسن FRP ها مقاومت بسیار بالایشان در برابر عوامل خوردنده مانند رطوبت، نمک ها، اسیدها، بازها و سایر عوامل مهاجم در دماهای مختلف می باشد. سیستم FRP رفتار مناسبی نسبت به سیستم های سنتی در مقابل پدیده خزش و خستگی از خود نشان می دهد.

عمر خستگی تیرهای بتن مسلح، به عمر خستگی میلگردهای آنها محدود می شود. خصوصاً در اجزایی که در معرض سطوح بالایی از بارها و تنش های تناوبی قرار دارند، منجر به شکست ناگهانی می شود. در حالیکه خواص خستگی الیاف FRP به گونه ای است که شکست ناشی از خستگی در این ورق ها، از هیچ یک از اجزاء متصل شده به آنها آغاز نمی شود، پس در مقایسه با فولاد در پدیده خستگی رفتار بسیار عالی از خود نشان می دهند.

پدیده گسیختگی ناشی از خزش اساساً در تمام مصالح ساختمانی وجود دارد. رفتار کامپوزیت های FRP در مقابل پدیده خزش بسیار خوب است و در واقع اکثر کامپوزیت های در دسترس دچار خزش نمی شوند.

۱-۱۱-۷ ترمیم و افزایش مقاومت مقاطع آسیب پذیر موجود شامل ترک خوردگی،

یخ زدگی، کرمو بودن

به دنبال فرسوده شدن ابنیه ها و سازه های بنایی و نیاز به تقویت سازه ها برای برآورده کردن شرایط سخت گیرانه طراحی، طی دو دهه اخیر تاکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم سازی سازه ها در سراسر

جهان صورت گرفته است. از طرفی بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها به خصوص در مناطق لرزه‌خیز اهمیت فراوانی یافته است.

در این میان تکنیک‌های استفاده از الیاف FRP به عنوان مسلح‌کننده خارجی به منظور ترمیم و بهسازی آسیب‌های موجود در اعضای بتنی (ترک خوردگی، یخ زدگی، کرمی بودن بتن در اثر اجرای نادرست، خوردگی میلگردها در اثر عوامل خوردنده و فرسایش و...) به دلیل خصوصیات منحصر بفرد این الیاف از جمله: مقاومت بالا، سبکی، مقاومت شیمیایی و سهولت اجرا و اجرای سریع و هزینه‌های کم در مقاوم‌سازی و احیاء سازه‌ها، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند.

۱-۱۱-۸ افزایش مقاومت، عمر مفید، بهسازی و مقاوم‌سازی تاسیسات و تجهیزات (سازه‌های خاص)

امروزه مواد کامپوزیتی به دلیل قابلیت‌های متعدد نظیر مقاومت مکانیکی و استحکام در برابر وزن بالا، مقاومت در مقابل خوردگی و سایش، بالا بودن عمر فرسودگی، عایق بودن حرارتی و صوتی بسیار خوب و بسیاری خواص مهندسی دیگر، کاربردهای فراوانی در صنایع نفت، گاز، آبرسانی، خطوط لوله و مخازن مختلف، صنایع شیمیایی و... دارد.

برخی از این کاربردهای مهم به شرح زیر می‌باشد که نشان‌دهنده کارآمد بودن و اثرات مفید و منحصر بفرد استفاده از این تکنولوژی نوین می‌باشد.

- افزایش مقاومت و تنش مجاز خطوط لوله و مخازن
- جبران ضعف‌های ناشی از خوردگی‌های خطوط داخل و خارج لوله
- محافظت از سیستم‌های تاسیساتی در برابر عوامل خوردنده داخلی و خارجی
- مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای سیلوها، مخازن، برج‌های خنک‌کننده و دودکش‌ها
- مقاوم‌سازی و بهسازی تاسیسات نفتی و پالایشگاه‌ها
- جلوگیری و رفع نشست سیستم‌های تاسیساتی

- تعمیر خطوط فرسوده با استفاده از الیاف مقاومت بالای شیشه
 - افزایش عمر مفید و کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری در طول بهره‌برداری
 - تقویت عرشه پل با استفاده از الیاف کربن
- پل‌ها به عنوان بخش بزرگی در صنعت ساخت و ساز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. هدف از مقاوم‌سازی پل‌ها با استفاده از (الیاف کربن) گسترش عملکرد و عمر پل‌ها با وجود افزایش میزان بارگذاری است. امروزه عرشه پل‌های کامپوزیتی به دلیل داشتن ساختاری بی‌نقص، کاهش بارمرده و وزن سبکتر، اجرای راحت‌تر، ظرفیت خستگی و خمشی بسیار بالا، کاهش چشم‌گیر در میزان کرنش‌های میلگردهای تحتانی تیرهای بتنی، استحکام بالا، عدم خوردگی و نگهداری راحت و... به شدت مورد علاقه واقع شده است.

۱-۱۲- مزایا و معایب استفاده از ورق‌های فولادی و پلیمری مسلح

الف) مزایای روش استفاده از ورق پلیمری مسلح نسبت به ورق فولادی

۱. مقاومت مناسب صفحات
۲. وزن مناسب صفحات
۳. حمل و نقل آسان آنها به پای کار
۴. روش‌های طراحی مناسب و قابل دسترسی
۵. آماده کردن ساده سطوح
۶. عدم نیاز به مهارهای انتهایی
۷. دوام سیستم تقویت شده
۸. مقاومت بیشتر در مقابل آتش سوزی

۹. مقاوم در برابر بارهای متناوب ، دینامیکی و تکراری (استفاده در پل ها به دلیل خستگی

ناپذیر بودن)

۱۰. افزایش رفتار شکل پذیر سازه

۱۱. رفتار تقریباً یکسان از لحاظ انبساط و انقباض بتن

۱۲. هدایت گرمایی کمتر نسبت به فولاد

۱۳. قابلیت ساخت در اندازه های مختلف

۱۴. زمان ساخت کمتر

۱۵. قابلیت پیش تنیدگی

۱۶. نگهداری آسان سیستم تقویت شده

۱۷. کاهش خطر یخ زدگی و آب شدگی

۱۸. مقاومت شیمیایی بالا در مقابل عوامل خورنده [۲۹]

ب) معایب روش استفاده از ورق پلیمری مسلح نسبت به ورق فولادی

۱. امکان صدمه دیدن مکانیکی

۲. گران بودن صفحات پلیمری مسلح نسبت به صفحات فولادی [۳۰]

فصل دوم

پدیده خستگی

۲-۱- مقدمه

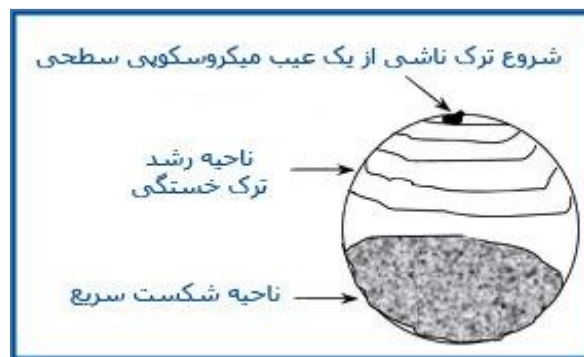
از سال ۱۸۳۰ مشخص شده است که وقتی مواد تحت یک بارگذاری نوسانی و تکراری دینامیکی قرار می‌گیرند در تنشی به مراتب کمتر از وقتی که تحت بارگذاری ثابت قرار دارند می‌شکنند. شکست در اثر بارگذاری دینامیکی را خستگی گویند. عملاً حدود ۹۰ درصد همه شکست‌های مکانیکی در اثر خستگی است. بارگذاری استاتیکی، بارگذاری است که با گذشت زمان نوع و مقدار بار همواره ثابت می‌ماند. عملاً تعداد کمی از سازه‌ها در معرض بارگذاری استاتیکی هستند. مثلاً بر اجزاء یک پل همواره بار ثابتی اعمال نمی‌شود. ممکن است در یک روز ترافیک روی پل سنگین‌تر باشد و در روزی دیگر سبک‌تر. در بارگذاری دینامیکی نوع بار و خصوصاً مقدار بار متغیر است. برای جلوگیری از کارافتادگی قطعات در بارگذاری استاتیکی باید مراقب باشیم بار به تنش تسلیم آن جسم نرسد. در اجسام ترد نباید تنش به تنش شکست برسد. چنین جسمی هیچ‌گاه تحت تنشهای مجاز مذکور نمی‌شکند. اما در صورتی که مقدار بار متغیر باشد جسم در مدت زمان معینی می‌شکند. البته شروع آسیب خستگی دارای شرایط زیر است:

- تنش دینامیکی وارده باید از یک سطحی بالاتر باشد.
- حداقل سطحی از تنش بصورت دینامیکی (متغیر) به آن اعمال شود.
- قطعه در یک مدت زمان مشخص تحت شرایط فوق قرار بگیرد. (آسیب خستگی یک آسیب زمان‌بر است)

در خستگی در طول زمان شکست شکل قطعه عوض نمی‌شود، زیرا همواره تنش اعمالی از تنش تسلیم کمتر است. پس، از نظر میکروسکوپی در قطعه پلاستیسیته نداریم. خستگی از این نظر که بدون اخطار قبلی اتفاق می‌افتد خطرناک است. خستگی فلزات وقتی اتفاق می‌افتد که فلز تحت تنش تکراری یا نوسانی قرار گیرد که منجر به شکست ناگهانی قطعه می‌گردد. با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند، خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشت می‌شود که عامل

حداقل ۹۰ درصد شکست‌های ناشی از دلایل مکانیکی حین کار، **خستگی** باشد. بطور کلی شکست‌هایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می‌دهند، شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. هیچ گونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می‌شکند، وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل خستگی از آن استفاده کرد.

دلیل عمده خطرناک بودن شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن اتفاق می‌افتد. خستگی به صورت شکستی با ظاهر ترد، بدون هیچ گونه تغییر شکل ناخالص در شکست، نتیجه می‌شود. معمولاً شکست خستگی از ظاهر سطح شکست تشخیص داده می‌شود، که از یک ناحیه هموار حاصل از عمل ساییش با اشاعه ترک در مقطع و یک ناحیه ناهموار که در هنگام عدم تحمل بار توسط مقطع، در قطعه به صورت نرم شکسته شده است، تشکیل می‌شود. غالباً پیشرفت شکست توسط یک دسته حلقه نشان داده می‌شود، که از نقطه شروع شکست به طرف داخل پیشرفت می‌کند. شکل زیر چگونگی گسترش ترک و شکست ناگهانی یک نمونه را نشان می‌دهد. [۳۱]



شکل (۲-۱) ۱۰

مشخصه دیگر شکست خستگی این است که معمولاً شکست در نقطه وجود تمرکز تنش، مانند یک گوشه تیز یا شیار، یا در یک تمرکز تنش متالورژیکی مانند ناخالصی، رخ می‌دهد. سه عامل عمده برای وقوع شکست خستگی ضروری هستند. این عوامل عبارتند از:

- استحکام کششی حداکثری به مقدار بسیار زیاد

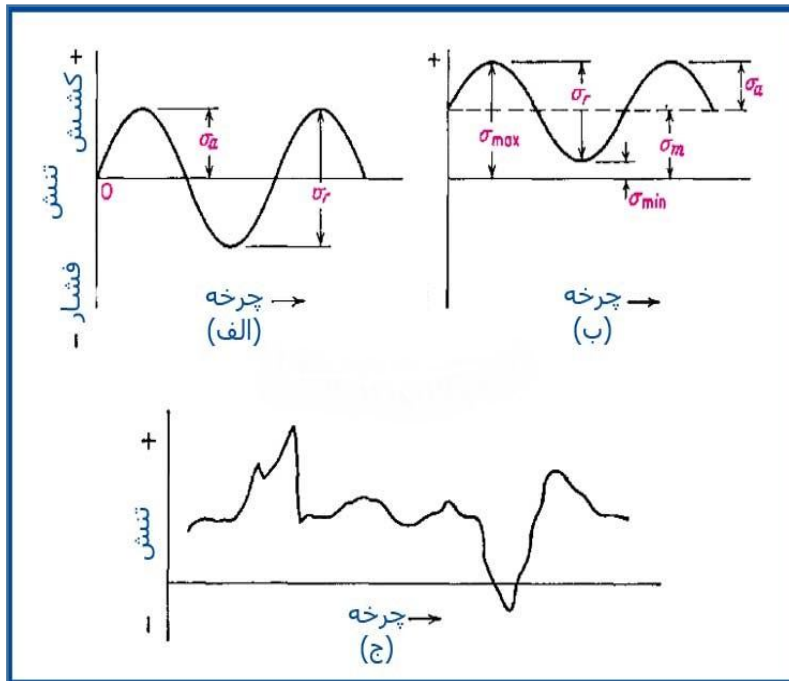
رجوع شود به مرجع [۳۱] ۱۰

- تغییرات به حد کافی زیاد یا نوسانی در تنش وارده به قطعه
- زیاد بودن چرخه‌های تنش وارده به قطعه

علاوه بر این، متغیرهای دیگری مانند تمرکز تنش، خوردگی، دما، بار اضافی، ساختار متالورژیکی، تنش‌های باقیمانده و تنش‌های مرکب هم وجود دارند که شرایط را برای ایجاد تنش خستگی تقویت می‌کنند.

۲-۲- چرخه‌های تنش خستگی

در شکل زیر چرخه‌های نمونه‌ای تنش خستگی نشان داده شده است.



شکل (۲-۲) ۱۱

قسمت (الف)، چرخه کاملاً معکوس تنش سینوسی شکل را نشان می‌دهد. این چرخه یک حالت آرمانی است که توسط دستگاه خستگی محور چرخان مور تولید شده و در عمل از چرخش محوری با

رجوع شود به مرجع [۳۱] ۱۱

سرعت ثابت و بدون اضافه بار به دست می‌آید. در این نوع چرخه تنش، تنش‌های حداکثر و حداقل برابرند.

قسمت (ب)، یک چرخه تنش تکراری را نشان می‌دهد که در آن تنش حداکثر و حداقل با هم برابر نیستند. در این نمودار هر دو تنش، کششی هستند. ولی یک چرخه تکراری می‌تواند شامل تنش‌های کششی و فشاری و یا تنش‌های فشاری باشد.

قسمت (ج)، چرخه تنشی مرکبی را نشان می‌دهد که در قطعه‌ای مانند بال هواپیما و در اثر تندباد تحت بارهای اضافی دوره‌ای غیر قابل پیش بینی، قرار می‌گیرد.

چرخه تنش نوسانی متشکل از دو مولفه می‌باشد، یک تنش متوسط یا پایدار σ_m و یک تنش تناوبی یا متغیر σ_a دامنه تنش نیز با نماد σ_r نشان داده می‌شود. این مقادیر با استفاده از فرمول‌های زیر بدست می‌آیند:

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1-2) \quad \text{دامنه تنش}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2-2) \quad \text{تنش تناوبی}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3-2) \quad \text{تنش متوسط}$$

۲-۳- منحنی S-N

روش اصلی ارائه داده‌های مهندسی درباره خستگی، استفاده از منحنی S-N است که نموداری از تنش S بر حسب تعداد چرخه‌های N می‌باشد که منجر به شکست قطعه می‌شوند. تقریباً همواره برای N، یک مقیاس لگاریتمی در نظر گرفته می‌شود. مقادیر تنش در این نمودار، معمولاً تنش‌های اسمی هستند، یعنی تمرکز تنش در نظر گرفته نمی‌شود.

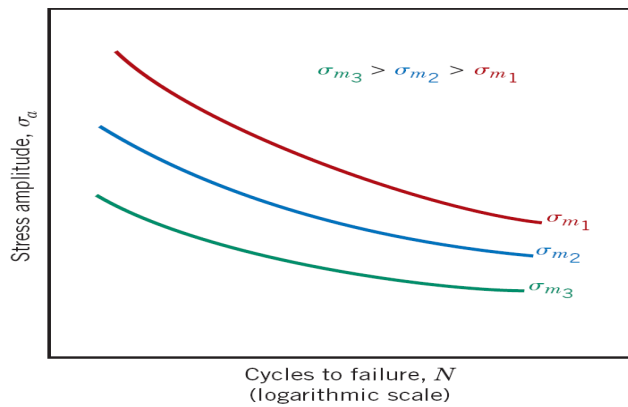
رابطه S-N برای یک مقدار معین σ_m ، R یا A تعیین می‌شود. تعیین خواص خستگی مواد در حالت خمش معکوس کامل که در آن تنش متوسط صفر است، به دست می‌آید. شکل (۲-۳) منحنی‌های نمونه ای S-N را که از تست خستگی (چرخش محور) به دست آمده، نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است، تعداد چرخه‌های تنشی که فلز قبل از شکست می‌تواند تحمل کند، با کم شدن تنش، زیاد می‌شود. آزمایش‌های خستگی در تنش‌های کم معمولاً در 10^7 چرخه و گاهی برای فلزات غیر آهنی در 5×10^8 چرخه انجام می‌شوند. برای تعداد کمی از مواد مهم مهندسی مانند فولاد و تیتانیوم، منحنی S-N در یک تنش حدی ویژه، افقی می‌شود. در زیر این تنش حدی، که حد خستگی یا حد تحمل نامیده می‌شود، ماده احتمالاً تعداد نامحدودی چرخه را بدون اینکه بشکند، تحمل می‌کند. در بیشتر فلزات غیر آهنی، مانند آلیاژهای مس، منیزیم و آلومینیوم، منحنی S-N با زیاد شدن تعداد چرخه‌ها، به تدریج به طرف پایین شیب پیدا می‌کند. این مواد دارای حد خستگی واقعی نیستند، چون منحنی S-N آنها هیچ وقت افقی نمی‌شود. در چنین مواردی مشخص کردن خواص خستگی ماده با به دست آوردن استحکام خستگی در تعداد چرخه‌های اختیاری، مثلاً 10^8 چرخه، امری رایج است. [۳۱]

۲-۴- مکانیزم خستگی

مکانیزم خستگی شامل دو مرحله است: جوانه‌زنی ترک و رشد ترک. جوانه‌زنی ترک از مکان‌های تمرکز تنش نظیر سوراخ‌ها، گوشه‌های تیز، ترک‌های سطحی و مانند آن‌ها شروع می‌شود. در صورت عدم وجود این عوامل ترک‌های اولیه حین اعمال بارهای سیکلی به وجود می‌آید. طبیعت تکرار شونده بارهای اعمالی باعث می‌شود تغییرات (مثلاً تغییر شکل پلاستیک) در مکان‌هایی خاص (مثلاً نزدیک ناخالصی‌های درونی) متمرکز شود و با تجمع تغییرات در این نواحی ترک اولیه ایجاد می‌شود. این ترک اولیه در هر سیکل مقداری رشد می‌کند و در نهایت پس از رسیدن به طول بحرانی ترک رشد می‌کند. [۳۱]

۲-۵- عوامل موثر بر عمر خستگی

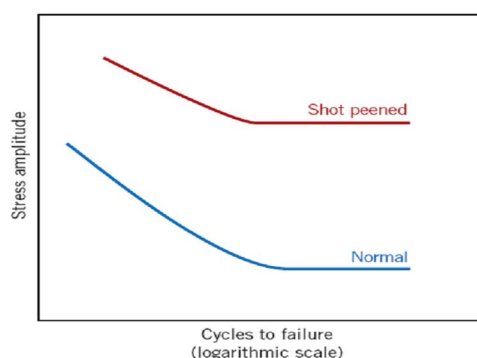
- ۱- تنش متوسط اعمالی: افزایش تنش متوسط اعمالی باعث کاهش عمر خستگی می‌شود.
- ۲- عوامل طراحی: وجود نقاطی که باعث تمرکز تنش می‌شود، عمر خستگی را کاهش می‌دهد.
- ۳- عملیات سطحی: در سطح قطعه معمولاً ترک وجود دارد که می‌تواند به علل گوناگون باشد مثل ترک‌های حاصل از برش، ماشین کاری، خراش ایجاد شده در اثر تماس با محیط و ترک‌هایی که روی سطح ایجاد می‌شود باعث کاهش عمر خستگی می‌شود. انجام پالیش روی سطح نیز باعث افزایش عمر خستگی می‌شود.



شکل (۲-۳) ۱۲

ایجاد تنش‌های فشاری بر روی سطح باعث می‌شود که از پیشروی ترک‌های روی سطح جلوگیری شده و عمر خستگی را زیاد می‌کند. یکی از راه‌های ایجاد تنش فشاری در سطح قطعه پرتاب گلوله به سطح است. برخورد گلوله به سطح باعث تغییر شکل پلاستیک در نواحی نزدیک سطح می‌شود. این تنش‌های فشاری باعث جلوگیری از پیشروی سطح شده و عمر خستگی را زیاد می‌کند. به این عملیات Shot peen گفته می‌شود. [۳۱]

رجوع شود به مرجع [۳۱] ۱۲



شکل (۲-۴) ۱۳

۲-۶- خصوصیات ساختاری خستگی

در مطالعات تغییرات ساختاری اصلی در فلزی که به آن تنش چرخه‌ای اعمال می‌شود، فرایند خستگی برای سهولت درک به مراحل زیر تقسیم شده است:

۱. **شروع ترک:** شامل ایجاد اولیه عیب خستگی که با عملیات تابانیدن مناسب برطرف می‌شود.
۲. **پرشیدن ترک نوار لغزش:** عبارت است از عمیق شدن ترک اولیه روی صفحات با تنش برشی زیاد، این مرحله غالباً رشد ترک مرحله ۱ نامیده می‌شود.
۳. **شکست ترک روی صفحاتی با تنش کششی زیاد:** عبارت است از رشد یک ترک معین در جهت عمود بر تنش کششی حداکثر. این مرحله معمولاً رشد ترک مرحله ۲ نامیده می‌شود.

