

# رفتار استاتیکی اتصالات X شکل سخت شده با حلقه بیرونی تحت بار محوری کششی

حسین نصیرائی<sup>۱\*</sup>، پویا رضادوست<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

• [h.nassiraei@guilan.ac.ir](mailto:h.nassiraei@guilan.ac.ir)

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۱۷

## چکیده

در این مقاله، اثر سخت‌کننده حلقوی بیرونی روی مقاومت نهایی، سختی اولیه و مودهای خرابی اتصالات لوله‌ای X شکل تحت بار محوری کششی بررسی شده است. در مرحله اول، مدل المان محدود ساخته و دقت آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. پس از اطمینان از دقت مدل‌سازی، مدل المان محدود برای بررسی اثر مشخصات هندسی سخت‌کننده و اتصال روی رفتار استاتیکی ساخته شد. در مدل‌های عددی، اثر غیرخطی مصالح و هندسه لحاظ شده است. همچنین، جوش متصل‌کننده اعضای فرعی به عضو اصلی مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد، سخت‌کننده حلقوی بیرونی می‌تواند مقاومت نهایی اتصال تحت بار کششی را تا ۱۸۹ درصد افزایش دهد. با وجود اثر محسوس سخت‌کننده روی مقاومت نهایی، سختی اولیه و همچنین مودهای خرابی، مطالعه بر روی این اتصالات تنها محدود به سه نمونه بوده است. همچنین، تاکنون هیچ رابطه‌ای برای محاسبه مقاومت نهایی اتصالات X شکل با سخت‌کننده حلقوی بیرونی تحت کشش معرفی نشده است. بنابراین، پس از انجام مطالعات پارامتریک حاضر، رابطه تحلیلی برای محاسبه مقاومت نهایی اتصالات سخت شده تحت بار کششی استخراج شده است. همچنین، دقت رابطه ارائه شده با استانداردهای دپارتمان انرژی بریتانیا مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**کلیدواژه‌گان:** اتصال X شکل، بارگذاری کششی، سخت‌کننده حلقوی بیرونی، مقاومت استاتیکی، رابطه تحلیلی

## ۱- مقدمه

سازه‌ها هستند که نقش مهمی در انتقال بارها دارند. یکی از انواع متداول اتصالات لوله‌ای، اتصال X شکل است (شکل ۱). هنگامی که اتصال X شکل تحت بار محوری کششی قرار می‌گیرد، ممکن

برای ساخت سازه‌های جک‌تی به منظور اکتشاف و استخراج منابع نفتی و گازی، بیشتر از اعضای لوله‌ای استفاده می‌شود. در این سازه‌ها، اتصالات لوله‌ای معمولاً با جوش دادن اعضای فرعی و اصلی به یکدیگر شکل می‌گیرند. اتصالات از بخش‌های بحرانی

است به دلیل بیضوی شدگی<sup>۱</sup> عضو اصلی کارایی خود را از دست دهد. به همین دلیل نیاز به مقاوم سازی اتصالات برای دستیابی به مقاومت بالاتر ضروری است.

ژائو<sup>۲</sup> و همکاران [1] با ساخت و آزمایش سه نمونه اتصال لوله ای X شکل سخت شده با حلقه بیرونی تحت بار کششی نشان داده اند که مقاومت نهایی اتصالات سخت شده تا ۵۰ درصد نسبت به اتصالات سخت نشده بیشتر است. همچنین ژو<sup>۳</sup> و همکاران [2,3] نشان داده اند که سخت کننده حلقوی بیرونی می تواند سختی اولیه و مقاومت نهایی اتصالات لوله ای X و T شکل را تحت بار محوری فشاری به طور محسوسی افزایش دهد. همچنین، افزایش ۲۷ درصدی ظرفیت نهایی اتصال نوع X در حالت مقاوم سازی شده با ورق های تقویتی مثلثی شکل توسط لی<sup>۴</sup> و همکاران [4] گزارش شده است. نصیرائی و همکاران [5] [6] به صورت آزمایشگاهی و عددی نشان داده اند که صفحات تقویتی کالر<sup>۵</sup> می تواند مودهای خرابی اتصالات X شکل تحت بار محوری را به شکل محسوسی بهبود ببخشد. همچنین رابطه ای برای پیش بینی مقاومت این اتصالات معرفی شده است. اثر گروت<sup>۶</sup> ریزی بین پوسته داخلی و خارجی در یک اتصال X شکل توسط چن<sup>۷</sup> و همکاران [7] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که ظرفیت، سختی اولیه و شکل پذیری اتصال تقویت شده با افزایش  $\beta$  (نسبت قطر عضو فرعی به قطر عضو اصلی) بیشتر می شود. نصیرائی و رضادوست [8] اثر پوشش های تقویتی پلیمری را روی اتصالات X شکل بررسی و رابطه ای برای تعیین مقاومت آن ارائه داده اند.

مرور پژوهش های پیشین نشان می دهد که تاکنون، مطالعه پارامتریکی روی اثر مشخصات هندسی اتصال X شکل و ابعاد

سخت کننده حلقوی بیرونی روی عملکرد این نوع اتصالات سخت شده تحت کشش انجام نشده است. تنها مطالعه صورت گرفته در این حوزه، محدود به بررسی سه نمونه اتصال توسط ژائو و همکاران [1] بوده است. همچنین، هیچ رابطه ای برای تعیین مقاومت نهایی این اتصالات تقویت شده در دسترس نیست. در این مقاله، پس از ساخت مدل عددی و درستی آزمایی آن با نتایج آزمایشگاهی، ۱۴۳ مدل المان محدود مطابق شکل (۱) ساخته شده است. هدف، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی اتصال  $(\gamma, \beta, \tau)$  و سخت کننده حلقوی بیرونی  $(\tau_r, \beta_r)$  روی مقاومت نهایی، سختی اولیه و مودهای خرابی است. در مدل های عددی حاضر، اثر غیرخطی مصالح و هندسه اعضا لحاظ شده است. همچنین، جوش متصل کننده اعضای فرعی به عضو اصلی در مدل های المان محدود ساخته شده است. در بخش آخر، پس از مطالعه پارامتریک، رابطه تحلیلی برای محاسبه ظرفیت نهایی این نوع اتصالات تحت کشش معرفی شده است.

## ۲- مدل سازی عددی

جزئیات و روند مدل سازی عددی اتصالات لوله ای ساخته شده در نرم افزار ANSYS نسخه ۲۱ در این بخش ارائه شده است. به دلیل وجود تقارن در هندسه و بارگذاری اتصال و به منظور کاهش حجم محاسبات و زمان مورد نیاز برای حل مسئله، تنها یک هشتم اتصالات تقویت نشده و تقویت شده مدل سازی شده است.

5. Collar  
6. Grout  
7. Chen

1. Ovalization  
2. Zhao  
3. Zhu  
4. Li

شکل ۱. جزئیات هندسی یک نمونه اتصال لوله‌ای X شکل تقویت‌شده با سخت‌کننده حلقوی بیرونی.

