

بررسی عملکرد پوشش‌های CFRP و GFRP بر بهبود رفتار استاتیکی غیرخطی اتصالات لوله‌ای X شکل

پویا رضادوست^۱، حسین نصیرائی^۲، سیداحمد لشته‌نشایی^{۳*}

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت
^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت
^۳ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

دریافت: ۱۴۰۰/۱۷/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۰/۸/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۹/۲

چکیده

در این پژوهش، تأثیرگذاری پوشش‌های FRP (Fiber Reinforced Polymer) بر روی مقاومت نهایی و تغییر شکل اتصالات لوله‌ای X شکل تحت بارگذاری محوری فشاری بررسی شده است. برای این هدف، ابتدا نتایج حاصل از مدل‌های المان محدود با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. به منظور بررسی متغیرهای مختلف در مقاوم‌سازی اتصالات لوله‌ای X شکل با FRP از جمله جنس، طول، زاویه دورگیری و تعداد لایه‌ها، ۷۵ اتصال در حالت‌های تقویت‌شده و تقویت‌نشده ایجاد و تحلیل شدند تا رفتار استاتیکی غیرخطی آن‌ها مورد مطالعه قرار گیرد. در این مدل‌ها، تماس بین لایه‌های FRP و اعضای فلزی در نظر گرفته شده است، همچنین پروفیل جوش در محل تقاطع عضو اصلی با عضوهای فرعی مدل‌سازی شده است. نتایج نشان داد که نحوه قرارگیری این پوشش‌ها روی اتصال و اندازه طول آن‌ها روی عضو اصلی، تأثیر محسوسی بر روی بهبود عملکرد اتصال دارند. همچنین این پوشش‌ها می‌توانند مقاومت نهایی اتصال را تا ۱۲۵ درصد افزایش و جابه‌جایی‌ها را تا ۸۴ درصد کاهش دهند.

کلیدواژه‌ها: اتصال لوله‌ای X شکل، بار محوری فشاری، پوشش‌های FRP، روش المان محدود، مقاومت نهایی.

۱- مقدمه

سازه را دارند (مانند جوشکاری صفحات فولادی دابلر^۲ Choo و همکاران، ۲۰۰۴). در مقابل، روش‌های محدودی وجود دارد که بتوان از آن‌ها هم در زمان طراحی و هم در زمان سرویس‌دهی سکو استفاده کرد (مانند جوشکاری صفحات فولادی کالر^۳ Nassiraei و همکاران، ۲۰۱۷).

تقویت اتصالات در سازه‌های در حال سرویس با استفاده از صفحات فولادی نیاز به تجهیزات، ابزار، امکانات و کارگران ماهر دارد که ممکن است هزینه اجرای آن‌ها را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دهد. یکی از روش‌های جایگزین، استفاده از پوشش‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف یا FRP^۴ است. مهم‌ترین مزیت این روش، قابلیت کاربرد آن برای سازه‌های در حال سرویس با هزینه‌ای منطقی‌تر نسبت به سایر روش‌های موجود است (Lesani و همکاران، ۲۰۱۵).

مرزهای طولانی آبی و ذخایر غنی نفت و گاز ایران در بخش‌های فراساحلی و همچنین ذخایر عظیم هیدروکربنی که در دریای خزر و خلیج فارس وجود دارد، بخش فراساحل را به‌ویژه در دو دهه اخیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار کرده است. سکوها شابلونی^۱ یکی از پرکاربردترین نوع سکوها برای اکتشاف و استخراج نفت و گاز در دریا است. این سکوها از اعضای فولادی توخالی با مقطع دایره‌ای شکل ساخته شده‌اند و نحوه اتصال انتهای یک عضو لوله‌ای به سطح خارجی عضو لوله‌ای دیگر یکی از چالش‌های اصلی در طراحی آن‌ها است.

ممکن است اتصالات لوله‌ای چه در زمان طراحی اولیه و چه بعد از طراحی و ساخت به دلایل مختلف نیاز به مقاوم‌سازی داشته باشند. تاکنون روش‌های مختلفی جهت تقویت این‌گونه اتصالات ارائه شده است که اکثر آن‌ها تنها قابلیت کاربرد در حین ساخت

3. Collar
4. Fiber Reinforced Polymer

1. Jacket platforms
2. Doubler

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۱۳-۴۴۰۸۳۱۴۰

آدرس ایمیل: pooya.rezadost@gmail.com (پ. رضادوست)، h.nassiraei@guilan.ac.ir (ح. نصیرائی)، maln@guilan.ac.ir (س. ا. لشته‌نشایی).

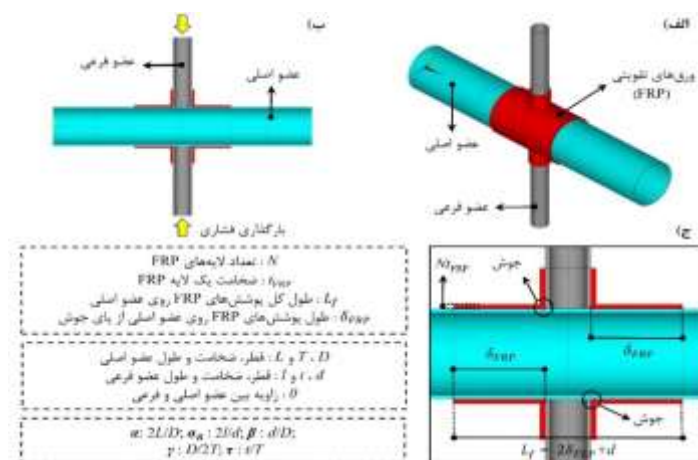
هدف اصلی این پژوهش، بررسی عددی تقویت اتصالات لوله‌ای X شکل با استفاده از ورق‌های FRP مطابق شکل (۱) است تا میزان کارایی این پوشش‌ها جهت مقاوم‌سازی این‌گونه اتصالات تحت بارگذاری فشاری مشخص شود. برای این هدف، ابتدا دقت مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این مدل‌ها تأثیر پروفیل جوش مابین عضو اصلی و فرعی و همچنین تماس بین لایه‌های FRP و سطح بیرونی اعضای فولادی تشکیل‌دهنده اتصال در نظر گرفته می‌شود. ضمن این‌که در زمان تحلیل مدل‌های المان محدود، اثر غیرخطی هندسه و اثر غیرخطی مصالح نیز در نظر گرفته خواهد شد. در مرحله بعدی، با استفاده از مدل‌های توسعه داده‌شده به بررسی عملکرد پوشش‌های کامپوزیتی در بهبود رفتار استاتیکی غیرخطی اتصال لوله‌ای X شکل پرداخته می‌شود و به‌طور جداگانه اثر پارامترهای مختلف FRP و میزان تأثیرگذاری هر یک از آن‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- مروری بر تحقیقات پیشین

مطالعات اولیه بر روی ظرفیت باربری اتصالات لوله‌ای توسط Yura و همکاران (۱۹۸۱) گزارش شد. آن‌ها روابطی را برای به دست آوردن ظرفیت نهایی این اتصالات در شرایط بارگذاری مختلف ارائه دادند. تا سال ۱۹۹۱، هیچ راهنمای طراحی مناسبی برای اتصالات X شکل وجود نداشت. در این سال Van der Vegte و همکاران (۱۹۹۱) با بررسی ۹ نمونه اتصال X شکل به بررسی سختی، مقاومت نهایی و تغییر شکل این‌گونه اتصالات پرداختند. Nassiraei و همکاران (۲۰۱۷) اتصالات لوله‌ای X شکل را با استفاده از ورق‌های فولادی کالر تقویت کردند و کارایی آن‌ها را تحت بار فشاری مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که

برای هر مقداری از β (نسبت قطر عضو فرعی به اصلی)، سختی اولیه و ظرفیت نهایی در اتصال تقویت‌شده افزایش می‌یابد. در مورد تقویت اتصالات لوله‌ای با ورق‌های FRP، یکی از تحقیقات اولیه، مقاوم‌سازی اتصال ترک‌خورده بین اعضای لوله‌ای آلومینیومی توسط پوشش‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) بود. نتایج نشان داد که ظرفیت اتصال تقویت‌شده حدوداً ۱/۱۷ تا ۱/۲۵ برابر بیشتر از اتصال بدون ترک است (Pantelides و همکاران، ۲۰۰۳). Lesani و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی آزمایشگاهی تقویت اتصالات لوله‌ای T شکل با استفاده از پوشش‌های GFRP تحت بار فشاری، تأثیرگذاری مثبت این پوشش‌ها را در افزایش مقاومت نهایی (تا ۵۰ درصد)، سختی اولیه (تا ۱۲ درصد) و کاهش تغییر شکل اتصال (تا ۵۰ درصد) گزارش دادند.

Fu و همکاران (۲۰۱۶) نتیجه گرفتند که نحوه قرارگیری پوشش‌های FRP روی اتصال لوله‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به‌طوری‌که طول و خصوصیات مکانیکی لایه‌های FRP نسبت به نحوه قرارگیری آن‌ها تأثیر کم‌تری بر افزایش ظرفیت اتصال خواهد داشت. Nassiraei و Rezadoost (۲۰۲۱) با بررسی ضرایب تمرکز تنش در اتصالات لوله‌ای X شکل تقویت‌شده با FRP تحت بار فشاری، نتیجه گرفتند که این پوشش‌ها منجر به افزایش عمر خستگی اتصال می‌شوند، زیرا ضریب تمرکز تنش در اتصال تقویت‌شده می‌تواند تا ۷۱ درصد کاهش یابد. Nassiraei و Rezadoost (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای تأثیر پارامترهای هندسی بی‌بعد را روی ظرفیت نهایی اتصالات لوله‌ای X تقویت‌شده با GFRP بررسی کردند و معادله‌ای را برای تخمین مقاومت نهایی ارائه دادند.



