

رفتار اتصال‌های لوله‌یی X شکل مقاوم‌شده با حلقه خارجی تحت بار محوری فشاری

حسین نصیرائی* (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت

پویا رضادوست (دانشجوی دکتری)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (دوره ۲ - شماره ۱/۲، ص. ۶۳-۷۳، پژوهشی)

در پژوهش حاضر، اثر سخت‌کننده حلقوی خارجی در مقاومت نهایی اتصال‌های لوله‌یی X شکل تحت بار فشاری مطالعه شده است. برای این هدف، ابتدا مدل عددی ساخته و دقت آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. سپس، ۱۱۷ مدل المان محدود جهت بررسی پارامتریک مشخصات هندسی اتصال و سخت‌کننده حلقوی ساخته شدند. در مدل‌های عددی مذکور، اثر غیرخطی هندسه و مصالح لحاظ شده است. همچنین، جوش متصل‌کننده اعضا فرعی به عضو اصلی مدل‌سازی شده است. نتایج نشان داده است که سخت‌کننده حلقوی خارجی می‌تواند مقاومت نهایی اتصال را تا ۳۶۷٪ افزایش دهد. علی‌رغم اثر محسوس سخت‌کننده در مقاومت نهایی اتصال، تاکنون هیچ رابطه‌یی جهت محاسبه مقاومت نهایی اتصال‌های X شکل با سخت‌کننده حلقوی خارجی استخراج نشده است؛ بنابراین، پس از انجام مطالعات پارامتریک در پژوهش حاضر، فرمول تحلیلی برای محاسبه مقاومت نهایی اتصال‌های سخت شده تحت بار فشاری ارائه شده است.

واژگان کلیدی: اتصال لوله‌یی X شکل، سخت‌کننده حلقوی خارجی، مقاومت نهایی، فرمول تحلیلی.

۱. مقدمه

بررسی رفتار سکوهای شاپلونی^۱ فراساحلی نشان می‌دهد که معمولاً خرابی سازه‌های مذکور در محل تقاطع اعضا لوله‌یی رخ می‌دهد. به همین دلیل استحکام کافی اتصال‌ها بین المان‌های لوله‌یی از مهم‌ترین عوامل در پایداری یک سکوی شاپلونی است.^۱ یکی از انواع متداول اتصال‌های لوله‌یی، اتصال‌های نوع X است، که در آنها انتهای دو عضو فرعی به سطح خارجی عضو اصلی جوش می‌شوند (شکل ۱). هنگامی که اتصال X شکل تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرد، ممکن است به دلیل بیضوی‌شدگی^۲ عضو اصلی، کارایی خود را از دست بدهد. به همین دلیل نیاز به مقاوم‌سازی اتصال‌های مذکور برای دست‌یابی به ظرفیت باربری بالاتر وجود دارد.^۲

ژو^۳ و همکاران (۲۰۱۷)،^۳ اتصال‌های لوله‌یی X شکل تقویت شده با سخت‌کننده حلقوی خارجی را به صورت آزمایشگاهی تحت بار فشاری قرار دادند و دریافته‌اند که استفاده از سخت‌کننده حلقوی خارجی توانسته است مقاومت نهایی را تا ۸۶٪ نسبت به اتصال تقویت نشده متناظر افزایش دهد. نتایج پژوهش ژائو^۴ و همکاران (۲۰۲۰)،^۴ نشان داده است که ظرفیت نهایی اتصال‌های X شکل تقویت شده با سخت‌کننده حلقوی خارجی تحت بارکششی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۷/۱۷، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۱۰، پذیرش ۱۴۰۰/۱۱/۱۳

DOI:10.24200/J30.2022.59133.3029

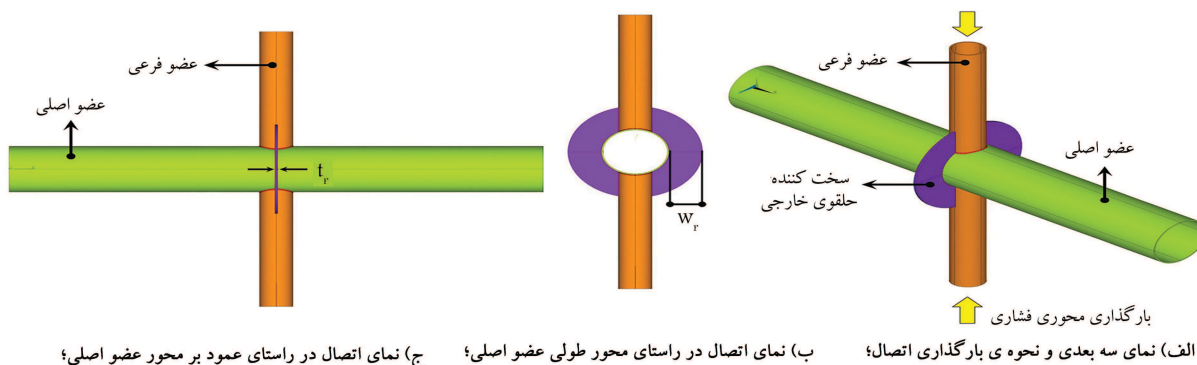
h.nassiraei@guilan.ac.ir
pooya.rezadost@gmail.com

تا ۵۰٪ نسبت به اتصال‌های تقویت نشده متناظر افزایش داشته است. ژو و همکاران (۲۰۱۶)،^۴ به صورت آزمایشگاهی به بررسی اتصال‌های T شکل تقویت شده با سخت‌کننده حلقوی خارجی تحت نیروی محوری فشاری پرداخته و خاطرنشان کرده‌اند که سخت‌کننده حلقوی خارجی توانسته است به طور محسوس، سختی استاتیکی اولیه و مقاومت نهایی اتصال‌های T شکل را افزایش دهد.

بررسی عددی اتصال‌های X شکل تقویت شده با سخت‌کننده حلقوی داخلی نشان داده است که سخت‌کننده‌های ذکر شده منجر به افزایش محسوس مقاومت نهایی اتصال‌ها شده‌اند.^۵ همچنین افزایش ۲۷ درصدی ظرفیت نهایی اتصال نوع X در حالت مقاوم‌سازی شده با ورق‌های تقویتی مثلثی شکل توسط لی^۵ و همکاران (۲۰۱۸)،^۶ گزارش شده است.

نصیرائی و همکاران (۲۰۱۷)،^۷ نیز به صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی اتصال‌های لوله‌یی X شکل تقویت شده با صفحات فولادی کالر^۶ تحت نیروی محوری فشاری پرداخته و دریافته‌اند که استفاده از صفحات کالر می‌تواند نقش خوبی در بهبود عملکرد و افزایش ظرفیت باربری اتصال‌ها داشته باشند.

چن^۷ و همکاران (۲۰۱۶)،^۸ با تزریق گروت بین پوسته داخلی و خارجی در یک اتصال X شکل دو پوسته‌یی تحت فشار گزارش داده‌اند، که ظرفیت، سختی اولیه و شکل‌پذیری اتصال با تزریق گروت افزایش داشته است. میزان تأثیرگذاری



الف) نمای سه بعدی و نحوه ی بارگذاری اتصال؛ ب) نمای اتصال در راستای محور طولی عضو اصلی؛ ج) نمای اتصال در راستای عمود بر محور عضو اصلی؛



د) پروفیل جوش.

$\alpha = 2L/D$; $\beta = d/D$; $\gamma = D/2T$ $\tau = t/T$; $\tau_p = t_p/T$; $\beta_p = 2W_p/D$	W_p : عرض سخت کننده حلقوی خارجی t_p : ضخامت سخت کننده حلقوی خارجی	T, D : قطر، ضخامت و طول عضو اصلی t, d : قطر، ضخامت و طول عضو فرعی
---	--	--

شکل ۱. جزئیات هندسی اتصال لوله‌یی X شکل تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی.

نهایی اتصال‌های X شکل بررسی شده است. در مدل‌های عددی مذکور، اثر غیرخطی هندسه و اثر غیرخطی مصالح تشکیل‌دهنده اعضا در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، جوش متصل‌کننده اعضا فرعی به عضو اصلی در مدل‌های المان محدود ایجاد شده است. همچنین، پس از انجام مطالعه پارامتریک، یک معادله تحلیلی به منظور محاسبه مقاومت نهایی اتصال‌های لوله‌یی X شکل مقاوم‌سازی شده با سخت‌کننده حلقوی خارجی ارائه شده است.