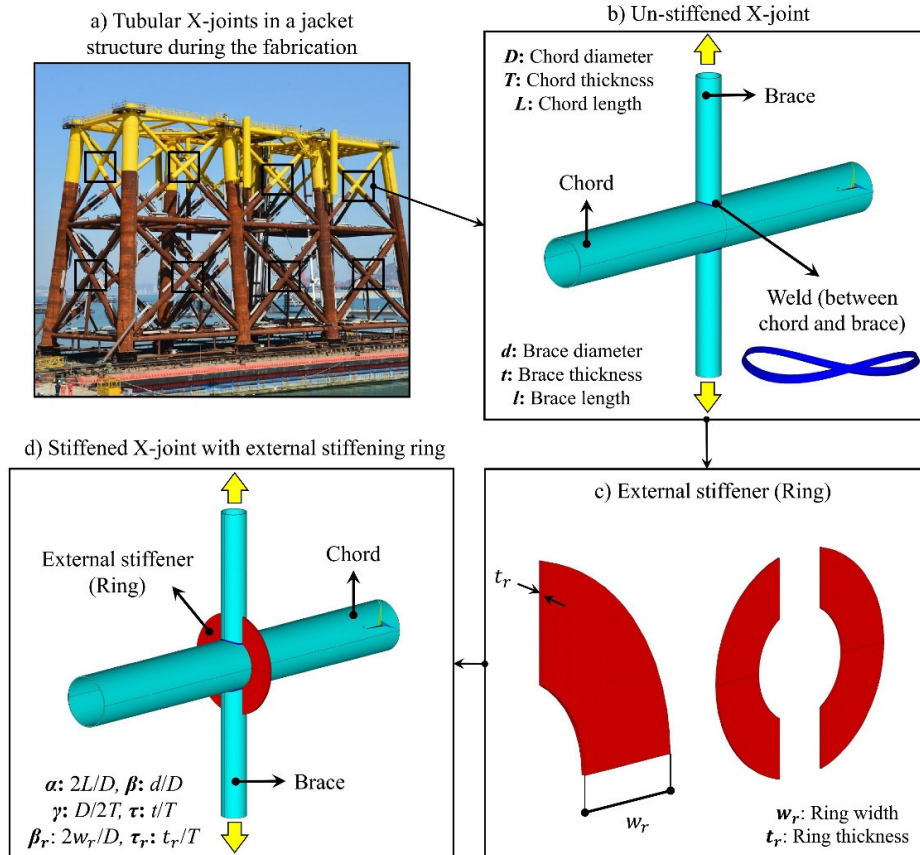


Fig. 1. Geometrical notation for a X-joint stiffened with outer ring.

برای مش‌بندی اعضا (اصلی، فرعی، جوش و حلقه سخت‌کننده) از المان سه‌بعدی SOLID186 استفاده شده است. به منظور تولید مش با کیفیت مطلوب و همچنین تعادل بین حجم محاسبات و زمان لازم برای حل مسئله، اتصال به چندین حوزه تقسیم‌بندی شده و هر حوزه به صورت جداگانه مش‌بندی شده است. مش تولیدشده برای یک اتصال لوله‌ای X شکل سخت شده با حلقه‌های بیرونی در شکل (۳) نشان داده شده است. برای مدل‌سازی شرایط مرزی، درجات آزادی در انتهای عضو اصلی آزاد در نظر گرفته شده است [5]. همچنین، به دلیل مدل‌سازی یک‌هشتم اتصال، شرایط مرزی تقارن روی سطوح تقارن اعمال شده است.

اتصالات اعضای لوله‌ای به یکدیگر در سکوها در دریایی به دلیل شرایط خوردگی شدید، به صورت گیردار و توسط جوش شیاری با نفوذ کامل اجرا می‌شوند. با در نظر گرفتن نیم‌رخ جوش به صورت تخت و با محاسبه زاویه دی‌هدرال محلی، هندسه جوش شامل کمترین و بیشترین زاویه پخ، کمترین و بیشترین شکافت ریشه، کمترین و بیشترین زاویه شیار و ابعاد جوش کامل با استفاده از ضوابط آیین‌نامه جوش آمریکا (AWS) [9] قابل تعیین است. به طور مثال بعد افقی جوش از پای عضو فرعی با توجه به زاویه دی‌هدرال مطابق ضوابط AWS که در شکل (۲) خلاصه شده، محاسبه و در مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته است.

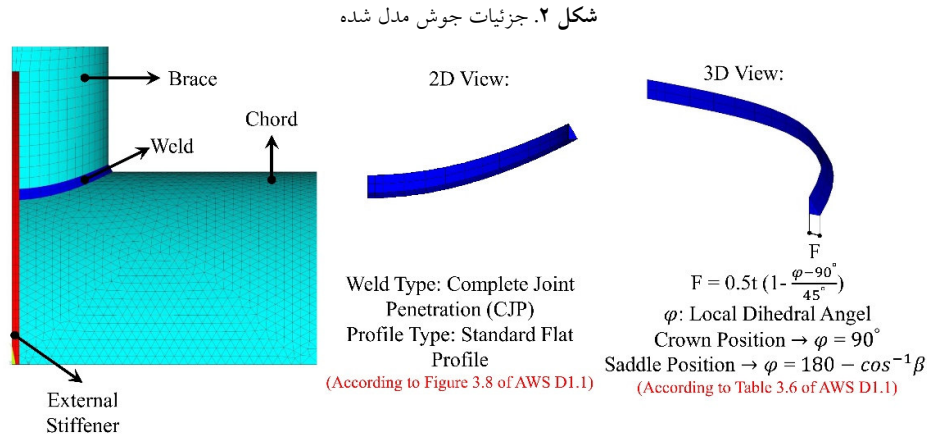


Fig. 2. Details of the modeled weld.

شکل ۳. مش ایجادشده برای یک نمونه اتصال لوله‌ای X شکل تقویت شده با سخت کننده حلقوی بیرونی.

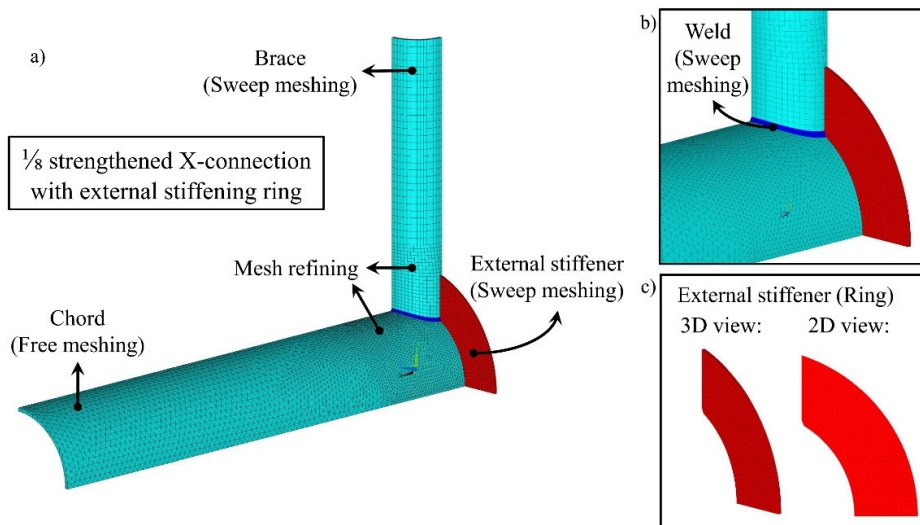


Fig. 3. The mesh generated using the sub-zone method for a tubular X-joint stiffened with outer ring.

برای تحلیل استاتیکی غیرخطی اتصالات لوله‌ای X شکل تحت بار محوری کششی از روش نیوتن-رافسون استفاده شده است. همچنین، برای پیش‌بینی رفتار اتصال بعد از وقوع خرابی، روش طول کمان<sup>۹</sup> بکار برده شده است.

با توجه به مطالعات پیشین صورت گرفته [8-1]، می‌توان از آثار عیوب در مدل‌سازی عددی برای بررسی مقاومت نهایی و مودهای رفتاری صرف‌نظر نمود.

نتایج آنالیز حساسیت مدل به اندازه مش در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حالت ۲ به دلیل تفاوت بسیار ناچیز در مقدار مقاومت نهایی در مقایسه با حالت ۱، مناسب برای مش‌بندی اتصالات است.

برای تعریف مشخصات ذاتی عضوها، از فولادی با نسبت پواسون ۰/۳، مدول یانگ ۲۱۰ گیگا پاسکال، تنش تسلیم ۳۰۰ مگا پاسکال و معیار تسلیم وون میز<sup>۸</sup> استفاده شده است [6].

