تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی ضرایب تمرکز تنش در اتصالات لوله‌ای T شکل سکوهای شابلونی تحت بارگذاری محوری

حمید احمدی [۱*]، محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین [۲]، میرمحمد فاتحی [۳]

[۱] استادیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز؛ h-ahmadi@tabrizu.ac.ir
[۲] استاد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز؛ lotfollahi@tabrizu.ac.ir
[۳] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز؛ mfatehi90@ms.tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۷/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۱۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:
ناکاملی هندسی
ضریب تمرکز تنش
سکوی شابلونی
اتصال لوله‌ای T شکل
نقاط Saddle و Crown

چکیده

اعضای اصلی و مهاری تشکیل دهنده یک اتصال لوله‌ای، در اثر اعمال نیروهای مختلف در حین ساخت، انتقال و نصب و همچنین در طول عمر مفید سازه همواره دارای درجه‌ای از ناکاملی هندسی می‌باشند. با این حال، در فرایند تحلیل و طراحی اتصالات لوله‌ای، معمولاً ناکاملی هندسی در نظر گرفته نمی‌شود. با لحاظ نمودن ناکاملی هندسی عضو مهاری در تحلیل اتصالات لوله‌ای، می‌توان عمر خستگی سازه را به طور واقع‌بینانه‌تری پیش‌بینی کرد. در این مقاله، تأثیر ناکاملی هندسی و پارامترهای هندسی بی بعد اتصال بر توزیع تنش در اتصالات لوله‌ای T شکل سکوهای شابلونی تحت بارگذاری محوری، از طریق مطالعه ضریب تمرکز تنش (SCF)، بررسی می‌شود. پس از مدل‌سازی عددی اتصالات مورد نظر توسط نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS، صحت‌سنجی مدل‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، و استخراج مقادیر SCF، یک سری معادلات پارامتری برای محاسبه ضرایب تمرکز تنش در نقاط بحرانی ارائه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که ناکاملی هندسی عضو مهاری در صفحه اتصال، موجب تغییر ضرایب تمرکز تنش در نقاط Crown 0° و Crown 180° شده، اما در نقطه Saddle تأثیر قابل توجهی ندارد.

The Effect of Geometrical Imperfection of the Brace Member on Stress Concentration Factors in Tubular T-Joints of Jacket-Type Platforms under Axial Loading

Hamid Ahmadi[1*], Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin[2], Mir Mohammad Fatehi[3]

[1] Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz; h-ahmadi@tabrizu.ac.ir
[2] Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz; lotfollahi@tabrizu.ac.ir
[3] MSc Graduate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz; mfatehi90@ms.tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 6 Oct. 2013
Accepted: 4 Aug. 2014
Available online: 11 Mar. 2015

Keywords:
Geometrical Imperfection
Stress Concentration Factors
Jacket-Type Platform
Tubular T-Joint
Saddle and Crown Positions

ABSTRACT

Brace and chord members of a tubular joint always have a degree of geometrical imperfection due to the manufacturing and installation processes and also the action of various loads during the structure's lifetime. However, during the analysis and design of tubular joints, geometrical imperfection is not usually taken into account. Consideration of geometrical imperfection during the analysis can lead to a more realistic prediction of the fatigue life. In this paper, the effect of geometrical imperfection of brace member and geometrical parameters on the stress distribution in tubular T-joints under axial loading is studied. The stress concentration factor (SCF) is used to investigate the stress distribution. After the numerical modeling of considered tubular joints using ANSYS, verification of the FE models by experimental data, and the extraction of SCFs, a set of parametric equations is presented to calculate the SCFs at critical positions. The results show that the in-plane geometrical imperfection of the brace member can change the SCFs at the crown 0° and crown 180° positions, but does not have a considerable effect on SCF values at the saddle position.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]

۱ - مقدمه

یکی از مهم‌ترین کاربردهای سکوهای دریایی، استحصال نفت و گاز از مخازن زیر بستر دریا است. در سال ۱۹۸۸، سهم سکوهای دریایی در تولید نفت ۹٪ مصرف جهانی بوده که این رقم در سال ۲۰۰۰ به ۲۴٪ رسیده است [۱]. مقاطع لوله‌ای به عنوان یکی از عناصر سازه‌ای اصلی سکوها دارای امتیازات فراوانی نظیر مقاومت خمشی یکسان نسبت به محورهای مختلف، خوردگی کم و کاهش رویيدنی‌های دریایی به دلیل صافی سطح و گوشه‌دار نبودن هستند. بارگذاری تناوبی ناشی از امواج دریا، محل اتصال این اعضا را که یک اتصال لوله‌ای نامیده می‌شود، در معرض آسیب ناشی از خستگی قرار می‌دهد. یکی از معیارهای تعیین کننده در تخمین عمر خستگی سکو، میزان تمرکز تنش در اتصالات لوله‌ای سازه می‌باشد که توسط ضریب تمرکز تنش[1] تعیین می‌گردد. این ضریب، نسبت تنش واقعی در محل اتصال به تنش اسمی عضو مهاری است [۲]. مطالعات گسترده‌ای در مورد تمرکز تنش در اتصالات لوله‌ای صورت گرفته است که از بین آن‌ها به طور خلاصه موارد زیر قابل اشاره است.

مایرز و همکاران در سال ۲۰۰۱ به بررسی تأثیر صفحات تیغه‌ای روی مقادیر SCF در پایه سکوهای جک‌آپ پرداختند [۳]. قو و گائو در سال ۲۰۰۴ یک سری معادلات پارامتری برای پیش‌بینی SCF در اتصالات لوله‌ای هم‌پوشان K تحت بارگذاری محوری ارائه دادند [۴]. شائو در سال ۲۰۰۷ تأثیر پارامترهای هندسی بر توزیع تنش حول پنجه جوش در اتصالات T و Y را تحت بارگذاری محوری مورد مطالعه قرار داد [۵]. لطف‌اللهی یقین و احمدی در سال ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی روی مقادیر SCF در طول پنجه جوش در محل تقاطع اعضای اصلی و مهاری اتصالات KT تحت بارگذاری محوری پرداختند [۶]. لی در سال ۲۰۱۱ تأثیر روش درون‌یابی لاگرانژ روی نتایج به دست آمده برای ضرایب تمرکز تنش را بررسی کرد [۷]. لطف‌اللهی یقین و احمدی در سال ۲۰۱۱ تأثیر پارامترهای هندسی بر روی SCF در اتصالات دو صفحه‌ای DKT در طول پنجه جوش را برای عضو مهاری مایل تحت بارگذاری محوری بررسی کردند [۸]. احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی روی SCF عضو مهاری مایل در اتصالات لوله‌ای KT تقویت شده با استفاده از سخت‌کننده‌های حلقوی پرداختند [۹]. اجمدی و همکاران در سال ۲۰۱۳ تأثیر پارامترهای هندسی بر توزیع مقادیر SCF در عضو مهاری مرکزی اتصالات لوله‌ای KT دارای سخت کننده‌های حلقوی داخلی را بررسی کردند [۱۰].

