

بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر ضرایب شدت تنش (SIFs) در اتصالات لوله‌ای نوع X سکوه‌های شابلونی

حمید احمدی^{۱*}، محمدعلی لطف‌اللهی^۲، مجید نعمتی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، پست الکترونیکی: h-ahmadi@tabrizu.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، پست الکترونیکی: lotfollahi@tabrizu.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، پست الکترونیکی: majidnemati32@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۴

* نویسنده مسوول

تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۱۶

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۴، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

روش‌های محاسبه عمر باقی‌مانده اتصالات ترک خورده در سکوه‌های فراساحلی شابلونی، مبتنی بر رویکرد مکانیک شکست هستند، که دقت آن منوط به تخمین صحیح ضریب شدت تنش (SIF) است. در مقاله حاضر، اثر پارامترهای هندسی اتصال و ترک روی SIF در اتصالات لوله‌ای X بررسی گردید. در این مقاله، برای مدل‌سازی عددی از نرم-افزار ABAQUS و برای محاسبه SIF از روش انتگرال J استفاده شد. نتایج تحلیل عددی، از طریق مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، مورد صحت‌سنجی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش انتگرال J برای به‌دست آوردن SIF در ترک سطحی مناسب است. افزایش پارامتر γ ($\gamma = D / 2T$) و β ($\beta = d / D$) باعث کاهش SIF می‌شود. در حالی‌که افزایش پارامتر τ ($\tau = t / T$)، نسبت c/a و یا نسبت d/T منجر به افزایش SIF می‌گردد؛ که d ، T ، t و c به ترتیب نشان‌دهنده قطر عضو مهار، قطر عضو اصلی، ضخامت عضو مهار، ضخامت عضو اصلی، عمق ترک، و نصف طول ترک هستند.

کلمات کلیدی: اتصال لوله‌ای X، خستگی، مکانیک شکست، ترک سطحی، ضریب شدت تنش (SIF)، روش انتگرال J .

۱. مقدمه

اصولی^۲ تشکیل شده‌اند. اعضای مهار به وسیله جوش به سطح خارجی عضو اصلی متصل می‌شوند. اتصال بین اعضای مهار و اصلی، یک اتصال لوله‌ای نامیده می‌شود. نیروهای ناشی از امواج و باد از جمله نیروهای تناوبی مهمی هستند که سازه جکت به طور دائم با آن‌ها مواجه است. نتیجه این نیروهای تناوبی، تنش‌های تناوبی منجر به خستگی است. شکست ناشی از

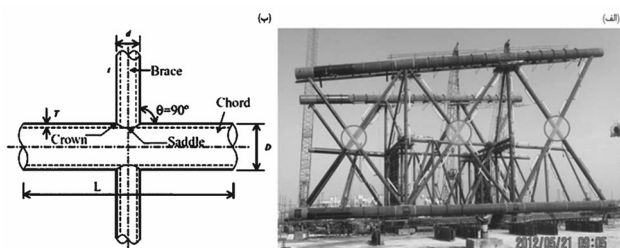
مقاطع لوله‌ای به دلیل مزایای زیادی که دارند به طور گسترده در سازه‌های فراساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور ویژه این مقاطع در زیرسازه (جکت) یک سکوی شابلونی به کار گرفته می‌شوند. این اتصالات از یک یا چند عضو مهار^۱ و یک عضو

² Chord

¹ Brace

فاکتورها، اثرات هندسه اتصال و پروفیل جوش را لحاظ می‌کنند. مدل‌های عددی نظیر مدل‌های تولید شده به روش اجزای محدود، برای تحلیل اتصالات لوله‌ای ترک خورده بسیار مناسب هستند و با استفاده از این مدل‌ها می‌توان هندسه اتصال، پروفیل جوش، قیدها، و شرایط بارگذاری را به درستی شبیه‌سازی نمود. بر خلاف آزمون‌های آزمایشگاهی، روش اجزای محدود یک راه ارزان، سریع و انعطاف‌پذیر برای مطالعه رفتار خستگی اتصالات لوله‌ای است. در تحلیل مکانیک شکست، مدل کردن مناسب ترک سطحی برای به‌دست آوردن مقادیر SIF بسیار مهم است. بنابراین نوع المان‌های بکار رفته در مدل‌سازی ترک بسیار مهم می‌باشد. Huang و همکاران (۱۹۹۸) و Haswell و Hopkins (۱۹۹۱) مدل اجزای محدود صفحه‌ای را برای مدل کردن ترک استفاده نمودند. در این مدل، جوش در نظر گرفته نشده بود. Du و Hancock (۱۹۸۹) و Chong Rhee و همکاران (۱۹۹۱) مدلی را پیشنهاد نمودند که در آن اتصال لوله‌ای با المان‌های صفحه‌ای مدل شده و ترک‌ها و پروفیل جوش با استفاده از المان‌های Solid سه بعدی مدل شدند. اما این مدل فقط برای اتصال نوع T قابل استفاده بود. زیرا فاکتور شکل برای اتصالات مختلف، متفاوت است. محدودیت دیگر روش پیشنهادی آن‌ها این است که موقعیت ترک صرفاً باید در نقطه Saddle باشد. Shao (2004) مدل اجزای محدود Solid سه بعدی با پنج نوع المان مختلف را برای مش‌بندی تمام قسمت‌های اتصال برای اتصال K استفاده نمود.

در حالی که اتصال نوع X (شکل ۱ الف) یکی از پرکاربردترین اتصالات لوله‌ای مورد استفاده در سازه جکت سکوه‌های شابلونی است، تاکنون ضرایب شدت تنش برای اتصال X شکل مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند.



شکل ۱: اتصال لوله‌ای نوع X: (الف) در یک جکت حین ساخت، (ب) مشخصات هندسی

به منظور ایجاد ارتباط بین خصوصیات هندسی اتصال و رفتار آن، در تحلیل و طراحی اتصالات لوله‌ای از یک سری پارامترهای

خستگی یکی از مهم‌ترین مودهای شکست در اتصالات لوله‌ای سکوه‌های شابلونی است؛ چرا که این اتصالات تحت اثر تمرکز تنش شدید هستند. برای تحلیل خستگی اتصال با یک ترک سطحی^۱، روش ضریب تمرکز تنش (SCF) قابل استفاده نیست. یک روش جایگزین برای محاسبه عمر باقی‌مانده چنین اتصالاتی استفاده از رویکرد مکانیک شکست است که دقت آن منوط به تخمین صحیح پارامتر ضریب شدت تنش (SIF) است.

مطالعات انجام شده در مورد اتصالات لوله‌ای، روی تعیین مقاومت استاتیکی نهایی، تحلیل تمرکز تنش، تخمین عمر خستگی، تخمین عمر باقی‌مانده اتصالات لوله‌ای ترک خورده و روش‌های تعمیر متمرکز شده‌اند. برای تحلیل‌های استاتیکی، شامل تعیین مقاومت نهایی و ضرایب تمرکز تنش، مطالعات زیادی روی انواع اتصالات مانند اتصالات T, K, X, DT, XX, KT و KK انجام شده است (Eftymiou and Durkin, 1985; Lee and Morgan, 1998; Lotfollahi-Yaghin and Ahmadi, 2010; Ahmadi et al., 2011; Ahmadi and Lotfollahi-Yaghin, 2012).