شکل ۱- جزئیات هندسی اتصال لوله‌ای X شکل تقویت‌شده با FRP: (الف) نمای سه‌بعدی، (ب) نحوه بارگذاری اتصال، (ج) جزئیات اتصال در محل برخورد عضو اصلی و اعضای فرعی

ایجاد شده برای یک اتصال لوله‌ای X شکل تقویت شده با ۴ لایه FRP در شکل (۲) نشان داده شده است. در این پژوهش برای مدل‌سازی اعضای اصلی، فرعی و جوش از المان سه‌بعدی ۱۸۶ Solid استفاده می‌شود. این المان شامل ۲۰ گره و ۳ درجه آزادی در هر گره است. برای مدل‌سازی FRP نیز از المان پوسته‌ای Shell ۲۸۱ که شامل ۸ گره و ۶ درجه آزادی در هر گره است، استفاده شده است.

۳-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

به علت تقارن هندسه اتصال و نحوه پوشاندن آن توسط FRP، تنها مدل‌سازی یک‌هشتم اتصال کافی است. مطابق مطالعه آزمایشگاهی پیشین (Nassiraei و همکاران، ۲۰۱۷)، دو انتهای عضو اصلی آزاد است و اعضای فرعی امکان جابه‌جایی خارج از صفحه را ندارند.

۳-۴- اندرکنش بین FRP و سطح اتصال

در این تحقیق برای شبیه‌سازی چسبندگی FRP به اتصال بین المان‌های سه‌بعدی و پوسته‌ای از المان‌های تماسی^{۱۲} استفاده می‌شود. برای تعریف تماس بین دو سطح باید یکی از آن‌ها را به‌عنوان سطح هدف^{۱۳} و دیگری را به‌عنوان سطح تماس^{۱۱} تعریف کنیم؛ بنابراین سطوح مربوط به FRP به‌عنوان سطح هدف و سطوح خارجی عضو اصلی، عضو فرعی و جوش را به‌عنوان سطح تماس در نظر می‌گیریم. رفتار تماس به‌صورت سطح به سطح^{۱۲}، انعطاف‌پذیر^{۱۳} و همواره به‌هم‌پیوسته^{۱۴} تعریف شده است تا اندرکنش بین کامپوزیت و اتصال به‌خوبی شبیه‌سازی شود. روش پیشنهادی در این پژوهش برای در نظر گرفتن تماس بین FRP و اتصال در بخش ۴-۲ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۵- نحوه تحلیل مدل‌ها

از روش نیوتن-رافسون^{۱۵} برای بررسی رفتار استاتیکی غیرخطی اتصالات لوله‌ای X شکل استفاده شده است اما چون این روش به‌تنهایی توانایی پیش‌بینی منفی‌شدگی سختی نمودار نیرو-جابه‌جایی را ندارد از روش طول کمان^{۱۶} بهره خواهیم برد تا از وقوع واگرایی حتی هنگامی که شیب نمودار نیرو-جابه‌جایی صفر یا منفی می‌شود جلوگیری کند. شایان‌ذکر است که هر دو عامل غیرخطی شدن تحلیل (هندسه و مصالح غیرخطی) در روند تحلیل در نظر گرفته شده است.

با این وجود در حال حاضر یک نیاز اساسی برای بررسی دقیق‌تر رفتار اتصالات X شکل دورپیچ شده با FRP وجود دارد زیرا:

(۱) هیچ مطالعه‌ای برای بررسی تأثیر جهت، طول و تعداد لایه‌های CFRP^{۱۷} در تغییر رفتار اتصال تقویت شده در دسترس نیست.

(۲) با وجود مشخص شدن نحوه تأثیر برخی از پارامترهای مربوط به FRP در بهبود رفتار اتصالات تقویت شده، لزوم انجام پژوهشی که با بررسی دقیق رفتار اتصالات، دلیل و نحوه تأثیر هرکدام از پارامترها نیز بحث شود، احساس می‌شود.

(۳) یکی از پارامترهای مهم در تقویت اتصالات لوله‌ای X شکل دورپیچ شده با FRP، طول لایه‌های FRP روی عضو اصلی است. در این پژوهش، محدوده مربوط به-طول FRP روی عضو اصلی که در مطالعه Nassiraei و Rezadoost (۲۰۲۱) بین ۰/۵ تا ۱/۵ بود به ۰/۵ تا ۳/۵ افزایش یافت تا تأثیر این پارامتر دقیق‌تر بررسی شود.

۳-۳- تشریح نحوه مدل‌سازی عددی

در این بخش مراحل انجام شده جهت مدل‌سازی عددی اتصالات لوله‌ای X شکل در نرم‌افزار ANSYS ارائه خواهد شد.

۳-۱- پروفیل جوش

برای به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر در این مطالعه، پروفیل جوش در امتداد محل برخورد اعضای فرعی به عضو اصلی مطابق ضوابط انجمن جوش آمریکا (۲۰۰۲) مدل‌سازی شده است. مطابق ضوابط این آیین‌نامه، ابعاد جوش تابعی از زاویه دی‌هدرال^{۱۷} است که به‌صورت زاویه بین صفحات تماس بر اعضای اصلی و فرعی در امتداد منحنی تلاقی تعریف می‌شود.

۳-۲- نحوه مش‌بندی

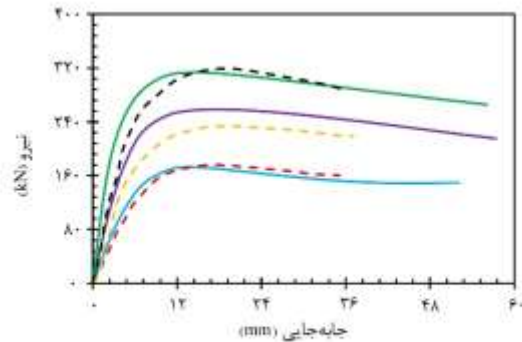
به‌دلیل پیچیدگی‌های هندسه اتصال به‌خصوص در محل تقاطع عضو اصلی و فرعی از روشی موسوم به مش زیر حوزه^{۱۸} در فرایند مش‌بندی اتصال و FRP استفاده شده است. در این روش کل اتصال و FRP به قسمت‌های مختلفی تقسیم می‌شوند و هر قسمت به‌صورت جداگانه مش‌بندی خواهد شد. با این روش می‌توان کیفیت مش و تعداد المان‌ها را به‌راحتی کنترل کرد (Nassiraei و Rezadoost، ۲۰۲۱). به‌عنوان نمونه، مش

12. Surface-to-surface
13. Flexible-to-flexible
14. Always bonded
15. Newton-Raphson method
16. Arc-Length

6. Carbon Fiber Reinforced Polymer
7. Dihedral angle
8. Sub-zone mesh
9. Adhesive elements
10. Target surface
11. Contact surface

جدول ۱- مشخصات هندسی سه نمونه اتصال X شکل تقویت نشده جهت اعتبارسنجی مدل های عددی تقویت نشده (اتصالات S1 تا S3)

نام نمونه	D (mm)	α	β	γ	τ	θ (°)
S1	۳۰۰/۰۳	۱۲/۰	۰/۲۵	۱۶/۴	-۰/۹۰	۹۰
S2	۲۹۹/۶۷	۱۲/۳	۰/۵۳	۱۷/۱	-۰/۹۳	۹۰
S3	۳۰۰/۰۰	۱۲/۰	۰/۷۳	۱۷/۹	-۰/۹۹	۹۰



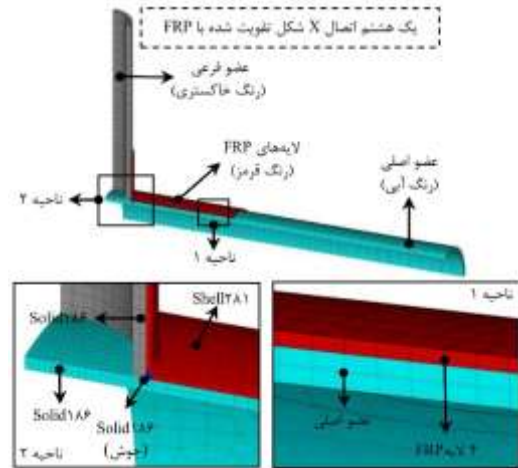
شکل ۳- مقایسه نمودار نیرو- جابه جایی اتصالات S1 تا S3 حاصل از مدل سازی عددی با نتایج آزمایش های انجام شده توسط Nassiraei و همکاران (۲۰۱۷)

جدول ۲- مقایسه مقاومت نهایی اتصالات S1 تا S3 حاصل از مدل سازی عددی و تست آزمایشگاهی

نام نمونه	$F_{u,Num}$ (kN)	$F_{u,Exp}$ (kN)	$F_{u,Num} / F_{u,Exp}$
S1	۱۷۸/۴	۱۷۵/۱	۱/۰۲
S2	۲۶۵/۸	۲۳۳/۵	۱/۱۴
S3	۳۲۱/۸	۳۱۹/۴	۱/۰۱

۴-۲- صحت سنجی اتصالات لوله ای T/Y شکل تقویت شده با FRP

در این بخش با مدل سازی عددی آزمایش های انجام شده توسط Lesani و همکاران (۲۰۱۵)، صحیح و دقیق بودن روش ارائه شده در این پژوهش برای شبیه سازی اندرکنش بین FRP و اتصال لوله ای مورد ارزیابی قرار می گیرد. به همین منظور سه نمونه اتصال لوله ای T/Y شکل تقویت شده با FRP که مشخصات هندسی آنها در جدول (۳) ارائه شده است، با شبیه سازی تمام موارد انجام شده در آزمایشگاه مدل سازی شدند. شکل (۴) نشان دهنده نمودار نیرو- جابه جایی این اتصالات، حاصل از مدل های عددی و آزمایشگاهی است. همچنین در جدول (۴) مقادیر مقاومت نهایی حاصل از مدل های عددی ($F_{u,Num}$) و آزمایشگاهی ($F_{u,Exp}$) نمونه های S4 تا S6 ارائه شده است.



شکل ۲- مش ایجاد شده برای یک نمونه اتصال X شکل تقویت شده با ۴ لایه FRP

۴-۳ اعتبارسنجی مدل های عددی

در ادامه، دقت مدل سازی عددی اتصال لوله ای X شکل تقویت نشده در بخش ۴-۱ و روش پیشنهادی در این پژوهش برای در نظر گرفتن چسبندگی بین لایه های FRP و سطح اتصال در بخش (۴-۲)، با توجه به نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می گیرند.

