



مرکز بررسی اطلاعات و پژوهش

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی رانی 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.



سازمان بنادر و دریانوردی





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



بررسی رفتار خستگی اتصالات لوله‌ای آ شکل سکوه‌های دریایی در محیط خورنده دریا به روش مکانیک شکست

ابراهیم بحرانی زاده ، دانشجوی کارشناسی ارشد ، دانشگاه صنعتی سهند ، e_bahranizadeh@sut.ac.ir

احمدرضا مصطفی قره باغی ، استادیار ، دانشگاه صنعتی سهند ، mgharabaghi@sut.ac.ir

محمد رضا چناقلو ، دانشیار ، دانشگاه صنعتی سهند ، mrchenaghrou@sut.ac.ir

کلید واژه: سکوه‌های دریایی، اتصالات لوله‌ای T شکل، خستگی، خوردگی، مکانیک شکست، ضریب شدت تنش

1- مقدمه

برای استخراج و بهره برداری از منابع انرژی هیدروکربنی موجود در بستر دریاها نیاز به سازه های خاصی می باشد که از جمله آنها سکوه‌های حفاری، بهره برداری، مسکونی و ... می باشند. از مهمترین مسائل سکوها، عمر خستگی سکو می باشد که باید عمر طراحی مد نظر را با ضریب اطمینان مشخصی فراهم سازد. این سکوها به علت اینکه تحت تأثیر امواج متناوب دریا هستند، تحت تأثیر پدیده خستگی می باشند. اتصالات لوله‌ای جوشی سکوه‌های دریایی به علت دارا بودن تمرکز تنش بالا به شدت تحت تاثیر این پدیده هستند. از طرفی محیط خورنده آب دریا به شدت بر عمر خستگی اتصالات لوله‌ای جوشی سکوه‌های دریایی تاثیر کرده و آن را کاهش می دهد [1]. به طور کلی، محیط خورنده آب دریا، با ایجاد خوردگی باعث کاهش مقاومت و افزایش تمرکز تنش می شود و از طرف دیگر، باعث تسریع جوانه زنی ترک و پس از آن با تجزیه آندی و شکست‌های هیدروژنی باعث افزایش بسیار زیاد نرخ رشد ترک خستگی و کاهش بسیار زیاد عمر خستگی می شود [2].

خستگی خوردگی از حدود هشتاد سال پیش مورد مطالعه قرار گرفته است که از جمله آنها مطالعات مک آدام¹ (1926) می باشد. از دیگر مطالعات در زمینه خستگی خوردگی تحقیقات گوف² و ساپوئیت³ (1932) و تامپسو⁴، وادزورث⁵ و لوات⁶ (1956) می باشد، که نشان می دهد اکسیژن محتوی آب، عمر خستگی جامدات نرم را کاهش می دهد. داکوت⁷ و اولیگ⁸، نیز خستگی فولاد کم کربن را در شرایط طبیعی محلول 3% کلرید سدیم بررسی کردند. فنگ هواکان⁹ و همکارانش (1986) نیز عمر خستگی خوردگی سکوه‌های دریایی را مورد مطالعه قرار دادند که از جمله نتایج پیشنهادی آنها در نظرگیری اثر فرکانس بر عمر خستگی خوردگی در شرایط محیط خورنده آب دریا بوده است. سازمان HSE¹⁰ نیز در زمینه خستگی خوردگی اتصالات جوشی سکوه‌های دریایی تحقیقات گسترده‌ای را در سال‌های 1990 تا 2000 انجام داده است. در سال 1994 هارلو و وی¹¹ عمر خستگی خوردگی احتمالاتی سه مرحله‌ای آلومینیوم را پیشنهاد و مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌های وسیعی نیز تحت عناوین PD6493:1991 و BS7910:1997 جهت مطالعه عمر خستگی خوردگی اتصالات جوشی سکوه‌های دریایی صورت گرفته است. کیتسونای¹² و همکارانش (1998) اثر فرکانس و تنش‌های پسماند بر عمر خستگی خوردگی اتصالات جوشی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. همچنین هارلو و وی (2006) رشد ترک فولاد با مقاومت بالا را با روش احتمالاتی مورد بررسی قرار دادند. البته کارهای فراوان دیگری در این زمینه صورت گرفته که مجال برای ارائه بیشتر نمی باشد.

در این مقاله، جهت بررسی اثر محیط آب دریا بر عمر خستگی اتصالات سکوه‌های دریایی، با استفاده از تئوری مکانیک شکست و با در نظرگیری پارامترهایی نظیر اثر فرکانس، نسبت تنش، عمر خستگی خوردگی و رشد ترک اتصال لوله‌ای جوشی T شکل تحت بارگذاری محوری با دامنه ثابت، بارگذاری ترکیبی محوری، خمش داخل صفحه و خمش خارج از صفحه و به کمک نرم افزار ANSYS مورد مطالعه قرار گرفت.

Adam

² Gough

³ Sopwith

⁴ Thompso

⁷ Duquette

⁸ Uhlig

⁹ Fang Huacan

¹⁰ Health and Safety Executive

¹¹ Harlow & Wei

¹² Y. Kitsunay

جهت صحت‌سنجی، نتایج تحلیل عمر خستگی خوردگی یک اتصال لوله‌ای T شکل تحت بارگذاری محوری با دامنه ثابت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. همچنین عمر و رشد ترک خستگی این اتصال در شرایط هوای آزاد مورد مطالعه قرار گرفت که مشاهده گردید در شرایط محیط خورنده آب دریا، ترک خستگی با سرعت بسیار بیشتری نسبت به هوای آزاد رشد کرده و در نتیجه عمر خستگی نیز به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. بنابراین با استفاده از این روش و بدون صرف هزینه‌های زیاد ناشی از بررسی‌های آزمایشگاهی می‌توان عمر خستگی اتصالات سکوه‌ای دریایی در شرایط محیط خورنده آب دریا را با دقت مناسبی برآورد کرد.

2- خستگی خوردگی اتصالات لوله‌ای جوشی سکوه‌ای دریایی

خوردگی، انهدام و فساد یا تغییر و دگرگونی در خواص و مشخصات مواد (عموماً فلزات) به علت واکنش آنها با محیط می‌باشد. بیشترین خوردگی در سطح آب یا منطقه پاشش اتفاق می‌افتد، زیرا این منطقه در معرض جو دریایی قرار دارد و در آن، تروخسک شدن فولاد مکرراً اتفاق می‌افتد. دو نوع خوردگی بر فرآیند خوردگی تأثیر عمده دارند: خوردگی کلی و خوردگی حفره‌ای. خوردگی کلی باعث کاهش ضخامت کلی و تقریباً یکنواختی بر روی عضو شده در حالی که خوردگی حفره‌ای حالت خاصی از حملات موضعی است که در آن فقط نقاط کوچکی از فلز مورد حمله قرار می‌گیرند، در حالی که سایر نقاط فلز صدمه چندانی نمی‌بینند. این نوع خوردگی غالباً در محلول‌های حاوی آنیون‌های خورنده (مخصوصاً Cl⁻) بوجود می‌آیند. معمولترین انواع محلول‌ها که باعث شروع و جوانه زنی ترک می‌شوند، سولفید آهن و سولفید منگنز می‌باشند [3].

