

# تأثیر شرایط محیطی در عملکرد تقویت صفحات فولادی با الیاف بسپاری (FRP)

اصغر وطنی اسکویی\* (دانشیار)

فلورا جلالی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

الهام رفیعی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (دوره ۲ - ۳۱، شماره ۱/۴، ص. ۱۰۷-۱۱۶، یادداشت شنی)

استفاده از الیاف بسپاری (پلیمری) روش مناسبی برای تقویت قطعات و عناصر سکوهای دریایی و دیگر عناصر سازه‌های دریایی است. این مطالعه به تأثیر الیاف بسپاری در عملکرد قطعات فولادی و پیوستگی الیاف با فولاد تحت شرایط محیطی شدید نظیر: چرخه‌ی ذوب و یخ‌زدگی و تر و خشک شدن متوالی می‌پردازد. لذا دو سری نمونه با تعداد لایه‌ی متفاوت بسپاری در معرض دو چرخه‌ی ۱۷° و ۲۱° سیکل ذوب و یخ‌زدگی و تحت دو چرخه‌ی ۶° و ۱۲° سیکل تر و خشک قرار گرفته‌اند. همچنین در این مطالعه به بررسی مقاومت و سختی پیوند، مد گسیختگی و تغییر شکل پرداخته شده است. افزایش تعداد لایه‌های (CFRP) باعث افزایش ۳۰ و ۳۲ درصدی تغییر شکل نهایی به ترتیب تحت ذوب و یخ‌زدگی و تر و خشک شدن شده و نمونه‌های در معرض شرایط ذوب و یخ‌زدگی نسبت به نمونه‌های در معرض شرایط تر و خشک شدن، بار کمتری را تحمل کرده‌اند.

واژگان کلیدی: الیاف بسپاری، فولاد، تر و خشک شدن، ذوب و یخ‌زدگی، مد گسیختگی.

## ۱. مقدمه

امروزه تقویت سازه‌های دریایی و سازه‌هایی که در شرایط محیطی متفاوت قرار دارند، از موارد مهم در مهندسی عمران است. در این‌گونه سازه‌ها به عناصر سازه‌ی به دلایل متفاوتی از قبیل شرایط مخرب محیطی آسیب‌هایی وارد می‌شود. روش‌های سنتی رایج برای بهسازی و تعمیر از قبیل: جوش‌دادن و پیچ و پرچ کردن صفحات تقویتی فولادی، اغلب موجب حجیم و سنگین‌تر شدن سازه‌ها و افزایش تمرکز تنش به علت جوش‌کاری و سوراخ‌کاری می‌شوند و این موضوع برای سازه‌های در معرض بارهای تکرارشونده به علت خستگی بحرانی‌تر است. تأثیر خوردگی، مشکلات ثابت‌کردن صفحات، گسیختگی بی‌موقع به علت جوش‌کاری، که ناشی از تغییر متالورژی در فلز است، و همچنین افزایش هزینه و زمان موردنیاز برای مقاوم‌سازی از دیگر معایب روش‌های بهسازی سنتی است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد الیاف بسپاری از قبیل: نسبت مقاومت به وزن پایین، مقاوم بودن در برابر شرایط محیطی فرسایشی و همچنین فرم‌پذیری آن، استفاده از این مصالح، گزینه‌ی مناسبی جهت ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌های آسیب دیده است.<sup>[۱-۳]</sup>

نزدیکی مدول کشسان الیاف بسپاری کربن به مدول کشسان فولاد، باعث

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱/۱۶، پذیرش ۱۳۹۳/۱/۳۰.

asvatani@gmail.com  
flora.jalali@gmail.com  
erafiae@mail.kntu.ac.ir

استفاده‌ی گسترده‌ی آن در صنعت مقاوم‌سازی در سال‌های اخیر شده است.<sup>[۴]</sup> مطالعات گسترده‌ی جهت ارزیابی رفتار خمشی تیرهای فولادی تقویت‌شده با الیاف بسپاری، استفاده از الیاف بسپاری جهت ترمیم اعضاء فولادی ترک‌خورده و همچنین رفتار پیوند بین الیاف بسپاری و سطح فولاد انجام شده است.<sup>[۵]</sup>

با وجود مزایای استفاده از الیاف بسپاری جهت تقویت، یک چالش مانع از پذیرش کامل سیستم‌های فولادی تقویت‌شده با الیاف بسپاری در کاربردهای مهندسی عمران است و آن دانش محدود در بررسی خواص مکانیکی و دوام سازه‌های قرارگرفته در شرایط محیطی شدید است. سازه‌های فولادی تقویت‌شده با الیاف بسپاری ممکن است در طول عمر خدمت‌رسانی خود تحت شرایط محیطی شدید، از قبیل: ذوب و یخ‌زدگی، تر و خشک شدن، دماهای زیاد، تابش خورشید و چرخه‌ی حرارتی و حملات شیمیایی مهاجم قرارگیرند.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۱، به تجزیه و تحلیل تنش در صفحات فولادی تقویت‌شده با چند لایه‌ی الیاف بسپاری کربن تحت بارگذاری تک محوره پرداخته شده است. به منظور بررسی اعتبار، مقایسه‌ی راه‌حل‌های تحلیلی و تجارب آزمایشگاهی، تجزیه و تحلیل اجزاء محدود انجام شده است. نتیجه‌ی حاصل، پیشنهادی شامل راه‌حل‌های مرسوم تحلیلی بوده است، که تجزیه و تحلیل توزیع تنش صفحات فولادی با چند لایه‌ی الیاف بسپاری کربن را ممکن می‌سازد.<sup>[۶]</sup>

همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۱۲)، تأثیر بار دینامیکی با نرخ‌های مختلف در

اتصال دو قطعه‌ی فولادی متصل‌شده به یکدیگر با الیاف بسیاری کربن بررسی شده است. با افزایش نرخ بارگذاری، ظرفیت نهایی افزایش یافته است، که دلیل آن بهبود مقاومت برشی اپوکسی چسب بین فولاد و الیاف بسیاری کربن بیان شده است.<sup>[۸]</sup> پژوهشگرانی نیز با مطالعه‌ی خود (۲۰۱۲) نشان داده‌اند که با استفاده از رزین‌های متفاوت برای چسباندن الیاف بسیاری کربن می‌توان به برخی محدودیت‌های این الیاف، در زمانی که تحت شرایط دمایی و رطوبت متفاوت و یا چرخه‌ی ذوب و یخ قرار می‌گیرند، غلبه کرد.<sup>[۹]</sup>

همچنین پژوهشگران دیگری در همان سال، رفتار دو صفحه‌ی فولادی، که با الیاف بسیاری کربن به یکدیگر متصل شده بودند، در سطوح متفاوت بار و دماهای ثابت را مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که نه فقط دما، بلکه زمان هم در کاهش سختی و مقاومت نمونه‌ها مؤثر بوده است. نمونه‌ها در دمای ثابت بالاتر تحت بار کششی ثابت کمتر از بار نهایی، کاهش سختی و ظرفیت حمل بار را نشان داده‌اند. از طرفی نمونه‌های در دمای بالاتر، تحت بار کمتر از بار نهایی گسیخته شده‌اند.<sup>[۱۰]</sup>

در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۱، عملکرد پیوستگی فولاد با الیاف بسیاری الیاف بسیاری کربن متصل‌شده با چسب در دمای بالا بررسی شده است. بار نهایی و سختی اتصال در دماهای نزدیک یا بزرگ‌تر از T<sub>g</sub> به میزان قابل توجهی کاهش یافته است، درحالی که طول پیوند مؤثر با دما افزایش یافته است.<sup>[۱۱]</sup>

همچنین در مطالعه‌ی انجام‌شده‌ی دیگری (۲۰۱۲)، به بررسی اتصال فولاد با الیاف بسیاری الیاف بسیاری کربن در معرض چرخه‌ی حرارتی، آب دریای شبیه‌سازی‌شده و دمای ثابت پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن بود که تأثیر دمای ثابت در نمونه‌های تحت آزمایش، بیشتر از تأثیر چرخه‌ی حرارتی است. از طرفی قرارگرفتن نمونه‌ها به مدت ۱ سال در آب دریای شبیه‌سازی‌شده (نمونه‌ها در دمای کنترل‌شده در مخزن آب نمک طعام ۵٪ قرار گرفتند)، باعث کاهش مقاومت و سختی نمونه‌ها شده است، که نرخ کاهش مقاومت و سختی به مرور زمان کاهش یافته است. همچنین نمونه‌هایی که در معرض شرایط محیطی دما قرار گرفته‌اند، در مقایسه با نمونه‌های قرارگرفته در شرایط محیطی آب دریا، کاهش کمتری در مقاومت و سختی از خود نشان داده‌اند.<sup>[۱۲]</sup>