۴-۱- صحت سنجی اتصال لوله ای X شکل تقویت نشده

به منظور بررسی دقت مدل سازی اتصالات لوله ای X شکل تقویت نشده به صورت المان محدود، سه نمونه اتصال لوله ای X شکل مدل سازی خواهند شد و نتایج حاصل از آنها با نتایج حاصل از آزمایش این سه نمونه که توسط Nassiraei و همکاران (۲۰۱۷) انجام شده است، اعتبارسنجی می شوند. مشخصات هندسی این سه نمونه اتصال در جدول (۱) ارائه شده است. شکل (۳) مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط Nassiraei و همکاران (۲۰۱۷) و مدل سازی عددی انجام شده در این پژوهش را در مقاومت نهایی، جابه جایی و سختی اتصال نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، مدل های المان محدود که در آنها شرایط آزمایشگاهی شبیه سازی شده است، به خوبی می توانند رفتار یک اتصال لوله ای X شکل تحت بار فشاری را پیش بینی کنند.

مطابق جدول (۲) مقاومت نهایی این سه اتصال حاصل از مدل سازی عددی ($F_{u,Num}$) و تست های آزمایشگاهی ($F_{u,Exp}$) به طور متوسط حدود ۶ درصد با یکدیگر اختلاف دارند؛ بنابراین می توان از این بخش نتیجه گرفت که نحوه مدل سازی عددی اتصال لوله ای X شکل تقویت نشده تحت بار فشاری در این مقاله از دقت قابل قبولی برخوردار است و می تواند به خوبی رفتار آن را پیش بینی کند.

از جمله زاویه دورگیری، طول و تعداد لایه‌های FRP بر مقاومت نهایی و تغییر شکل اتصال تقویت‌شده بررسی خواهد شد.

۵-۱- مشخصات هندسی اتصالات

قصد داریم سه نمونه اتصال لوله‌ای X شکل را در دو حالت تقویت نشده و تقویت‌شده بررسی کنیم. مشخصات هندسی این نمونه‌ها در جدول (۵) ذکر شده است. طول عضو اصلی در این نمونه‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده است تا اثر کوتاه بودن طول عضو اصلی رخ ندهد. طول عضو فرعی نیز چهار برابر قطر عضو فرعی است تا شرایط مرزی و بارگذاری در انتهای عضو فرعی روی ظرفیت اتصال تأثیرگذار نباشد، ضمن این‌که عضو فرعی به علت طول زیاد و تحت فشار قرار گرفتن دچار کمناش نشود.

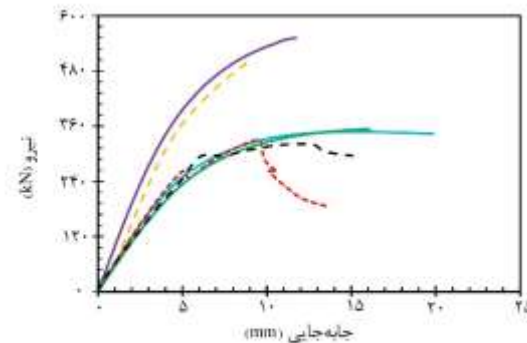
۵-۲- مشخصات مصالح

در این پژوهش با فرض رفتار الاستیک-پلاستیک کامل برای فولاد، مدول الاستیسیته عضو اصلی و فرعی را به ترتیب ۲۰۶ و ۲۱۸ گیگاپاسکال و تنش تسلیم عضو اصلی و فرعی را نیز به ترتیب ۲۷۰ و ۳۵۸ مگاپاسکال در نظر می‌گیریم. برای بررسی تأثیر جنس FRP، دو نوع از این کامپوزیت‌ها را به دلیل کاربرد بیشتر در نظر گرفته شده است که شامل پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP)^{۱۷} و پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) می‌باشند. مشخصات مکانیکی و مقاومتی پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف کربن و شیشه در جدول (۶) ارائه شده است.

در جدول (۶)، E_1 ، E_2 ، E_3 به ترتیب مدول الاستیسیته FRP در راستای محور ۱ (در راستای الیاف)، محور ۲ (عمود بر راستای الیاف در صفحه الیاف) و محور ۳ (عمود بر راستای الیاف اما خارج از صفحه الیاف) است. v_{12} ، v_{13} و v_{23} متناظر با نسبت پواسون^{۱۸} از FRP در صفحات ۱-۲ (داخل صفحه الیاف)، ۱-۳ و ۲-۳ (خارج از صفحه الیاف) است. به طور مشابه G_{12} ، G_{13} و G_{23} نیز نشان‌دهنده مدول برشی FRP در صفحات داخل و خارج الیاف است. همچنین X_T و X_C مقاومت کششی و فشاری کامپوزیت در راستای الیاف، Y_C و Y_T مقاومت کششی و فشاری کامپوزیت در راستای عمود بر جهت الیاف، S_{12} مقاومت برشی FRP داخل صفحه الیاف و S_{23} مقاومت برشی FRP خارج از صفحه الیاف است. FRP تا لحظه گسیختگی رفتار خطی داشته و از معیار هاشین (Hashin) و Rotem (۱۹۷۳) برای تشخیص خرابی در آن استفاده می‌کنیم. ضخامت هر لایه FRP، مشابه مراجع (Fu و همکاران، ۲۰۱۶) و (Lesani و همکاران، ۲۰۱۳)، ۰/۵ میلی‌متر فرض می‌شود.

جدول ۳- مشخصات هندسی سه نمونه اتصال T/Y شکل تقویت‌شده با FRP جهت اعتبارسنجی مدل‌های عددی تقویت‌شده (اتصالات S۴ تا S۶)

نام نمونه	D (mm)	A	β	γ	τ	θ (°)
S۴	۲۷۳/۱۰	۱۳/۵۱	۰/۴۲	۲۱/۵	۱/۳۵	۹۰
S۵	۲۷۳/۱۰	۱۲/۰۸	۰/۴۲	۲۱/۵	۱/۳۵	۴۳
S۶	۲۷۳/۱۰	۱۵/۲۷	۰/۴۲	۲۱/۵	۱/۳۵	۶۹



شکل ۴- مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی اتصالات S۴ تا S۶ حاصل مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط Lesani و همکاران (۲۰۱۵)

جدول ۴- مقایسه مقاومت نهایی اتصالات S۴ تا S۶ حاصل از

مدل‌سازی عددی و تست آزمایشگاهی

نام نمونه	$F_{u, Num}$ (kN)	$F_{u, Exp}$ (kN)	$F_{u, Num} / F_{u, Exp}$
S۴	۳۴۷/۷	۳۲۷/۱	۱/۰۶
S۵	۵۵۱/۵	۴۹۹/۲	۱/۱۰
S۶	۳۵۲/۳	۳۲۰/۲	۱/۱۰

مطابق جدول (۴) مقاومت نهایی حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی نهایتاً ۱۰ درصد با یکدیگر اختلاف دارند. پس می‌توان نتیجه گرفت که نحوه تعریف اندرکنش و چسبندگی بین FRP و سطح اتصال در مدل‌های عددی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند؛ بنابراین می‌توان از این روش برای مدل‌سازی اندرکنش بین FRP و سطح اتصال لوله‌ای X شکل نیز استفاده کرد.

۵- بررسی اثر پوشش‌های FRP بر مقاومت نهایی و جابه‌جایی‌های اتصال

در بخش ۴ نحوه مدل‌سازی عددی اتصالات تقویت‌شده و تقویت‌شده با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد و دقت آن‌ها مورد تأیید قرار گرفت. در این بخش تأثیر پارامترهای مختلف

جدول ۵- مشخصات هندسی سه نمونه اتصال لوله‌ای X شکل برای بررسی اثر پارامترهای مختلف FRP روی مقاومت نهایی و تغییر شکل اتصالات تقویت شده

نام اتصال	قطر عضو اصلی (mm)	α	β	γ	τ
X1	۳۵۰	۱۲	۰/۲	۱۸	۱/۰
X2	۳۵۰	۱۲	۰/۳	۲۲	۱/۰
X3	۳۵۰	۱۲	۰/۵	۳۰	۱/۰

جدول ۶- مشخصات مکانیکی و مقاومتی CFRP و GFRP برای تقویت اتصالات X1 تا X3

	GFRP (Lesani و همکاران، ۲۰۱۳)	CFRP (Barbero و همکاران، ۲۰۰۷) (Hosseini و همکاران، ۲۰۲۰)
E_1	۳۸/۶ GPa	۱۳۸/۰ GPa
$E_T = E_C$	۸/۲۷ GPa	۸/۹۶ GPa
$\nu_{12} = \nu_{13}$	۰/۲۶	۰/۳۰
ν_{23}	۰/۳۳	۰/۵۹
$G_{12} = G_{13}$	۴/۱۴ GPa	۷/۱۰ GPa
G_{23}	۳/۱۰ GPa	۲/۸۲ GPa
X_T	۱۰۶۲ MPa	۱۵۵۰ MPa
X_C	۶۱۰ MPa	۱۰۹۰ MPa
Y_T	۳۱ MPa	۵۹ MPa
Y_C	۱۱۸ MPa	۲۰۷ MPa
$S_{12} = S_{13}$	۷۲ MPa	۱۲۸ MPa
S_{23}	۲۰ MPa	۷۵ MPa

جدول ۷- حالات مختلف قرارگیری لایه‌های FRP روی اتصال X1

شماره طرح دورگیری	زوایای الیاف روی عضو اصلی و جوش	زوایای الیاف روی عضو فرعی
۱	۰/۹۰/۰/۹۰/۰/۹۰/۰	۰/۰/۰/۰/۰/۰
۲	۹۰/۰/۰/۹۰/۰/۰	۰/۰/۰/۰/۰/۰
۳	۰/۰/۰/۰/۰/۰	۰/۰/۰/۰/۰/۰
۴	۹۰/۰/۰/۹۰/۰/۰	۰/۰/۰/۰/۰/۰
۵	۹۰/۰/۰/۹۰/۰/۰	۰/۹۰/۰/۰/۹۰/۰
۶	۹۰/۰/۰/۹۰/۰/۰	۹۰/۰/۰/۹۰/۰/۰
۷	۹۰/۰/۰/۹۰/۰/۰	۹۰/۰/۰/۹۰/۰/۰

هفت طرح دورگیری اتصال توسط FRP که در جدول (۷) ارائه شده است به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که می‌توان در طرح‌های ۱ تا ۴ اثر زوایای الیاف روی عضو اصلی و در طرح‌های ۴ تا ۷ اثر زوایای الیاف روی عضو فرعی را بررسی کرد. تغییر زوایای الیاف روی عضو اصلی نسبت به عضو فرعی تأثیرگذاری بیشتری دارد.