۲. جزئیات مدل‌سازی عددی اتصال‌های لوله‌یی

جزئیات و روند مدل‌سازی عددی اتصال‌های لوله‌یی تقویت نشده و تقویت شده با سخت‌کننده حلقوی خارجی در نرم‌افزار ANSYS، در بخش حاضر ارائه شده است.

۱.۲. مش‌بندی اتصال‌های لوله‌یی X شکل

برای کاستن از حجم محاسبات و زمان مورد نیاز برای حل مسئله، به دلیل وجود تقارن در هندسه و بارگذاری اتصال، مدل‌سازی $\frac{1}{8}$ آن کافی است. همچنین، از المان سه‌بعدی Solid ۱۸۶ در تولید مش برای عضوهای اصلی، فرعی، جوش و سخت‌کننده حلقوی خارجی استفاده شده است. المان مذکور شامل ۲۰ گره است، که هر گره آن، ۳ درجه آزادی دارد. شایان ذکر است که برای مدل‌سازی جوش از پیشنهاد‌های آیین‌نامه‌ی جوش آمریکا (AWS) ^[۱۴] استفاده شده است؛ که مطابق ضوابط آن، اندازه‌ی زاویه‌ی پخ، شکافت ریشه، زاویه‌ی شیار و ابعاد جوش شیار با نفوذ کامل در اتصال‌های لوله‌یی تابعی از زاویه‌ی دی‌هدرال ^[۱۱] است. در پژوهش حاضر با محاسبه زاویه‌ی دی‌هدرال و فرض نیم‌رخ تخت برای جوش، ابعاد جوش از آیین‌نامه‌ی AWS استخراج و در مدل‌های عددی لحاظ شده‌اند.

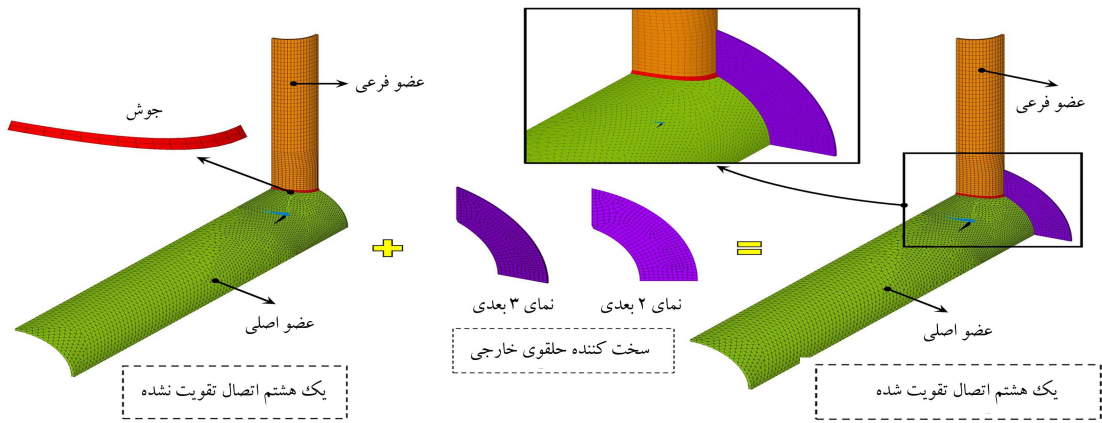
به منظور تولید مش با کیفیت مطلوب و همچنین تعادل بین حجم محاسبات و زمان لازم بین حل مسئله، بنا به نیازهای محاسباتی، اتصال به چندین حوزه تقسیم‌بندی و هر حوزه به صورت جداگانه مش‌بندی شده است. به عنوان نمونه، مش

روش تقویتی مذکور با افزایش β (نسبت قطر عضو فرعی به قطر عضو اصلی) بیشتر شده است. نصیرائی و رضادوست (۲۰۲۱)^[۹] تأثیر الیاف‌های پلیمری را در تغییر رفتار اتصال‌های لوله‌یی X شکل تحت بار فشاری بررسی کرده و دریافته‌اند که استفاده از الیاف‌های پلیمری در افزایش مقاومت نهایی تا ۱۳۲٪ مؤثر است.

مسئله‌ی نالایاراسو^[۸] (۲۰۲۱)^[۱۰] به صورت آزمایشگاهی و عددی، مقاومت نهایی اتصال‌های لوله‌یی T شکل تقویت شده با حلقه‌های داخلی تحت بار محوری فشاری را مطالعه کرده‌اند. همچنین ضریب تقویتی مقاومت نهایی ناشی از وجود حلقه توسط آنها معرفی شده است. کو^۹ و همکاران (۲۰۲۱)^[۱۱] اثر حلقه‌ی خارجی در مقاومت نهایی اتصال‌های لوله - صفحه را ارزیابی کردند و دریافتند که وجود حلقه در انتهای صفحات، نقش مؤثری در افزایش عملکرد استاتیکی اتصال‌ها می‌تواند داشته باشد. مظاهری و همکاران (۲۰۲۱)^[۱۲] روش‌های تقویتی موجود برای مقاوم‌سازی اتصال‌های سکوه‌ای فراساحلی در حال بهره‌برداری را ارزیابی کرده‌اند. احمدپور و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۳] به صورت آزمایشگاهی و عددی، اثر پارامترهای هندسی و شرایط مرزی را در عملکرد اتصال‌های لوله‌یی T شکل تحت بارگذاری خارج صفحه در دماهای بالا را مطالعه کرده‌اند.

مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که تاکنون، مطالعه‌ی پارامتریک بر روی اثر مشخصات هندسی اتصال X شکل و ابعاد سخت‌کننده حلقوی خارجی در عملکرد اتصال X شکل انجام نشده است. همچنین، هیچ فرمولی جهت تعیین مقاومت نهایی اتصال‌های سخت شده مذکور در دسترس نیست. در نتیجه، هدف از نوشتار حاضر، بررسی آثار مشخصات هندسی اتصال و سخت‌کننده حلقوی خارجی در عملکرد استاتیکی غیرخطی اتصال‌های لوله‌یی X شکل تقویت شده تحت بار محوری فشاری شکل ۱ است. همچنین، رابطه‌ی تحلیلی با دقت بالا جهت محاسبه مقاومت نهایی اتصال‌های مقاوم‌سازی شده با سخت‌کننده حلقوی خارجی معرفی شده است.

در پژوهش حاضر، پس از ساخت و تکمیل مدل المان محدود، دقت آنها با نتایج آزمایشگاهی متعددی ارزیابی شده است. در مرحله بعد، با ساخت و تحلیل ۱۰۸ اتصال تقویت شده با سخت‌کننده حلقوی خارجی و ۹ اتصال تقویت نشده، تأثیر پارامترهای هندسی بی‌بعد اتصال و سخت‌کننده در مقاومت



شکل ۲. مش ایجاد شده برای یک نمونه‌ی اتصال لوله‌یی X شکل در حالت‌های تقویت نشده و تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی.

جدول ۱. مشخصات هندسی ۶ نمونه اتصال X شکل تقویت نشده و تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی جهت اعتبارسنجی مدل‌های عددی.

اتصال	$D(mm)$	α	β	γ	τ
S1	۳۰۰/۰۳	۱۲/۰۰	۰/۲۵	۱۶/۴۰	۰/۹۰
S2	۲۹۹/۶۷	۱۲/۳۰	۰/۵۳	۱۷/۱۰	۰/۹۳
S3	۳۰۰/۰۰	۱۲/۰۰	۰/۷۳	۱۷/۹۰	۰/۹۹
S4	۳۰۰/۳۰	۱۲/۰۶	۰/۲۵	۱۸/۳۳	۰/۷۵
S5	۲۹۹/۶۰	۱۲/۰۶	۰/۵۱	۱۸/۶۱	۱/۰۱
S6	۲۹۹/۸۰	۱۲/۰۵	۰/۷۳	۱۸/۶۲	۱/۰۰

ایجاد شده برای یک اتصال لوله‌یی X شکل تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۲.۲. شرایط مرزی اتصالات لوله‌یی X شکل

درجه‌های آزادی در انتهای عضو اصلی آزاد هستند.^{[۹] و [۲]} همچنین، درجه‌های آزادی خارج از صفحه برای انتهای عضو فرعی بسته شده‌اند. به دلیل مدل‌سازی $\frac{1}{8}$ اتصال، شرایط مرزی تقارن روی سطوح تقارن اعمال شده است، تا نتایج به دست آمده از مدل‌های هندسی کاهش یافته منطبق بر نتایج یک اتصال کامل باشد.