گزارش‌های به مراتب کمتری از مطالعات مکانیک شکست، به خصوص برای اتصالات با پیچیدگی‌های هندسی بیشتر مثل X, K, XX و KK موجود است. این امر عمدتاً به سبب سختی مدل‌سازی و تولید مش در تحلیل‌های اجزای محدود برای منحنی جوش و ترک سطحی است.

تا به امروز سه نوع مدل توسط محققین برای تخمین SIF اتصالات لوله‌ای به کار گرفته شده است: مدل‌های نیمه تجربی^۲، مدل‌های صفحه‌ای^۳، و مدل‌های عددی^۴. Hopkins و Haswell (۱۹۹۱) مطالعاتی روی مزایا و معایب این مدل‌ها انجام داده‌اند. اساس مدل‌های نیمه تجربی، انجام آزمایش روی اتصال لوله‌ای با مقیاس واقعی می‌باشد که بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. مدل‌های صفحه‌ای بر اساس راه‌حل‌های SIF برای یک صفحه مسطح توسعه داده شده‌اند. این مدل‌های ساده، پاسخ دقیقی برای اتصالات لوله‌ای که دارای هندسی به مراتب پیچیده‌تری هستند، به دست نمی‌دهند. Lee و Bowness (۲۰۰۰) و Lee و Bowness (۲۰۰۱) عوامل تصحیحی برای به‌دست آوردن SIF اتصالات لوله‌ای با استفاده از معادلات یک مدل صفحه‌ای ارائه نمودند. این

¹ Surface crack

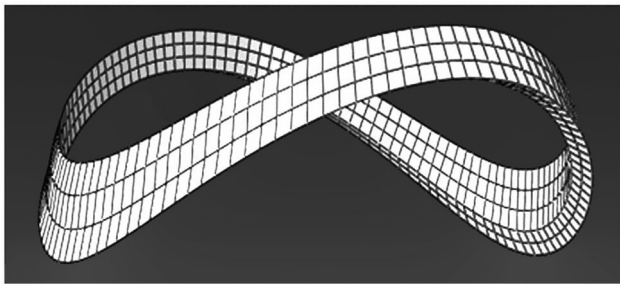
² Semi-empirical models

³ Plate models

⁴ Numerical models

عضو مهاری (d) به قطر عضو اصلی (D)، L_w اندازه پای جوش در نقطه Crown، و H_w ارتفاع پروفیل جوش در نقطه Crown است. پارامتر ψ نیز به صورت زاویه بین صفحات مماس بر اعضای اصلی و مهاری، در هر نقطه حول منحنی محل تلاقی این اعضا تعریف می‌شود. نقاط Saddle و Crown در شکل ۱ ب نشان داده شده‌اند.

Herion و همکاران (۱۹۹۶) نشان دادند که المان‌های صفحه‌ای^۲ نمی‌توانند پروفیل جوش را به درستی مدل کنند و در مطالعات مکانیک شکست، نتایج عددی به دست آمده از مدل‌هایی که تنها با المان‌های صفحه‌ای تولید شده‌اند، قابل پذیرش نیستند. بنابراین مدل کردن جوش و دیگر قسمت‌های اتصال با المان‌های Solid سه بعدی ضروری است. در این تحقیق نیز پروفیل جوش توسط المان‌های سه بعدی Solid شش وجهی مدل شده است. شکل ۲ پروفیل جوش مدل شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲: پروفیل جوش مش‌بندی شده

۲-۲. مدل‌سازی هندسی ترک سطحی

آزمون‌های آزمایشگاهی روی مدل‌های با ابعاد واقعی نشان می‌دهند که شکل ترک نه تنها حول محل تقاطع عضو مهاری و اصلی در امتداد پنجه جوش، دارای یک شکل منحنی است؛ بلکه علاوه بر آن، در راستای ضخامت عضو اصلی و در زیر پنجه جوش نیز به شکل منحنی است (Bowness and Lee, 1995). بنابراین تعریف و مدل کردن اجزای محدود این منحنی دوگانه در زیر پنجه جوش به خصوص برای ترک سطحی بسیار پیچیده است. Bowness و Lee (۱۹۹۸) مقایسه‌ای بین انحناهای مختلف در امتداد ضخامت انجام دادند و دریافتند که ترک در راستای یک خط مستقیم که تقریباً عمود بر دیواره عضو اصلی است، انتشار می‌یابد. بر اساس این ایده و طبق تئوری حداقل انرژی، ترک

هندسی بی‌بعد استفاده می‌شود. در این پژوهش، به بررسی ضریب شدت تنش در اتصال X و تاثیر پارامترهای هندسی بی‌بعد روی مقادیر SIF در این نوع اتصال پرداخته شد. همین‌طور برای مدل-سازی و تحلیل اتصالات مورد مطالعه در این پژوهش، از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده گردید. برای محاسبه ضرایب شدت تنش از روش انتگرال J در امتداد جبهه ترک سطحی استفاده شد و نتایج تحلیل عددی، از طریق مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، مورد صحت‌سنجی قرار گرفتند.

۲. مدل‌سازی هندسی و تحلیل اتصال لوله‌ای X شکل دارای ترک سطحی

دقت مقادیر SIF به دست آمده از تحلیل اجزای محدود، به ۳ فاکتور مهم شامل مدل‌سازی هندسی جوش، مدل‌سازی جزئیات ترک، و المان‌های مورد استفاده در محل تقاطع اعضای اصلی و مهاری و همچنین جبهه ترک^۱ وابستگی دارد.

۲-۱. مدل‌سازی پروفیل جوش

از آن جا که مدل کردن اتصال جوش شده بسیار مشکل است، بسیاری از محققین شبیه‌سازی پروفیل جوش را در مدل نادیده می‌گیرند. با این حال، هندسه و ابعاد پروفیل جوش تاثیر زیادی روی نتایج SIF دارند. تحقیقات انجام گرفته روی اثر پروفیل جوش نشان داده است که مقاومت اتصال بدون لحاظ نمودن پروفیل جوش در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، ۲۰٪ کم‌تر بوده است (Lee 1999; Cao et al., 1997; Wilmshurst and Lee 1995). در پژوهش حاضر، هندسه و ابعاد جوش بر مبنای ضوابط AWS D1.1 (2000) به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$F = \frac{t}{2} * \frac{135^\circ - \psi}{45^\circ} \quad \psi = 180^\circ - \cos^{-1}(\beta) \quad (1)$$

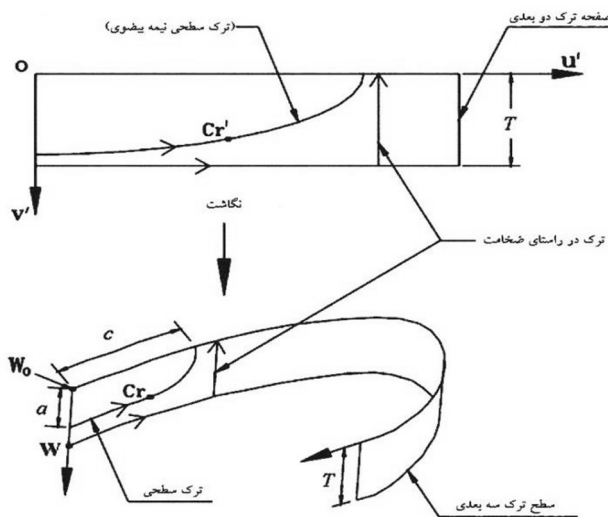
$$H_w = 0.85t + 4.24 \quad L_w = 0.5t \quad (2)$$

