



سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی
ICOPMAS 2010
 10-8 آذر ماه (تهران)



تأثیر اعضای مهاری افزوده بر توزیع ضرایب تمرکز تنش در امتداد پنجه جوش در اتصالات لوله ای KT تحت بارگذاری محوری

محمد علی لطف اللهی یقین، دانشیار، دانشگاه تبریز، a_lotfollahi@yahoo.com
 حمید احمدی، دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، h_ahmadi_81@yahoo.com

چکیده

در این مقاله تأثیر اعضای مهاری افزوده هم صفحه که در واقع عامل تفاوت هندسی اتصالات لوله ای KT و DKT هستند، روی توزیع ضرایب تمرکز تنش (SCFs) در امتداد پنجه جوش بررسی شده است. بدین منظور، تأثیر پارامترهای هندسی بی بعد شامل τ ، γ و β و همچنین زوایه اتصال عضو مهاری به عضو اصلی (θ) روی توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش تحت بارگذاری متعادل محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامتر SR به صورت نسبت مقدار SCF در یک نقطه خاص از اتصال DKT به مقدار SCF در همان نقطه در یک اتصال لوله ای KT با مشخصات هندسی یکسان تعریف می شود. تأثیر هندسه اتصال روی توزیع مقادیر SR به دقت بررسی شده است. به ازای مقادیر بخصوصی از پارامترهای بی بعد، تفاوت قابل توجهی بین مقادیر SCF در اتصالات KT و DKT با خصوصیات هندسی یکسان مشاهده گردید. این نتیجه، لزوم استفاده از معادلات پارامتری که مخصوص اتصالات لوله ای DKT طراحی شده اند را روشن می سازد. چنین معادلاتی در حال حاضر موجود نیستند. ضرایب تمرکز تنش پارامترهای ضروری در محاسبات خستگی و مکانیک شکست سکوها فراساحلی هستند.

کلید واژه ها: سکوها فراساحلی، خستگی، مکانیک شکست، اتصالات لوله ای KT و DKT، ضریب تمرکز تنش (SCF)، بارگذاری متعادل محوری

مقدمه

مقاطع تو خالی مدور فولادی در سازه های فراساحلی از جمله سکوها شابلونی و خودبالابر به شکل گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. در این سازه ها، یک اتصال لوله ای از جوش دادن انتهای آماده سازی شده یک یا چند عضو مهاری (Brace) به سطح یک عضو اصلی (Chord) تشکیل می شود (شکل 1). رفتار این اتصالات لوله ای، حتی در ساده ترین شکل آنها، پیچیده بوده و لذا تحلیل این رفتار نسبتاً مشکل است. یک اتصال لوله ای KT که با متصل شدن اعضای مهاری افزوده به یک اتصال DKT تبدیل گردیده در شکل (1) نشان داده شده است. در این شکل، نقاط Saddle، Crown toe و Crown heel در امتداد محل تقاطع اعضای اصلی و مهاری نشان داده شده و پارامترهای هندسی بی بعد برای عضو اصلی (با قطر D و ضخامت جدار T) و اعضای مهاری (با قطر d و ضخامت جدار t) تعریف شده اند. اتصالات لوله ای در سازه های فراساحلی متداولی نظیر سکوها شابلونی و خودبالابر تحت اثر بارگذاری چرخه ای امواج بوده و در نتیجه در معرض آسیب های ناشی از خستگی قرار دارند. طراحی اتصال برای خستگی و بازرسی های متناوب در حین سرویس دهی سکو، به منظور کسب اطمینان از یکپارچگی و ایمنی این اتصالات، ضروری هستند. یکی از روش های متداول برای ارزیابی عمر خستگی سکوها فراساحلی، استفاده از منحنی های S-N است. در این روش، تعداد سیکل های بارگذاری قابل تحمل توسط سازه پیش از گسیختگی، بر اساس محدوده تنش بحرانی (HSS) تخمین زده می شود. محدوده تنش بحرانی با استفاده از تنش اسمی و پارامتری به نام ضریب تمرکز تنش (SCF) محاسبه می گردد. طبق تعریف، نسبت تنش سطحی موضعی در محل تقاطع اعضای اصلی و مهاری به تنش اسمی در عضو مهاری بارگذاری شده، ضریب تمرکز تنش نامیده می شود. با مرور مطالعات فنی مشخص می شود که کارهای پژوهشی متعددی با هدف محاسبه ضرایب تمرکز تنش در انواع مختلف اتصالات لوله ای صورت گرفته است. برخی محققین یک سری معادلات پارامتری برای محاسبه مقادیر SCF در محل تقاطع اعضای اصلی و مهاری ارائه نموده اند. با این وجود، نتایج اکثریت قریب به اتفاق این تحقیقات روی محاسبه مقادیر SCF در نقاط خاصی نظیر Saddle و Crown متمرکز شده

و تعیین HSS در سایر نقاط در امتداد پنجه جوش چندان مورد توجه قرار نگرفته است. گرچه نتایج این تحقیقات مفید و در عین حال کاربردی هستند، لازم به ذکر است که تعیین توزیع مقادیر SCF در امتداد پنجه جوش به جای محاسبه این مقادیر در نقاط خاصی نظیر Saddle و Crown، از اهمیت خاصی برخوردار است. برخی از مهم‌ترین دلایل این مسئله عبارتند از:

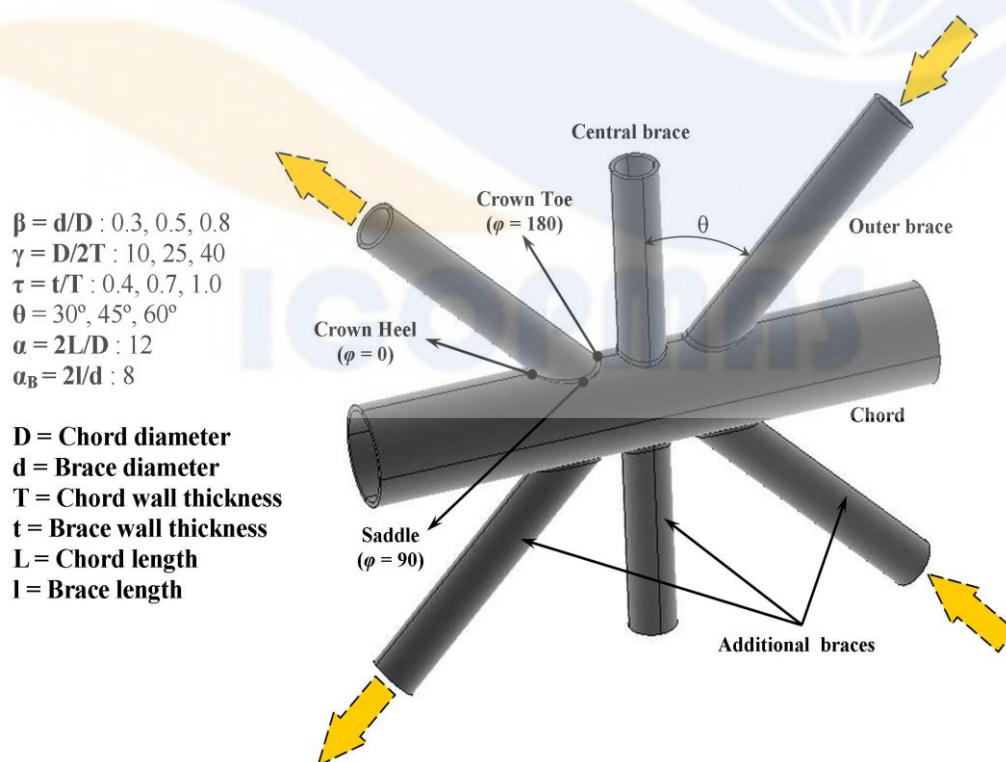
1- اتصالات سکوه‌های فراساحلی علاوه بر بار محوری، تحت لنگر خمشی داخل صفحه و خارج از صفحه نیز قرار دارند. طبق روش پیشنهادی توسط آئین نامه API [1]، ابتدا باید بطور جداگانه تنش اسمی ناشی از هر کدام از این بارها را در حداکثر ضریب تمرکز تنش اتصال تحت آن بار ضرب نموده و سپس سه مقدار حاصل را با هم جمع نمود. واضح است که این روش موقعیت HSS را در نظر نگرفته و عموماً منجر به تخمین بسیار محافظه‌کارانه‌ای از عمر خستگی اتصال خواهد شد [2]. برای حصول مقادیر به مراتب دقیقتر برای HSS، می‌توان ابتدا توزیع تنش ناشی از هر کدام از این سه حالت بارگذاری را به طور مجزا بدست آورد و سپس آن‌ها را رویهم گذاری نمود. در نتیجه می‌توان مقادیر واقع‌بینانه‌تری برای عمر خستگی اتصال بدست آورد.