شکل ۴. آنالیز حساسیت مش

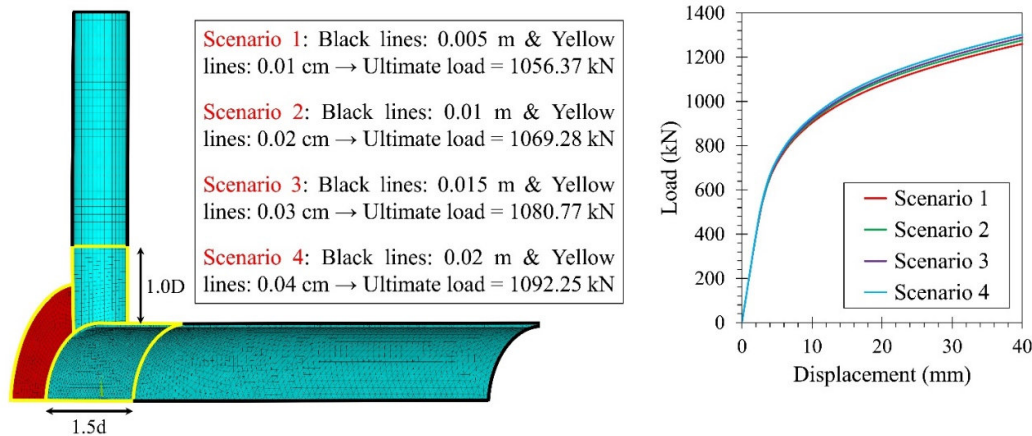


Fig. 4. Mesh sensitivity analysis.

می‌دهند که مدل المان محدود حاضر می‌تواند سختی اولیه و مقاومت نهایی اتصالات لوله‌ای X شکل سخت نشده و سخت شده تحت بار محوری کششی را به خوبی پیش‌بینی نمایند. مقایسه مقادیر ظرفیت نهایی حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد، مقادیر مقاومت نهایی حاصل از این دو روش در اتصالات به طور متوسط ۷ درصد و در بیشترین حالت ۱۱ درصد با یکدیگر اختلاف دارند. در نتیجه، مدل المان محدود توسعه داده شده در این پژوهش با دقت مناسبی قادر است تا رفتار اتصالات لوله‌ای X شکل سخت نشده و سخت شده با حلقه بیرونی تحت بار کششی را شبیه‌سازی نماید.

#### ۴- مطالعه پارامتریک

برای مطالعه مقدار و چگونگی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف بر روی عملکرد اتصالات تقویت شده با سخت‌کننده حلقوی بیرونی تحت بار محوری کششی، ۱۴۳ مدل عددی ساخته و تحلیل شده است. به منظور ایجاد ارتباط بین رفتار اتصال با مشخصات هندسی اتصال و ابعاد سخت‌کننده، مجموعه‌ای از پارامترهای هندسی بی‌بعد مورداستفاده قرار گرفته است. معرفی این پارامترها در شکل (۱) و محدوده آن‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

برای محاسبه مقاومت نهایی اتصالات، تغییر شکل برابر با شش‌صدم قطر عضو اصلی، به عنوان حد تغییر شکل نهایی و نیروی متناظر با آن به عنوان مقاومت نهایی اتصال لحاظ شده است [10]. لازم به ذکر است که چنانچه نقطه اوج نمودار نیرو-جابجایی قبل از حد تغییر شکل روی دهد، مقدار نیروی متناظر با نقطه پیک به عنوان مقاومت نهایی در نظر گرفته می‌شود [6].

#### ۳- درستی آزمایشی مدل عددی

درستی و دقت نتایج شبیه‌سازی عددی باید قبل از شروع مطالعه پارامتریک مورد ارزیابی قرار بگیرد؛ بنابراین در این قسمت، دقت مدل‌سازی عددی اتصالات لوله‌ای X شکل تقویت نشده و تقویت شده با سخت‌کننده حلقوی بیرونی تحت بار محوری کششی با نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است. مشخصات هندسی ۶ اتصال لوله‌ای برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی در جدول (۱) ارائه شده است. اتصالات X1 تا X3 اتصالات سخت نشده هستند. همچنین، اتصالات X4 تا X6، اتصالات سخت شده با حلقه بیرونی هستند. هر شش نمونه اتصال تحت کشش بوده و توسط ژائو و همکاران [1] مورد آزمایش قرار گرفته است. پس از مدل‌سازی اتصالات اشاره شده با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) و با شبیه‌سازی جزئیات انجام شده در آزمایشگاه، نتایج نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات تقویت نشده و تقویت شده در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج نشان

تغییر شکل می‌شود. این پدیده سبب جذب انرژی بیشتر و بالا رفتن مقاومت نهایی اتصال می‌شود. همچنین شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش  $\beta$  و ابعاد حلقه تقویتی، مقاومت اتصال با افزایش محسوسی روبرو می‌شود.

شکل تغییر یافته دو اتصال با مقادیر متفاوت  $\beta$  تحت یک جابه‌جایی یکسان در شکل (۸) ارائه شده است. مطابق شکل (۸)، تغییر شکل اتصال با  $\beta = 0.6$  از اتصال مشابه با  $\beta = 0.8$  در صورت اعمال جابه‌جایی یکسان روی عضوهای فرعی، موضعی‌تر است. این اتفاق (موضعی‌تر بودن تغییر شکل) علت اصلی کمتر بودن مقاومت اتصال سخت شده با مقدار کوچک‌تر  $\beta$  است. همچنین، مقایسه دو شکل نشان می‌دهد که بحرانی‌ترین نقطه برای هر دو اتصال سخت شده نقطه نشیمن است.

شکل ۵. مقایسه نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی.

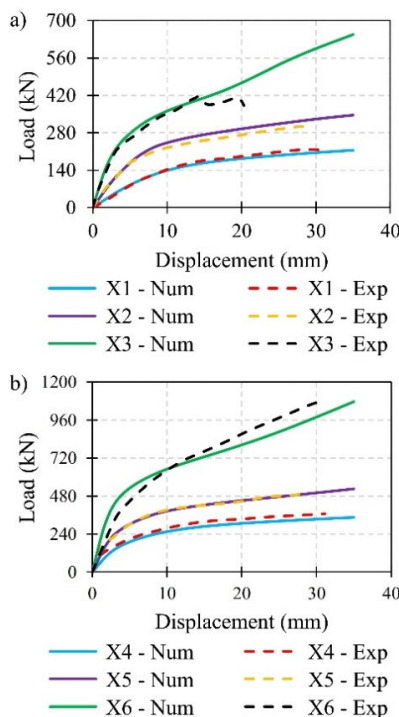


Fig. 5. Comparison numerical and experimental load-displacement curves.

جدول ۱. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی.

| Specimen | $D$ (mm) | $w_r$ (mm) | $t_r$ (mm) | $\beta$ | $\gamma$ | $\tau$ |
|----------|----------|------------|------------|---------|----------|--------|
| X1       | 300      | -          | -          | 0.25    | 19.35    | 0.76   |
| X2       | 300      | -          | -          | 0.50    | 18.50    | 1.08   |
| X3       | 300      | -          | -          | 0.73    | 18.87    | 1.06   |
| X4       | 300      | 50.0       | 7.70       | 0.25    | 18.74    | 0.76   |
| X5       | 300      | 49.8       | 7.93       | 0.51    | 18.67    | 1.02   |
| X6       | 300      | 49.8       | 7.85       | 0.73    | 17.88    | 1.02   |

Table 1. Geometrical parameters of experimental tests.