۴. **شکست نرم نهایی:** هنگامی رخ می‌دهد که طول ترک به اندازه کافی برسد، طوری که سطح مقطع باقیمانده نتواند بار وارده را تحمل کند.

سهیم نسبی هر مرحله از کل چرخه‌های مسبب شکست به شرایط آزمایش و ماده بستگی دارد. اما کاملاً مشخص شده است که یک ترک خستگی می‌تواند قبل از اینکه ۱۰ درصد عمر کل نمونه منقضی شود، تشکیل شود. البته در تصمیم‌گیری در مورد زمانی که یک نوار لغزش عمیق شده

رجوع شود به مرجع [۳۱] ۱۳

می‌تواند ترک نامیده شود، ابهام زیادی وجود دارد. به طور کلی، سهم بیشتری از کل چرخه‌های مسبب شکست به اشاعه ترک‌های مرحله ۲ در خستگی کم چرخه تعلق دارد تا خستگی پرچرخه. در صورتی که رشد ترک در مرحله ۱ برای خستگی پرچرخه و تنش کم، بیشتر است. اگر تنش کششی زیاد باشد، مانند خستگی در نمونه‌های با شیار تیز، رشد ترک مرحله ۱ به هیچ وجه قابل مشاهده نیست.

بررسی ساختاری دقیق خستگی این واقعیت را نشان می‌دهد که معمولاً ترک‌های خستگی در یک سطح آزاد شروع می‌شوند. در موارد نادری که ترک‌های خستگی از قسمت داخلی شروع می‌شوند، همیشه مرزی مانند حد فاصل یک لایه سطحی کربوره شده و فلز اصلی، باید وجود داشته باشد. خستگی شباهت‌هایی با جریان مومسان و شکست تحت تغییرشکل تک جهتی یا ایستا دارد. بررسی‌های گوف نشان داده است که فلز تحت کرنش چرخه‌ای توسط لغزش بر صفحات اتمی مشابه و در همان جهات بلور شناسی کرنش تک جهتی تغییرشکل می‌دهد. در حالی که لغزش در تغییر شکل تک جهتی معمولاً در تمام دانه‌ها منتشر می‌شود، در خستگی فقط در بعضی دانه‌ها خطوط لغزش مشاهده می‌شود و در دانه‌های دیگر هیچ اثری از لغزش وجود ندارد. به طور کلی خطوط لغزش هنگام چند هزار چرخه اول تنش تشکیل می‌شوند. چرخه‌های پی‌درپی خطوط لغزش اضافی تولید می‌کنند، ولی تعداد خطوط لغزش مستقیماً با تعداد چرخه‌های تنش مناسب نیست. لغزش قابل رویت در بسیاری از فلزات خیلی زود به مقدار اشباع می‌رسد، که این امر به صورت نواحی پیچیده‌ای از لغزش سنگین، موازی با آنچه به طور طبیعی یک نوار لغزش بود، مشاهده می‌شود. نوارهای لغزش حین خستگی به معنای تشکیل ترک نخواهد بود.

یک جنبه مهم ساختاری که به نظر می‌رسد منحصر به تغییر شکل خستگی باشد، تشکیل سطحی از برآمدگی و شیار است که فرورفتگی‌های نوار لغزش و برآمدگی‌های نوار لغزش نامیده می‌شود. انجام عملیات فلزننگاری خیلی دقیق بر قسمت‌های مخروطی سطح نمونه نشان داده است که ترک‌های خستگی در مکان‌های فرورفتگی و برآمدگی شروع می‌شوند. تجربیات زیادی نشان می‌دهند

که لغزش متقاطع در فرایند ایجاد برآمدگی اهمیت زیادی دارد. مثلاً تولید شکست خستگی در بلورهای یونی ویژه‌ای که به سادگی لغزش متقاطع نمی‌کنند مشکل بوده و تولید شکست خستگی در بلورهای روی که طوری جهتدار می‌شوند تا فقط به صورت لغزش آسان تغییر شکل دهند نیز خیلی مشکل است. از طرف دیگر در آلومینیوم خالص، که لغزش متقاطع آن بی‌نهایت ساده است، برآمدگی نوار لغزش ایجاد نمی‌شود (بر خلاف بیشتر آلیاژهای آلومینیم). حال وکاترل مکانیزمی برای تشکیل برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌ها پیشنهاد کرده‌اند. این مکانیزم به انجام لغزش پی‌درپی عمل می‌کنند تا دو پله سطحی تولید شود. هنگامی که تنش فشاری می‌شود، روی اولین سیستمی که شروع به کار می‌کند فرورفتگی توسط لغزش تشکیل می‌شود و هنگامی که سایر سیستم‌های لغزش به کار می‌افتند، برآمدگی تشکیل می‌شود. [۳۱]

فصل سوم

مروری بر مطالعات گذشته

همان طور که می‌دانیم پل‌های معلق با دهانه بلند اغلب در معرض چند نوع بار دینامیکی قرار دارند بویژه آن‌هایی که در مناطق مستعد باد قرار گرفته‌اند یا تحت باروسایل نقلیه و قطار بطور هم‌زمان قرار می‌گیرند. از این‌رو ارزیابی پدیده خستگی برای حصول اطمینان از ایمن بودن پل‌ها انجام می‌گیرد. در یک مطالعه خاص مهندسین چینی به نام‌های چن، شو، شا، لی و ووئنگ [۳۲] به دنبال ایده‌ای جهت تحلیل پدیده خستگی در پل‌های معلق با دهانه بلند تحت بارگذاری چندگانه با دخالت دادن شبیه‌سازی نرم افزاری و سیستم مانیتورینگ سلامت سازه بودند. آن‌ها پل تسینگما در هنگ کنگ را به‌عنوان یک نمونه در نظر گرفتند. سپس از یک روش مهندسی محاسباتی جهت تحلیل تنش دینامیکی پل تحت بارریل راه‌آهن، بزرگراه و همچنین بار باد استفاده نمودند. پس از آن محل‌های بحرانی پل را به‌عنوان عناصر کلیدی پل در نظر گرفتند و پایه‌های داده‌ای را برای ثبت پاسخ تنش دینامیکی در این نقاط ایجاد کردند. تاریخچه‌های زمانی تنش‌های دینامیکی ناشی از بارگذاری منفرد در طی عمر طراحی پل‌ها براساس این پایه‌های داده‌ای ایجاد گردید. پس از آن تاریخچه زمانی تنش‌های متناظر با ترکیب بارگذاری‌ها نیز گردآوری شد. در نهایت تحلیل خستگی برای محاسبه تجمعی آسیب ناشی از پدیده خستگی در طول ۱۲۰ سال عمر طراحی پل انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحلیل نشان داد که در نظر گرفتن تأثیر ترکیب بارهای اعمالی در تحلیل پدیده خستگی پل‌های معلق با دهانه بلند امری ضروری است.

افزایش بارگذاری‌های موثر بر طراحی پل‌ها نیاز به روش‌های مقاوم‌سازی سریع الانجام، موثر و بادوام را پررنگ‌تر می‌کند. استفاده از ورق‌های فولاد جهت تقویت راه‌حلی رضایت‌بخش است، اما پلیمرهای مسلح به الیاف کربن (CFRP) مزایای بیشتری هم‌چون مقاومت در برابر خوردگی، وزن کم و مقاومت مکانیکی بالا دربر خواهد داشت. در پژوهشی که توسط اندرو بارس و چارلز مایس [۳۳] انجام شد، کارایی این سیستم مقاوم‌سازی به عنوان یک جایگزین ورق فولادی در برابر پدیده خستگی بررسی گردید. در این پژوهش ۵ تیر بتن آرمه شامل ۳ تیر مقاوم شده با ورق‌های CFRP و ۲ تیر کنترل جهت آزمایش استفاده شدند. سه روش اعمال بارگذاری روی نمونه‌ها در این آزمایش استفاده

شد. نوع اول: بارگذاری یکسان برای هر دونوع تیر مقاوم شده و نشده با ورق؛ نوع دوم: بارگذاری با دامنه تنشی یکسان در آرماتورها در هر دو نوع تیر؛ نوع سوم: بارگذاری با درصدی یکسان از ظرفیت نهایی هر تیر. پس از آزمایش، مشاهده شد که گسیختگی ناشی از خستگی در آرماتورها عامل حاکم و کنترل کننده خرابی تیر است و به نظر منطقی بود که انتظار داشته باشیم که هر دونوع تیر مقاوم شده و نشده با مقادیر قابل قیاس دامنه تنش در آرماتور عمر مقاومت یکسانی در برابر خستگی داشته باشند.

دریکی از پژوهشاتی که توسط *لو، فاستر و اسمیت [۳۴]* در ارتباط با پدیده خستگی در تیرهای بتن آرمه مقاوم شده انجام شده است، یک مدل ساختاری برای اتصال پلیمر مسلح به الیاف به سطح بتن که تحت بارگذاری خستگی قرار می گرفت، ایجاد شد. کلیات این مقاله در ابتدا شامل یک برنامه اجزای محدود بود که در آن رفتار تیرهای بتنی مقاوم شده با پلیمرهای مسلح به الیاف تحلیل شد. پس از تحلیل، نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه گردید تا توانایی مدل اجزای محدود در پیش بینی دقیق عکس العمل اعضای بتن آرمه مقاوم شده با پلیمرهای مسلح به الیاف تحت بارگذاری تناوبی پدیده خستگی اثبات شود. این مدل همچنین توانایی ثبت تغییرات تغییر مکان های بیشینه، توزیع و پیشرفت کرنش ورق های پلیمری در طی افزایش تناوب های بارگذاری و تعداد تناوب های بارگذاری تا مرحله خرابی را داشت.

الروسان و م. عیسی [۳۵] در سال ۲۰۱۱ پژوهشی انجام دادند که در آن در طی یک آزمایش بارگذاری استاتیکی و آزمایش خستگی شتابدار برای بررسی عملکرد ۹ تیر بتن آرمه مقاوم شده با تعداد و آرایش مختلف ورق CFRP انجام گردید. بارگذاری روی تیرها در دامنه های تنش ۰/۲۵ تا ۰/۳۵، ۰/۴۵ تا ۰/۶۵، ۰/۶۵ تا ۰/۹ و ۰/۴۵ تا ۰/۹ تنش تسلیم اعمال شد. پس از کسب اطمینان از تطابق نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج تجربی، از نتایج تحلیلی برای درک بهتر تأثیر دامنه تنش، تعداد لایه های پلیمر و سطح تماس پلیمر با بتن بر عملکرد تیرها در برابر پدیده خستگی استفاده شد.

با بهره‌گیری از این نتایج، مشخص شد که دامنه تنش تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خیز وسط دهانه خصوصاً در دامنه تنش ۰/۴۵ تا ۰/۹ تنش تسلیم داشته است. بارگذاری تناوبی خستگی باعث ایجاد یک بازتوزیع تنش وابسته به زمان شد که تا زمان از بین رفتن مقاومت تیر در برابر خستگی این بازتوزیع سبب کاهش ناگهانی تنش بتن و افزایش تنش فولاد و ورق پلیمر گردید. در پی مشاهده این امر، محققین این پژوهش توصیه کردند که جهت احتساب کاهش سختی ناشی از خستگی، ملاحظات در طراحی تیرها در برابر خستگی در نظر گرفته شود.

پلیمرهای مسلح به الیاف کربن در طی چندسال گذشته در ترمیم و مرمت پل‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است. تحقیقات مهمی که روی رفتار سازه‌های مقاوم شده با این سیستم ترمیم در شرایط محیطی شدید تحت بار استاتیکی و نیز بار ناشی از خستگی انجام شده، هنوز نیاز به بررسی بیشتری دارد. به همین منظور، یک آزمایش توسط *اکنل و میرز [۳۶]* انجام شد تا پدیده خستگی را که باعث ایجاد تنش (ناشی از بار سرویس) روی تیرهای مقاوم شده با پلیمرهای مسلح به الیاف کربن می‌شود، بررسی نماید. در این آزمایش، تأثیر شرایط محیطی مهاجم بر اعضای مورد نظر، با قرار دادن آن‌ها در معرض دوره‌های تروخشک شدگی، دمای بالا، اشعه ماورابنفش و رطوبت نسبی مطالعه گردید. تمام تیرها تا ۲ میلیون تناوب بارگذاری بدون بروز هیچ‌گونه اشکالی در محل اتصال پلیمر با سطح بتن دوام آوردند؛ اما کاهش چشمگیر سختی خمشی در این نمونه‌ها قابل مشاهده بود. وجود نواقص در نمونه‌ها بر سختی آن‌ها تأثیر گذاشته بود و علاوه براین، میزان نواقص در نمونه‌ها تحت تأثیر اعمال تناوب‌های بارگذاری خستگی رشد محدودی داشت. در سال‌های اخیر، تلاش زیادی صورت گرفته است تا استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی ارتقا یابد. علی‌رغم پژوهش‌های گذشته در این زمینه، مطالعاتی که روی رفتار تیرهای بتنی مقاوم شده با پلیمرها مسلح به الیاف تحت بارگذاری ناشی از پدیده خستگی شده است، به نسبت محدود بوده است. این کم توجهی بیشتر در ارتباط با جنبه مقاوم‌سازی برشی می‌باشد.

در یک پروژه تحقیقاتی که توسط چالال، بوساها و بوسلهام [۳۷] انجام شده است، مقصود این بود که کارایی پلیمرهای مسلح به الیاف کربن در ترمیم تیرهای بتن آرمه در مقابل خستگی مورد آزمایش قرار گیرد. در آزمایشی که انجام شد تعدادی تیر T شکل با هدف بررسی چند پارامتر مورد آزمون قرار گرفتند. این پارامترها شامل میزان پلیمر و فولاد عرضی قرار گرفته در تیرهای بتنی بود. مهم‌ترین یافته این آزمایش این بود که نمونه‌هایی که با یک لایه CFRP ترمیم شدند تا تعداد ۵ میلیون تناوب بارگذاری سالم ماندند. برخی از آن‌ها هیچ نشانی از خرابی نداشتند که این امر نشان دهنده تأثیر پلیمر بر افزایش عمر مقاومت در برابر خستگی می‌باشد. نمونه‌هایی که با دولایه CFRP ترمیم شده بودند تا قبل از ۵ میلیون تناوب بارگذاری به مرحله تسلیم رسیدند. مود خرابی مشاهده شده در این نمونه‌ها متشکل از سه مود خرابی بود: خرد شدن تیرهای بتنی، جداشدگی ورق‌های پلیمر و جاری شدن خاموت‌ها. خرابی حاصل شده را می‌توان به دامنه بالای بارگذاری و نیز سختی بالای پلیمر مسلح به الیاف نسبت داد که ممکن است باعث تغییر توزیع تنش در مولفه‌های تحت بارگذاری شود. مقایسه بین عملکرد نمونه‌ها با فولاد عرضی و بدون فولاد عرضی به نظر بیانگر این امر است که افزودن فولاد عرضی عمر مقاومت تیرهای بتن آرمه را در برابر خستگی می‌افزاید.

در پژوهشی که در دو سال اخیر توسط الحمود، سودکی و تاپر [۳۸] انجام شده است، رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه خورده شده و ترمیم‌شده با ورق‌های پلیمرهای مسلح به الیاف کربن در برابر پدیده خستگی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش تعداد ۳۰ تیر ساخته و آزمایش شد. شکست خمشی ناشی از خستگی در ۲۹ تیر از بین آن‌ها رخ داد. مطالعه روی تیرها نشان داد که سوراخ شدن آن‌ها ناشی از خوردگی آرماتورها تنها بعد از حدود ۷ درصد کاهش جرم واقعی آن‌ها رخ می‌دهد که این سوراخ‌شدگی همزمان با کاهش کارایی تیر در اثر پدیده خستگی اتفاق می‌افتد. بنابراین عامل کنترل‌کننده مقاومت تیر بتن آرمه در برابر خستگی، مقاومت آرماتورهای آن در برابر خستگی است. ترمیم با استفاده از ورق CFRP ظرفیت خستگی تیرهای بتن مسلح خورده شده را می‌افزاید. این افزایش باعث می‌شود که ظرفیت خستگی این تیرها از تیرهای خورده نشده که ترمیم نشده بودند

و بعنوان تیرهای کنترل در نظر گرفته شدند، فراتر رود. تیرهای ترمیم شده با پلیمرهای مسلح به الیاف کربن با سطح خوردگی متوسط که پیش از انجام آزمایش خوردگی آنها به سطح زیاد رسید، کارایی قابل مقایسه‌ای در مقابل خستگی نسبت به آن تیرهایی دارند که پس از خوردگی زیاد بصورت مستقیم ، ترمیم شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند.

نتایج مطالعه‌ای دیگر در همین زمینه از لی سونگ و ژی وویو (۳۹) این حقیقت را به اثبات رسانید که خوردگی آرماتورها عمر خستگی تیرها را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد در حالی که مقاوم‌سازی تیرها با ورق CFRP کارایی تیرها را در برابر پدیده خستگی می‌افزاید. تأثیر خوردگی آرماتورها بر رفتار تیرها در برابر خستگی را می‌توان به چهار عمل نسبت داد: اولین عامل رفتار اتصال آسیب دیده بین آرماتورها و بتن اطراف آن می‌باشد. دیگر عوامل شامل کاهش سطح مقطع موثر آرماتورها، تمرکز تنش در آرماتورها و تقلیل خواص مکانیکی آرماتورهای فولادی میباشد.

پژوهشی توسط معتاز بدوی و خالد سودکی [۴۰] که به موضوع تأثیر پلیمرهای مسلح به الیاف در مقاوم‌سازی در برابر خستگی پرداخته است، به روش قرارگیری پلیمر به شکل آرماتور در تیر (NSM) اشاره می‌کند. در آزمایشی که در این پژوهش صورت گرفته است، تعداد ۹ تیر تحت بار خستگی آزمایش شدند. علاوه بر آن، دو نمونه جهت آزمودن ظرفیت تحمل آنها، تحت بارگذاری یکنواخت قرار گرفتند. تیرها ۳۵۰۰ میلیمتر طول، ۲۵۴ میلیمتر ارتفاع و ۱۵۲ میلیمتر پهنا داشتند. دامنه‌های بارگذاری مختلف در آزمایش خستگی برای رسم منحنی‌های عمر مقاومت در برابر خستگی در نظر گرفته شد. نتایج کلی نشان داد که تیرهای بتن آرمه‌ای که با روش قرارگیری پلیمر به شکل آرماتور مقاوم‌سازی شده‌اند، زمانی که تحت بار یکنواخت قرار می‌گیرند آستانه جاری شدن آنها تا ۲۶ درصد و ظرفیت نهایی آنها تا ۵۰ درصد نسبت به تیرهای کنترل (مقاوم نشده) افزوده می‌شود. همچنین تحت بارگذاری خستگی، عمر مقاومت تیرها در برابر خستگی تا ۲۴ درصد نسبت به تیرهای کنترل افزوده می‌شود. پژوهش کنندگان برای اطمینان از صحت نتایج از روش تحلیل مقطعی و نیز

ترسیم نمودار کرنش در برابر عمر خستگی استفاده کردند تا عمر مقاومت نمونه‌ها را در برابر خستگی در دامنه‌های بارگذاری تناوبی مختلف تخمین زنند. بررسی نتایج بیانگر تطابق خوبی بین نتایج پیش بینی عمر مقاومت در برابر خستگی براساس روش‌های تحلیلی با نتایج تجربی بود.