تاکنون تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی ضرایب تمرکز تنش مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مقاله تأثیر ناکاملی هندسی و همچنین پارامترهای هندسی بی بعد اتصال روی مقادیر SCF در اتصالات لوله‌ای T شکل سکوهای شابلونی تحت بارگذاری محوری بررسی شده است. در ابتدا به جزئیات مدل‌سازی عددی اتصالات لوله‌ای پرداخته می‌شود که شامل خصوصیات هندسی مدل‌ها، المان مورد استفاده، مشخصات هندسی پروفیل جوش، تولید مش، اعمال شرایط مرزی و بارگذاری، تحلیل و برداشت نتایج و در نهایت نحوه صحت‌سنجی مدل‌ها می‌باشد. سپس به بررسی تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری و پارامترهای هندسی بی بعد روی مقادیر SCF در اتصالات لوله‌ای پرداخته شده و جزئیات استخراج معادلات پارامتری مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت نیز نتایج حاصل از تحقیق جمع‌بندی می‌شوند.

۲- مدل‌سازی عددی اتصالات لوله‌ای

جزئیات روند مدل‌سازی عددی اتصالات لوله‌ای T شکل مورد مطالعه در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS، در ادامه ارائه شده است.

۲-۱- خصوصیات ناکاملی هندسی

در شکل ۱ نمونه‌ای از مدل دارای ناکاملی هندسی نشان داده شده که در آن انحراف عضو مهاری دارای ناکاملی در وسط عضو فرض شده است و هندسه آن توسط معادله‌های (۱) تا (۳) بیان می‌گردد.

$$y = ax^2 + bx + c \qquad (۱)$$

$$\text{شرایط مرزی}: \begin{cases} x = 0 & \rightarrow y = 0 \\ x = \Delta & \rightarrow y = l/2 \\ x = \Delta & \rightarrow y' = 0 \end{cases} \qquad (۲)$$

$$y = -\frac{l}{2\Delta^2}\, x^2 + \frac{l}{\Delta}\, x \qquad (۳)$$

لازم به ذکر است که علاوه بر ناکاملی هندسی مورد مطالعه در این تحقیق، انواع دیگری از ناکاملی‌های هندسی نیز ممکن است در فرایند ساخت مشاهده شوند؛ نظیر بیضوی بودن مقطع عرضی و وجود اعوجاج در نقاط مختلف در راستای محور طولی. چنین ناکاملی‌هایی در مقاله حاضر مد نظر نبوده‌اند.

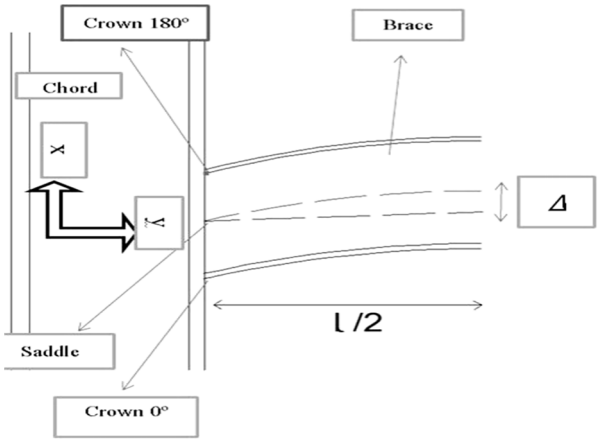
۲-۲- خصوصیات هندسی مدل‌ها

در تحقیق حاضر، به منظور تعیین SCF در نقاط Saddle و Crown، ۸۱ مدل از اتصالات لوله‌ای T شکل توسط نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و تحلیل شده است. پارامترهای هندسی بی بعد در یک اتصال لوله‌ای شامل ضرایب β، γ، τ، ε، α و α_β می‌باشند که به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$\beta = d/D \;,\; \gamma = D/2T \;,\; \tau = t/T \qquad (۴)$$
$$\varepsilon = \Delta/l \;,\; \alpha = 2L/D \;,\; \alpha_B = 2l/d$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]



شکل ۱- نمونه‌ای از مدل با ناکاملی هندسی عضو مهاری

L و l به ترتیب طول عضو اصلی و مهاری، d قطر عضو مهاری، t ضخامت جدار عضو مهاری و T ضخامت جدار عضو اصلی می‌باشد. مقادیر در نظر گرفته شده برای این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. با توجه به تعریف اتصال T شکل، زاویه بین اعضای اصلی و مهاری در تمام مدل‌ها یکسان می‌باشد ($\theta = 90^{\circ}$).

افتیمیو [۱۱] نشان داد در صورتی که عضو اصلی[۲] از طول کافی برخوردار باشد، توزیع تنش در محل تقاطع عضو اصلی و عضو مهاری از شرایط مرزی دو انتهای عضو اصلی متأثر نخواهد شد. طبق این مطالعات، در صورتی که مقدار پارامتر α بزرگ‌تر یا مساوی ۱۲ باشد، این شرایط برآورده خواهد شد. در مقاله حاضر نیز به منظور جلوگیری از تأثیرگذاری شرایط مرزی دو انتهای عضو اصلی روی نتایج به دست آمده برای SCF، مقدار پارامتر α، همان‌طور که در جدول ۱ ذکر گردیده، برابر با ۱۲ در نظر گرفته شده است.

چنگ و داور [۱۲] نیز تأثیر طول عضو مهاری را روی مقادیر به دست آمده برای SCF مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند در صورتی که مقدار پارامتر α_B، بزرگ‌تر یا مساوی ۸ باشد، توزیع تنش در محل تقاطع عضو اصلی و عضو مهاری تحت تأثیر کوتاه بودن عضو مهاری قرار نخواهد گرفت. در مقاله حاضر نیز به منظور جلوگیری از تأثیرگذاری طول عضو مهاری روی نتایج به دست آمده برای SCF، مقدار پارامتر α_B، همان‌طور که در جدول ۱ ذکر گردیده، برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده است.

۲-۳- نوع المان

برای مدل‌سازی اتصالات لوله‌ای T شکل از المان SOLID 95 استفاده شده است. این المان که قادر به مدل‌سازی احجام نامنظم می‌باشد، سه بعدی و دارای ۲۰ گره بوده و در هر گره سه درجه آزادی دارد. در شکل ۲ نمونه‌هایی از المان‌های سه بعدی نشان داده شده است [۱۳].

جدول ۱- مقادیر پارامترها در اتصالات مورد مطالعه

پارامتر	مقادیر مفروض
β	۰/۳، ۰/۴۵، ۰/۶
γ	۱۰، ۲۰، ۳۰
τ	۰/۴، ۰/۷، ۱/۰
ε	۰/۰۲، ۰/۰۲۵، ۰/۰۳
α	۱۲/۰
α_β	۱۰/۰

۲-۴- مشخصات هندسی پروفیل جوش

مدل کردن صحیح پروفیل جوش یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در دقت نتایج به دست آمده برای SCF می‌باشد. در این پژوهش، ابعاد جوش در امتداد منحنی تقاطع اعضای اصلی و مهاری بر اساس ضوابط AWS D1.1 [۱۴] انتخاب شده است. در شکل ۳ و جدول ۲ جزئیات پروفیل جوش نشان داده شده است.

۲-۵- تولید شبکه

مش‌بندی مدل اجزای محدود اتصال لوله‌ای یکی از مهم‌ترین معیارهای تعیین کننده در دقت نتایج SCF است. در این تحقیق، مش‌هایی با چگالی‌های متفاوت برای مدل هندسی تولید شد و نهایتاً چگالی بهینه با کنترل همگرایی و مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی انتخاب گردید. بعد از حصول استقلال مش، ۸۱ مدل ساخته شده، مش-بندی شدند.