خستگی مکانیکی عبارت است از پدیده‌ای که به علت وارد شدن تنش‌های مکرر و متناوب (کمتر از مقاومت کششی فلز) منجر به شکست فلزات می‌گردد. گسیختگی یک اتصال لوله‌ای جوشی طی فرآیند خستگی می‌تواند طی مراحل زیر صورت پذیرد: 1- جوانه زنی ترک در پای جوش، 2- رشد ترک‌های ریز و سطحی نیم بیضوی، 3- رشد ترک‌های بزرگ‌تر نیم بیضوی در راستای ضخامت، 4- رشد ترک درون ضخامتی حول محیط عضو، 5- شکست نرم یا مد ترکیبی، وقتی که ترک منجر به گسیختگی کامل عضو می‌شود [4].

خستگی خوردگی، کاهش مقاومت خستگی فلز به علت قرار گرفتن آن در معرض محیط خورنده می‌باشد [1]. خستگی خوردگی در تنش‌های با فرکانس پایین شدیدتر است [1]. افزایش رشد ترک بر اثر کاهش فرکانس می‌تواند ناشی از عوامل 1- شکست هیدروژنی، 2- صورت گرفتن واکنش‌های خوردگی در نوک ترک باشد [5]. خستگی خوردگی همچنین توسط نوع محیط خورنده، مقدار اکسیژن، درجه حرارت و PH محیط تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

بر خلاف خستگی در هوای آزاد، ترک‌های چندگانه نزدیک پای جوش در نقاط حاد تنش، تحت شرایط خستگی خوردگی به علت اثرات تمرکز تنش در کنار خوردگی حفره‌ای و عیوب جوش، مشاهده می‌شوند [6]. این امر باعث به هم پیوستن سریع ترک‌ها و رشد سریع‌تر ترک می‌شود که دلیل کاهش عمده عمر خستگی در محیط خورنده می‌باشد.

3- روش مکانیک شکست جهت مطالعه خستگی خوردگی

در اوایل دهه 1960، پاریس نشان داد که مکانیک شکست، ابزاری مناسب جهت تشریح گسترش ترک ناشی از خستگی می‌باشد. از آن زمان به بعد، کاربرد مکانیک شکست در مسایل خستگی قابل ملاحظه بوده است. طبق این روش، نرخ رشد ترک خستگی در فلزات را می‌توان توسط رابطه زیر (رابطه پاریس) تشریح کرد:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

که da/dN نرخ رشد ترک، ΔK محدوده ضریب شدت تنش و C و m نیز مقادیر ثابت می‌باشند که از طریق آزمایش به دست می‌آیند. همچنین ΔK برابر است با:

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

که $\Delta\sigma$ محدوده تنش، a عمق ترک و Y ضریب اصلاح هندسی می‌باشد. Y تابعی هندسی برای در نظر گرفتن اثرات هندسه عضو، مد بارگذاری و پروفیل ترک می‌باشد.

شکل 1 نمودار نرخ رشد ترک (da/dN) را بر حسب ΔK در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد [7]. این نمودار دارای سه ناحیه می‌باشد - باشد که نمودار، در ناحیه 2 خطی است، در صورتی که در ناحیه 1 و 3 غیر خطی می‌باشد.

مقادیر پیشنهادی DnV [8]، برای اتصالات جوشی سکوه‌های دریایی در معرض آب دریا به نحوی است که $m=3$ و $C=1/426 \times 10^{-11}$ می‌باشند. همچنین برای شرایط هوای آزاد، مقادیر $m=3$ و $C=1/398 \times 10^{-11}$ پیشنهاد شده است. شکل اصلاح شده‌ی فرمول پاریس برای محیط دریا به صورت زیر پیشنهاد شده است [9]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot C(f) \cdot (\Delta K)^m \quad (3)$$

که $C(f)$ اثر فرکانس را در رابطه پاریس اعمال می‌کند و برابر است با:

$$C(f) = \frac{4.5 + 0.3 f}{1 + f} \quad (0.05 < f \leq 10) \quad (4)$$

کلسنیل¹ و لوکاس²، رابطه پاریس را برای در نظر گرفتن اثر آستانه که مرز شروع خستگی است، به شکل زیر اصلاح کردند:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (5)$$

که ΔK_{th} محدوده ضریب شدت تنش آستانه می‌باشد و در محیط خورنده تقریباً برابر صفر است [9]. در واقع، بر اثر تجزیه آندی، هیچ حد پایینی برای خوردگی وجود ندارد. برای فولادهای ضد زنگ آستنیتی، مقدار آستانه $63 \text{ Nmm}^{-1.5}$ (یا $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) در شرایط هوای آزاد قابل کاربرد است [10].

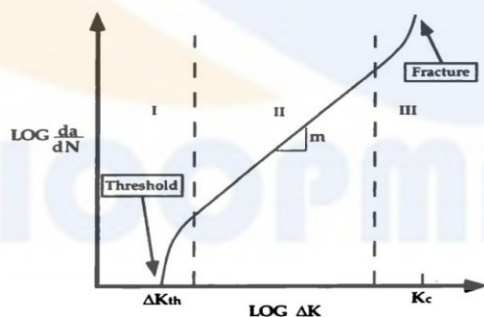
وابستگی رشد ترک به نسبت تنش را می‌توان با معرفی مفهوم بسته شدگی ترک از بین برد. فرض می‌شود که به هنگام اعمال بخش پایینی بارگذاری سیکلی ترک بسته می‌ماند. این بخش از سیکل، باعث باز شدگی ترک نمی‌شود و اثری در رشد ترک نخواهد داشت. این مشاهدات منجر به در نظر گرفتن تنها محدوده مثبت محدوده ضریب شدت تنش می‌شود [4]:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = U \cdot \Delta K \quad (6)$$

که K_{max} ضریب شدت تنش مرتبط با تنش ماکزیمم K_{op} مقداری است که باعث باز شدن ترک می‌شود. اگر در معادله پاریس به جای ΔK از ΔK_{eff} استفاده شود، پارامترهای C و m برای هر آزمایش با هر مقدار نسبت تنش (R) ثابت می‌ماند. این ویژگی، برای ΔK_{th} نیز صادق است. تنها مسئله، تعیین محدوده ضریب شدت تنش موثر³ (SIFR) است که مورد به مورد (برای R های مختلف) تفاوت می‌کند. برای پارامتر U روابط زیر پیشنهاد شده است [2]:

$$U = 0.8 + 0.29 R \quad 0 \leq R < 0.7 \quad (7)$$

$$U = 1 \quad R \geq 0.7 \quad (8)$$



شکل 1) نمودار رشد ترک خستگی در فلزات [7]

4- مطالعه رفتار خستگی خوردگی اتصال لوله ای T شکل

در این مقاله، با استفاده از میانی و اصولی که ارائه شد، به شبیه سازی و بررسی عمر خستگی خوردگی یک اتصال T-شکل پرداخته شده است. جهت اطمینان در روش مطالعه، در ابتدا نتایج حاصل از تحلیل با نتایج حاصله از آزمایشاتی که توسط گاندی و همکارانش [6] در زمینه بررسی خستگی خوردگی اتصالات سکوه‌های دریایی پرداخته خواهد شد.

² Lukas

³ stress intensity factor range

مشخصات مکانیکی و هندسی اتصال ، در جدول 1 آورده شده است. برای انجام تست های خستگی خوردگی ، اثر خوردگی توسط آب دریای مصنوعی که در یک محفظه قرار دارد، اعمال شده است. آب دریای مصنوعی با توجه به استاندارد ASTM مشخصه D1141-1990 آماده شده است. دما بین 22 تا 28°C می باشد.