در کنار مطالعاتی که در زمینه مقاوم‌سازی اعضای بتن‌آرمه با پلیمرهای مسلح به الیاف انجام شده است، جوانب دیگر کاربرد این سیستم ترمیم هنوز قابل بررسی است. رفتار تیرهای مقاوم شده با نوار یا ورق پلیمری که در این مطالعه به بحث آن می‌پردازیم، اطلاعاتی ارزشمند در ارتباط با کارایی سیستم مقاوم‌سازی FRP ارائه می‌دهد. این مطالعه توسط آیدو، هاریس و پترو [۴۱] اثرات سیستم‌های ترمیم را بر عملکرد خمشی تیرهای بتن‌آرمه پل در برابر پدیده خستگی مورد آزمایش قرار می‌دهد. در این مطالعه، آزمایشاتی روی تیرهای T شکل با و بدون FRP که به سطح کششی آن‌ها متصل شده بود، انجام شد. هدف این آزمایش پاسخ به این سوال بود که آیا استفاده از این سیستم ترمیم قابلیت ایستادگی در برابر خستگی را دارد و تأثیری بر کارایی، رفتار و عمر مقاومت شاه تیرها در برابر خستگی خواهد داشت یا خیر؟

در این آزمایش ۸ تیر T شکل با ارتفاع ۵۰۸ میلیمتر و طول دهانه ۵/۶ متر تحت یک بار متمرکز در وسط دهانه با یک بارگذاری تناوبی با دامنه ثابت بارگذاری شدند. جزئیات این تیرها بیانگر این بود که ابعاد تیر ۶۲ درصد اندازه اصلی تیر بوده است. دو سیستم مقاوم‌سازی CFRP جهت تقویت به سطح تنه شاه‌تیرها متصل شد. این دو سیستم طوری طراحی شدند که سختی آن‌ها تقریباً با یکدیگر یکسان باشد. نتایج آزمایشات خستگی با توجه خاصی به سطح اتصال پلیمر با بتن و شکست و ازهم پاشیدگی نهایی آن تحت بارگذاری خستگی ارائه گردید. این نتایج نشان داد که رفتار این تیرهای تقویت شده در برابر پدیده خستگی بوسیله رفتار فولاد مسلح‌کننده تیرها کنترل می‌شود. عمر مقاومت تیرهای بتن‌آرمه در برابر خستگی با بکارگیری این سیستم مقاوم‌سازی افزایش می‌یابد و این باعث

کاهش تنش خستگی وارده بر فولاد خواهد شد. بدین ترتیب سختی سیستم مقاوم‌سازی بسیار پراهمیت است.

با وجود توجه روزافزون و کاربرد گسترده سازه‌های بتن‌آرمه مقاوم شده با لایه های CFRP، هنوز اطلاعات خیلی کمی در زمینه رفتار خمشی تیرهای بتن‌آرمه مقاوم شده با پلیمرهای مسلح به الیاف کربن در برابر پدیده خستگی موجود است. در طی مطالعه‌ای که توسط هفرنان و ارکی [۴۲] انجام شد، این موضوع به طور عمیق‌تری مورد توجه قرار گرفت. در این مطالعه، آزمایشی روی ۲۰ تیر ۳ متری و ۶ تیر ۵ متری انجام شد که در آن تیرها تحت بار یکنواخت و تناوبی تا مرحله شکست قرار گرفتند. سپس مقایسه‌ای بین تیرهای مقاوم شده و مقاوم نشده صورت گرفت. هدف آن‌ها این بود که تأثیر افزایش مقدار پلیمر استفاده شده را بر عمر مقاومت تیرها در برابر خستگی بررسی کنند.

ضعف طراحی شاه‌تیرهای فولادی قدیمی که آن‌ها را در برابر پدیده خستگی حساس می‌سازد، یکی از مشکلات متداول در مهندسی سازه است که امروزه با آن روبرو هستیم. خصوصیات طراحی اعضای فولادی می‌تواند با بکارگیری لایه‌های CFRP در قسمتهای کششی تحت تنش بحرانی، بطور چشم‌گیری تلقی پیدا کند. در پژوهشی که در کشورمان توسط پورفسور سعادت منش و دکتر توکلی زاده [۴۳] انجام گرفت، روی مقاوم‌سازی تعدادی تیر فولادی شکاف خورده بوسیله وصله پلیمری و آزمایش آن تحت بارگذاری خستگی مطالعه شد. در این پژوهش تعداد ۲۱ نمونه تیر جهت آزمایش آماده گردید. تیرهای مقاوم نشده نیز به عنوان تیر کنترل آزمایش شدند. تیرهای فولادی در یک آزمایش خمش چهار نقطه‌ای با فرکانس بار بین ۵ و ۱۰ هرتز مورد آزمون قرار گرفتند. دامنه های تنش به طور متفاوت بین ۶۹ تا ۳۷۹ مگاپاسکال در نظر گرفته شدند. طول و ضخامت وصله برای تمام تیرهای مقاوم شده یکسان لحاظ گردید. علاوه براین تعداد تناوب‌ها تا مرحله خرابی تیر برای همه نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد و تغییرات سختی و رشد و گسترش ترک‌ها در طی هر آزمایش

بازبینی شد. نتایج نشان داد که وصله CFRP نه تنها سبب افزایش مقاومت تیر در برابر خستگی حتی بیش از سه برابر می‌شود، بلکه میزان رشد ترک‌ها را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد.

فصل چهارم

مدل سازی و تحلیل با استفاده از

نرم افزار ABAQUS

۴-۱- مختصری درباره نرم افزار ABAQUS

ABAQUS یک نرم افزار مهندسی قدرتمند براساس روش اجزای محدود است که توانایی حل مسائل از مثال های خطی ساده تا شبیه سازی های غیرخطی پیشرفته را دارا می باشد. ABAQUS شامل یک کتابخانه بسیار گسترده از تمامی المان هایی است که برای رسم هندسی لازم باشد و همچنین شامل یک کتابخانه قدرتمند شامل بسیاری از خواص مکانیکی مواد مانند فلزات، لاستیک، پلیمرها، کامپوزیت ها، انواع بتن مسلح، انواع فوم ها، مواد ژئوتکنیک مانند انواع خاک و سنگ و... می باشد. ABAQUS یک نرم افزار شبیه ساز چند کاربردی است. از سال ۱۹۶۰ که روش های اجزا بوجود آمد نرم افزارهای متفاوتی متولد شد که از این روش استفاده می کردند. از آنجا که نرم افزارهای تحلیلی و نرم افزارها بازاری کاملاً رقابتی دارند؛ تقریباً کلیه نرم افزارهای تولید شده نرم افزارهایی قوی هستند. در این میان ABAQUS بسیاری از نقاط ضعف و اشکالات نرم افزارهای اجزای محدود دیگر را ندارد و سهولت در استفاده، مدل سازی قوی، تحلیل دقیق و سرعت بالای این نرم افزار، آن را به یک نرم افزار اجزای محدود متفاوت تبدیل کرده است. یکی از کاربردهای اولیه این نرم افزار در مدل سازی و تحلیل اسکله های نفتی تحت بار موج دریا بود. از آنجا که ABAQUS هم خوانی و هم پوشانی خوبی با نرم افزار طراح CATIA دارد؛ بسیاری از شرکت های بزرگ اتومبیل سازی برای تحلیل های پیشرفته خود به ABAQUS روی آورده اند. سهولت در دستیابی و فهم نحوه کارکرد این نرم افزار موجب گشته که جوامع دانشگاهی بین المللی، از آن بیش از نرم افزارهای دیگر در مقاله های علمی منتشر شده استفاده کنند. دقت فراوان این نرم افزار و مقایسه آن با حل عددی موجب گشته که این نرم افزار به عنوان نرم افزار استاندارد دانشگاهی لندن و MIT انتخاب شود. تئوری کامل این نرم افزار که مبتنی بر تحلیل غیرخطی المان محدود پیشرفته است، با استفاده از جدیدترین روابط و روش نگارش ریاضی در راهنمای آن موجود است. همچنین کثرت مثال های حل شده، موجب گشته که کاربران بتوانند با سرعت بیشتری مراحل آموزشی مدل سازی و آنالیز را پشت سر گذاشته و به مراحل پیچیده تحلیل

دست یابند. هر نرم افزار المان محدود دارای ویژگی های خاص و منحصر به فرد خود می باشد که از مزیت های ABAQUS به اختصار می توان به موارد زیر اشاره کرد.

المان های موجود در ABAQUS بسیار متنوع تر، ساده تر، دقیق تر و تخصصی تر از سایر نرم افزارهای مشابه است. یکی از اساسی ترین مشکلات نرم افزارهای تحلیلی موجود در بازار ضعف مدل سازی آنها می باشد. از این منظر ABAQUS می تواند با بعضی از نرم افزارهای تخصصی مدل سازی نیز رقابت کند. توانایی مونتاژ نمودن قطعات در محیط های جداگانه، سادگی در ایجاد تماس بین سطوح، قابلیت اصلاح مدل در مراحل مختلف مدل سازی و... از جمله این امکانات است.

۴-۱-۱- المان ها در ABAQUS

با توجه به مهم بودن نوع تکنیک مش بندی و نیز نوع المان مورد استفاده، کاربر می بایست اطلاعات بیشتری در زمینه المان ها داشته باشد. طیف وسیعی از المان ها در ABAQUS قابل استفاده است که از این جهت توانایی بسیار زیادی را به کاربر می دهد تا بتواند انواع مختلف مسائل را مدل کرده و تحلیل نماید. در ادامه پنج ویژگی یک المان که رفتار آن را معین می سازند نام برده شده اند.

- خانواده
- درجات آزادی
- تعداد گره ها
- روش فرمول بندی
- روش انتگرال گیری

۴-۱-۲- اصول ABAQUS

به طور کلی هر تحلیل اجزاء محدود شامل سه مرحله است:

- پیش پردازش

- حل مسئله

- پس پردازش

در همه نرم افزارهای اجزاء محدود این سه مرحله اصلی انجام می شود و تنها تفاوت آنها در نحوه انجام آن است.

۴-۱-۳- محیط نرم افزار ABAQUS

نرم افزار ABAQUS/CAE به محیط های ده گانه ای تقسیم شده است. این محیط ها عبارتند از :

- محیط Part: در این محیط کار مدل سازی هندسی قطعات انجام می گیرد.
- محیط Property: در این محیط کار تعریف خصوصیات مواد مورد تحلیل، تعریف پروفیل سطح مقطع، نسبت دادن خواص تعریف شده به قطعات و.... انجام می گیرد.
- محیط Assembly: در این محیط کار مونتاژ قطعات مختلف در صورت وجود در یک تحلیل انجام می گیرد. در واقع موقعیت هندسی قطعات را کاربر تعیین می کند.
- محیط Step: در این محیط گام های حل مساله انتخاب می شوند. در اینجا است که کاربر نوع حل گر را نیز مشخص می کند.
- محیط Interaction: در این محیط خاصیت فیزیکی تماس بین سطوح تعیین می شود.
- محیط Load: در این محیط بارگذاری و شرایط مرزی تعیین می گردد.
- محیط Mesh: در این محیط کار المان بندی مدل انجام می شود.
- محیط Job: در این محیط با تعریف یک job، کاربر شروع حل مسئله را به پردازشگر اعلام می کند.
- محیط Visualization: در این محیط کاربر نتایج حل را مشاهده می کند.

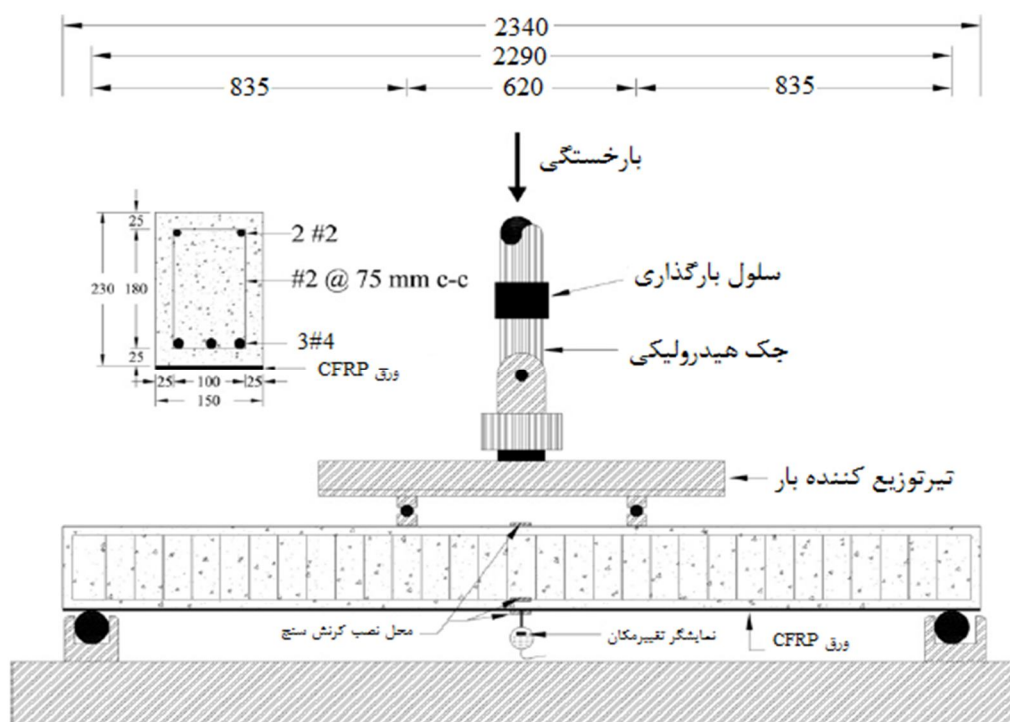
در این پایان نامه، برای انجام تحلیل های نرم افزاری به نتایج آزمایشات در یک مقاله تحقیقاتی با

عنوان " تأثیر خستگی بر عملکرد تیرهای بتن آرمه مقاوم شده با CFRP " که در سال ۲۰۱۱ توسط

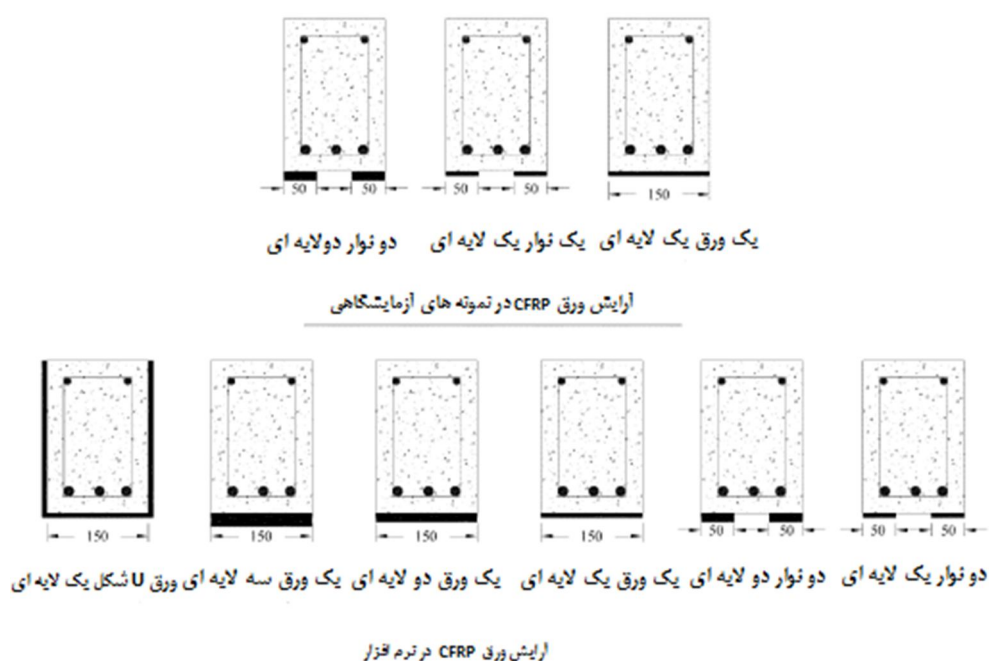
الروسان و م. عیسی در ژورنال Elsevier به چاپ رسیده است، استناد می شود. لازم بذکرست که ارزش علمی این اطلاعات با توجه به اهمیت علمی و پژوهشی مقاله، جای هیچ گونه تردید در صحت آن باقی نمی گذارد. مشخصات نمونه ها و مصالح آزمایشگاهی که ذکر خواهد شد مرتبط به آزمایشات مذکور است.

۲-۴- مشخصات نمونه ها

در این پژوهش، تعداد ۶ تیر بتن آرمه ساخته شده و سپس با ورق CFRP با آرایش های متفاوت مقاوم سازی می شود. طول همه نمونه ها ۲۳۴۰ میلی متر، عرض آن ها ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع آن ها ۲۳۰ میلی متر می باشد. این تیرها با ۳ آرماتور کششی #۴ (۱۲/۷ میلی متر) و ۲ آرماتور فشاری #۲ (۶/۳۵ میلی متر) و خاموتهای #۲ در فواصل ۷۵ میلی متری (مرکز به مرکز) مسلح شده اند. جزئیات مقطع تیرها در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. پس از گذشت ۲۸ روز از قالب ریزی بتن، ورق های CFRP در طول مورد نیاز با استفاده از چسب اپوکسی به سطح تیرها متصل شد. آرایش ورق های متصل شده شامل: یک ورق ۱۵۰ میلی متری در یک لایه، یک ورق ۱۵۰ میلی متری در دو لایه، یک ورق ۱۵۰ میلی متری در سه لایه، دو نوار ۵۰ میلی متری در یک لایه و دو نوار ۵۰ میلی متری در دو لایه می باشد. تیرهایی که با دو نوار ۵۰ میلی متری مقاوم سازی شدند، دارای سطح تماس ۱۰۰ میلی متری با بتن هستند، در حالی که تیرهایی که با یک ورق مسلح شده اند، در کل عرض ۱۵۰ میلی متری با بتن در تماس هستند. جزئیات آرماتورها و آرایش پلیمر در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل (۴-۱): مقطع تیر و دستگاه آزمایش (ابعاد بر حسب میلیمتر)



شکل (۴-۲): آرایش ورق CFRP در آزمایش و نرم افزار

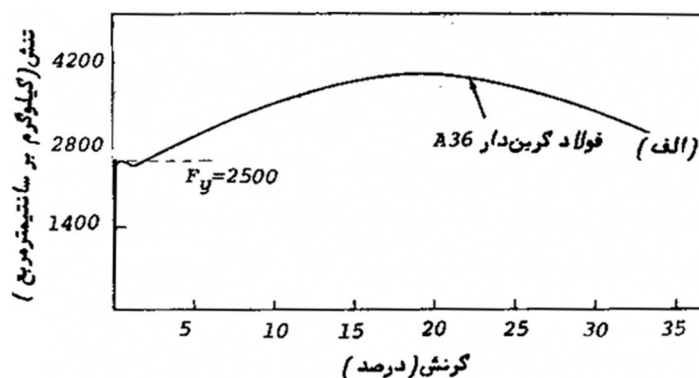
۳-۴- مشخصات مصالح آزمایشگاهی

مصالح استفاده شده در آزمایش عبارتند از: بتن C55، فولاد A36 برای ورق های بارگذاری و آرماتورها، ورق CFRP و چسب اپوکسی. مشخصات مصالح در جدول ۴-۱ ذکر شده است.

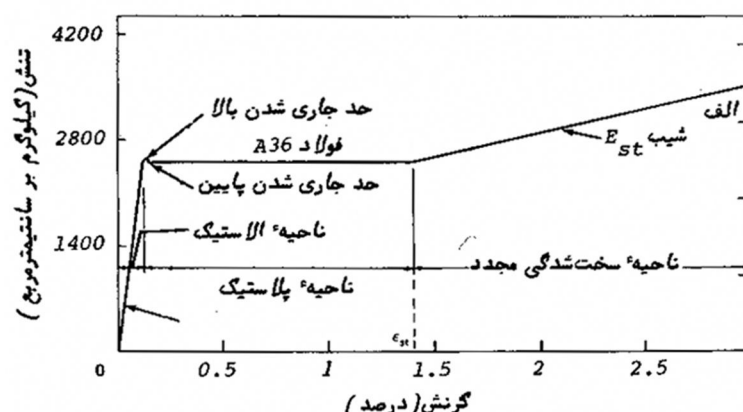
جدول (۴-۱): مشخصات مصالح آزمایشگاهی

نوع مصالح	جرم مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول یانگ (مگا پاسکال)	ضریب پواسون	ضخامت (میلیمتر)
CFRP	۱۸۰۰	۲۲۸۰۰۰	۰/۲۲	۰/۱۶۵
چسب اپوکسی	۱۰۰۰	۳۰۰۰۰	۰/۲۹	۰/۳۴۳
نوع مصالح	جرم مخصوص	مدول یانگ (مگا پاسکال)	ضریب پواسون	مقاومت مشخصه (مگا پاسکال)
بتن C55	۲۵۰۰	۳۵۰۶۳	۰/۱۶	۵۵
فولاد A36	۸۰۰۰	۲۰۶۰۱۰	۰/۳	۲۵۰

نمودار تنش - کرنش فولاد استفاده شده برای ورق های بارگذاری و تکیه گاهی که از نوع A36 انتخاب شده است طبق شکل ۴-۳ و ۴-۴ می باشد.