پژوهشگران دیگری (۲۰۱۰) نیز روش‌های متفاوت پیوند الیاف بسیاری الیاف بسیاری کربن با فولاد را تحت شرایط محیطی شدید بررسی و بیان کرده‌اند که کاهش مقاومت پیوند به علت تخریب چسب پیوستگی است.<sup>[۱۳]</sup>

پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۱۲، به مطالعه‌ی پیوند ورق‌های الیاف بسیاری با مدول بالا و فولاد پرداخته‌اند و مدگسیختگی، مقاومت پیوند، اثر طول پیوند و توزیع کرنش را در این اتصالات بررسی کرده‌اند. همچنین به مقایسه‌ی مدل تئوری با مدل آزمایشگاهی به‌منظور پیش‌بینی مقاومت پیوند و اثر طول پیوند در این اتصالات پرداخته‌اند.<sup>[۱۴]</sup>

پژوهشگران دیگری هم در سال ۲۰۱۳، لوله‌های فولادی را در آب دریای شبیه‌سازی‌شده و هوا مورد مطالعه قرار داده و مشاهده کرده‌اند که رفتار نمونه‌های دورپیچ‌شده با الیاف بسیاری دارای مقاومت خمشی نهایی، سختی خمشی و ظرفیت دوران بیشتری هستند. لیکن نمونه‌های دورپیچ‌شده، که در زیر آب قرار داده شده‌اند، به ظرفیت خمشی نمونه‌هایی که در هوا بودند، نرسیده‌اند.<sup>[۱۵]</sup>

در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۱۲، اثر چرخه‌ی ذوب و یخبندان در خواص مکانیکی ورق‌های شیشه و کربن مورد مطالعه قرارگرفته و هیچ تغییر قابل ملاحظه‌ی در مقاومت، مدول قطری و کرنش نهایی برای نمونه‌های الیاف بسیاری شیشه (GFRP) مشاهده نشده است. از سوی دیگر، مقاومت کششی و کرنش نهایی ورق‌های بسیاری

الیاف بسیاری کربن کاهش قابل ملاحظه‌ی داشته‌اند، درحالی که در سختی تغییر قابل ملاحظه‌ی مشاهده نشده است.<sup>[۱۶]</sup>

در برخی از کشورها نیز تغییرات فصلی و روزانه در آب و هوا منجر به ایجاد چرخه‌های متعدد ذوب و یخ‌زدگی می‌شود.<sup>[۱۷]</sup> تکرار چرخه‌ی ذوب و یخ باعث آسیب بیشتر مصالح می‌شود و به تدریج سختی و مقاومت مصالح کاهش می‌یابد. بنابراین آسیب ناشی از یخ‌زدگی یک فرایند بسیار پیچیده از خستگی است.<sup>[۱۸]</sup>

بسیاری از سازه‌های مهندسی مانند پل‌ها و سکوها در شرایطی در معرض ذوب و یخ‌زدگی و تر و خشک شدن قرار می‌گیرند و این موضوع باعث از دست دادن عملکرد آنها نسبت به زمان طراحی می‌شود. قرارگرفتن در معرض شرایط محیطی شدید، کاهش مقاومت اتصال و همچنین دوام اتصال بین الیاف بسیاری کربن و سطح فولاد را به همراه خواهد داشت.<sup>[۱۹]</sup>

عامل مهم دیگر در تقویت فولاد با الیاف بسیاری، اتصال این دو مصالح به یکدیگر است، که در شرایط محیطی ذوب و یخ‌زدگی و تر و خشک شدن به علت حضور رطوبت، مدگسیختگی در فصل مشترک اتفاق می‌افتد. چسبندگی معمولاً منسوب به نیروی ثانویه‌ی واندروالس<sup>۱</sup> است، که نیروهای بین مولکولی نسبتاً ضعیفی هستند. ضعف این نیروهای بین مولکولی باعث جابجایی آسان مولکول‌های چسب در حضور آب می‌شود، که این جابه‌جایی منجر به پیوندزدایی خودبه‌خودی بین دو مصالح می‌شود.

علاوه بر این، حضور رطوبت در خواص چسب به دوروش برگشت‌پذیر (نرم‌شدگی) و برگشت‌ناپذیر (شکست فیزیکی یا شیمیایی چسب) تأثیر می‌گذارد. یکی دیگر از عوامل پیوندزدایی بی‌ثباتی لایه‌های اکسید روی سطح فلز است.<sup>[۲۰]</sup>

مدگسیختگی عنصر پیونددهنده (چسب) همان‌طور که در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ ذکر شده است،<sup>[۲۱]</sup> به ضخامت چسب نیز بستگی دارد. در صورتی که ضخامت چسب کمتر از ۲ میلی‌متر باشد، مدگسیختگی چسب‌بندنده اتفاق خواهد افتاد؛ در غیر این صورت مقاومت پیوند کاهش می‌یابد و مدگسیختگی به مد لایه‌لایه‌شدگی الیاف بسیاری کربن برای لایه‌ی چسب ضخیم‌تر تبدیل می‌شود.

قرارگیری در معرض شرایط دمای زیر صفر منجر به سخت‌شدگی و ایجاد میکروترک‌ها در چسب و تخریب پیوند بین چسب با الیاف می‌شود. در حالی که در چرخه‌های یخ و ذوب، که در حضور نمک است، تسریع تنزل به علت تغییر شکل و انبساط لایه‌های نمک اتفاق می‌افتد و در مجموع اثر رطوبت موجب تورم و خشک‌شدن چسب می‌شود. به‌علاوه چرخه‌ی ذوب و یخ باعث کاهش مقاومت و سختی الیاف بسیاری می‌شود. گرچه کاهش مقاومت نسبت به کاهش سختی بیشتر است.<sup>[۲۲]</sup> بنابراین قرارگیری در شرایط: ذوب - یخ و تر - خشک باعث تخریب الیاف نمی‌شود، بلکه لایه‌ی چسب‌بندنده میان الیاف‌های بسیاری و فولاد در معرض خطر است.<sup>[۲۳]</sup>

عملکرد اعضای سازه‌ی تقویت‌شده با الیاف که در معرض چرخه‌ی ذوب و یخ‌زدگی و یا چرخه‌ی تر و خشک شدن قرار می‌گیرند، اساساً به این دو جنبه مربوط می‌شود:<sup>[۲۴]</sup>

۱. چسب بین الیاف بسیاری و عضو تقویت‌شده؛
۲. خواص مکانیکی ورقه‌ها.

در این مطالعه تعدادی نسبه‌ی فولادی با الیاف بسیاری تقویت‌شده، تحت شرایط محیطی: ۱. چرخه‌ی ذوب و یخ‌زدگی؛ ۲. تر و خشک شدن متوالی قرار گرفته‌اند و در نهایت، نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی گسیخته شده‌اند. هدف از انجام این آزمایش بررسی مقاومت نهایی و سختی پیوند، مدگسیختگی و تغییر شکل این

جدول ۱. معرفی نمونه‌ها.

نام نمونه‌ها	تعداد نمونه	تعداد لایه‌ی CFRP	تعداد سبکل بارگذاری	نوع شرایط محیطی
F-T-۱۷°	۲	۰		ذوب و یخبندان متوالی
F-T-G۱-C۱-۱۷°	۲	۱	۱۷°	
F-T-G۱-C۲-۱۷°	۲	۲		
F-T-۲۱°	۲	۰		
F-T-G۱-C۱-۲۱°	۲	۱	۲۱°	
F-T-G۱-C۲-۲۱°	۲	۲		
W-D-۶°	۲	۰		تر و خشک شدن متوالی
W-D-G۱-C۱-۶°	۲	۱	۶°	
W-D-G۱-C۲-۶°	۲	۲		
W-D-۱۲°	۲	۰		
W-D-G۱-C۱-۱۲°	۲	۱	۱۲°	
W-D-G۱-C۲-۱۲°	۲	۲		
STEEL	۲	۰	--	دمای محیط

گالوانیک فولاد را به میزان زیاد کاهش می‌دهد.<sup>[۱۶]</sup> بنا بر مطالعات دیگر، روش دوم، تعبیه‌ی ۱ لایه‌ی الیاف شیشه بین فولاد و الیاف بسیاری کربن است؛ که با جلوگیری از تماس بین دو سطح مصالح، به خصوص در مکان‌هایی که امکان خلاء در چسب وجود دارد، از خوردگی فولاد جلوگیری می‌کند.<sup>[۲]</sup> از این رو در این مطالعه از ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه روی سطح فولاد، جهت جلوگیری از خوردگی گالوانیک فولاد استفاده شده است.