۳.۲. مشخصات مصالح و نحوه‌ی تحلیل غیرخطی اتصالات لوله‌یی X شکل

اتصال لوله‌یی و سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی از فولادی با مدول یانگ ۲۰۶ گیگاپاسکال، نسبت پواسون $\frac{0}{3}$ و تنش تسلیم ۲۷۰ مگاپاسکال ساخته شده‌اند، که از معیار تسلیم وون میزیز تبعیت می‌کنند. جهت تحلیل استاتیکی غیرخطی اتصالات لوله‌یی X شکل تحت بار فشاری با در نظر گرفتن اثر غیرخطی بودن مصالح و هندسه‌ی غیرخطی از روش نیوتن-رافسون استفاده شده است. همچنین، برای پیش‌بینی رفتار اتصال بعد از خرابی از روش طول کمان^[۱۳] استفاده شده است. لو^[۱۴] و همکاران (۱۹۹۴)،^[۱۵] پیشنهاد کرده‌اند که برای تعیین مقاومت نهایی اتصالات تحت بار محوری فشاری، نمودار نیرو-جابجایی ترسیم شود. جابجایی در پیشنهاد آنها برابر تفاوت جابجایی‌ها در محل برخورد عضو فرعی و اصلی (میانگین ۴ نقطه‌ی تاج^[۱۵] و آستانه^[۱۶]) با مرکز عضو اصلی در نظر گرفته شود. سپس حد تغییرشکل $\frac{0}{3}$ قطر عضو اصلی ترسیم شود. با مشاهده‌ی محل برخورد حد تغییرشکل با نمودار و همچنین نقطه‌ی پیک نمودار، هر کدام که زودتر رخ دهد، مقاومت آن نقطه به عنوان مقاومت نهایی در نظر گرفته شود. چو^[۱۷] و همکاران (۲۰۰۵)،^[۱۶] نظریه‌ی ارائه شده‌ی لو و همکاران (۱۹۹۴)،^[۱۵] را اصلاح و پیشنهاد کردند که محور جابجایی برابر با تفاوت جابجایی‌ها در محل برخورد عضوهای فرعی و اصلی (میانگین ۴ نقطه‌ی تاج و آستانه) با نقطه‌ی پایین عضو اصلی (در امتداد وسط عضو فرعی) و حد تغییرشکل در این حالت برابر با $\frac{0}{6}$ قطر عضو اصلی در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که با توجه به تقارن اتصال X شکل، مقاومت نهایی حاصل از دو روش ذکر شده، یکسان است.

۳.۳. صحت‌سنجی مدل‌های عددی

در بخش حاضر، دقت مدل‌سازی عددی اتصالات لوله‌یی X شکل تقویت نشده و تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی با توجه به نتایج آزمایشگاهی ارزیابی شده است. مشخصات هندسی ۶ اتصال لوله‌یی جهت اعتبارسنجی مدل‌های عددی در جدول ۱ ارائه شده است. اتصالات S1 تا S3، اتصالات تقویت نشده هستند، که توسط نصیرائی و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۸] به صورت آزمایشگاهی بررسی شده‌اند. همچنین، اتصالات S4 تا S6، اتصالات تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی هستند، که توسط ژو و همکاران (۲۰۱۷)،^[۲۱] تجزیه و تحلیل شده‌اند. پس از مدل‌سازی اتصالات اشاره شده با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ و با شبیه‌سازی تمام موارد انجام شده در آزمایشگاه، نتایج نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات تقویت نشده و تقویت شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود، که مطابق آن مدل‌های المان محدود به خوبی می‌توانند رفتار استاتیکی خطی و غیرخطی یک اتصال لوله‌یی X شکل تقویت نشده و تقویت شده تحت بار فشاری را پیش‌بینی کنند. نمودارهای حاصل از مدل‌سازی عددی تطابق خوبی با نمودارهای آزمایشگاهی نشان می‌دهند. مقایسه‌ی نمودارهای آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که نیروی متناظر با یک جابجایی مشخص در مدل‌های المان محدود و آزمایشگاهی، بسیار نزدیک به یکدیگر است.

مقادیر مقاومت نهایی نتایج آزمایشگاهی و عددی در جدول ۲ مقایسه شده‌اند. بررسی جدول مذکور نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت نهایی حاصل از دو روش در اتصالات تقویت نشده به طور متوسط 10% و در اتصالات تقویت شده به طور متوسط 6% با یکدیگر اختلاف دارند. از بخش حاضر می‌توان نتیجه‌گیری کرد

حلقوی خارجی تحت بار محوری فشاری، ۱۱۷ اتصال در نرم‌افزار ANSYS نسخه ۱۹/۰ مدل و تحلیل شدند. به منظور راحتی بیشتر در ایجاد ارتباط بین مقاومت نهایی با ابعاد سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی و اتصال، یک سری پارامترهای هندسی بی‌بعد، که در شکل ۱ تعریف شده‌اند، استفاده شده است. مشخصات هندسی اتصال‌های بررسی شده در مطالعه‌ی پارامتریک، در جدول ۳ ارائه شده است.

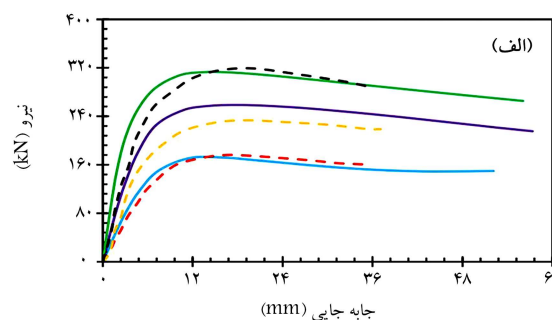
۱.۴. تأثیر پارامتر γ در مقاومت نهایی

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که استفاده از سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی می‌تواند به طور محسوسی مقاومت نهایی اتصال لوله‌یی X شکل را افزایش دهد. به طور مثال، مقاومت نهایی اتصالی با $\gamma = 24$ ، $\beta = 0/5$ و $\alpha = 0/9$ در حالت تقویت نشده برابر $248/196$ کیلونیوتن است. تقویت اتصال مذکور با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی با مشخصات $\beta_r = 1/0$ و $\alpha_r = 2/0$ منجر به افزایش $366/656$ درصدی مقاومت نهایی شده است. علت افزایش مقاومت نهایی، افزایش سختی شعاعی عضو اصلی در ناحیه‌ی اتصال به دلیل وجود سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی است؛ زیرا بیشتر شدن سختی در ناحیه‌ی اتصال، سبب کاهش تغییرشکل و در نتیجه افزایش مقاومت نهایی می‌شود.

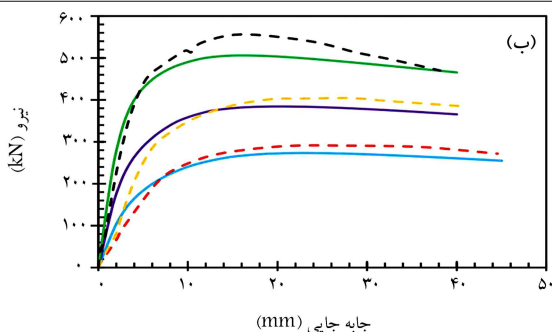
با کاهش مقدار γ (در صورت ثابت بودن قطر عضو اصلی)، مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده با افزایش محسوسی همراه می‌شود؛ زیرا هر چه مقدار γ کوچک‌تر شود، ضخامت عضو اصلی و همچنین ضخامت سخت‌کننده، بزرگ‌تر خواهد شد. افزایش دو پارامتر اخیر به طور محسوسی سبب افزایش سختی محل تقاطع عضوهای اصلی و فرعی می‌شود. در مقابل، کاهش مقدار γ منجر به کاهش محسوس نسبت مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت نشده‌ی متناظر می‌شود؛ زیرا اتصال‌هایی با $\gamma = 24$ به دلیل ضخامت عضو اصلی و سخت‌کننده‌ی کمتر، ضعیف‌تر از اتصال‌هایی با $\gamma = 16$ هستند؛ بنابراین استفاده از سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی بر روی اتصال‌هایی با مقدار بزرگ γ نسبت به اتصال‌هایی با مقدار کوچک γ مؤثرتر است. برای نمونه، نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده به تقویت نشده در صورت به کارگیری یک سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی با مشخصات $\beta_r = 0/6$ و $\alpha_r = 1/5$ به $2/29$ در اتصالی با $\gamma = 16$ برابر $2/05$ و در اتصالی با $\gamma = 24$ برابر $2/29$ است.