شکل (۴-۳): نمودار تنش-کرنش فولاد



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

۴-۴- روند انجام و ابزار آزمایش

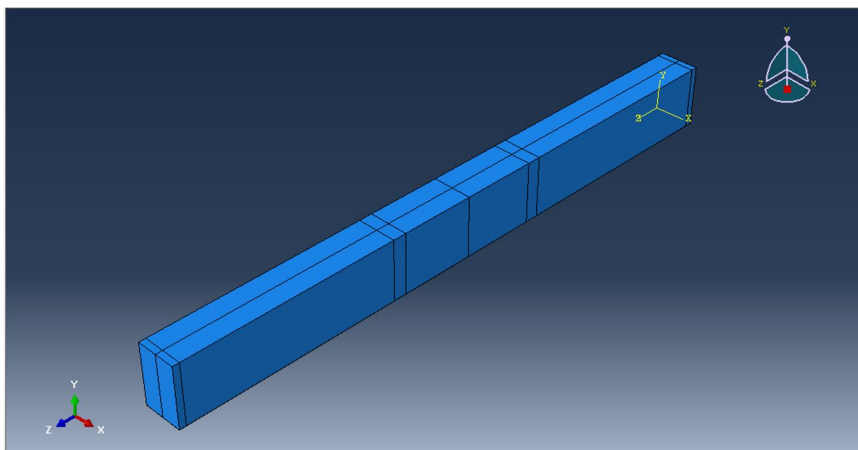
تیرها با شرایط تکیه‌گاهی دوسر ساده و طول دهانه ۲۲۹۰ میلیمتر تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌ای قرار گرفتند. سه تیر با یک لایه ورق CFRP مقاوم‌سازی شدند و سپس بطور عملی تحت آزمایش تا مرحله خرابی قرار گرفتند. جهت انجام آزمایش خستگی، نمونه‌ها (تیرهای کنترل) قبل از شروع بارگذاری تناوبی خستگی، در ابتدا تا مقدار بار فراتر از بار ترک خوردگی بارگذاری شده، و سپس تا حداکثر بار موردنظر، آزمایش با شبیه‌سازی پدیده خستگی (در طی زمانی کمتر از زمانی که برای مشاهده خستگی لازم است) ادامه پیدا کرد. به منظور بازبینی صدمات ناشی از بار تناوبی و خیز متناظر و نیز کرنش بوجود آمده، بارگذاری تناوبی خستگی در دامنه تنش صفر تا ۰/۹ تنش تسلیم در تعداد مختلف تناوب از ۰/۰۱ تا ۲ میلیون روی تیرهای کنترل اعمال گردید. برای نمونه‌های دیگر، بارگذاری خستگی در دامنه‌های تنش متفاوت اعمال شد طوری که یا تیر به مرحله خرابی برسد و یا بارگذاری تا ۲ میلیون تناوب ادامه پیدا کند.

در انتهای بارگذاری تناوبی خستگی، تیرهایی که هنوز به مرحله خرابی نرسیده بودند تا مرحله خرابی تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند. سه کرنش سنج به سطوح بالا و پایین تیرهای بتنی جهت اندازه گیری کرنش‌های کشش و فشاری و نیز کرنش فولاد کششی متصل گردید. خیز وسط دهانه با استفاده از یک نمایشگر دیجیتالی که در زیر نمونه در وسط دهانه متصل شده بود (شکل ۴-۱) اندازه

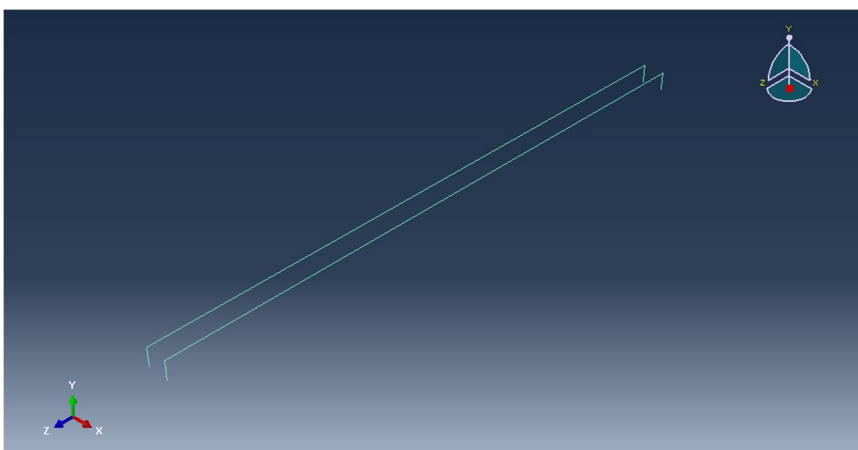
گیری شد. برای تعیین تفاوت بین واکنش دوتیر مشابه تحت بارگذاری متفاوت، از دو فرکانس ۱ و ۴ هرتز در اعمال بارگذاری خستگی استفاده می شود. دامنه های بارگذاری بصورت $26/7 - 17/8$ ، $56 - 37/4$ ، $74/7 - 56$ و $74/7 - 37/4$ کیلونیوتن است که به ترتیب متناظر با $0/35 - 0/25$ ، $0/65 - 0/45$ تنش تسلیم می باشد.

۴-۵- مدل سازی در نرم افزار ABAQUS

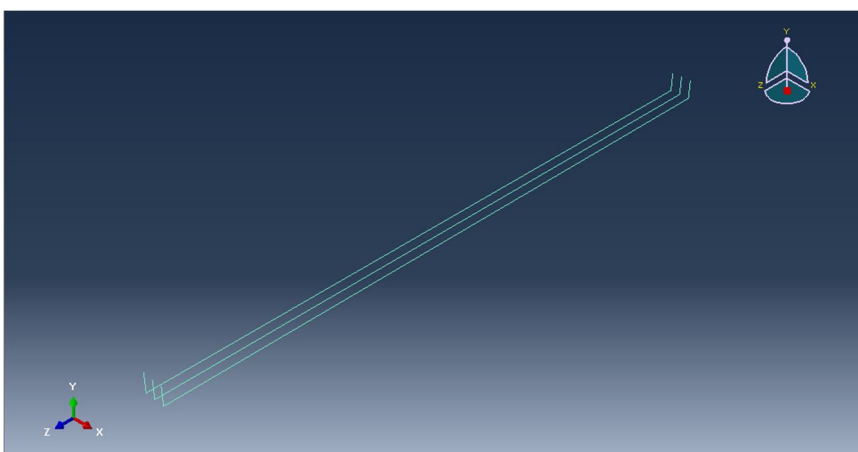
برای مدل سازی تیر بتن آرمه همان طور در شکل ۴-۵ مشخص است، از المان Beam با مقطع Solid استفاده شده است. این المان قابلیت تغییر شکل محوری، خمشی و پیچشی را داراست. المان استفاده شده برای مدل سازی آرماتورها، المان Truss با مقطع Wire می باشد. این المان در نرم افزار عمدتاً برای مدل سازی اعضای خطی دوبعدی و سه بعدی که تنها بار در راستای محور خود را تحمل می کنند، استفاده می شود. تفاوت بین دو المان Beam و Truss در این است که المان Beam توانایی خمش توأم با تغییر شکل برشی را دارد که المان Truss این قابلیت را ندارد. نکته مهم در مدل سازی ورق CFRP و اپوکسی می باشد. این دو جز به دلیل نسبت عرض به ضخامت زیاد رفتار پیوسته مانند دارند. المان Shell با درجات آزادی تغییر مکان و دوران، المان مناسبی جهت شبیه سازی رفتار ورق کامپوزیت و اپوکسی است. جهت در نظر گرفتن تماس سطح بتن با چسب اپوکسی و چسب اپوکسی با ورق CFRP در نرم افزار بایستی از یک ورق کامپوزیت چندلایه (Composite Layup) استفاده شود تا به برنامه اتصال این سه جز بطور پیوسته شناسانده شود. علت پیوسته در نظر گرفتن این اتصال، پیشگیری از جداسدن ورق کامپوزیت تحت بارگذاری تناوبی و پدیده خستگی است چراکه با جدا شدن این ورق از سطح بتن دیگر بررسی تأثیر ورق در افزایش مقاومت تیر در برابر خستگی به راحتی قابل بررسی نخواهد بود لذا فرض شده است که این سه سطح با یکدیگر تماس پیوسته دارند و از هم جدا نمی شوند.



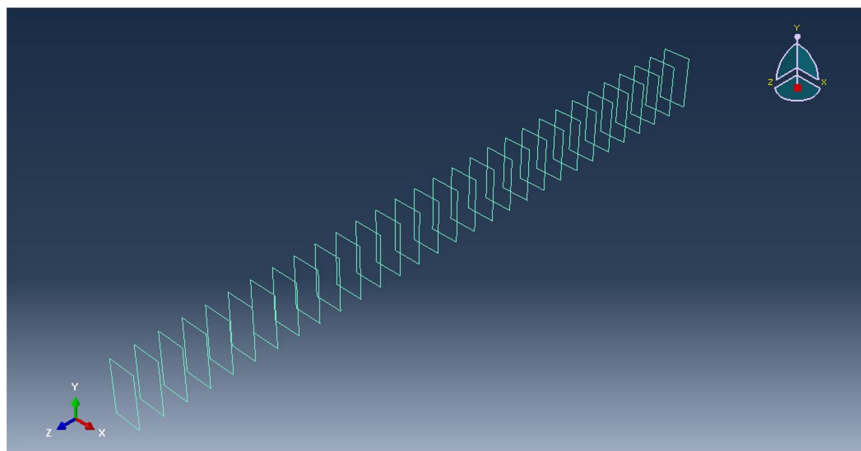
شکل (۴-۵): تیر بتن آرمه مدل شده



شکل (۴-۶): آرماتورهای فوقانی مدل شده

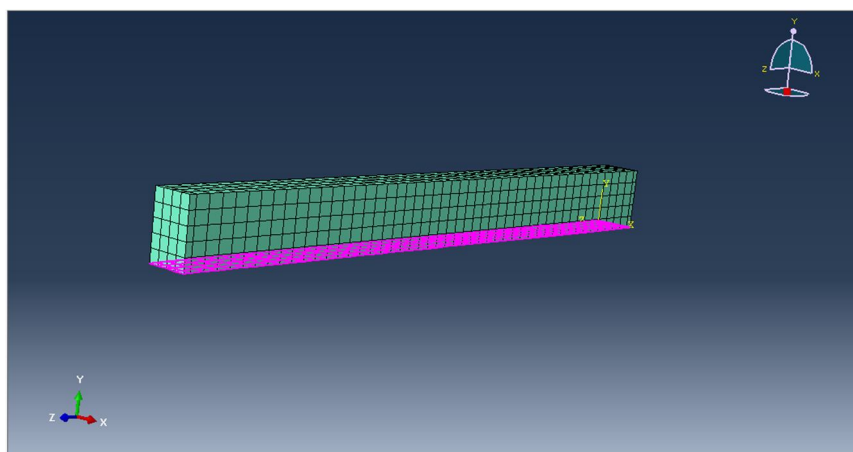


شکل (۴-۷): آرماتورهای تحتانی مدل شده



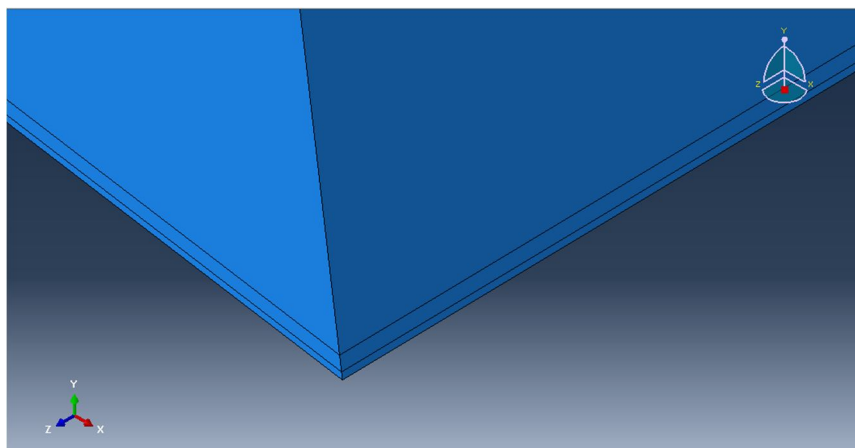
شکل (۴-۸): آرماتورهای برشی مدل شده

جهت مدل سازی ورق CFRP و رزین اپوکسی از المان Shell در برنامه استفاده شده است. زیرا باتوجه به ضخامت کم ورق المانی باید استفاده گردد که یک بعد آن نسبت به سایر ابعاد بسیار کوچکتر بوده و قابلیت تحمل نیروهای محوری، برشی و خمشی را داشته باشد که ازین جهت المان مذکور مناسب است.



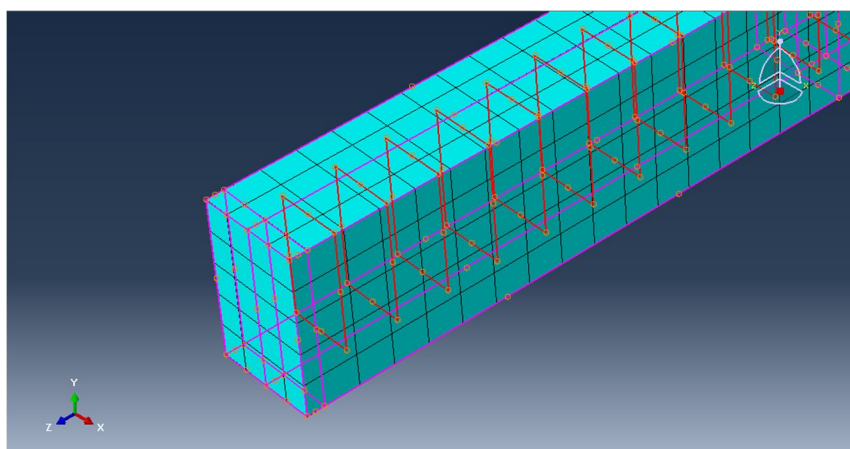
شکل (۴-۹): رزین اپوکسی مدل شده در نرم افزار

در برنامه ABAQUS، جهت تعیین تماس کامل بین سطح بتن با رزین اپوکسی و رزین اپوکسی با ورق CFRP، ورق CFRP و رزین اپوکسی و نیز سطح بتن در تماس با رزین اپوکسی مجموعاً بصورت یک ورق سه لایه ای کامپوزیت (Composite Layup) تعریف می شود. در تصویر زیر نحوه قرارگیری ورق و رزین اپوکسی به وضوح مشخص است.



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

جهت در نظر گرفتن چسبندگی بین آرماتورهای خمشی و برشی مدفون در بتن در برنامه، بایستی قید (Constraint) از نوع (Embedded Region) تعریف شود تا برنامه این خصوصیت را به آرماتورها و بتن اختصاص دهد. در پروژه حاضر، این خصوصیت به آرماتورهای خمشی بالا و پایین و آرماتورهای برشی اختصاص داده شده است.

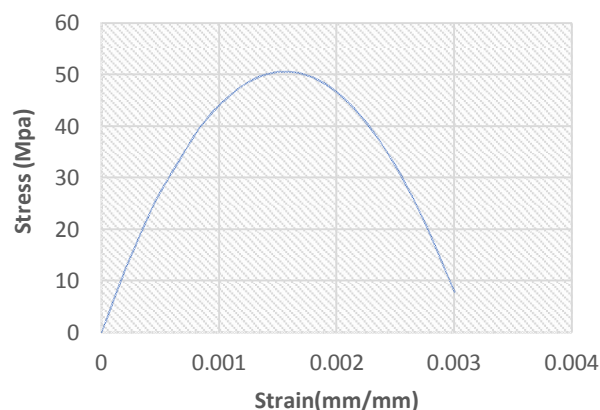


شکل (۴-۱۱): چسبندگی آرماتورها و بتن در نرم افزار

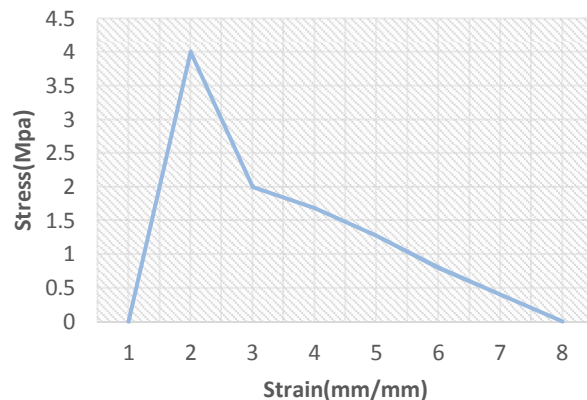
۴-۶- مشخصات مصالح

بتن استفاده شده، بتن C55 با مدول یانگ 35063 مگاپاسکال و نمودار تنش- کرنش نشان داده شده در شکل ۴-۱۲ و جهت مدل سازی در نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. بتن، فولاد و CFRP تعریف شده در برنامه بصورت ماده ای با رفتار غیر الاستیک و همگن تعریف شده اند. بتن مصرفی با جرم مخصوص 2500 کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب پواسون 0.16 در نظر گرفته شده است.

برای ترسیم نمودار تنش-کرنش بتن در ناحیه فشاری از رابطه Hognestad اصلاح شده استفاده و در ناحیه کششی، این نمودار به صورت خطی فرض شده است. فولاد مصرفی از نوع A36 با جرم مخصوص ۸۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته ۲۰۶۰۱۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ فرض شده است. قابل ذکرست که وجود کرنش های پسماند در فولاد در نرم افزار منظور نشده است.



شکل (۴-۱۲): نمودار تنش-کرنش فشاری بتن

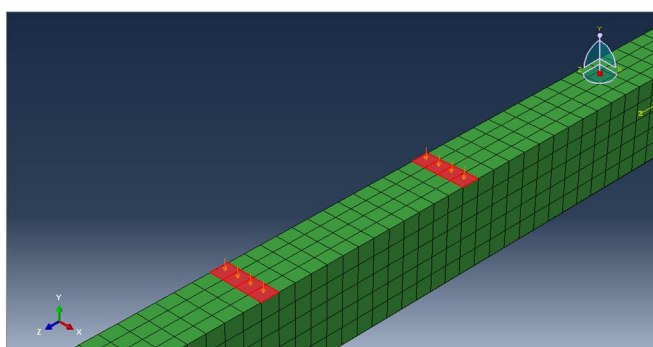


شکل (۴-۱۳): نمودار تنش-کرنش کششی بتن

۴-۷- اعمال شرایط مرزی و بار

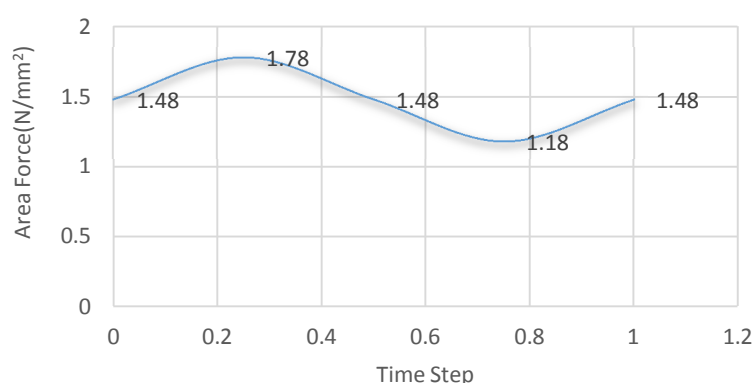
با توجه به اینکه تیر مورد نظر دارای شرایط تکیه گاهی دو سر ساده یا به عبارتی یک تیر دو سر مفصل است، جابه جایی در محل اتصال تکیه گاه سمت راست با زمین در راستای X و Y و Z برابر صفر و در محل اتصال تکیه گاه سمت چپ در راستای X و Y صفر خواهد بود اما در راستای Z آزادی

جابه جایی دارد. آزادی جابه جایی در راستای Z آزادی محوری محسوب می شود که یکی از ویژگی های تکیه گاه غلطکی می باشد. هم چنین تیر در هر دو تکیه گاه قابلیت دوران حول هر سه محور را دارد. تیر بتن آرمه مورد نظر در آزمایش همان طور که در دستگاه آزمایش نیز قابل مشاهده است تحت یک بار متمرکز قرار دارد که این بار بوسیله یک تیر توزیع کننده (Spread Beam) در دو نقطه تقسیم می شود. نظر به این که هر نمونه تحت یک بار تناوبی و پس از آن تا لحظه خرابی تحت بار استاتیکی تحلیل می شود، دونوع بار Cyclic Loading و Static Loading در برنامه تعریف شده است.



شکل (۴-۱۴): محل اعمال بارگذاری

باتوجه به مقادیر کمینه و بیشینه دامنه بار اعمالی، نمودار بار تناوبی که در تعداد ۵۰۰۰۰ سیکل روی تیر اعمال شده است در شکل ۴-۱۵ مشاهده می شود.