نمونه‌ها در زمانی که تحت شرایط محیطی ذوب و یخ‌زدگی، و تر و خشک شدن قرار می‌گیرند، است.

## ۲. برنامه‌ی آزمایش

در این مطالعه، ۲۴ قطعه‌ی صفحه‌ی فولادی توسط الیاف بسیاری تقویت شده و پس از قرارگیری در شرایط محیطی شدید و متفاوت، به این شرح تا مرحله‌ی گسیختگی تحت بارگذاری کششی قرار گرفته‌اند.

### ۲.۲. آزمایش نمونه‌ها در شرایط محیطی تر و خشک شدن متوالی

در این طرح نیز ۱۲ نمونه مانند طرح اول استفاده شده است، ولی این بار تحت چرخه‌ی تر و خشک شدن متوالی با دو سبکل ۶° و ۱۲° قرار گرفته‌اند. جزئیات این طرح نیز در جدول ۱ ارائه شده است. انتخاب این طرح بر مبنای وجود سازه‌هایی است که در نزدیک سطح آب و تحت تأثیر امواج، جذر و مد، در معرض تر و خشک شدن متوالی هستند، صورت گرفته است.

### ۱.۲. آزمایش نمونه‌ها در شرایط محیطی ذوب و یخبندان

بعضی مناطق اختلاف دمایی زیاد در شب و روز دارند، لذا ممکن است اعضای سازه‌ی در معرض چرخه‌های متوالی ذوب و یخ‌زدگی قرار گیرند، طرح اول بر این اساس انتخاب شده است. در این طرح ۱۲ نمونه، که شامل نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه و تعدادی متغیر ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن و همچنین نمونه‌های شاهد هستند، تحت چرخه‌ی ذوب و یخ با دو سبکل ۱۷° و ۲۱° قرار گرفته‌اند. جزئیات این طرح در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۳.۲. خصوصیات مصالح

مصالح مصرفی در این آزمایش شامل: الیاف کربن، الیاف شیشه، چسب اپوکسی دو بخشی عمل‌آوری شده در دمای محیط و فولاد گرم نورد شده است. مشخصات تمامی این مصالح مطابق با دستورالعمل کارخانه‌ی سازنده در نظر گرفته شده است. خصوصیات الیاف بسیاری در جدول ۲ ارائه شده است.

الیاف بسیاری کربن و الیاف بسیاری شیشه به شکل نوارهایی با عرض ۵° و طول ۲۰۰ میلی‌متر با توجه به آیین‌نامه‌ی ASTM ۳۰۳۹ آماده شده است.<sup>[۱۷]</sup> چسب اپوکسی با توجه به دستورالعمل کارخانه‌ی سازنده آماده و در دمای اتاق عمل‌آوری شده است. ابعاد صفحات فولادی ۴۰۰ × ۵۰ × ۵ میلی‌متر (طول × عرض × ضخامت) بوده است.

علی‌رغم مزایای استفاده از الیاف بسیاری کربن جهت تقویت فولاد، حضور الیاف کربن باعث خوردگی فولاد می‌شود، زیرا کربن یک هادی الکتریکی است. برای کمک به کمینه‌رساندن وقوع خوردگی گالوانیکی بین فولاد و مواد الیاف بسیاری کربن، یک عایق الکتریکی می‌تواند بین دو سطح برای شکستن تماس الکتریکی و جلوگیری از شکل‌گیری یک جریان گالوانیک قرار داده شود.<sup>[۱۲]</sup> دو روش در پژوهش‌های پیشین برای جلوگیری از خوردگی گالوانیک ذکر شده است. روش اول، استفاده از چسب اپوکسی به‌عنوان عایق بین فولاد و الیاف کربن است. طبق این مطالعه پوشش الیاف کربن با ۰/۲۵ میلی‌متر ضخامت لایه‌ی چسب، نرخ خوردگی

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مصالح.

الیاف کربن	الیاف شیشه	
۲۴۰	۷۷	مدول کشسان (GPa)
۴۱۱۶	۳۴۵۰	مقاومت کششی (MPa)
۱٫۷۲	۴٫۴۸	کرنش کششی (%)

#### ۴.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

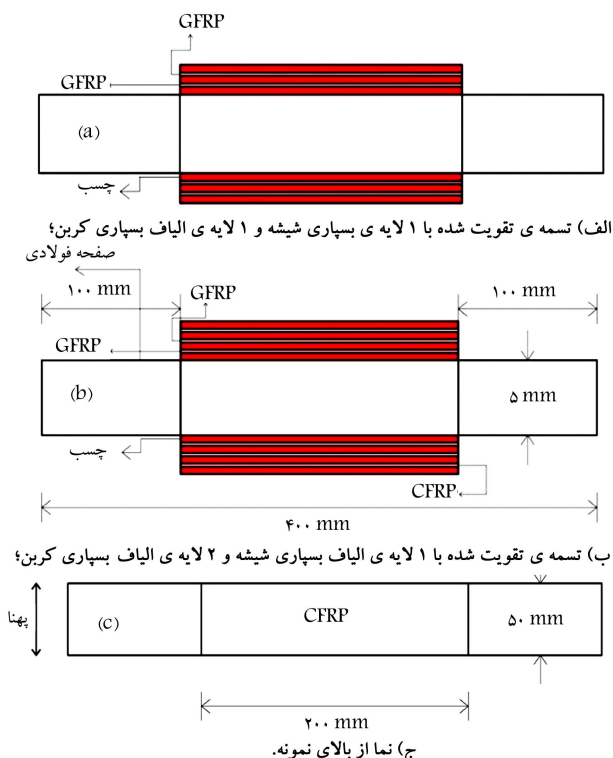
در این مطالعه، مقاومت و تغییرشکل فولاد تقویت شده با الیاف بسیاری شیشه و کربن بعد از قرارگیری در شرایط محیطی ذکر شده، تحت بارکششی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه از اتصال نشان داده شده در شکل ۱ بر مبنای تحقیقات ژانگ لی،<sup>[۶]</sup> که برای مقاوم‌سازی مناسب است، جهت تقویت نمونه‌های فولادی استفاده شده است. در مطالعات پیشین مشاهده شده است که تجاوز تعداد لایه‌ها از یک حد معین، افزایش قابل توجهی در مقاومت سیستم ندارد.<sup>[۸]</sup> بنابراین آزمایش‌ها برای دو سری ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن، آماده و در این مطالعه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

این تذکر لازم است که جهت جلوگیری از خوردگی فولاد قبل از استفاده از لایه‌های الیاف بسیاری کربنی، ۱ لایه از الیاف بسیاری شیشه‌یی استفاده شده است. ابعاد الیاف بسیاری شیشه‌یی به‌کاررفته در همان ابعاد و اندازه‌ی الیاف کربنی بوده است.

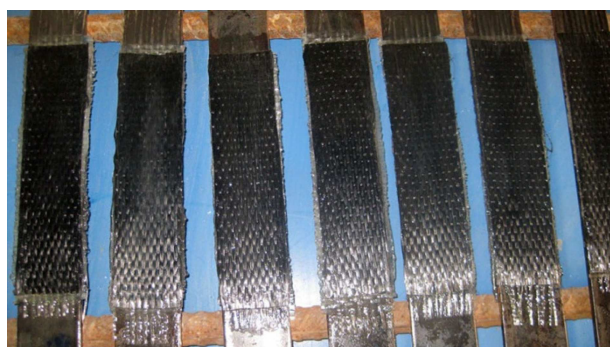
با توجه به شکل ۱، هر نمونه‌ی فولادی شامل یک صفحه فولادی به طول ۴۰۰ و عرض ۵۰ و ضخامت ۵ میلی‌متر است. تسمه‌ی فولادی از دو طرف با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه به طول ۲۰۰ و عرض ۵۰ میلی‌متر پوشانده شده است. در مرحله‌ی بعد، سطح این نمونه‌ها یک بار با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن و بار دیگر با ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن پوشانده شده است (شکل‌های ۱ الف و ۱ ب). جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، سطح فولاد ماسه‌پاشی<sup>۲</sup> و از هرگونه آلودگی و چربی زدوده شده است. برای ساخت اتصال این نمونه‌ها از روش لایه‌یی مرطوب<sup>۳</sup> استفاده شده است. به این صورت که با توجه به دستورالعمل کارخانه‌ی سازنده سطح فولاد و الیاف به میزان لازم از چسب آغشته و بعد از چسباندن لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه روی فولاد، اشباع‌شدن نمونه از طریق عبور یک غلتک کوچک بر روی لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه تأمین شده است. بعد از آن از یک رول پلاستیکی جهت خارج کردن حباب‌های هوای محبوس شده در چسب استفاده شده است.