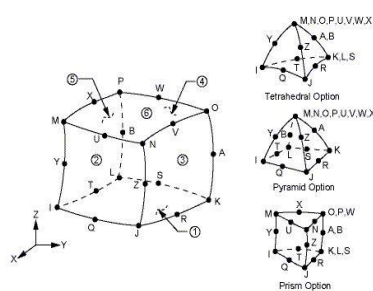
تست های خستگی خوردگی بر روی اتصال لوله ای توسط بارگذاری سیکلی محوری متناوب با دامنه ثابت روی عضو فرعی انجام شده به نحوی که محدوده تنش حاد 175 MPa بوده است. فرکانس بارگذاری، 0/2 Hz به عنوان فرکانس موج آب دریا انتخاب شده است. نسبت تنش (نسبت تنش مینیمم به ماکزیمم) نیز 1- می باشد. نرخ خوردگی حدود 5 میل بر سال (یک میل برابر 0/0254 mm می باشد) اندازه گیری

جدول 1) مشخصات هندسی و مکانیکی اتصال لوله ای T شکل [6]

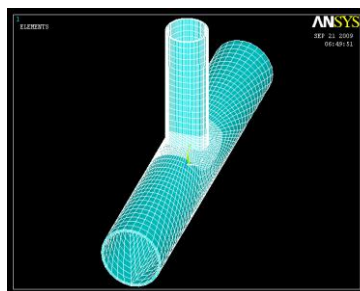
تنش تسلیم (MPa)	آلیاژ	زاویه	ابعاد عضو فرعی ² (mm)		ابعاد عضو اصلی ¹ (mm)	
			طول	ضخامت	طول	ضخامت
240	IS:226	90	8	220 600	12	320 1800

شده است. ترک ها از نقاط حاد تنش (که در این مورد در نشیمن گاه³ قرار داشت) جوانه زده و عمر جوانه زنی ترک برای این اتصال (N_i) برابر $1/15 \times 10^5$ تناوب، عمر رشد ترک در کل ضخامت (N_c) برابر $3/78 \times 10^5$ تناوب و عمر نهایی اتصال که کل اتصال از هم گسیخته شده (N_f) برابر 4×10^5 تناوب بوده است. ترک های خستگی در پای جوش و از نقاط حاد تنش جوانه زده و در کل ضخامت گسترش یافتند. همچنین عمق اولیه برای ترک در این آزمایش برابر 0/2564 mm در نظر گرفته شده است.

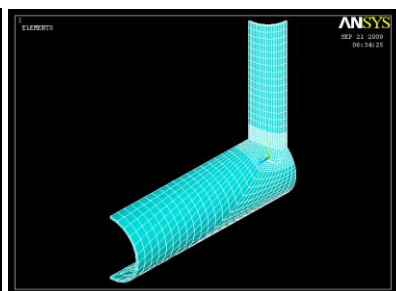
جهت تعیین ضریب تمرکز تنش در بارگذاری محوری اعمالی به عضو فرعی و اطلاعات مورد نیاز جهت مدلسازی و تحلیل مکانیک شکست، مدلی از اتصال ، با استفاده از نرم افزار ANSYS ایجاد شده و تحت بارگذاری محوری در قسمت انتهایی عضو فرعی قرار داده می شود. برای تحلیل مدل، دو روش را می توان انتخاب کرد: 1- مدلسازی ربع (یک چهارم) مدل، اعمال شرایط مرزی مربوط به مدل و شرایط مربوط به تقارن (شکل 2). 2- مدلسازی و اعمال شرایط مرزی کل مدل (شکل 3). جهت مدلسازی و انجام تحلیل استاتیکی و در ادامه مدلسازی ترک و انجام تحلیل مکانیک شکست، از المان SOLID186 استفاده شده است. المان SOLID186 (شکل 4)، المانی 20 گرهی از گروه المانهای SOLID می باشد که دارای قابلیت رفتار تغییرشکل سهموی (درجه دوم) می باشد. این المان توسط 20 گره تعریف می شود که هر گره دارای سه درجه آزادی شامل جابجایی در جهات X و Y و Z می باشد. همچنین، این المان قادر به شبیه سازی تغییر شکل های بزرگ، خزش، کرنش های بزرگ، هیپرواستیسیته و تغییر شکل های مواد الاستوپلاستیک و هیپرواستیک غیرقابل فشرده گی می باشد. این المان قادر به مش بندی اشکال نامنظم بوده و به دلیل اینکه قادر به مدلسازی ترک نیز می باشد، لذا از این المان جهت مدلسازی و انجام تحلیل مکانیک شکست استفاده گردید.



شکل 4) المان SOLID186



شکل 3) مش بندی مدل کامل



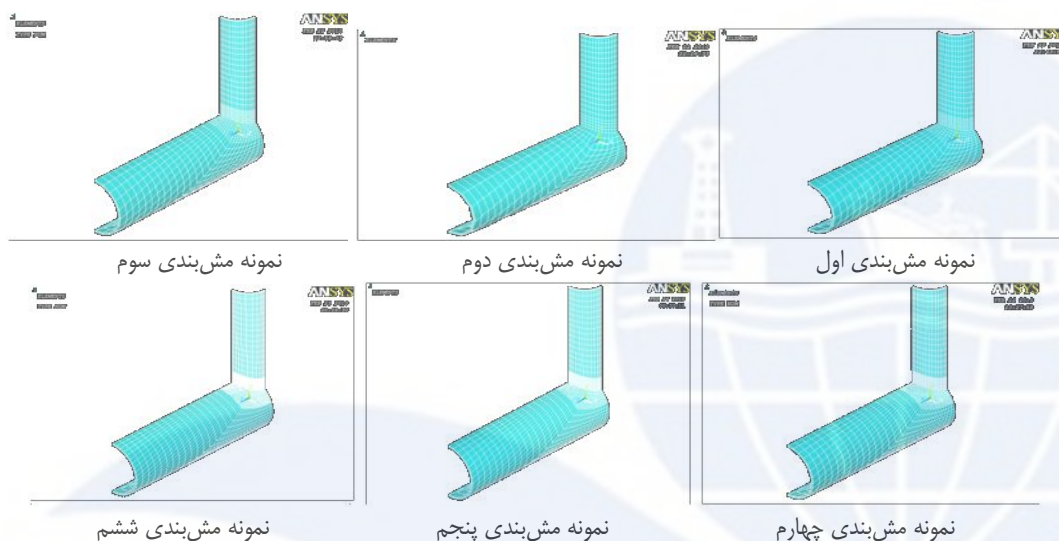
شکل 2) مش بندی یک چهارم مدل

¹Chord

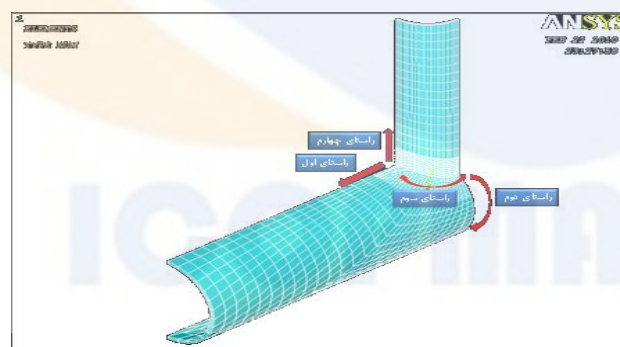
² Brace
4

³ Saddle
www.SID.ir

جهت انتخاب مش بندی اتصال T شکل، مش بندی های مختلف با اندازه المان های متفاوت انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفت. انواع مختلف این مش بندی ها در شکل 5 مشاهده می گردد. نحوه شماره گذاری مش بندی ها بدین صورت است که به ترتیب از شماره اول تا ششم، المان ها و در نتیجه مش بندی ها ریزتر شده اند. تعداد تقسیمات خطوط و راستاهای مربوطه در شکل 6 و جدول 2 آورده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل تغییرات تنش زیاد در نزدیکی محل برخورد عضو اصلی به فرعی و جهت برآورد دقیق این تغییرات، از مش بندی ریزتری در این ناحیه استفاده شده است. نحوه بارگذاری بدین صورت می باشد که تنش محوری 11/905 MPa بر عضو فرعی اعمال گردید. شرایط مرزی، گیرداری کامل در انتهای عضو اصلی، محدودیت جابجایی در راستای Z در صفحه تقارن XY و محدودیت جابجایی در راستای X در صفحه تقارن YZ می باشد. پس از انجام تحلیل ها، مقادیر تنش حاد در پای جوش (در محل نشیمن گاه) برای هر نمونه برآورد گردید که در جدول 3 ارائه شده است. با بررسی نتایج حاصله از مقادیر تنش های حاد (در محل نشیمن گاه)، مش بندی نمونه چهارم با دقت مناسب به عنوان مش بندی مناسب انتخاب گردید.