شکل (۴-۱۵): نمودار بارگذاری تناوبی

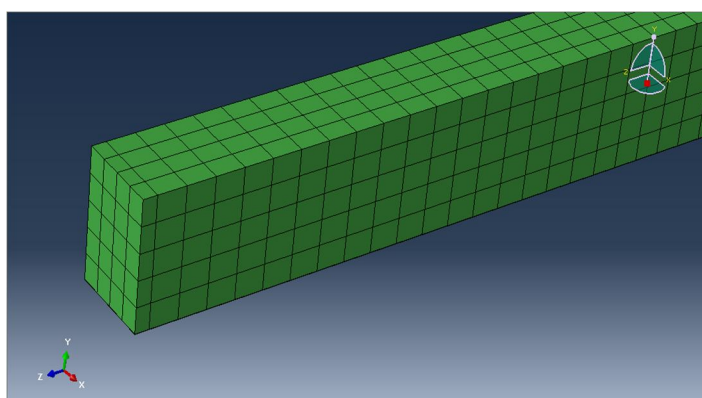
مقادیر بیشینه و کمینه این بارگذاری با توجه به ابعاد صفحات بارگذاری که 15×5 سانتیمتر می باشد محاسبه شده است. دامنه بار اعمالی همان طور که گفته شد، $17/8$ تا $26/7$ کیلونیوتن است

که نظیر تنش $0.25f_y$ تا $0.35f_y$ می باشد. بار وارده در مرکز تیر توسط تیر توزیع کننده بار، در دو نقطه تقسیم شده و در هر نقطه بصورت یک بار سطحی روی سطح ورق اعمال شده است. برنامه ABAQUS این الگوی بار را به تعداد سیکل مشخص شده که در این پروژه ۵۰۰۰۰ سیکل می باشد تکرار می کند تا این که تیر به مرز خستگی برسد.

نمونه ها همگی تا ۵۰۰۰۰ سیکل تحت بارگذاری تناوبی با در نظر گیری خستگی قرار گرفتند و سپس تحت بار استاتیکی تا مرحله خرابی بارگذاری شدند. نتایجی که ارائه خواهد شد، نتایج نمودار بار تغییرمکان تیر تا حد تغییرمکان خاصی است تا بتوان رفتار تیر را براساس بار قابل تحملش تحت اثر بارگذاری تناوبی و پدیده خستگی مورد مقایسه قرار داد.

۴-۸- مش بندی مدل

مرحله مش بندی یکی از مهم ترین و حساس ترین مراحل مدل سازی در برنامه می باشد چراکه دقت تحلیل تا حد زیادی بستگی به نحوه مش بندی دارد. اندازه مش پس از چندین تکرار مش بندی به دست آمده است. نوع مش بندی استفاده شده از نوع Structured با المان های چهارضلعی (Tetrahedral) انتخاب شده تا مدل مش بندی شده دقیق تری حاصل شود. اندازه مش پس از بررسی چند اندازه مختلف در بازه ۱ تا ۱۰ سانتیمتر در نهایت ۳/۷۵ سانتیمتر لحاظ شد. نزدیکی نتایج بدست آمده که در پایان به آنها اشاره خواهد شد، گواه بر دقت مش بندی است. در شکل زیر تیر مش بندی شده نمایش داده شده است.



شکل (۴-۱۶): تیر مش بندی شده

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

روشی سنتی جهت تعیین اینکه سازه مورد نظر چه موقع به حد خستگی خود می رسد، تشکیل نمودار S-N (بار در برابر تعداد سیکل های بارگذاری) برای مصالح تشکیل دهنده سازه می باشد. این روش سنتی هنوز به عنوان یک ابزار طراحی در بسیاری از موارد جهت پیش بینی مقاومت خستگی سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد. چراکه رویکردی محافظ کارانه در طراحی دارد و رابطه ای بین تعداد سیکل بارگذاری و میزان آسیب سازه یا طول ترک ایجاد شده در ضمن بارگذاری در نظر نمی گیرد. روشی که جایگزین این روش شده است، جهت پیش بینی عمر خستگی سازه از رابطه بین پیشرفت آسیب دیدگی با تعداد سیکل بارگذاری استفاده می کند.

توانایی نرم افزار ABAQUS در مدل سازی، امکان استفاده از یک تکنیک محاسباتی شبیه سازی برای مشخص کردن عکس العمل سازه تحت یک بارگذاری تناوبی را فراهم می کند. نرم افزار برای مدل سازی پدیده خستگی و عکس العمل سازه نسبت به این پدیده، از یک الگوی پیش رونده آسیب دیدگی سازه و خرابی آن تحت اثر پدیده خستگی در محل تماس مصالح با یکدیگر (برای مثال در سطح تماس لایه های یک ورق CFRP) بهره می گیرد. به بیان ساده تر، برنامه در هر زمان تعیین شده رفتار سازه را در چند نقطه مجزا از سازه ارزیابی می کند. سپس از این ارزیابی رفتار سازه، افت عملکرد سازه یا به عبارتی افت مشخصات مکانیکی مصالح را که در گام زمانی بعدی اتفاق خواهد افتاد پیش بینی می کند. افت بوجود آمده در گام زمانی بعدی سپس مجدد برای گام پس از آن استفاده می شود. به همین ترتیب برنامه میزان رشد ترک ها و افزایش آسیب دیدگی در سازه را بطور مستمر در طول تحلیل به روز می کند تا در نهایت در یک زمان تعیین شده به عمر خستگی سازه یا اینکه سازه چه موقع به اوج خستگی می رسد، دست پیدا می کند.[۴۴]

۴-۱۰ - تحلیل نمونه ها

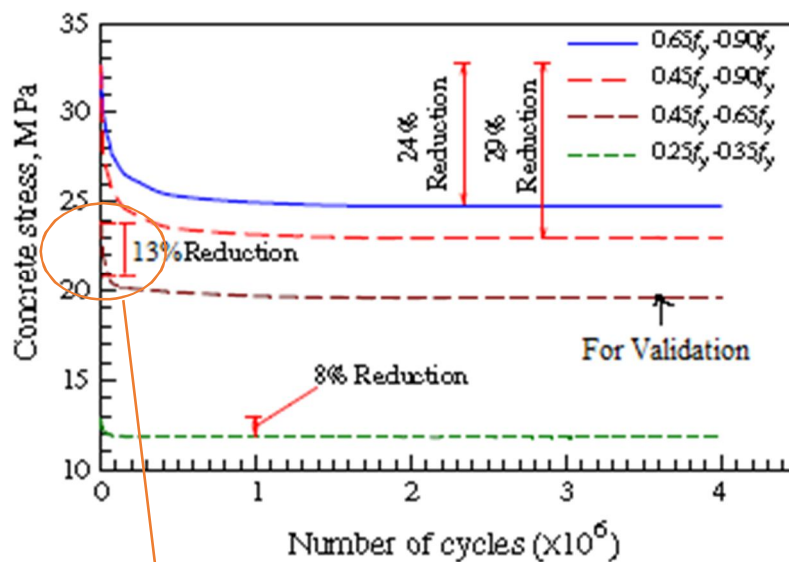
جهت در نظر گرفتن پدیده خستگی در تحلیل، نرم افزار ABAQUS در تحلیل بارگذاری تناوبی ابزاری برای لحاظ پدیده خستگی در نظر گرفته است. کلیه فرضیاتی که در تحلیل خستگی اعمال شده است همانند پیش فرضیات نرم افزار لحاظ گردیده است. تعداد ۶ تیر بتن آرمه مقاوم شده با آرایش های متفاوت ورق CFRP با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی تحلیل شدند. هر تیر یک بار بصورت استاتیکی تا مرحله خرابی بارگذاری شده و مورد تحلیل قرار گرفت و سپس بار دیگر بصورت تناوبی با در نظر گرفتن پدیده خستگی تحلیل شده است. به طور کلی برای هر تیر دو نمودار بار - تغییر مکان تحت بارگذاری استاتیکی و تناوبی (با در نظر گرفتن پدیده خستگی) ترسیم می شود. در هنگام اعمال بارگذاری تناوبی، همه نمونه ها تا مرز خستگی بصورت تناوبی بارگذاری شده، سپس تحت یک بار استاتیکی تا لحظه خرابی بارگذاری می شوند. به عبارتی بارگذاری در دو مرحله انجام شده است:

- مرحله اول: بار بصورت تناوبی در حداکثر ۵۰۰۰۰ سیکل اعمال می شود.
- مرحله دوم: بار استاتیکی به صورت افزایشده روی تیر اعمال می شود تا تیر به مرحله خرابی برسد.

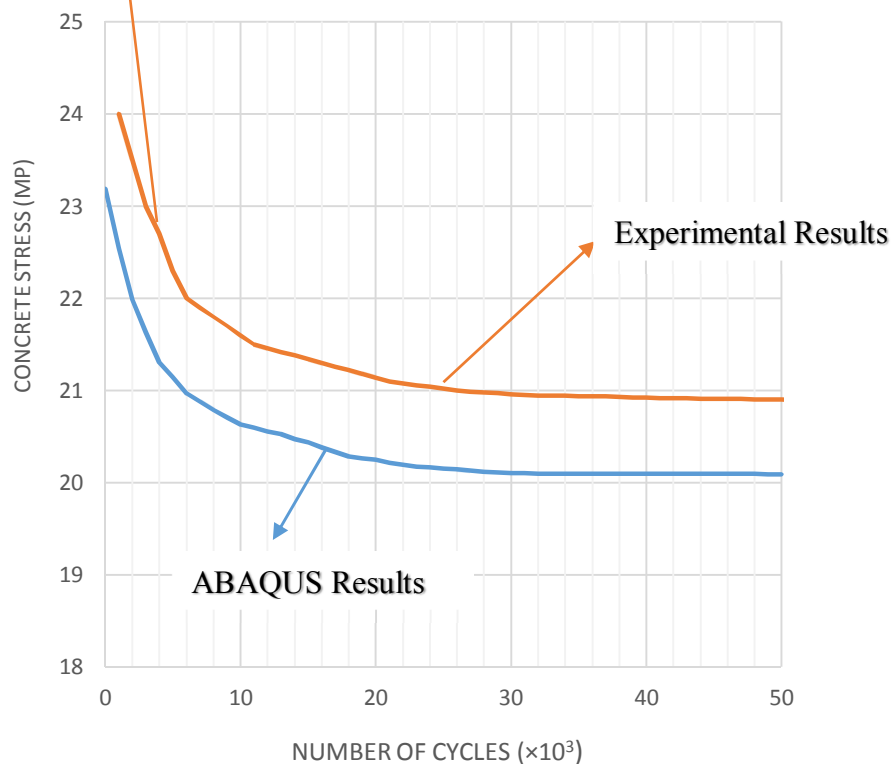
۴-۹ - صحت سنجی

همان طور که پیش تر گفته شد، جهت صحت سنجی از نتایج آزمایشگاهی مقاله ای با عنوان " تأثیر پدیده خستگی بر تیرهای بتن آرمه مقاوم شده با ورق پلیمر مسلح به الیاف کربن (CFRP) " بهره گرفته شده است. نمونه آزمایشگاهی بطور مشابه بارگذاری شده و تحت ۲۰ هزار تا ۲ میلیون سیکل قرار گرفته است و تیر مدل شده در نرم افزار تحت ۵۰۰۰۰ سیکل بارگذاری شده است. نکته قابل توجه این است که هدف از صحت سنجی در اینجا کسب اطمینان از صحت و دقت مدل سازی تیر و تعریف مصالح در نرم افزار است. به عبارتی دیگر، صحت سنجی در اینجا نوعی رفتار سنجی تیر تحت

پدیده خستگی است که در نهایت با مقایسه نتایج به این نتیجه دست پیدا خواهیم کرد. نمودار تنش بر حسب تعداد سیکل (S-N) تیر بتن آرمه مقاوم شده با ورق تک لایه ای CFRP که از آزمایش حاصل شده است، در شکل زیر نشان داده شده است.

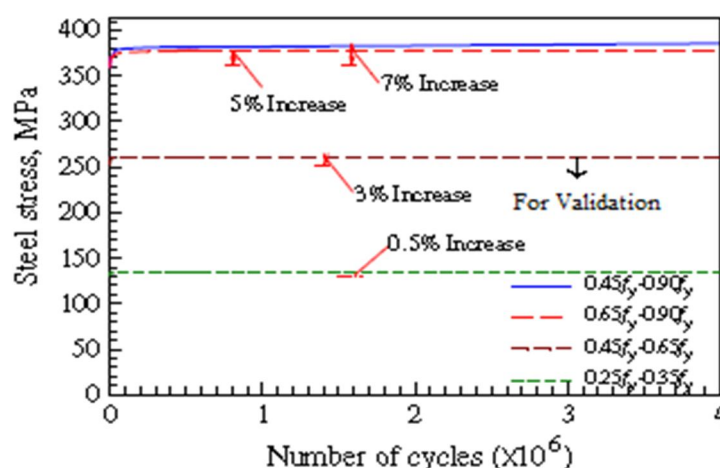


شکل (۴-۱۷): نمودار تنش-تعداد سیکل بتن در نمونه آزمایشگاهی

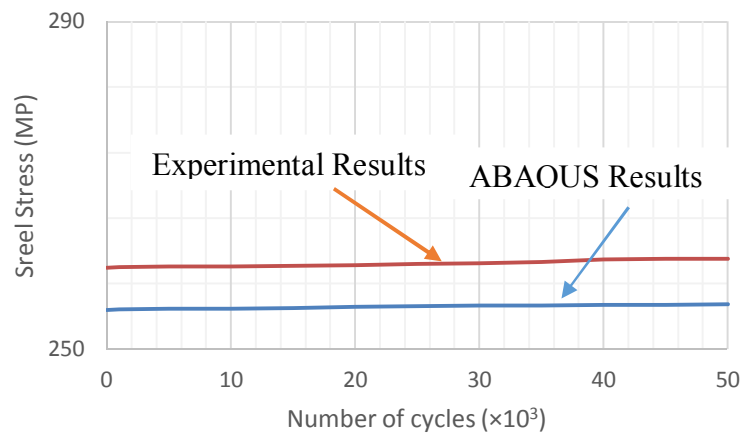


شکل (۴-۱۸): مقایسه نتایج تحلیل نمونه اول و نتایج آزمایشگاهی

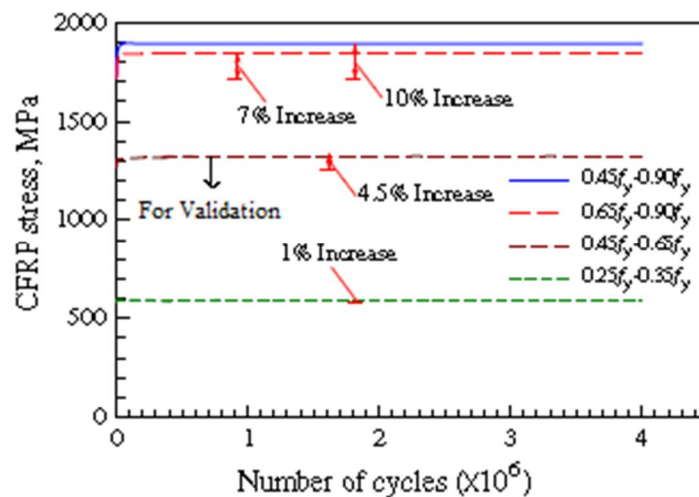
شکل ۴-۱۷ نمودار تنش بر حسب تعداد سیکل برای ۴ دامنه تنش متفاوت می باشد. نموداری که در اینجا جهت مقایسه و صحت سنجی استفاده شده است در شکل اشاره شده است. در شکل ۴-۱۸ نتایج آزمایشگاهی با نتایجی که از نرم افزار بدست آمده است، مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود تنش در بتن از ابتدای بارگذاری تناوبی تا انتهای ۵۰۰۰۰ سیکل حدود ۱۳ درصد کاهش داشته است. تنش در ابتدا حدود ۲۴ مگا پاسکال و در انتهای تناوب های بارگذاری به ۲۰/۹ رسیده است. حال نمودار تنش بتن را در طی بارگذاری تناوبی بررسی می کنیم. در مدل نرم افزاری بتن از تنش ۲۳/۱۹ مگا پاسکال در ابتدای بارگذاری شروع شده و با گذشت ۵۰۰۰۰ سیکل در نهایت به تنش ۲۰/۰۹ مگا پاسکال رسیده است که نشان دهنده کاهش تنش ۱۳/۳ درصدی می باشد. کاهش تنش فشاری که در بتن شاهد بودیم بین مدل نرم افزاری و نمونه آزمایشگاهی اختلاف بسیار ناچیز ۲/۲ درصدی دارد. در شکل ۴-۱۹ نمودار تنش - تعداد سیکل برای فولاد و شکل ۴-۲۱ نمودار تنش - تعداد سیکل برای CFRP نمایش داده شده است. شکل ۴-۲۰ و ۴-۲۱ نزدیکی نتایج نرم افزاری و آزمایشگاهی را بهتر مشخص می کند.



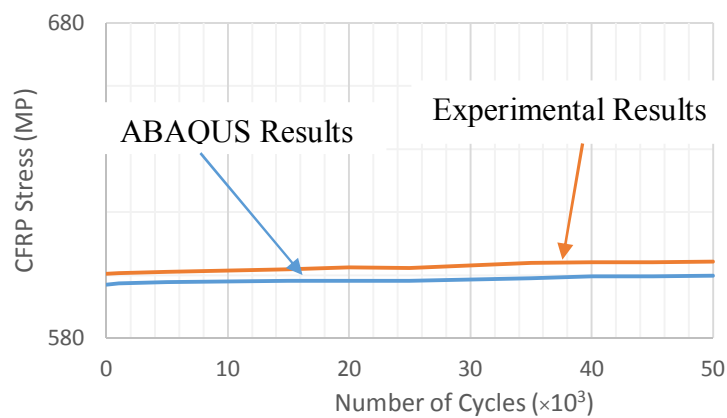
شکل (۴-۱۹): نمودار تنش - تعداد سیکل فولاد در نمونه آزمایشگاهی



شکل (۴-۲۰): مقایسه نتایج تحلیل نمونه اول و نتایج آزمایشگاهی



شکل (۴-۲۱): نمودار تنش - تعداد سیکل CFRP در نمونه آزمایشگاهی



شکل (۴-۲۲): مقایسه نتایج تحلیل نمونه اول و نتایج آزمایشگاهی

می توان این اختلاف ناچیز را به دقت نرم افزار در مدل سازی و یکسان نبودن ۱۰۰ درصدی مواد شبیه سازی شده و مواد اصلی نسبت داد. با توجه به نتایج ارائه شده و نزدیکی نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری و نیز مشاهده عدم تغییر تنش در مصالح در سیکل های بالا، می توان تغییرات ظرفیت باربری تیر را در خستگی با تعداد سیکل ۵۰ هزار و ۲ میلیون تا حد زیادی مشابه یکدیگر دانست و برای مقایسه تأثیر خستگی بر ظرفیت باربری تیر با آرایش های مختلف ورق CFRP، می توان از نتایج نرم افزاری با خستگی ۵۰ هزار سیکل بهره برد.

فصل پنجم

بررسی نتایج و پیشنهادات

۵-۱- مشخصات تحلیل

در این پروژه برای هر نمونه دو تحلیل انجام می‌شود که مشخصات هر کدام به قرار زیر است:

۱- تحلیل اول: نمونه تحت بارگذاری متمرکز استاتیکی افزایشده از زمان صفر تا لحظه‌ای که تیر

به مرحله خرابی می‌رسد، بصورت استاتیکی تحلیل می‌شود.

۲- تحلیل دوم: نمونه ابتدا تحت بار تناوبی در دامنه $17/8$ تا $26/7$ کیلونیوتن با تعداد سیکل

5000 با در نظرگیری پدیده خستگی تحلیل می‌شود و پس از آن بار متمرکز افزایشده روی

تیر اعمال شده و بصورت استاتیکی تا حد خرابی تیر تحلیل می‌شود.

در ادامه نتایج هر نمونه به طور تفصیلی شرح داده خواهد شد.

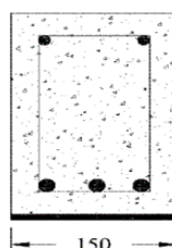
۵-۲- نمونه اول (تیر بتن آرمه مقاوم شده با یک ورق سرتاسری تک

لایه‌ای CFRP)

اولین تیری که تحت بارگذاری استاتیکی و تناوبی با در نظرگیری پدیده خستگی تحلیل شده

است تیر بتن آرمه مقاوم شده با یک ورق تک لایه‌ای سرتاسری CFRP می‌باشد. در شکل زیر مقطع

تیر و نحوه قرارگیری ورق CFRP در تیر نشان داده شده است.