الیاف بسیاری کربن بر روی سطح الیاف بسیاری شیشه به همین ترتیب چسبانده شده‌اند (شکل ۲). بعد از آماده‌سازی، نمونه‌ها در دمای محیط عمل‌آوری شده‌اند تا چسب به خوبی با سطح فولاد و الیاف بسیاری پیوند داشته باشد. سپس نمونه‌ها در معرض شرایط محیطی (طرح‌های یک و دو)، مطابق جدول ۱ قرار گرفته‌اند.

در قسمت اول آزمایش‌ها، چرخه‌ی ذوب و یخ‌زدگی عبارت است از قرارگیری نمونه‌ها در دمای ۲۱- تا ۲۵- درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵٪ به مدت ۴ ساعت، سپس نمونه‌ها در دمای اتاق (۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) به مدت ۲ ساعت با رطوبت نسبی ۲۰٪ قرار گرفته‌اند. این دو مرحله یک سیکل ذوب و یخ‌زدگی را تشکیل می‌دهد. این عملیات تحت دو چرخه‌ی بارگذاری متفاوت، یک بار به تعداد ۱۷۰ سیکل و بار دیگر به تعداد ۲۱۰ سیکل برای نمونه‌های تقویت شده با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه و ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن و همچنین نمونه‌های تقویت شده با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن و نمونه‌های بدون تقویت تکرار شده است (شکل ۳).



شکل ۱. تسمه‌های تقویت شده با الیاف بسیار.



شکل ۲. نمایشی از نمونه‌های آماده‌سازی شده.



شکل ۳. نمونه‌های قرارگرفته در سیکل ذوب و یخ.

به طوری که الیاف بسیاری عملاً در ناحیه‌ی خمیری فولاد کار بردی نداشتند. برای رفع این مشکل از دو صفحه‌ی فولادی به هم پیچ شده با ضخامت ۱۰ mm، که در هر دو انتها الیاف بسیاری را در برگیرد، استفاده شده است. هدف از استفاده از این ورق‌های فولادی، جلوگیری از جداشدگی و سُرخوردگی الیاف بسیاری از سطح بوده است و هیچ تأثیر مقاومتی در تسمه‌های تقویتی ندارد.

#### ۴. نتایج تجربی و بحث

در این بخش نتایج میانگین نمونه‌های مورد آزمایش برای دو طرح تر و خشک شدن متوالی و قرارگیری در چرخه‌ی ذوب و یخ در به تفصیل گزارش شده است.

۴.۱. نتایج نمونه‌ها در معرض شرایط تر و خشک شدن در ۶۰ سیکل با مشاهده‌ی نمودار بار - تغییرشکل به دست آمده از میانگین نتایج نمونه‌هایی که در معرض شرایط محیطی ۶۰ سیکل تر و خشک شدن متوالی قرار گرفته‌اند (شکل ۵ الف)، مشاهده می‌شود که مقاومت نهایی نمونه‌های فولادی که با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن تقویت شده‌اند، نسبت به نمونه‌هایی که با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه و ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن تقویت شده‌اند، افزایش ناچیزی در حدود ۱٪ داشته است. شیب نمودار در ناحیه‌ی خطی برای نمونه‌های تقویت شده و نمونه‌ی تقویت نشده‌ی قرارگرفته در معرض تر و خشک شدن متوالی تقریباً یکسان است، که نشان‌دهنده‌ی آن است که تقویت صفحه‌ی فولادی و افزایش تعداد لایه‌های الیاف بسیاری کربن تأثیری در میزان سختی نمونه‌هایی که در معرض تر و خشک شدن متوالی با چرخه‌ی ۶۰ سیکل قرار گرفته‌اند، ندارد. این مسئله را می‌توان به این صورت توضیح داد که تا قبل از تسلیم فولاد، وجود لایه‌های الیاف بسیاری نقشی در تحمل بار یا تأمین سختی ندارند. اما به محض تسلیم فولاد لایه‌های بسیاری وارد عمل شده و بخشی از نیروی کششی که توسط دستگاه اعمال می‌شود، را تحمل می‌کند. تفاوتی که بین دو نمونه‌ی یک لایه و دو لایه مشاهده می‌شود، را می‌توان به مقاومت پیوند ارتباط داد.

با مقایسه‌ی نمونه‌های فولادی تقویت نشده، که در معرض تر و خشک شدن متوالی قرار داشته‌اند و نمونه‌های فولادی که در شرایط عادی بوده‌اند، می‌توان به کاهش سختی، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی اشاره کرد. با توجه به کم بودن تعداد سیکل‌های بارگذاری، این تفاوت قابل ملاحظه نیست.

با توجه به منحنی‌های شکل ۵ ج می‌توان مشاهده کرد که برای نمونه‌های فولادی تقویت نشده (نمونه‌ی شاهد)، افزایش سیکل بارگذاری باعث کاهش تغییرشکل شده است. از سوی دیگر، منحنی‌های شکل‌های ۵ د و ۵ هـ نشان می‌دهند که در نمونه‌های فولادی تقویت شده با ۱ لایه و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری، افزایش تعداد سیکل تر و خشک شدن نه فقط باعث کاهش تغییرشکل نمی‌شود، که به عکس، افزایش تغییرشکل را به همراه دارد. با افزایش تعداد لایه‌ها، تغییرشکل پیوند به میزان ۳۰٪ افزایش یافته است. جذب رطوبت، نیز تأثیری سودمند در کامپوزیت دارد. جذب رطوبت باعث تورم رزین می‌شود، که این مسئله به نوبه‌ی خود تنش‌های پس ماند بین ماتریس و الیاف راکه در اثر انقباض ضمن عمل‌آوری کامپوزیت ایجاد شده است، کاهش می‌دهد. این مسئله باعث آزاد شدن تنش‌های بین ماتریس و الیاف می‌شود و ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. در کامپوزیت‌هایی که به صورت نامناسب ساخته شده‌اند، در اثر وجود حفره‌ها در سطح بین الیاف و ماتریس و یا در لایه‌های کامپوزیت، نفوذ آب در داخل حفره‌ها و یا در سطح مشترک الیاف و ماتریس ممکن است به سیلان رزین منجر شود.<sup>[۱۸]</sup>

سری دوم آزمایش‌ها شامل قرارگیری نمونه‌ها در معرض تر و خشک شدن متوالی است، که در این سری، نمونه‌ها با دو سیکل ۶۰ و ۱۲۰ به طور متوالی تر و خشک شده‌اند. چرخه‌ها به این صورت بوده‌اند که نمونه‌ها بعد از هر بار خشک شدن، در دمای محیط مجدد خیس شده‌اند و هر چرخه‌ی تر و خشک شدن، تشکیل یک سیکل را داده است. نام‌گذاری نمونه‌ها به این صورت تفسیر شده است:

۱. حرف اول F-T و یا W-D برای بیان نوع شرایط محیطی: ذوب (T) و یخ‌زدگی (F) و یا تر (W) و خشک شدن (D) است.

۲. بیان‌کننده‌ی الیاف شیشه و عدد بعد از آن، بیان‌کننده‌ی تعداد لایه‌های آن است.

۳. C بیانگر الیاف کربن و عدد بعد از آن بیان‌کننده‌ی تعداد لایه‌ی الیاف بسیاری کربن است.

۴. آخرین عدد، بیان‌کننده‌ی تعداد سیکل بارگذاری چرخه‌ی است.