در روابط فوق، t ضخامت جدار عضو مهاری (بر حسب میلی‌متر)، F اندازه پای جوش در نقطه Saddle، β نسبت قطر

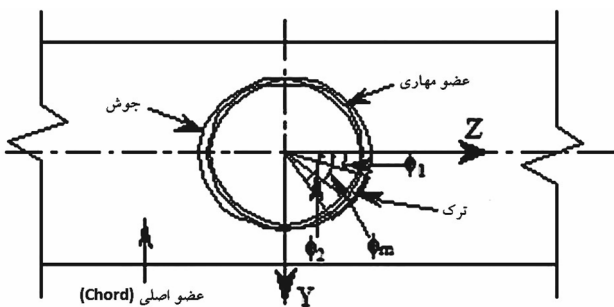
² Shell elements

¹ Crack front

جوش قرار گرفته‌اند به عنوان دو نوک ترک^۲ تعریف می‌شوند. این نقاط باید به درستی بر سطح عضو اصلی به هنگام مدل‌سازی مشخص شوند. موقعیت ترک در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل، $\phi 1$ و $\phi 2$ زوایای نوک ترک نسبت به نقطه Crown روی عضو اصلی هستند. ϕm وسط ترک سطحی، یعنی جایی که عمق ترک حداکثر است را نشان می‌دهد. در این تحقیق، $\phi m=0$ در نظر گرفته شده است.



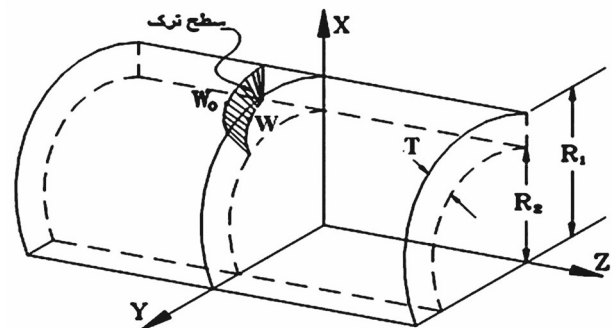
شکل ۴: تصویر صفحه نرمالیزه شده دو بعدی روی سطح ترک سه بعدی



شکل ۵: موقعیت ترک سطحی

جبهه ترک خطی است که دو نوک ترک را به هم وصل می‌کند و در واقع مکان هندسی نقاطی است که از عمیق‌ترین قسمت ترک در هر نقطه عبور می‌کند و شکل نیمه بیضوی را ایجاد می‌کند. شکل ۶، طول ترک، جبهه ترک و دو نوک ترک را که بر یک سطح دو بعدی ترسیم شده‌اند در شکل ۶ نشان داده شده است. c در این شکل نصف طول ترک و a عمق ترک در وسط طول ترک است.

روی یک سطح سه بعدی مانند آنچه در شکل ۳ نشان داده شده است، انتشار می‌یابد؛ به طوری که انرژی مورد نیاز برای انتشار ترک حداقل خواهد بود. سطح منحنی قرار گرفته در امتداد ضخامت عضو اصلی، سطح ترک نامیده می‌شود. جبهه ترک روی این سطح قرار گرفته است. ترک در امتداد عمود بر سطح عضو اصلی، در نقطه W_0 انتشار خواهد یافت و حداکثر عمق ترک همواره توسط ضخامت عضو اصلی (T) محدود می‌شود. از این رو خط W_0-W از میان محور Z در شرایطی که $X=Y=0$ است، عبور خواهد کرد. شکل ۴، ترک در راستای ضخامت را که به صورت یک خط افقی مستقیم روی یک صفحه صاف نرمالیزه شده است نشان می‌دهد.



شکل ۳: ترک سطحی در راستای ضخامت عضو اصلی

ترک سطحی در امتداد پنجه جوش و با عمق ترک متغیر انتشار خواهد یافت. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، شکل ترک در این حالت به صورت نیمه بیضوی است. همچنین در این شکل، عمق ترک (a) و نصف طول ترک (c) مشخص شده است. آزمون‌های آزمایشگاهی با ابعاد واقعی نشان داده‌اند که شکل ترک تقریباً به صورت نیمه بیضوی است. در این تحقیق، نمونه‌ها با ترک سطحی نیمه بیضوی ساخته و تحلیل شده‌اند.

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی با ابعاد واقعی، ترک در محل تنش ناحیه ملتهب^۱ ایجاد می‌شود. این ناحیه معمولاً در نقطه Crown قرار دارد. بنابراین در این تحقیق، ترک در نقطه Crown در نظر گرفته شده است؛ به طوری که نقطه وسط ترک یعنی جایی که ترک دارای عمق حداکثر است، در محل Crown واقع شده است و کل طول ترک که در امتداد پنجه جوش است، به صورت متقارن در طرفین این نقطه قرار دارند. انتهای دو طرف ترک که روی سطح عضو اصلی و در محل پنجه

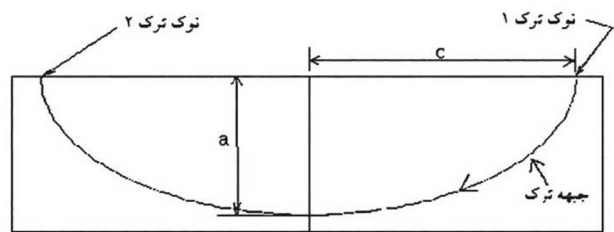
² Crack tip

¹ Hot-spot stress

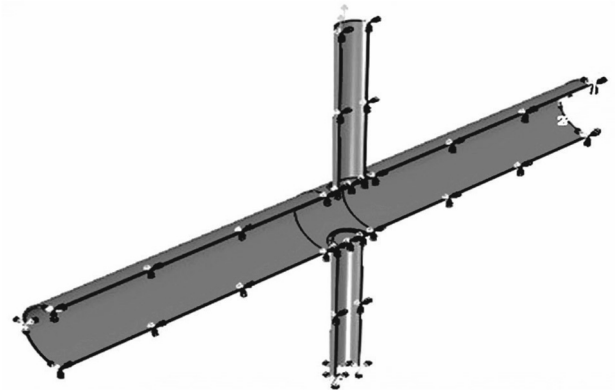
کششی به بزرگی ۱/۰ مگاپاسکال در انتهای عضو مهاری اعمال شده است و در دو انتهای عضو اصلی، تکیه‌گاه گیردار در نظر گرفته شده است.