جدول ۵- مشخصات هندسی سه نمونه اتصال لوله‌ای X شکل برای بررسی اثر پارامترهای مختلف FRP روی مقاومت نهایی و تغییر شکل اتصالات تقویت شده

نام اتصال	قطر عضو اصلی (mm)	α	β	γ	τ
X1	۳۵۰	۱۲	۰/۲	۱۸	۱/۰
X2	۳۵۰	۱۲	۰/۳	۲۲	۱/۰
X3	۳۵۰	۱۲	۰/۵	۳۰	۱/۰

جدول ۶- مشخصات مکانیکی و مقاومتی CFRP و GFRP برای تقویت اتصالات X1 تا X3

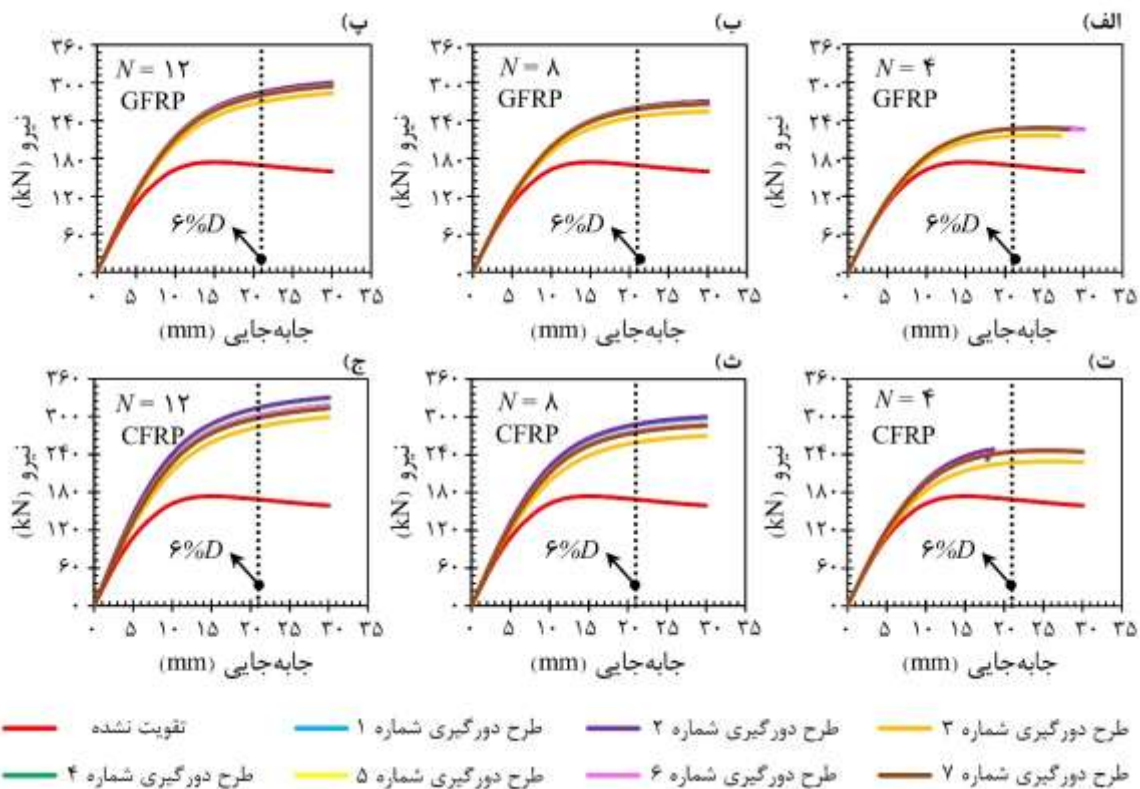
	GFRP (Lesani و همکاران، ۲۰۱۳)	CFRP (Barbero و همکاران، ۲۰۰۷) (Hosseini و همکاران، ۲۰۲۰)
E_1	۳۸/۶ GPa	۱۳۸/۰ GPa
$E_T = E_C$	۸/۲۷ GPa	۸/۹۶ GPa
$\nu_{12} = \nu_{13}$	۰/۲۶	۰/۳۰
ν_{23}	۰/۳۳	۰/۵۹
$G_{12} = G_{13}$	۴/۱۴ GPa	۷/۱۰ GPa
G_{23}	۳/۱۰ GPa	۲/۸۲ GPa
X_T	۱۰۶۲ MPa	۱۵۵۰ MPa
X_C	۶۱۰ MPa	۱۰۹۰ MPa
Y_T	۳۱ MPa	۵۹ MPa
Y_C	۱۱۸ MPa	۲۰۷ MPa
$S_{12} = S_{13}$	۷۲ MPa	۱۲۸ MPa
S_{23}	۲۰ MPa	۷۵ MPa

۵-۳- بررسی اثر زاویه دورگیری FRP روی مقاومت نهایی

و جابه‌جایی‌های اتصال

به منظور بررسی اثر زاویه دورگیری FRP روی مقاومت نهایی و تغییر شکل‌ها، اتصال X1 در سه حالت ۴، ۸ و ۱۲ لایه با ۷ حالت متفاوت دورگیری FRP روی اتصال مطابق جدول (۷) توسط الیاف‌های کربن و شیشه مقاوم‌سازی می‌شود. شایان ذکر است که در جدول (۷) زوایای الیاف برای حالت چهار لایه ارائه شده است. حالت‌های ۸ و ۱۲ لایه به ترتیب از یک و دو بار تکرار این طرح به دست خواهد آمد. منظور از زاویه ۹۰ درجه در عضو اصلی حالتی است که ورق‌های FRP به گونه‌ای روی آن‌ها قرار گیرند که الیاف‌ها عمود بر محور طولی عضو اصلی باشند. همچنین زاویه ۹۰ درجه در عضو فرعی نیز به حالتی اطلاق می‌شود که ورق‌های FRP به گونه‌ای روی آن قرار گیرند که الیاف‌ها در راستای محور طولی عضو فرعی باشند. به طور مشابه، زاویه ۰ درجه نیز در عضو اصلی و فرعی قابل تعریف است.

شکل (۵) نشان‌دهنده نمودار نیرو- جابه‌جایی اتصال X1 در حالت‌های تقویت نشده و تقویت شده است. در این پژوهش از حد جابه‌جایی ارائه شده توسط مراجع (Choo و همکاران، ۲۰۰۵) و



شکل ۵- نمودار نیرو- جابه‌جایی اتصال X1 در حالت‌های متفاوت مقاومت‌سازی به‌منظور بررسی تأثیر زاویه دورگیری FRP بر روی تغییر رفتار اتصالات تقویت‌شده

بیرونی عضو اصلی که از محل تلاقی فصل مشترک عضو اصلی و فرعی با صفحه مار بر محورهای این اعضا عبور می‌کند، خط تاج (محور Y) در نقطه‌ای به مختصات $X/\sqrt{DT} = 0$ اتفاق افتاده است. اتصال در این نقطه به‌اندازه $7/12$ میلی‌متر جابه‌جا شده است. در حالت تقویت با ۸ لایه CFRP نیز حداکثر جابه‌جایی در همان نقطه اتفاق می‌افتد. در طرح دورگیری شماره ۳ جابه‌جایی در این نقطه به $3/67$ میلی‌متر ($48/4$ درصد کاهش) و در طرح شماره ۷ به $3/35$ میلی‌متر (53 درصد کاهش) می‌رسد. در حالت تقویت با ۸ لایه GFRP نیز حداکثر جابه‌جایی در نقطه $X/\sqrt{DT} = 0$ اتفاق می‌افتد. پس ورق‌های تقویتی محل حداکثر جابه‌جایی را تغییر نمی‌دهند؛ اما در حالت استفاده از الیاف شیشه، در طرح دورگیری شماره ۳ جابه‌جایی در این نقطه به $3/74$ میلی‌متر ($47/5$ درصد کاهش) و در طرح شماره ۷ به $3/73$ میلی‌متر ($47/6$ درصد کاهش) می‌رسد. پس تغییر زاویه قرارگیری الیاف روی اتصال همانند مقاومت نهایی روی تعدیل جابه‌جایی‌های اتصال نیز تأثیرگذار است، اما این اثر در حالت استفاده از الیاف‌های کربن نسبت به شیشه محسوس‌تر است.

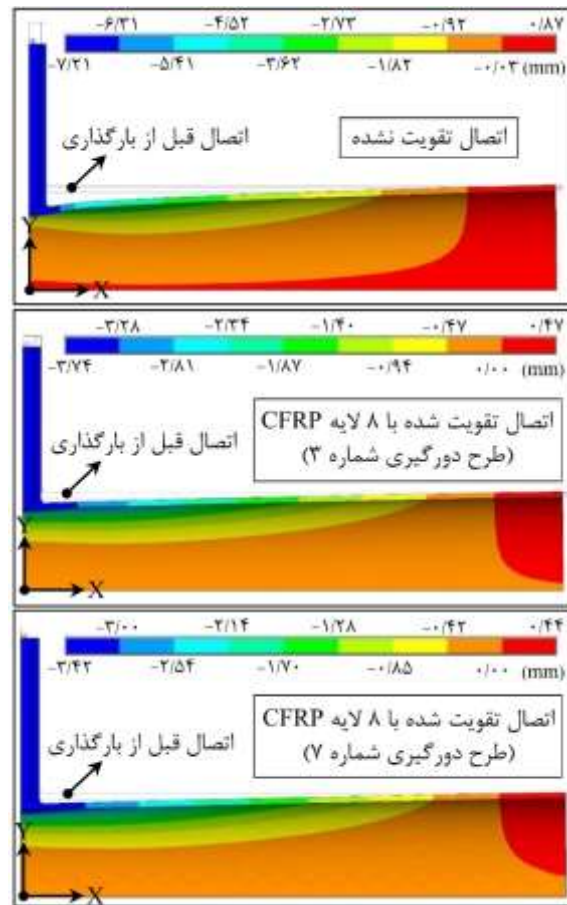
هنگام مقاومت‌سازی اتصال با ۸ لایه GFRP، طرح‌های اول تا چهارم مقاومت نهایی را از حدود ۵۰ تا ۶۶ درصد افزایش می‌دهند، اما در طرح‌های چهارم تا هفتم مقاومت نهایی تغییر چشم‌گیری ندارد و در هر چهار حالت حدود ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. در حالت تقویت با ۸ لایه GFRP نیز طرح‌های اول تا چهارم منجر به افزایش مقاومت نهایی از حدود ۴۱ تا ۵۰ درصد شده است، اما در نمونه‌های چهارم تا هفتم مقاومت نهایی در حدود ۴۰ درصد افزایش یافته است.