برای مثال F-T-G1-C1-170 بیانگر نمونه‌ی قرارگرفته شده در شرایط محیطی ذوب و یخ‌زدگی با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه و ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن تحت چرخه‌ی ۱۷۰ سیکل است. دو نمونه‌ی شاهد بدون الیاف و بدون قرارگیری در شرایط محیطی شدید با عنوان STEEL نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

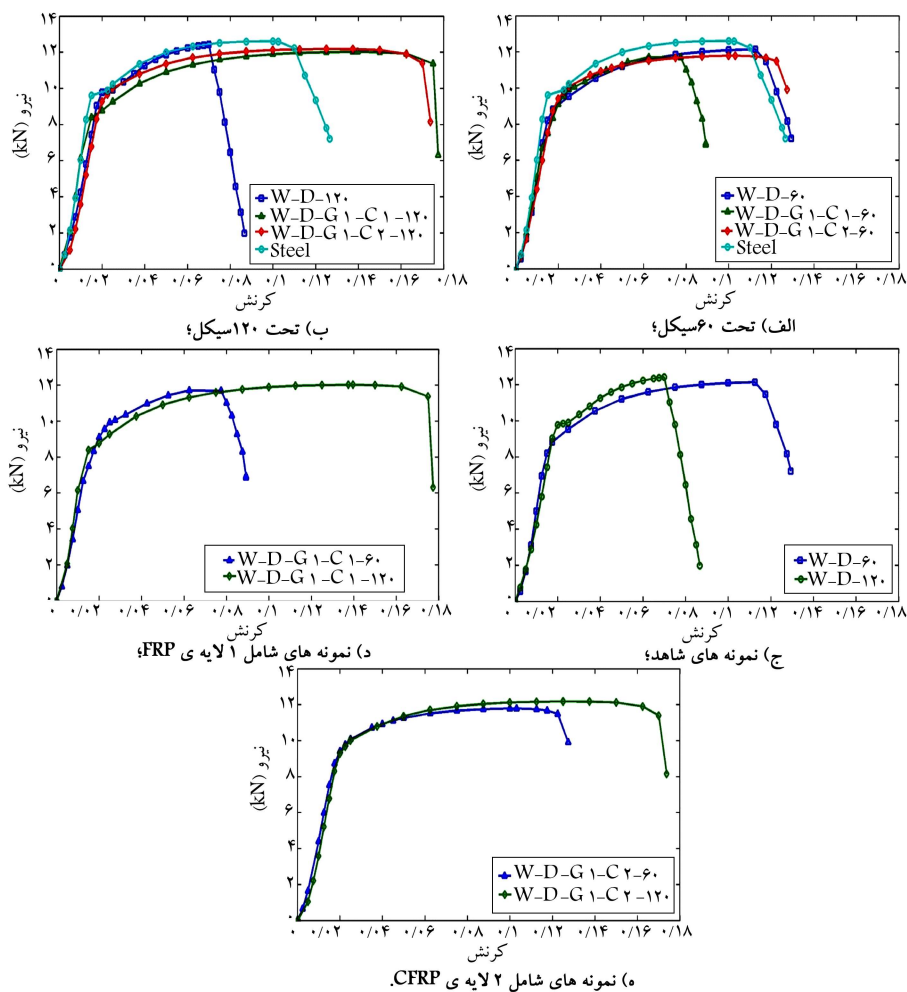
#### ۳. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

بعد از تکمیل زمان قرارگیری نمونه‌ها در شرایط محیطی بیان شده، نمونه‌ها در معرض شرایط ذوب و یخ‌زدگی به مدت ۵ ساعت و نمونه‌های تر و خشک ۴۸ ساعت قبل از شروع آزمایش در محیط آزمایش قرار گرفته و سطح تمامی نمونه‌ها خشک بوده و دمای همه‌ی نمونه‌ها به دمای محیط رسیده است، سپس جهت تخمین ظرفیت پیوند فولاد با الیاف بسیاری، نمونه‌ها تحت آزمایش گسیختگی کششی با سرعت یکنواخت ۵ mm/min بارگذاری شده‌اند. اعمال بارگذاری با استفاده از دستگاه Zwick/Roll توسط گیره‌های هیدرولیکی با ظرفیت بارگذاری ۱۵ kN انجام شده است. این آزمایش در حالت کنترل‌شونده توسط تغییرمکان انجام شده است (شکل ۴).

در زمان انجام آزمایش، چسب و رزینی که در فصل مشترک فولاد با الیاف بسیاری قرار داده شده بود، در انتهای محدوده‌ی رفتار کشسان فولاد جدا شده است؛



شکل ۴. آزمایش کشش نمونه‌های آزمایش.



شکل ۵. نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ها تحت تر و خشک شدن متوالی.

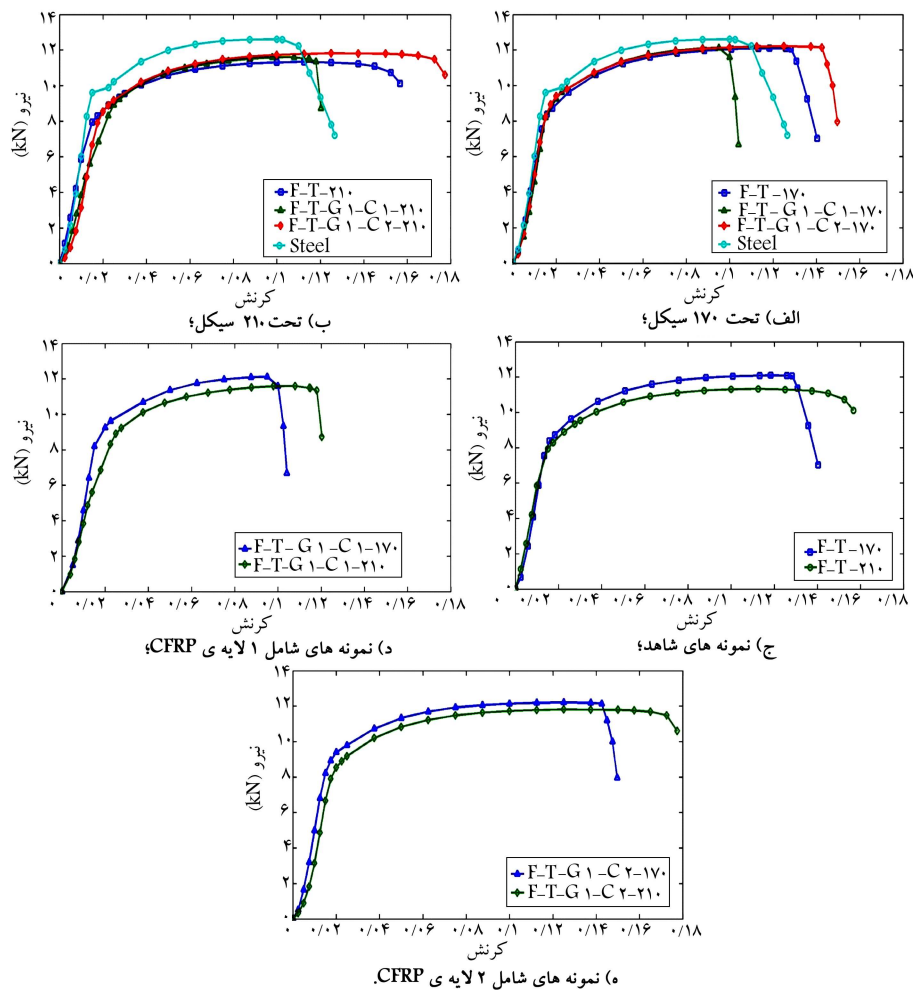
شیشه مشاهده شده است،<sup>[۱۹]</sup> ولی رطوبت هیچ‌گونه تأثیر منفی شناخته‌شده‌ی در الیاف کربن نداشته است.<sup>[۲۰]</sup> افزایش فشار هیدرواستاتیک (مثلاً در مواردی که کامپوزیت‌ها در مصارف زیر آب یا در کف دریا به کار می‌روند)، لزوماً به جذب آب بیشتر توسط کامپوزیت و افت خواص مکانیکی آن منجر نمی‌شوند. بدین ترتیب انتظار می‌رود که بیشتر سازه‌های بسیاری زیر آب، دوام بالایی داشته باشند. در حقیقت، تحت فشار هیدرواستاتیک، جذب آب به دلیل بسته شدن ریز ترک‌ها و ضایعات بین سطحی، کمی کاهش می‌یابد.<sup>[۲۱]</sup>

**۲.۴. نتایج نمونه‌ها در معرض شرایط تر و خشک شدن در ۱۲۰ سیکل**  
نتایج حاصل از نمودار بار - تغییر شکل (شکل ۵ ب) نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌های الیاف بسیاری کربن تأثیری در میزان مقاومت و سختی نمونه‌هایی که در معرض ۱۲۰ سیکل تر و خشک شدن متوالی قرار گرفته‌اند، نداشته و تغییر شکل این نمونه‌ها تقریباً بدون تغییر است. نمونه‌های تقویت شده با ۱ و ۲ لایه الیاف بسیاری کربن (شکل‌های ۵ ج و ۵ د) که در معرض شرایط تر و خشک شدن قرار گرفته بودند، هیچ افزایش مقاومتی نسبت به نمونه‌های تقویت نشده (شکل ۵ ج)، که تحت همان شرایط قرار داشتند، نداشته‌اند و حتی در حدود ۲ تا ۳ درصد کاهش مقاومت نیز مشاهده شده است.