در شکل‌های ۴ و ۵ نمونه‌هایی از مش تولید شده برای مدل دارای ناکاملی هندسی و نواحی اطراف جوش نشان داده شده‌اند.

۲-۶- اعمال شرایط مرزی

به دلیل وجود تقارن در صفحه اتصال، تنها نیمی از مدل تولید شده و برای لحاظ کردن اثر نیمه دوم مدل، از تعریف شرایط مرزی متقارن در نرم افزار ANSYS استفاده شد. همچنین شرایط مرزی دو انتهای عضو اصلی، به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شد.

به منظور تعیین SCF در امتداد پنجه جوش، تنش محوری به اندازه یک مگاپاسکال به انتهای عضو مهاری اعمال گردید.

۲-۷- تحلیل و برداشت نتایج

تحلیل استاتیکی از نوع ارتجاعی خطی برای تعیین مقادیر SCF در امتداد پنجه جوش مناسب می‌باشد. مدول

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]

الاستیسیته‌ی فولاد برابر ۲۰۷ GPa و ضریب پواسون برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

برای تعیین مقادیر SCF در پنجه جوش از روش برون‌یابی خطی استفاده گردیده است. در شکل ۶ محدوده‌ی برون-یابی نشان داده شده است.

حل ارائه شده توسط نرم‌افزار ANSYS برای مقادیر تنش، به طور پیش‌فرض، یک حل با مبنای المان به المان است؛ مگر این که کاربر گزینه دیگری را انتخاب نماید. در واقع ANSYS ابتدا مقادیر تنش را در نقاط گاوس به دست آورده و سپس مقادیر تنش در گره‌ها را از برون‌یابی این تنش‌ها محاسبه می‌کند. از آن‌جا که بسیاری از المان‌ها دارای گره‌های مشترک هستند، ANSYS از تنش‌های گرهی محاسبه شده از هر کدام از المان‌های مجاور، میانگین‌گیری می‌کند. در صورتی که مش تولید شده به حد کافی ریز باشد، تنش‌های میانگین‌گیری شده اختلاف چندانی با تنش‌های میانگین‌گیری نشده نخواهند داشت. به عبارت دیگر در شرایطی که مش تولید شده به حد کافی ریز است، اختلاف قابل توجهی بین تنش‌های گرهی محاسبه شده از المان‌های مجاور در یک گره مشترک وجود ندارد. بنابراین در صورتی که کاربر در پلات تنش‌های میانگین-گیری نشده مشاهده کند که مقادیر تنش از یک المان به المان مجاور به شدت تغییر می‌کنند، بدین معنی است که مش تولید شده به حد کافی ریز نیست. در پژوهش حاضر، مش تولید شده برای ناحیه برون‌یابی حول پروفیل جوش به حد کافی ریز در نظر گرفته شده تا از بروز چنین مشکلی جلوگیری شود.

۲-۸- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

صحت‌سنجی مدل اجزای محدود به منظور اطمینان از دقت مدل و در نتیجه حصول اطمینان نسبت به نتایج به دست آمده ضروری است. به منظور صحت‌سنجی، نتایج مدل‌های عددی بدون ناکاملی T شکل با داده‌های آزمایشگاهی HSE OTH 354 [۱۵] مقایسه شدند. مشخصات یکی از مدل‌های آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر به دست آمده از مدل عددی ANSYS برای SCF در نقاط Crown و Saddle به ترتیب برابر ۲/۴۱ و ۷/۰۳۷ هستند.

اختلاف مقادیر SCF آزمایشگاهی و عددی در نقاط Crown و Saddle به ترتیب برابر ۸٪ و ۱۴٪ است. میزان اختلاف موجود قابل قبول تلقی می‌شود.

نوع المان	تعداد گره ها	شکل
H20	۲۰	
P15	۱۵	
QP15	۱۵	
T10	۱۰	
PR20	۲۰	

شکل ۲- نمونه‌هایی از المان‌های سه بعدی [۱۳]

۳- بررسی تأثیر ناکاملی هندسی و پارامترهای هندسی بی بعد روی ضرایب تمرکز تنش

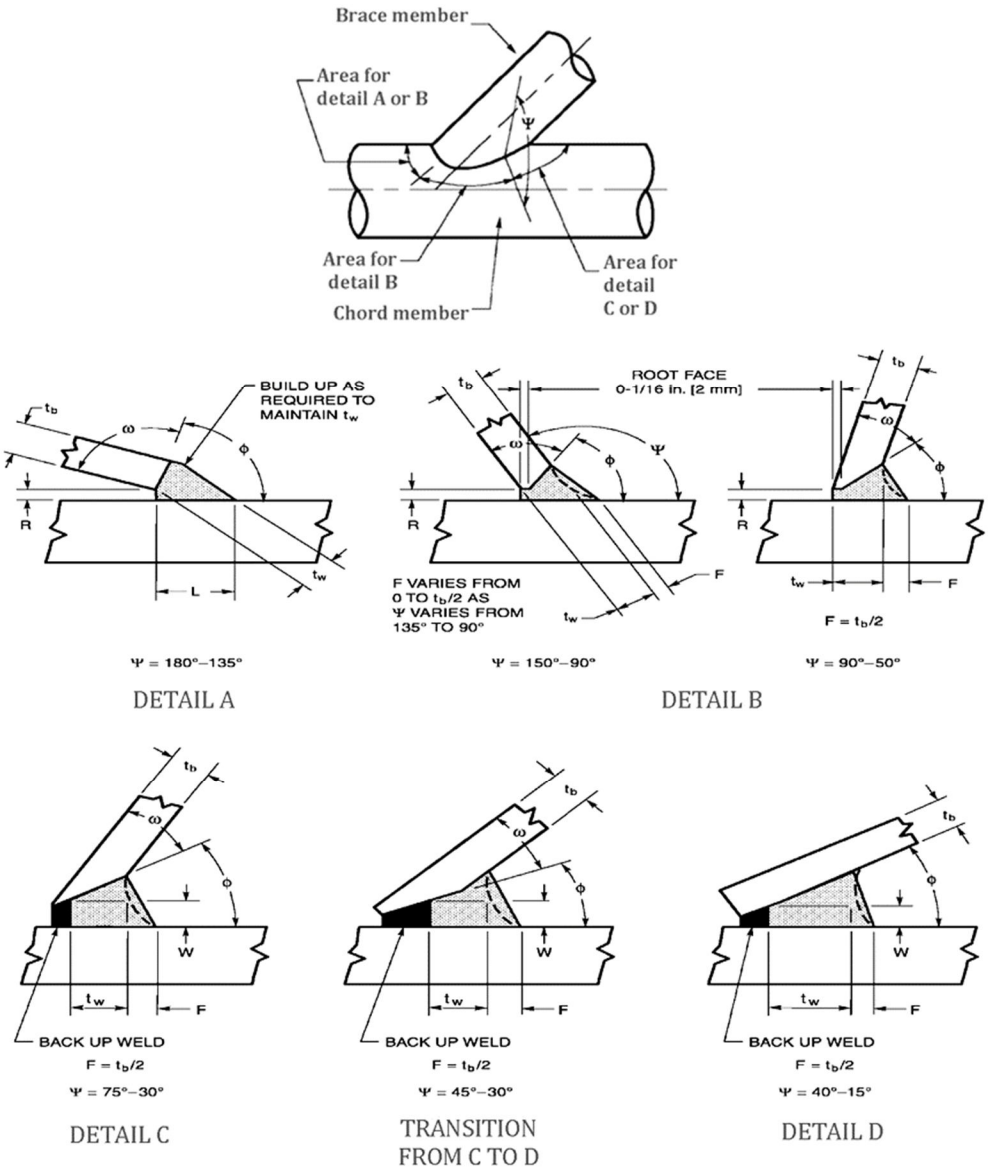
تاکنون پژوهشی به منظور بررسی تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی مقادیر SCF انجام نشده است و تحقیقات صورت گرفته مربوط به اعضای بدون ناکاملی می‌باشند. در شکل‌های ۷ تا ۲۴، تأثیر پارامترهای هندسی بی بعد شامل τ، γ، و β و همچنین پارامتر ناکاملی هندسی عضو مهاری (ε) روی مقادیر SCF در نقاط Saddle، Crown0° و Crown 180° بررسی شده است و در ادامه نتایج ارائه می-شوند.