در ادامه میزان تأثیرگذاری زاویه دورگیری بر تعدیل تغییر شکل‌های اتصال تقویت‌شده بررسی خواهد شد. برای این منظور اتصال X1 را در حالت‌های تقویت نشده و تقویت‌شده با ۸ لایه CFRP و GFRP که یکبار با طرح دورگیری شماره ۳ و بار دیگر با طرح دورگیری شماره ۷ مقاومت‌سازی شده‌اند را مقایسه می‌کنیم. در شکل (۶) برای نمونه، تغییر شکل اتصال X1 در حالت‌های تقویت نشده و تقویت‌شده با الیاف کربن نشان داده شده است. برای این‌که امکان مقایسه بین جابه‌جایی‌ها وجود داشته باشد، تغییر شکل اتصالات تقویت‌شده در باری معادل با مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده با مقیاس ۵ نشان داده شده است. حداکثر جابه‌جایی سطح اتصال تقویت نشده روی خط تاج^{۱۹} (به خط مماس بر سطح

از ۲۲۳/۷۱۱ به ۲۴۸/۹۵۵ کیلونیوتن (۱۷ درصد افزایش) شده است. پس می‌توانیم نتیجه بگیریم که با افزایش طول ورق‌های CFRP، مقاومت نهایی اتصال نیز افزایش می‌یابد اما اثر افزایش طول در تعداد لایه‌های بیشتر محسوس‌تر خواهد بود. در حالت تقویت با پلیمرهای مسلح شده با الیاف کربن نیز نتایج مشابهی حاصل می‌شود. افزایش طول ورق‌ها از $0/5d$ به $3/5d$ در حالت‌های ۴، ۸ و ۱۲ لایه به ترتیب ۶، ۲۰ و ۳۰ درصد مقاومت نهایی اتصال را افزایش داده است.

اثر افزایش δ_{FRP} در یک تعداد لایه معین از CFRP نسبت به GFRP محسوس‌تر است، زیرا افزایش طول ورق‌ها از $0/5d$ به $2/5d$ در حالت استفاده از ۸ لایه پلیمرهای مسلح شده با الیاف شیشه و کربن به ترتیب مقاومت نهایی را ۷ و ۱۴ درصد افزایش می‌دهد.

شکل (۸) نشان‌دهنده تغییر شکل اتصال X2 در راستای محور Z (که در واقع بیانگر میزان بیضی‌شدگی عضو اصلی است) در حالت‌های تقویت نشده و تقویت شده با ۱۲ لایه CFRP با دو مقدار متفاوت برای δ_{FRP} ($1/5d$ و $3/5d$) است. تغییر شکل اتصالات تقویت شده در مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده با مقیاس ۵ برابر بزرگ‌تر نشان داده شده است. مطابق این شکل حداکثر جابه‌جایی روی خط حلقه 2^0 (به منحنی مماس بر سطح بیرونی عضو اصلی که از محل تلاقی فصل مشترک اعضا با صفحه مار بر محور عضو فرعی و عمود بر صفحه محورهای عضو اصلی و اعضای فرعی عبور می‌کند، منحنی یا خط حلقه اطلاق می‌شود) در نمونه‌های تقویت شده و تقویت نشده در نقطه‌ای به مختصات $5/21$ $R\phi/\sqrt{DT} =$ اتفاق افتاده است. (دقت شود که منظور از R و ϕ به ترتیب شعاع عضو اصلی و زاویه نقطه موردنظر روی خط حلقه در صفحه YZ برحسب رادیان است). پس ورق‌های تقویتی محل حداکثر جابه‌جایی را تغییر نمی‌دهند اما در تعدیل جابه‌جایی‌ها بسیار مؤثرند. به طوری که استفاده از ۱۲ لایه پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه به طول کل $4d$ روی عضو اصلی ($\delta_{FRP} = 1/5d$) توانسته است جابه‌جایی در این نقطه را از $6/23$ میلی‌متر در حالت تقویت نشده به $2/77$ میلی‌متر کاهش دهد. با افزایش طول FRP روی عضو اصلی برخلاف مقاومت نهایی جابه‌جایی‌های اتصال تقویت شده تغییر چشم‌گیری نداشته است. زمانی که اتصال با ۱۲ لایه پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه دورگیری شده است، افزایش طول پوشش‌ها از $1/5d$ به $3/5d$ جابه‌جایی اتصال را در نقطه $3/80$ $R\phi/\sqrt{DT} = 5/21$ دو درصد بهبود داد؛ یعنی جابه‌جایی از $3/80$ میلی‌متر به $3/70$ میلی‌متر کاهش یافت. این در حالی است که همین میزان افزایش طول، مقاومت نهایی اتصال تقویت شده را ۹ درصد افزایش می‌دهد.



شکل ۶- تأثیر زاویه دورگیری FRP بر روی میزان تعدیل تغییر شکل‌های اتصال X1 در حالت تقویت با ۸ لایه CFRP

۵-۴- بررسی اثر طول پوشش‌های FRP روی مقاومت نهایی و جابه‌جایی‌های اتصال

در این بخش اثر افزایش طول پوشش‌های تقویتی روی عضو اصلی از پای عضو فرعی (δ_{FRP}) بر افزایش مقاومت نهایی و کاهش جابه‌جایی‌های اتصال بررسی می‌شود. برای این هدف اتصال X2 با ۴ طول متفاوت از FRP روی عضو اصلی (از $0/5d$ تا $3/5d$) مقاومت‌سازی می‌کنیم. طول FRP روی هرکدام از عضوهای فرعی، یک‌چهارم طول کل این لایه‌ها روی عضو اصلی است. شکل (۷) نشان‌دهنده مقادیر مقاومت نهایی اتصال X2 در حالت تقویت شده توسط ۴، ۸ و ۱۲ لایه GFRP و CFRP با ۴ طول متفاوت از FRP روی عضو اصلی است.

ابتدا حالت تقویت با پلیمرهای مسلح شده با الیاف شیشه را در نظر می‌گیریم. در حالت ۴ لایه، افزایش طول ورق‌ها (δ_{FRP}) از $0/5d$ به $3/5d$ منجر به افزایش مقاومت نهایی اتصال از $173/338$ به $192/368$ کیلونیوتن (۳ درصد افزایش) شده است؛ اما در حالت ۱۲ لایه همان میزان افزایش طول منجر به افزایش مقاومت نهایی

۵-۵- بررسی اثر تعداد لایه‌های FRP روی مقاومت نهایی و جابه‌جایی‌های اتصال

در ادامه این پژوهش تأثیر افزایش تعداد لایه‌های FRP قرارگرفته روی اعضای اصلی و فرعی بر افزایش مقاومت نهایی و تعدیل جابه‌جایی‌های اتصال بررسی خواهد شد. برای این هدف اتصال X۳ را در نظر می‌گیریم. مقاومت نهایی این اتصال در حالت تقویت نشده برابر ۱۲۲/۹۲۳ کیلونیوتن است.

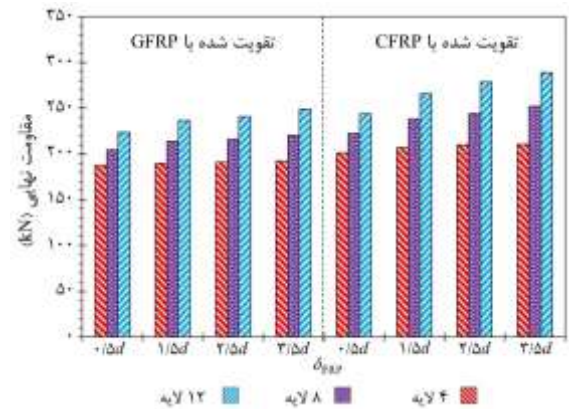
شکل (۹) نشان‌دهنده مقادیر نسبت‌های مقاومت نهایی اتصالات تقویت‌شده به مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده در سه حالت ۴، ۸ و ۱۲ لایه، یک‌بار تقویت‌شده با پلیمرهای مسلح شده با الیاف کربن و بار دیگر با الیاف شیشه است. مطابق شکل (۹)، با افزایش تعداد لایه‌ها، مقاومت نهایی اتصال تقویت‌شده نیز افزایش بیشتری داشته است. به‌طور مثال استفاده از ۴، ۸ و ۱۲ لایه GFRP، مقاومت نهایی را به‌ترتیب به ۱۵۳/۰۶۰، ۱۸۱/۰۵۰ و ۲۲۱/۹۵۹ کیلونیوتن افزایش داده است؛ بنابراین ۴ لایه ۲۴/۵ درصد، ۸ لایه ۴۷/۳ درصد و ۱۲ لایه الیاف شیشه ۸۰/۵ درصد ظرفیت نهایی اتصال را افزایش داده است.

پلیمرهای مسلح شده با الیاف کربن نسبت به پلیمرهای مسلح شده با الیاف شیشه، خصوصیات مکانیکی و مقاومتی بهتری دارند؛ بنابراین انتظار عملکرد بهتری از CFRP نسبت به GFRP در افزایش مقاومت نهایی اتصال وجود دارد. دورگیری اتصال توسط ۴، ۸ و ۱۲ لایه CFRP، مقاومت نهایی اتصال را به‌ترتیب به ۱۷۳/۹۱۳، ۲۲۶/۰۸۷ و ۲۷۶/۰۸۷ کیلونیوتن افزایش داده است؛ بنابراین ۴ لایه ۴۱/۵ درصد، ۸ لایه ۸۳/۹ درصد و ۱۲ لایه پلیمر مسلح شده با الیاف کربن منجر به افزایش ۱۲۴/۶ درصدی مقاومت نهایی اتصال X۳ شده است. اثر ۸ لایه CFRP در افزایش مقاومت نهایی تقریباً مشابه ۱۲ لایه GFRP است، زیرا ۸ لایه پلیمر مسلح شده با الیاف کربن، مقاومت نهایی را ۸۳/۹ درصد و ۱۲ لایه پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه، مقاومت نهایی را ۸۰/۵ درصد افزایش داده است. این نتیجه را می‌توان برای حالت تقویت با ۴ لایه CFRP و ۸ لایه GFRP نیز بیان کرد.