در منحنی‌های شکل ۵ ه می‌توان مشاهده کرد که نمونه‌ی فولادی تقویت شده با ۱ لایه الیاف بسیاری شیشه و ۲ لایه الیاف بسیاری کربن که تحت ۱۲۰ سیکل چرخه‌ی تر و خشک شدن متوالی قرار گرفته‌اند، تغییر شکل ۱۷٪ را تجربه کرده‌اند و این در حالی است که اعمال ۶۰ سیکل چرخه‌ی تر و خشک شدن متوالی، ۹٪ تغییر شکل را به همراه داشته است. بنابراین نمونه‌های در معرض ۱۲۰ سیکل تر و خشک در حدود ۲۸٪ تغییر شکل بزرگ‌تر از نمونه‌های در معرض ۶۰ سیکل را تحمل می‌کنند و در نهایت جذب انرژی سیستم بیشتر شده است، و سیستم قبل از گسیختگی، تغییر شکل بیشتری را تحمل کرده است.

نمونه‌ی تقویت شده با ۱ و ۲ لایه الیاف بسیاری کربن رفتار غیرخطی مناسبی (بدون هیچ شکست در نمودار) را از خود نشان داده است. الیاف بسیاری که با آب اشباع می‌شوند، معمولاً کمی افزایش شکل‌پذیری<sup>۴</sup> در اثر نرم‌شدگی<sup>۵</sup> ماتریس از خود نشان می‌دهند. این مسئله را می‌توان یک جنبه‌ی سودمند از جذب آب در الیاف بسیاری بر شمرد. این موضوع به این علت است که الیاف بسیاری کربن به سطح فولاد چسبیده و بعد از گسیختگی فولاد، از سطح پیوندشده جدا نشده و به صورت یک پارچه عمل کرده و باعث انعطاف‌پذیر شدن این پیوند شده است.

گرچه رفتار الیاف بسیاری شیشه به علت داشتن سیلیکا در ساختار خود نیاز به بررسی بیشتری تحت رطوبت است و در آزمایش‌ها کاهش بار بیشتری در الیاف



شکل ۶. نمودار بار - تغییرمکان نمونه‌ها تحت ذوب و یخ‌زدگی متوالی.

#### ۱.۲.۴. نمونه‌ها در معرض ۱۷۰ چرخه‌ی ذوب و یخ

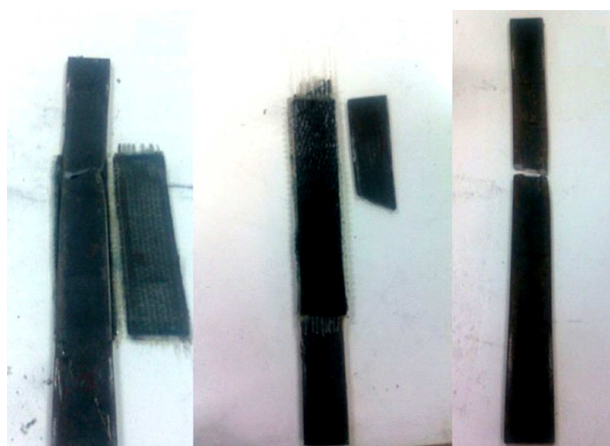
نمودار بار - تغییرشکل (شکل ۶ الف)، برای نمونه‌های قرارگرفته در معرض ۱۷۰ سیکل چرخه‌ی ذوب و یخ، نشان می‌دهد که تقویت نمونه‌ها و همچنین افزایش تعداد لایه‌های کربن تأثیری در میزان سختی نمونه‌ها نداشته است. با مقایسه‌ی نمونه‌های تقویت‌نشده با نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن مشاهده می‌شود که با تقویت صفحات فولادی، حدود ۱٪ مقاومت نهایی افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود تغییرشکل نهایی نمونه‌ها با افزایش تعداد لایه‌ها از ۱ به ۲ لایه از ۱۰۴ به ۱۴۹، به‌طور قابل ملاحظه‌ی در حدود ۳۱٪ افزایش یافته است. چرا که الیاف بسیاری کربن باعث تغییرشکل بیشتری شده است، به‌طوری که نمونه‌های تقویت‌شده به‌صورت انعطاف‌پذیرگی‌سخت شده‌اند. مقاومت نهایی نمونه‌ی ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن با مقدار ۱۲/۲۰ kN، حدود ۶۶٪ از نمونه‌های ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن با مقدار ۱۲/۱۲ kN بیشتر است، که این افزایش، مقداری ناچیز است و نمی‌توان انتظار داشت که با افزایش ۱ لایه به ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن، مقاومت نیز ۲ برابر شود.

#### ۲.۲.۴. نمونه‌ها در معرض ۲۱۰ چرخه‌ی ذوب و یخ

درجه حرارت‌های حدود ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، تأثیر چندانی در مقاومت تسلیم فولاد ندارند، لیکن درجه حرارت‌های پایین‌تر از حد معمول می‌تواند اثرات قابل ملاحظه‌ی در شکل‌پذیری فولاد داشته باشند. به‌عبارت دیگر، رفتار فولاد در آستانه‌ی درجه

تغییرشکل حد تسلیم با افزایش سیکل بارگذاری از ۶۰ سیکل ذوب و یخ به ۱۲۰ سیکل ذوب یخ از ۱۲ به ۱۷، ۱۷ به ۱۱، ۱۱ به ۱۱، به ترتیب برای نمونه‌ی تقویت‌شده با ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن کاهش یافته است، در صورتی که تغییرشکل نهایی این نمونه‌ها با افزایش سیکل بارگذاری از ۷ به ۸، ۸ به ۱۲ و ۱۳ به ترتیب برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری افزایش یافته است. در صورتی که این روند در نمونه‌های شاهد، که در معرض همان شرایط محیطی هستند، بر عکس است. به این صورت که با افزایش سیکل، تغییرشکل تسلیم از ۱۵ به ۱۷، افزایش و تغییرشکل نهایی از ۱۱ به ۱۱، ۱۱ به ۱۱، کاهش یافته است. استفاده از الیاف بسیاری در مقاوم‌سازی قطعه‌های فولادی باعث افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها در شرایط محیطی ذوب و یخبندان شده است.

مطالعات انجام‌شده در پژوهشی در سال ۲۰۰۹<sup>[۲۲]</sup> بر روی تیرهای I شکل، که در معرض چرخه‌های متفاوت تر و خشک شدن در آب نمک انجام شده است، حاکی از کاهش قابل توجه ظرفیت بار نهایی نمونه‌ها بوده است. به‌علاوه آنها نشان داده‌اند که با افزایش تعداد سیکل، مقدار کاهش مقاومت بیشتر خواهد بود. گرچه برخی پژوهشگران در مطالعه‌ی خود در سال ۲۰۱۲<sup>[۲۳]</sup> کاهش مقاومت و سختی در اثر تر و خشک شدن تحت آب دریا را خیلی ناچیز بیان کرده‌اند. در نمونه‌های آزمایش‌شده در این پژوهش، کاهش مقاومت چشم‌گیری تحت تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن مشاهده نشده است.



شکل ۷. الف) مد گسیختگی سطح مشترک و تسلیم فولاد، ب) مد گسیختگی فولاد و ج) گسیختگی نرم شدگی.

شکل ۷. الف) مد گسیختگی سطح مشترک و تسلیم فولاد، ب) مد گسیختگی فولاد و ج) گسیختگی نرم شدگی.

آزمایش مد گسیختگی پیوند در بیشتر نمونه‌ها ترکیب مدهای گسیختگی (الف) و (و) بوده است. البته در برخی از نمونه‌ها از جمله ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن تر و خشک و همچنین ۱ لایه و ۲ لایه‌ی ذوب و یخ‌زدگی، مد گسیختگی فقط از نوع (و) در محدوده‌ی خارج از محل تقویت در نزدیکی صفحه‌های فولادی، که برای نگاه‌داشتن الیاف به کار برده شده است، اتفاق افتاده است.