شکل 5) انواع مش بندی های بکار رفته جهت انتخاب مش بندی مناسب



شکل 6) راستاهای مربوطه به تقسیم بندی خطوط جهت مش بندی

جدول 2) تعداد تقسیمات خطوط مش بندی نمونه های مختلف متناظر با شکل 5

نمونه مش بندی	1	2	3	4	5	6
تقسیمات خطوط (راستای اول و دوم)	21	24	27	30	36	42
تقسیمات خطوط (راستای سوم)	12	16	20	24	32	40
تقسیمات خطوط (راستای چهارم)	20	24	28	32	40	48

جدول (3) مقادیر تنش‌های حاد تحت مش‌بندی‌های متفاوت

3	2	1	نمونه مش‌بندی
88/96	/668 84	84/14	تنش حاد (MPa)
6	5	4	نمونه مش‌بندی
/549 87	/631 87	87/5	تنش حاد (MPa)

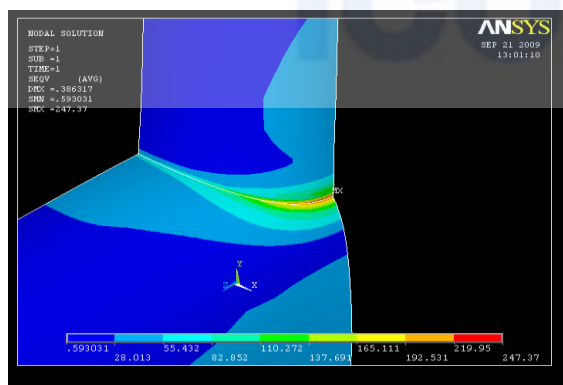
پس از انتخاب مش بندی، برای اعمال محدوده تنش حاد 175 MPa در نقطه حاد تنش (در پای جوش و در محل نشیمن‌گاه)، تنش اسمی 23/81 MPa می‌بایست بر عضو فرعی اعمال گردد (پس از چند بار تحلیل مشخص شد که می‌بایست این مقدار تنش اعمال گردد). اما به دلیل اینکه تحلیل تنش، الاستیک خطی و نسبت تنش 1- می‌باشد، می‌توان محدوده تنش مثبت (11/905 MPa) را اعمال و نتایج حاصل را برای محدوده منفی تنش بسط داد. همانطور که اشاره شد، محدوده تنش منفی سهم خاصی در گسترش ترک خستگی نخواهد داشت. باید در نظر داشت که جهت انجام تحلیل استاتیکی و سپس مکانیک شکست در محیط آب دریا در ابتدا مقدار کاهش ضخامت به هنگام جوانه‌زنی ترک از ضخامت اعضا کم می‌شود. جهت مدلسازی در شرایط محیط خورنده آب دریا، میزان ضخامت خورده شده را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$(9) \quad \text{میزان ضخامت خورده شده (mm)} = \left(\frac{N}{f}\right) \times (\text{میل برسال}) \times \frac{25.4 \times 10^{-3}}{31.536 \times 10^6}$$

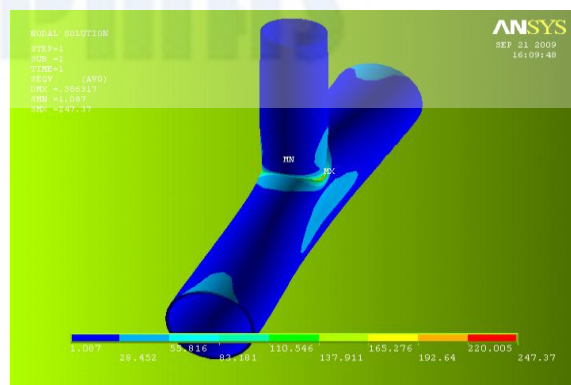
مقدار $25/4 \times 10^{-3}$ در صورت کسر، برای تبدیل میل به میلی‌متر و مقدار $31/536 \times 10^6$ در مخرج کسر، برای تبدیل سال به ثانیه می‌باشد. N تعداد تناوب‌ها و f فرکانس بارگذاری می‌باشد. با در نظر گرفتن عمر جوانه زنی ترک، فرکانس آزمایش و نرخ تقریبی خوردگی، به هنگام جوانه‌زنی ترک، حدود $23/1 \times 10^{-3}$ mm از ضخامت اعضا کم می‌شود. بنابراین شعاع خارجی عضو اصلی به 159/9769 mm و شعاع خارجی عضو فرعی به 109/9769 mm کاهش می‌یابد.

جهت مدلسازی مدل، با توجه به وجود دو محور تقارن در هندسه و بارگذاری، بجای مدلسازی کامل اتصال، می‌توان جهت کاهش حجم محاسبات، ربع (یک چهارم) مدل را با اعمال شرایط مرزی متناظر با شرایط تقارن، مورد بررسی قرار داد.

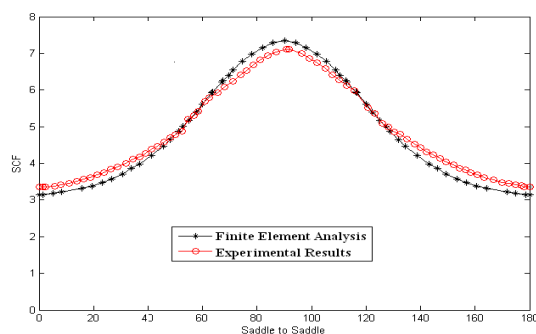
پس از انجام تحلیل استاتیکی مشخص گردید، که ضریب تمرکز تنش در نقطه حاد (در اینجا در محل نشیمن‌گاه و در پای جوش) و در حالت بدون خوردگی برابر 7/35 و در حالت وجود محیط خورنده برابر 7/436 می‌باشد. اشکال توزیع تنش برای هر دو مدل با استفاده از معیار وُن میسر ترسیم شده است (شکل‌های 7 و 8). همانطور که برای هر دو مدل ملاحظه می‌گردد تمرکز تنش در نزدیکی ناحیه اتصال عضو فرعی و اصلی بوده و نقاط نشیمن‌گاه نیز از سایر نقاط بحرانی‌تر می‌باشد. همچنین توزیع ضریب تمرکز تنش پای جوش برآورد گردیده و جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل 9 نشان داده شده است.