2- با انجام چنین مطالعه‌ای می‌توان موقعیت دقیق HSS را تعیین نمود. این مسئله از اهمیت خاصی برخوردار است چرا که ترک‌های سطحی ناشی از خستگی اتصال تحت بارهای تناوبی از این نقطه آغاز می‌شوند. در صورت استفاده از معادلاتی که مقادیر SCF را صرفاً در نقاط Saddle و Crown toe ارائه می‌کنند، امکان تعیین موقعیت HSS وجود ندارد.

3- اطلاعات دقیق در مورد نحوه توزیع تنش در اتصال جهت پیش‌بینی رشد ترک‌های ناشی از خستگی و همچنین تعیین عمر باقی مانده اتصالات ترک خورده با استفاده از روش‌های پیشرفته مکانیک شکست نظیر O-integral، AVS و TPM، ضروری است. لذا تعیین دقیق توزیع تنش در امتداد محل تلاقی اعضای اصلی و مهارى دارای اهمیت قابل توجهی است.

4- ممکن است اختلاف بین حداکثر ضریب تمرکز تنش (SCF_{HSS}) و مقادیر SCF در نقاط Saddle و Crown toe زیاد باشد. در این صورت استفاده از معادلاتی که مقادیر SCF را صرفاً در این نقاط ارائه می‌کنند، منجر به کاهش دقت و پیش‌بینی دست پائین مقدار HSS خواهد شد. از طرفی به علت هزینه‌های بسیار بالای بازرسی اعضای قرار گرفته در زیر آب توسط غواص‌ها، عملاً امکان بازرسی تمام اتصالات وجود ندارد. بنابراین بازرسی صرفاً برای چند اتصال بحرانی صورت می‌گیرد [3]. میزان مستعد بودن یک اتصال نسبت به آسیب‌های ناشی از خستگی ارتباط مستقیم با محدوده تنش بحرانی آن اتصال دارد. لذا تعیین مقدار دقیق HSS از اهمیت زیادی برخوردار است.

توزیع تنش در امتداد پنجه جوش در اتصالات لوله‌ای تا حدود زیادی تحت تأثیر خصوصیات هندسی اتصال قرار دارد. به منظور مطالعه رفتار این اتصالات و تسهیل در مرتبط نمودن این رفتار به ویژگی‌های هندسی اتصال، از یک سری پارامترهای هندسی بی بعد استفاده می‌شود. این پارامترها در شکل (1) تعریف شده‌اند.



شکل (1) تعاریف متداول در یک اتصال لوله‌ای KT تحت بارگذاری متعادل محوری که با متصل شدن اعضای مهارى افزوده به یک اتصال DKT تبدیل شده است.

در ادامه، کارهای پژوهشی اخیر با هدف بررسی تمرکز تنش در اتصالات لوله‌ای، به اجمال مرور می‌شود:

معادلات LR [4] برای محاسبه مقادیر SCF در اتصالات T، Y، X، K و KT قابل استفاده هستند. لازم به ذکر است که این معادلات صرفاً قادر به پیش‌بینی مقادیر ضرایب تمرکز تنش در نقاط Saddle و Crown می‌باشند. Lee و Morgan [5] مسئله تمرکز تنش را در اتصالات لوله‌ای K تحت بار متعادل محوری مورد مطالعه قرار دادند. Chang و Dover [3] توزیع مقادیر SCF در امتداد محل تقاطع اعضای اصلی و مهاری در اتصالات T و Y را بررسی نمودند. این پژوهش با استفاده از نتایج تحلیل مدل‌های اجزای محدود که در آنها پروفیل جوش شبیه‌سازی نشده بود، صورت گرفت. Karamanos و همکاران [6] معادلاتی برای تعیین مقادیر SCF در اتصالات لوله‌ای چند صفحه‌ای XX ارائه نمودند. در این مطالعه، برای مدل‌سازی پروفیل جوش از المان 20 گرهی SOLID و برای مدل‌سازی اعضای اصلی و مهاری از المان 8 گرهی SHELL استفاده شده است. Chiew و همکاران [7] ضرایب تمرکز تنش را در اتصالات چند صفحه‌ای XX تحت بارگذاری‌های محوری، لنگر خمشی داخل صفحه و خارج از صفحه مورد مطالعه قرار دادند. Van Wingerde و همکاران [8] معادلات و گراف‌هایی برای تعیین مقادیر SCF در اتصالات K و اتصالات چند صفحه‌ای KK ارائه نمودند. هدف این پژوهش ساده‌سازی معادلات به منظور ایجاد سهولت بیشتر در کاربردهای طراحی بود. Karamanos و همکاران [9] توزیع تنش در اتصالات لوله‌ای چند صفحه‌ای DT را با در نظر گرفتن اثرات خمش مورد بررسی قرار دادند. Shao [10] معادلاتی را برای تعیین مقادیر SCF در اتصالات لوله‌ای K تحت بارهای خمشی ارائه نمود. Gho و Gao [11]، ضرایب تمرکز تنش در اتصالات N کاملاً همپوشان را تحت بار محوری که بر روی عضو مهاری پوشاننده وارد شده بود، مطالعه کردند. Gao [12] معادلاتی برای تعیین مقادیر ضریب تمرکز در اتصالات لوله‌ای کاملاً همپوشان تحت لنگر خمشی خارج از صفحه (OPB) که روی عضو مهاری پوشاننده (Lap brace) وارد شده بود، ارائه نمود. Woghiren و Brennan [13] مقادیر SCF در اتصالات لوله‌ای چند صفحه‌ای KK تقویت شده را مورد بررسی قرار دادند. Shao و همکاران [14] توزیع تنش بحرانی (HSS) در اتصالات لوله‌ای از نوع K را تحت بارگذاری‌های پایه مطالعه نمودند. معادلات ارائه شده توسط Lotfollahi-Yaghin و Ahmadi [15-16] اولین معادلاتی هستند که با استفاده از آنها می‌توان توزیع ضرایب تمرکز تنش را در امتداد پنجه جوش در اتصالات لوله‌ای KT تحت بارگذاری متعادل محوری بدست آورد.

با وجود استفاده گسترده از اتصالات لوله‌ای DKT در سازه‌های فراساحل، تاکنون توزیع تنش در امتداد محل تقاطع اعضای اصلی و مهاری در این نوع اتصال مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله، با بکارگیری نتایج بدست آمده از تحلیل‌های مفصل اجزای محدود، تأثیر اعضای مهاری افزوده هم صفحه که در واقع عامل تفاوت اتصالات لوله‌ای KT و DKT هستند، روی توزیع ضرایب تمرکز تنش (SCFs) در امتداد پنجه جوش مطالعه شده است. بدین منظور تأثیر پارامترهای هندسی بی بعد اتصال شامل τ ، γ و β و همچنین زوایه اتصال عضو مهاری به عضو اصلی (θ) روی توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش تحت بارگذاری متعادل محوری مورد بررسی قرار گرفته است. پارامتر SR به صورت نسبت مقدار SCF در یک نقطه خاص از اتصال DKT به مقدار SCF در همان نقطه در یک اتصال لوله‌ای KT با مشخصات هندسی یکسان تعریف می‌شود.

شبیه‌سازی عددی اتصالات لوله‌ای KT و DKT

به منظور مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی بی بعد بر توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش، 51 اتصال لوله‌ای KT به همراه 51 اتصال DKT با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS [17] مدل‌سازی و تحلیل شدند. تمامی مدل‌ها تحت بارگذاری متعادل محوری قرار داشته و نیروها روی اعضای مهاری کناری (مایل) وارد شدند.

ویژگی‌های هندسی مدل‌های مورد بررسی

مطالعه پارامتری که با استفاده از 102 مدل اجزای محدود صورت گرفته است، دارای دو بخش می‌باشد:

1- مطالعه اصلی که در برگیرنده 54 مدل بوده (27 اتصال KT و 27 اتصال DKT) و هدف از آن بررسی تأثیرات پارامترهای هندسی بی بعد اتصال شامل τ ، γ و β روی توزیع مقادیر SR است. مقادیر پارامترها در این مطالعه به شکل زیر انتخاب شده‌اند:
 $\tau = 0.4, 0.7, 1.0$ ، $\gamma = 10, 25, 40$ و $\beta = 0.3, 0.5, 0.8$. برای تمام این مدل‌ها: $\theta = 45^\circ$. مقادیر اختصاص داده شده به هر کدام از پارامترهای هندسی بی بعد، مقادیر متداول در سازه‌های فراساحلی هستند.