جدول ۲. مقایسه نتایج نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی.

| Specimen | Joint tensile capacity (kN) |        | FE/Exp |
|----------|-----------------------------|--------|--------|
|          | Experimental                | FE     |        |
| X1       | 188.2                       | 177.51 | 0.94   |
| X2       | 265.3                       | 286.83 | 1.08   |
| X3       | 399.12                      | 442.38 | 1.11   |
| X4       | 331.1                       | 299.95 | 0.90   |
| X5       | 438.8                       | 440.65 | 1.00   |
| X6       | 830.2                       | 772.79 | 0.93   |

Table 2. Comparison between numerical and experimental results.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای بی‌بعد مورد استفاده در مطالعه پارامتریک.

| Parameter | Expression | Values                   |
|-----------|------------|--------------------------|
| $\beta$   | $d/D$      | 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8  |
| $\gamma$  | $D/2T$     | 12, 16, 20, 24, 28       |
| $\tau$    | $t/T$      | 0.5, 0.6, 0.75, 0.9, 1.0 |
| $\beta_r$ | $2w_r/D$   | 0.2, 0.6, 1.0            |
| $\tau_r$  | $t_r/T$    | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0       |

Table 3. Value of non-dimensional parameters for the parametric study.

#### ۴-۱- اثر پارامتر $\beta$

در این بخش، تأثیر پارامتر  $\beta$  بر روی سختی اولیه، مقاومت نهایی و مودهای خرابی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پارامتر  $\beta$  برابر با نسبت قطر عضو فرعی به قطر عضو اصلی است. شکل (۶) نشان می‌دهد که افزایش پارامتر  $\beta$  (با ثابت بودن قطر عضو اصلی) سبب افزایش سختی اولیه اتصال می‌شود. در نتیجه افزایش پارامتر  $\beta$  سبب کاهش نرمی اتصالات سخت شده می‌شود. همچنین، با افزایش این پارامتر، مقادیر مقاومت نهایی با افزایش محسوسی روبرو می‌شود. چون با افزایش پارامتر  $\beta$ ، قطر عضو فرعی با افزایش همراه می‌شود. بزرگ‌تر شدن قطر عضو فرعی باعث شده تانیروی وارد شده بر سطح بزرگ‌تری از عضو اصلی وارد شود. در نتیجه، سطح بیشتری از عضو اصلی دچار

شکل ۶. تأثیر پارامتر  $\beta$  روی سختی اولیه و مقاومت نهایی.

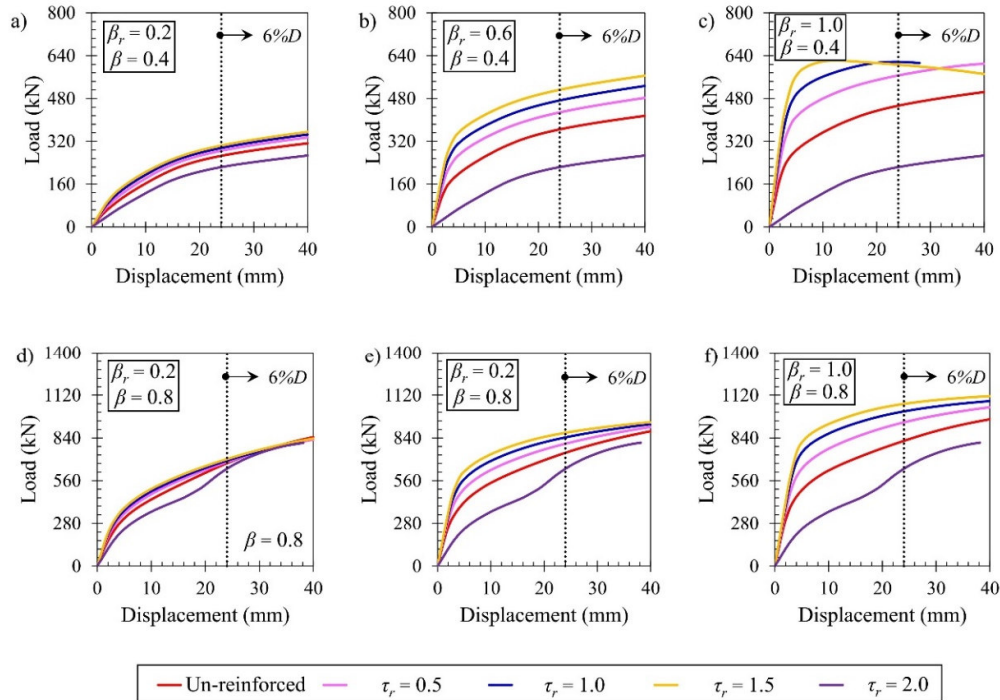


Fig. 6. The effect of the  $\beta$  on the initial stiffness and ultimate strength.

شکل ۷. تأثیر پارامتر  $\beta$  روی مقادیر مقاومت نهایی و نسبت‌های مقاومت نهایی.

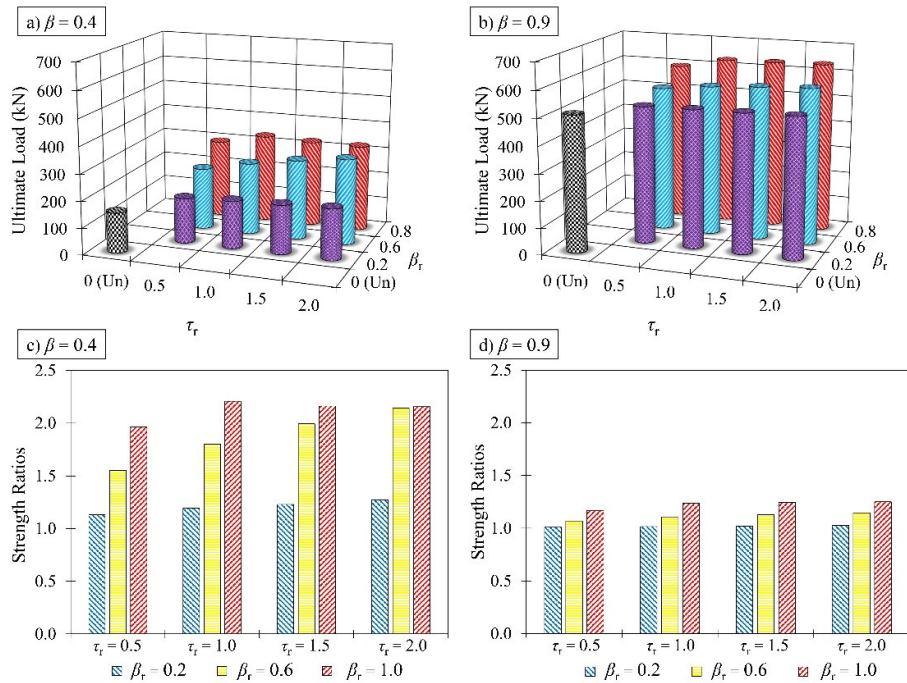
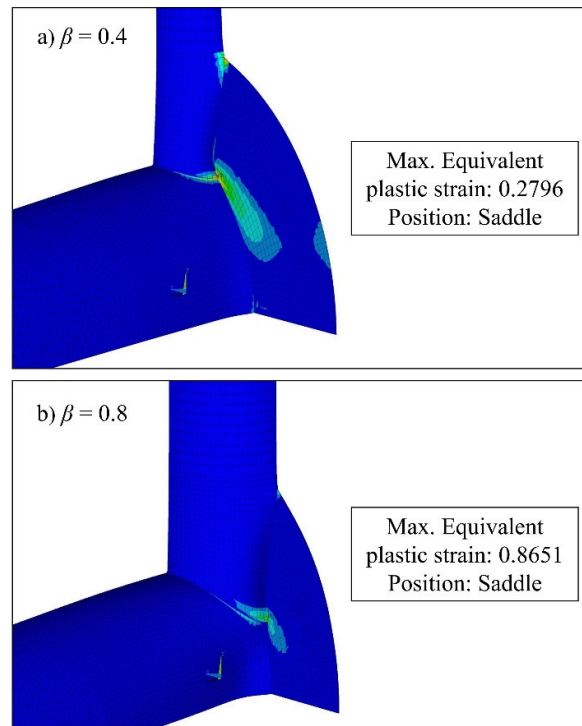


Fig. 7. The effect of the  $\beta$  on the ultimate strength values and ultimate strength ratios.