۳-۱- بررسی تأثیر پارامتر γ روی مقادیر SCF در اتصال دارای ناکاملی هندسی

پارامتر γ برابر نسبت شعاع به ضخامت جدار عضو اصلی است. قطر عضو اصلی در تمام مدل‌ها یکسان می‌باشد. لذا افزایش γ منجر به کاهش ضخامت عضو اصلی می‌گردد. ضمناً به منظور بررسی اندرکنش پارامتر γ با پارامتر β، بررسی به ازای سه مقدار متفاوت پارامتر β (۰/۳، ۰/۴۵ و ۰/۶) انجام شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]



شکل ۳- جزئیات پروفیل جوش مطابق با ضوابط AWS D1.1 [۱۴]

جدول ۲- ابعاد پروفیل جوش طبق ضوابط AWS D1.1 [۱۴]

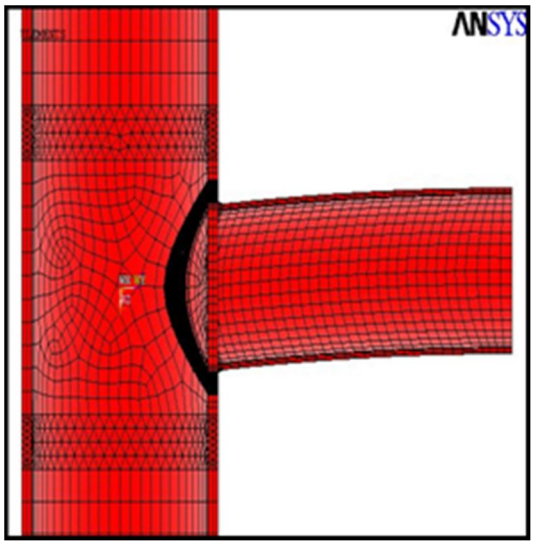
پارامتر	دسته جزئیات (مطابق شکل (۳))			
	Detail A (Ψ=180º-135º)	Detail B (Ψ=150º-50º)	Detail C (Ψ=75º-30º)	Detail D (Ψ=40º-15º)
بازشدگی ریشه R (mm)	۱/۶ تا ۵	۱/۶ تا ۶	۳ تا ۱۳	۳ تا ۱۳
زاویه شمول اتصال (φ)				
حداکثر	۹۰°	۹۰° برای $\Psi \leq 150^o$	۴۰°، در صورت بیشتر بودن: Detail B	
حداقل	۴۵°	۳۷/۵°، در غیر این صورت: Detail C	Ψ/2	
ابعاد جوش کامل				
t_w	$t_1 \leq$	$t_1 \geq$ برای $\Psi \geq 90^o$	$\geq t_1$ اما $t_1/\sin\Psi \geq 1.75\ t_1$	
L_w	$t_1/\sin\Psi \geq$ اما $\leq 1.75\ t_1$	$t_1/\sin\Psi \geq$ برای $\Psi \leq 150^o$		$\geq 2t_1$

جدول ۳- مشخصات مدل آزمایشگاهی T_{20} [۱۵]

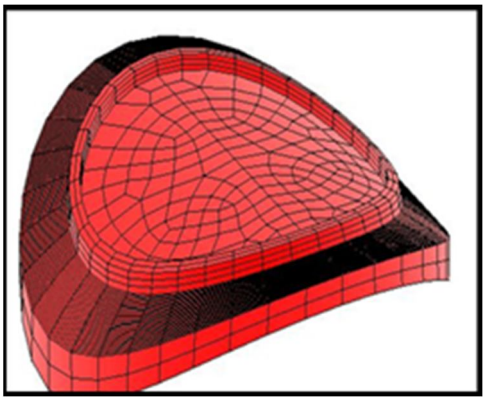
(mm) D	θ	α	γ	β	τ	SCF_{Crown}	SCF_{Saddle}
۱۶۸	۹۰°	۱۰	۱۳/۳	۰/۵۳	۰/۵۱	۲/۸	۶/۵

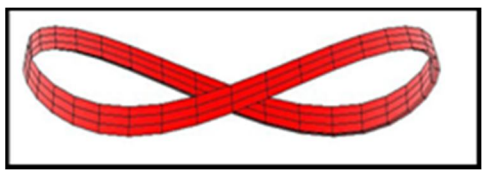
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]

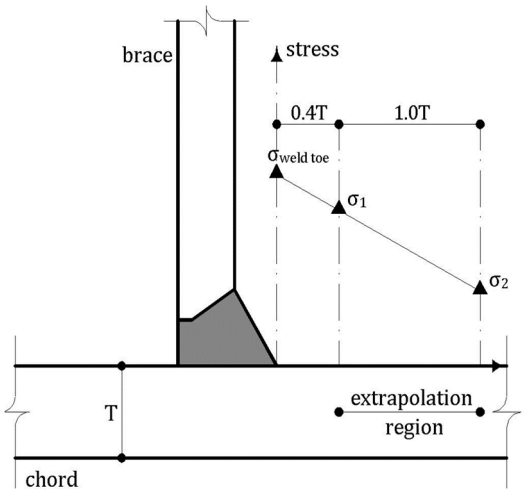


شکل ۴- نمونه‌هائی از مش تولید شده در مدل اجزای محدود اتصال لوله‌ای دارای ناکاملی هندسی





شکل ۵- مش تولید شده برای نواحی اطراف جوش در مدل اجزای محدود اتصالات لوله‌ای مورد مطالعه



شکل ۶- محدوده برون‌یابی خطی برای تعیین تنش در پنجه جوش و محاسبه SCF با استفاده از آن [۹]

۳-۱-۱- تأثیر پارامتر γ در نقطه Saddle

با توجه به شکل‌های ۷ تا ۹، با افـزایش پـارامتر γ مقـادیر SCF بـه ازای تمام مقادیر β افزایش می‌یابند.