شکل (8) توزیع تنش ون میسر برای ربع مدل در محیط دریا (MPa)



شکل (7) توزیع تنش ون میسر برای مدل اصلی در محیط دریا (MPa)



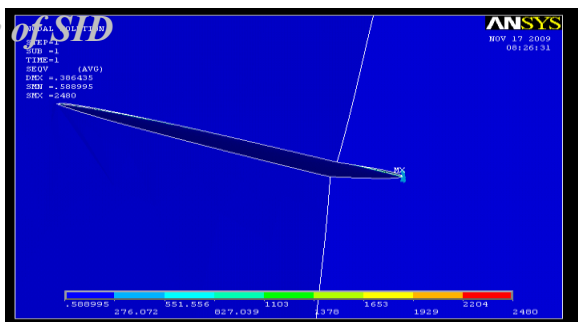
شکل 9) مقایسه ضریب تمرکز تنش بای جوش حاصل از تحلیل اجزاء محدود ANSYS و نتایج آزمایشگاهی [6]

یک تحلیل شکست، ترکیب تحلیل تنش و محاسبه پارامتر مکانیک شکست می باشد. به علت وجود گرادیان های تنش بالا در حواشی ناحیه نوک ترک، مدل سازی المان محدود یک عضو دارای ترک، توجه خاصی را در آن ناحیه می طلبد. برای مدل سازی و مش بندی ترک در نرم افزار ANSYS، به دو روش می توان عمل کرد. در روش اول استفاده از قابلیت خود نرم افزار ANSYS با ایجاد ماکرو جهت مدل سازی ترک می باشد که این قابلیت فقط در نسخه های یازده به بالاتر موجود می باشد. ماکرو CTMOPT، پارامترهای مورد نیاز جهت مش بندی ناحیه نوک ترک جهت تحلیل شکست سه بعدی را تنظیم می کند. این ماکرو، ابزار مناسبی را جهت مش بندی مخصوص هندسه ترک را فراهم می کند. جهت مش بندی ترک، می بایست ماکرو را ایجاد و سپس اجرا کرد. روش دوم استفاده از تکنیک های دستی جهت مدل سازی و مش بندی ترک می باشد.

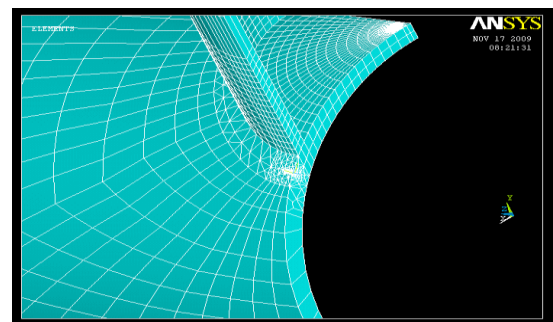
با توجه به اینکه روش اول قابلیت مدل سازی و مش بندی ترک های نیم بیضوی با نسبت ابعاد 5 به 1 را دارا نیست و فقط ترک های نیم بیضوی با نسبت حداکثر 1/5 به یک را داراست و همچنین قابلیت مدل سازی ترک های با اعماق بیشتر از نصف ضخامت را دارا نیست، در اینجا جهت مدل سازی و مش بندی ترک از روش دوم استفاده شده است.

جهت مدل سازی، مش بندی و تحلیل مدل ترک دار با استفاده از تکنیک های دستی ترک، می بایست پس از ایجاد سطوح مربوط به ترک نیم-بیضوی، تنظیمات مربوط به مش بندی نوک ترک را انجام داده و مش بندی به صورت دستی را اجرا کرد (شکل 10). بنابراین، مدل های مختلفی که هر کدام از آنها شامل یک ترک با عمق خاصی بودند، در دو حالت با و بدون خوردگی مدل سازی شدند. سپس این مدل ها بارگذاری و مورد تحلیل قرار گرفتند. پس از تحلیل و محاسبه برای حالات شرایط هوای آزاد و محیط خورنده، پارامترهای شدت تنش ترک ها با ابعاد مختلف، از ترک های ریز تا درشت، به نحوی که تقریباً تمام ضخامت اتصال را پوشش دهد، استخراج گردید. جدول 4، مقادیر محدوده ضریب شدت تنش را در حالت شرایط هوای آزاد و جدول 5، پارامترهای محدوده ضریب شدت تنش را در حالت وجود محیط خورنده آب دریا نشان می دهند. توزیع تنش در مدل با ترکی به عمق 3/5 mm برای نمونه، در حالت وجود محیط خورنده در شکل 11 نشان داده شده است.

در ادامه با استفاده از قانون اصلاح شده پاریس و با در نظر گرفتن اثر نسبت تنش، فرکانس (برای محیط خورنده آب دریا)، برنامه هایی در نرم افزار Matlab نوشته شد و عمر خستگی اتصال برای حالات شرایط هوای آزاد و محیط دریا برآورد گردید. برای محاسبه عمر از روابط 3، 4، 5 و با در نظرگیری اثر نسبت تنش (یعنی $m=3/5$ ، $C=1/426 \times 10^{-11}$ ، $f=0/2 \text{ sec}^{-1}$ و $\Delta K_{th}=0$ برای شرایط محیطی آب دریا و $m=3$ ، $C=1/398 \times 10^{-11}$ و $\Delta K_{th}=63 \text{ Nmm}^{-1/5}$ برای شرایط هوای آزاد) استفاده شد. شکل 12 نرخ های رشد ترک خستگی را در دو حالت شرایط هوای آزاد و محیط خورنده آب دریا نشان می دهد. مشاهده می شود، عمر نهایی اتصالات در شرایط هوای آزاد برابر 9.77×10^5 سیکل و در حالت وجود محیط خورنده آب دریا برابر 3.741×10^5 سیکل می باشد. نتایج حاصله از رشد ترک خستگی خوردگی اتصال با استفاده از روش تحلیل مکانیک شکست با نتایج حاصل از آزمایش تفاوت دارد که برآورد خوبی محسوب می شود. عمق اولیه ترک نیز جهت مطابقت با آزمایش برابر 0/2564 mm در نظر گرفته شد.



شکل 11: توزیع تنش مدل با ترکی به عمق 3/5 mm



شکل 10: مدل سازی و مش بندی ترکی با عمق 1/5 mm

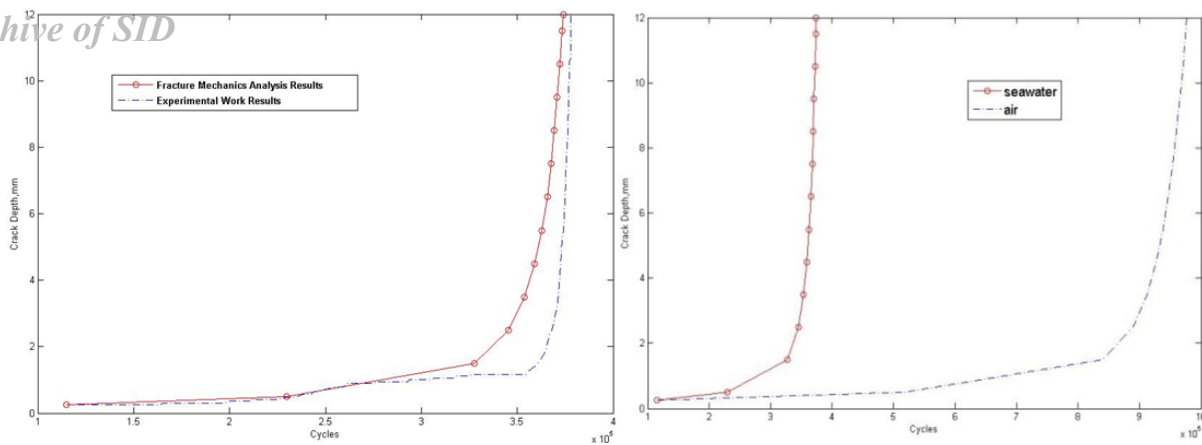
به منظور بررسی اثر کاهش ضخامت اعضا، ناشی از خوردگی، در مرحله بعدی مقدار کاهش ضخامت برای دو عمق ترک 4/5 mm و 5/5 mm محاسبه شد که به ترتیب برابر با 0/00713 mm و 0/00723 mm بوده و در نتیجه ضخامت عضو اصلی و فرعی به ترتیب برای حالت اول برابر با 159/9928 mm و 109/9928 mm و برای حالت دوم برابر با 159/9927 mm و 109/9927 mm گردید. سپس ضرایب شدت تنش متناسب با عمق های ترک 4/5 mm و 5/5 mm مجدداً محاسبه شد که به ترتیب برابر با $306/01 \text{ N/mm}^{1.5}$ و $333/5 \text{ N/mm}^{1.5}$ شده و در نتیجه تعداد تناوب بارگذاری متناظر با این بازه محاسبه گردید که برابر با $3/952 \times 10^3$ سیکل می باشد و حدود 0/8 درصد با مقدار محاسبه شده در مرحله قبلی ($3/985 \times 10^3$) تفاوت دارد که قابل چشم پوشی است.