2- مطالعه ثانویه که روی زوایه تمایل عضو مهاری تمرکز داشته و هدف از آن بررسی تأثیر پارامتر θ روی توزیع مقادیر SR و مطالعه اندرکنش پارامتر مذکور با پارامترهای هندسی بی بعد اتصال است. مقادیر پارامترها در این مطالعه به شکل زیر انتخاب شده‌اند:
 $\theta = 30^\circ, 60^\circ$ ، $\tau = 0.4, 1.0$ ، $\gamma = 10, 40$ و $\beta = 0.3, 0.5, 0.8$. در این مطالعه ثانویه، 48 مدل (24 اتصال KT و 24 اتصال DKT) بکار رفته است.

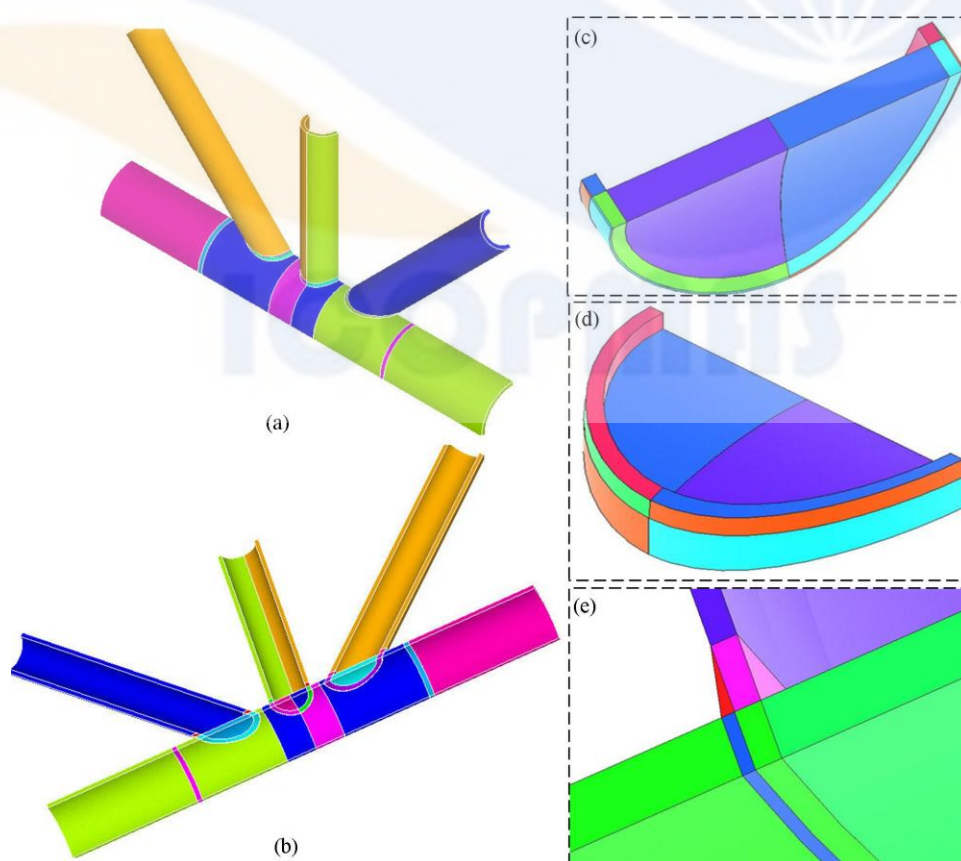
خصوصیات هندسی 6 عضو مهاری در یک مدل (شامل 2 عضو مهاری مرکزی و 4 عضو مهاری کناری) شامل قطر، ضخامت جدار و طول یکسان می‌باشند. مقادیر قطر و ضخامت جدار، متناسب با مقادیر پارامترهای τ ، γ و β از یک مدل به مدل دیگر تغییر می‌کنند. بر اساس نتایج بدست آمده توسط Lotfollahi-Yaghin و Ahmadi [15-16]، فاصله آزاد نسبی ($\zeta = g / D$) تأثیر قابل توجهی روی مقادیر و همچنین توزیع ضرایب تمرکز تنش در امتداد پنجه جوش ندارد. لذا برای تمام اتصالات مورد بررسی، مقدار واقع بینانه $\zeta = 0.4$ در نظر گرفته شد. 102 مدل مورد بررسی، بازه‌های زیر از پارامترهای هندسی بی‌بعد را پوشش می‌دهند:

$$\begin{aligned} 0.3 &\leq \beta \leq 0.8 \\ 10 &\leq \gamma \leq 40 \\ 0.4 &\leq \tau \leq 1.0 \\ 30^\circ &\leq \theta \leq 60^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

انتخاب نوع المان و روش تولید مش

به منظور مدل‌سازی اعضای اصلی و مهاری و همچنین پروفیل جوش توسط نرم افزار ANSYS از المان سه بعدی SOLID 95 استفاده شده است. استفاده از این المان برای مدل‌سازی احجام نامنظم با دقت بالا بسیار مفید است. این المان 20 گرهی بوده و در هر گره دارای 3 درجه آزادی است. المان مذکور قابلیت هر گونه جانمایی فضایی دلخواه را دارا می‌باشد. با استفاده از این المان، امکان لحاظ نمودن خصوصیات نظیر پلاستیسیته، خزش، سخت شدگی تنش و همچنین تغییر شکل‌ها و کرنش‌های بزرگ وجود دارد. از آنجا که محل تقاطع اعضای اصلی و مهاری در یک اتصال لوله‌ای، یک منحنی فضائی است و پروفیل جوش در امتداد این منحنی فضائی، تشکیل یک حجم پیچیده را می‌دهد، مشکل‌ترین مسئله در مدل‌سازی اتصالات لوله‌ای که شبیه‌سازی پروفیل جوش در آنها در نظر گرفته شده است، تولید مش با کیفیت مطلوب می‌باشد.

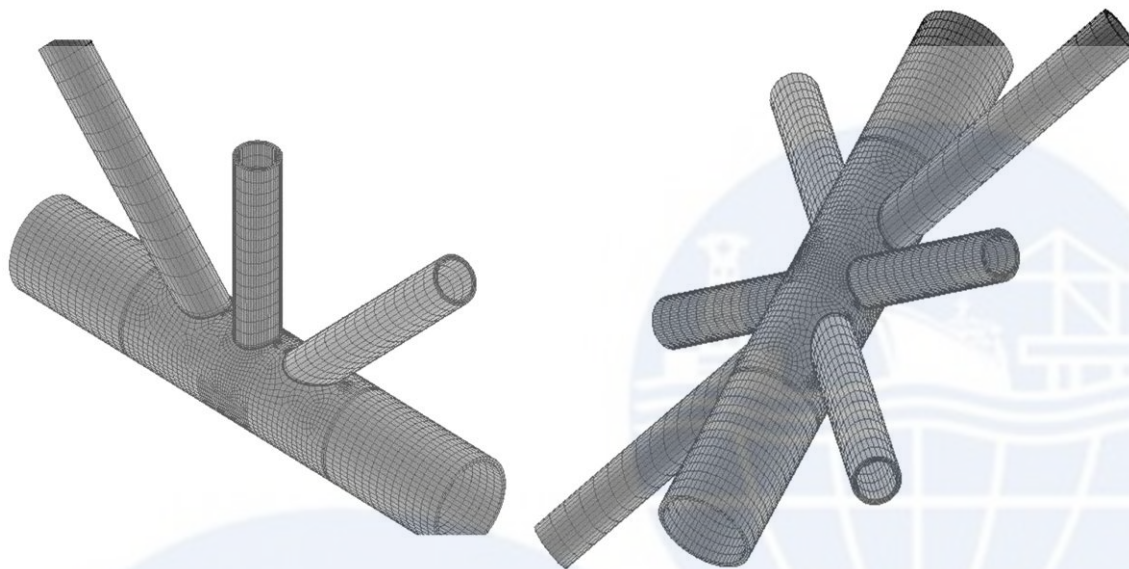
در این مقاله، به منظور تضمین کیفیت مش تولیدی، از روشی موسوم به روش زیر ناحیه (Sub-zone) برای تولید مش استفاده شده است. در این روش، کل سازه متناسب با نیازهای محاسباتی به چندین ناحیه تقسیم می‌شود. در فرایند ایجاد مش به روش Sub-zone، مش هر ناحیه به صورت مجزا تولید شده و سپس با الحاق (Merge) مش‌های تمام Sub-zone ها، مش کل سازه بدست می‌آید. این روش به آسانی قادر است کیفیت و کمیت مش تولیدی را کنترل نموده و از تولید المان‌های بد شکل جلوگیری نماید. یک اتصال لوله‌ای DKT متداول که به چندین Sub-zone تقسیم شده است در قسمت‌های (a) و (b) از شکل (2) قابل مشاهده است. در شکل (2)، ناحیه‌های مجاور مجزا با رنگ‌های متفاوت نشان داده شده‌اند.