۵-۲. مش‌بندی اتصال X شکل و ترک سطحی

دقت نتایج عددی وابستگی زیادی به مش تولیدی برای اتصالات لوله‌ای دارد. به‌خصوص برای نواحی اطراف ترک که در آن‌ها، دقت نتایج SIF بسیار مهم است. جداول ۱ و ۲ انواع المان‌هایی را که توسط Wong (2000) و Shao (2004) برای اتصالات T و K شکل به‌کار گرفته شده‌اند نشان می‌دهد. در این تحقیق نیز از این المان‌ها استفاده شده است.



شکل ۶: ترک سطحی ترسیم شده روی صفحه دو بعدی



شکل ۷: مدل هندسی تولید شده برای اتصال X شکل

۳-۲. مدل‌سازی هندسی اتصال X شکل

اتصال X شکل از دو عضو مهاری که در امتداد هم و در طرفین عضو اصلی قرار گرفته است تشکیل شده است. در این تحقیق، زاویه تقاطع اعضای مهاری $\theta = 90^\circ$ در نظر گرفته شده است. تمام مراحل مدل‌سازی و تحلیل با نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS انجام شده است. خصوصیات مواد به صورت الاستیک، ایزوتروپیک و همگن با مدول یانگ $E = 205 \text{ KN/mm}^2$ و نسبت پواسون $\nu = 0.3$ تعریف شده است.

۴-۲. شرایط مرزی و بارگذاری

با توجه به شکل ۷، بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی نسبت به صفحه YZ متقارن است. در نتیجه صرفاً نصف مدل هندسی ساخته شده و در صفحه YZ، از شرایط مرزی متقارن استفاده شده است؛ یعنی جابجایی گره‌ها در راستای محور X کاملاً مقید شده است. استفاده از شرایط مرزی متقارن، با کاهش ابعاد مدل، منجر به کاهش تعداد المان‌ها شده و در نتیجه، زمان تحلیل کاهش چشم‌گیری خواهد داشت. در تمام مدل‌ها، تنش محوری

جدول ۱: المان‌های Solid سه بعدی خطی

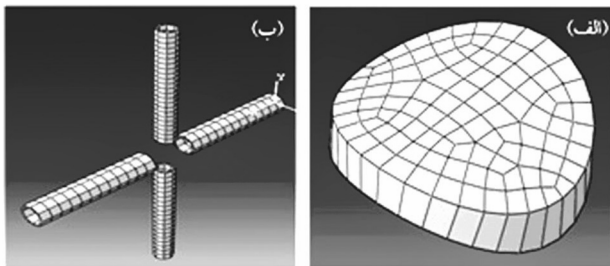
شکل المان	تعداد گره	نوع المان	ردیف
	۸	Hexahedral/Cubic Element – (H8)	۱
	۶	Prism/Wedge – (P6)	۲
	۶	Quarter Point / Crack Element – (QP6)	۳
	۴	Tetrahedron – (T4)	۴
	۸	Pyramid – (PR8) (Collapsed Hexahedral)	۵

جدول ۲: المان‌های Solid سه بعدی درجه دوم

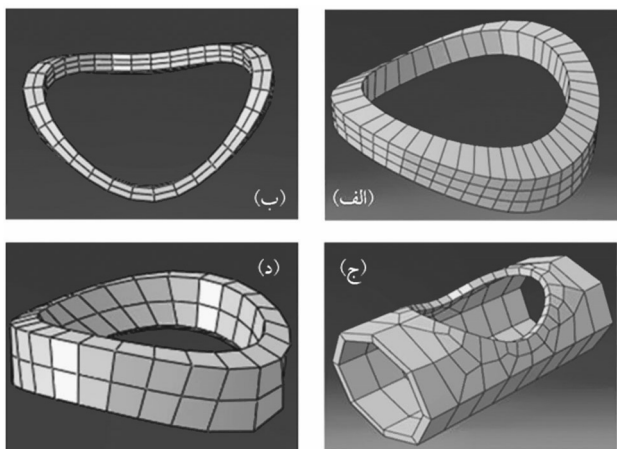
شکل المان	تعداد گره	نوع المان	ردیف
	۲۰	Hexahedral/Cubic Element – (H20)	۱
	۱۵	Prism/Wedge – (P15)	۲
	۱۵	Quarter Point/Crack Element – (QP15) (Collapsed Prism)	۳
	۱۰	Tetrahedron – (T10)	۴
	۲۰	Pyramid – (PR20) (Collapsed Hexahedral)	۵

برای کاهش پیچیدگی کار مش‌بندی، به‌خصوص در نواحی مجاور محل تقاطع اعضای اصلی و مهاری اتصال، پروفیل جوش و ترک استفاده گردید. همین‌طور به منظور شناسایی المان‌هایی که نسبت ابعادی آن‌ها خارج از محدوده مجاز است؛ و به جهت مرتبط کردن المان‌های مختلف به یکدیگر، در مرحله اول از المان‌های خطی استفاده شد (جدول ۱) و بعد از شکل-گیری مش‌بندی در مناطق تقسیم‌بندی شده مورد اشاره در ادامه

یافته است. در ناحیه D، مشابه با ناحیه B، تعداد المان‌ها در راستای ضخامت افزایش یافته است. ناحیه E، مناطق CH(L&R) را به D متصل می‌کند. در این ناحیه، تعداد المان‌ها در عضو اصلی از ۸ به ۱۶ تغییر کرده است. ناحیه‌های G1 و G2، نواحی H(U&D) را به نواحی محل تقاطع اعضا متصل می‌کنند. در شکل ۱۰ ناحیه CF نشان داده شده است که محل تقاطع اعضا را شامل می‌شود. این ناحیه، منطقه‌ای با مش ریز است. ترک سطحی و جوش در این ناحیه قرار دارند. جبهه ترک از ناحیه CF استخراج شده و به طور جداگانه مش‌بندی می‌شود. مش ترک در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل ۱۲ نیز نحوه اتصال المان‌های ترک توسط المان‌های چهار وجهی ۱۰ گرهی را به مناطق مجاور نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، جبهه ترک توسط سه حلقه از المان‌ها مش‌بندی شده که حلقه اول به عنوان جبهه ترک معرفی می‌شود. هر حلقه شامل ۸ المان است. تعداد و اندازه المان‌ها بستگی به اندازه ترک دارد. در دیواره عضو اصلی در جایی که ترک سطحی واقع شده است، ضخامت عضو اصلی با سه لایه المان مدل می‌شود.



شکل ۸: الف) مش ناحیه A، ب) مش نواحی CH(L&R) و H(U&D)



شکل ۹: الف) مش ناحیه B، ب) مش ناحیه D، ج) مش ناحیه E، د) مش نواحی G1 و G2

و اتصال نواحی به هم، برای به دست آوردن نتایج بهتر، با افزودن گره‌های میانی، المان‌های خطی به المان‌های درجه دو تبدیل شدند (جدول ۲).