جدول 4) پارامترهای محدوده ضریب شدت تنش در حالت شرایط هوای آزاد ($\text{N/mm}^{1.5}$ و mm)

2/5	1/5	0/5	0/2564	0/1	عمق ترک (mm)
243/54	191/4	110/48	73/98	41/33	$\Delta K1 (\text{N/mm}^{1.5})$
7/5	6/5	5/5	4/5	3/5	عمق ترک (mm)
384/74	362/04	336/91	320/89	285/6	$\Delta K1 (\text{N/mm}^{1.5})$
	11/5	10/5	9/5	8/5	عمق ترک (mm)
	455/34	419/21	411/46	31	$\Delta K1 (\text{N/mm}^{1.5})$
				392	

جدول 5) پارامترهای محدوده ضریب شدت تنش در حالت وجود محیط خورنده آب دریا ($\text{N/mm}^{1.5}$ و mm)

2/5	1/5	0/5	0/2564	0/1	عمق ترک (mm)
239/2	188/2	108/6	70/53	60/46	$\Delta K1 (\text{N/mm}^{1.5})$
7/5	6/5	5/5	4/5	3/5	عمق ترک (mm)
402/2	381/6	332/8	305/3	284/1	$\Delta K1 (\text{N/mm}^{1.5})$
	11/5	10/5	9/5	8/5	عمق ترک (mm)
	463/5	444/3	418/8	412/7	$\Delta K1 (\text{N/mm}^{1.5})$



شکل 12) مقایسه عمرهای خستگی اتصال در دو حالت هوای آزاد و محیط دریا با استفاده از روش مکانیک شکست
 شکل 13) مقایسه نمودار حاصل از شبیه سازی و آزمایشگاهی

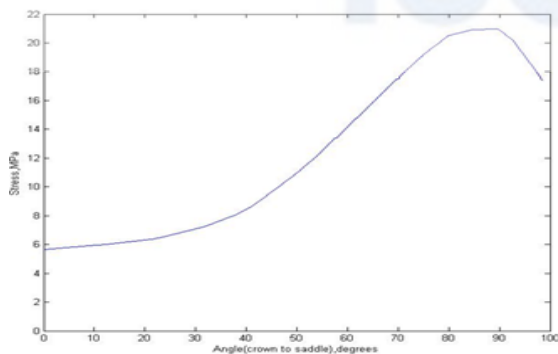
2-4 مطالعه عمر خستگی خوردگی اتصال لوله ای T شکل تحت ترکیب بارگذاری

پس از اطمینان از صحت مدلسازی اتصال و پیش بینی عمر خستگی خوردگی، در این بخش به مطالعه عمر خستگی خوردگی یک اتصال لوله ای T شکل تحت ترکیب بارگذاری محوری، خمش داخل صفحه و خمش خارج از صفحه پرداخته می شود. مشخصات هندسی اتصال مورد مطالعه در جدول 6 ارائه شده است.

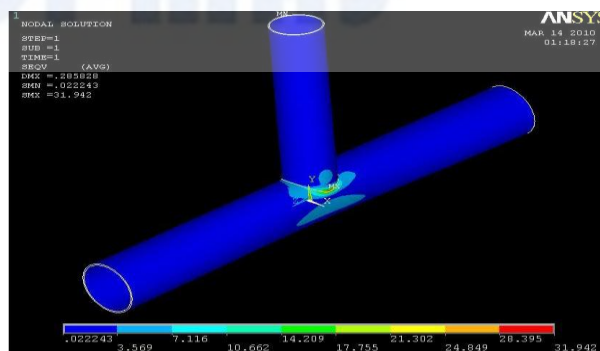
جدول 6) ابعاد اتصال لوله ای

ابعاد جوش (mm)	زاویه	عضو فرعی (Brace)		عضو اصلی (Chord)	
		ضخامت (mm)	قطر (mm)	ضخامت (mm)	قطر (mm)
4/7625	90	9/525	406/4	12/7	508

در ابتدا تحلیل استاتیکی تحت ترکیب بارگذاری محوری، خمش داخل صفحه و خمش خارج صفحه صورت پذیرفت. در این حالت تنش محوری، لنگر خمشی داخل صفحه و لنگر خمشی خارج صفحه به طور همزمان بر مدل کامل اتصال اعمال می گردند. شرایط مرزی به گونه ای است که اتصال در دو انتهای عضو اصلی گیردار می باشد. سپس اتصال مورد تحلیل قرار گرفت که کانتورهای توزیع تنش در اتصال بر اساس معیار ون میسز در شکل 14 مشاهده می گردد. محل وقوع تنش حاد در پای جوش و در محل نشیمن گاه اتصال و مقدار ضریب تمرکز تنش نیز برابر 20/946 برآورد گردید. باید توجه داشت که ضرایب تمرکز تنش در پای جوش (و نه در محل تقاطع عضو اصلی و فرعی) محاسبه می شوند و به دلیل اینکه پروفیل جوش مدلسازی نشده، جهت برآورد ضریب تمرکز تنش در پای جوش، تمرکز تنش در مختصات پای جوش برآورد گردیده است. منحنی توزیع تنش (که نشانگر ضرایب تمرکز تنش می باشد) در پای جوش برآورد گردیده که در شکل 15 نشان داده شده است.



شکل 15 منحنی توزیع تنش در پای جوش تحت بارگذاری ترکیبی محوری، خمش داخل صفحه و خمش خارج از صفحه



شکل 14 کانتورهای توزیع تنش (MPa) در اتصال بر اساس معیار ون میسز تحت بارگذاری ترکیبی محوری، خمش داخل صفحه و خمش خارج صفحه

جهت انجام تحلیل مکانیک شکست می‌بایست خوردگی به گونه‌ای که در محیط خورنده آب دریا بر عمر خستگی اتصال تاثیر می‌گذارد، بر روی مدل و تحلیل‌های مربوطه اعمال شود. در ابتدا محیط خورنده آب دریا با ایجاد انواع خوردگی‌ها شامل خوردگی کلی و خوردگی حفره‌ای بر روی مدل تاثیر می‌گذارد. خوردگی کلی با کاهش ضخامت و خوردگی حفره‌ای در نقاط حاد تنش و در پای جوش اتصال منجر به تسریع جوانه‌زنی ترک خستگی در محیط خورنده آب دریا می‌شود.

جهت برآورد عمر جوانه‌زنی ترک در محیط خورنده آب دریا رابطه زیر پیشنهاد شده است [6]:

$$N_i = 5.4 \times 10^{13} \times \Delta\sigma^{-4.03} \quad (10)$$

که N_i عمر جوانه‌زنی ترک و $\Delta\sigma$ محدوده تنش حاد بر حسب MPa می‌باشد.