شکل 2) یک اتصال لوله‌ای DKT متداول که به چندین Sub-zone تقسیم شده است: (a) و (b): نمای جلو و عقب کل مدل، (c) تا (e):

Sub-zone های نواحی مجاور محل تقاطع اعضای اصلی و مهاري

همان طور که در قسمت‌های (a) و (b) از شکل (2) قابل مشاهده است، به علت وجود تقارن در هندسه و بارگذاری، صرفاً یک چهارم اتصال کامل مدل سازی شده است. قسمت‌های (c) تا (e) در شکل (2)، نشان دهنده Sub-zone های نواحی مجاور محل تقاطع اعضای اصلی و مهاري هستند. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که به منظور تولید مش با کیفیت قابل قبول و در عین حال کمیت کنترل شده، یک اتصال لوله‌ای DKT متداول تحت بارگذاری متعادل محوری، به 32 ناحیه تقسیم شده است. در شکل (3) نمونه‌هایی از مش تولید شده با استفاده از این روش برای اتصالات لوله‌ای KT و DKT نشان داده شده است. لازم به ذکر است به منظور بررسی همگرایی تحلیلی اجزای محدود، پیش از تولید 102 مدل مورد مطالعه، تست همگرایی با بکارگیری مش‌هایی با چگالی‌های مختلف انجام گرفته است.



شکل 3) مش تولید شده برای اتصالات لوله‌ای KT و DKT

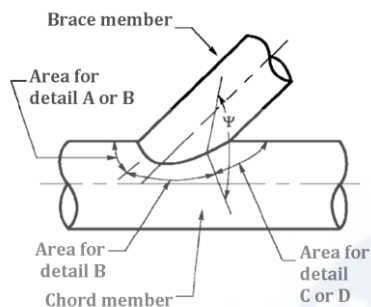
مدل سازی پروفیل جوش

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که دقت نتایج بدست آمده برای توزیع تنش را متأثر می‌سازد، مدل‌سازی دقیق پروفیل جوش است. در این پژوهش، ابعاد جوش در امتداد محل تقاطع اعضای اصلی و مهاري، منطبق بر ضوابط AWS [18] می‌باشد. طبق این ضوابط، ابعاد جوش تابعی از زاویه دی‌هدرال ψ می‌باشد که همان طور که در شکل (4) نشان داده شده، زاویه بین صفحات مماس بر اعضای اصلی و مهاري در امتداد منحنی محل تقاطع است. جزئیات پروفیل جوش بر مبنای ضوابط AWS در شکل (5) نشان داده شده است. در این شکل، L و t_w به ترتیب بیانگر طول و ضخامت جوش هستند. ابعاد جوش تعیین شده توسط AWS [18] در جدول (1) ارائه شده است.

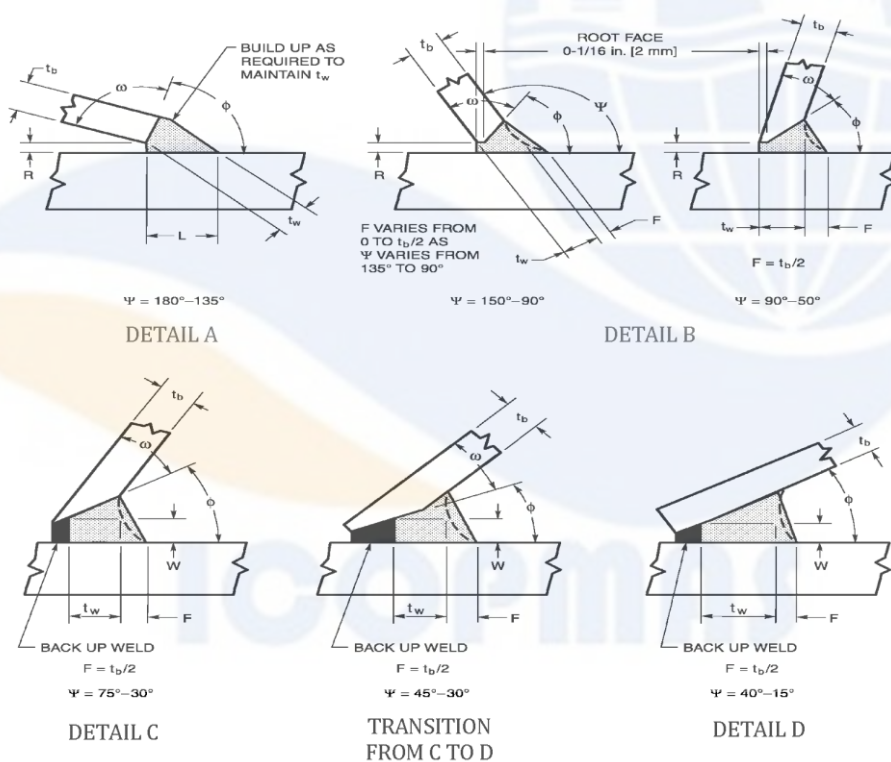
شرایط مرزی و روش بارگذاری

به علت وجود تقارن در هندسه و بارگذاری اتصالات لوله‌ای DKT مورد بررسی، صرفاً مدل‌سازی یک چهارم اتصال کافی است. لذا یک چهارم اتصال مدل شده و در صفحه تقارن، شرایط مرزی متقارن برای مدل تعریف می‌شود. با تعریف این شرایط مرزی، از تغییر مکان گره‌های واقع در صفحه تقارن در جهت عمود بر این صفحه جلوگیری خواهد شد. بر اساس نتایج بدست آمده توسط Morgan و Lee [19]، تغییر شرایط مرزی از گیردار به مفصلی منجر به 15% افزایش در مقادیر SCF در مدل‌های با $\alpha = 6$ و فقط 8% افزایش در مدل‌های با $\alpha = 8$ می‌گردد. لذا با توجه به این واقعیت که اثر شرایط مرزی انتهای عضو اصلی صرفاً در اتصالات با شرایط $\alpha < 8$ که دارای مقادیر بزرگ β و γ هستند قابل توجه بوده و اتصالاتی با چنین شرایط هندسی معمولاً در عمل چندان بکار نمی‌روند، در این مطالعه شرایط مرزی دو انتهای عضو اصلی به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. به منظور کسب اطمینان از این مسئله که مقادیر تنش در محل تقاطع اعضای اصلی و مهاري از شرایط مرزی انتهای عضو اصلی متأثر نمی‌شود، عضو اصلی باید دارای طول کافی باشد. Eftymiou [20] نشان داد این طول معمولاً 6 برابر قطر عضو اصلی در نظر گرفته می‌شود. لذا می‌توان گفت در مدل‌هایی که در آنها $\alpha \geq 12$ است، شرایط مرزی انتهای عضو اصلی تأثیری بر مقادیر SCF ندارد. بنابراین در پژوهش حاضر، مقدار $\alpha = 12$ برای تمام مدل‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به مطالعات

Efthymiou [20] می‌توان نتیجه گرفت که نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر برای تمام اتصالات با $\alpha \geq 12$ صحیح خواهد بود. تأثیر طول عضو مهاري روی مقادير SCF در محل تقاطع اعضاي اصلي و مهاري، توسط Chang و Dover [21] مطالعه شده است. بر اساس نتایج این بررسی، در صورتی که مقدار پارامتر α_B بزرگتر یا مساوی 8 در نظر گرفته شود، می‌توان از تأثیر طول عضو مهاري بر توزیع تنش جلوگیری نمود. لذا برای تمام اتصالات، مقدار $\alpha_B = 8$ در نظر گرفته شده است. به منظور ایجاد سهولت بیشتر در تعیین مقادير ضرایب تمرکز تنش در امتداد پنجه جوش، بارگذاری محوري وارد بر اعضاي مهاري مایل، به صورت تنش محوري واحد (IMPa) اعمال شد. لذا مقدار تنش در هر نقطه حول پنجه جوش، برابر با ضریب تمرکز تنش در آن نقطه بوده و توزیع تنش در امتداد پنجه جوش معادل با توزیع مقادير SCF خواهد بود.