برای رسیدن به ظرفیت پیوند قوی میان فولاد و الیاف بسیاری می‌توان از نمونه‌های فولادی با سطح زبر استفاده کرد. از طرفی با افزایش ضخامت صفحه‌ی فولادی می‌توان تا حدی از بروز گسیختگی نوع (و) جلوگیری کرد.<sup>[۴]</sup>

همان‌طور که در (شکل ۷ الف) مشاهده می‌شود، در نمونه‌های تقویت‌نشده، محل گسیختگی (ورق‌های تقویت‌نشده) تقریباً در وسط نمونه بوده است؛ ولی در نمونه‌های تقویت‌شده، محل گسیختگی به محلی که توسط الیاف تقویت‌نشده و یا محلی که الیاف از آنجا به بعد ادامه ندارد (نزدیکی گیره‌های دستگاه کشش)، منتقل شده است (شکل‌های ۷ ب و ۷ ج). این تذکر لازم است که برای آن قسمتی که بین فک‌های دستگاه کشش قرار می‌گیرد، الیاف به‌کار نرفته است؛ چرا که در صورت به‌کار بردن الیاف در این ناحیه، الیاف بر اثر فشار فک‌های جک له می‌شوند و خاصیت خود را از دست می‌دهند.

شکست گسیختگی فولاد در بیشتر نمونه‌ها از نوع شکست کششی بوده است. تمام نمونه‌ها که در معرض شرایط محیطی بودند، الیاف بسیاری پیوندشده در آنهایی که شرایط تر و خشک شدن و یا در معرض ذوب و یخ‌زدگی قرار داشته‌اند، دچار پارگی و آسیب نشده‌اند. با توجه به مشاهده‌های صورت‌گرفته، سطح فولاد در محل‌هایی که با الیاف بسیاری تقویت نشده بوده و همچنین ضخامت آن به دلیل دورپیچ نبودن، دچار زنگ‌زدگی شده است (که در نمونه‌های در معرض تر و خشک شدن نسبت به نمونه‌های در معرض ذوب و یخ‌زدگی، میزان زنگ‌زدگی بیشتر بوده است). با این حال مقدار زنگ‌زدگی در هر دو مورد ناچیز است.

## ۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه به ارائه‌ی یافته‌های یک برنامه‌ی آزمایشی که به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های فولادی تقویت‌شده با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری شیشه‌یی و ۱ یا ۲

حرارتی معین، به طور فراینده‌یی از حالت شکل‌پذیر به وضعیت ترد تغییر می‌یابد.<sup>[۲۴]</sup> سیکل‌های ذوب و یخبندان به دلیل تفاوت‌های موجود در ضرایب انبساط حرارتی اجزاء موجود، در ریزساختار سیستم (الیاف بسیاری - رزین - فولاد) تفاوت ایجاد می‌کنند. در شرایط دمایی بسیار پایین، چنین تنش‌هایی می‌توانند منجر به تشکیل ریزترک‌ها در رزین ماتریس و یا در سطح مشترک رزین و الیاف بسیاری و همچنین باعث کاهش پیوند حدود ۲۸ درصدی پیوستگی الیاف با فولاد شوند.<sup>[۲۵]</sup> گرچه بعضی از پژوهشگران در آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیده‌اند که در دماهای پایین ( $\pm 20^\circ$ )، تغییری در پیوستگی بین الیاف و فولاد ایجاد نمی‌شود.<sup>[۲۶، ۲۳]</sup>

در صورتی که افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش در حدود ۳۲٪ در تغییر شکل نهایی، که برابر با مقدار ۱۲/۰ و ۱۸/۰ به ترتیب برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری است، شده است. در (شکل‌های ۶ ج، ۶ د و ۶ هـ) مشاهده می‌شود که نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه‌های تقویت‌نشده در معرض شرایط محیطی ذوب و یخ‌زدگی، افزایش ناچیز مقاومت در حدود ۲/۰ تا ۹/۰ درصد و ۲ تا ۴ درصد به ترتیب برای سیکل‌های ۱۷۰ و ۲۱۰ داشته‌اند، در صورتی که سختی هیچ تغییری نکرده است؛ که این مورد بیانگر این است که الیاف نقشی در محدوده‌ی کشسان فولاد ندارند.

همان‌طور که برای نمونه‌های قرارگرفته در شرایط محیطی تر و خشک، تغییر شکل حد تسلیم و حد نهایی با تغییراتی همراه بوده است، برای نمونه‌های در معرض شرایط محیطی ذوب و یخ نیز تغییراتی مشاهده شده است. به این صورت که در نمونه‌های شاهد قرارگرفته در معرض ذوب و یخ با افزایش سیکل، تغییر شکل حد تسلیم و حد نهایی تغییری نکرده است، در صورتی که در نمونه‌های تقویت‌شده، افزایش تغییر شکل حد تسلیم و حد نهایی از ۱۵/۰ به ۲۴/۰ و ۱۷/۰ به ۲/۰ به ترتیب برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن مشاهده شده است. که البته این مورد با مشاهده‌های بلاربی و همکارانشان،<sup>[۲۷]</sup> که اعمال شرایط محیطی ذوب و یخ در رفتار الیاف، تأثیر چندانی در عملکرد الیاف کربنی و حتی الیاف شیشه ندارد، کمی تفاوت دارد. در مواردی که الیاف بسیاری، درصد قابل توجهی حفره‌های متصل به یکدیگر و پراز آب داشته باشند، تأثیرات یخ‌زدن و ذوب‌شدن در محدوده‌ی دمایی متداول ( $30^\circ\text{C}$  تا  $-20^\circ\text{C}$ )، در مقاومت جزئی بوده است. ولی در نمونه‌های تحت شرایط سیکل‌های حرارتی شدید بین  $60^\circ\text{C}$  تا  $-60^\circ\text{C}$ ، ریزترک‌ها امکان رشد و به هم پیوستن پیدا کرده‌اند، که منجر به تشکیل ترک در ماتریس و انتشار آن در ماتریس و یا در اطراف سطح مشترک ماتریس و الیاف شده است.<sup>[۲۷]</sup> چنین ترک‌هایی تحت سیکل‌های حرارتی طولانی‌مدت از نظر تعداد و اندازه رشد کرده‌اند، که می‌توانند منجر به زوال سختی و یا زوال سایر خواص وابسته به ماتریس شوند.

## ۵. مد گسیختگی

شش مد گسیختگی برای الیاف بسیاری کربن پیوند تقویت‌شده با فولاد توسط برخی پژوهشگران در سال ۲۰۱۲،<sup>[۴]</sup> طبقه‌بندی شده است، که شامل این موارد است: الف) گسیختگی سطح مشترک فولاد و چسب؛ ب) گسیختگی چسباننده (گسیختگی لایه‌ی چسب)؛ ج) گسیختگی سطح مشترک الیاف بسیاری و چسب؛ د) لایه‌لایه‌شدگی الیاف بسیاری (جداشدن بعضی از الیاف از ماتریس رزین)؛ هـ) پاره‌شدگی الیاف بسیاری؛ و) تسلیم فولاد.

در این مطالعه همچنین اشاره شده است که مدهای گسیختگی به مدول کشسان ورقه‌های الیاف بسیاری و نیز نوع چسب و ضخامت چسب بستگی دارد. در این



نهایی در حدود ۲٫۲، ۱٫۱ و ۲٫۲۵ درصد به ترتیب برای نمونه‌های تقویت‌نشده، نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن و نمونه‌های تقویت‌شده با ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن افزایش یافته است. همچنین با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، تغییرشکل نهایی در حدود ۴۹٫۷۲ و ۲۶٫۶۸ درصد به ترتیب برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن مشاهده شده است. در صورتی که برای نمونه‌های تقویت‌نشده، تغییرشکل نهایی در حدود ۳۳٪ کاهش به همراه داشته است. درحالی که در شرایط ذوب و یخ‌زدگی، مقاومت نهایی در حدود ۶٫۳، ۴٫۲ و ۳٫۲ درصد کاهش به ترتیب برای نمونه‌های تقویت‌نشده، نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ لایه و نمونه‌های تقویت‌شده با ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن و در حدود ۱۰، ۱۳ و ۱۵ درصد افزایش تغییرشکل نهایی به ترتیب برای نمونه‌های تقویت‌نشده، نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن رخ داده است.

