

تحلیل رفتار اتصالات لوله‌ای T شکل تقویت شده به وسیله مواد کامپوزیتی (FRP) تحت بار محوری فشاری

محمد حسین نژاد^۱، علی اکبر آقاچوکچک^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

A_gha@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱/۲۶]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۶/۲۶]

چکیده - سازه‌های دریایی بخصوص سکوه‌های دریایی به علت آسیب‌دیدگی و یا ضرورت‌های دیگر ممکن است نیاز به تعمیر و تقویت داشته باشند. به دنبال نتایج مثبت به دست آمده از کاربرد FRP در سازه‌های خشکی، به تازگی توجه ویژه‌ای به استفاده از این مواد برای انجام تعمیرات سازه‌های فراساحل معطوف شده است. به این منظور مطالعه‌ای با هدف بررسی رفتار اتصالات T- شکل تقویت‌شده با مصالح FRP تحت بار محوری فشاری انجام شده است تا میزان کارآمدی این مصالح در بهبود این اتصالات مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا و به منظور بررسی اثر متغیرهای مختلف، مدل‌هایی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود غیر خطی ساخته شد و با تحلیل عددی آن‌ها، پارامترهای موثر در رفتار نمونه‌ها، ارزیابی شدند. در این ارزیابی اثر تعداد لایه‌های FRP و جهت الیاف بر ظرفیت نهایی اتصالات لوله‌ای تقویت شده بررسی شد. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی، بهبود در ظرفیت نهایی اتصالات تقویت شده را نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌ها این میزان بهبود افزایش یافت. با مقایسه بار شروع گسیختگی FRP با بار نهایی اتصال روشن شد که کامپوزیت می‌تواند مقدار قابل توجهی از بار نهایی اتصال را بدون گسیختگی تحمل کند. همچنین با مقایسه تنش فون- میسس و تغییر مکان قائم و افقی (بیضی‌شدگی) عضو اصلی اتصالات تقویت شده و اتصالات بدون FRP مشاهده شد که این روش تقویت، با کاهش قابل توجه این مقادیر باعث به تاخیر انداختن تسلیم فولاد و افزایش سختی اتصال و بهبود رفتار اتصالات می‌شود.

واژگان کلیدی: FRP، اتصالات T- شکل، بار فشاری، اجزای محدود غیر خطی، ظرفیت نهایی اتصالات.

۱- مقدمه

بنایی و سازه‌های فلزی به تازگی گسترش یافته است. نسبت مقاومت به وزن بالای FRPها نقش مهمی در گرایش به استفاده از آن‌ها در بهسازی سازه‌های فلزی دارد [۱].

سازه‌های دریایی به دلیل آسیب‌دیدگی و یا ضرورت‌های دیگر نیاز به تعمیر و تقویت دارند. برای نمونه اعضا و اتصالات لوله‌ای سکو ممکن است دچار آسیب‌های موضعی ناشی از برخورد کشتی و سقوط اجسام شوند و یا به لحاظ مقاومتی و تحت تاثیر تغییر شرایط بهره‌برداری، تغییر کاربری سکو، تغییر شرایط بارگذاری، بازسازی و نوسازی و توسعه میادین نفت و گاز و غیره نیاز به ارزیابی مجدد و تعمیر و تقویت داشته باشند. استفاده از کامپوزیت‌ها با توجه به مواردی چون واکنش پذیر

نقص و خرابی در بسیاری از اعضای سازه‌های فولادی بخاطر خوردگی، خستگی یا خرابی‌های مکانیکی ممکن است بروز نماید، بنابراین روش‌های اقتصادی برای اصلاح و تقویت این اعضا نیاز ضروری است. روش‌های سنتی برای تعمیر اعضای فولادی، از قبیل چسباندن ورق‌های پوششی به این اعضا به وسیله پیچ و مهره و یا جوش دارای معایبی از جمله کار فشرده، ازدست دادن زمان، حساسیت جوش به خستگی، تمرکز تنش بالا نزدیک پیچ و مهره‌ها و افزایش وزن اعضا است. استفاده از مواد کامپوزیت در تقویت و تعمیر، کاربرد بیشتری در سازه‌های بتنی دارد ولی استفاده از آن‌ها در سازه‌های چوبی،

شده، تحت خمش چهار نقطه‌ای انجام دادند. دو سیستم تقویت در نظر گرفته شد. یکی استفاده از صفحه مسطح GFRP و CFRP پیش آغشته که فقط به بال کششی متصل شدند، دیگری استفاده از GFRP، U- شکل پیش آغشته که به بال کششی متصل شده و تا روی جان ادامه می‌یابد. همه تیرهای بهسازی شده به بار گسیختگی پلاستیکی تیرهای RHS اصلی بدون خرابی رسیدند. شکست الیاف کربن فقط در تیرهای با CFRP مدول بالا اتفاق افتاد [۲، ۳]. تیرهای با CFRP مدول نرمال (Gpa) ۱۳۵) پاسخ‌های شکل‌پذیر نشان دادند بدون آن که گسیختگی در الیاف و چسب تا ماکزیمم تغییر شکل (۴۰/ دهانه) اتفاق بیفتد. آن‌ها ثابت کردند که سیستم U- شکل توانایی جلوگیری از گسیختگی و فراهم کردن درجه ای از سختی حتی بعد از اینکه خرابی قابل توجهی اتفاق افتاد را دارد [۲].

ماتا^۶ و نیز لیو و همکاران^۷ آزمایش‌هایی را برای بررسی تاثیر بارگذاری خستگی روی چسبندگی بین فولاد و CFRP انجام دادند. آن‌ها دریافتند وقتی که ماکزیمم بار استفاده شده کمتر از حدود ۳۵٪ مقاومت نهایی استاتیکی است و تعداد سیکل‌ها کمتر از ۶ میلیون است، تاثیر روی مقاومت نهایی قابل توجه نیست (کمتر از ۱۰٪). مطالعاتی نیز در زمینه انتشار ترک خستگی انجام شد. پژوهشگران مختلف آرایش‌های متفاوتی را برای تقویت انتخاب کردند [۲].