1-Layer
sheet

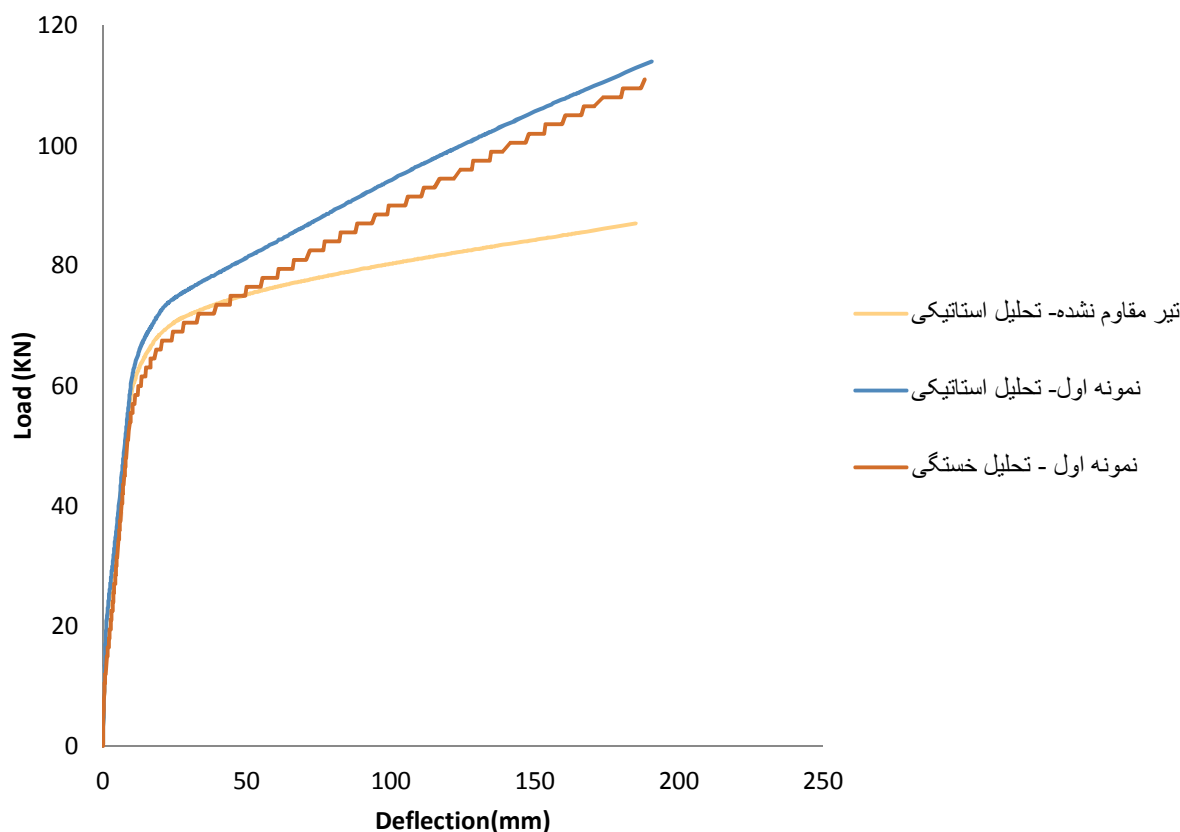
شکل (۵-۱): مقطع نمونه اول

همان طور که در شکل ۵-۲ دیده می‌شود، سه نمودار برای سه حالت وجود دارد: تیر مقاوم نشده،

تیر مقاوم شده بدون در نظرگیری پدیده خستگی و تیر مقاوم شده با در نظرگیری پدیده خستگی. نمودار

تحتانی که برای تیر مقاوم نشده است، نشان می‌دهد که ظرفیت تحمل تیر در این حالت 87 کیلونیوتن

است. حال آن که وقتی این تیر را با یک ورق تک لایه‌ای CFRP با پهنای ۱۵۰ میلی‌متر و بصورت سرتاسری مقاوم می‌کنیم، ظرفیت تحمل تیر در حالت استاتیکی به ۱۱۴ کیلو نیوتن می‌رسد. این به آن معناست که تیر در اثر مقاوم‌سازی با ورق CFRP حدود ۳۱ درصد افزایش ظرفیت باربری یا به عبارتی افزایش مقاومت داشته است. باری دیگر تیر مقاوم شده را بارگذاری و سپس تحلیل کردیم اما این بار بارگذاری تناوبی بوده و پدیده خستگی در تحلیل لحاظ شده است. می‌خواهیم ببینیم خستگی چقدر مقاومت این تیر را تقلیل خواهد داد. همان طور که از نمودار میانی در شکل ۵-۲ مشخص است، تیر افت مقاومت بسیار ناچیزی داشته است. با مقایسه ظرفیت باربری تیر در دو حالت مشخص شد که تیر در اثر پدیده خستگی پس از ۵۰ هزار سیکل بارگذاری تنها ۲/۶ درصد افت مقاومت داشته است. این میزان کم افت نشان از آن دارد که پدیده خستگی چه تأثیر ناچیزی بر تیرهای مقاوم شده با ورق تک لایه‌ای CFRP دارد.

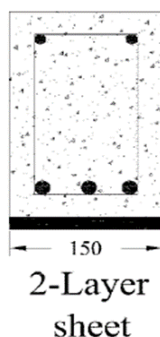


شکل (۵-۲): نمودار بار- تغییرمکان نمونه اول

اگر نمودار تیر مقاوم شده را در دو حالت استاتیکی و تناوبی با دقت بیشتر بررسی کنیم، مشاهده می‌کنیم که تا میزان بار ۵۴ کیلونیوتن تغییر مکان تیر برای هر دو حالت یکسان بوده است. از این امر می‌توان این طور نتیجه گرفت که تیر تحت اثر پدیده خستگی تا یک میزان بار مشخصی را توانسته است بدون کاهش قابل ملاحظه‌ای در سختی تحمل نماید. پس از این نقطه، تحت اثر پدیده خستگی، رفته رفته سختی تیر تقلیل یافته است که این تقلیل سختی با شیب ثابتی تا نقطه اوج تحمل تیر ادامه داشته است.

۵-۳- نمونه دوم: (تیر بتن آرمه مقاوم شده با یک ورق سرتاسری دو لایه‌ای CFRP)

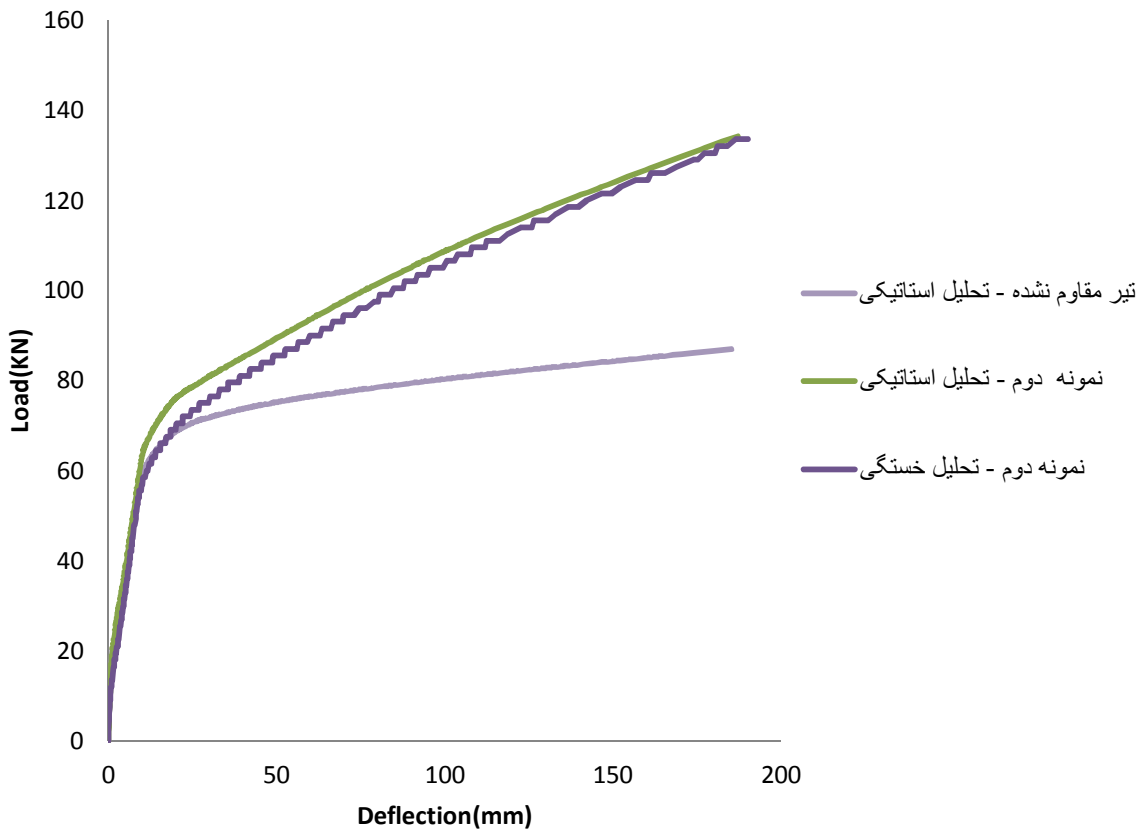
دومین تیری که تحت بارگذاری استاتیکی و تناوبی با در نظرگیری پدیده خستگی تحلیل شده است تیر بتن آرمه مقاوم شده با یک ورق دو لایه‌ای سرتاسری CFRP می‌باشد در شکل زیر مقطع تیر و محل قرارگیری ورق نشان داده شده است.



شکل (۵-۳): مقطع نمونه دوم

همان طور که در نمودارهای شکل ۵-۴ مشاهده می‌شود، سه نمودار برای سه حالت وجود دارد. در نمودار فوقانی که مربوط به تیر مقاوم شده با ورق CFRP است، ظرفیت تحمل تیر تا ۱۳۴/۴ کیلونیوتن افزایش یافته است. در حالی که در نمونه اول که ورق بصورت تک لایه استفاده شد، ظرفیت تحمل تیر به ۱۱۴ کیلونیوتن رسید. این میزان افزایش ظرفیت باربری تیر نسبت به نمونه اول، فقط ناشی از افزایش تعداد لایه های ورق CFRP بوده است و پهنای ورق و نحوه مقاوم سازی و نیز سطح

تماس ورق با سطح بتن هیچ تغییری نکرده است. در نمونه اول حدود ۳۱ درصد افزایش باربری مشاهده شد، در حالی که در نمونه دوم در نتیجه مقاومسازی حدود ۵۴ درصد افزایش باربری نسبت به حالت مقاوم نشده داشتیم.



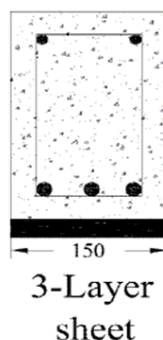
شکل (۴-۵): نمودار بار- تغییر مکان نمونه دوم

در نمودار بار- تغییر مکان نمونه دوم در بارگذاری تناوبی (نمودار میانی) مشاهده می‌کنیم که تیر در ابتدا از لحاظ ظرفیت باربری نسبت به حالت مقاوم نشده و مقاوم شده بدون در نظرگیری خستگی، رفتاری متفاوتی نداشته است اما پس از بار ۵۷ کیلونیوتن رفتار تیر در سه حالت از هم متمایز شده است. نمودار میانی نشان می‌دهد که تیر در اثر خستگی در نهایت دچار افت مقاومت کمی شده است. این افت مقاومت تنها از بار ۱۳۴/۴ به ۱۳۳/۵ بوده است. این افت مقاومت بسیار کم حاکی از نقش مهم ورق CFRP و تأثیر افزایش لایه‌ها در مقاومت تیر در برابر خستگی است. بنابراین از

مقایسه نتایج این دو نمونه نتیجه می‌شود که افزایش لایه‌های ورق CFRP از یک لایه به دو لایه افت مقاومت تیر را در برابر خستگی از ۲/۶ درصد به ۰/۶ درصد کاهش داده است. به عبارتی افزایش لایه‌ها از یک به دو لایه افت مقاومت تیر را تا ۷۷ درصد جبران کرده است که این نشان دهنده تأثیر قابل ملاحظه تعداد لایه‌ها و ضخامت ورق CFRP بر عملکرد تیر در برابر خستگی است.

۵-۴- نمونه سوم: (تیر بتن آرمه مقاوم شده با یک ورق سرتاسری سه لایه‌ای CFRP)

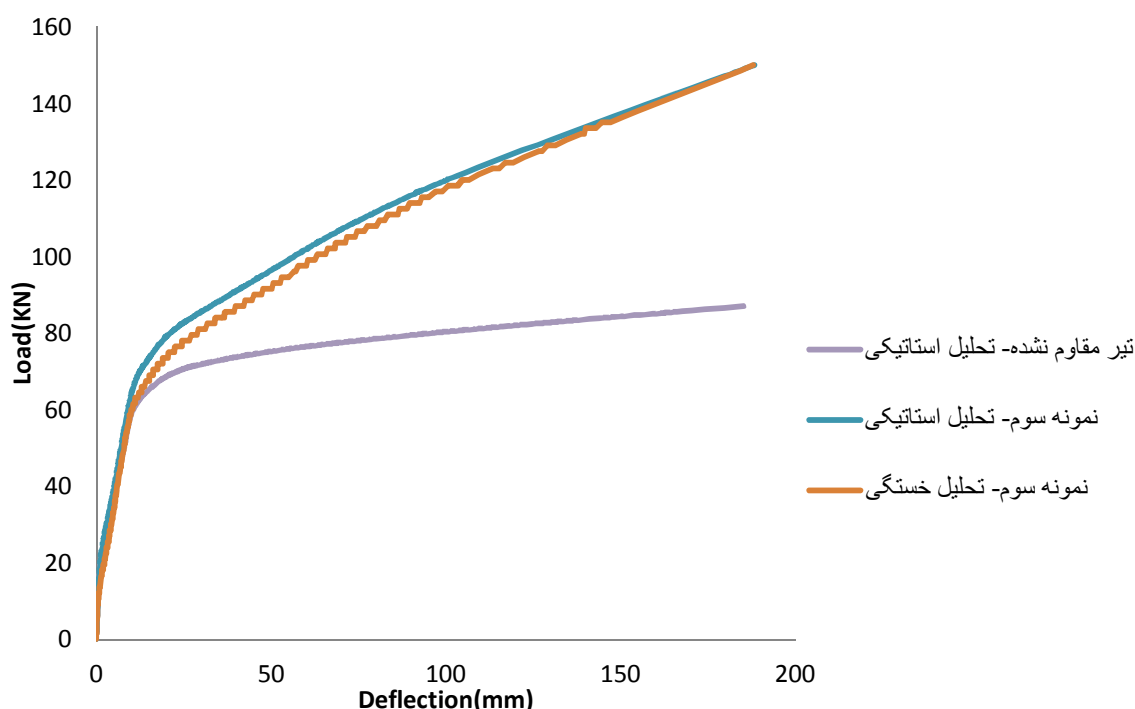
سومین نمونه که تحلیل استاتیکی و تناوبی روی آن انجام گردید، تیر بتن آرمه با ورق سه لایه‌ای CFRP است که این بار هم بصورت سرتاسری در سطح زیرین تیر قرار گرفته است. شکل زیر مقطع تیر و محل قرارگیری ورق را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۵): مقطع نمونه سوم

همان طور که در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود، برای این نمونه نیز مشابه نمونه‌های قبلی سه نمودار از نتایج تحلیل استاتیکی و تناوبی حاصل شده است. در نمونه قبلی که ورق بصورت دو لایه استفاده شد، ظرفیت تحمل تیر به ۱۳۴/۴ کیلونیوتن رسید. این میزان افزایش ظرفیت باربری تیر نسبت به نمونه اول و دوم، فقط ناشی از افزایش تعداد لایه‌های ورق CFRP بوده است و پهنای ورق و نحوه مقاوم‌سازی و نیز سطح تماس ورق با سطح بتن هیچ تغییری نکرده است. همان طور که در نتایج نمونه اول هم گفته شد، تیر در حالت مقاوم نشده ۸۷ کیلونیوتن تحمل داشت در صورتی که پس از مقاوم‌سازی با ورق سه لایه‌ای CFRP، ظرفیت باربری تیر به ۱۵۰ کیلونیوتن رسید. این بدین

معناست که در اثر مقاوم سازی توانستیم ظرفیت تیر را حدود ۷۲ درصد ارتقا دهیم. حالا تأثیر خستگی را بر این تیر مقاوم شده بررسی می کنیم. همان طور که در نمودار بار- تغییر مکان نمونه در بارگذاری تناوبی (نمودار میانی) دیده می شود، تیر در ابتدا مانند نمونه های قبلی در هر سه حالت ظرفیت یکسانی داشته است. این امر بیانگر آن است که پدیده خستگی تأثیری بر ظرفیت باربری این نمونه نداشته است.

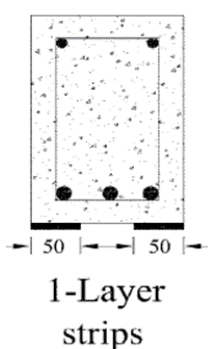


شکل (۵-۶): نمودار بار- تغییر مکان نمونه سوم

نتیجه ای که از تحلیل این نمونه بدست آمد، عدم افت مقاومت تیر پس از ۵۰۰۰۰ بار تکرار بارگذاری و بروز پدیده خستگی بود که کمی فراتر از نتیجه ای است که انتظار می رفت. این نتیجه نشان می دهد که تا چه اندازه افزایش ضخامت و تعداد لایه های ورق CFRP در بهبود مقاومت تیر نقش دارد.

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

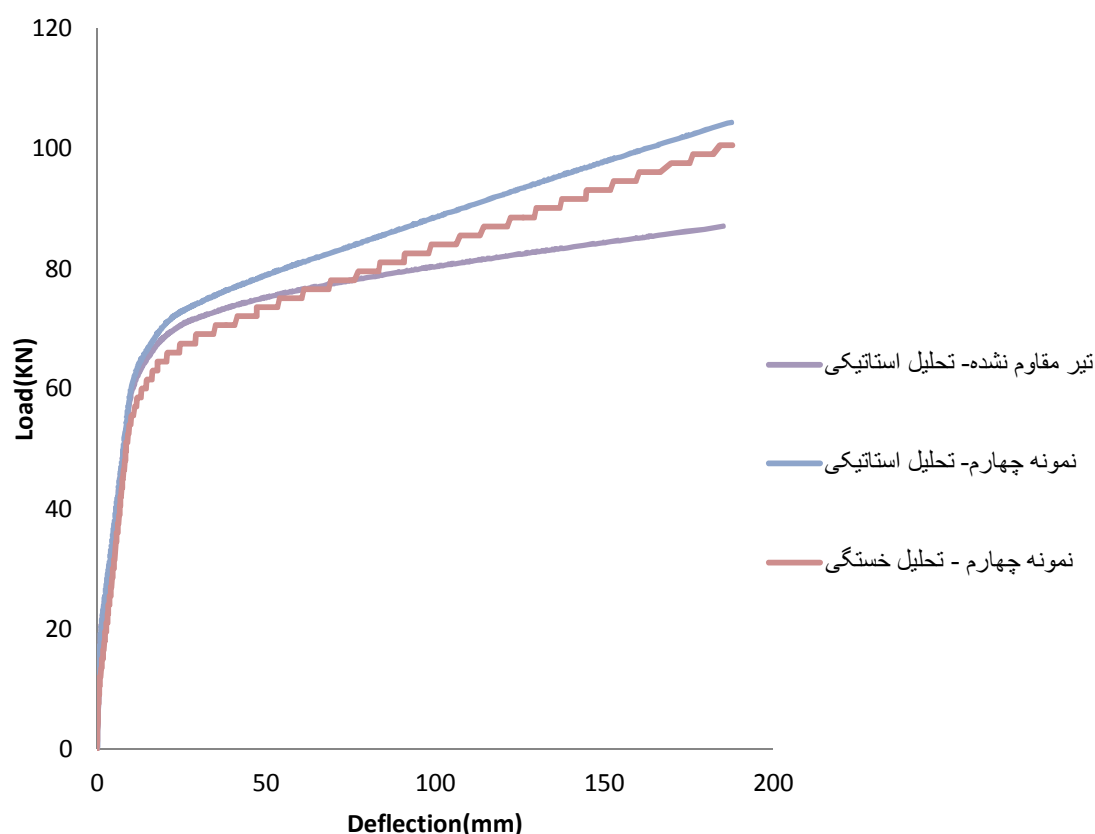
نمونه چهارم که تحت بارگذاری استاتیکی و خستگی تحلیل شده است، تیر بتن آرمه مقاوم شده با دو نوار CFRP تک لایه به پهنای ۵۰ سانتیمتر و بصورت ناپیوسته می‌باشد که باز هم بصورت سرتاسری در زیر تیر نصب شده است. در شکل ۵-۷ این نمونه و محل قرارگیری نوارهای CFRP نشان داده شده است.



شکل (۵-۷): مقطع نمونه چهارم

همان طور که در شکل ۵-۷ مشاهده می‌شود، نوار CFRP بصورت ناپیوسته در زیر تیر قرار گرفته و بین آنها هیچ ورق قرار نگرفته است. برای این نمونه نیز مشابه نمونه‌های قبلی سه نمودار از نتایج تحلیل استاتیکی و تناوبی حاصل شده است. در نموداری که مربوط به تیر مقاوم شده با ورق CFRP است (نمودار فوقانی)، ظرفیت تحمل این نمونه همان طور که انتظار می‌رفت، به مقداری کمتر از ظرفیت تحمل نمونه اول که ورق پیوسته داشت، رسیده است. علت این کاهش باربری را می‌توان تنها کاهش سطح تماس ورق با تیر دانست چرا که هیچ کدام از مشخصات نمونه قبلی تغییری نداشته است. همان طور که در نمودارها می‌بینید، ظرفیت باربری تیر مقاوم شده در اثر پدیده خستگی در یک محدوده به کمتر از ظرفیت باربری تیر مقاوم نشده رسیده است. شیب تغییرات ظرفیت باربری برای این نمونه مشابه نمونه نظیر خود یعنی نمونه اول است که این امر بیانگر یکسان بودن رفتار این دو تیر است.