محدوده تنش حاد برابر $2 \times 20/946 = 41/892$ MPa می‌باشد (مقدار تنش حاد حاصل از ترکیب بارگذاری محوری، خمش داخل صفحه و خارج از صفحه انتخاب شده است) چون مقدار $20/946$ MPa فقط مربوط به ناحیه کشش بوده و نسبت تنش 1- می‌باشد. با توجه به اینکه بیشترین نرخ خوردگی در ناحیه پاشش بوده که نرخ خوردگی‌ای برابر $13/6$ میل بر سال پیشنهاد شده است [11]، لذا با در نظر گرفتن نرخ خوردگی مذکور، فرکانس $0/2 \text{ sec}^{-1}$ و رابطه 9، مقدار $0/836$ mm از ضخامت اعضا به هنگام جوانه‌زنی ترک کاسته می‌شود.

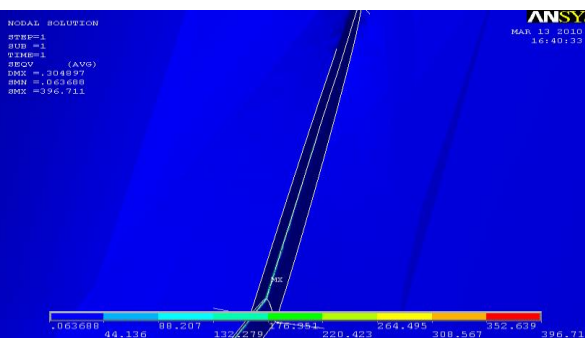
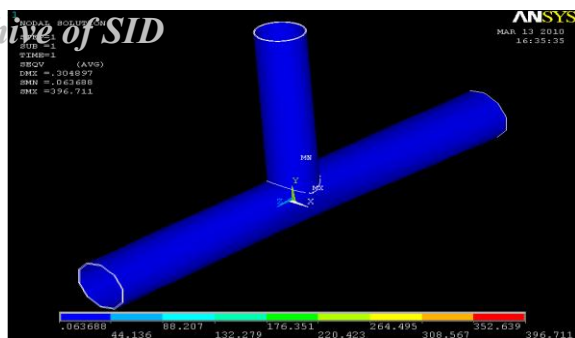
جهت انجام تحلیل مکانیک شکست با استفاده از نرم‌افزار ANSYS می‌بایست ترک‌هایی با عمق‌های مختلف (به گونه‌ای که کل ضخامت را پوشش دهند) را مدلسازی، مش‌بندی و مورد تحلیل قرار داد. سپس با محاسبه ضرایب شدت تنش مربوط به هر عمق ترک از روابط اصلاح شده پاریس استفاده کرده و عمر را برآورد کرد. از این رو به هنگام مدلسازی ترک‌های با عمق مختلف مقدار ضخامت کاهش یافته پس از جوانه‌زنی ترک در دسترس نمی‌باشد. جهت برطرف کردن این مشکل می‌بایست یک سیکل تکراری را انجام داد. این امر بدین معنی است که یک بار مدلسازی، مش‌بندی، تحلیل و محاسبه ضرایب شدت تنش را فقط با در نظر گرفتن مقدار کاهش ضخامت به هنگام عمر جوانه‌زنی ترک انجام داده، عمر ترک را متناظر با اعماق مختلف ترک برآورد کرده و برای بار دوم و با در نظر گرفتن نرخ خوردگی، ضخامت واقعی اعضا اتصال را منظور کرده و تحت مدلسازی، مش‌بندی و تحلیل قرار داده و مجدداً عمر خستگی خوردگی را برآورد کرد. لازم به ذکر است که در تحلیل‌های قبلی به دلیل اینکه مقدار تنش حاد بسیار بیشتر و عمر بسیار کمتر بود، مقدار خوردگی پس از جوانه‌زنی ترک بسیار کمتر و همچنین به دلیل تمرکز تنش در خط جلوی ترک (که تقریباً منجر به تحمل نیروها فقط توسط این ناحیه می‌شد) از انجام سیکل دوم مدلسازی و تحلیل‌های مکانیک شکست صرف نظر گردید.

جهت انجام سیکل اول، پس از انجام تحلیل‌های مکانیک شکست برای مدل‌های ترک‌دار با عمق‌های مختلف ترک، ضرایب شدت تنش استخراج گردید که در جدول 7 ارائه شده است. لازم به ذکر است که عمق اولیه ترک $0/5$ mm در نظر گرفته شد [6]. کانتورهای توزیع تنش ون‌میسز برای مدلی با ترکیبی به عمق ترک $6/5$ mm (به عنوان مثال) در کل مدل و همچنین در پروفیل ترک در شکل‌های 16 و 17 نشان داده شده است. پس از حصول محدوده‌های ضرایب شدت تنش برای ترک‌های مختلف از روابط اصلاح شده پاریس عمرهای متناظر با عمق‌های ترک مختلف محاسبه گردید. منحنی رشد ترک خستگی خوردگی اتصال در شکل 18 نشان داده شده است.

جدول 7) مقادیر محدوده‌های ضریب شدت تنش برای عمق ترک‌های مختلف طی سیکل اول تحلیل مکانیک شکست در محیط آب دریا

عمق ترک (mm)	0/5	1/5	2/5	3/5	4/5
ΔK_1 (N/mm ^{1.5})	16/75	31/11	40/61	45/75	48/34
عمق ترک (mm)	5/5	6/5	7/5	8/5	9/5
ΔK_1 (N/mm ^{1.5})	51/63	55/1	58/1	63/22	71/52
عمق ترک (mm)	10/5	11/5			
ΔK_1 (N/mm ^{1.5})	82/23	95/68			

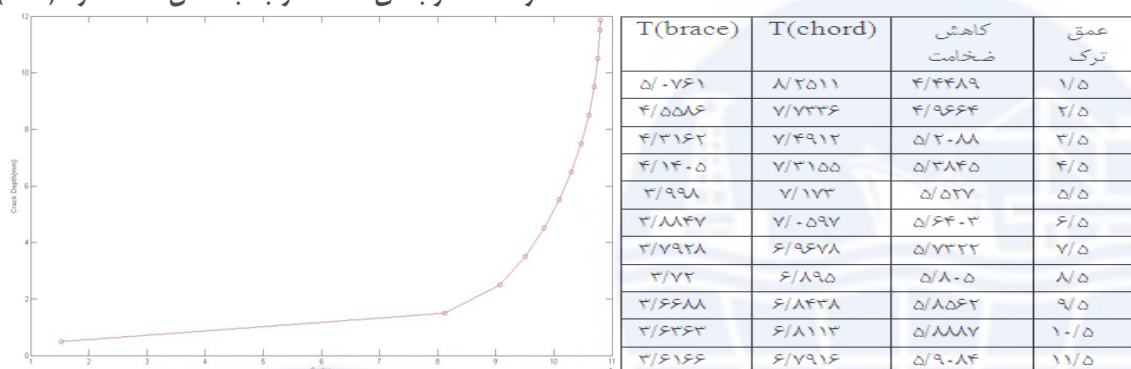
حال با داشتن عمرهای مربوط به عمق‌های ترک مختلف، مقدار ضخامت کاهش یافته مربوط به هر عمر در مدل اعمال شده و مجدداً مدلسازی، مش‌بندی و تحلیل‌های مکانیک شکست می‌بایست صورت گیرد. مقدار کاهش ضخامت و ضخامت‌های در عمرهای مختلف مربوط به اعماق مختلف ترک در جدول 8 ارائه شده است. جهت محاسبه میزان کاهش ضخامت می‌توان از رابطه 9 استفاده کرد. مجدداً می‌بایست با استفاده از مقادیر کاهش یافته ضخامت، مدل‌های ترک‌دار مختلف متناسب با مقادیر کاهش یافته ضخامت ایجاد، مش‌بندی و مورد تحلیل قرار