شکل 4) تعریف زاویه دی هدرال طبق AWS [18]



شکل 5) جزئیات پروفیل جوش بر مبنای ضوابط AWS [18]

جدول 1) ابعاد جوش تعیین شده توسط AWS [18]

Detail ID (شکل 4 را ببینید)	پارامتر				
	Root opening	Joint included angle (ϕ)		Complete weld	
		Max	Min	t_w	L_w
Detail A ($\Psi=180^\circ-135^\circ$)	1.6-5 mm	90°	45°	$\leq t_1$	$\geq t_1/\sin\Psi$ but $\leq 1.75 t_1$
Detail B	1.6-6	90° for $\Psi \leq 150^\circ$	37.5° ; if unless use	$\geq t_1$ for $\Psi \geq 90^\circ$	$\geq t_1/\sin\Psi$ for $\Psi < 90^\circ$

($\Psi=150^\circ-50^\circ$)	mm		Detail C		$\Psi \leq 150^\circ$
Detail C	3-13	40°; if more use	$\Psi/2$	$\geq t_1/\sin\Psi$ but	Weld built up to
($\Psi=75^\circ-30^\circ$)	mm	Detail B		$\leq 1.75 t_1$	meet
Detail D	3-13				$\geq 2t_1$
($\Psi=40^\circ-15^\circ$)	mm				

روش تحلیل و برون‌یابی

بنا به توصیه N'Diaye و همکاران [22]، تحلیل استاتیکی از نوع ارتجاعی خطی برای تعیین مقادیر SCF در امتداد پنجه جوش اتصالات لوله‌ای مناسب می‌باشد. در این مقاله نیز از این نوع تحلیل استفاده گردیده است. مدول الاستیسیته فولاد برابر 207 GPa و ضریب پواسون برابر 0/3 در نظر گرفته شده است. یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی مقاومت خستگی اتصالات لوله‌ای، استفاده از تنش‌های هندسی در پنجه جوش است. برای تعیین محدوده برون‌یابی به منظور برداشت نتایج، از توصیه‌های پیشنهادی توسط کمیته XV-E انستیتوی بین‌المللی جوش (IIW-XV-E) [23] استفاده شده است. حداقل و حداکثر فاصله ناحیه برون‌یابی از پنجه جوش به ترتیب برابر 0.4T و 1.4T در نظر گرفته شده که T ضخامت عضو اصلی می‌باشد. لذا مقدار تنش در هر نقطه حول پنجه جوش از برون‌یابی خطی مقادیر تنش در نقاطی که به ترتیب در فواصل 0.4T و 1.4T از پنجه جوش قرار گرفته‌اند بدست می‌آید. بنا به مطالب فوق، مقدار تنش هندسی پیک با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{\text{weld toe}} = 1.4\sigma_1 - 0.4\sigma_2 \quad (1)$$

در رابطه فوق، $\sigma_{\text{weld toe}}$ مقدار تنش von Mises در پنجه جوش بوده و σ_1 و σ_2 به ترتیب مقادیر تنش von Mises در نقاطی که فاصله 0.4T و 1.4T از پنجه جوش می‌باشند.

صحت سنجی مدل اجزای محدود

به منظور حصول اطمینان از صحت روش‌های بکار رفته برای مدل‌سازی اتصال از جمله نحوه مدل‌سازی پروفیل جوش و روش بکار رفته برای تولید مش و در نتیجه حصول اطمینان نسبت به قابل اعتماد بودن نتایج، صحت سنجی مدل اجزای محدود ضروری است. از آنجاکه تاکنون هیچ پژوهش آزمایشگاهی برای تعیین ضرایب تمرکز تنش در اتصالات لوله‌ای KT و DKT فولادی صورت نگرفته است، لذا برای صحت سنجی مدل اجزای محدود از نتایج آزمایشگاهی موجود برای اتصالات T، Y و K استفاده شده است. بارگذاری اتصالات T و Y، بار محوری بوده و بار وارد بر اتصال K نیز متعادل محوری می‌باشد. در هر حالت اتصال مورد نظر توسط همان روش‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی اتصالات KT و DKT، مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از تحلیل با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در گزارش HSE OTH 354 [4] و همچنین مقادیر بدست آمده از معادلات پارامتری ارائه شده توسط لویدز رجیستر (معادلات LR) [4] مقایسه شده است.

نتایج صحت سنجی که برای نقاط Saddle و Crown به شکل مجزا ارائه شده در جدول (1) خلاصه شده است. در این جدول، e_1 نشان دهنده درصد اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر بدست آمده از معادلات LR بوده و e_2 نشانگر درصد اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از مدل‌های اجزای محدود پژوهش حاضر می‌باشد. بنابراین $|e_1| - |e_2|$ بیانگر تفاوت دقت معادلات LR و مدل‌های اجزای محدود این مطالعه خواهد بود. چنانچه مقدار $|e_1| - |e_2|$ دارای علامت مثبت باشد، بدین معنی است که مدل اجزای محدود ارائه شده در پژوهش حاضر، در پیش‌بینی مقادیر SCF، در مقایسه با معادلات LR از دقت بیشتری برخوردار است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود با داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر بدست آمده از معادلات LR نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل اجزای محدود می‌باشد.

جدول 1) مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر بدست آمده از معادلات LR [4]

$ e_1 - e_2 $ (%)	e_2^* (%)	e_1^{**} (%)	FE	معادلات LR	آزمایش	موقعیت	β	γ	τ	α	θ	D (mm)	نوع اتصال
+7	1	8	11/26	10/54	11/4	Saddle	0/8	20/3	0/99	6/2	90	508	T
+12	15	27	4/6	3/92	5/4	Crown							
-2	34	32	5/46	5/48	8/3	Saddle	0/8	20/3	1/05	6/2	45	508	Y
+25	0	25	4/7	3/5	4/7	Crown							
+29	0/5	29/5	6/76	4/8	6/8	Saddle	0/5	20/3	1/0	12/6	45	508	K***
-3	-4	1	4/8	4/56	4/6	Crown							

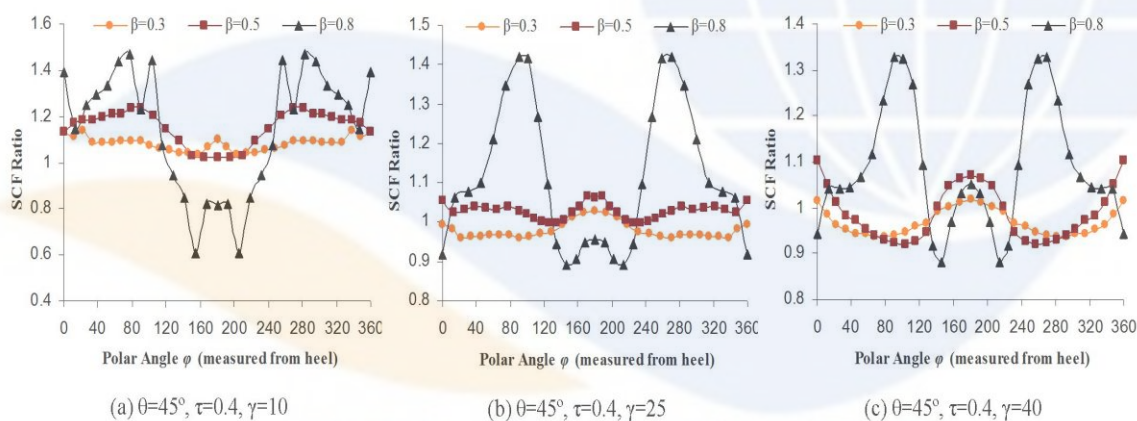
* $e_1 = (\text{Test} - \text{LR Eqs.}) / \text{Test}$ ** $e_2 = (\text{Test} - \text{FE}) / \text{Test}$ *** $\zeta = 0.15$

تأثیر پارامترهای هندسی بی بعد بر توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش

به منظور بررسی تفاوت توزیع تنش در اتصالات KT و DKT، توزیع مقادیر SR که نسبت مقدار SCF در یک نقطه خاص از اتصال DKT به مقدار SCF در همان نقطه در یک اتصال لوله‌ای KT با مشخصات هندسی یکسان می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفته است. همان طور که پیشتر اشاره شد، توزیع تنش در امتداد پنجه جوش در اتصالات لوله‌ای تا حدود زیادی تحت تأثیر خصوصیات هندسی اتصال قرار دارد. برای بررسی تأثیر هندسه اتصال بر توزیع مقادیر SR، انجام مطالعه پارامتری ضروری است. در این پژوهش، ابتدا تأثیر سه پارامتر هندسی بی بعد متداول (β و γ و τ) و اندرکنش آنها بررسی شده و سپس اثر زاویه اتصال عضو مهاری به عضو اصلی (θ) روی توزیع مقادیر SR و اندرکنش این پارامتر با پارامترهای بی بعد اتصال مورد مطالعه قرار گرفته است.