۳-۱-۲- تأثیر پارامتر γ در نقطه Crown 0°

با بررسی شکل‌های ۱۳ تا ۱۵، نتایج زیر را می‌توان استنباط نمود:

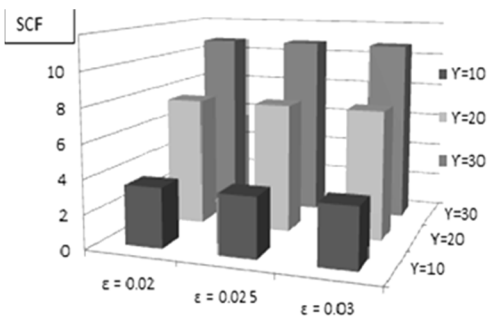
۱- با افزایش پارامتر γ مقادیر SCF به ازای β = 0.3 کاهش می‌یابند.

۲- با افزایش پارامتر γ مقادیر SCF به ازای β = 0.45 به صورت نامنظم تغییر می‌کنند.

۳- با افزایش پارامتر γ مقادیر SCF به ازای β = 0.6 افزایش می‌یابند.

۳-۱-۳- تأثیر پارامتر γ در نقطه Crown 180°

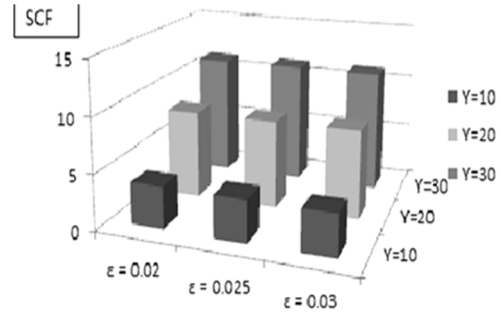
با توجه به شکل‌های ۱۹ تا ۲۱، با افـزایش پـارامتر γ مقـادیر SCF افزایش پیدا می‌کنند.



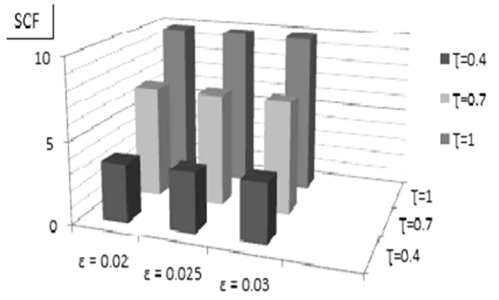
شکل ۷- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در (α = 12, β = 0.3, θ = 90°, τ= 0.4) Saddle

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

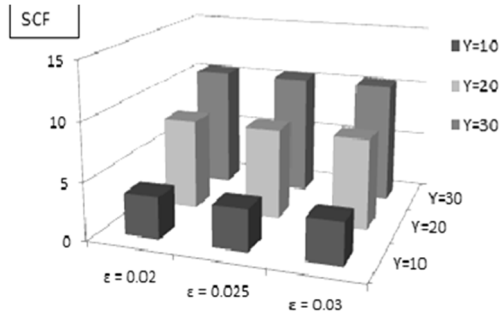
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]



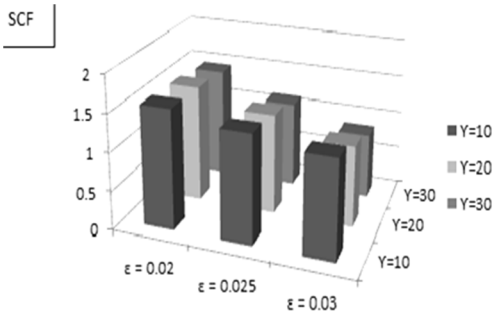
شکل ۸- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
(α = 12, β = 0.45, θ = 90°, τ = 0.4) Saddle



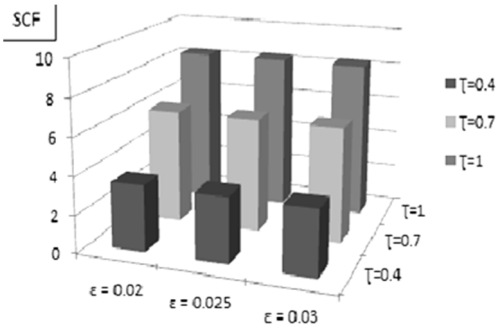
شکل ۱۲- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
(α = 12, β = 0.6, θ = 90°, γ =10) Saddle



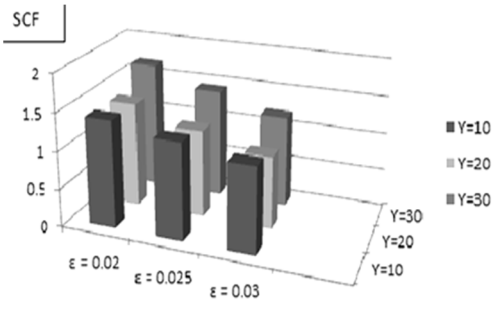
شکل ۹- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
(α = 12, β = 0.6, θ = 90°, τ = 0.4) Saddle



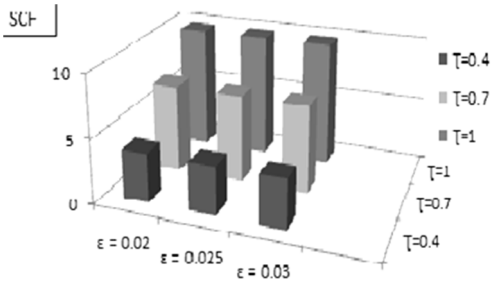
شکل ۱۳- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
(α = 12, β = 0.3, θ = 90°, τ = 0.4) Crown 0°



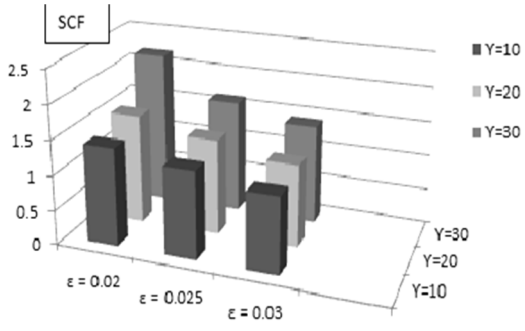
شکل ۱۰- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
(α = 12, θ = 90°, β = 0.3, γ = 10) Saddle



شکل ۱۴- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
(α = 12, β = 0.45, θ = 90°, τ = 0.4) Crown 0°



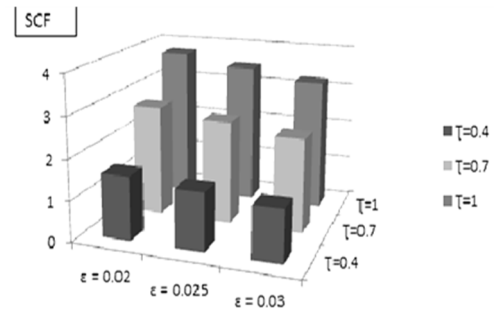
شکل ۱۱- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
(α = 12, β = 0.45, θ = 90°, γ = 10) Saddle



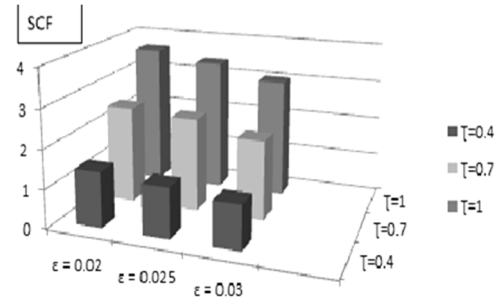
شکل ۱۵- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
(α = 12, β= 0.6 θ = 90°, τ = 0.4) Crown 0°