مصالح کامپوزیت برای تقویت و تعمیر سازه‌های فراساحل بطور روزافزونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نخستین کاربرد قابل توجه FRP برای تعمیرات سازه‌ای فراساحل مربوط به تعمیر ورق‌های ترک‌خورده عرشه کشتی‌ها در اوایل دهه ۱۹۸۰ بود. هم چنین تعمیر کنداکتورهای خورده شده با کامپوزیت در چندین سکوی خلیج مکزیک انجام شده است. روی کیسون‌های خورده شده سکوه‌های دریای شمال نیز از این مواد برای تعمیرات استفاده شده است. موسسه Francais du petrole (IFP) در اواخر دهه ۱۹۷۰ ارزیابی استفاده از مصالح کامپوزیتی در کاربردهای مختلف در صنعت نفت فراساحل در اعماق آب تا ۱۰۰۰ متر را شروع کرد. در اواخر دهه ۱۹۹۰، پژوهش‌های

نبودن آن‌ها، ویژگی‌های مقاومت در برابر خوردگی، افزایش عمر خستگی مقاطع فولادی، صرفه اقتصادی، زمان کم اجرا در دریا، عدم نیاز به امکانات گسترده، داشتن حداقل محدودیت‌ها و بیشترین مزایا و عملکرد و سرویس دهی مطلوب ممکن است بر دیگر روش‌های تعمیر و بهسازی ارجحیت داشته باشد. پژوهش‌های زیادی برای تقویت اعضای فولادی با مقطع توخالی به وسیله ورق‌های کامپوزیتی FRP انجام شده است. برای تقویت اعضای فشاری آزمایش‌هایی به وسیله شات و فام^۱، تائو و همکاران^۲، ژائو و همکاران^۳ در تقویت ستون‌های کوتاه و بلند فولادی با مقطع توخالی به وسیله ورقه‌های CFRP انجام شد. پارامترهای اصلی که در آزمایش تغییر کردند شامل تعداد لایه‌های CFRP و جهت الیاف (عرضی یا طولی) بودند. شات و فام برای ستون‌های کوتاه دریافتند که لایه‌های CFRP عرضی در محدود کردن کماتش موضعی رو به بیرون موثر است. حداکثر ظرفیت باربری برای ستون‌های کوتاه ۱۸٪ و برای ستون‌های بلند ۲۳٪-۱۳٪ افزایش یافت. بالاترین بهره‌وری با به کارگیری سه لایه در چهارطرف به دست آمد. برای تقویت اعضای خمشی آزمایش‌هایی به وسیله هایدرو همکاران^۴ روی تیرهای با مقطع توخالی دایره‌ای (CHS) کلاس ۴ تقویت شده با ورقه‌های CFRP انجام شد. پارامترهای اصلی پژوهش شده جهت الیاف (طولی در مقابل حلقه‌ای)، تعداد لایه‌ها و ترتیب جانمایی الیاف بودند. اگر از CFRP برای تقویت در هر دو جهت استفاده می‌شد، دیده شد که یک مقطع کلاس ۴ می‌توانست به کلاس ۲ ارتقا یابد. لایه‌های دورپیچ نقش مهم‌تری را در مهار کردن یا تاخیر کماتش موضعی ایفا کرد که معمولاً به شکل یک بیضی برای CHS است. لایه‌های طولی نقش مهم‌تری را در افزایش ظرفیت ممان به علت مشارکت CFRP در ناحیه کششی ایفا کردند [۲].

فوتیو و همکاران^۵ مطالعاتی را روی تقویت تیرهای با مقطع توخالی مستطیلی (RHS) فولادی که به طور مصنوعی تضعیف

1Shaht and Fam

2Tao et al.

3Zhao et al.

4Haedir et al.

5Photiou et al.

6Matta

7 Liu et al.

افزایش سختی خمشی ۷٪ تا ۱۸٪ بود. افزایش مقاومت نهایی برای لوله‌های عمل‌آوری شده در زیر آب دریا بین ۸٪ تا ۲۱٪ بود نسبت به نمونه‌های خشکی افزایش کمتری در سختی خمشی و ظرفیت دوران اتفاق افتاد. فام و همکاران^۲ یک روش جدید برای سازه‌های خرپایی آلومینیومی موجود در بزرگراه‌ها با استفاده از ورقه‌های FRP ارائه کردند. برای این کار از اتصالات K استفاده نمودند. این اتصالات به دلیل خستگی ناشی از تاثیرات باد و ترافیک دچار ترک خوردگی می‌شوند. آن‌ها برای تقویت اتصال از ورقه‌های CFRP و GFRP و رزین اپوکسی برای چسباندن استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که مقاومت کامل اتصال با استفاده از ورقه‌های FRP با الیاف کربن برگشت و فقط ۷۰٪ مقاومت اتصال با استفاده از FRP با الیاف شیشه بازگردانده شد. در آزمایش‌ها گسیختگی یا ناشی از پارگی ورقه‌های FRP یا شکست لوله آلومینیومی نزدیک جوش یا نزدیک قسمت بارگذاری شده بود و در هیچ حالتی گسیختگی چسب بین دورپیچ FRP و لوله آلومینیومی مشاهده نشد. پنتلیدس و همکاران^۳ [۷] نیز سازه‌های لوله‌ای موجود در بزرگراه‌ها را با روشی دیگر با GFRP پیشنهاد کردند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که تقویت GFRP ظرفیت اتصالات آلومینیومی بدون هیچ‌ترک قابل مشاهده‌ای را ۱/۱۷ تا ۱/۲۵ برابر افزایش می‌دهند.

لسانی و همکاران به تازگی آزمایش‌هایی برای ارزیابی اتصالات لوله‌ای T و Y شکل تقویت شده با FRP انجام داده‌اند و رفتار آن‌ها را تحت بار محوری فشاری مورد ارزیابی قرار دادند که از نتایج آن برای راستی آزمایشی مدل در ادامه استفاده شده است [۱۱].