تأثیر پارامتر β بر توزیع مقادیر SR

در این بخش، نتایج بررسی تأثیر پارامتر β روی توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش ارائه می‌شود. در این مطالعه، نقش پارامترهای γ و τ در نحوه تأثیرگذاری پارامتر β روی توزیع مقادیر SR بررسی شده است. از آنجا که β نسبت قطر عضو مهاری به قطر عضو اصلی است، افزایش β در مدل‌هایی که قطر عضو اصلی در آنها ثابت است، منجر به افزایش قطر عضو مهاری خواهد شد. به عنوان مثال، توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش برای 9 عدد از مدل‌های مورد بررسی در شکل (6) ارائه شده است. در این شکل، محور افقی نشان دهنده مقدار زاویه قطبی (φ) در امتداد منحنی 360 درجه خط جوش است. این زاویه نسبت به نقطه Crown heel سنجیده می‌شود. لذا مقدار φ در نقاط Saddle، Crown heel و Saddle به ترتیب صفر، 90 و 180 درجه خواهد بود. محور قائم در این شکل نشانگر مقدار SR در هر نقطه دلخواه در امتداد پنجه جوش است. در هر کدام از سه نمودار شکل (6)، توزیع مقادیر SR به ازای سه مقدار مختلف از β (0/3، 0/5 و 0/8) ارائه شده است. مقدار پارامترهای τ و γ برای هر کدام از این سه نمودار، در پی‌نویس نمودار مربوطه ذکر شده است. لازم به ذکر است که 9 نمودار به منظور مطالعه تأثیر پارامتر β روی توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش مورد استفاده قرار گرفت که جهت حفظ اختصار صرفاً 3 نمودار در این بخش ارائه شده است.



شکل (6) تأثیر پارامتر β بر توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش

از بررسی تأثیر پارامتر β روی توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش می‌توان نتیجه گرفت که افزایش β منجر به افزایش اختلاف بین مقدار SCF در یک نقطه خاص از اتصال DKT و مقدار SCF در همان نقطه در یک اتصال لوله‌ای KT (با مشخصات هندسی یکسان) می‌شود. به ازای مقادیر بزرگ β (مانند $\beta = 0.8$) مقدار SR در نقطه Saddle حداکثر مقدار را دارد. همان طور که در نمودار (a) از شکل (6) قابل مشاهده است، افزایش SCF در یک اتصال DKT با $\theta = 45^\circ$ ، $\tau = 0.4$ و $\gamma = 10$ نسبت به اتصال لوله‌ای KT مشابه، در حدود 50٪ است. با توجه به این اختلاف قابل توجه، استفاده از معادلات ارائه شده برای اتصالات KT [15-16] برای محاسبه مقادیر SCF در اتصالات DKT مناسب نبوده و ارائه معادلات پارامتری برای محاسبه توزیع ضرایب تمرکز تنش در اتصالات لوله‌ای DKT ضروری است.

تأثیر پارامتر τ بر توزیع مقادیر SR

در این بخش، نتایج بررسی تأثیر پارامتر τ روی توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش ارائه می‌شود. در این مطالعه، نقش پارامترهای β و γ در نحوه تأثیرگذاری پارامتر τ روی توزیع مقادیر SR بررسی شده است. از آنجا که τ نسبت ضخامت جدار عضو مهاری به ضخامت جدار عضو

اصلی بوده و γ نسبت شعاع به ضخامت جدار عضو اصلی است، افزایش τ در مدل‌هایی که مقدار γ در آنها ثابت است، منجر به افزایش ضخامت جدار عضو مهاري خواهد شد.

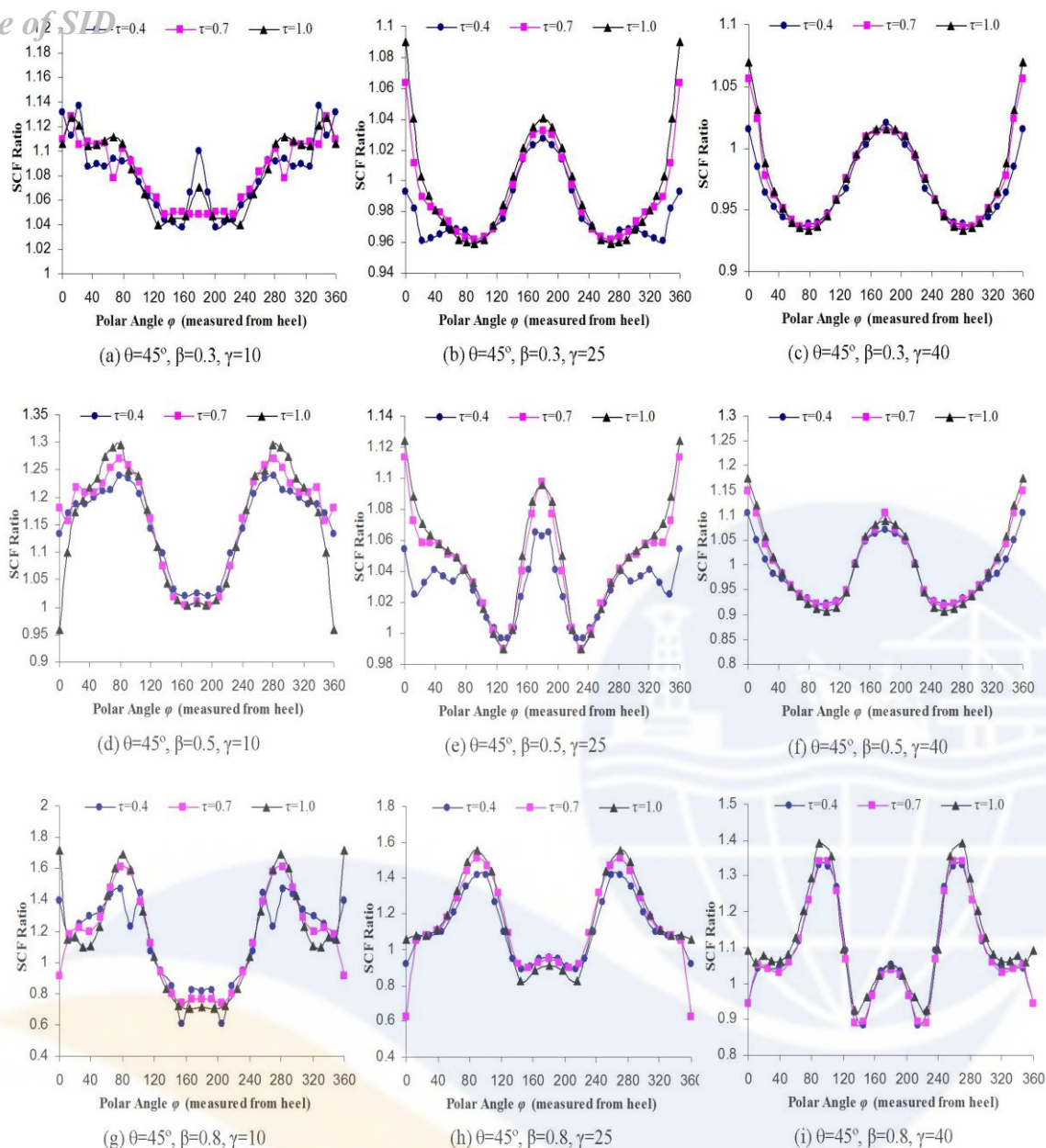
به منظور بررسی تأثیر پارامتر τ بر توزیع SR و مطالعه اثر پارامترهای γ و β بر نحوه تأثیر گذاری پارامتر τ ، 9 نمودار مقایسه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. توزیع مقادیر SR برای مدل‌های با $\beta = 0.3$ در نمودارهای (a) تا (c) از شکل (7) ارائه شده است. هر کدام از این 3 نمودار، توزیع مقادیر SCF را به ازای سه مقدار متفاوت از τ (0/4، 0/7 و 1/0) نشان می‌دهند. مقدار پارامتر γ در نمودارهای (a) تا (c) به ترتیب 10، 25 و 40 می‌باشد. 6 نمودار دیگر که در قسمت‌های (d) تا (i) ارائه شده‌اند مربوط به مدل‌های دارای β برابر 0/5 و 0/8 هستند. در هر کدام از این نمودارها، مقادیر پارامترهای γ و β در پی‌نویس نمودار مربوطه داده شده است.

پس از بررسی اتصالات با شرایط هندسی مختلف، نتایج زیر در مورد نحوه تأثیر پارامتر τ بر توزیع مقادیر SR قابل استنباط است:

1- مقدار پارامتر τ تأثیر چندانی روی مقدار SR ندارد. ولی تغییر γ منجر به تغییر قابل توجه در شکل توزیع SR می‌شود. به علاوه ملاحظه می‌شود که شکل منحنی‌های SR در اتصالات با β و γ بزرگ (به عنوان مثال $\beta = 0.8$ و $\gamma = 40$)، شباهت بیشتری به هم دارند.