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

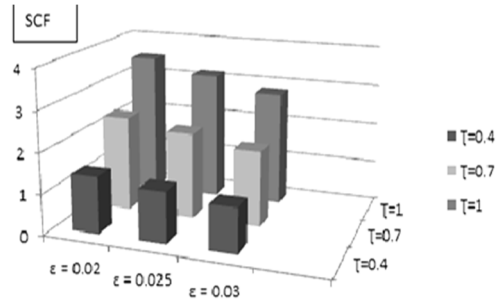
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]



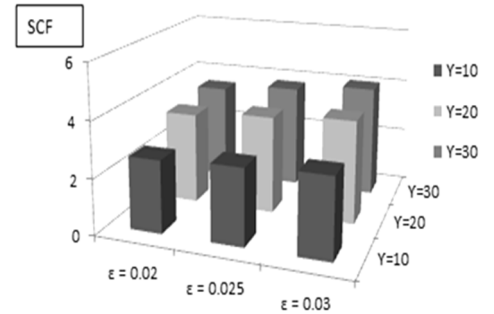
شکل۱۶- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
($\alpha = 12, \beta = 0.3, \theta = 90^\circ, \gamma = 10$) Crown 0°



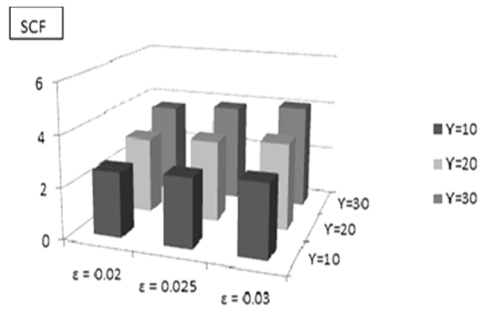
شکل ۱۷- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
($\alpha = 12, \beta = 0.45, \theta = 90^\circ, \gamma = 10$) Crown 0°



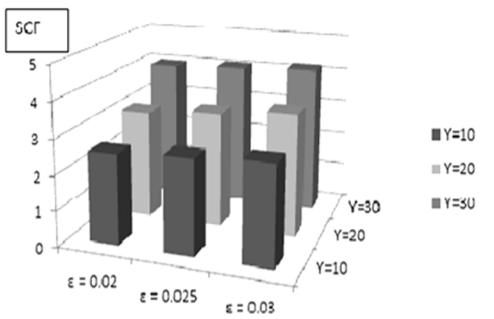
شکل ۱۸- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
($\alpha = 12, \beta = 0.6, \theta = 90^\circ, \gamma = 10$) Crown 0°



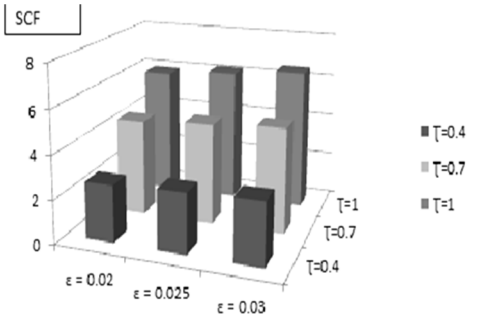
شکل ۱۹- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در Crown
($\alpha = 12, \beta = 0.3, \theta = 90^\circ, \tau = 0.4$) 180°



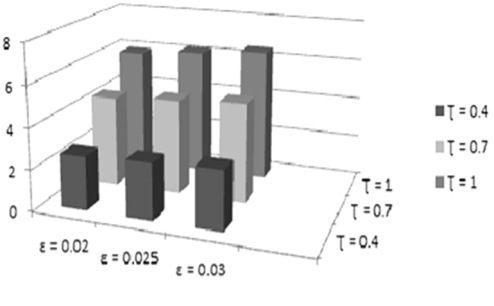
شکل ۲۰- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
($\alpha = 12, \beta = 0.3, \theta = 90^\circ, \tau = 0.4$) Crown 180°



شکل ۲۱- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در Crown
($\alpha = 12, \beta = 0.3, \theta = 90^\circ, \tau = 0.4$) 180°



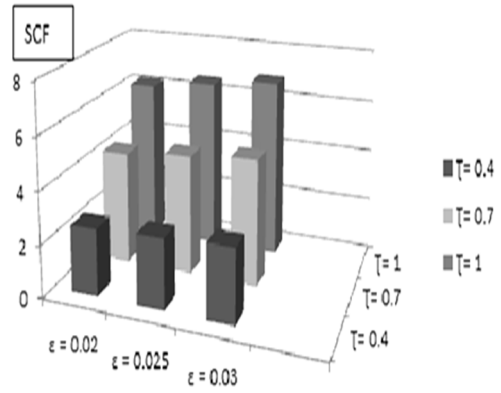
شکل ۲۲- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
($\alpha = 12, \beta = 0.3, \theta = 90^\circ, \gamma = 10$) Crown 180°



شکل ۲۳- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
($\alpha = 12, \beta = 0.45, \theta = 90^\circ, \gamma = 10$) Crown 180°

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]



شکل ۲۴- تأثیر ناکاملی هندسی عضو مهاری روی SCF در
($\alpha = 12, \beta = 0.6, \theta = 90^{\circ}, \gamma = 10$) Crown 180°

۳-۲- بررسی تأثیر پارامتر τ روی مقادیر SCF در اتصال دارای ناکاملی هندسی

پارامتر τ برابر نسبت ضخامت عضو مهاری به عضو اصلی می‌باشد. پس در صورت ثابت بودن ضخامت جدار عضو اصلی، افزایش τ منجر به افزایش ضخامت جدار عضو مهاری خواهد شد. به منظور بررسی اندرکنش پارامتر τ با پارامتر β، بررسی به ازای سه مقدار متفاوت پارامتر β (۰/۳، ۰/۴۵ و ۰/۶) به صورت جداگانه انجام شده است. با بررسی نمودارها مشخص می‌شود که با افزایش پارامتر τ مقادیر SCF به ازای تمام مقادیر β در هر سه نقطه Saddle (شکل‌های ۱۰تا ۱۲)، 0° Crown (شکل‌های ۱۶ تا ۱۸) و 180° Crown (شکل‌های ۲۲ تا ۲۴) افزایش می‌یابند.

۳-۳- بررسی تأثیر پارامتر β روی مقادیر SCF در اتصال دارای ناکاملی هندسی

پارامتر β برابر نسبت قطر عضو مهاری به عضو اصلی می‌باشد. با توجه به این که قطر عضو اصلی در تمامی حالات یکسان می‌باشد؛ لذا با افزایش پارامتر β قطر عضو مهاری افزایش می‌یابد.

با مقایسه شکل‌های ۷ تا ۱۲ (برای نقطه Saddle)، شکل‌های ۱۳ تا ۱۸ (برای نقطه 0° Crown) و شکل‌های ۱۹ تا ۲۴ (برای نقطه 180° Crown)، مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر β، مقادیر SCF بسته به مقادیر پارامترهای τ و γ به صورت نامنظم تغییر می‌کنند.