این نمونه مانند نمونه های قبلی نیز در ابتدا در دو حالت استاتیکی و تناوبی تا بار ۵۴ کیلونیوتن تغییراتی مشابه داشته است. اما در بارهای بالاتر آهنگ تغییرات تیر در سه حالت مقاوم نشده، مقاوم شده تحت بارگذاری استاتیکی و مقاوم شده تحت بارگذاری تناوبی و پدیده خستگی متفاوت است. مقاومت تیر تحت اثر پدیده خستگی در نهایت به ۱۰۴/۴ کیلونیوتن رسیده است در حالی که در حالت استاتیکی و بدون در نظر گیری پدیده خستگی مقاومت تیر به ۱۰۰/۵ کیلونیوتن رسیده است. بنابراین تیر در اثر خستگی حدود ۳/۷ درصد افت مقاومت داشته است.

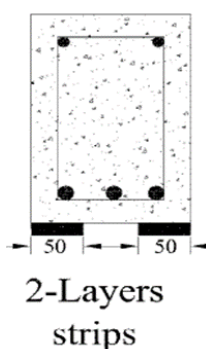


شکل (۵-۸): نمودار بار- تغییر مکان نمونه چهارم

با توجه به اینکه افت مقاومت تیر حدود ۳/۷ درصد است، در مقایسه با نمونه اول که با ورق تک لایه ای CFRP بصورت پیوسته مقاوم شده بود، مقاومت تیر ۱/۱ درصد بیشتر افت داشته است که تنها دلیل آن، عدم پیوستگی ورق CFRP استفاده شده می باشد.

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

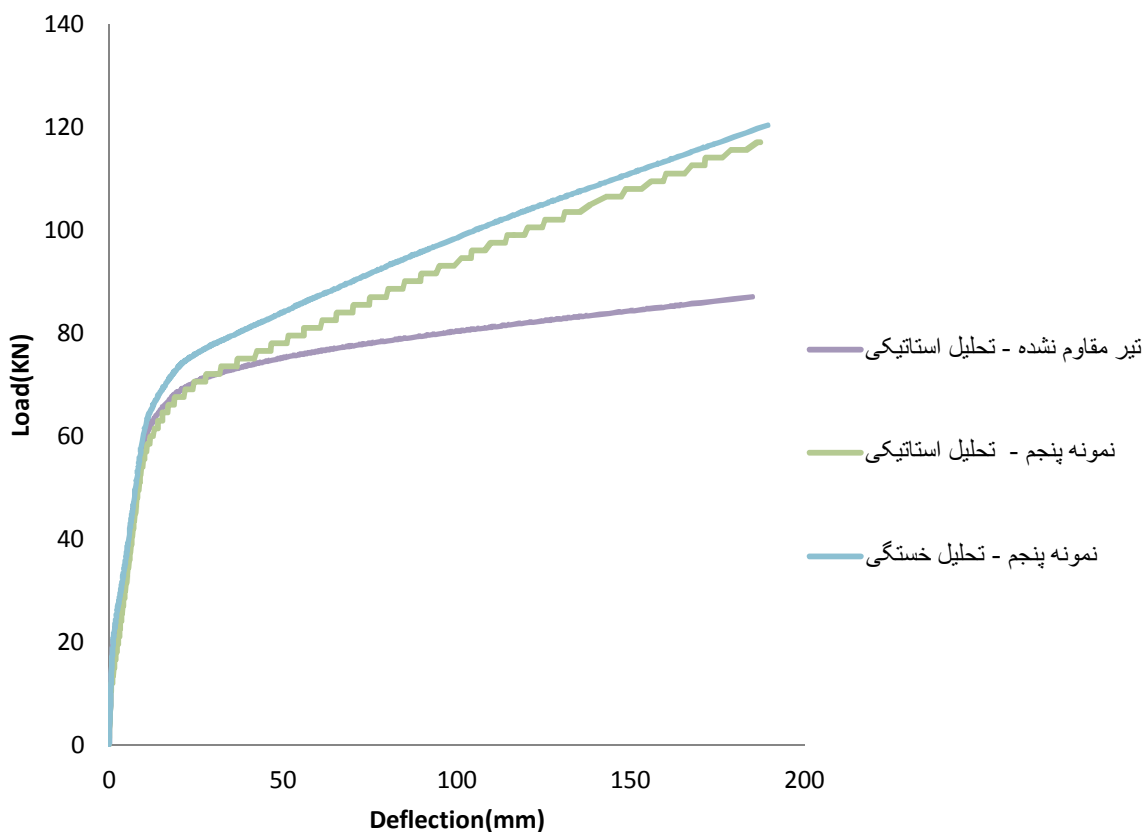
تیر پنجم که مورد تحلیل استاتیکی و تناوبی قرار گرفته است، تیر بتن آرمه مقاوم شده با دو نوار CFRP به پهنای ۵۰ سانتیمتر و بصورت ناپیوسته و دو لایه‌ای می‌باشد. در شکل زیر این تیر و محل قرارگیری نوارها نمایش داده شده است.



شکل (۵-۹): مقطع نمونه پنجم

با توجه به نمودارهایی که در شکل ۵-۱۰ مشاهده می‌شود، یک نمودار برای تحلیل استاتیکی تیر مقاوم نشده و دو نمودار برای تحلیل استاتیکی و تناوبی تیر مقاوم شده نتیجه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، تغییرات نمودار تیر در حالت مقاوم شده در دو حالت استاتیکی و تناوبی مشابهت زیادی به نمودار حالت‌های نظیر در نمونه قبلی دارد. تفاوت واضحی که در این نمودار نسبت به نمودار نمونه قبلی دیده می‌شود، در محدوده‌ای است که ظرفیت باربری تیر در حالت مقاوم شده تحت اثر پدیده خستگی کمتر از ظرفیت تیر در حالت مقاوم نشده است. این تفاوت ظرفیت ناشی از تفاوت ضخامت و تعداد لایه‌های این دو نمونه است چراکه نمونه قبلی با نوار CFRP تک لایه و این نمونه با نوار دو لایه‌ای مقاوم شده است و در سایر خصوصیات هندسی و مکانیکی وضعیتی مشابهی دارند. نمونه پنجم همان طور که در نمودار فوقانی که مربوط به حالت بارگذاری استاتیکی است مشاهده می‌شود، تا بار ۱۲۰/۴ کیلونیوتن تاب آورده است در حالی که تیر مقاوم نشده همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد، فقط تا بار ۸۷ کیلونیوتن تاب آورده است. بنابراین تیر با استفاده از این سیستم

مقاوم‌سازی توانسته است حدود ۳۸ درصد ظرفیت باربری خود را تحت بار استاتیکی ارتقا دهد. حال تأثیر پدیده خستگی بر تیر موردنظر را با این نوع سیستم مقاوم‌سازی بررسی می‌کنیم.



شکل (۵-۱۰): نمودار بار- تغییرمکان نمونه پنجم

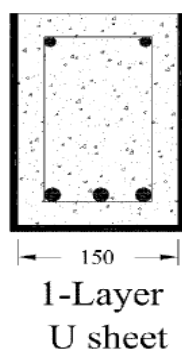
تیر تحت اثر پدیده خستگی در ابتدا دچار یک افت مقاومت ۱۲ درصدی بوده است که رفته رفته این میزان افت با شیب بسیار کمی تقلیل پیدا کرده است. این تقلیل افت مقاومت تفاوتی است که بین این نمونه و نمونه قبل دیده می‌شود که تنها می‌تواند ناشی از افزایش تعداد لایه‌های ورق CFRP باشد.

این نمونه پس از ۵۰۰۰۰ سیکل بارگذاری و تحت اثر پدیده خستگی در نهایت به ظرفیت ۱۱۷ کیلونیوتن رسیده است. با مقایسه ظرفیت تیر در این حالت و حالت استاتیکی مشاهده می‌شود که تنها ۲/۸ درصد افت ظرفیت باربری در این نمونه داشتیم. به عبارتی افزایش تعداد لایه‌های نوار CFRP

توانسته است افت ظرفیت باربری تیر را از $3/7$ درصد به $2/8$ درصد برساند. می توان این نتیجه را این طور بیان کرد که افزایش لایه های نوار CFRP از یک لایه به دولایه، افت ظرفیت باربری تیر را حدود 24 درصد جبران کرده است. این میزان تأثیر مقاوم سازی با نوار CFRP در مقایسه با تأثیر افزایش لایه های ورق CFRP کم به نظر می رسد اما اگر در حالت کلی به تأثیر نوار CFRP در مقاوم سازی نگاه کنیم، نتیجه خواهیم گرفت که تفاوت تأثیر خستگی روی تیرهای مقاوم شده با نوار CFRP با پهنای 50 میلیمتر و تیرهای مقاوم شده با ورق CFRP با پهنای 150 میلیمتر بسیار کم و ناچیز است.

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

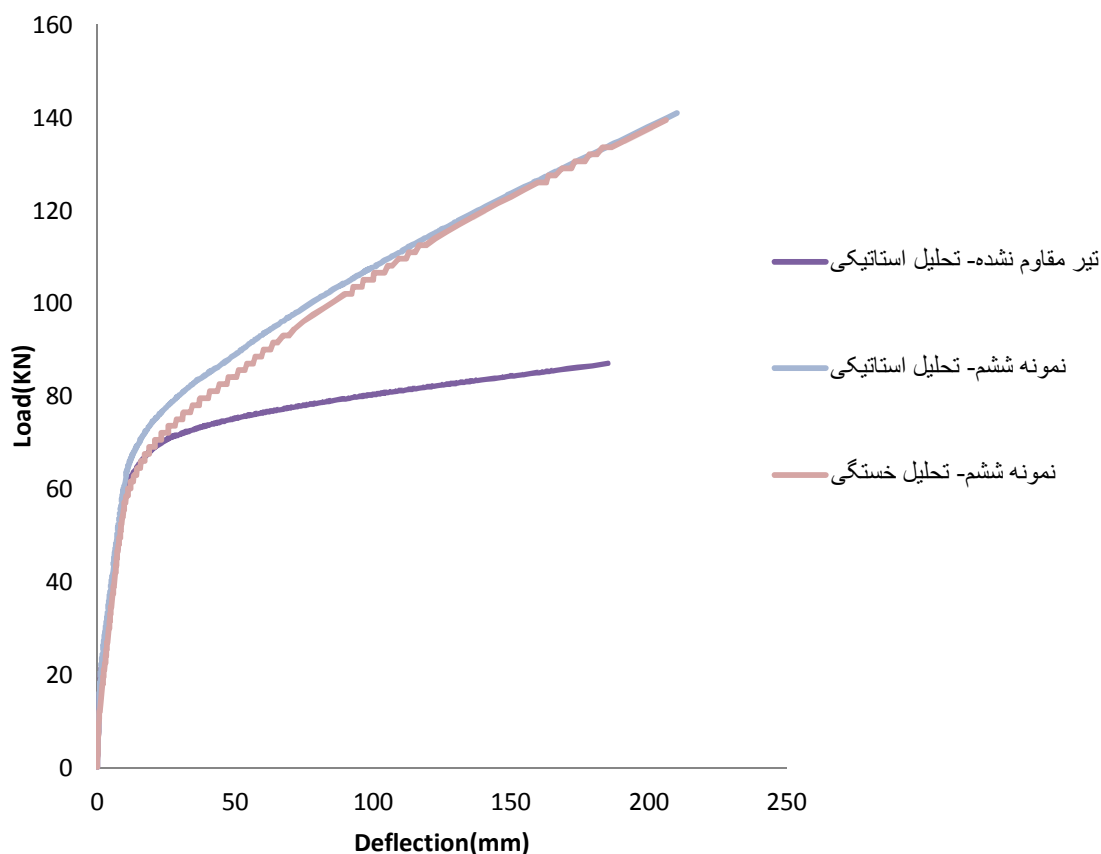
ششمین تیری که در نرم افزار مدل شده و مورد تحلیل خستگی و استاتیکی قرار گرفت، تیر بتن آرمه مقاوم شده با ورق سراسری U شکل که سطح زیر و اضلاع جانبی را پوشش می دهد می باشد. شکل زیر مقطع تیر و آرایش ورق را نمایش می دهد.



شکل (۵-۱۱): مقطع نمونه ششم

همان طور که در نمودارهای شکل ۵-۱۲ مشاهده می شود، حداکثر ظرفیت این نمونه در تحلیل استاتیکی 141 کیلونیوتن و در تحلیل خستگی مقدار $139/5$ کیلو نیوتن دارد. همان طور که مشخص است، این نمونه با رفتاری مشابه نمونه سوم، تحت اثر خستگی افت مقاومت 1 درصدی از خود نشان داده است. شیب نمودار در هر دو تحلیل استاتیکی و خستگی نیز مشابه نمونه سوم می باشد و تیر تا حد بار تقریباً 60 کیلونیوتن در هر سه حالت رفتار یکسانی داشته است و پس از آن دو نمودار تحلیل استاتیکی و خستگی تیر مقاوم شده بهم نزدیک تر شده اند. اختلاف ناچیز افت مقاومت این نمونه و

نمونه سوم نشان می‌دهد که آرایش این دو نمونه تحت اثر خستگی رفتار مشابهی داشته‌اند و هر دو تیر به یک نحو دچار تغییرات مقاومتی شده‌اند.



شکل (۵-۱۲): نمودار بار- تغییر مکان نمونه ششم

نمودار این نمونه بیانگر آن است که با استفاده از ورق‌های جانبی می‌توان تا حدودی افت مقاومت را جبران کرد. این ورق‌ها علی‌رغم این که نقش برشی در مقاوم‌سازی دارند اما در ارتقای ظرفیت تیر در برابر خستگی نیز موثر بوده‌اند. نمونه اول که با یک ورق تک لایه‌ای سراسری CFRP مقاوم شده بود در اثر خستگی ۲/۶ درصد افت داشت و در نمونه ششم که علاوه بر ورق تک لایه‌ای سراسری در سطح زیرین تیر، از دو ورق جانبی تک لایه‌ای سراسری CFRP استفاده شده بود، تیر ۱ درصد افت مقاومت داشته است. بنابراین می‌توان گفت که دو ورق جانبی باعث جبران ۱/۶ درصد افت مقاومت (حدود ۶۲ درصد کل افت مقاومت) شده است که این تأثیر قابل ملاحظه است.

۵-۸- تجزیه و تحلیل نتایج

همان گونه که در نمودار بدست آمده از نتایج مشاهده شد، پدیده خستگی در نمونه اول باعث یک افت مقاومت $2/6$ درصدی شد. این نمونه تنها با یک ورق تک لایه‌ای CFRP مقاوم شده بود اما پس از اینکه تعداد تعداد لایه‌های ورق را به دو لایه افزایش دادیم، این افزایش لایه یا به عبارتی دیگر افزایش ضخامت ورق CFRP افت $2/6$ درصدی را به $0/6$ درصد رساند یعنی 77 درصد افت مقاومت تیر را جبران کرد. شاید افت مقاومت $0/6$ درصدی از لحاظ کمیتی ناچیز باشد اما در سازه‌های بزرگ این میزان افت مقاومت قابل ملاحظه خواهد بود لذا کاهش این افت مقاومت در این گونه سازه از اهمیت بیشتری برخوردار است.

بار دیگر تعداد لایه‌های ورق را افزایش دادیم و به سه لایه رساندیم. در این حالت مشاهده شد که خستگی تیر تحت بار، افت بسیار ناچیزی نزدیک به صفر درصد بوجود آورد. می‌توان از این نتیجه این طور برداشت کرد که هرچه تعداد لایه‌های ورق CFRP بیشتر شود خستگی تیر تأثیر کمتری روی مقاومت تیر خواهد داشت.

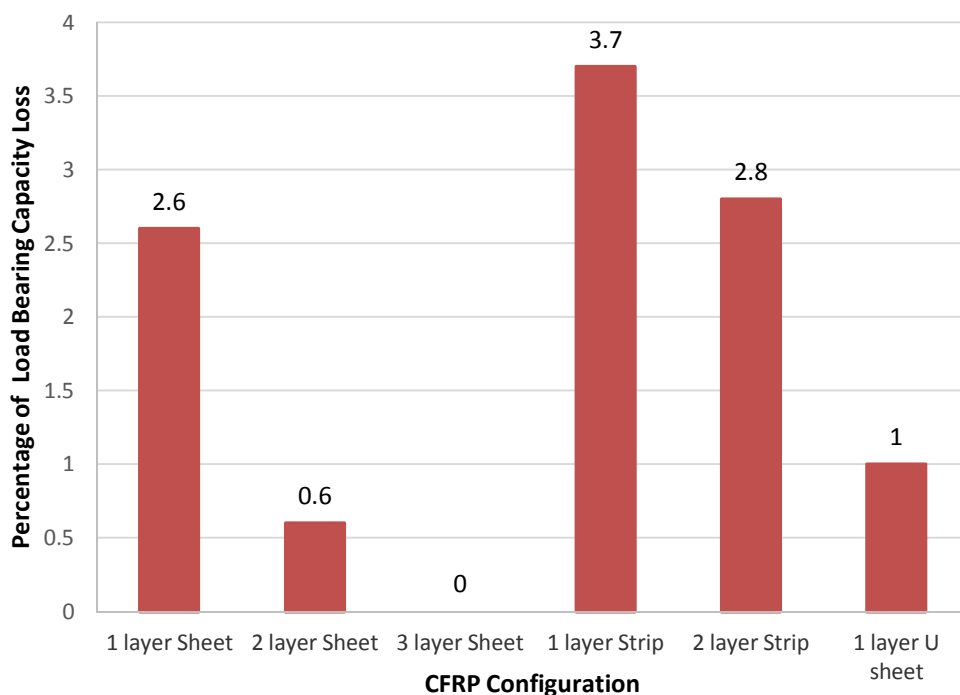
اگر فرض شود که تیر مقاوم شده با ورق تک لایه‌ای CFRP مربوط به یک پل در یک منطقه با تردد کم باشد طوری که در طی یک سال 50 هزار تردد روی آن صورت گیرد، می‌توان با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل‌های نرم‌افزاری انتظار داشت که مقاومت تیر این پل پس از گذشت یک سال حدود $2/6$ درصد کاهش یابد و پس از گذشت ده سال شاهد یک افت مقاومت قابل توجه باشیم. این نتیجه مبین آن است که تأثیر خستگی بر مقاومت تیر پل اهمیت بسزایی دارد و ازینرو اهمیت افزایش ضخامت ورق جهت مقاوم‌سازی پل افزون‌تر خواهد شد.

اختلاف افت مقاومت نمونه‌های اول، دوم و سوم نشان می‌دهد که می‌توان با ضخیم کردن ورق CFRP، تأثیر خستگی را روی تیر تقلیل داد. در کنار این موضوع، تأثیر کاهش پهنای ورق CFRP بر افت مقاومت تیر تحت اثر بارگذاری تناوبی و بروز خستگی در نمونه‌های چهارم و پنجم مورد بررسی

قرار گرفت. پهنای ورق از ۱۵۰ میلیمتر به ۱۰۰ میلیمتر کاهش داده شد و این کاهش ۳۳ درصدی منجر شد تا خستگی ظرفیت تیر را حدود ۳/۷ درصد کاهش دهد. این نتیجه مشخص کرد که کاهش پهنای ورق، مقاومت تیر را در برابر خستگی بیشتر تقلیل خواهد داد. در مرحله بعد تعداد لایه به دو لایه افزایش داده شد که این امر منتج به افت مقاومت ۲/۸ درصدی گردید. بنابراین نتیجه شد که افزایش تعداد لایه‌های نوار ۵۰ میلیمتری منجر به جبران ۰/۹ درصد افت مقاومت گردیده است و افزایش تعداد لایه‌ها برای نوار CFRP از یک لایه به دو لایه افت مقاومت تیر را نزدیک به ۲۵ درصد جبران کرده است.