شکل ۸ تأثیر پارامتر  $\beta$  روی کرنش پلاستیک معادل.Fig. 8. The effect of the  $\beta$  on the on the equivalent plastic strain.

#### ۴-۲- اثر پارامتر $\gamma$

پارامتر  $\gamma$  برابر با نسبت شعاع عضو اصلی به ضخامت آن است. شکل (۹) نشان می‌دهد که استفاده از سخت‌کننده حلقوی بیرونی می‌تواند به‌طور چشم‌گیری مقاومت نهایی اتصال را افزایش دهد؛ زیرا سخت‌کننده حلقوی، سختی شعاعی عضو اصلی را در ناحیه اتصال به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد. در نتیجه، تغییر شکل در محل اتصال با کاهش و در مقابل مقاومت نهایی اتصال با افزایش محسوسی همراه می‌شود. همچنین، با افزایش مقدار  $\gamma$  (در صورت ثابت بودن قطر عضو اصلی)، مقاومت نهایی اتصالات تقویت‌شده به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. چون با افزایش  $\gamma$ ، ضخامت عضو اصلی و ضخامت سخت‌کننده با کاهش همراه می‌شود. کاهش ضخامت این دو عضو، سبب کاهش سختی محل اتصال می‌شود. به عنوان نمونه، در اتصالی با  $\gamma$  برابر ۱۶،  $\beta$  برابر ۰/۵ و  $\tau$  برابر ۰/۹ مقاومت نهایی ۱۰۵۴/۳۱۳ کیلو نیوتن است، اما در اتصال مشابه با  $\gamma$  برابر ۲۴ مقاومت نهایی ۵۵۸/۲۷۹ کیلو نیوتن است.

بررسی اثر  $\gamma$  روی مقادیر نسبت مقاومت نهایی نشان می‌دهد که افزایش مقدار  $\gamma$  منجر به افزایش آن می‌شود؛ زیرا اتصالی با  $\gamma = ۱۶$  به دلیل ضخامت بیشتر عضو سخت‌کننده و عضو اصلی، قوی‌تر از اتصالی با  $\gamma = ۲۴$  هستند؛ بنابراین استفاده از سخت‌کننده حلقوی بیرونی روی اتصالی با مقدار بزرگ  $\gamma$  (اتصالات ضعیف‌تر) نسبت به اتصالی با مقدار کوچک  $\gamma$  (اتصالات قوی‌تر) مؤثرتر است. برای نمونه، نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت‌شده به تقویت نشده در صورت استفاده از سخت‌کننده حلقوی بیرونی ( $\beta_r = ۰/۶$  و  $\tau_r = ۲$ ) در اتصالی با  $\gamma = ۱۶$  برابر ۲/۰۲ و در اتصالی با  $\gamma = ۲۴$  برابر ۲/۱۹ است.

فرم تغییر یافته دو اتصال با مقادیر متفاوت  $\gamma$  در شکل (۱۰) ارائه شده است. مقدار جابه‌جایی اعمال‌شده برای هر دو اتصال برابر است. نتایج نشان می‌دهند که در صورت وارد شدن مقدار جابه‌جایی یکسان، مقدار بار تحمل شده در اتصالی با  $\gamma = ۱۶$  برابر با ۱۵۳۷/۷۷ کیلو نیوتن است. در صورتی که این مقدار برای اتصالی با  $\gamma = ۲۴$  برابر ۸۶۷/۸۰۸ کیلو نیوتن است. دلیل این تفاوت، بزرگ‌تر بودن ضخامت عضو اصلی و سخت‌کننده در اتصالی با مقدار  $\gamma$  کوچک‌تر است. در اتصالی با  $\gamma = ۱۶$ ، مقدار ضخامت عضو اصلی و سخت‌کننده ۱/۶۶ برابر ضخامت عضو اصلی و سخت‌کننده در اتصال مشابه با  $\gamma = ۲۴$  است. لازم به ذکر است که فرم توزیع تنش وون‌میز و شکل تغییر یافته در هر دو اتصال با مقدار متفاوت  $\gamma$  مشابه است.

#### ۴-۳- اثر پارامتر $\tau$

پارامتر  $\tau$  برابر با نسبت ضخامت عضو فرعی به ضخامت عضو اصلی است؛ بنابراین، با افزایش پارامتر  $\tau$  در اتصالی با مقادیر ثابت قطر و ضخامت عضو اصلی، ضخامت عضو فرعی با افزایش همراه می‌شود. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت نهایی اتصالات تقویت‌شده و تقویت نشده با افزایش  $\tau$ ، افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، اتصالی با مقادیر  $\tau$  برابر با ۰/۷۵ و ۱/۰، زمانی که اتصال با سخت‌کننده حلقوی بیرونی با ابعاد  $\beta_r$  برابر ۰/۶ و  $\tau_r$  برابر ۱/۵ تقویت‌شده باشند، مقاومت نهایی اتصالات تقویت‌شده به ترتیب ۷۸۵/۴۳۶ و ۹۸۴/۵۶۹ کیلو نیوتن می‌شوند. همچنین نتایج نشان می‌دهد، افزایش عرض و ضخامت



نتایج مدل‌سازی ۱۰۸ اتصال سخت شده شکل‌های (۴-۱۱) نشان می‌دهند که هر دو پارامتر ضخامت و عرض سخت‌کننده معمولاً اثر محسوسی روی عملکرد استاتیکی اتصال دارند. شکل (۱۲) تنش وون‌میز برای دو اتصال با عرض سخت‌کننده متفاوت را نشان می‌دهد. دو اتصال تحت نیروی کششی یکسان ۴۶۵ کیلو نیوتن قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که قابل مشاهده است مقادیر تنش وون‌میز در اتصالی با عرض سخت‌کننده بزرگ‌تر به‌طور محسوسی کمتر است؛ زیرا افزایش عرض سخت‌کننده حلقوی بیرونی، بیضوی شدگی عضو اصلی را به تأخیر می‌اندازد؛ بنابراین استفاده از سخت‌کننده حلقوی با عرض بزرگ‌تر، رفتار اتصال را بهبود می‌بخشد.

سخت‌کننده حلقوی بیرونی در اتصالاتی با  $\tau$  کوچک، تأثیر محسوسی در تغییر رفتار اتصالات تقویت‌شده ندارند؛ زیرا با افزایش ابعاد سخت‌کننده، نسبت‌های مقاومت نهایی به آهستگی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، به‌کارگیری سخت‌کننده حلقوی با حداقل ابعاد ( $\beta_r = 0.2$  و  $\tau_r = 0.5$ ) در اتصالات با  $\tau$  کوچک ( $\tau_r = 0.5$ ) پیشنهاد می‌شود. در مقابل، در اتصالاتی با  $\tau$  بزرگ، مقاومت نهایی اتصالات تقویت‌شده با افزایش ابعاد سخت‌کننده حلقوی افزایش می‌یابد.

#### ۴-۴- اثر ابعاد حلقه سخت‌کننده

شکل ۹. تأثیر پارامتر  $\gamma$  روی مقادیر مقاومت نهایی و نسبت‌های مقاومت نهایی.