در این پژوهش مطالعه‌ای با هدف بررسی رفتار اتصالات T- شکل تقویت شده با مصالح FRP تحت بار فشاری انجام می‌شود تا میزان کارآمدی این مصالح در بهبود این اتصالات مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا و به منظور بررسی رفتار متغیرهای مختلف مدل‌هایی با استفاده از نرم افزار المان محدود غیر خطی ABAQUS ساخته می‌شود که پس از تحلیل عددی

گسترده‌ای به وسیله‌ی دانشگاه‌ها و موسسات مختلف انجام شد که در آن‌ها قابلیت رایزرهای کامپوزیتی تا عمق ۵۰۰۰ فوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه این مطالعات تطابق خوب رایزرهای کامپوزیتی از نظر هزینه، وزن و عملکرد با اهداف پژوهش را نشان داد. در سال ۱۹۹۳، یک مطالعه اولیه برای اثبات مناسب بودن استفاده از کامپوزیت‌های الیاف کربن برای تقویت اعضای فولادی سکوی Beryl B در برابر انفجار انجام شد. برای تایید طراحی، ۱۴ مدل با مقیاس ۰/۵ از دیوارهای تقویت شده در برابر انفجار ساخته شد و آزمایش شد. همبستگی خوبی بین نتایج آزمایش و پیش‌بینی آنالیز مدل المان محدود دیده شد و مدهای گسیختگی طبق انتظار بود [۴].

مقاطع لوله‌ای به دلایل اقتصادی و زیبایی و حداقل بودن خوردگی و تمرکز تنش و نیروهای وارد شده از طرف امواج و جریان‌ات دریایی و نیز بخاطر تقارن در جهت‌های x و y کاربرد وسیعی در سکوه‌های دریایی دارند. سیکا و پکر^۱ [۵] در مطالعه‌ای به ارزیابی کارآمدی تقویت اعضای فولادی لوله‌ای در معرض خمش و توسعه یک روش تعمیر مناسب برای کاربردهای زیرآب و خشکی پرداختند. بخاطر خصوصیات مکانیکی ویژه فولاد، از الیاف تقویتی کربن بخاطر مدول الاستیسیته مشابه‌اش با فولاد استفاده شد. تعداد نمونه‌های موردآزمایش قرارگرفته هفت عدد بود. یک نمونه به عنوان نمونه مرجع در نظر گرفته شد. شش نمونه دیگر با مصالح CFRP دورپیچ شدند. دو نمونه در هوای آزاد آماده شدند (یعنی شرایط عمل‌آوری استاندارد) در حالی که چهار نمونه دیگر زیرآب دورپیچی شده‌اند (یعنی شرایط عمل‌آوری زیر آب دریا). پیچیدن مصالح CFRP زیر آب یک چالش اضافی دارد: چسبندگی رزین خیس ضمن اینکه لایه‌ها تمایل به جدایش از لوله را تحت وزن خودشان دارند. بنابراین برای تامین چسبندگی کافی همه لایه‌ها، مهارهای نایلونی پیرامونی برای دو نمونه آخر (یعنی ۶ و ۷) استفاده شد تا ورق‌های CFRP را در حین عمل‌آوری در جای خود نگه‌دارد. افزایش مقاومت نهایی نسبت به نمونه مرجع برای نمونه‌های خشکی ۱۶٪ تا ۲۷٪ و

2Fam et al.

3 Pantelides et al.

1Seica and Packer

جدول (۴) خواص ویسکوز گسیختگی برای فشار و کشش کامپوزیت [۹]

X_T (MPa)	X_C (MPa)	Y_T (MPa)	Y_C (MPa)	S_L (MPa)
۲۵۰۰	۲۰۰۰	۵۰	۱۵۰	۵۰

پارامترهای موثر در رفتار نمونه‌ها، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- مدل سازی

برای مدل‌سازی مساله از نرم‌افزار المان محدود عمومی ABAQUS v 6.10.1 استفاده شده است. امکانات مناسب این نرم‌افزار برای مدل‌سازی اتصالات لوله‌ای و حل‌کننده قوی آن به ویژه در برخورد با تحلیل‌های غیرخطی استفاده از این نرم‌افزار را در این زمینه امکان‌پذیر می‌کند. این نرم‌افزار توانایی در نظر گرفتن مدل‌های گسیختگی مواد کامپوزیتی را نیز دارد.

۲-۱- مشخصات مصالح

از فولاد با منحنی تنش- کرنش الاستیک- پلاستیک ایده‌آل با تنش جاری شدن ۴۱۲ MPa و مدول ینگ و ضریب پواسون به ترتیب ۲۰۰ kN/mm² و ۰/۳ استفاده شده و معیار تسلیم نیز فون- میسس در نظر گرفته شده است. هم‌چنین از کامپوزیت شیشه/اپوکسی به دلیل عمومیت آن برای تقویت اتصال استفاده شده است. در جدول (۱) تا جدول (۴) مشخصات کامپوزیت مورد نظر آمده است. برای ارزیابی مقاومت FRP از معیار گسیختگی Hashin استفاده شده است. این معیار شامل سازوکارهای گسیختگی در کشش و فشار الیاف و رزین است و روابط گسیختگی الیاف در کشش و فشار ماتریس به صورت مجزا است که نشانگر این است که برای الیاف و ماتریس می‌توان شروع گسیختگی را در چهار مد به صورت مجزا دید.