با توجه به نتایج و نمودارها، می‌توان علت موثر نبودن خستگی بر مقاومت نمونه سوم را این طور بیان کرد که تیر تحت تعداد سیکل نه چندان زیادی قرار گرفته است و این تعداد سیکل مقاومت فشاری و کششی بتن و فولاد را تا میزان کمی تحت تأثیر قرار داده است به گونه‌ای که ورق CFRP توانسته است با افزایش یک لایه، مقاومت آن را تا ۷۷ درصد و با دو لایه افزایش مقاومت تیر را به طور کلی جبران کند. به عبارتی دیگر، تأثیر خستگی در تعداد سیکل پایین روی تیرهای بتنی کم بوده و افت مقاومت بوجود آمده به راحتی با استفاده از ورق CFRP قابل جبران بوده است. مقایسه نتایج سه نمونه اول این نتیجه را بدست می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌ها تأثیر چشم‌گیری بر جبران افت مقاومت تیر تحت اثر خستگی دارد اگرچه این افت مقاومت مقدار قابل توجهی ندارد. علاوه بر این، مقایسه نتایج نمونه چهارم و پنجم بیانگر این امرست که میزان تأثیر افزایش لایه‌های ورق CFRP با پهنای ۱۵۰ میلیمتر بیشتر از تأثیر افزایش لایه‌های نوار CFRP با پهنای ۵۰ میلیمتر بر جبران افت مقاومت تیر تحت اثر پدیده خستگی می‌باشد. در کنار این، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر افزایش لایه‌های ورق CFRP در بهبود مقاومت تیر تحت اثر پدیده خستگی بسیار فراتر از تأثیر افزایش پهنای ورق CFRP و سطح تماس آن با بتن است. نتایج نمونه ششم که آرایش آن با سایر نمونه‌ها متفاوت است، نشان داد که علاوه بر تأثیر اندک خستگی بر عملکرد تیر مقاوم شده با ورق U شکل، ورق‌های جانبی که در دو طرف تیر قرار گرفته‌اند، در مقاوم سازی تیر نقش چشم‌گیری دارند و می‌توانند در مقاومت در برابر

خستگی علاوه بر افزایش مقاومت برشی تیر نقش داشته باشند. امری که شاید انتظار آن نمی‌رفت و تصور میشد که این دو ورق فقط نقش برشی در تیرمقاوم شده بازی کنند. نمودار شکل ۵-۱۳ تفاوت تأثیر خستگی را روی آرایش‌های متفاوت CFRP بطور واضح‌تری نمایش می‌دهد.



شکل (۵-۱۳): نمودار مقایسه‌ای افت مقاومت تحت اثر خستگی در آرایش‌های متفاوت

همان طور که از نمودار مشخص است، افت مقاومت در نمونه سوم که با ورق ۱۵۰ میلیمتری سه‌لایه‌ای CFRP مقاوم شده بود کمترین مقدار و در نمونه چهارم که با دو نوار ۵۰ میلیمتری تک لایه‌ای CFRP مقاوم شده بود، بیشترین مقدار را دارد. توجه شود که نمونه ششم اختلاف بسیار اندکی با نمونه دوم دارد که می‌توان آن را جایگزینی برای نمونه دوم در نظر گرفت. به عبارتی دیگر، اگر از یک ورق تک لایه‌ای U شکل برای مقاوم‌سازی استفاده شود، از لحاظ مقاومت در برابر خستگی با مقاوم‌سازی تیر با استفاده از یک ورق دو لایه‌ای CFRP در سطح زیرین تیر تفاوتی نخواهد داشت.

پدیده خستگی همان طور که از تعریف آن پیداست، در اثر بارگذاری دینامیکی و تکرار بارگذاری در طی گذر زمان در سازه بروز پیدا می‌کند. حال هرچه تعداد سیکل‌های بارگذاری بیشتر باشد ویا مقدار بار وارده بیشتر شود، سازه موردنظر زودتر دچار خستگی خواهد شد. تعداد سیکلی که در

مدل‌سازی تیر موردنظر لحاظ شده است، جهت مشاهده خستگی یک تیر بتن‌آرمه منطقی است هرچند با افزایش تعداد سیکل تأثیر خستگی بر تیر محسوس‌تر است. لیکن تحلیل خستگی با تعداد سیکل بالا نیاز به پردازنده فوق‌العاده قدرتمند و زمان تحلیل بسیار دارد که در حوزه زمانی پروژه ممکن نبود.

در نمودارها این امر مشاهده شد که تا یک حد بار پس از اتمام ۵۰ هزار سیکل بارگذاری تناوبی، مقاومت تیر هیچ افتی نداشت و پس از آن به تدریج افزایش بار منتج به کاهش مقاومت تیر گردید. یک تیر بتن‌آرمه وقتی تحت اثر بارگذاری تناوبی قرار می‌گیرد، بتن و فولاد استفاده شده در آن رفته رفته دچار تقلیل مقاومت می‌شوند. اما همان طور که می‌دانیم بتن و فولاد در یک تیر بتن‌آرمه بطور متعامل عمل می‌کنند و تحت اثر خستگی هردوی آنها دچار تغییر می‌شوند. در این صورت ورق به کار رفته که به سطح زیرین بتن چسبانیده می‌شود، در واقع علاوه بر پوشش ضعف کششی-برشی بتن، با تحمل تنش‌های کششی در ناحیه بتن کششی و مقاومت در برابر خستگی، درصدی از تنش‌های کششی فولاد کششی را نیز می‌کاهد که این امر باعث افزایش مقاومت فولاد و به عبارتی افزایش عمر خستگی فولاد مسلح‌کننده تیر می‌گردد.

با توجه به این که بتن تشکیل‌دهنده تیر موردنظر از مقاومت کششی ناچیزی برخوردار است (حدود ۵ مگاپاسکال) و از ورق CFRP برای افزایش مقاومت کششی تیر علاوه بر افزایش مقاومت خستگی استفاده شده است، انتظار بروز خستگی در بتن نسبت به سایر مواد منطقی‌تر است. همان‌طور که می‌دانیم CFRP که برای مقاوم‌سازی و ترمیم سازه‌های بتنی استفاده می‌شود، به دلیل دارا بودن مقاومت کششی بالاتری (علی‌رغم کرنش گسیختگی پائین‌تر) نسبت به GFRP و AFRP، توانایی بیشتری در جبران مقاومت کششی پائین تیر دارد، لذا تیر مقاوم شده با CFRP تحت اثر بارگذاری تناوبی و خستگی رفتار بهتری از خود نشان خواهد داد. وقتی که بار طی چند سیکل روی تیر اعمال می‌شود، رفته رفته بتن در کشش وارد ناحیه غیرخطی می‌شود. هرچه بارگذاری به سوی جلو پیش

می‌رود، عرض و عمق ترک‌های کششی در بتن کششی نیز افزایش می‌یابد تا این که بتن ظرفیت کششی خود را از دست می‌دهد. پس از این که بتن در ناحیه کششی مقاومت خود را از دست داد، فولادهای کششی وارد عمل شده و تنش‌های کششی را متحمل می‌شوند. اما فولاد به دلیل ضعف باربری در اثر خستگی، با گذشت سیکل بیشتر ضعف خود را نشان خواهد داد و رفته رفته کرنش بیشتری را از خود نشان می‌دهد. این که بتن یا فولاد کدام زودتر به خستگی دچار می‌شوند پاسخ واضحی نخواهد داشت و با توجه به تعداد سیکل‌ها و میزان بار وارده روی تیر، انتظار افت مقاومت کمی از تیر می‌رفت که این انتظار نیز برآورده شد. اما همان طور که پیش‌تر گفته شد، به دلیل تعداد سیکل نه چندان زیاد و مقاومت فشاری بالای بتن احتمال خستگی در ورق CFRP بسیار پائین است.

همان طور که در نمودارها نیز مشاهده شد، تیر تحت اثر بار استاتیکی نیز خیز بالایی از خود نشان داد که این امر را نمی‌توان به تأثیر خستگی بر تیر نسبت داد. چرا که عوامل زیادی منجر به افزایش خیز تیر می‌شوند. اما افت مقاومت تیر را در برابر خستگی می‌توان تا حدودی ناشی از ضعف کششی در بتن دانست چرا که CFRP پس از رسیدن بتن به حد تنش مشخصی، نقش خود را در ارتقای خصوصیات کششی بتن بیشتر از قبل نشان داده است و چون میزان خستگی دیده شده در نمودارها حاکی از افت مقاومت ناچیز تیر است می‌توان گفت این افت مقاومت تنها به دلیل بروز ترک‌های کششی پس از گذشت چندین سیکل در بتن ناشی شده است در نتیجه پدیده خستگی تا درصد زیادی روی بتن مؤثر بوده است. از طرفی نمودار تنش-تعداد سیکل برای بتن (نمودار ۴-۱۷) نیز نشان می‌دهد که بتن در طی بارگذاری تناوبی دچار تغییرات تنش به مراتب بیشتری نسبت به آرماتورها و ورق CFRP شده است که این نیز می‌تواند دلیلی بر تأثیر بیشتر خستگی بر بتن باشد.

۹-۵- خلاصه نتایج

در جدول ۱-۵ خلاصه‌ای از نتایج تحلیل‌های استاتیکی و خستگی برای ۶ نمونه مشاهده می‌شود.

جدول (۱-۵): خلاصه نتایج نرم افزار ABAQUS

نمونه تیر	آرایش ورق	ظرفیت استاتیکی نرم افزار ABAQUS	ظرفیت خستگی نرم افزار ABAQUS	افت مقاومت تحت اثر خستگی
نمونه اول	یک ورق سرتاسری تک لایه ای	۱۱۴	۱۱۱	٪ ۲/۶
نمونه دوم	یک ورق سرتاسری دو لایه ای	۱۳۴/۴	۱۳۳/۵	٪ ۰/۶
نمونه سوم	یک ورق سرتاسری سه لایه ای	۱۵۰	۱۵۰	٪ ۰
نمونه چهارم	دو نوار ۵۰ میلیمتری تک لایه ای	۱۰۴/۴	۱۰۰/۵	٪ ۳/۷
نمونه پنجم	دو نوار ۵۰ میلیمتری دو لایه ای	۱۲۰/۴	۱۱۷	٪ ۲/۸
نمونه ششم	یک ورق U شکل تک لایه‌ای	۱۴۱	۱۳۹/۵	٪ ۱

نتایجی که از تحلیل نمونه‌ها و مقایسه نمودارها بدست آمده است می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- افزایش تعداد لایه‌های ورق CFRP از یک لایه به دولایه حداقل ۷۷ درصد و تا سه لایه می‌تواند حداقل ۹۵ درصد افت مقاومت تیر را در برابر خستگی جبران کند.
- تأثیر افزایش تعداد لایه‌های ورق CFRP در بهبود مقاومت تیر در برابر خستگی بیشتر از تأثیر افزایش پهنای ورق و سطح تماس آن با بتن است.

- با دو لایه شدن ورق CFRP با پهنای ۱۵۰ میلیمتر، افت مقاومت تیر حدود ۳ برابر بیشتر از دو لایه شدن دو نوار ۵۰ میلیمتری جبران می‌شود.
- تأثیر خستگی روی تیر مقاوم شده با ورق U شکل همانند تأثیر آن بر تیر مقاوم شده با ورق دو لایه‌ای CFRP است.
- کاهش پهنای ورق سراسری CFRP تا ۳۳ درصد تأثیر ناچیزی در تضعیف تیر در اثر پدیده خستگی دارد.

۵-۱۰- پیشنهادات

با توجه به ابعاد متفاوت تأثیرگذاری پدیده خستگی بر سازه‌های بتنی و نیز وجود زمینه‌های مختلف مقاوم‌سازی در این گونه سازه‌ها، می‌توان تأثیر خستگی بر مقاومت سازه‌ها و اعضای سازه‌ای را به طرق دیگر بررسی نمود. در تحقیقی که بررسی شد، تأثیرگذاری خستگی بر ظرفیت باربری تیرهای مقاوم شده با ورق CFRP مقایسه گردید و موضوع مورد بررسی تنها افت ظرفیت باربری تیر مقاوم شده بود. به عنوان یک پیشنهاد، می‌توان چگونگی تغییر شکل تیر مقاوم شده با ورق‌های کامپوزیتی تحت اثر خستگی با تعداد سیکل بالا بررسی گردد. همچنین تأثیر این پدیده بر کاهش سختی تیر مقاوم شده با ورق کامپوزیتی و مقایسه آن با تیرهای مقاوم شده با سایر سیستم‌های مقاوم‌سازی یکی از موضوعات قابل پژوهش در این زمینه است و می‌تواند زمینه‌ساز تحقیقات آینده درباره تأثیر خستگی روی پل‌ها جهت شناخت عملکرد سیستم‌های مختلف مقاوم‌سازی و چگونگی مقابله آنها با خستگی باشد.

فهرست مراجع

- [1] Hamada H., Fukute T., and Yamamoto, K., (1992) "Bending Behavior of Unbounded Prestressed Concrete Beams Prestressed with CFRP Rods", Fiber Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium, pp.1015-1026, Sheffield, UK
- [2] Saadatmanesh H., and Ehsani M. R., (1991) "RC Beams Strengthened with GFRP Plates, I: Experimental Study," **J.Structural Engineering, ASCE**, 117, 11, pp. 3417-3433.
- [3] Bedard and Claude, (1992) "Composite Reinforcing Bars: Assessing Their Use in Concrete," **Concrete International**, pp. 55-59.
- [4] Sharp B. N., (1996) "Reinforced and Prestressed Concrete in Maritime Structures" **Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Building**, 116, 3, pp. 449-469.
- [5] Hamid and Ahmad A., (1995) "Improving Structural Concrete Durability in the Arabian Gulf," **Concrete International**, pp. 32-35.
- [6] Ali Mohammed Gholam, Dannish, Sami Abdulla, and Al-Hussaini Adel, (1996) "Strength and Durability of Concrete Structures in Bahrain", **Concrete International**, pp. 39-45.
- [7] Matta Z., (1992) "Chlorides and Corrosion in the Arabian Gulf Environment," **Concrete International**, pp. 47-48.
- [8] Matta Z., (1993) "Deterioration of Concrete Structures in the Arabian Gulf," **Concrete International**, pp. 33-36.
- [9] Matta Z., (1993) "More Deterioration of Reinforced concrete in the Arabian Gulf," **Concrete International**, pp. 50-51.
- [10] Razaqpur A. G., and Kashef A. H., (1993) "State-of-the-Art on Fiber Reinforced Plastics for Buildings," Construction – National Research Council of Canada, Carleton University, Ottawa
- [11] Rostasy F. S., (1993) "FRP Tensile Elements for Prestressed Concrete – State of the Art, Potentials and Limits," Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138, pp. 347-366, USA
- [12] Minosaku, Koichi, (1992) "Using FRP Materials in Prestressed Concrete Structures," **Concrete International**, pp.41-45.
- [13] Erki M. A., and Rizkalla S. H., (1993) "Anchorage for FRP Reinforcement," **Concrete International**, pp. 54-59.
- [14] Martin, Roderick H., (1996) "Fiber Reinforced Plastic Standards for the Offshore Industry," **SAMPE Journal**, pp. 37-41.
- [15] Yamasaki, Y., Masuda, Y., Tanano, H., and Shimizu, A., (1993) "Fundamental Properties of Continuous Fiber Bars," Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138, pp. 715-730, USA
- [16] Tarricone, Paul, (1993) "Plastic Potential," **Civil Engineering**, pp. 62-64.

- [17] Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., and Tao, S., (1993) "Bond of GFRP Rebars to Ordinary- Strength Concrete," Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138, pp. 333-346, USA
- [18] Char, M. S., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R., (1994) "Concrete Girders Externally prestressed with Composite Plates," **PCI Journal**, pp. 40-51.
- [19] Mashida, M., and Iwamoto, K., (1993) "Bond Characteristics of FRP Rod and Concrete After Freezing and Thawing Deterioration," Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138, pp. 51-70, USA
- [20] Hahn, H. T., and Kim, R. Y., (1978) "Swelling of Composite Laminates," **Advanced Composite Materials-Environmental Effects, ASTM-STP 658**, pp. 98-130.
- [21] Mallick, P. K., (1988) "Fiber Reinforced Composites", Marcel Dekker, Inc., New York, USA
- [22] Burnsell, A. R., (1989) "Long-Term Degredation of Polimeric Matrix Composites," Concise Encyclopedia of Composite Materials, Pergamon Press, UK, pp. 165-173.
- [23] Dewimille, B., and Burnsell, A. R., (1983) "Accelerated Aging of a Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin in Water," **Composites**, pp. 14-35.
- [24] Dutta, P. K., (1983) "Tensile Strength of Unidirectional Fiber Composites at Low Temperatures", Conference on Composite Materials, pp. 782-792, Orlando, USA
- [25] Lord, H. W., and Dutta, P. K., (1988) "On the Design of Polymeric Composite Structures for Cold Region Applications", **J.Reinforced Plastics and Composites**, 7, pp. 435-450.
- [26] Larsson, F., (1988) "The Effect of Ultraviolet Light on Mechanical Properties of Kevlar 49 Composites," Environmental Effects on Composite Materials, Technomic Publishings Co., USA, pp. 132-135.
- [27] Fang-Yao YEH and Kuo-Chun CHANG, (1988) "Development and Application of Composite Materials" Retrofit RC Structure Technology, Taiwan

[۲۸] "راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP ، نشریه شماره ۳۴۵، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، تهران، ایران

- [29] Macdonald M.D., (1978) " The Flexural Behavior of Concrete Beams with Bonded External Reinforcement ", Supplementary Report 415, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK., p. 82
- [30] Macdonald M.D. and Calder A.J.J., (1982) " Bonded Steel Plating for Strengthening Concrete Structures ", **Int J Adhesion and Adhesives**, 2, pp. 127- 199.

[۳۱] جورج ای. دیتر ، (۱۳۸۲) " متالورژی مکانیکی " ، مرکز نشر دانشگاهی ، تهران، ایران

- [32] Chen, ZW., Xu, YL., Xia, Y., Li, Q., Wong, KY. (2011) "Fatigue analysis of long-span suspension bridges under multiple loading", **J of Engineering Structures**, 33(12), pp. 3246–3256
- [33] Barnes, R. and Mays, G., (1999) "Fatigue Performance of Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates", **J. Compos Constr ASCE**, 3(2), pp. 63–72
- [34] Loo, K., Foster, S., and Smith, S. (2012) "FE Modeling of CFRP-Repaired RC Beams Subjected to Fatigue Loading", **J. Compos Constr ASCE**, 16(5), pp. 572–580.
- [35] Al- Rousan, R. Issa, M., (2011) "Fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets". **J .Construction & Building Material**, 25 (8), pp. 3520-3529
- [36] Ekenel, M. and Myers, J. (2009) "Fatigue Performance of CFRP Strengthened RC Beams under Environmental Conditioning and Sustained Load", **J.Compos Constr ASCE**, 13(2), pp. 93–102
- [37] Chaallal, O., Boussaha, F., and Bousselham, A. (2010) "Fatigue Performance of RC Beams Strengthened in Shear with CFRP Fabrics". **J.Compos Constr ASCE**, 14(4), pp. 415–423
- [38] Al-Hammoud, R., Soudki, K., and Topper, T., (2011) "Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams Repaired with CFRP Sheets", **J.Compos Constr ASCE**, 15(1), pp. 42–51
- [39] Li Song., Zhi Wu Yu., (2011) "Fatigue Performance of Corroded RC Beams Strengthened with CFRP Sheets", **Advanced Materials Research**, 5589, pp. 243–249
- [40] Badawi, M. and Soudki, K., (2009) "Fatigue Behavior of RC Beams Strengthened with NSM CFRP Rods", **J. Compos Constr ASCE**, 13(5), pp. 415–421
- [41] Aidoo, J., Harries, K., and Petrou, M., (2004) "Fatigue Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer Strengthened Reinforced Concrete Bridge Girders", **J.Compos Constr ASCE**, 8(6), pp. 501–509
- [42] Heffernan, P. and Erki, M., (2004) "Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates", **J.Compos Constr ASCE**; 8(2), pp. 132–140
- [43] Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., (2003) "Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch", **J.Struct Eng ASCE**; 129(2), pp. 186–196
- [44] ABAQUS, ABAQUS/CAE User's manual revision 6.11. Dassault Systemes Simulia Corp, Providence, RI, USA

Abstract

Given the importance of strengthening and repairing the structures especially bridges and developing of FRP sheet strengthening method in current years, many researches in the field of structural have had a tendency toward evaluation of FRP strengthening system and comparing it with other modern methods. All bridges are always subjected to dynamic loads posed by vehicle traffic. Therefore, fatigue is a very important factor on the long term load bearing capacity of bridge girders.

FRP sheet strengthening system is one of the most effective methods in strengthening and repairing bridges for fatigue. In this investigation the effect of fatigue on RC beams strengthened with different CFRP configurations was studied. Moreover, a comparison between the loss of load bearing capacity caused by iteration of loading cycles and fatigue phenomenon was made. Based on a number of layers and sheet width, the specimens were modeled with six different configurations in finite elements software ABAQUS and the behavior of each specimen under static and fatigue loading was studied. Fatigue analysis consists of two steps. First, cyclic loading in 50,000 cycles and second, static loading was applied on sample. Finally, static and fatigue analyzing results for all samples were compared with each other in load-deflection diagram. The comparisons showed the different effects of fatigue phenomenon on RC beams strengthened with different number of layers and sheet width of CFRP. These comparisons also showed that the effect of increasing the number of the layers and the thickness of CFRP sheet in beam strength improvement for fatigue is greater than the effect of increasing the CFRP sheet width and contact area in beam strength improvement.

Keywords: FRP, fatigue, strengthening, cyclic loading, load bearing