افزایش عرض و ضخامت سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی، بیضوی‌شدگی عضو اصلی را به تأخیر می‌اندازد. لذا نقش مهم سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی در افزایش مقاومت نهایی برای اتصال‌هایی با مقدار γ بزرگ‌تر، محسوس‌تر است؛ زیرا اتصال‌هایی با γ بزرگ‌تر، اتصال‌های ضعیف‌تری هستند (به علت کوچک‌تر بودن ضخامت عضو اصلی و سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی). مطابق شکل ۴، مقاومت نهایی در صورت به کارگیری سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی با $\beta_r = 0/5$ در اتصالی با $\gamma = 16$ با افزایش β_r از $0/2$ به $1/0$ ، $64/986\%$ افزایش داشته است. این در حالی است که همین میزان افزایش در پارامتر عرض سخت‌کننده در حالت $\gamma = 24$ مقاومت نهایی را $89/865\%$ افزایش داده است.

در شکل ۵، جابه‌جایی و کرنش خمیری برای اتصال‌هایی با مقادیر متفاوت γ مشاهده می‌شود. مقدار بار اعمال شده برای هر دو اتصال برابر 400 کیلونیوتن است. مطابق شکل ۵، تغییرشکل اتصال‌هایی با مقادیر کوچک γ ، یکنواخت‌تر از تغییرشکل در اتصال‌هایی با مقدار بزرگ γ است، زیرا در اتصال‌هایی با γ کوچک‌تر، سختی



شکل ۳. مقایسه‌ی نمودار نیرو - جابه‌جایی اتصال‌ها: (الف) S۱ تا S۳ و (ب) S۴ تا S۶ حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط نصیرانی و همکاران (۲۰۱۷) [۷].



شکل ۳. مقایسه‌ی نمودار نیرو - جابه‌جایی اتصال‌ها: (الف) S۱ تا S۳ و (ب) S۴ تا S۶ حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط نصیرانی و همکاران (۲۰۱۷) [۷].

شکل ۳. مقایسه‌ی نمودار نیرو - جابه‌جایی اتصال‌ها: (الف) S۱ تا S۳ و (ب) S۴ تا S۶ حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط نصیرانی و همکاران (۲۰۱۷) [۷].

جدول ۲. مقایسه‌ی مقاومت نهایی اتصال‌های S۱ تا S۶ حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی.

اتصال	مقاومت نهایی (kN)	
	مدل عددی	آزمایشگاهی
S۱	۱۷۸/۴	۱۷۵/۱
S۲	۲۶۵/۸	۲۳۳/۵
S۳	۲۶۹/۸	۳۱۹/۴
S۴	۲۶۹/۲۳	۲۸۳/۳۶
S۵	۳۸۴/۵۰	۴۰۱/۱۵
S۶	۵۰۵/۷۵	۵۵۷/۶۰

که مدل المان محدود توسعه داده شده در پژوهش حاضر با دقت مناسبی، توانایی پیش‌بینی رفتار استاتیکی غیرخطی اتصال‌های تقویت نشده و تقویت شده را تحت بار فشاری دارد.

۴. مطالعه‌ی پارامتریک

در بخش ۳، نحوه‌ی مدل‌سازی عددی اتصال‌های تقویت نشده و تقویت شده با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی و دقت آنها تأیید شده است؛ بنابراین می‌توان به بررسی موضوع پژوهش حاضر پرداخت. جهت بررسی نحوه و مقدار تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد استاتیکی غیرخطی اتصال‌های تقویت شده با سخت‌کننده‌ی

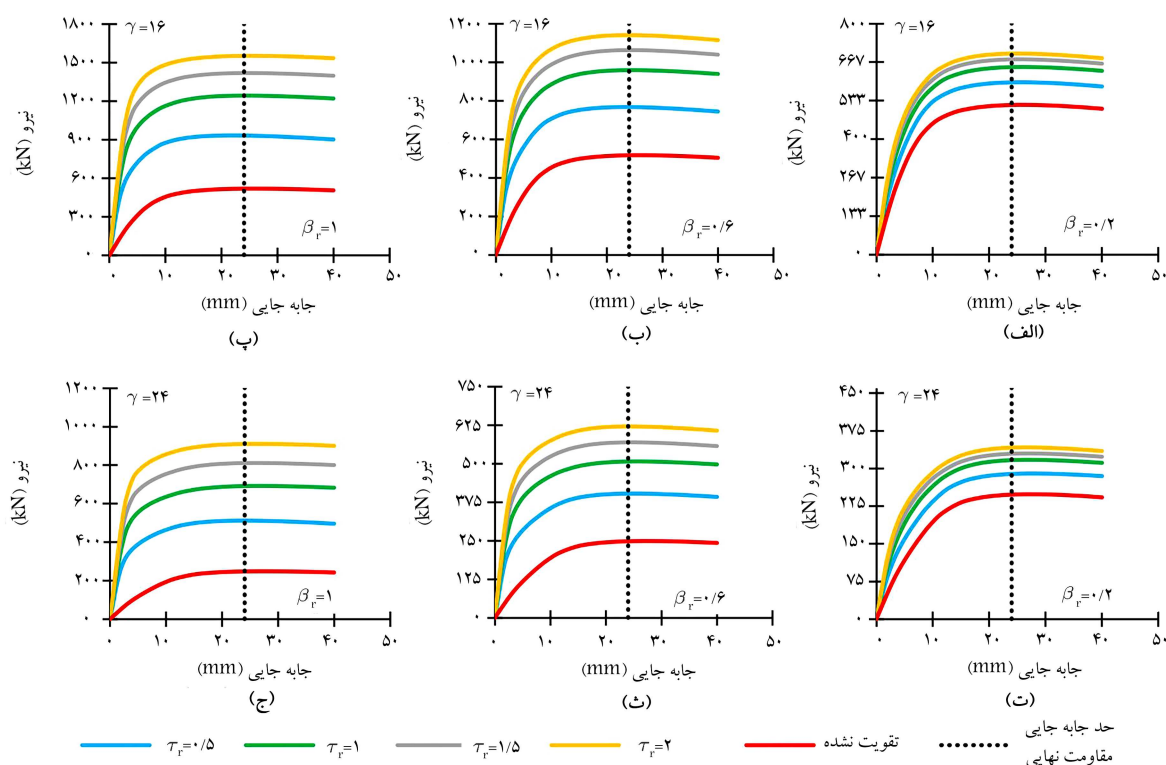
جدول ۳. مشخصات هندسی ۱۱۷ نمونه اتصال X شکل بررسی شده در مطالعه‌ی پارامتریک.

نام اتصال	$D(mm)$	α	β	γ	τ	β_p	τ_p
X1-X2-X3-X4						۰/۲۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X5-X6-X7-X8	۴۰۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۴۰	۲۴/۰۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X9-X10-X11-X12						۱/۰۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X13						-	-
X14-X15-X16-X17						۰/۲۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X18-X19-X20-X21	۴۰۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۶۰	۲۴/۰۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X22-X23-X24-X25						۱/۰۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X26						-	-
X25-X28-X29-X30						۰/۲۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X31-X32-X33-X34	۴۰۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۸۰	۲۴/۰۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X35-X36-X37-X38						۰/۱۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X39						-	-
X40-X41-X42-X43						۰/۲۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X44-X45-X46-X47	۴۰۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۵۰	۱۶/۰۰	۰/۹۰	۰/۶۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X48-X49-X50-X51						۱/۰۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X52						-	-
X53-X54-X55-X56						۰/۲۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X57-X58-X59-X60	۴۰۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۵۰	۲۰/۰۰	۰/۹۰	۰/۶۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X61-X62-X63-X64						۱/۰۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X65						-	-
X66-X67-X68-X69						۰/۲۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X70-X71-X72-X73	۴۰۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۵۰	۲۴/۰۰	۰/۹۰	۰/۶۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X74-X75-X76-X77						۱/۰۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X78						-	-
X79-X80-X81-X82						۰/۲۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X83-X84-X85-X86	۴۰۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۲۰	۱۲/۰۰	۰/۵۰	۰/۶۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X87-X88-X89-X90						۱/۰۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X91						-	-
X92-X93-X94-X95						۰/۲۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X96-X97-X98-X99	۴۰۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۲۰	۱۲/۰۰	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X100-X101-X102-X103						۱/۰۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X104						-	-
X105-X106-X107-X108						۰/۲۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X109-X110-X111-X112	۴۰۰/۰۰	۱۶/۰۰	۰/۲۰	۱۲/۰۰	۱/۰۰	۰/۶۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X113-X114-X115-X116						۱/۰۰	۰/۵۰-۱/۰۰-۱/۵۰-۲/۰۰
X117						-	-

عضو اصلی به دلیل داشتن ضخامت بزرگ‌تر، بیشتر از اتصال مشابه با γ بزرگ‌تر است. در اتصال با $\gamma = ۲۴$ ، تغییر شکل و کرنش خمیری محسوس در محل اتصال سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی به عضو فرعی روی می‌دهد. در اتصال با $\gamma = ۱۶$ نیز کرنش خمیری بیشینه در محل مشابه اما با مقداری بسیار کمتر رخ داده است؛ بنابراین با تغییر مقدار γ ، در صورت ثابت ماندن سایر مشخصات هندسی اتصال (β و τ)، موقعیت محل بحرانی اتصال از نظر کرنش خمیری بیشینه تغییر نخواهد کرد.