جدول (۱) مشخصات الاستیک اورتوتروپیک کامپوزیت [۸]

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	$G_{12}=G_{13}$ (MPa)	G_{23} (MPa)	ν_{12}
۵۵۰۰۰	۹۵۰۰	۵۵۰۰	۳۰۰۰	۰/۳۳

جدول (۲) مشخصات اورتوتروپیک شروع گسیختگی کامپوزیت [۸]

X_T (MPa)	X_C (MPa)	Y_T (MPa)	Y_C (MPa)	S_L (MPa)
۲۵۰۰	۲۰۰۰	۵۰	۱۵۰	۵۰

جدول (۳) انرژی‌های گسیختگی کامپوزیت [۸]

G_{ftc} (MPa)	$G_{fc,c}$ (MPa)	$G_{mt,c}$ (MPa)	$G_{mc,c}$ (MPa)
۱۲/۵	۱۲/۵	۱	۱

۲-۲- مدل المان محدود، شرایط مرزی و بارگذاری

برای مدل‌سازی اتصال لوله‌ای و کامپوزیت از المان سه بعدی پوسته^۱ استفاده شده است. نوع المان S4 انتخاب شده است که المان چهارگره‌ای از نوع پوسته‌ای معمولی است. این نوع المان با در نظرگیری کرنش‌های غشایی محدود رفتار لوله را مدل می‌کند. از یک مش نسبتاً ریز برای محدوده فصل مشترک اتصال استفاده شده است چرا که نیاز به بررسی دقیق‌تر نواحی نزدیک به محل برخورد عضوهای اصلی و فرعی است. پس در انتهای عضو اصلی از المان‌های درشت‌تر استفاده شده است. جوش بین اعضای اتصال (محل برخورد عضوهای اصلی و فرعی) مدل نشده است چرا که تاثیر آن روی مقاومت استاتیکی ناچیز است [۱۰]. طول عضو فرعی نصف طول عضو اصلی در نظر گرفته شده است تا تاثیر کمانش یا تکیه‌گاه عضو فرعی حذف شود. هم‌چنین FRP به فولاد Tie شده است. یعنی اتصال بین آن‌ها به صورت ایده‌آل در نظر گرفته شده است و از هیچ المان دیگری برای مدل کردن پیوند در فصل مشترک فولاد و FRP استفاده نشده است در نتیجه این مدل نمی‌تواند جدایش بین لایه‌ای را در کامپوزیت پیش‌بینی کند. شکل (۱) نمونه‌ای از مدل اتصال را نشان می‌دهد.

تکیه‌گاه‌های عضو اصلی در دو انتها به صورت گیردار مدل شده است. در واقع برای رسیدن به ماکزیمم ظرفیت اتصال تمام درجات انتقالی عضو اصلی مهار می‌شود. هیچ قیدی برای مهار درجات چرخشی انتهای عضو اصلی به کار نمی‌رود. عضو فرعی تنها به صورت قائم در صفحه‌اش تغییر مکان می‌دهد. برای بارگذاری از یک بار فشاری به صورت تغییر مکان بر بالای عضو فرعی به صورت عمود بر مقطع عضو در نظر گرفته شده است. برای عضو اصلی هیچ باری در نظر گرفته نشده است.

۳- راستی آزمایی

برای راستی آزمایی اتصالات تقویت شده با FRP از کار آزمایشگاهی که در مرجع [۱۳] انجام شده، استفاده شده است. مشخصات هندسی اتصال و کامپوزیت استفاده شده به ترتیب در جدول (۵) و جدول (۶) آمده است.

نمودار نیرو- تغییر مکان اتصال مورد نظر پس از تحلیل مدل عددی به وسیله نرم افزار المان محدود ABAQUS در شکل (۲) آمده است که با مقایسه آن با نتیجه آزمایشگاهی مرجع مورد نظر قابل قبول به نظر می‌رسد. این شکل نشان می‌دهد در ناحیه خطی نتایج کاملاً تطابق داشته و با آغاز ناحیه غیر خطی تا میزان حداکثر مقاومت، تطابق مناسب است. در صورتی که در ناحیه پس از مقاومت نهایی تطابق مطلوب نیست که این امر می‌تواند ناشی از مشکلات آزمایشگاهی و یا تفاوت مشخصات کامپوزیت در آزمایشگاه با آنچه در آن گزارش ارائه شده، باشد.

۴- نتایج حاصل از مدل سازی تحلیل مدل های

عددی

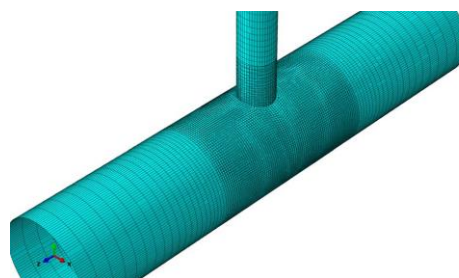
۴-۱- پارامترهای مطالعه شده در بررسی اتصال لوله ای

تقویت شده با FRP

تعداد، چیدمان و طول لایه های کامپوزیتی عوامل اصلی در میزان تاثیر بهسازی است. ضخامت هر لایه ۰/۲ میلی متر برای عضو اصلی و فرعی در نظر گرفته شده است. چیدمان لایه های کامپوزیتی به دو صورت انجام گرفته است.

حالت اول (I): در این حالت لایه ها با جهت الیاف صفر درجه نسبت به عضو اصلی و ۹۰ درجه نسبت به عضو فرعی که برای شبیه سازی شرایط آزمایشگاهی یک لایه مهاری نیز با جهت الیاف صفر درجه نسبت به عضو فرعی اضافه می شود که در سه حالت ۲، ۴ و ۸ لایه روی اتصال قرار می گیرند.

حالت دوم (II): در این حالت لایه ها با جهت الیاف ۴۵، صفر و ۴۵- درجه نسبت به اعضا به صورت پشت سر هم قرار می گیرند که در دو حالت ۴ و ۸ لایه قرار داده شد که چیدمان آنها به ترتیب به صورت [۰، ۴۵-، ۴۵، ۰] و [۰، ۴۵-، ۰، ۴۵، ۰، ۴۵-، ۰، ۴۵، ۰] است.