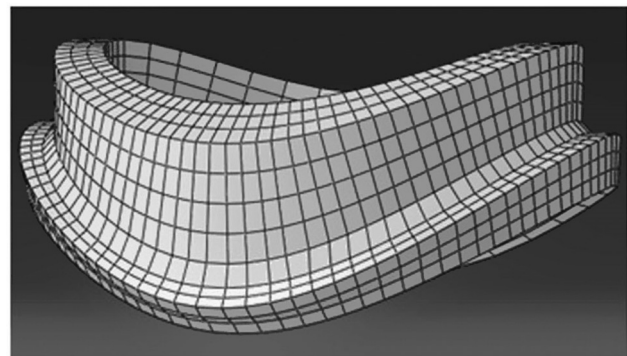
به علت هندسه پیچیده اتصال در محل تقاطع و به ویژه ترک سطحی، نوع المان‌های به کار رفته در این نواحی و در امتداد جبهه ترک و از همچنین نسبت ابعادی^۱ این المان‌ها بسیار مهم هستند. نرم‌افزار ABAQUS این قابلیت را دارد که نسبت ابعادی را کنترل کند. برای این منظور محدودیت‌های نسبت ابعادی را تعریف کرده و پس از مش‌بندی، المان‌هایی که نسبت ابعادی آن‌ها از محدوده مورد نظر خارج شده و یا به اصطلاح بدشکل شده باشند، به راحتی شناسایی و اصلاح می‌گردند. به طور کلی در تولید مش اتصال، باید نکات زیر در نظر گرفته شوند:

۱) مش در نزدیک مناطقی که گرادیان بالای تنش وجود دارد، به حد کافی ریز و با کیفیت باشد.
 ۲) در نقاط دور از مناطق با گرادیان‌های تنش بالا، نیاز به مش‌های ریز نیست. در نتیجه در این نواحی برای صرفه‌جویی در زمان تحلیل و نیاز به حافظه کم‌تر، مش درشت‌تر کفایت می‌کند.
 ۳) برنامه‌های تولید مش باید قادر باشند المان‌هایی که دارای اعوجاج و نسبت ابعادی بیش از حد هستند را شناسایی و کنترل کنند.

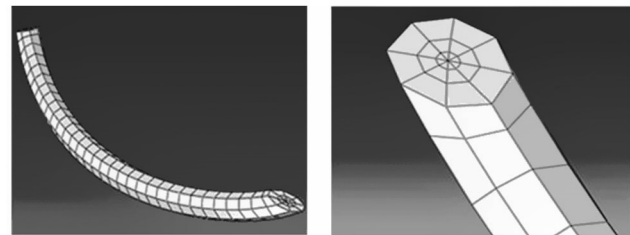
۴) اگر سازه متقارن است، مش سازه نیز باید متقارن باشد. این کار مدل‌سازی را ساده کرده و زمان محاسبات را کاهش می‌دهد. با توجه به نکات فوق، اتصال به سه منطقه تقسیم می‌شود: الف) منطقه با مش درشت، ب) منطقه با مش ریز، ج) منطقه با مش انتقالی. در شکل ۸ مناطق با مش درشت نشان داده شده‌اند. این مناطق از یک لایه المان در راستای ضخامت تشکیل شده‌اند؛ زیرا گرادیان تنش در راستای ضخامت در این مناطق یکنواخت است. در این شکل، منظور از ناحیه A، منطقه مرکز اتصال و جزئی از عضو اصلی است. ناحیه‌های CH(L&R) مناطق دور از محل تقاطع اعضا و در دو طرف آن و جزئی از عضو اصلی هستند. نواحی H(U&D) مناطق دور از محل تقاطع اعضا و دو انتهای اعضای مهاری هستند. مناطق با مش انتقالی در شکل ۹ نشان داده شده است. ناحیه B، ناحیه A را به ناحیه مرکز اتصال وصل می‌کند. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در این ناحیه تعداد المان‌ها در راستای ضخامت از یک به سه افزایش

^۱ Aspect ratio

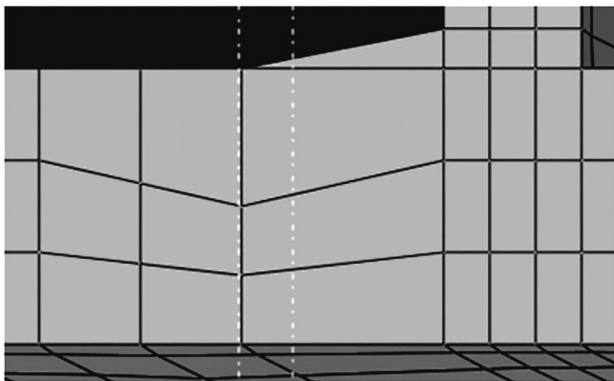
در شکل ۱۳، علت انتقال المان به پایین، ورود ترک به المان دوم است. در واقع هدف از به‌کارگیری این ترفند، کاهش پیچیدگی مدل‌سازی است. همین‌طور چون ترک جداگانه مدل می‌شود و در آخر قسمت‌های جدا سرهم می‌شوند، این انتقال گره به پایین، با توجه به محدودیت‌های موجود در نرم‌افزار ABAQUS، به صورت دستی انجام گردید. همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید، طبق مطالعات Bowness و Lee (۱۹۹۸)، ترک در راستای یک خط مستقیم که تقریباً عمود بر دیواره عضو اصلی است، انتشار می‌یابد. همچنین در مورد انتخاب نوع ترک، با توجه به تحقیقات انجام گرفته به صورت آزمایشگاهی و بر اساس مدل‌های بزرگ‌مقیاس، شکل نیمه بیضوی نزدیک‌ترین شکل به وضعیت واقعی ترک است (Bowness and Lee, 1998).



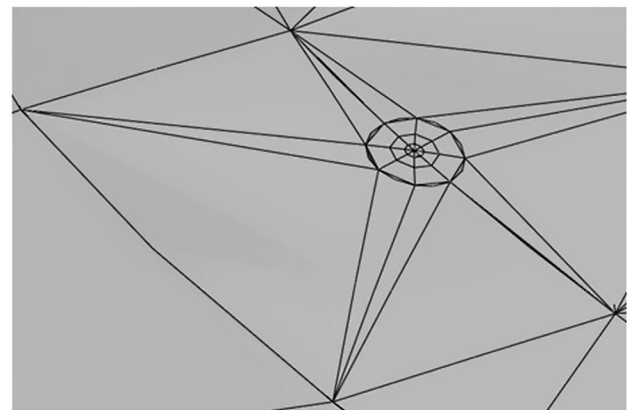
شکل ۱۰: مش ناحیه CF



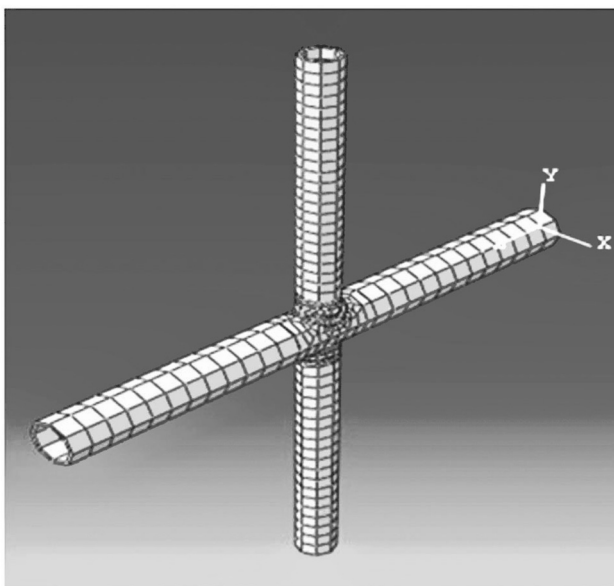
شکل ۱۱: مش ترک سطحی



شکل ۱۳: المان انتقال داده شده به پایین ترک سطحی در سطح ترک خورده



شکل ۱۲: نحوه اتصال المان‌های ترک سطحی به المان‌های مجاور



شکل ۱۴: اتصال X شکل با مش بندی کامل

سطح ترک حداقل از یک لایه المان عبور می‌کند. برای کاهش پیچیدگی، یکی از المان‌ها به پایین سطح ترک انتقال داده می‌شود. در نتیجه، المان‌های سطح ترک درون یک المان روی دیواره عضو اصلی قرار می‌گیرند. در مناطق مجاور این ناحیه، سه لایه المان در راستای ضخامت در جای خود قرار دارند. المان انتقال داده شده به پایین ترک سطحی و ترتیب المان‌ها در مجاورت آن در اتصال X شکل در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همین‌طور یک اتصال X که به طور کامل مش‌بندی شده در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