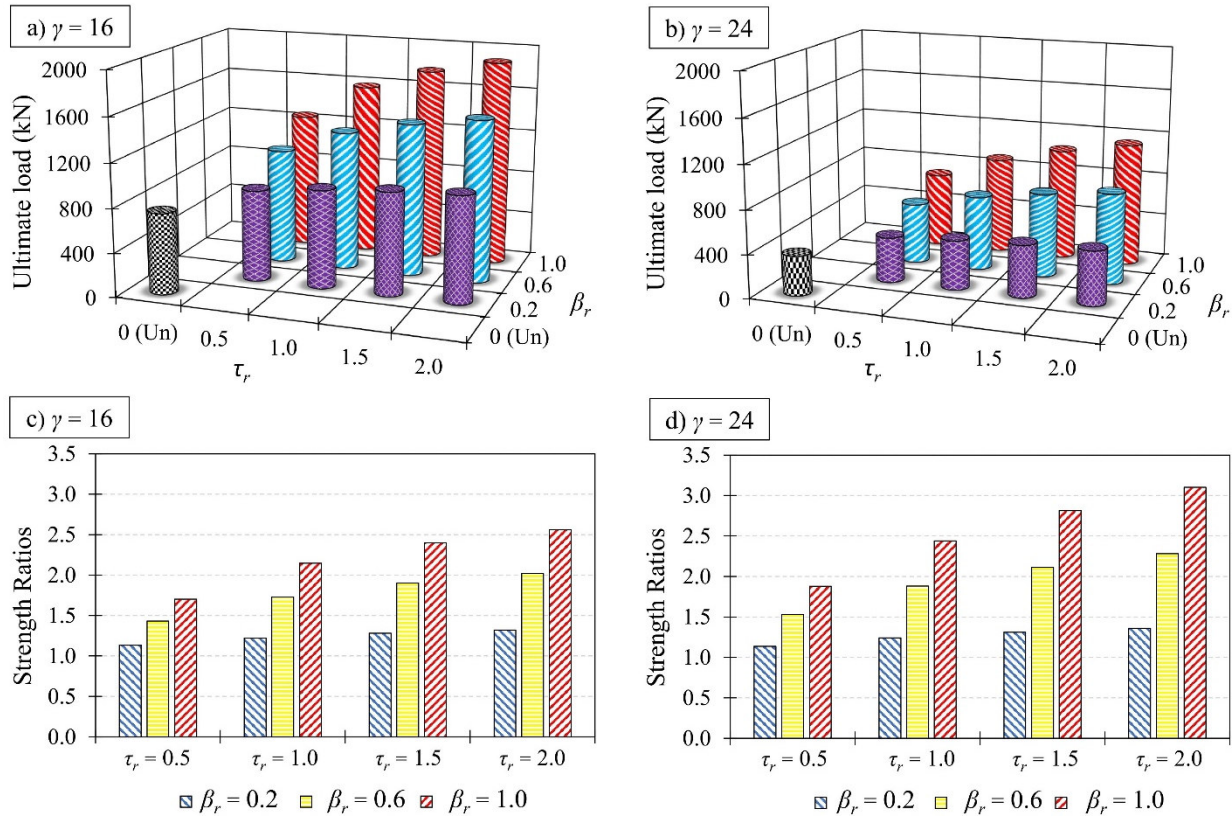


Fig. 9. The effect of the  $\gamma$  on the ultimate strength values and ultimate strength ratios.

شکل ۱۰. تأثیر پارامتر  $\gamma$  روی مود خرابی.

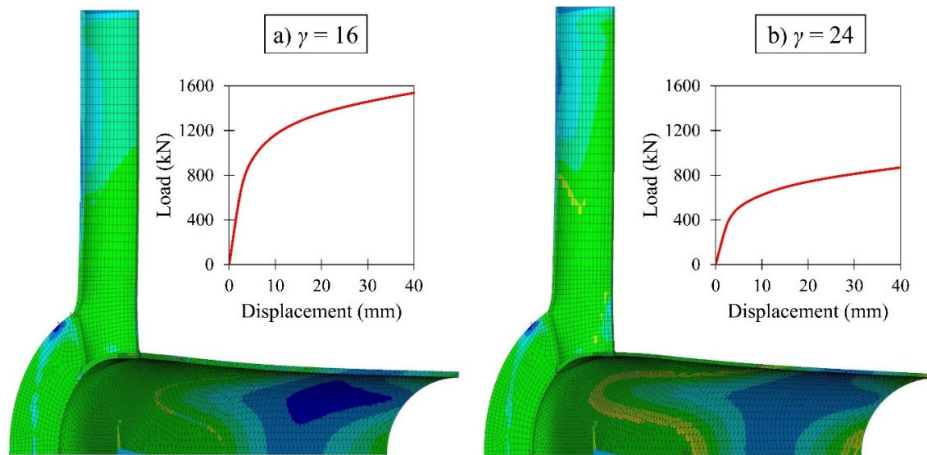


Fig. 10. The effect of the  $\gamma$  on the failure mechanism.

شکل ۱۱. تأثیر پارامتر  $\tau$  روی مقادیر مقاومت نهایی.

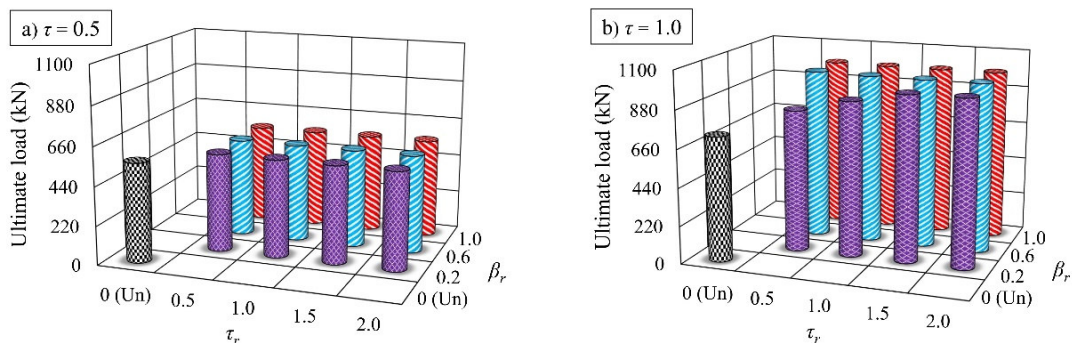


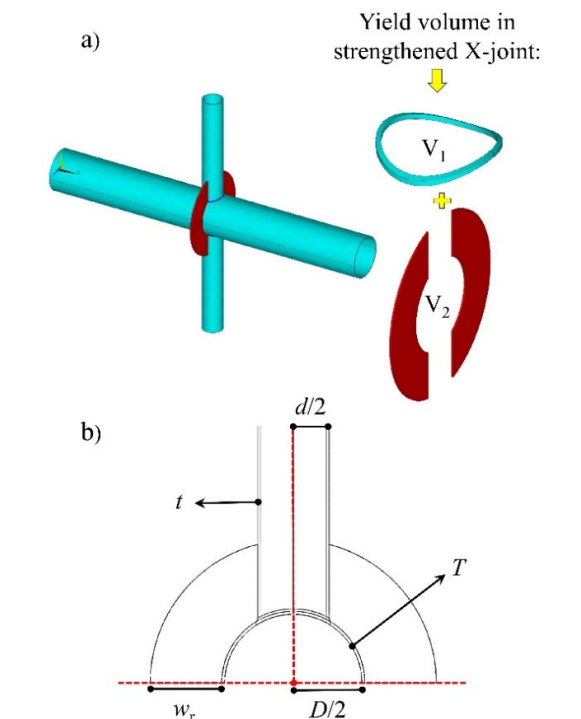
Fig. 11. The effect of the  $\tau$  on the ultimate strength.