شکل (۱) نمونه ای از مدل اتصال

۳-۲- روند انجام تحلیل

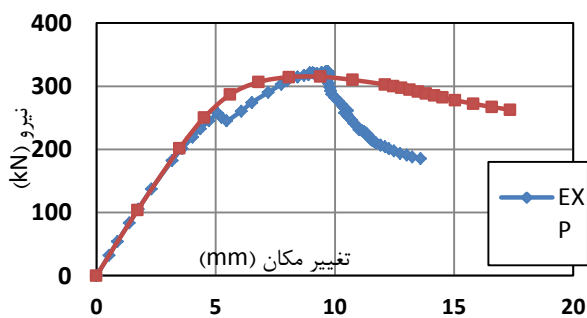
از یک آنالیز استاتیکی غیرخطی برای مطالعه رفتار اتصال زیر بار محوری فشاری استفاده شده است. غیرخطی بودن مصالح و غیر خطی هندسی در این آنالیزها در نظر گرفته شده است. روش مورد استفاده در این آنالیزها روش اصلاح شده ریکس^۱ است. این روش عموماً برای پیش بینی گسیختگی ناپایدار و غیرخطی هندسی یک سازه استفاده می شود که می تواند شامل شرایط مرزی و مصالح غیر خطی باشد و بیشتر از یک آنالیز بار بحرانی کماتش برای به دست آوردن اطلاعات کامل درباره ی گسیختگی یک سازه استفاده می کند. روش ریکس از شدت بار به عنوان مجهول اضافی استفاده می کند که همزمان برای بار و تغییر مکان حل می کند. بنابراین یک مقدار دیگر برای اندازه گیری پیشرفت حل باید استفاده شود، این مقدار طول کمان^۲ در امتداد مسیر تعادل استاتیکی در فضای نمودار بار- تغییر مکان است. بارگذاری در طول آنالیز ریکس به صورت تناسبی نسبت به بار اولیه اضافه می شود. ضریب نسبت بار به عنوان بخشی از حل در نظر گرفته می شود. این روش با چشم پوشی از اینکه پاسخ سازه پایدار یا ناپایدار است سازه را تحلیل می کند. معادله غیرخطی تعادل به وسیله ی روش نیوتن حل می شود. این روش تنها از ۱٪ برون محوری نمو کرنش استفاده می کند. آنالیز تا تعداد داده شده در تعریف این مرحله ادامه پیدا خواهد کرد. هنگامی که ضریب نسبت بار در مقابل منحنی طول کمان به بالاترین نقطه یا پایین ترین نقطه می رسد، نشانه ای از بار نهایی سازه است [۱۲].

1 Modified RIKS algorithm
2 Arc Length

جدول (۵) مشخصات اتصال برای راستی آزمایشی اتصال تقویت شده [۱۳]

طول عضو فرعی l (mm)	طول عضو اصلی L (mm)	ضخامت عضو فرعی t (mm)	ضخامت عضو اصلی T (mm)	قطر عضو فرعی d (mm)	قطر عضو اصلی D (mm)	نوع اتصال
۵۷۰	۱۸۴۵	۸/۵۶	۶/۳۵	۱۱۴/۳	۲۷۳/۱	T

داشتن یک اتصال بدون FRP و فقط ترکیب بار فشاری، ۶ اتصال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مشخصات هندسی اتصال T- شکل مورد استفاده و پارامترها مطابق جدول (۷) است. در شکل (۳) و شکل (۴)، اشکال تغییر فرم یافته برای حالت بدون تقویت و تقویت ۸ لایه کامپوزیت آورده شده است. تاثیر تقویت بر تنش‌ها و تغییر مکان‌ها از این شکل‌ها قابل مشاهده است.



شکل (۲) مقایسه نتایج حاصل از برنامه ABAQUS و مدل آزمایشگاهی نمونه تقویت شده با FRP

جدول (۶) مشخصات کامپوزیت بکاررفته در مدل راستی آزمایشی [۱۳]

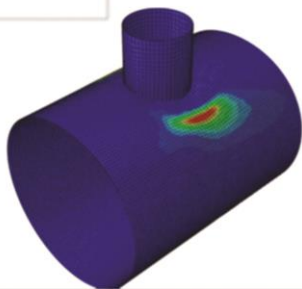
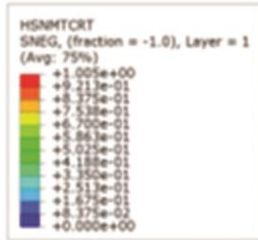
مشخصات مصالح		کامپوزیت شیشه/وینیل استر ($\gamma = 1600 \text{ kg/m}^3$)
تحلیل تنش	تحلیل گسیختگی	
$E = 2/5 \text{ (GPa)}$	$\sigma_f = 70 \text{ (MPa)}$	
$\nu = 0/32$		
$E_c = 28/0 \text{ (GPa)}$	$X_C = 410 \text{ (MPa)}$	
$E_r = 7/00 \text{ (GPa)}$	$Y_T = 55 \text{ (MPa)}$	
$G_{12} = 4/50 \text{ (GPa)}$	$S_{12} = 46 \text{ (MPa)}$	

طول ناحیه بهسازی شده در سطح عضو اصلی با توجه به مقاله لسانی و همکاران [۱۱] حداقل به فاصله $6\sqrt{DT}$ از نقطه مرکز اتصال در طرفین عضو فرعی در نظر گرفته شد. همچنین طول تقویت عضو فرعی نصف تقویت اصلی یعنی به میزان $3\sqrt{DT}$ در نظر گرفته می‌شود که عموماً برای حفظ پیوستگی FRP به کار رفته در طول اتصال بکار می‌رود. در نهایت با توجه به

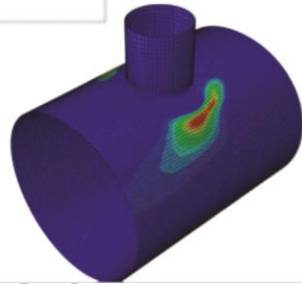
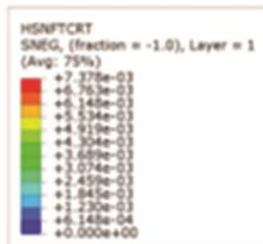
جدول (۷) مشخصات اتصال T- شکل مورد استفاده در مدل‌سازی