۲.۴. تأثیر پارامتر τ در مقاومت نهایی

پارامتر τ برابر با نسبت ضخامت عضو فرعی به ضخامت عضو اصلی است؛ بنابراین با افزایش پارامتر τ در اتصالاتی با مقادیر ثابت قطر و ضخامت عضو اصلی، ضخامت عضو فرعی افزایش می‌یابد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که مقادیر مقاومت نهایی اتصالات تقویت شده و تقویت نشده برای اتصالاتی گروه اول ($\tau = ۰/۵$) کوچک‌تر از مقادیر مقاومت نهایی متناظر اتصالاتی گروه دوم ($\tau = ۱/۰$) است.

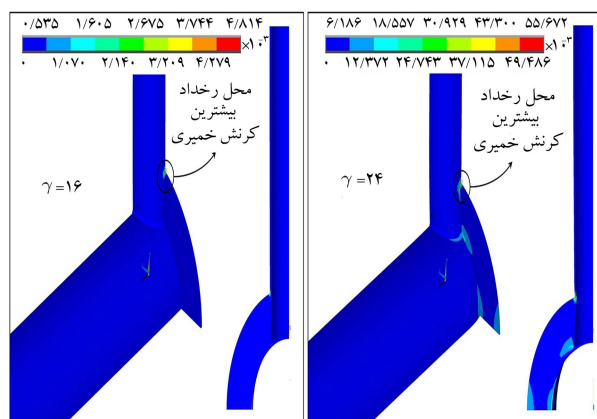


شکل ۴. تأثیر پارامتر γ در مقاومت نهایی ($\tau = 0/9$ و $\beta = 0/5$).

سخت‌کننده‌ی حلقوی افزایش می‌یابد. در چنین اتصال‌هایی، افزایش پارامتر ضخامت سخت‌کننده (τ_r) از $0/5$ به $1/0$ و افزایش پارامتر عرض سخت‌کننده (β_r) از $0/2$ به $0/6$ ، بیشترین تأثیرگذاری را در افزایش نسبت‌های مقاومت نهایی دارد؛ بنابراین استفاده از سخت‌کننده‌ی حلقوی با ابعاد متوسط ($\beta_r = 0/6$ و $\tau_r = 1/0$) در اتصال با τ بزرگ ($\tau = 1/0$) پیشنهاد می‌شود.

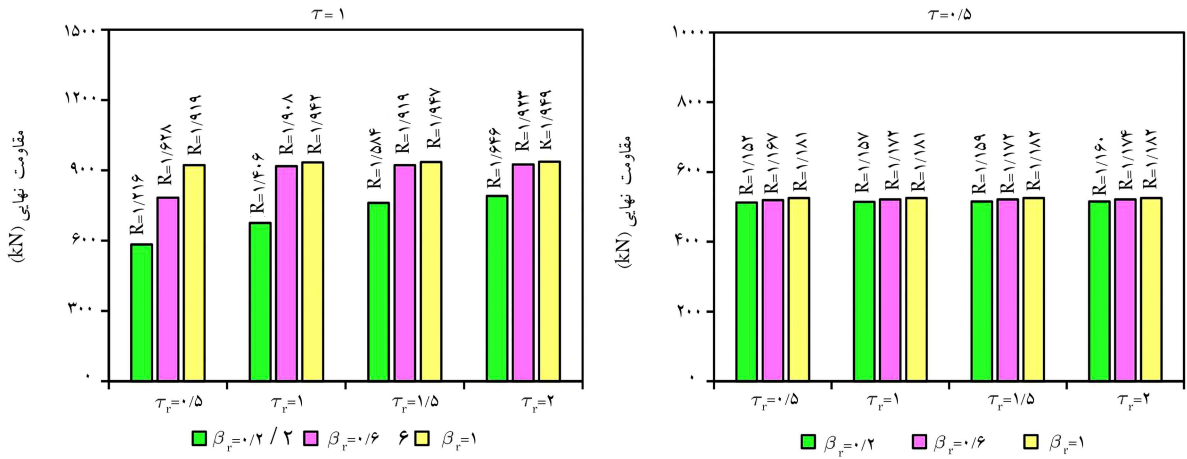
۳.۴. تأثیر پارامتر β در مقاومت نهایی

در بخش حاضر، تأثیر β در مقاومت نهایی تجزیه و تحلیل شده است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که مقاومت نهایی برای اتصال‌هایی با اندازه‌ی متوسط $\beta (0/4 = \beta)$ ، کوچک‌تر از مقاومت نهایی اتصال‌هایی با اندازه‌ی بزرگ $\beta (0/8 = \beta)$ است. این نتیجه حاصل از مدل‌های عددی به این صورت قابل توجیه است که بیضوی‌شدگی مقطع عضو اصلی، که قبل از بارگذاری دایروی است، در حالتی که اعضاء مهار می‌شوند به آن قطر کوچک‌تری داشته باشند، سریع‌تر رخ خواهد داد؛ زیرا ناحیه‌ی بزرگ‌تری از محل تقاطع، قابلیت بیضوی‌شدگی را دارند. نسبت مقاومت نهایی برای اتصال‌های تقویت شده در حالت $\beta = 0/8$ ، کوچک‌تر از نسبت مقاومت نهایی برای اتصال‌های تقویت شده در حالت $\beta = 0/4$ است؛ زیرا هر چقدر β کوچک‌تر باشد، سختی شعاعی عضو اصلی کمتر است و چون ناحیه‌ی بزرگ‌تری از محل اتصال، پتانسیل بیضوی‌شدگی را دارد، پس اتصال با $\beta = 0/4$ از اتصال با $\beta = 0/8$ ضعیف‌تر است و اثر سخت‌کننده در اتصال ضعیف‌تر، محسوس‌تر خواهد بود. برای نمونه، اتصال‌هایی با مقادیر β برابر $0/4$ و $0/8$ ، زمانی که اتصال‌ها با سخت‌کننده‌ی به مشخصات $\beta_r = 0/6$ و $\tau_r = 0/5$ تقویت شده‌اند، مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده به ترتیب برابر $1/765$ و $1/557$ برابر مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت نشده‌ی متناظر است.



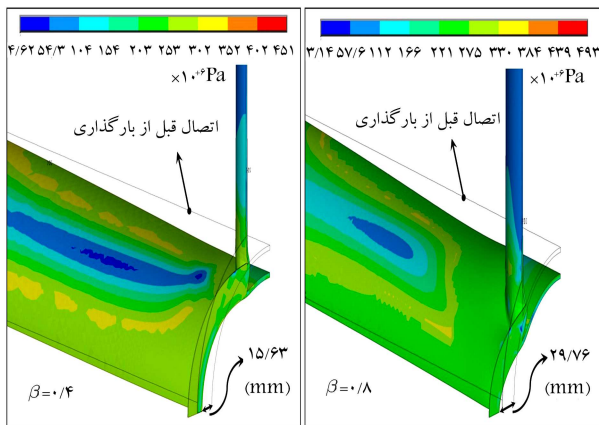
شکل ۵. تأثیر پارامتر γ در تغییر شکل اتصال‌ها ($\tau = 0/9$ و $\beta = 0/5$).

همچنین مطابق شکل ۶، نسبت‌های مقاومت نهایی برای اتصال‌های گروه اول کوچک‌تر از نسبت‌های مقاومت نهایی گروه دوم هستند. به عنوان مثال، برای اتصال‌هایی با مقادیر τ برابر با $0/5$ و $1/0$ ، زمانی که اتصال با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی با ابعاد $\beta_r = 0/2$ و $\tau_r = 2/0$ تقویت شده باشد، مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده به ترتیب $1/160$ و $1/646$ برابر مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت نشده‌ی متناظر می‌شود. افزایش عرض و ضخامت سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی در اتصال‌هایی با τ کوچک، تأثیر محسوسی در تغییر رفتار اتصال‌های تقویت شده ندارند، زیرا با افزایش ابعاد سخت‌کننده، نسبت‌های مقاومت نهایی به آهستگی افزایش می‌یابد؛ بنابراین استفاده از سخت‌کننده‌ی حلقوی با کمیته‌ی ابعاد $\beta_r = 0/2$ و $\tau_r = 0/5$ در اتصال‌های با τ کوچک ($\tau = 0/5$) پیشنهاد می‌شود. در مقابل، در اتصال‌هایی با τ بزرگ، مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده با افزایش ابعاد



(R: نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده متناظر)

شکل ۶. تأثیر پارامتر τ_r در مقاومت نهایی و نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده ($\beta = 0/2$ و $\gamma = 12$).