2- به ازای مقادیر بزرگ β (به عنوان مثال $\beta = 0.8$)، مقدار SR می‌تواند در حدود 1/7 باشد. این اختلاف قابل توجه (70%) بین مقدار SCF در یک نقطه خاص از اتصال DKT و مقدار SCF در همان نقطه در یک اتصال لوله‌ای KT با مشخصات هندسی یکسان، ضرورت استفاده از معادلات پارامتری مخصوص اتصالات DKT را برای محاسبه مقادیر SCF روشن می‌سازد. ضمناً با توجه به این اختلاف قابل توجه، روشن است که استفاده از معادلات ارائه شده برای اتصالات KT [15-16] برای محاسبه مقادیر SCF در اتصالات DKT ممکن است منجر به پیش‌بینی‌های خیلی دست‌پاینی شود.

3- بسته به خصوصیات هندسی اتصال، حداکثر اختلاف بین مقدار SCF در اتصالات KT و DKT (حداکثر SR) در یکی از نقاط Saddle یا Crown رخ داده ($\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$) و معمولاً بین این نقاط اتفاق نمی‌افتد.



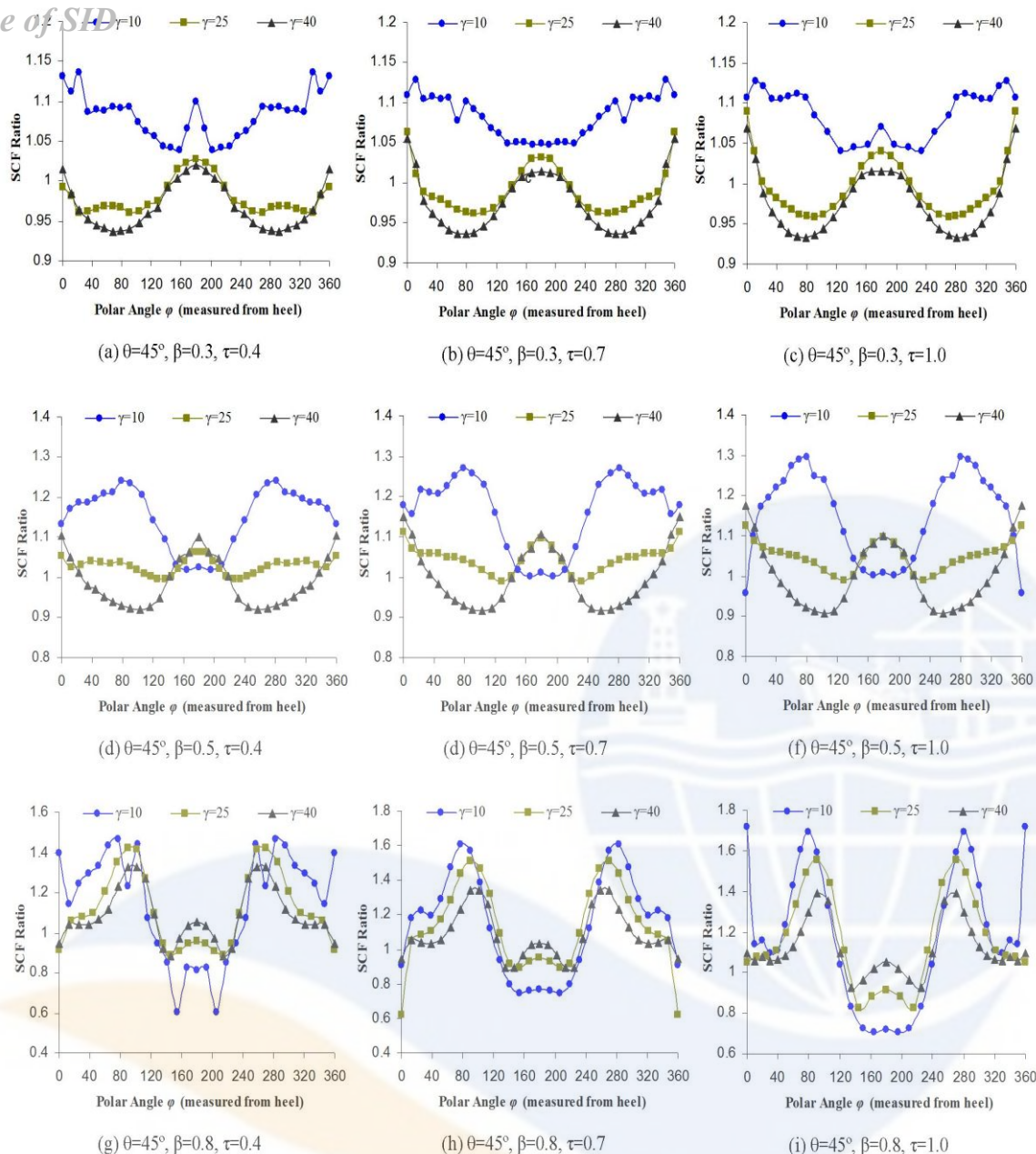
شکل 7) تأثیر پارامتر τ بر توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش

تأثیر پارامتر γ بر توزیع مقادیر SR

در این بخش، نتایج بررسی تأثیر پارامتر γ روی توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش ارائه می‌شود. در این مطالعه، نقش پارامترهای β و τ در نحوه تأثیرگذاری پارامتر γ روی توزیع مقادیر SR بررسی شده است. از آنجا که γ نسبت شعاع به ضخامت جدار عضو اصلی است، افزایش γ در مدل‌هایی که قطر عضو اصلی در آنها ثابت است، منجر به کاهش ضخامت جدار عضو اصلی خواهد شد.

به منظور بررسی تأثیر پارامتر γ بر توزیع SR و مطالعه اثر پارامترهای τ و β بر نحوه تأثیرگذاری پارامتر τ ، 9 نمودار مورد استفاده قرار گرفت. توزیع مقادیر SR برای مدل‌های با $\beta = 0.3$ در نمودارهای (a) تا (c) از شکل (8) ارائه شده است. هر کدام از این 3 نمودار، توزیع مقادیر SCF را به ازای سه مقدار متفاوت از γ (10، 25 و 40) نشان می‌دهند. مقدار پارامتر τ در نمودارهای (a) تا (c) به ترتیب 0/4، 0/7 و 1/0 می‌باشد.

6 نمودار دیگر که در قسمت‌های (d) تا (i) از شکل (8) ارائه شده‌اند مربوط به مدل‌های دارای β برابر 0/5 و 0/8 هستند. در هر کدام از این نمودارها، مقادیر پارامترهای τ و β در پی‌نویس نمودار مربوطه داده شده است.



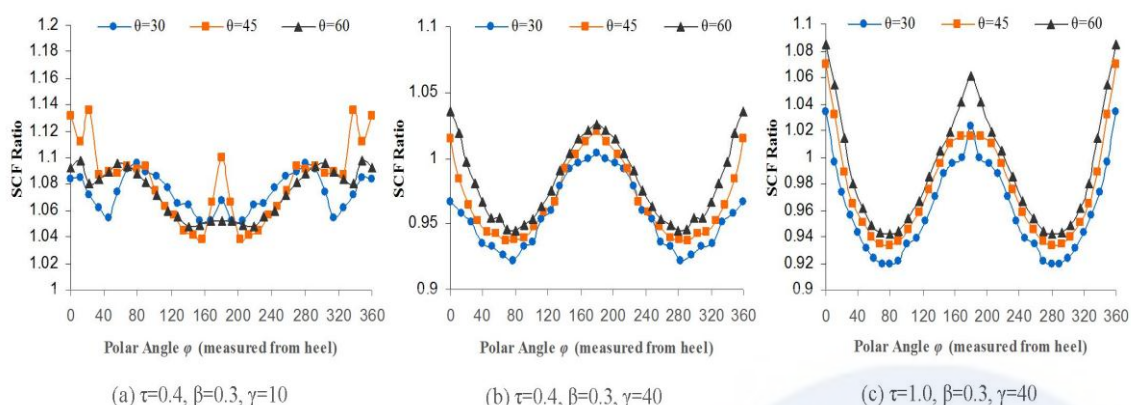
شکل 8) تأثیر پارامتر γ بر توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش

عمده‌ترین نتایج حاصل از بررسی نحوه تأثیر پارامتر γ بر توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش را به شکل زیر می‌توان خلاصه نمود:

- 1- در اتصالات دارای مقادیر کوچک β (به عنوان مثال $\beta = 0.3$) و مقادیر متوسط و بزرگ γ (به عنوان مثال $\gamma = 25, 40$)، مقادیر SR در بسیاری از نقاط در امتداد پنجه جوش کوچکتر از واحد هستند. در حالی که در اتصالات با β و γ کوچک (به عنوان مثال $\beta = 0.3$ و $\gamma = 10$)، مقادیر SR بزرگتر از واحد بوده و ممکن است تا $1/2$ افزایش پیدا کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت به ازای مقادیر کوچک β (به عنوان مثال $\beta = 0.3$)، چنانچه قطر عضو اصلی ثابت باشد، کاهش ضخامت جدار عضو اصلی منجر به کاهش مقادیر SR خواهد شد.
- 2- در اتصالات دارای مقادیر متوسط β (به عنوان مثال $\beta = 0.5$) و مقادیر متوسط و بزرگ γ (به عنوان مثال $\gamma = 25, 40$)، مقادیر SR در تمام نقاط در امتداد پنجه جوش بزرگتر از واحد هستند.
- 3- در مقایسه با مقادیر کوچک و متوسط β ($\beta = 0.3, 0.5$)، پارامتر γ به ازای مقادیر بزرگ β (به عنوان مثال $\beta = 0.8$) تأثیر کمتری روی شکل منحنی‌های SR دارد.