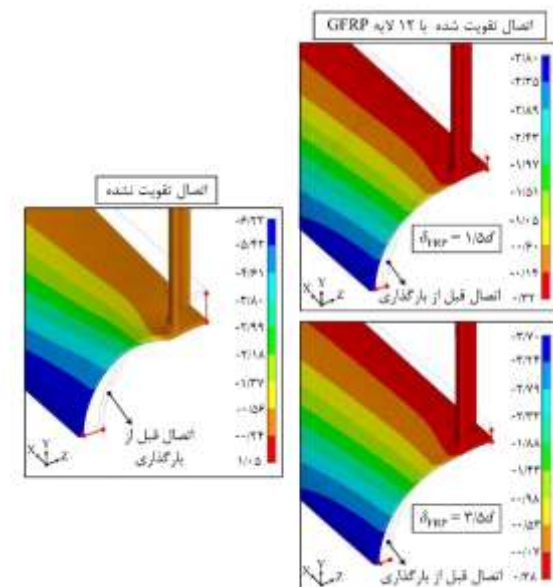
اثر افزایش تعداد لایه‌های CFRP از GFRP در افزایش مقاومت نهایی اتصال بیشتر است. به‌طور مثال افزایش تعداد لایه‌ها از ۴ به ۸، در حالت استفاده از پلیمر مسلح شده با الیاف کربن، مقاومت نهایی را ۴۲ درصد بهبود می‌بخشد، اما همین تعداد افزایش ورق‌های تقویتی در حالت استفاده از پلیمرهای مسلح شده با الیاف شیشه مقاومت نهایی را ۲۳ درصد افزایش می‌دهد.

در شکل (۱۰)، جابه‌جایی نقاط واقع بر روی خط تاج در راستای محور طولی عضو فرعی (محور Y) و جابه‌جایی نقاط واقع بر روی خط حلقه در راستای محور Z که متناظر با بیضی‌شدگی عضو اصلی است، نشان داده شده است.

در حالت تقویت با ۱۲ لایه CFRP وقتی که طول کل این پوشش‌ها روی عضو اصلی برابر $4d$ ($\delta_{FRP} = 1/5d$) است، جابه‌جایی در نقطه $R\phi/\sqrt{DT} = 5/21$ به $2/77$ میلی‌متر ($55/5$ درصد کاهش) می‌رسد. با افزایش طول کل این پوشش‌ها به $8d$ ($\delta_{FRP} = 3/5d$) جابه‌جایی در این نقطه به $2/66$ میلی‌متر ($57/3$ درصد کاهش) خواهد رسید. پس افزایش طول پلیمرهای مسلح شده با الیاف کربن روی عضو اصلی برخلاف مقاومت نهایی تأثیر محسوسی روی تعدیل جابه‌جایی‌های اتصال ندارد.



شکل ۷- مقاومت نهایی اتصال X۲ در حالت‌های متفاوت مقاومت‌سازی به‌منظور بررسی تأثیر طول FRP بر روی تغییر رفتار اتصالات تقویت‌شده



شکل ۸- تأثیر طول پوشش‌های FRP روی عضو اصلی بر روی میزان تعدیل تغییر شکل‌های اتصال X۲ در حالت تقویت با ۱۲ لایه GFRP

حداکثر جابه‌جایی روی خط حلقه در نمونه‌های تقویت‌شده و تقویت نشده در نقطه‌ای به مختصات $R\phi/\sqrt{DT} = 5/21$ اتفاق افتاده است. استفاده از ۱۲ لایه پلیمر مسلح شده با الیاف کربن توانسته است جابه‌جایی در این نقطه را از $10/03$ میلی‌متر در حالت تقویت نشده به $2/04$ میلی‌متر کاهش دهد؛ یعنی یک کاهش محسوس $79/6$ درصدی حاصل شده است. ۱۲ لایه GFRP نیز جابه‌جایی در این نقطه را به $3/04$ میلی‌متر رسانده است، پس منجر به کاهش $69/7$ درصدی شده است؛ بنابراین از این بخش می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد لایه‌های FRP، مقاومت نهایی افزایش و جابه‌جایی‌های اتصال کاهش بیشتری پیدا می‌کنند. ضمن این‌که افزایش تعداد لایه‌های CFRP نسبت به GFRP در افزایش ظرفیت اتصال، اثرگذاری محسوس‌تری دارد.

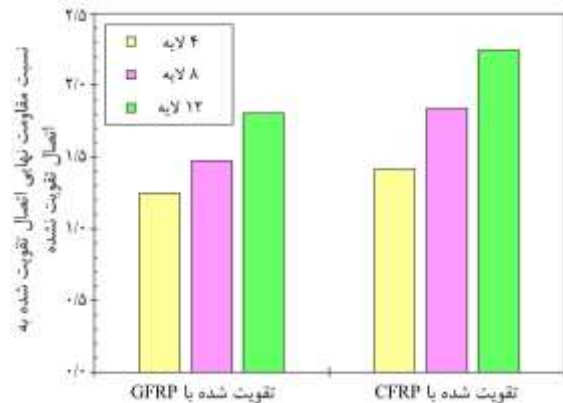
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از صحت‌سنجی مدل‌های عددی با مطالعات آزمایشگاهی پیشین، ۷۵ مدل‌های المان محدود با هدف بررسی تأثیرگذاری و کارآمدی پوشش‌های FRP بر روی افزایش مقاومت نهایی و کاهش تغییر شکل اتصال لوله‌ای X شکل تحت بار فشاری که یکی از انواع متداول اتصالات لوله‌ای در سکوهای فراساحلی فولادی هستند، توسعه داده شدند. در ادامه مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش ارائه خواهد شد.

(۱) بهبود رفتار استاتیکی غیرخطی اتصال لوله‌ای X شکل تقویت‌شده با FRP کاملاً مشهود بود، زیرا این پوشش‌ها می‌توانند مقاومت نهایی اتصال را تا ۱۲۵ درصد نسبت به اتصال تقویت نشده افزایش دهند. ضمن این‌که تغییر شکل اتصال را در راستای محور عضو فرعی تا ۸۴ درصد و جابه‌جایی‌ها روی خط حلقه را تا ۸۰ درصد کاهش دادند.

(۲) زاویه دورگیری و نحوه قرارگیری الیاف‌ها روی اتصال تأثیر قابل‌توجهی بر روی میزان افزایش مقاومت نهایی و تعدیل تغییر شکل اتصال تقویت‌شده دارد. این تأثیرگذاری در حالت استفاده از الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه محسوس‌تر است.

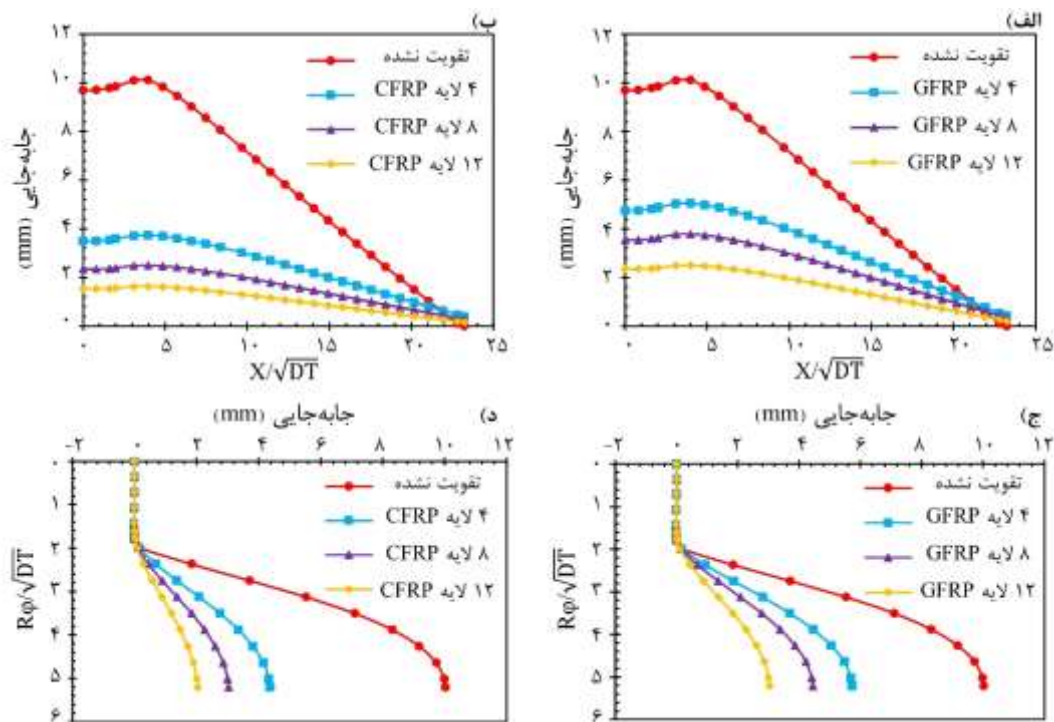
(۳) برای افزایش کارایی پوشش‌های FRP بهتر است لایه‌ها به‌گونه‌ای رو عضو اصلی قرار گیرند که الیاف‌ها در جهت انتقال بار از عضو فرعی به عضو اصلی باشند. زوایای الیاف روی عضو فرعی تأثیر چشم‌گیری ندارند و می‌توان آن‌ها را برحسب راحت‌تر بودن اجراء، روی عضو فرعی قرار داد.