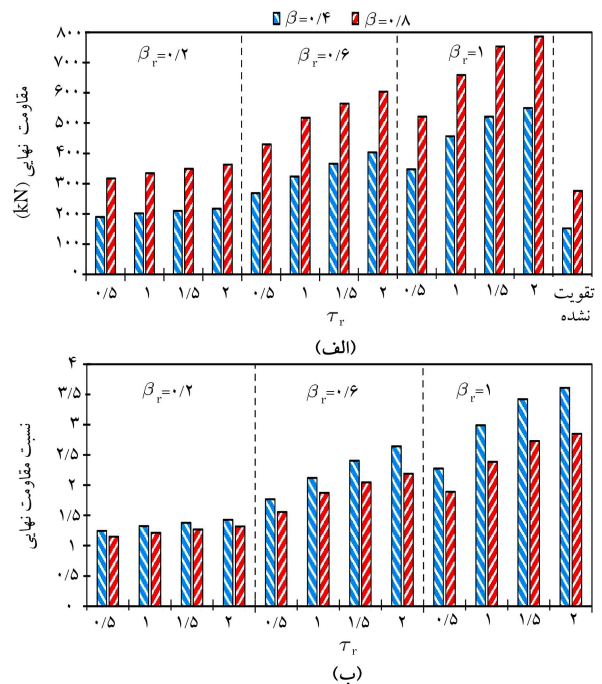
شکل ۸. تأثیر پارامتر β در تغییر شکل اتصال ها ($\tau = 0/6$ و $\gamma = 28$).

می‌دهد که در اتصالاتی با β بزرگ‌تر، سطح بیشتری از عضو اصلی درگیر بار اعمالی وارده از طرف عضو فرعی می‌شود.

۴.۴. تأثیر پارامترهای τ_r و β_r در مقاومت نهایی

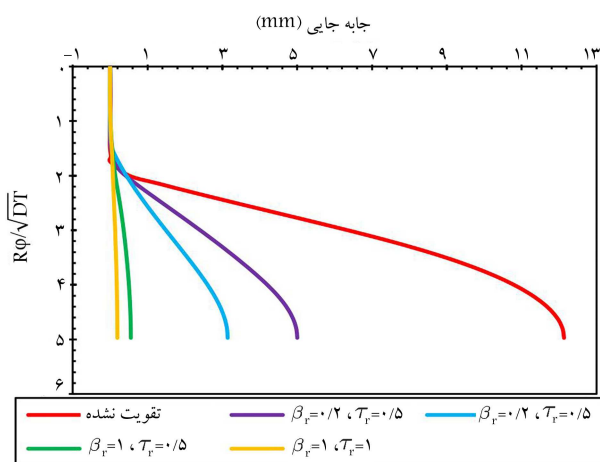
مجموعه‌یی از ۱۰۸ اتصال X شکل تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی ایجاد و تحت بار محوری فشاری قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که برای اتصالاتی تقویت شده با مشخصات هندسی $\gamma = 20$ ، $\beta = 0/5$ و $\tau = 0/9$ ، افزایش عرض و ضخامت سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی منجر به افزایش محسوس مقاومت نهایی و نسبت مقاومت نهایی می‌شود (شکل ۹)؛ زیرا افزایش هر یک از دو پارامتر مذکور سختی مقطع عضو اصلی در محل تقاطع اعضا به عنوان بحرانی‌ترین محل از نظر بیضوی‌شدگی را افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، تغییر ضخامت سخت‌کننده‌ی حلقوی در حالت $\beta_r = 0/6$ از یک واحد ضخامت عضو اصلی به دو واحد ضخامت عضو اصلی، منجر به افزایش نسبت مقاومت نهایی از $1/99$ به $2/40$ شده است. به طور مشابه، تغییر پارامتر عرض سخت‌کننده‌ی حلقوی (β_r) در حالت $\tau_r = 0/2$ از $0/2$ به $1/0$ ، منجر به افزایش نسبت مقاومت نهایی از $1/19$ به $1/97$ شده است.

تأثیر تقویتی ضخامت سخت‌کننده‌ی حلقوی در مقاومت نهایی اتصال‌ها، زمانی



شکل ۷. تأثیر پارامتر β در الف) مقاومت نهایی و ب) نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده ($\gamma = 28$ و $\tau = 0/6$).

شکل تغییر یافته و توزیع تنش وون میز اتصال‌های تقویت شده در شکل ۸ مشاهده می‌شود. مقدار جابه‌جایی اعمال شده بر روی عضوهای فرعی در هر دو اتصال برابر است. مطابق شکل مذکور، تغییر شکل اتصال با $\beta = 0/4$ از اتصال مشابه با $\beta = 0/8$ در صورت اعمال جابه‌جایی یکسان بر روی عضوهای فرعی، موضعی‌تر است. به عبارت دیگر، در اثر اعمال مقدار جابه‌جایی یکسان بر عضوهای فرعی، در اتصال با مقدار β بزرگ‌تر، تغییر شکل محسوس‌تری در قسمت مرکزی عضو اصلی روی می‌دهد. تغییر شکل بیشتر، باعث جذب بیشتر انرژی و در نتیجه منجر به افزایش مقاومت اتصال شده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که در اتصالاتی با مقدار $\beta = 0/8$ ، مقادیر تنش وون میز در عضو اصلی نسبت به مقادیر متناظر در اتصالاتی با مقدار $\beta = 0/4$ بالاتر است. پدیده‌ی مذکور نشان



شکل ۱۰. تأثیر پارامتر β_r و τ_r در بیضوی‌شدگی عضو اصلی ($\tau = 0/9$ ، $\beta = 0/5$ و $\gamma = 20$).

آن تقویت اتصال با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی، بیضوی‌شدگی عضو اصلی را به تأخیر می‌اندازد. به همین دلیل اتصال‌های تقویت شده ظرفیت باربری بالاتری نسبت به اتصال تقویت نشده دارند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت و عرض سخت‌کننده‌ی حلقوی، مهم‌ترین دلیل خرابی اتصال، یعنی بیضوی‌شدگی عضو اصلی، کمتر می‌شود؛ بنابراین با افزایش ابعاد سخت‌کننده‌ی حلقوی، توانایی اتصال در استهلاک انرژی بیشتر می‌شود.

۵. ارائه‌ی معادله‌ی پارامتری

تاکنون هیچ رابطه‌ی برای محاسبه‌ی مقاومت نهایی اتصال‌های لوله‌یی نوع X در حالت تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی در دسترس نیست؛ بنابراین در مطالعه‌ی حاضر، رابطه‌ی تحلیلی برای این موضوع ارائه شده است، که هدف از آن، محاسبه‌ی نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده‌ی متناظر (R_e) تحت بار فشاری بر اساس ۵ متغیر: β ، γ ، τ ، β_r و τ_r است. نسبت مقاومت نهایی (R_e) برابر نسبت حجم تسلیم شده در اتصال تقویت شده به حجم تسلیم شده در اتصال تقویت نشده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در اتصال تقویت نشده در باری معادل با ظرفیت نهایی، حجم متقاطع بین عضو اصلی و فرعی (V_1) تسلیم می‌شود.