تأثیر پارامتر θ بر توزیع مقادیر SR

به منظور مطالعه تأثیر زاویه تمایل عضو مهارى (θ) بر توزیع مقادیر SR و بررسی اندرکنش بین θ و پارامترهای هندسی بی بعد اتصال τ و γ مقدار مختلف برای θ در نظر گرفته شد (30، 45 و 60 درجه). شکل (9) تأثیر پارامتر θ را بر توزیع مقادیر SR به ازای مقادیر مختلف τ و γ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (9) ملاحظه می‌شود که پارامتر θ در مقایسه با سایر پارامترها تأثیر کمتری روی مقدار SR دارد.



شکل (9) تأثیر پارامتر θ بر توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از تشریح جنبه‌های مختلف مدل‌سازی اجزای محدود اتصالات لوله‌ای KT و DKT به منظور محاسبه ضرایب تمرکز تنش، با بکارگیری نتایج بدست آمده از تحلیل‌های مفصل اجزای محدود، تأثیر اعضای مهارى افزوده هم صفحه که در واقع عامل تفاوت اتصالات لوله‌ای KT و DKT هستند، روی توزیع ضرایب تمرکز تنش (SCFs) در امتداد پنجه جوش مطالعه شد. بدین منظور تأثیر پارامترهای هندسی بی بعد اتصال شامل τ ، γ و β و همچنین زاویه اتصال عضو مهارى به عضو اصلی (θ) روی توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش تحت بارگذاری متعادل محوری مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر SR به صورت نسبت مقدار SCF در یک نقطه خاص از اتصال DKT به مقدار SCF در همان نقطه در یک اتصال لوله‌ای KT با مشخصات هندسی یکسان تعریف می‌شود.

به ازای مقادیر بخصوصی از پارامترهای بی بعد، تفاوت قابل توجهی بین مقادیر SCF در اتصالات KT و DKT با خصوصیات هندسی یکسان مشاهده گردید. این نتیجه، لزوم استفاده از معادلات پارامتری که مخصوص اتصالات لوله‌ای DKT طراحی شده‌اند را روشن می‌سازد. ضمناً با توجه به این اختلاف قابل توجه، روشن است که استفاده از معادلات ارائه شده برای اتصالات KT [15-16] برای محاسبه مقادیر SCF در اتصالات DKT ممکن است منجر به پیش‌بینی‌های خیلی دست پائینی شود. لازم به ذکر است جزئیات نتایج بدست آمده از بررسی تأثیر خصوصیات هندسی اتصال بر توزیع مقادیر SR در امتداد پنجه جوش، به طور کامل در متن مقاله مورد بحث قرار گرفته و به منظور حفظ اختصار از تکرار این مطالب در این بخش خودداری شده است.

مراجع

- [1] American Petroleum Institute, (1993), Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms: RP2A-WSD, USA.
- [2] Pang, H.L.J., Lee, C.W., (1995), The Three Dimensional Finite Element Analysis of a Tubular T-joint under Combined Axial and Bending Loading, International Journal of Fatigue, Vol. 17, 313-20.
- [3] Chang, E., Dover, W.D., (1999), Prediction of Stress Distributions Along the Intersection of Tubular Y and T-joints, International Journal of Fatigue, Vol. 21, 361-381.
- [4] UK Health and Safety Executive (1997), OTH 354: Stress Concentration Factors for Simple Tubular Joints- Assessment of Existing and Development of New Parametric Formulae, prepared by Lloyd's Register of Shipping.
- [5] Morgan, M.R., Lee, M.M.K., (1997), Prediction of Stress Concentrations and Degrees of Bending in Axially Loaded Tubular K-joints, Journal of Constructional Steel research, Vol. 45, 67-97.

- [6] Karamanos, S.A., Romeijn, A., Wardenier, J., (1999), Stress Concentrations in Multi-planar Welded CHS XX-connections, *Journal of Constructional Steel research*, Vol. 50, 259-282.
- [7] Chiew, S.P., Soh, C.K., Wu, N.W., (2000), General SCF Design Equations for Steel Multiplanar Tubular XX-joints, *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, 283-293.
- [8] Wingerde, A.M., Packer, J.A., Wardenier, J., (2001), Simplified SCF Formulae and Graphs for CHS and RHS K- and KK-connections, *Journal of Constructional Steel research*, Vol. 57, 221-252.
- [9] Karamanos, S.A., Romeijn, A., Wardenier J., (2002), SCF Equations in Multi-planar Welded Tubular DT-joints Including Bending Effects, *Marine Structures*, Vol. 15, 157-173.
- [10] Shao, Y.B., (2004), Proposed Equations of Stress Concentration Factor (SCF) for Gap Tubular K-joints Subjected to Bending Load, *International Journal of Space Structures*, Vol. 19, 137-47.
- [11] Gho, W.M., Gao, F., (2004), Parametric Equations for Stress Concentration Factors in Completely Overlapped Tubular K (N)-joints, *Journal of Constructional Steel research*, Vol. 60, 1761-1782.
- [12] Gao, F., (2006), Stress and Strain Concentrations of Completely Overlapped Tubular Joints under Lap Brace OPB Load, *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, 861-871.
- [13] Woghiren, C.O., Brennan, F.P., (2009), Weld Toe Stress Concentrations in Multi Planar Stiffened Tubular KK Joints, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, 164-172.
- [14] Shao Y.B., Du, Z.F., Lie, S.T., (2009), Prediction of Hot Spot Stress Distribution for Tubular K-joints under Basic Loadings, *Journal of Constructional Steel research*, Vol. 65, 2011-2026.
- [15] Lotfollahi-Yaghin, M.A., Ahmadi, H., (2009), "Numerical Parametric Study of Stress Concentration along the Intersection of Tubular KT-Joints Subjected to Balanced Axial Loading", *Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan.
- [16] Lotfollahi-Yaghin, M.A., Ahmadi, H., (2010), Effect of Geometrical Parameters on SCF Distribution along the Weld Toe of Tubular KT-joints under Balanced Axial Loads, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, 703-719.
- [17] ANSYS user's manual (2007), Swanson Analysis Systems Inc., USA.
- [18] American Welding Society (AWS), (2002), *Structural Welding Code: AWS D 1.1*, USA.
- [19] Morgan, M.R., Lee, M.M.K., (1997), Prediction of Stress Concentrations and Degrees of Bending in Axially Loaded Tubular K-joints, *Journal of Constructional Steel research*, Vol. 45, 67-97.
- [20] Efthymiou, M., (1988), *Development of SCF Formulae and Generalized Influence Functions for Use in Fatigue Analysis*, OTJ 88, Surrey, UK.
- [21] Chang, E., Dover, W.D., (1999), Parametric Equations To Predict Stress Distributions along the Intersection of Tubular X and DT-joints, *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, 619-635.
- [22] N'Diaye, A., Hariri, S., Pluinage, G., Azari, Z., (2007), Stress Concentration Factor Analysis for Notched Welded Tubular T-joints, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, 1554-1570.
- [23] IIW-XV-E, (1999), *Recommended Fatigue Design Procedure for Welded Hollow Section Joints*, International Institute of Welding, France.
- [24] Department of Energy (1983), *Background Notes to the Fatigue Guidance of Offshore Tubular Joints*, HMSO, UK.


 The logo for ICOPMAS (International Conference on Offshore and Polar Mechanics and Structures) is displayed in a large, light blue, semi-transparent font across the bottom center of the page.