شکل ۹- تأثیر تعداد لایه‌های FRP بر روی مقادیر نسبت مقاومت نهایی اتصال X۳ در حالت‌های تقویت‌شده به مقاومت نهایی اتصال در حالت تقویت نشده

این شکل با هدف بررسی تأثیر تعداد لایه‌ها روی میزان تعدیل جابه‌جایی‌های اتصال تقویت‌شده ارائه شده است. همان‌طور که از قسمت‌های (الف) و (ب) شکل (۱۰) مشخص است، حداکثر جابه‌جایی در راستای محور Y در اتصالات تقویت نشده و تقویت‌شده در نقطه‌ای به مختصات $X/\sqrt{DT} = 3/98$ اتفاق افتاده است. اتصال تقویت نشده در این نقطه به‌اندازه $10/12$ میلی‌متر جابه‌جایی شده است. با مقاوم‌سازی اتصال توسط پوشش‌های FRP، جابه‌جایی‌ها تعدیل شد و هر چه قدر تعداد لایه‌های بیشتری به کار رفت، کاهش بیشتری در جابه‌جایی‌ها را شاهد هستیم. در ابتدا، مقاوم‌سازی با لایه‌های پلیمری مسلح شده با الیاف شیشه را در نظر می‌گیریم. ۴ لایه GFRP، جابه‌جایی در این نقطه را به $5/05$ میلی‌متر کاهش داد؛ یعنی منجر به کاهش حدوداً ۵۰ درصدی جابه‌جایی در این نقطه شد. قرارگیری ۸ و ۱۲ لایه GFRP روی اتصال نیز جابه‌جایی‌ها را به $3/78$ و $2/50$ میلی‌متر رساند که به ترتیب متناظر با $62/5$ درصد و $75/3$ درصد کاهش نسبت به اتصال تقویت نشده است. تأثیر لایه‌های CFRP روی کاهش جابه‌جایی‌های اتصال بسیار چشم‌گیر است. به‌طوری‌که ۴، ۸ و ۱۲ لایه CFRP جابه‌جایی در نقطه $X/\sqrt{DT} = 3/98$ را از $10/12$ میلی‌متر به ترتیب به $3/73$ ، $2/50$ و $1/63$ میلی‌متر کاهش داده است که به ترتیب متناظر با $63/1$ درصد، $75/3$ و $83/9$ درصد کاهش نسبت به اتصال تقویت نشده است.

قسمت‌های (ج) و (د) شکل (۱۰) به‌طور واضحی نشان می‌دهند که بیضی‌شدگی عضو اصلی در محل برخورد این عضو با اعضای فرعی به میزان قابل‌قبولی به‌خصوص هنگام استفاده از CFRP تعدیل شده است. این تعدیل در بیضی‌شدگی عضو اصلی با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش پیدا کرده است مطابق این شکل،



شکل ۱۰- الف) و ب) جابه‌جایی نقاط واقع بر روی خط تاج در راستای محور طولی عضو فرعی (محور Y) در اتصال X۳ در حالت‌های تقویت نشده و تقویت شده، ج) و د) جابه‌جایی نقاط واقع بر روی خط حلقه در راستای محور Z در اتصال X۳ در حالت‌های تقویت نشده و تقویت شده

این نکته را نیز در نظر داشت که CFRP از GFRP گران‌تر است.

در پایان می‌توان گفت که روش پیشنهاد شده در این پژوهش برای تقویت اتصالات لوله‌ای X شکل از نظر افزایش مقاومت نهایی و تعدیل بیضی‌شدگی عضو اصلی امیدوارکننده است؛ بنابراین می‌توان از این روش به‌جای شیوه‌های دیگر تقویت اتصالات لوله‌ای مانند جوشکاری صفحات کالر که نیازمند صرف هزینه و زمان بسیار زیادی به‌خصوص برای سازه‌های در حال سرویس هستند، استفاده کرد. هرچند لزوم انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه برای اطمینان از عملکرد مناسب این پوشش‌ها در شرایط بارگذاری دیگر ضروری می‌باشد.

۷- مراجع

- American Welding Society (AWS), "Structural Welding Code: AWS D1.1", Miami, US, 2002.
- Barbero EJ, "Finite element analysis of composite materials using ANSYS", Crc Press, Boca Raton, Florida, 2007.
- Choo YS, Liang JX, Van der Vegte GJ, Liew JYR, "Static strength of doubler plate reinforced CHS X-joints loaded by in-plane bending", Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60 (12), 1725-1744.
- Choo YS, Van der Vegte GJ, Zettlemoyer N, Li BH, Liew JYR, "Static strength of T-joints reinforced with

FRP با بیوشانیم، هرچه قدر طول بیشتری از اتصال را با FRP پوشانیم، مقاومت نهایی اتصال نیز افزایش بیشتری می‌یابد؛ اما در میزان تعدیل جابه‌جایی‌ها تغییر چشم‌گیری به وجود نمی‌آید. اثر افزایش طول لایه‌های تقویتی بر میزان افزایش مقاومت نهایی اتصال، در تعداد لایه‌های بیشتر محسوس‌تر خواهد بود.

۵) با افزایش تعداد لایه‌های FRP روی اعضا، ظرفیت نهایی اتصال نیز افزایش می‌یابد. ضمن این‌که جابه‌جایی‌های سطح عضو اصلی در راستای محور طولی عضو فرعی و بیضی‌شدگی آن نیز با افزایش تعداد لایه‌ها بهبود می‌یابد. اثر افزایش تعداد لایه‌ها روی میزان افزایش مقاومت نهایی در حالت استفاده از CFRP نسبت به GFRP محسوس‌تر است.

۶) در اتصال تقویت شده با الیاف‌های کربن، مقاومت نهایی نسبت به تقویت آن اتصال با الیاف‌های شیشه افزایش بیشتری دارد، به‌طوری‌که میزان افزایش مقاومت نهایی توسط ۸ لایه CFRP مشابه ۱۲ لایه GFRP است. همچنین الیاف‌های کربن جابه‌جایی‌ها را نسبت به الیاف‌های شیشه بیشتر کاهش می‌دهند؛ بنابراین منطقی است که اولویت اول برای تقویت یک اتصال لوله‌ای با CFRP باشد ولی باید

- doubler or collar plates. I: Experimental investigations", *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131 (1), 119-128.
- Fu Y, Tong L, Zhao XL, "Experimental and numerical investigation on behavior of CFRP-strengthened circular hollow section gap K-joints", *Thin-Walled Structures*, 2016, 102, 80-97.
- Hashin Z, Rotem A, "A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials", *Journal of composite materials*, 1973, 7 (4), 448-464.
- Hosseini AS, Bahaari MR, Lesani M, "Experimental and parametric studies of SCFs in FRP strengthened tubular T-joints under axially loaded brace", *Engineering Structures*, 2020, 213, 110548.
- Lesani M, Bahaari MR, Shokrieh MM, "FRP wrapping for the rehabilitation of Circular Hollow Section (CHS) tubular steel connections", *Thin-Walled Structures*, 2015, 90, 216-234.
- Lesani M, Bahaari MR, Shokrieh MM, "Experimental investigation of FRP-strengthened tubular T-joints under axial compressive loads", *Construction and building materials*, 2014, 53, 243-252.
- Lesani M, Bahaari MR, Shokrieh MM, "Numerical investigation of FRP-strengthened tubular T-joints under axial compressive loads", *Composite structures*, 2013, 100, 71-78.
- Nassiraei H, Rezaadoost P, "Stress concentration factors in tubular X-connections retrofitted with FRP under compressive load", *Ocean Engineering*, 2021, 108562.
- Nassiraei H, Rezaadoost P, "Static capacity of tubular X-joints reinforced with fiber reinforced polymer subjected to compressive load", *Engineering Structures*, 2021, 112041.
- Nassiraei H, Zhu L, Lotfollahi-Yaghin MA, Ahmadi H, "Static capacity of tubular X-joints reinforced with collar plate subjected to brace compression", *Thin-Walled Structures*, 2017, 119, 256-265.
- Pantelides CP, Nadauld J, Cercione L, "Repair of cracked aluminum overhead sign structures with glass fiber reinforced polymer composites", *Journal of Composites for Construction*, 2003, 7 (2), 118-126.
- Van der Vegte GJ, Choo YS, Liang JX, Zettlemoyer M, Liew JYR, "Static strength of T-joints reinforced with doubler or collar plates. II: Numerical simulations", *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131 (1), 129-138.
- Van der Vegte GJ, De Koning CHM, Puthli RS, Wardenier J, "Numerical simulation of experiments on multiplanar tubular steel X-joints", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1991, 1 (03), 200-207.
- Yura JA, Edwards IF, Zettlemoyer N, "Ultimate capacity of circular tubular joints", *Journal of the structural division*, 1981, 107 (10), 1965-1984.

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of the Performance of CFRP and GFRP Wraps on Improving the Nonlinear Static Behavior of Tubular X-Joints

Pooya Rezadoost, Hossein Nassiraei, Seyed Ahmad Neshaei *

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran

Received: 08 September 2021; **Review:** 13 November 2021; **Accepted:** 23 November 2021

Keywords:

Tubular X-joint, Axial compression, FRP wraps, Finite element method, Ultimate strength.

1. Introduction

Tubular structures are made of hollow steel members with circular cross-sections and connecting them is one of the major challenges in their design. So far, some techniques to improve the performance of tubular connections have been proposed. Most of these methods can only be used for structures during the fabrication, but there are only a few techniques that can be applied during both fabrication and operation. Due to the successful experience of using composite materials for the repair and retrofitting of structures, special attention has now been paid to examining the efficacy of these materials in offshore structures.

In this research, the effect of CFRP and GFRP wraps on the ultimate strength and deformation of tubular X-joints under compressive load is investigated. For this purpose, the results of the finite element (FE) models were validated with several available experimental tests. After that, the nonlinear static behavior of tubular X-joints strengthened with FRP was studied. In these FE models, the contact between the FRP layers and the steel members (chord, weld, and braces) was considered. Also, the weld profile in the brace/chord intersection was modeled.

2. Details of FE models

In the present paper, the von Mises yield standard and isotropic plasticity model were applied in the FE modeling. Moreover, both geometric and material nonlinearities were utilized. The weld along was generated according to the A.W.S instructions (2002). The SHELL 281 and SOLID186 elements were used to mesh the steel members and FRP sheets. The mesh created by this technique is depicted in Fig. 1. Also, the perfect bonding was modeled between the FRP sheets. Also, the contact was modeled between the steel members and FRP sheets. For this aim, the bottom planes of the FRP sheets were selected as the target areas and the external planes of the chord, weld and brace members were selected as the contact areas (Nassiraei and Rezadoost, 2021).