در اتصال تقویت شده نیز علاوه بر حجم متقاطع بین عضوهای اصلی و فرعی (V_1)، حجم سخت‌کننده‌ی حلقوی (V_2) نیز تسلیم خواهد شد. طرح محاسبه جهت دستیابی به نسبت مقاومت نهایی (R_e) در روابط ۱ الی ۱۰ ارائه شده است:

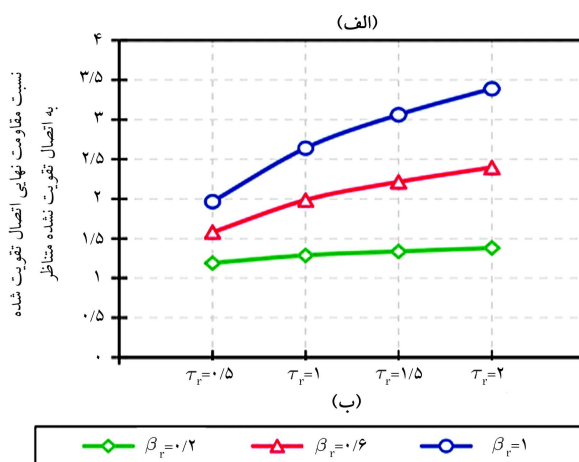
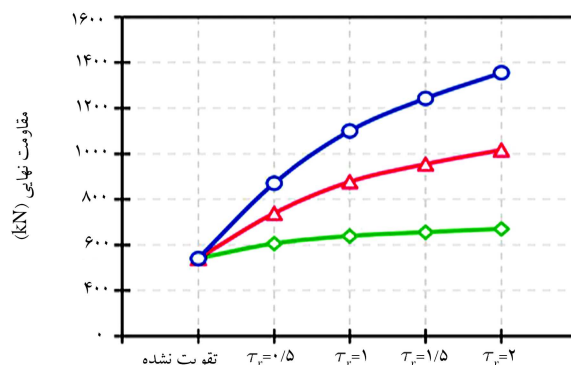
$$R_e = 1 + \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

$$P = \pi \left(\frac{d}{\gamma} + \frac{D}{2 \text{Arcsin} \beta} \right) \quad (2)$$

$$V_1 = PTt \quad (3)$$

$$\text{Arcsin} \beta = \beta + \frac{\beta^3}{3!} \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{\pi [(D + 2w_r)^2 - D^2]}{4} t_r = \pi t_r (w_r^2 + Dw_r) \quad (5)$$

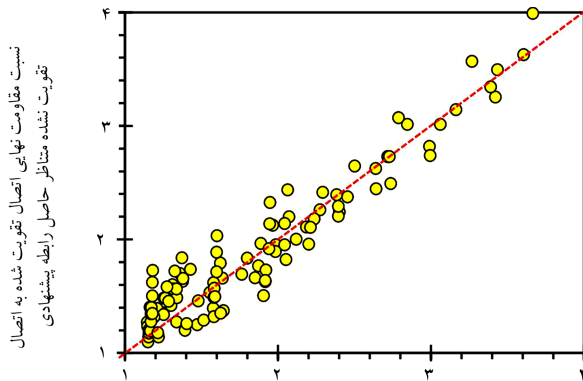


شکل ۹. تأثیر پارامتر β_r و τ_r در الف) مقاومت نهایی و ب) نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده ($\tau = 0/9$ ، $\beta = 0/5$ و $\gamma = 20$).

که از سخت‌کننده با عرض بیشتر استفاده شده باشد، محسوس‌تر است؛ زیرا شیب خط $\beta_r = 1/0$ نسبت به خط $\beta_r = 0/2$ در شکل ۹ - ب تندتر است؛ یعنی مقاومت نهایی اتصال تقویت شده با سخت‌کننده‌ی $\beta_r = 0/2$ در صورت افزایش $\tau_r = 0/5$ از $0/5$ به $2/0$ ، 19% افزایش خواهد یافت. اما همین میزان افزایش در پارامتر مربوط به ضخامت سخت‌کننده در حالت $\beta_r = 1/0$ منجر به افزایش 142% درصدی مقاومت نهایی شده است.

در صورت استفاده از سخت‌کننده‌ی حلقوی ضخیم‌تر، اثر تقویتی افزایش عرض سخت‌کننده در مقاومت نهایی محسوس‌تر می‌شود. برای نمونه، برای اتصال‌هایی با مقدار τ_r برابر با $0/5$ ، زمانی که اتصال‌ها با سخت‌کننده‌ی مشخصات $\beta_r = 0/2$ و $\beta_r = 1/0$ تقویت شده‌اند، مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده به ترتیب برابر $1/19$ و $1/97$ برابر مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت نشده‌ی متناظر است؛ اما برای اتصال‌هایی با مقدار τ_r برابر با $2/0$ ، زمانی که اتصال‌ها با سخت‌کننده‌ی به مشخصات $\beta_r = 1/0$ و $\beta_r = 0/2$ تقویت شده‌اند، مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده به ترتیب برابر $3/39$ و $1/38$ برابر مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت نشده‌ی متناظر است.

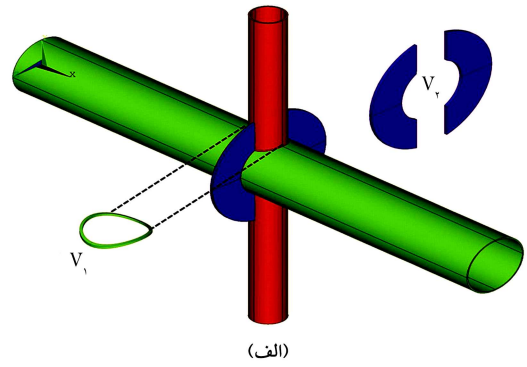
در شکل ۱۰، جابه‌جایی نقاط واقع بر روی خط حلقه (به منحنی مماس بر سطح بیرونی عضو اصلی که از محل تلاقی فصل مشترک اعضا با صفحه‌ی ماز بر محور عضو فرعی و عمود بر صفحه‌ی محورهای عضو اصلی و اعضاء فرعی عبور می‌کند، منحنی یا خط حلقه اطلاق می‌شود)، که متناظر با بیضوی‌شدگی عضو اصلی است، در حالت‌های تقویت شده و تقویت نشده مشاهده می‌شود، که مطابق



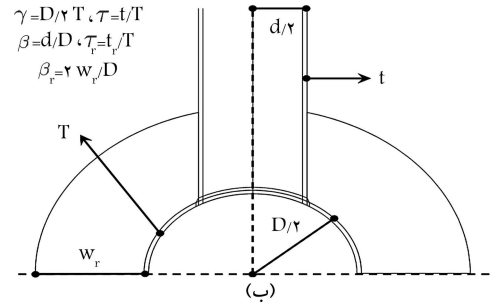
شکل ۱۱. مقایسه‌ی نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده به اتصال تقویت نشده متناظر حاصل از مدل سازی عددی

جدول ۴. ارزیابی رابطه‌ی ارائه شده برای محاسبه‌ی مقاومت نهایی بر اساس معیارهای دیپارتمان انرژی بریتانیا. [۱۷]

رابطه	$P/R < 0/8$	$P/R > 1/5$	تصمیم پذیرش
(۱۱)	$OK < 5\%$	$OK < 5\%$	



(الف)



(ب)

شکل ۱۱. الف) حجم تسلیم در اتصالات تقویت شده و تقویت نشده، ب) طرح محاسبه جهت استخراج رابطه‌ی نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده متناظر.

۱۲ است:

$$0/2 \leq \beta \leq 0/8$$

$$0/5 \leq \tau \leq 1/0$$

$$12 \leq \gamma \leq 28$$

$$0/2 \leq \beta_r \leq 1/0$$

$$0/5 \leq \tau_r \leq 2/0$$

(۱۲)

دیپارتمان انرژی بریتانیا، [۱۷] توصیه کرده است که اگر روابط $[P/R < 1/5] \leq$ و $[P/R < 0/8] \leq 5\%$ برقرار باشد، معادله پذیرفته می‌شود. اگر علاوه بر شرایط اخیر، شرط $[P/R > 1/5] \geq 5\%$ نیز برقرار شود، معادله پذیرفته می‌شود، ولی عموماً محافظه‌کارانه تلقی می‌شود (P/R) بیان‌گر مقاومت نهایی به دست آمده از معادله‌ی پارامتری به مقاومت نهایی حاصل از مدل‌سازی عددی است. ارزیابی رابطه‌ی ۱۱ با معیارهای دانشکده‌ی انرژی بریتانیا، [۱۷] در جدول ۴ ارائه شده است، که مطابق آن، معادله‌ی ارائه شده مورد پذیرش است و می‌توان از آن در طراحی استفاده کرد.