آزمایشگاهی موجود، مقایسه شدند. مشخصات مدل T شکل مورد بررسی به شرح زیر است.

$$T=27/8 \text{ mm}, t=25/4 \text{ mm}, D/2=177/8 \text{ mm} \quad (3)$$

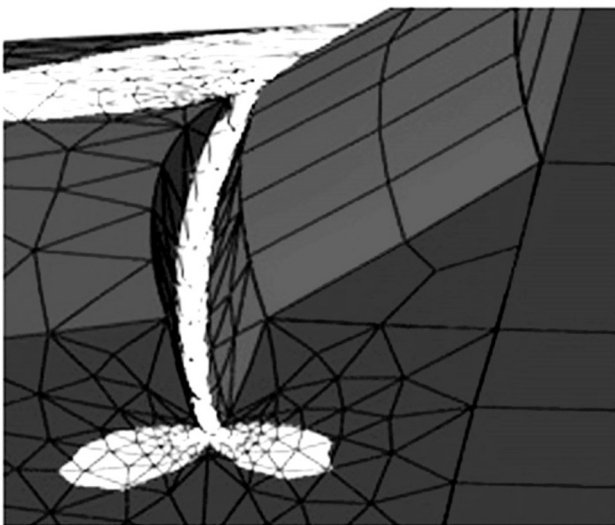
$$d/2=136/5 \text{ mm}, L=4130/0 \text{ mm}$$

$$l=2159/0 \text{ mm}, \theta_2=90^\circ, \Phi_1=-22/5, \Phi_2=22/5$$

$$a/T=0/5, 2c=57/11 \text{ mm}$$

در روابط فوق، T و t به ترتیب ضخامت اعضای اصلی و مهاري، D و d به ترتیب قطر اعضای اصلی و مهاري، L و l به ترتیب طول اعضای اصلی و مهاري و θ زاویه بین اعضای اصلی و مهاري است. بقیه پارامترها در شکل‌های ۵ و ۶ تعریف شده‌اند. مدول یانگ $E=205 \text{ kN/mm}^2$ و ضریب پواسون $\nu=0/3$ در

نظر گرفته شد. بارگذاری به صورت یک بار محوری برابر 1 MPa در انتهای عضو مهاري اعمال گردید. شرایط مرزی هر دو انتهای عضو اصلی به صورت کاملاً ثابت در نظر گرفته شد و با توجه به تقارن، صرفاً مدل‌سازی نیمی از هندسه اتصال کافی بود. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، نتیجه SIF در مود اول شکست در نقطه $\sigma/\pi=0$ ، برابر $K_I=11/6 \text{ MPa} \cdot (\text{m}^{1/2})$ به دست آمد. در مدل اجزای محدود مورد استفاده برای صحت‌سنجی در این تحقیق، در نقطه $\sigma/\pi=0$ SIF برابر با $K_I=9/45 \text{ MPa} \cdot (\text{m}^{1/2})$ به دست آمد. این نتیجه از میانگین داده‌ها در کانتورهای انتگرال محاسبه شد. با توجه به نتایج فوق، ۱۸٪ اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود وجود دارد که با توجه به ماهیت پیچیده مسئله، قابل قبول تلقی می‌گردد. بازشدگی ترک سطحی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: بازشدگی ترک سطحی در اتصال X شکل

اتصال و مرتبط کردن نواحی مختلف به هم، به طور مثال ترک سطحی به المان‌های مجاور، از طریق تعریف سطوح تماس (ناحیه ترک به عنوان سطح اصلی) انجام گرفت. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مش‌بندی از طریق تقسیم نواحی، مش‌بندی جداگانه آن‌ها و سپس سرهم‌بندی کلی بعد از تکمیل مش هر قسمت انجام گردید. از المان‌های انتقالی در این مرحله برای نواحی مختلف کمک گرفته شد.

مش‌بندی ترک سطحی توسط سه رینگ از المان‌ها انجام گرفت که هر رینگ شامل هشت المان بود و رینگ اول به عنوان جبهه ترک معرفی گردید.

۲-۶. آزمون همگرایی

نتایج SIF با افزایش چگالی مش تغییر خواهند کرد. برای به دست آوردن نتایج درست، باید به یک چگالی مش مناسب دست یافت؛ به طوری که بتوان بدون قربانی کردن دقت، زمان تحلیل را تا حد امکان کاهش داد. برای رسیدن به چگالی مش مورد نظر، مدل در چند مرحله تحلیل شده و در هر مرحله تعداد المان‌ها در ناحیه‌های با گرادیان تنش بالا (مناطق با مش ریز)، دو برابر می‌شود. این کار تا جایی ادامه می‌یابد که دیگر با اضافه کردن المان‌ها تغییر زیادی در نتایج ایجاد نشود. مسئله دیگری که لازم است مشخص شود تعداد کانتورهای انتگرال مورد استفاده است. برای تعیین تعداد مطلوب کانتورها تحلیل‌های متعددی انجام شد. نتایج نشان دادند که وقتی تعداد کانتورها بیشتر از ۵ اختیار می‌شوند، در نتایج تغییر زیادی حاصل نمی‌شود؛ و با این تعداد کانتور، نتایج همگرا می‌شوند. لذا در این تحقیق تعداد کانتورها ۵ در نظر گرفته شد.

۲-۷. صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

از آنجا که نتایج آزمایشگاهی ارزیابی SIF برای اتصال X شکل وجود نداشت، در این تحقیق برای صحت‌سنجی نتایج از داده‌های آزمایشگاهی SIF برای اتصال T شکل استفاده شد. این داده‌ها توسط Huang (2002) استخراج گردید.