In the present work, the displacement was applied to the brace end. Moreover, a nonlinear static analysis was carried out to analyze the performance of the connections. Also, the arc-length technique was applied to overcome the numerical instability (Nassiraei and Rezadoost, 2021).

3. Validation of FE results

The accuracy of the FE results should be verified. As far as the authors are aware, no experimental database for X-connections retrofitted with the FRP is existent. Therefore, the following experimental data are used to validate the accuracy of the FE model. Three experimental X-joints under compressive load conducted by the

* Corresponding Author

E-mail addresses: pooya.rezadoost@gmail.com (Pooya Rezadoost), h.nassiraei@guilan.ac.ir (Hossein Nassiraei), maln@guilan.ac.ir (Seyed Ahmad Neshaei).

second author' previous study (Nassiraei et al, 2017) and three T/Y-connections with GFRP in brace compressive load (Lesani et al. 2015). Table 1 shows that the FE results are accurate and safe.

4. Results and discussion

4.1. The effects of the orientation of the FRP sheets

43 FE models are generated and analyzed to investigate the effect of the orientation of the FRP sheets on the ultimate strength and deformation of FRP-strengthened X-joints. Changing the orientation of the fibers on the members can modify the behavior of the reinforced joint. For instance, the ultimate strength of a connection with specifications $\beta=0.2$ and $\gamma=18$ in the unreinforced state is 173.617 kN. Wrapping this connection with 8 FRP sheets increases the ultimate strength by 50% in sketch 1 and by 60% in sketch 2 (Fig. 2). Changing the angle of the fibers on the joint, like the ultimate strength, also affects the modulation of the joint deformations, but this effect is more noticeable in the case of using carbon fibers (CFRP) than in glass (GFRP).

The results of this section showed that the best orientation of the FRP sheet on the chord member is 90 degrees. The angles of the fibers on the brace member do not have a significant effect therefore, the placement of the FRP on the brace member is determined by the ease of execution.

4.2. The effects of the FRP sheet length

Analysis of 25 joints showed that the length of the FRP on the chord member affects the increase of the ultimate strength. Therefore, to achieve a stronger connection, a longer length of the chord member must be wrapped with FRP. The effect of increasing the length of the reinforcement layers on the rate of improvement of the ultimate strength is more noticeable when using 12 FRP layers than 8 and 4 layers.

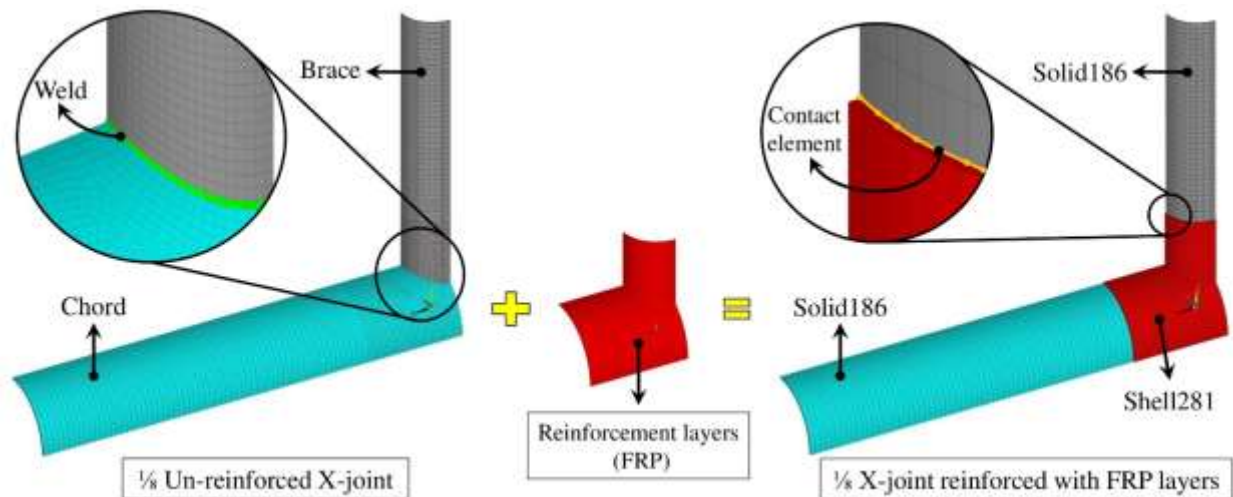


Fig. 1. The mesh generated in an X-joint reinforced with four FRP layers

Table 1. Comparison between numerical and experimental results

Specimen	Joint type	Remarks	$F_{u, Numerical}$ (kN)	$F_{u, Experimental}$ (kN)	R
S1	X	Un-reinforced	171.4	175.1	0.98
S2	X	Un-reinforced	258.6	234.2	1.10
S3	X	Un-reinforced	313.2	320.1	0.98
S4	T	Reinforced with GFRP	197.3	217.8	0.90
S5	Y	Reinforced with GFRP	347.7	327.1	1.06
S6	Y	Reinforced with GFRP	308.6	320.6	0.96

Note: $R = F_{u, Numerical} / F_{u, Experimental}$

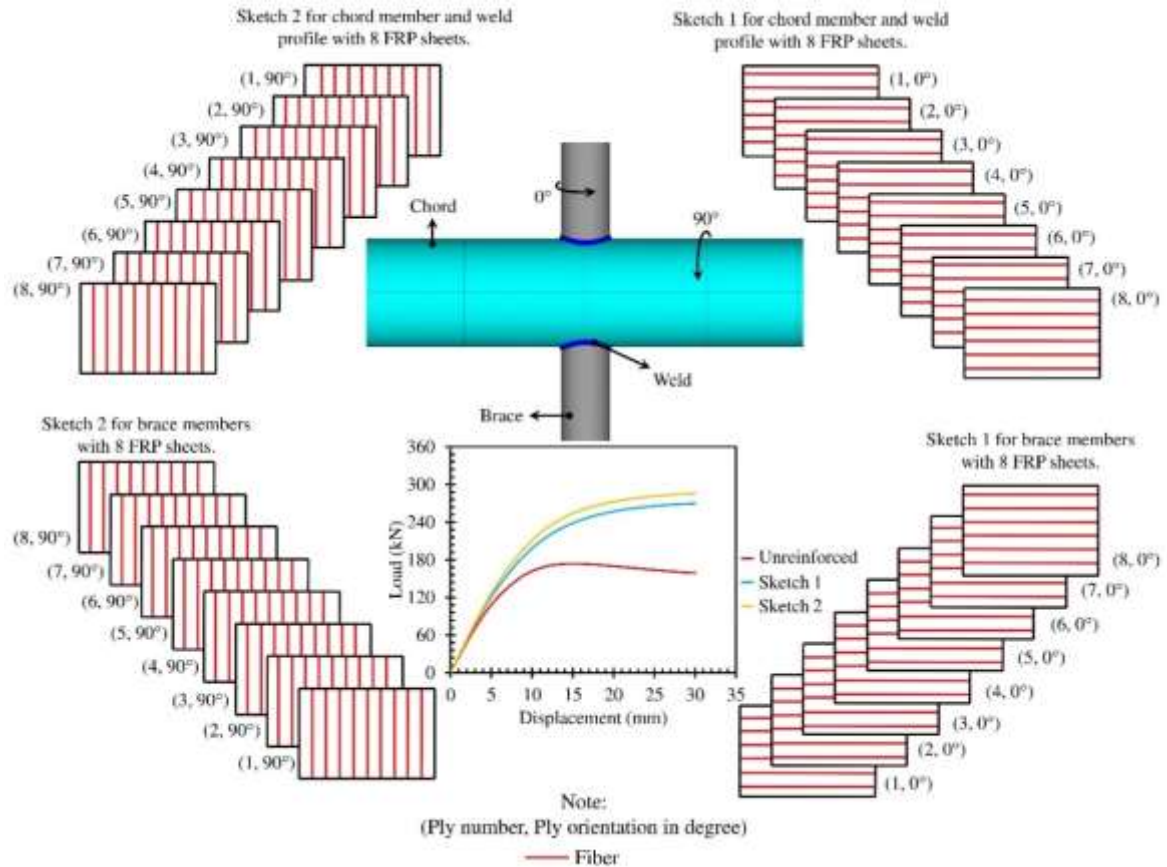


Fig. 2. The effect of the layer orientation on the strength ($\tau=1.0$)

4.3. The effects of the FRP sheet number

As the number of FRP layers on the members increases, so does the ultimate strength. In addition, the displacements of the surface of the chord member along the longitudinal axis of the brace member and its ovalization also improve with increasing the number of layers. The effect of increasing the number of layers on the rate of increase of the ultimate strength in the case of using CFRP is more noticeable than GFRP.

5. Conclusions

Results showed that the orientation of the FRP sheets and their length on the chord member are efficient in enhancing the ultimate strength. Moreover, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) increased the ultimate strength of tubular X-joints more than Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). Also, the increase of the FRP layer number resulted in the decrease of the deflections and the increase of the ultimate strength. A comparison of the ultimate strength of the reinforced joint with the corresponding unreinforced joint show that FRP layers can increase the ultimate strength of the joint by up to 125% and adjust the displacements by up to 84%. Despite the significant effect of the FRP on the enhance of the static behavior of the X-joints, there was not any study on the X-connections with FRP. According to the obtained results, it can be concluded that the use of FRP layers is a good way to reinforce tubular X-joints in offshore tubular structures.

6. References

- American Welding Society, "Structural welding code: AWS D 1.1", Miami, US, 2002.
- Lesani M, Bahaari MR, Shokrieh MM, "FRP wrapping for the rehabilitation of Circular Hollow Section (CHS) tubular steel connections", *Thin-Walled Structures*, 2015, 90, 216-234.
- Nassiraei H, Rezadoost P, "Static capacity of tubular X-joints reinforced with fiber reinforced polymer subjected to compressive load", *Engineering Structures*, 2021, 236, 112041.
- Nassiraei H, Zhu L, Lotfollahi-Yaghin MA, Ahmadi H, "Static capacity of tubular X-joints reinforced with collar plate subjected to brace compression", *Thin-Walled Structures*, 2017, 119, 256-265.