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، پس از صحت‌سنجی مدل‌های عددی با مطالعات آزمایشگاهی پیشین، ۱۱۷ نمونه‌ی اتصال لوله‌یی X شکل با هدف بررسی تأثیرگذاری سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی در عملکرد استاتیکی اتصال لوله‌یی X شکل ساخته شده است. در ادامه، مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش حاضر ارائه شده است:

(۱) سخت‌کننده‌های حلقوی خارجی توانسته‌اند تا مقاومت نهایی اتصال‌های X شکل را به ۳/۶۷ برابر مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت نشده متناظر ارتقاء دهند.

$$R_e = 1 + \frac{V_1}{V_f} = 1 + \frac{\pi DT t (\beta + \frac{\beta_r}{\tau})}{\pi t_r (w_r \tau + D w_r)} \quad (6)$$

$$\beta_r = \frac{\tau w_r}{D} \rightarrow R_e = 1 + \frac{Dt (\beta + \frac{\beta_r}{\tau})}{\tau_r D (\frac{\beta_r \tau}{\tau} + \frac{\beta_r}{\tau})} \quad (7)$$

$$\times \frac{T}{T} \rightarrow R_e = 1 + \frac{tT (\beta + \frac{\beta_r}{\tau})}{T \tau_r D (\frac{\beta_r \tau}{\tau} + \frac{\beta_r}{\tau})} \quad (8)$$

$$\tau \gamma = DT \rightarrow R_e = 1 + \frac{\tau (\beta + \frac{\beta_r}{\tau})}{\tau_r \gamma (\beta_r + \frac{\beta_r \tau}{\tau})} \quad (9)$$

$$R_e = 1 + \frac{\alpha_1 \tau^{\alpha_2} (\alpha_3 + \alpha_4 \beta^{\alpha_5})}{\alpha_6 \tau_r^{\alpha_7} \gamma^{\alpha_8} (\alpha_9 + \alpha_{10} \beta_r^{\alpha_{11}})} \quad (10)$$

با استفاده از نتایج ۱۰۸ اتصال لوله‌یی X شکل تقویت شده و ۹ اتصال تقویت نشده متناظر، ضرایب ثابت موجود در رابطه‌ی ۱۰ از طریق آنالیز رگرسیون غیرخطی به دست آمده است. در نتیجه، رابطه‌ی تعیین نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی به مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده متناظر (R_e)، به صورت رابطه‌ی ۱۱ خواهد بود. مقایسه‌ی نسبت مقاومت نهایی حاصل از مدل‌های المان محدود و رابطه‌ی پارامتری ۱۱ در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. پراکندگی نقاط نسبت به خط نیمساز کم است، که نشان از دقت قابل قبول رابطه‌ی پیشنهادی دارد.

$$R_e = 1 + \frac{0/000005 \tau^{0/87} (1 - 0/73 \beta^0)}{3/47 \tau_r^{-0/52} \gamma^{-1/24} (1 - \beta_r^{0/00008})} \quad (11)$$

محدوده‌ی مجاز هر یک از پارامترهای موجود در رابطه‌ی ۱۱ به صورت روابط

طور محسوس افزایش یافته است، ولی نسبت مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت نشده با کاهش محسوس همراه بوده است؛ بنابراین تأثیر سخت‌کننده در افزایش مقاومت نهایی در اتصال‌های با β کوچک‌تر، محسوس‌تر خواهد بود.

(۶) افزایش β_r و τ_r منجر به افزایش مقاومت نهایی و نسبت مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده، شده است. علاوه بر این، بیضوی‌شدگی عضو اصلی اتصال‌های تقویت شده با سخت‌کننده‌های ضخیم‌تر و عریض‌تر یکنواخت‌تر شده است.

(۷) یک رابطه‌ی تحلیلی برای محاسبه‌ی مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده با سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی ارائه شده است. رابطه‌ی پیشنهادی با توجه به معیارهای پذیرش دانشکده‌ی انرژی بریتانیا ارزیابی شده است. رابطه‌ی ذکر شده می‌تواند به طور قابل اعتمادی برای تحلیل و طراحی در سازه‌های لوله‌ی استفاده شود.

(۲) سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی منجر به بهبود بخشیدن مود خرابی اتصال‌ها شده است، زیرا بیضوی‌شدگی عضو اصلی به عنوان مهم‌ترین دلیل خرابی اتصال نوع X، در اتصال تقویت شده نسبت به اتصال تقویت نشده به طور محسوس کاهش یافته است.

(۳) با افزایش γ (در صورت ثابت بودن قطر عضو اصلی)، مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده با کاهش محسوس و نسبت‌های مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت نشده با افزایش محسوس همراه شده است؛ بنابراین اثر تقویتی سخت‌کننده‌ی حلقوی خارجی با افزایش پارامتر γ (در صورت ثابت بودن قطر عضو اصلی) افزایش می‌یابد.

(۴) افزایش ضخامت عضو فرعی (در صورت ثابت بودن قطر عضو اصلی) منجر به افزایش پارامتر τ شده است، که با افزایش آن (τ)، مقاومت نهایی و نسبت مقاومت اتصال‌های تقویت شده افزایش یافته است.

۵ با افزایش β (در صورت ثابت بودن قطر عضو اصلی)، مقاومت نهایی به

پانویس‌ها

1. jacket platforms
2. ovalization
3. Zhu
4. Zhao
5. Li
6. Collar
7. Chen
8. Masilamani and Nallayarasu
9. Qu
10. American Welding Society
11. Dihedral
12. Von Mises
13. arc-length
14. Lu
15. crown
16. saddle
17. Choo

منابع (References)

1. Chen, C., Shao, Y.B. and Yang, J. "Study on fire resistance of circular hollow section (CHS) T-joint stiffened with internal rings", *Thin-Walled Structures*, **92**, pp. 104-114 (2015).
2. Zhu, L., Yang, K., Bai, Y. and et al. "Capacity of steel CHS X-joints strengthened with external stiffening rings in compression", *Thin-Walled Structures*, **115**, pp. 110-118 (2017).
3. Zhao, L., Zhu, L., Sun, H. and et al. "Experimental and numerical investigation of axial tensile strength of CHS X-joints reinforced with external stiffening rings", *International Journal of Steel Structures*, **20**(3), pp. 1003-1013 (2020).
4. Zhu, L., Han, S., Song, Q. and et al. "Experimental study of the axial compressive strength of CHS T-joints reinforced with external stiffening rings", *Thin-Walled Structures*, **98**(Part B), pp. 245-251 (2016).
5. Zhang, F., Chen, Y.J., Chen, Y.Y. and et al. "Effects of ring-stiffeners on the behaviour steel tubular joints", *J. Space Struct.*, **10**, pp. 51-56 (2004).
6. Li, W., Zhang, S., Huo, W. and et al. "Axial compression capacity of steel CHS X-joints strengthened with external stiffeners", *Journal of Constructional Steel Research*, **141**, pp. 156-166 (2018).
7. Nassiraei, H., Zhu, L., Lotfollahi-Yaghin, M.A. and et al. "Static capacity of tubular X-joints reinforced with collar plate subjected to brace compression", *Thin-Walled Structures*, **119**, pp. 256-265 (2017).
8. Chen, Y., Feng, R. and Xiong, L. "Experimental and numerical investigations on double-skin CHS tubular X-joints under axial compression", *Thin-Walled Structures*, **106**, pp. 268-283 (2016).
9. Nassiraei, H. and Rezadoost, P. "Static capacity of tubular X-joints reinforced with fiber reinforced polymer subjected to compressive load", *Engineering Structures*, **236**, pp. 112041 (2021).
10. Masilamani, R. and Nallayarasu, S. "Experimental and numerical investigation of ultimate strength of ring-stiffened tubular T-joints under axial compression", *Applied Ocean Research*, **109**, 102576 (2021).
11. Qu, S., Sun, Q. and Yuan, J. "Stiffness and ultimate strength of tube-gusset plate joints with ring stiffener plate", *Structures*, **33**, pp. 3862-3876 (2021).
12. Mazaheri, P., Asgarian, B. and Gholami, H. "Assessment of strengthening, modification, and repair techniques for aging fixed offshore steel platforms", *Applied Ocean Research*, **110**, 102612 (2021).

13. Ahmadpour, F., Zeinoddini, M., Rashnooie, R. and et al. "Out-of-plane bending fire response of steel tubular T-joints: A sequentially coupled thermal-stress modelling", *Thin-Walled Structures*, **171**, 108665 (2022).
14. American Welding Society (AWS), Part D 1.1, "Structural welding code", (2002).
15. Lu, L.H., De Winkel, G.D., Yu, Y. and et al. "Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints", *Proceedings of the 6th International Symposium on Tubular Structure*, pp. 341-347 (1994).
16. Choo, Y.S., Van der Vegte, G.J., Zettlemyer, N. and et al. "Static strength of T-joints reinforced with doubler or collar plates. I: experimental investigations", *Journal of Structural Engineering*, **131**(1), pp. 119-128 (2005).
17. UK Department of Energy, "Background Notes to the Fatigue Guidance of Offshore Tubular Connections", London, UK (1983).