- مد گسیختگی در اغلب نمونه‌ها از نوع گسیختگی سطح مشترک فولاد و الیاف بسیاری بوده است. محل مد گسیختگی علت تقویت فولاد با الیاف بسیاری کربن از وسط به بالا، به قسمت پایین‌گیره منتقل شده است، در صورتی که در نمونه‌های تقویت‌نشده مد گسیختگی در وسط مشاهده شده است.
- استفاده از الیاف بسیاری کربن به منظور مقاوم‌سازی قطعات فولادی، در شرایط محیطی ذوب و یخبندان و همچنین ترو خشک شدن متوالی، افزایش تغییرشکل نهایی را به همراه دارد. لیکن این مصالح گزینه‌ی مناسبی جهت افزایش سختی و مقاومت قطعات فولادی، که مطابق نمونه‌های این مطالعه هستند، نخواهد بود.

لایه‌ی الیاف بسیاری کربن نسبت به نمونه‌های تقویت‌نشده و همچنین بررسی دوام محیطی پیوند بین مصالح الیاف بسیاری و سطح فولاد در معرض شرایط محیطی شدید، ترو خشک شدن، و ذوب و یخ‌زدگی قرار گرفته‌اند، به این شرح پرداخته است:

- تغییرشکل نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف بسیاری از یک روند یکسان برای تمامی شرایط و سیکل‌های بارگذاری تبعیت نمی‌کند. در نمونه‌های قرارگرفته در شرایط محیطی ترو خشک شدن در ۶۰ سیکل، کاهش تغییرشکل در حدود ۳۰٪ و ۲۰٪ به ترتیب برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ و ۲ لایه نسبت به نمونه‌ی تقویت‌نشده قرارگرفته در همان شرایط مشاهده شده است. در صورتی که در ۱۲۰ سیکل افزایشی در حدود ۵۰٪ برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۱ و ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری نسبت به نمونه‌های تقویت‌نشده مشاهده شده است.
- نمونه‌های تقویت‌شده‌یی که در معرض شرایط ذوب و یخ‌زدگی متفاوت با ۱ لایه‌ی الیاف بسیاری قرارگرفته‌اند. در این شرایط تحت ۱۷۰ و ۲۱۰ سیکل، حدود ۲۵٪ کاهش تغییرشکل نسبت به نمونه‌های تقویت‌نشده مشاهده شده است. در صورتی که نمونه‌های تقویت‌شده با ۲ لایه‌ی الیاف بسیاری کربن، افزایش ۶ و ۱۱ درصد را به ترتیب برای ۱۷۰ و ۲۱۰ سیکل‌ها نشان داده‌اند.
- نمونه‌های در معرض شرایط ذوب و یخ‌زدگی دارای بار نهایی کمتری نسبت به نمونه‌های در معرض ترو خشک شدن هستند. بنابراین شرایط محیطی ذوب و یخ‌زدگی، شرایط محیطی شدیدتری برای این نوع تقویت است.
- در شرایط محیطی ترو خشک شدن با افزایش تعداد سیکل بارگذاری مقاومت

## پانویس‌ها

1. secondary Van Der Waals force
2. sandblasting
3. wet-layup
4. ductility
5. softening

## منابع (References)

1. Al-Salloum, Y.A. and Almusallam, T.H. "Rehabilitation of the infrastructure using composite materials: Overview and applications", *J. King Saud Univ., Eng. Sci.*, **0**(2), pp. 1-22 (2002).
2. Lesani, M., Bahaari, M.R. and Shokrieh, M.M. "Numerical investigation of FRP-strengthened tubular T-joints under axial compressive loads", *Composite Structures*, **100**, pp. 71-78 (2013).
3. Seica, M.V. and Packer, J.A. "FRP materials for the rehabilitation of tubular steel structures, for underwater applications", *Composite Structures*, **80**(3), pp. 440-450 (2007).
4. Nguyen, T.-C., Bai, Y., Zhao, X.-L. and Al-Mahaidi, R. "Durability of steel/CFRP double strap joints exposed to sea water, cyclic temperature and humidity", *Composite Structures*, **94**(5), pp. 1834-1845 (2012).
5. Zhao, X.-L. "Thin-walled structure: special issue-FRP strengthened metallic structures", *Thin-Walled Structures*, **47**(10), pp. 1019 (2009).
6. Zhao, X.-L. and Zhang, L. "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures", *Engineering Structures*, **29**(8), pp. 1808-1823 (2007).
7. Miyashita, T. and Nagai, M. "Stress analysis for steel plate with multilayered CFRP under uniaxial loading", *Procedia Engineering*, **14**, pp. 2411-2419 (2011).
8. Al-Zubaidy, H., Al-Mahaidi, R. and Zhao, X.-L. "Experimental investigation of bond characteristics between CFRP fabrics and steel plate joints under impact tensile loads", *Composite Structures*, **94**(2), pp. 510-518 (2012).
9. Di Ludovico, M., Piscitelli, F., Prota, A., Lavorgna, M., Mensitieri, G. and Manfredi, G. "Improved mechanical properties of CFRP laminates at elevated temperatures and freeze-thaw cyclin", *Construction and Building Materials*, **31**, pp. 273-283 (2012).
10. Nguyen, T., Yu, B., Al-Mahaidi, R. and Zhao, X.-L. "Time-dependent condition of steel/CFRP double strap joints subjected to combined thermal and mechanical loading", *Composite Structures*, **94**(5), pp. 1826-1833 (2012).

11. Nguyen, T.-C., Yu, B., Zhao, X.-L. and Al-Mahaidi, R. "Mechanical characterization of steel/CFRP double strap joints at elevated temperatures", *Composite Structures*, **93**(6), pp. 1604-1612 (2011).
12. Dawood, M. and Rizkalla, S. "Environmental durability of a CFRP system for strengthening steel structures", *Construction and Building Materials*, **24**(9), pp. 1682-1689 (2010).
13. Wu, C., Zhao, X.-L., Wen, H.D., Al-Mahaidi, R. "Bond characteristics between ultra high modulus CFRP laminates and steel", *Thin-Walled Structures*, **51**, pp. 147-157 (2012).
14. Nardone, F., Di Ludovico, M., De Caso y Basalo, F.J., Prota, A. and Nanni, A. "Tensile behavior of epoxy based FRP composites under extreme service conditions", *Composites Part B: Engineering*, **43**(3), pp. 1468-1474 (2012).
15. Shang, H.-S. and Yi, T.-H. "Freeze-thaw durability of air-entrained concrete", *The Scientific World Journal*, **2013**, Article ID 650791, 6 p. (2013).
16. Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. "Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments", *Journal of Composites for Construction*, **5**(3), pp. 200-221 (2001).
17. ASTM D3039/D 3039M-00, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
18. Hahn, H.T. and Kim, R.Y. "Swelling of composite laminates", *Advanced Composite Materials-Environmental Effects*, ASTM-STP 658, pp. 98-130 (1978).
19. Böer, P., Holliday, L. and Kang, T. "Independent environmental effects on durability of fiber-reinforced polymer wraps in civil applications: A review", *Construction and Building Materials*, **48**, pp. 360-370 (2013).
20. Mallick, P.K., *Fiber Reinforced Composites*, Marcel Dekker Inc., New Yoek (1988).
21. Burnsell, A.R., *Long-Term Degredation of Polimeric Matrix Composites*, Concise Encyclopedia of Composite Materials, Pergamon Press, pp. 165-173 (1989).
22. Huitao, R., Shan, L. and Danying, G. "Bond behavior of CFRP and steel under dry-wet cyclic condition and loading", *China Civil Engineering Journal*, **3**, pp. 36-41 (2009).
23. Nguyen, T.C., Bai, Y., Zhao, X.-L. and Al-Mahaidi, R. "Durability of steel/CFRP double strap joints exposed to sea water, cyclic temperature and humidity", *Composite Structures*, **94**(5), pp. 1834-1845 (2012).
24. Azhari, M. and Mirghaderi, R., *Design of steel structures*, Arkan publication, Esfahan, 4th volume, Second edition, pp.19-30 In Persian (2003).
25. Agarwal, A., Foster, S.J., Hamed, E. and Ng, T.S. "Influence of freeze-thaw cycling on the bond strength of steel-FRP lap joints", *Composites Part B: Engineering*, **60**, pp. 178-185 (2014).
26. Yoshitake, I., Tsuda, H., Itose, J. and Hisabe, N. "Effect of discrepancy in thermal expansion coefficients of CFRP and steel under cold temperature", *Construction and Building Materials*, **59**, pp. 17-24 (2014).
27. Lord, H.W. and Dutta, P.K. "On the design of polymeric composite structures for cold region applications", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **7**(5), pp. 435-450 (1988).