است. در اتصال سخت نشده در باری معادل با ظرفیت نهایی، حجم مقاطع بین عضو اصلی و فرعی ( $V_1$ ) تسلیم می‌شود (شکل ۱۳)؛ اما در اتصال سخت شده، علاوه بر حجم مقاطع بین عضو اصلی و فرعی ( $V_1$ )، حجم سخت‌کننده حلقوی ( $V_2$ ) نیز تسلیم خواهد شد (شکل ۱۳). چگونگی استخراج این احجام در روابط (۱ تا ۸) نشان داده شده است. در مرحله بعد، با استفاده از نتایج داده‌های به‌دست‌آمده از آنالیز ۱۴۳ اتصال مدل شده در مطالعه پارامتریک، ضرایب ثابت ( $\chi_1$  تا  $\chi_{10}$ ) موجود در رابطه (۸) به‌وسیله آنالیز رگرسیون غیرخطی به صورت رابطه (۹) حاصل می‌شود. محدوده مجاز پارامترهای موجود در رابطه (۹) به صورت رابطه (۱۰) است.

## ۵- استخراج معادله تحلیلی

مرور ادبیات پیشین نشان داده است که هیچ رابطه‌ای برای محاسبه مقاومت نهایی اتصالات لوله‌ای X شکل سخت شده با حلقه بیرونی تحت کشش در دسترس نیست؛ بنابراین در این بخش، رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه مقاومت نهایی این اتصالات استخراج شده است. هدف از این رابطه محاسبه نسبت ظرفیت نهایی اتصال تقویت‌شده به ظرفیت نهایی اتصال تقویت نشده متناظر ( $R_e$ ) تحت بار کششی بر اساس ۵ متغیر  $\beta$ ،  $\eta$ ،  $\tau$ ،  $\beta_r$  و  $\tau_r$  است. نسبت ظرفیت نهایی ( $R_e$ ) برابر نسبت حجم تسلیم‌شده در اتصال سخت شده به حجم تسلیم‌شده در اتصال سخت نشده

محاسبه برای استخراج رابطه نسبت مقاومت نهایی اتصال تقویت شده به مقاومت نهایی اتصال تقویت نشده متناظر.



**Fig. 13.** a) Yield volume in stiffened and un stiffened joints, b) Calculation scheme to derive the relationship between the ratio of the ultimate strength of the stiffened joint to the ultimate strength of the corresponding unstiffened joint.

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

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

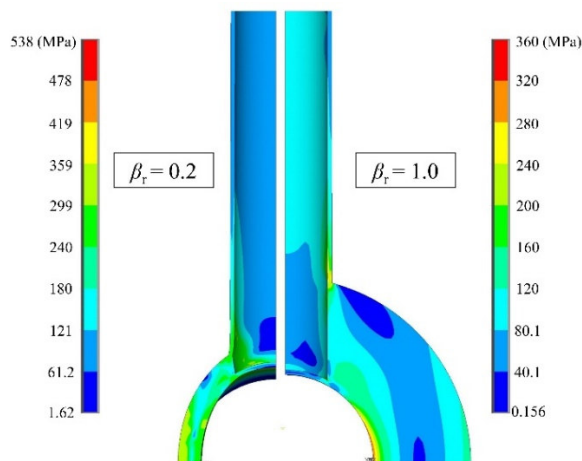
$$V_1 = PTt \quad (3)$$

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

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

$$R_e = 1 + \frac{V_1}{V_2} = 1 + \frac{\pi DTt(2\beta + \frac{\beta^3}{3!})}{\pi t_r (w_r^2 + Dw_r)} \quad (6)$$

شکل ۱۲. تأثیر عرض سخت کننده حلقوی بر روی توزیع تنش وون میزز.



**Fig. 12.** The effect of outer ring stiffener width on Von Mises stress distribution.

مقایسه نسبت مقاومت نهایی حاصل از مدل های المان محدود رابطه پارامتریک (۹) در شکل (۱۴) نشان داده شده است. پراکندگی نقاط نسبت به خط نیمساز کم است. همچنین، دپارتمان انرژی بریتانیا [11] پیشنهاد داده است که موارد زیر برای پذیرش یک رابطه برای استفاده در روند طراحی کنترل شوند. لازم به ذکر است در شرط های زیر، \$P\$ بیانگر مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه معرفی شده و \$M\$ نشان دهنده مقادیر اندازه گیری شده (نتایج حاصل از مدل سازی المان محدود) است. اگر ۱-  $[\%P/M < 0.8] \leq 5\%$  و  $[\%P/M < 1.0] \leq 25\%$  باشد، معادله مورد قبول است. اگر  $[\%P/M < 1.5] \geq 50\%$  باشد، معادله مورد قبول است؛ اما بیشتر نتایج محافظه کارانه حاصل می شود.

۲- اگر  $[\%P/M < 1.0] \leq 30\%$  و  $25\% \leq$  و/یا  $[\%P/M < 0.8] \leq 7/5\%$  برقرار باشد، نتایج رابطه مرزی بوده و قضاوت مهندسی باید لحاظ شود.

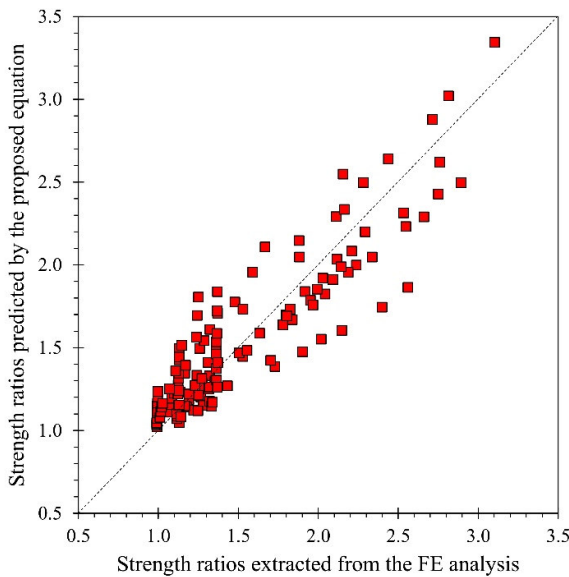
۳- چنانچه هیچ کدام از موارد بالا برقرار نباشد، رابطه مورد پذیرش نیست.

سنجش رابطه معرفی شده (۹) با معیارهای دپارتمان انرژی بریتانیا [11] جدول (۴) نشان می دهد که معادله ارائه شده مورد پذیرش بوده و می توان از آن در طراحی و مقاوم سازی اتصالات سازه های لوله ای استفاده کرد.

شکل ۱۳. (a) حجم تسلیم در اتصالات تقویت شده و تقویت نشده، (b) طرح

۳- با افزایش  $\beta$ ،  $\tau$  و کاهش  $\gamma$  (در صورت ثابت بودن قطر عضو اصلی)، مقاومت نهایی اتصالات تقویت شده با افزایش چشمگیری روبرو می شود. همچنین، با افزایش  $\gamma$  نسبت مقاومت نهایی اتصال سخت شده به مقاومت نهایی اتصال سخت نشده متناظر افزایش می یابد.

شکل ۱۴. مقایسه نسبت های مقاومت نهایی حاصل از مدل های عددی و رابطه ارائه شده.



**Fig. 14.** Comparison of the strength ratios predicted by proposed equation with the strength ratios extracted from FE analysis.

جدول ۴: ارزیابی رابطه ارائه شده بر اساس معیارهای استاندارد دپارتمان انرژی بریتانیا [11].

| Eq. | % $P / M > 1.5$ | % $P / M < 0.8$ | Decision |
|-----|-----------------|-----------------|----------|
| (9) | 0 % < 5% OK.    | 3.8% < 5% OK.   | Accept   |

**Table 4.** Assessment of developed equations based on the UK Department of Energy [11] standard.

۴- استفاده از سخت کننده حلقوی بیرونی مود خرابی اتصالات تحت کشش را بهبود می بخشد.