D (mm)	d (mm)	T (mm)	t (mm)	L (mm)	چیدمان لایه‌ها	تعداد لایه‌ها
۴۵۷/۶	۱۶۵/۲	۴/۹	۴/۷	۲۲۸۶	بدون FRP	-
۴۵۷/۶	۱۶۵/۲	۴/۹	۴/۷	۲۲۸۶	حالت اول	۲
۴۵۷/۶	۱۶۵/۲	۴/۹	۴/۷	۲۲۸۶	حالت اول	۴
۴۵۷/۶	۱۶۵/۲	۴/۹	۴/۷	۲۲۸۶	حالت اول	۸
۴۵۷/۶	۱۶۵/۲	۴/۹	۴/۷	۲۲۸۶	حالت دوم	۴
۴۵۷/۶	۱۶۵/۲	۴/۹	۴/۷	۲۲۸۶	حالت دوم	۸

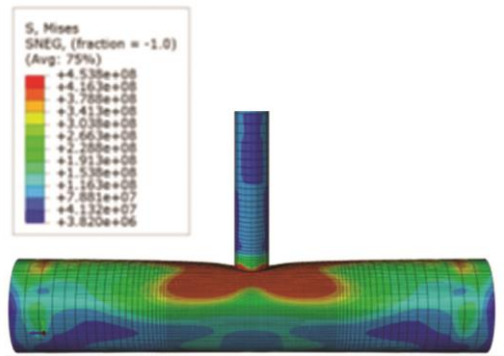
قسمت بالایی عضو اصلی نزدیک به عضو فرعی است. در لایه‌های تقویتی FRP برای این اتصال در هیچ موردی گسیختگی ناشی از کشش الیاف مشاهده نشد اما ناحیه مستعد گسیختگی برای این حالت در شکل (۷) آورده شده است.



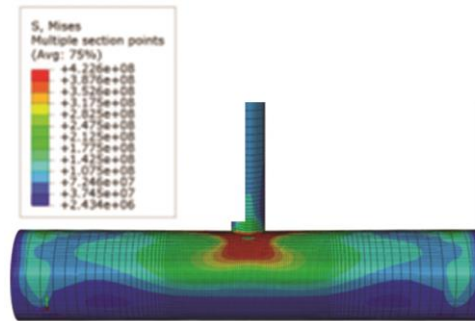
شکل (۶) گسیختگی ناشی از کشش ماتریس



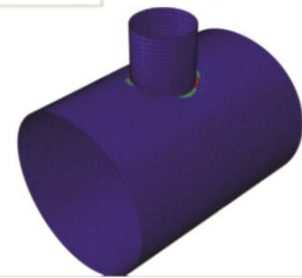
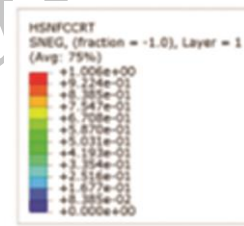
شکل (۷) گسیختگی ناشی از کشش الیاف



شکل (۳) شکل تغییر فرم یافته برای حالت بدون تقویت کامپوزیت



شکل (۴) شکل تغییر فرم یافته برای حالت تقویت لایه FRP



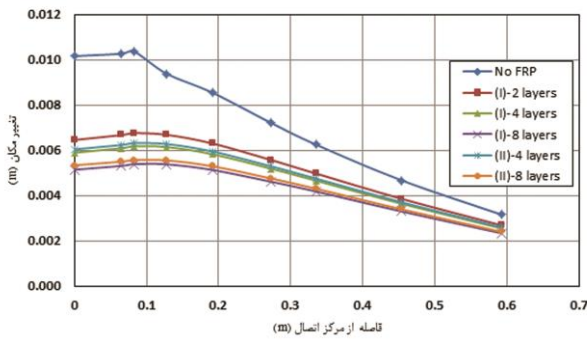
شکل (۵) گسیختگی ناشی از فشار الیاف

۴-۲- گسیختگی FRP

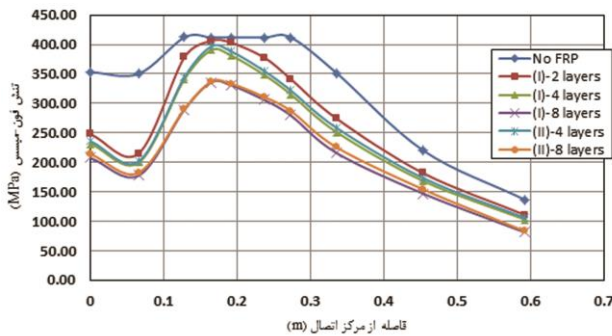
گسیختگی ناشی از فشار الیاف، با توجه به بارگذاری وارد شده بر اتصال که فشاری است، در شکل (۵) ملاحظه می‌شود. بحرانی‌ترین ناحیه برای این حالت اطراف محل برخورد دو عضو اتصال است. ناحیه بحرانی ناشی از گسیختگی فشار ماتریس نیز تقریباً مشابه حالت فشار الیاف است. گسیختگی ناشی از کشش ماتریس نیز در اتصال مورد نظر دیده شده است. با توجه به شکل (۶) ناحیه بحرانی برای این حالت

۴-۳- نمودارهای نیرو- تغییر مکان

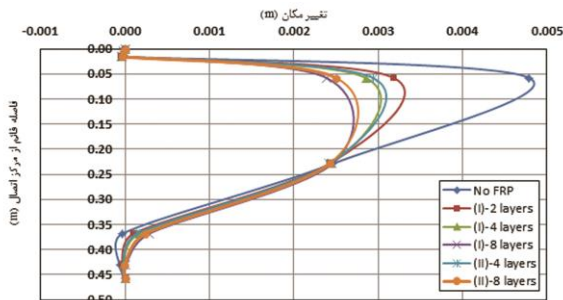
پس از تحلیل نمونه‌های مطالعه شده نمودارهای نیرو- تغییر مکان که بیانگر رفتار اتصال است از آن‌ها استخراج شدند که در شکل (۸) نشان داده شده است. استفاده از لایه‌های FRP با چیدمان حالت اول افزایش نسبتاً بیشتری در ظرفیت اتصالات ایجاد کرده است. در جدول (۸) بار شروع گسیختگی FRP با بار نهایی اتصال مقایسه شده است که مشاهده می‌شود تا حدود ۵۰ درصد بازنمایی اتصال، FRP بدون گسیختگی در باربری