۳-۴- بررسی تأثیر پارامتر ε روی مقادیر SCF در اتصال دارای ناکاملی هندسی

۳-۴-۱- تأثیر پارامتر ε در نقطه Saddle

تأثیر پارامتر ε روی مقادیر SCF در نقطه Saddle برای شش حالت بررسی شده است. همان طور که در شکل‌های ۷ تا ۱۲ملاحظه می‌گردد، با افزایش ناکاملی هندسی عضو مهاری هیچ گونه تغییری در مقدار SCF مشاهده نمی‌شود؛ چرا که Saddle فقط تحت تأثیر فشار محوری است و ناکاملی باعث ایجاد کشش یا فشار ناشی از خمش در این نقطه نمی‌شود.

۳-۴-۲- تأثیر پارامتر ε در نقطه 0° Crown

با توجه به شکل‌های ۱۳ تا ۱۸، با افزایش ناکاملی هندسی عضو مهاری، مقادیر SCF کاهش پیدا می‌کنند؛ چرا که در نقطه 0° Crown عضو تحت فشار محوری ۱ MPa و کشش ناشی از خمش عضو در اثر ناکاملی قرار دارد. با افزایش ناکاملی، مقدار کشش ناشی از خمش عضو بیشتر شده و این مسئله موجب کمتر شدن تنش موجود می‌گردد. در نتیجه با کاهش تنش، مقادیر SCF کاهش می‌یابند. پس می‌توان گفت با افزایش ناکاملی، مقدار SCF در نقطه 0° Crown کاهش می‌یابد.

۳-۴-۳- تأثیر پارامتر ε در نقطه 180° Crown

با توجه به شکل‌های ۱۹ تا ۲۴، با افزایش ناکاملی هندسی عضو مهاری، مقادیر SCF افزایش پیدا می‌کنند؛ چرا که در نقطه 180° Crown، عضو تحت فشار محوری ۱ MPa و فشار ناشی از خمش عضو در اثر ناکاملی قرار دارد. با افزایش ناکاملی، مقدار فشار ناشی از خمش عضو بیشتر شده و این مسئله موجب افزایش تنش موجود می‌گردد. در نتیجه با افزایش تنش، مقادیر SCF نیز افزایش می‌یابند. پس می‌توان گفت با افزایش ناکاملی، مقدار SCF در نقطه 180° Crown افزایش می‌یابد. به منظور بررسی کمّی میزان تأثیرگذاری ناکاملی هندسی روی مقادیر ضرایب تمرکز تنش، در جدول ۴ مقادیر SCF مربوط به اتصالات با و بدون ناکاملی هندسی، در نقاط مختلف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مشاهده می‌شود که میزان اختلاف در نقاط Crown قابل توجه است.

۴- استخراج معادلات پارامتری

۴-۱- تحلیل رگرسیون غیرخطی

برای استخراج معادلات پارامتری SCF بر اساس داده‌های به دست آمده از تحلیل عددی در ANSYS، از نرم‌افزار SPSS و روش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]

جدول ۴- مقایسه مقادیر SCF مربوط به اتصالات با و بدون ناکاملی هندسی در نقاط مختلف

شماره مدل و مقدار ناکاملی	SCF در اتصال بدون ناکاملی هندسی		SCF در اتصال دارای ناکاملی هندسی		
	Saddle	Crown	Saddle	Crown 0°	Crown 180°
KTJ-73 (ε=0.03)	۳/۴۷	۱/۹۷	۳/۶۱	۱/۱۱	۲/۸۱
اختلاف مقادیر SCF در Saddle		اختلاف مقادیر SCF در Crown 0°		اختلاف مقادیر SCF در Crown 180°	
٪۴		٪۷۷		٪۴۳	

رگرسیون غیر خطی استفاده شده است. داده‌های ورودی به نرم افزار، شامل ۵ ستون بود که دربرگیرنده مقادیر پارامترهای τ، β، γ، و ε و همچنین مقادیر SCF هستند. در این ماتریس ورودی، به ازای هر دسته از پارامترهای هندسی مستقل، یک ضریب SCF وجود داشت. با توجه به ۸۱ مدل ساخته شده، برای هر کدام از سه نقطه Saddle، Crown 0°و Crown 180° یک ماتریس ۸۱×۵ به عنوان ورودی تعریف شد. در تحلیل رگرسیون غیر خطی، متغیرهای مستقل، پارامترهای هندسی بی بعد τ، β، γ و ε بوده و متغیر وابسته ضریب تمرکز تنش به دست آمده بر اساس هر دسته از پارامترهای مستقل است.

در این مقاله به عنوان یک تخمین اولیه، برای پیش‌بینی مقادیر SCF از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\mathrm{SCF} = a_1 \beta^{a_2}.\gamma^{a_3}.\tau^{a_4}.\varepsilon^{a_5} \qquad (۵)$$

بعد از تعیین متغیرهای مستقل و وابسته و تعریف رابطه غیرخطی (۵) بین این متغیرها، مقادیر این پارامترها در نرم‌افزار SPSS طوری تعیین شد که حداکثر انطباق بین رابطه تعریف شده و داده‌های ورودی ایجاد گردد. هر چه مقادیر پارامترها و رابطه ارائه شده مناسب‌تر باشند، ضریب تعیین (R^2) به دست آمده برای رابطه بزرگ‌تر بوده و به عدد یک نزدیک‌تر خواهد شد. اگر ضریب همبستگی کوچک باشد، باید یک رابطه مناسب‌تر همراه با پارامترهای جدید تعریف شده و تحلیل رگرسیون تکرار شود. این روند تا جایی ادامه خواهد داشت که ضریب همبستگی قابل قبول برای معادله به دست آید. در جدول ۵ نتایج به دست آمده از تحلیل رگرسیون غیر خطی برای استخراج معادلات پارامتری ارائه شده‌اند.

جدول ۵- نتایج به دست آمده از تحلیل رگرسیون غیر خطی برای استخراج معادلات پارامتری

موقعیت	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2	SCF
Saddle	۰/۹۷۶	۰/۱۳۹	۱/۰۶۸	۱/۱۷۴	۰	۰/۹۸۳	$0.976\,\beta^{0.139}.\gamma^{1.068}.\tau^{1.174}.\varepsilon^{0}$
Crown 180°	۹/۱۰۳	-۰/۱۱۹	۰/۲۹۹	۰/۹۲۲	۰/۳۰۷	۰/۹۷۸	$9.103\,\beta^{-0.119}.\gamma^{0.299}.\tau^{0.922}.\varepsilon^{0.307}$
Crown 0°	۰/۲۲۶	-۰/۱۳۱	-۰/۱۳۹	۰/۸۹۸	-۰/۷۷۱	۰/۸۷۸	$0.226\,\beta^{-0.131}.\gamma^{-0.139}.\tau^{0.898}.\varepsilon^{-0.771}$

۴-۲- ارزیابی معادلات پیشنهادی

دپارتمان انرژی بریتانیا معیارهای زیر را برای ارزیابی معادلات پارامتری مورد استفاده برای تعیین مقادیر SCF پیشنهاد می‌کند که در آن P/R نشان دهنده نسبت مقدار SCF به دست آمده از معادله پارامتری به مقدار SCF به دست آمده از تحلیل عددی است [۹ و ۱۶]:

- برای تعداد مشخصی از داده‌ها، چنانچه درصد پیش‌بینی خیلی دست پایین کمتر یا مساوی ۵ درصد باشد، یعنی معادله در صورت برقراری $5\% \geq [\%P/R < 0.8]$، پذیرفته می‌شود.
- اگر علاوه بر شرایط فوق، درصد پیش‌بینی خیلی دست بالا بیشتر یا مساوی ۵۰ درصد باشد، به عبارت دیگر چنانچه رابطه $50\% \geq [\%P/R > 1.5]$، معادله پذیرفته شده ولی عموماً محافظه‌کارانه تلقی می‌شود.
- چنانچه اختلاف شرایط معادله با معیارهای پذیرش کم باشد، به عبارت دیگر داشته باشیم $30\% \geq [\%P/R < 1.0] \geq 25\%$ و یا رابطه $7.5\% \geq [\%P/R < 0.8] \geq 5\%$ برقرار باشد، در این صورت معادله روی خط مرزی قرار دارد و برای پذیرش یا رد آن باید قضاوت مهندسی صورت گیرد.
- چنانچه هیچ کدام از حالت‌های فوق اقناع نشوند، معادله مردود خواهد بود.