برای این منظور، روش مورد استفاده در این تحقیق برای مدل‌سازی اتصال لوله‌ای ترک خورده X شکل، در مورد اتصال T شکل به کار گرفته شد و نتایج به دست آمده با داده‌های

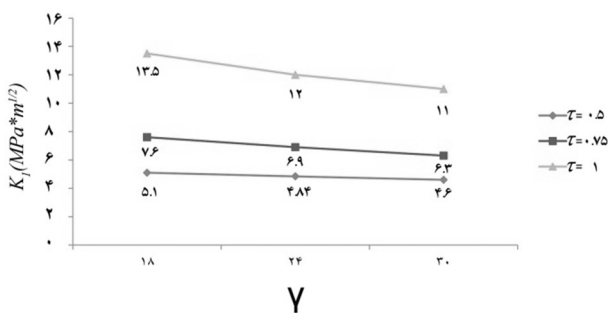
$$c/a \in [5,8] \quad , \quad a/T \in [0.1,0.7] \quad (5)$$

که d و D به ترتیب قطر اعضای مهارى و اصلى، t و T به ترتیب ضخامت جدار اعضای مهارى و اصلى، و a و c به ترتیب عمق و نصف طول ترک هستند.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. اثر پارامتر γ روی مقادیر SIF

اولین پارامتر هندسی که مورد بررسی قرار می‌گیرد γ است، که برابر نسبت نصف قطر عضو اصلى به ضخامت آن است. ارتباط بین SIF و γ برای اتصال X شکل تحت بار کششی محوری در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در شرایطی که پارامترهای a/T و c/a ثابت نگه داشته شده‌اند، مقدار K_I با مقدار γ تقریباً نسبت عکس دارد. بزرگ‌تر شدن γ بدین معنی است که با ثابت نگه داشتن قطر عضو اصلى (D)، ضخامت عضو اصلى (T) کوچک‌تر می‌شود و همچنین عمق ترک (a) و طول ترک ($2c$) با توجه به این که مقادیر a/T و c/a ثابت هستند، کوچک‌تر خواهند شد. این وضعیت منجر به کوچک‌تر شدن ترک شده و در نتیجه K_I که با اندازه ترک نسبت مستقیم دارد، کاهش می‌یابد. این کاهش تقریباً خطی است.



شکل ۱۶: اثرات τ و γ روی نتایج SIF ($c/a=5$, $a/T=0.5$, $\beta=0.4$)

۳-۲. اثر پارامتر τ روی مقادیر SIF

ارتباط بین τ و SIF در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این پارامتر هندسی بی‌بعد، نسبت ضخامت عضو مهارى (t) به ضخامت عضو اصلى (T) است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با افزایش τ ، K_I افزایش می‌یابد. علت این است

لازم به یادآوری است که روش به کار رفته در این تحقیق برای مدل‌سازی اتصال X ترک خورده، با روش به کار گرفته شده توسط Huang (2002) برای اتصال T یکسان بوده و لذا نتایج صحت‌سنجی مدل اجزای محدود مطالعه حاضر بر مبنای داده‌های مربوط به اتصال T، می‌تواند قابل استناد تلقی شود. با این وجود، در صورت موجود بودن داده‌های آزمایشگاهی برای اتصال X، صحت‌سنجی مدل اجزای محدود بر مبنای چنین داده‌هایی می‌تواند از قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار باشد.

۲-۸. جزئیات مطالعه پارامتری

اتصالات لوله‌ای X شکلی که در عمل به کار گرفته می‌شوند، در معرض ترکیبی از انواع بارهای مختلف قرار می‌گیرند. بار متعادل محوری، خمش درون صفحه^۱، خمش برون صفحه^۲ سه نوع کلی از این بارگذاری‌ها هستند. توزیع تنش ناحیه ملتهب تحت اثر بارهای محوری و خمش درون صفحه، نسبت به نقطه Crown و در امتداد پنجه جوش متقارن است. برای اتصالات لوله‌ای اثر بارهای محوری و خمش درون صفحه غالب می‌باشد؛ و خمش برون صفحه اثر کمی دارد (Shao, 2004). در این تحقیق، فقط اثر بارهای محوری بررسی شد. بدین منظور، همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تنش کششی به بزرگی ۱/۰ مگاپاسکال در انتهای عضو مهارى اعمال شد. ترک از منطقه تنش ناحیه ملتهب شروع شده و با توجه به این که این ناحیه معمولاً در نقطه Crown قرار دارد، قابل پیش‌بینی است که ترک در این موقعیت واقع شده باشد. در این تحقیق، مدل اتصال X شکل توسط نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS تولید و تحت بار محوری تحلیل شد. در تمام این مدل‌ها، ترک‌های سطحی در موقعیت متقارن نسبت به نقطه Crown قرار دارند. در پژوهش حاضر، محدوده مورد مطالعه برای پارامترهای هندسی اتصال لوله‌ای X شکل و پارامترهای شکل ترک بر اساس CIDECT (2000) انتخاب شد. این محدوده‌ها به قرار زیر هستند:

$$\gamma = D / 2T \in [12,30] \quad , \quad \beta = d / D \in [0.3,0.6] \quad (4)$$

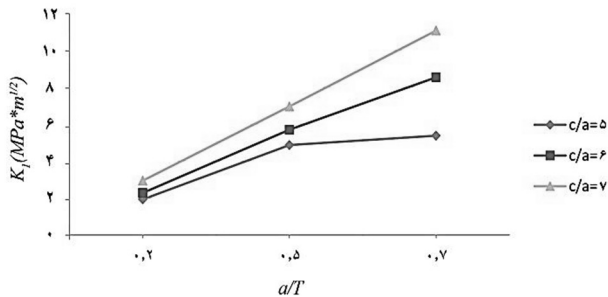
$$\tau = t / T \in [0.25,1.0]$$

¹ Balanced axial load

² In-plane bending (IPB)

³ Out-of-plane bending (OPB)

افزایش می‌یابد. علت این است که مقدار a/T بزرگ‌تر، به معنی ترک عمیق‌تر است. در نتیجه انتشار ترک سریع‌تر خواهد بود و در این حالت SIF باید بزرگ‌تر باشد. شکل ۱۸ تغییرات SIF در برابر c/a را نیز نشان می‌دهد. با مشاهده نمودار برای یک مقدار ثابت a/T ، با افزایش c/a ، مقدار K_I هم افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸: اثرات a/T و c/a روی نتایج SIF ($\beta=0.4$ ، $\tau=0.5$ ، $\gamma=1.8$)