شکل (۹) نمودار تغییر مکان سطح عضو اصلی



شکل (۱۰) نمودار تنش فون-میسس سطح عضو اصلی

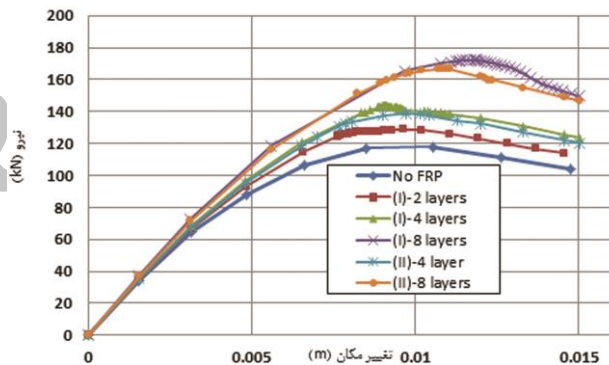


شکل (۱۱) نمودار بیضی شدگی عضو اصلی

مشارکت می کند و با افزایش تعداد لایه‌های FRP این درصد کاهش پیدا می کند. مد شروع گسیختگی FRP در همه حالات فشار ماتریس است. در این جدول همچنین مقادیر بار نهایی به دست آمده به وسیله روابط موجود در آیین نامه (API 22nd) برای حالات بدون FRP آمده است.

۴-۴- تغییر مکان سطح عضو اصلی

شکل (۹) تغییر مکان قائم سطح عضو اصلی را در طول خط تاج در بار نهایی حالت بدون FRP برای اتصالات مورد نظر نشان می دهد که ملاحظه می شود بعد از تقویت با FRP به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می کند. در ضمن در همه نمودارها ماکزیمم تغییر مکان در نقطه تاج اتفاق افتاده است و تغییر مکان قائم برای تقویت حالت اول نسبت به حالت مشابه اش در حالت دوم کمی کمتر است.



شکل (۸) نمودار نیرو-تغییر مکان

جدول (۸) مقادیر بار نهایی اتصال و بار شروع گسیختگی FRP

بار نهایی / بار شروع گسیختگی FRP (درصد)	بار شروع گسیختگی FRP (KN)	بار نهایی اتصال با روابط (KN) API(22 nd)	بار نهایی اتصال (KN)	نمونه
-	-	۹۷/۵	۱۱۷/۸	بدون FRP
۵۲	۶۶/۴	-	۱۲۸/۶	حالت اول- دو لایه
۴۸	۶۸/۴	-	۱۴۳/۳	حالت اول- چهار لایه
۴۲	۷۲/۹	-	۱۷۲/۲	حالت اول- هشت لایه
۴۸	۶۷/۸	-	۱۳۹	حالت دوم- چهار لایه
۴۳	۷۱/۷	-	۱۶۶/۷	حالت دوم- هشت لایه

۴-۵- تنش فون-میسیس

در شکل (۱۰) تنش فون-میسیس که معیار اصلی برای توصیف رفتار فولاد است برای سطح عضو اصلی در طول خط تاج اتصال مورد مطالعه در بار نهایی اتصال بدون FRP بررسی شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود تقویت FRP می‌تواند تسلیم در اتصال را به تاخیر بیندازد. در ضمن نمودار نشان می‌دهد که تسلیم در فولاد از نقطه تاج آغاز می‌شود. همچنین مشابه حالت قبل میزان این تنش برای تقویت حالت اول نسبت به حالت مشابه‌اش در حالت دوم کمی کمتر است.

۴-۶- بیضی شدگی عضو اصلی

بیضی شدگی عضو اصلی در واقع همان تغییر مکان افقی محیط پیرامونی این عضو است که در اینجا این پدیده در محل برخورد این عضو با عضو فرعی در بار نهایی اتصال بدون FRP مورد توجه قرار می‌گیرد. همان گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود تقویت اتصال با FRP تغییر مکان بیضی شدگی را در این عضو کاهش داده است که برای تقویت با FRP در حالت اول این کاهش کمی بیشتر است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از مدل عددی المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS رفتار اتصالات لوله‌ای T- شکل تقویت شده با FRP تحت بار فشاری ارزیابی شده است تا میزان تاثیر این روش تقویت و کارآمدی آن بررسی شود. پارامترهای تقویت اتصال تعداد لایه‌های FRP و چیدمان لایه‌های آن بودند و نتایج زیر به دست آمد:

استفاده از FRP برای تقویت اتصالات لوله‌ای T- شکل تحت بار فشاری باعث افزایش ظرفیت فشاری این اتصالات به میزان قابل توجهی می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌ها، افزایش بیشتری در ظرفیت اتصال مشاهده می‌شود.

استفاده از تقویت کامپوزیت با چیدمان حالت اول ظرفیت اتصال را اندکی بیشتر از حالت دوم افزایش می‌دهد که این مقدار آنچنان قابل توجه نیست.

این نوع تقویت، تغییر مکان‌های قائم سطح عضو اصلی، تنش

فون-میسیس روی عضو اصلی و نیز بیضی شدگی این عضو را در مقایسه با حالت بدون FRP به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد که این موارد باعث افزایش مقاومت اتصال می‌شود. به غیر از مود گسیختگی کشش الیاف بقیه مودهای در نظر گرفته شده در معیار گسیختگی Hashin، که شامل فشار الیاف و کشش و فشار ماتریس می‌باشد، در نمونه‌ها مشاهده شد. همچنین مود شروع گسیختگی کامپوزیت نیز برای تمام حالات فشار ماتریس بود.