برای ارزیابی معادلات پارامتری، ۸۱ ضریب تمرکز تنش به دست آمده از معادله پارامتری و روش اجزای محدود برای هر یک از نقاط Saddle، Crown 0° و Crown 180° مورد مقایسه قرار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]

گرفتند و نتایج در جدول ۶ ذکر شده است. با توجه به نتایج این جدول، کلیه ضوابط پذیرش پیشنهادی توسط دپارتمان انرژی بریتانیا اقناع شده و معادلات پارامتری ارائه شده برای اتصال دارای ناکاملی هندسی قابل قبول می‌باشند. در نتیجه می‌توان با اطمینان خاطر از این معادلات در فرایند تحلیل و طراحی خستگی اتصالات لوله‌ای T شکل دارای ناکاملی هندسی استفاده نمود.

جدول ٦- نتایج ارزیابی معادلات پارامتری پیشنهادی طبق ضوابط دپارتمان انرژی بریتانیا [١٦]

موقعیت	مورد	مقدار حاصله	وضعیت معادله
Saddle	%P/R < 0.8	٪۰	قابل قبول
	%P/R < 1.5	٪۰	
Crown 180°	%P/R < 0.8	٪۱/۲	قابل قبول
	%P/R < 1.5	٪۰	
Crown 0°	%P/R < 0.8	٪۳/۷	قابل قبول
	%P/R < 1.5	٪۰	

۵- جمع‌بندی نتایج

در این مقاله، اثر ناکاملی هندسی عضو مهاری و همچنین پارامترهای هندسی بی‌بعد اتصال شامل τ، β، و γ روی مقادیر SCF در اتصالات لوله‌ای T شکل تحت بارگذاری محوری در سه نقطه Saddle، Crown 180°، و Crown 0° بررسی شده است. سپس برای هر کدام از سه نقطه Saddle، Crown 180°، و Crown 0° یک معادله پارامتری ارائه شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های به دست آمده در این مطالعه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- با افزایش پارامتر ε، تغییری در مقادیر SCF در نقطه Saddle ایجاد نمی‌گردد. در حالی که با چنین افزایشی، مقادیر SCF در Crown 0° کاهش و در Crown 180° افزایش پیدا می‌کنند.

۲- با افزایش پارامتر γ، مقادیر SCF در نقاط Saddle و Crown 180° افزایش می‌یابند. در حالی که با چنین افزایشی، مقادیر SCF در نقطه Crown 0°، بسته به مقدار پارامتر β به صورت نامنظم تغییر می‌کنند.

۳- با افزایش پارامتر τ مقادیر SCF در هر سه نقطه Saddle، Crown 0° و Crown 180° افزایش می‌یابند.

۴- با افزایش پارامتر β مقادیر SCF در سه نقطه مورد بررسی به صورت نامنظم تغییر می‌کنند.

۵- معادلات پارامتری ارائه شده برای سه نقطه Saddle، Crown 180°، و Crown 0° بر اساس ضوابط دپارتمان انرژی بریتانیا ارزیابی شده و مورد پذیرش قرار گرفتند.

کلیدواژگان

1- Stress concentration factor (SCF)
2- Chord

۶- مراجع

1- Zeinaddini, M., (2005), *Design and Construction of fixed Oil Platforms*, Iranian National Ocean Research Center Press (In Persian).

2- Lotfollahi-Yaghin, M.A., Ahmadi, H., (2011), *Dynamics of Offshore Structures, University of Tabriz Press, Tabriz, Iran* (In Persian).

3- Myers, P.T., Brennan, F.P. and Dover, W.D., (2011), *The Effect of Rack/Rib Plate on the Stress Concentration Factors in Jack-up Chords*, Marine Structures, Vol. 14, p. 485-505.

4- Gho, W.M., and Gao, F., (2004), *Parametric Equations for Stress Concentration Factors in Completely Overlapped Tubular K(N) Joints*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 60, p. 1761-1789.

5- Shao, Y.B., (2007), *Geometrical Effect on the Stress Distribution along Weld toe for Tubular T-and K-joints under Axial Loading*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, p. 1351-1360.

6- 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 Load*, International Journal of Fatigue, Vol. 32, p. 703-719.

7- Lee, W.M., Chiew, S.P. and Sopha, T., (2011), *Stress Concentration Factor Prediction by the Multi-dimensional Lagrangian Interpolation Method*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 78, p. 1008-1028.

8- Lotfollahi-Yaghin, M.A. and Ahmadi, H., (2011), *Geometrical Stress Distribution along the Weld Toe of the Outer Brace in Two Planar Tubular DKT-joints: Parametric Study and Deriving the SCF Design Equations*, Marine Structures, Vol. 24, p. 239-260.

9- Ahmadi, H., Lotfollahi-Yaghin, M.A., Aminfar, M.H. and Shao, Y.B., (2012), *Parametric Study and Formulation of Outer-brace Geometric Stress Concentration Factors in Internally Ring-stiffened Tubular KT-joints of Offshore Structures*, Applied Ocean Research, Vol. 38, p. 74-91.

10- Ahmadi, H., Lotfollahi-Yaghin, M.A. and Shao, Y.B., (2013), *Chord-side SCF Distribution of Central Brace in Internally Ring-stiffened Tubular KT-joints: A Geometrically Parametric Study*, Thin-walled Structures, Vol. 70, p. 93-105.

11- Efthymiou, M., (1988), *Development of SCF Formulae and Generalized Influence Functions for Use in Fatigue Analysis*, OTJ 88, Surrey, UK.

12- Chang, E. and Dover, W.D. (1999), *Parametric Equations to Predict Stress Distributions along the*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]

Intersection of Tubular X and DT-joints, International Journal of Fatigue, Vol. 21, p. 619-635.

13- Shao, Y.B., (2004), *Proposed Equations of Stress Concentration Factors (SCF) for Gap Tubular K-joints Subjected to Bending Load*, International Journal of Space Structure, Vol. 19, p. 137-147.

14- American Welding Society (AWS), (2002), Structural Welding Code: AWS D 1.1, US.

15- UK Health and Safety Executive, (1997), *OTH 354: Stress Concentration Factors for Simple Tubular Joints-Assessment of Existing and Development of New Parametric Formulae*, London, UK.

16- UK Department of Energy, (1983), *Background Notes to the Fatigue Guidance of Offshore Tubular Joints*, London, UK.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.20.2.7]