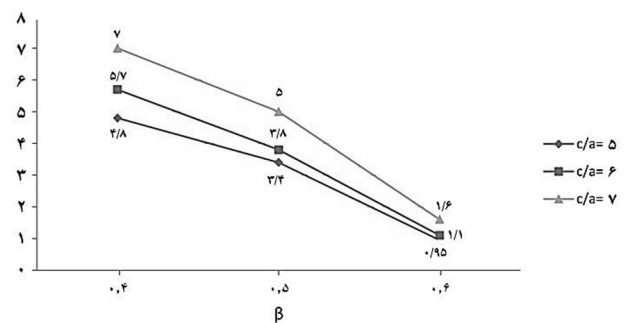
۴. نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، تأثیر خصوصیات هندسی اتصال و ترک روی ضرایب شدت تنش یک اتصال لوله‌ای X شکل مورد مطالعه قرار گرفت. ترک سطحی روی عضو اصلی، در امتداد پنجه جوش، در محل تقاطع اعضای اصلی و مهار، در نقطه Crown مدل شد. پس از تولید مدل هندسی اتصال، پروفیل جوش، و ترک سطحی و سپس تولید مش مناسب، انجام آزمون همگرایی و نهایتاً صحت‌سنجی مدل اجزای محدود با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، اثر پارامترهای هندسی بی‌بعد اتصال و ترک روی نتایج SIF بررسی گردید. نتایج ضرایب شدت تنش در اتصال لوله‌ای X شکل تحت تأثیر نحوه مدل‌سازی، مش‌بندی، نسبت ابعادی المان‌های به‌کار رفته و هندسه جوش بودند. روش انتگرال J برای به‌دست آوردن SIF در ترک سطحی مناسب می‌باشد. افزایش پارامتر γ که برابر نسبت نصف قطر عضو اصلی به ضخامت آن است ($\gamma = D/2T$) باعث کاهش مقادیر SIF می‌شود. با افزایش پارامتر β که به صورت نسبت قطر عضو مهار به عضو اصلی ($\beta = d/D$) تعریف می‌شود، مقادیر SIF با شیب تندی کاهش پیدا می‌کنند. افزایش پارامتر τ که به صورت نسبت ضخامت عضو مهار به عضو اصلی تعریف می‌شود ($\tau = t/T$)، منجر به افزایش SIF می‌شود. افزایش نسبت c/a و یا a/T سبب افزایش SIF می‌گردد که c به ترتیب نشان‌دهنده عمق ترک و نصف طول ترک هستند.

که افزایش τ ، در صورت ثابت بودن γ و قطر عضو اصلی، به معنی افزایش ضخامت عضو مهار است. ضخامت بیشتر عضو مهار منجر به تمرکز تنش بالاتر در پنجه جوش شده و این مسئله باعث افزایش K_I در عضو اصلی می‌شود.

۳-۳. اثر پارامتر β روی SIF

ارتباط بین مقادیر SIF و پارامتر β در شکل ۱۷ نشان داده شده است. β نسبت قطر عضو مهار (d) به قطر عضو اصلی (D) است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی، نشان‌دهنده رابطه معکوس β با SIF هستند. همان‌طور که در شکل ۱۷ قابل مشاهده است، با افزایش β ، مقادیر SIF با شیب تندی کاهش می‌یابند. افزایش β ، با فرض ثابت بودن قطر عضو اصلی، به معنی افزایش شعاع عضو مهار است.



شکل ۱۷: اثرات β و c/a روی نتایج SIF ($\gamma=1.8$ ، $\tau=0.5$ ، $a/T=0.5$)

۳-۴. اثر نسبت c/a ترک روی مقادیر SIF

ارتباط β با SIF و همین‌طور اثر c/a (نسبت نصف طول ترک به عمق آن) روی SIF در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت c/a ، بر مقدار K_I افزوده می‌شود. در صورت ثابت بودن قطر عضو اصلی، با بزرگ‌تر شدن نسبت c/a ، ترک طولی‌تر می‌شود. وضعیت ترک طولی‌تر مانند یک ترک کم‌عمق‌تر است و طبیعی است که SIF در عمیق‌ترین نقطه چنین ترکی باید خیلی بزرگ‌تر باشد.

۳-۵. اثر نسبت a/T ترک روی مقادیر SIF

ارتباط بین نسبت a/T و SIF در شکل ۱۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار SIF در اثر افزایش نسبت a/T

- Efthymiou, M.; Durkin, S., 1985. Stress concentrations in T/Y and gap/overlap K-joints. Proceedings of the Conference on Behavior of Offshore Structures, Delft. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 429-440PP.
- Haswell, J.; Hopkins, P., 1991. A review of fracture mechanics models of tubular joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 14: 483-497.
- Herion, S.; Mang, F.; Puthli, R., 1996. Parametric study on multiplanar K-joints with gap made of circle hollow sections by means of the finite element method. Proceeding of the Sixth International Offshore and polar Engineering Conference, Los Angeles, CA, IV: 68-73.
- Huang, X.; Du, Z.Z.; Hancock, J.W., 1998. A finite element evaluation of the stress intensity factors of surface cracks in a tubular T joint. Offshore Technology Conference, OTC 5165.
- Huang, Z.W., 2002. Stress intensity factor of cracked steel tubular T and Y-joints under complex loads. Ph.D. Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
- Lee, M.M.K., 1999. Strength, stress and fracture analyses of offshore tubular joints using finite elements. *Journal of Constructional Steel Research*, 51: 256-286.
- Lee, M.M.K.; Bowness, D., 2001. Prediction of stress intensity factors in semi-elliptical weld toe cracks in offshore tubular joints. Proceedings of the International Symposium and Euro Conference on Tubular Structures, Dusseldorf, Germany, 299-308.
- Lee, M.M.K.; Morgan, M.R., 1998. Prediction of stress concentration factors in in-plane moment loaded tubular K-joints. Proceedings of the 8th International Symposium on Tubular Structures, Singapore, 305-314PP.
- Lee, M.K.; Wilmshurst, S.R., 1995. Numerical modeling of CHS joints with multiplanar double-K configuration. *Journal of Constructional Steel Research*, 32: 281-301.
- Lotfollahi-Yaghin, M.A.; Ahmadi, H., 2010. Effect of Ahmadi, H.; Lotfollahi-Yaghin, M.A.; Aminfar, M.H., 2011. Distribution of weld toe stress concentration factors on the central brace in two-planar CHS DKT-connections of steel offshore structures. *Thin-Walled Structures*, 49: 1225-1236.
- Ahmadi, H.; Lotfollahi-Yaghin, M.A., 2012. A probability distribution model for stress concentration factors in multi planar tubular DKT-joints of steel offshore structures. *Applied Ocean Research*, 34: 21-32.
- American Welded Society. Structural welding code-steel, ANSI/AWS. Miami, USA, D1.1, 2000.
- Bowness, D.; Lee, M.M.K., 1995. A finite element study of stress fields and stress intensity factors in tubular joints. *Journal of Strain Analysis*, 30: 135-142.
- Bowness, D.; Lee, M.M.K., 1998. Fatigue crack curvature under the weld toe in an offshore tubular joint. *International Journal of Fatigue*, 20: 481-490.
- Bowness, D.; Lee, M.M.K., 2000. Prediction of weld toe magnification factors for semi-elliptical cracks in T-Butt joint. *International Journal of Fatigue*, 22: 369-387.
- Cao, j.j.; Yang, G.J.; Packer, J.A., 1997. FE mesh Generation for Circular Tubular Joints with or without Cracks. Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, HI, IV: 98-105
- Chong Rhee, H.; Han, S.; Gipson, G.S., 1991. Reliability of solution method and empirical formulas of stress intensity factors for weld toe cracks of tubular joints. Proceedings of the Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, ASME, 3: 441-452.
- Du, Z.Z.; Hancock, J.W., 1989. Stress intensity factors of curved semi-elliptical cracks in a tubular welded joint using line springs and 3D finite elements. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 111: 247-251.

Shao, Y.B.; Lie, S.T., 2004. Parametric equation of stress intensity factor for tubular K-joint under balanced axial loads. *International Journal of Fatigue*, 27: 666-679.

geometrical parameters on SCF distribution along the weld toe of tubular KT-joints under balanced axial loads. *International Journal of Fatigue*, 32: 703-719.