۵- یک رابطه تحلیلی پارامتریک برای محاسبه مقاومت نهایی اتصال X شکل سخت شده با حلقه بیرونی تحت بار محوری کششی ارائه شده است. رابطه پیشنهادی با توجه به معیارهای پذیرش دپارتمان انرژی بریتانیا ارزیابی شده است. این رابطه

$$\beta_r = \frac{2w_r}{D} \rightarrow R_e = 1 + \frac{iD(2\beta + \frac{\beta^3}{3!})}{\tau_r D^2 (\frac{\beta_r}{2} + \frac{\beta_r^2}{4})}$$

$$\rightarrow R_e = 1 + \frac{Tt(2\beta + \frac{\beta^3}{3!})}{\tau_r TD (\frac{\beta_r}{2} + \frac{\beta_r^2}{4})} \quad (7)$$

$$2\gamma = DT \rightarrow R_e = 1 + \frac{\tau(2\beta + \frac{\beta^3}{3!})}{\gamma\tau_r (\beta_r + \frac{\beta_r^2}{4})}$$

$$R_e = 1 + \frac{\chi_1 \tau^{x_2} (\chi_3 + \alpha_4 \beta^{x_3})}{\chi_6 \tau_r^{x_1} \gamma^{x_4} (\chi_9 + \chi_{10} \beta_r^{x_{11}})} \quad (8)$$

$$R_e = 1 + \frac{1.08615 \gamma^{2.638} \tau^2 \tau_r^{0.477} (4.3394 \beta^{-0.00018} - 4.3391)}{(\beta_r^{-1.32} + 0.862)} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} 0.2 \leq \beta_r \leq 1.0 \\ 0.5 \leq \tau_r \leq 2.0 \\ 12 \leq \gamma \leq 35 \\ 0.2 \leq \beta \leq 0.9 \\ 0.5 \leq \tau \leq 1.0 \end{aligned} \quad (10)$$

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، پس از مقایسه نتایج مدل عددی حاضر با داده های آزمایشگاهی، ۱۴۳ نمونه اتصال لوله ای X شکل، شامل ۱۱ اتصال سخت نشده و ۱۳۲ اتصال در حالت سخت شده با سخت کننده حلقوی بیرونی ساخته شده است. از مهم ترین نتایج این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- مدل المان محدود حاضر قادر است تا رفتار اتصالات لوله ای

X شکل سخت نشده و سخت شده با حلقه بیرونی تحت کشش را با دقت بالا شبیه سازی نماید.

۲- افزایش ابعاد سخت کننده حلقوی می تواند سختی اولیه و

مقاومت نهایی اتصال تحت کشش را افزایش دهد. نتایج

نشان داده است که این روش تقویتی می تواند مقاومت نهایی

اتصالات تحت کشش را به ۲/۸۹ برابر مقاومت نهایی اتصال

تقویت نشده متناظر ارتقا دهد.

- [10] Choo, Y., van der Vegte, G., Zettlemoyer, N., Li, B. and Liew, J., 2005. Static Strength of T-Joints Reinforced with Doubler or Collar Plates. I: Experimental Investigations. *Journal of Structural Engineering*, 131(1), pp.119-128.
- [11] UK Department of Energy, Background Notes to the Fatigue Guidance of Offshore Tubular Connections, 1983, London, UK.

می‌تواند با دقت بالا در تحلیل و طراحی سازه‌های لوله‌ای بکار برده شود.

## ۷- مراجع

- [1] Zhao, L., Zhu, L., Sun, H., Yang, L. and Chen, X., 2020. 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.
- [2] Zhu, L., Yang, K., Bai, Y., Sun, H. and Wang, M., 2017. Capacity of steel CHS X-joints strengthened with external stiffening rings in compression. *Thin-Walled Structures*, 115, pp.110-118.
- [3] Zhu, L., Han, S., Song, Q., Ma, L., Wei, Y. and Li, S., 2016. Experimental study of the axial compressive strength of CHS T-joints reinforced with external stiffening rings. *Thin-Walled Structures*, 98, pp.245-251.
- [4] Li, W., Zhang, S., Huo, W., Bai, Y. and Zhu, L., 2018. Axial compression capacity of steel CHS X-joints strengthened with external stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, pp.156-166.
- [5] Nassiraei, H., Zhu, L., Lotfollahi-Yaghin, M. and Ahmadi, H., 2017. Static capacity of tubular X-joints reinforced with collar plate subjected to brace compression. *Thin-Walled Structures*, 119, pp.256-265.
- [6] Nassiraei, H., Mojtahedi, A. and Lotfollahi-Yaghin, M., 2018. Static strength of X-joints reinforced with collar plates subjected to brace tensile loading. *Ocean Engineering*, 161, pp.227-241.
- [7] Chen, Y., Feng, R. and Xiong, L., 2016. Experimental and numerical investigations on double-skin CHS tubular X-joints under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 106, pp.268-283.
- [8] Nassiraei, H. and Rezaeidoost, P., 2021. Static capacity of tubular X-joints reinforced with fiber reinforced polymer subjected to compressive load. *Engineering Structures*, 236, p.112041.
- [9] American Welding Society (AWS), 2010, Part D 1.1, Structural welding code.

## Static strength of CHS X-joints stiffened with outer ring under axially tensile load

Hossein Nassiraei <sup>1\*</sup>, Pooya Rezadoost <sup>2</sup>

1- Assistant Prof., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran.

2- Ph.D Student of Civil Engineering in the field of Coastal, Ports and Marine Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

Tubular members, due to their convenient equipment installation and high-strength performance, are widely applied in the support system of offshore platforms such as jack-ups and jackets. In most steel tubular structures; the circular hollow section (CHS) members are mainly joined using welding. Commonly, one or more braces are welded directly onto the surface of a chord member to form that so named welded connection. So far, some techniques to improve the performance of tubular connections have been proposed. Most of these methods (e.g., internal ring, doubler plate) can only be used for structures during the design, but there are only a few techniques (e.g., outer ring, FRP) which can be applied during both fabrication and service. This paper studies the static strength of CHS X-joints reinforced with external ring subjected to axially tensile load. The SOLID186 in ANSYS version 21 was used to establish the finite element (FE) models of the tubular X-joints. Validation of the FE model with experimental data showed that the present FE model can accurately predict the static behavior of the external-ring stiffened and un-stiffened tubular X-joints under tension. Afterwards, 143 FE models were generated and analyzed to investigate the effect of the joint geometry and the external ring size on the ultimate strength, failure mechanisms, and initial stiffness through a parametric study. In these models, both geometric and material non-linearity were considered. Moreover, the welds joining the chord and brace members were modeled. Results indicated that the ultimate strength of the ring stiffened X-joints under brace tension can be up to 289% that of the ultimate strength of the corresponding un-stiffened joint. Also, the increase of the  $\beta$  (the ratio of the brace diameter to chord diameter) results in the increase of the ultimate strength and initial stiffness (in a fixed chord diameter). Because, the increase of the  $\beta$  leads to the increase of the brace diameter. The increase of this member results in the increase of the joints stiffness. In addition, the decrease of the  $\gamma$  (the ratio of the chord radius to chord thickness) leads to the remarkable increase of the ultimate strength. Also, the increase of the  $\tau$  (the ratio of the brace to chord thickness) leads to the increase of the ultimate strength (in a fixed chord thickness). However, it is not remarkable. Moreover, the comparison between failure modes of reinforced and un-reinforced joints showed that the ring can significantly improve the failure mechanisms. Also, the ring can remarkably increase the initial stiffness. Despite this significant difference between the ultimate strength, failure mode, and initial stiffness of unreinforced and ring reinforced X-joints under brace tension, the investigations on this type of the reinforced joints have been limited to only three X-joint tests. Also, no design equation is available to determine the ultimate strength of X-joints reinforced with the external ring. Therefore, the geometrically parametric study was followed by the nonlinear regression analysis to develop an ultimate strength parametric formula for the static design of ring stiffened X-joints subjected to brace tension. The proposed formula was evaluated based on the UK DoE acceptance standard.

**Keywords:** Tubular X-connection; tensile load; outer ring; ultimate strength; theoretical design equation.