با مقایسه بار شروع گسیختگی کامپوزیت با بار نهایی اتصال مشاهده شد که FRP می‌تواند حدوداً تا ۵۰٪ بار نهایی اتصال بدون هیچ گسیختگی در تحمل بار مشارکت نماید، که البته با افزایش تعداد لایه‌های FRP این میزان کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج فوق و خواص مناسب FRP از قبیل دوام و مقاومت بالای خستگی و آسیب پذیر نبودن در محیط دریا، به نظر می‌رسد بتوان از FRP به عنوان روشی مناسب برای تقویت اتصالات لوله‌ای استفاده کرد.

۶- مراجع

[۱] دهقان؛ احسان؛ مقاوم‌سازی تیرهای ترک خورده فولادی بوسیله ورق‌های FRP؛ رساله دکتری تخصصی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده فنی مهندسی؛ اسفند ۱۳۸۸.

[2]Zhao, XL, Zhang, L.,(2007),*State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures*,Engineering Structures,Vol. 29, p 1808–23.

[3]Fawzia, S, Al-Mahaidi, R, Zhao, XL, Rizkalla, S., (2005),*Repair of damaged aluminum truss joints of highway overhead sign structures using FRP*, Construction and Building Materials, Vol. 20,p 948-956.

[4] MSL Engineering Ltd and Devonport Management Ltd, (Rev.1,November 2004),*Assessment of repair techniques for ageing or damaged structures, Joint Industry Project Final Report*, MSL Document Ref. C35700R001.

[5]Seica M, and Packer, J., (2007),*FRP materials for the rehabilitation of tubular steel structures for underwater applications*, Composite Structures, Vol. 80, p 440-450.

[6]Fam, A., Witt, S., Rizkalla, S., Fawzia, S, Al-Mahaidi, R, Zhao, XL, Rizkalla, S., (2005),*Strengthening of circular hollow steel tubular section using CFRP sheets*, Construction and Building Materials.

[7]Pantelides C., Nadauld J.,(2003)*Repair of cracked aluminium overhead sign structures with GFRP composites*.

[8]Lapczyk, I., Hurtado, J.A., (2007), *Progressive*

[11]Lesani, M., Bahari, M.R., Shokreh, M.M., (2013), *Detail investigation on un-stiffened T/Y tubular joints behavior under axial compressive loads*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 80, p 91-99.

[12]SIMULIA Inc., ABAQUS 3.610 User Manual.

[۱۳] لسانی؛ محمد؛ بهسازی اتصالات لوله‌ای فلزی T و Y

شکل تحت اثر بار محوری فشاری به کمک دورپیچ FRP؛

رساله دکتری؛ دانشگاه تهران؛ دانشکده مهندسی عمران؛

شهریور ۱۳۹۲.

damage modeling in fiber-reinforced materials, Composites, Part A, Vol. 38, p 2333-2341.

[۹] وظیفه اصل؛ یعقوب؛ بررسی تئوری-تجربی اتصال کاور

کامپوزیتی به بدنه فلزی خودرو؛ پایان نامه کارشناسی ارشد؛

دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده فنی مهندسی؛ زمستان ۱۳۸۸.

[10]Lee, M.K. M., Llewelyn-Parry, A., (2005), *Strength prediction for ring-stiffened DT-joints in offshore jacket structures*, Engineering Structures, Vol. 27, p 421-430.

Archive of SID

Research Note:

Analysis of the Behavior of Tubular T Joints Strengthened by FRP under Compressive axial Load

M. Hosseinnjad¹, A. Aghakouchak^{2*}

1-M.Sc., Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University

2- Prof., Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University

A_gha @iust.ac.ir

Abstract:

In recent years, significant progress has been made on the use of Fiber Reinforced Polymers (FRP) in civil infrastructures. These materials have been used widely for the repair of concrete members, but their application to steel structures has been limited so far. Offshore structures, especially offshore platforms are very important and expensive ones, due to rising demand of energy. These structures may require repair and strengthening due to damages they may suffer in service. Searching for methods which are faster, more reliable, and less expensive led to application of FRP in repairing of offshore structures. Durability and high resistance against fatigue as well as high ratio of strength to weight make these material superior to other conventional materials for this purpose. In addition high resistance of these materials against corrosion is an advantage for their use in marine environment. Composite materials are being increasingly used for the strengthening and repair of offshore structures. More recently, carbon fiber reinforced laminates have been used to upgrade fire walls in Mobil's Beryl Bravo platform to enable them to withstand blast loading. Also a number of corroded conductors and caissons have been repaired by composites on several Gulf of Mexico and North Sea platforms.

In current research, the behavior of T-shaped tubular joints reinforced with FRP material under compressive axial load is studied to evaluate the efficiency of these materials in strengthening the connections. For this purpose and in order to examine the effect of different variables, a numerical study was carried out using the non-linear finite element program. An elastic-perfectly plastic stress-strain curve was used for steel and glass/epoxy composite was used as the FRP. A four-node quadrilateral shell element was used to model the tubular members and composite. A perfect bond between steel and composite was considered. For considering different modes of FRP failure, the criteria proposed by Hashin is used. The numerical model was verified using the data available for a T-joint which was tested earlier. The model showed acceptable accuracy especially up to the level of maximum strength of the joint. Using the verified model a number of joints with different strengthening scheme were analysed under a monotonically increasing axial compression loads. Material and geometric nonlinearities were considered in the analyses. The analysis was carried out using the modified RIKS algorithm. The effect of number of FRP layers and the fibers direction on the ultimate capacity of reinforced tubular joints was studied. The results of numerical analysis showed improvements in the capacity of reinforced joints which were further enhanced by increasing the number of layers. Comparing FRP failure initiation load with ultimate capacity of joint, it was found FRP can bear a considerable amount of ultimate load without breaking. In addition, by comparing the Von-Mises stress and the vertical and horizontal displacement (ovalization) of chord in reinforced joints were observed that a substantial reduction in mentioned factors led to hindering the yielding of steel and increased the stiffness and ultimately the strength of connections.

Keywords: FRP, T-shaped joints, Compressive axial load, Nonlinear finite element, Ultimate capacity.