شکل 17) کانتورهای توزیع تنش ون میسز (MPa) برای مدلی با ترکی به عمق ترک 6/5 mm برای پروفیل ترک در محیط دریا

شکل 16) کانتورهای توزیع تنش ون میسز (MPa) برای مدلی با ترکی به عمق ترک 6/5 mm در محیط دریا

جدول 8) مقدار کاهش ضخامت و ضخامت‌های کاهش یافته مدل در تعداد تناوب‌های مختلف مرتبط با اعماق مختلف ترک (mm)



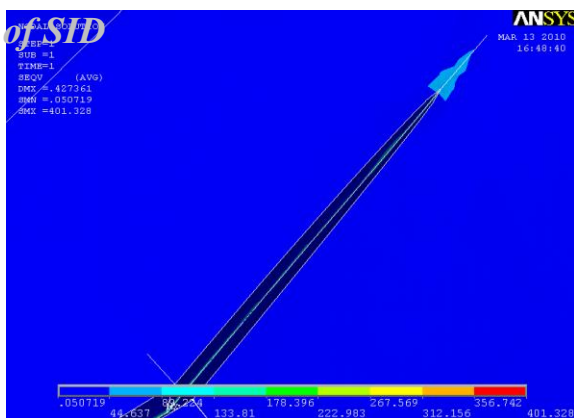
شکل 18) منحنی رشد ترک خستگی خوردگی اتصال طی سیکل اول تحلیل مکانیک شکست

گیرند. با دقت در جدول 8 ملاحظه می‌شود که عملاً امکان ایجاد ترک با عمق بزرگتر از 6/5 mm وجود ندارد به دلیل اینکه ضخامت عضو اصلی کمتر از عمق ترک‌های 7/5 mm به بالاتر می‌باشد.

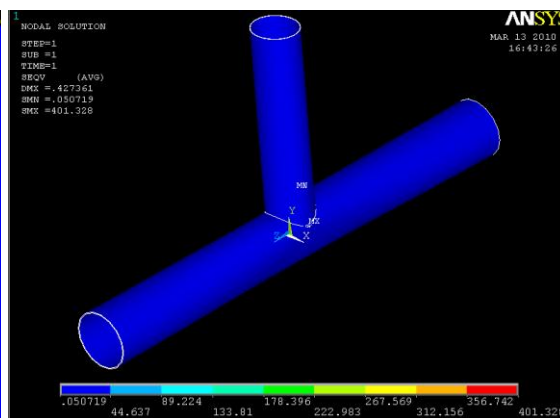
مجدداً تحلیل‌های مکانیک شکست با مقادیر کاهش یافته ضخامت صورت گرفت و ضرایب شدت تنش متناظر با هر عمق ترک استخراج گردید که در جدول 9 ارائه شده است. کانتورهای توزیع تنش ون میسز برای مدلی با عمق ترک 4/5 mm (به عنوان مثال) برای کل مدل و همچنین در خط جلوی پروفیل ترک در شکل‌های 19 و 20 ارائه شده است. پس از حصول محدوده‌های ضرایب شدت تنش برای ترک‌های مختلف از روابط اصلاح شده پاریس عمرهای متناظر با عمق‌های ترک مختلف محاسبه گردید. منحنی رشد ترک خستگی خوردگی اتصال در شکل 21 نشان داده شده است.

جدول 9) پارامترهای محدوده ضریب شدت تنش سیکل دوم تحلیل مکانیک شکست

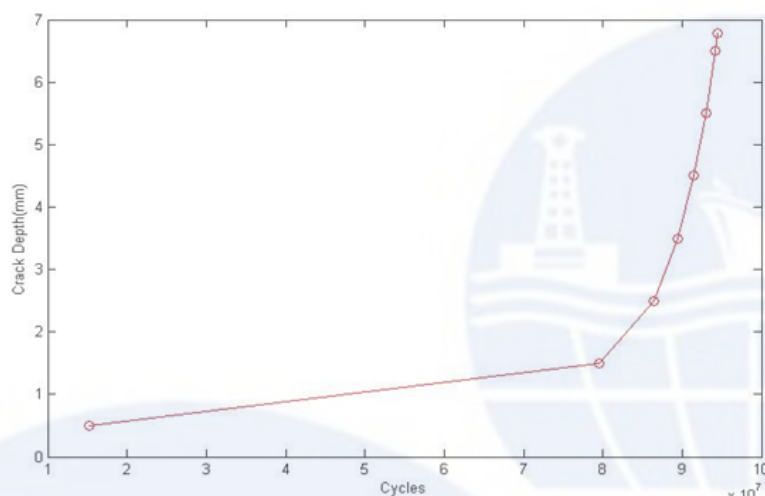
3/5	2/5	1/5	0/5	عمق ترک (mm)
51/92	44/93	33/78	16/75	$\Delta K1 (N/mm^{1.5})$
	6/5	5/5	4/5	عمق ترک (mm)
	65/27	60/36	56/49	$\Delta K1 (N/mm^{1.5})$



شکل 20) کانتورهای توزیع تنش ون میسز (MPa) برای مدل با عمق ترک 4/5 mm در پروفیل ترک



شکل 19) کانتورهای توزیع تنش ون میسز (MPa) برای مدلی با عمق ترک 4/5 mm



شکل 21) منحنی رشد ترک خستگی خوردگی اتصال طی سیکل دوم تحلیل مکانیک شکست

5- نتیجه گیری

جهت انجام تحلیل مکانیک شکست و برآورد عمر خستگی تحت بارگذاری با دامنه ثابت، پروفیل ترک نیم بیضوی در محل تنش حاد متناظر با بارگذاری ایجاد و مش بندی گردید. پس از تحلیل های مکانیک شکست ملاحظه گردید که سطوح شامل ترک از یکدیگر جدا شده و تنش ها در حواشی ترک متمرکز می شوند. علاوه بر آن مشاهده گردید که تمرکز تنش روی خط جلوی ترک بیشتر بوده و همچنین تمرکز تنش در قسمت نوک ترک در جلوی آن از سایر نقاط خط جلوی ترک بیشتر می باشد. همچنین برای اعماق مختلف ترک و در شرایط مختلف، محدوده های ضرایب شدت تنش جهت برآورد نرخ رشد ترک و عمر خستگی محاسبه گردید.

در ابتدا عمر خستگی یک اتصال لوله ای T شکل در شرایط با و بدون خوردگی تحت بارگذاری محوری با دامنه ثابت مورد بررسی قرار گرفت و سپس عمر و رشد ترک خستگی اتصال در شرایط خوردگی با نتایج آزمایشگاهی سایر محققین مقایسه گردید که نتایج مطابقت مناسبی را با یکدیگر نشان دادند. با مقایسه نرخ های رشد ترک خستگی در شرایط هوای آزاد و محیط خورنده آب دریا، مشاهده گردید که نرخ رشد ترک در محیط خورنده آب دریا با سرعت خیلی بیشتر از هوای آزاد گسترش می یابد و عمر خستگی اتصال نیز در این محیط به شدت کاهش می یابد. در نتیجه می توان به جای انجام کارهای آزمایشگاهی که هزینه بر، زمان بر و در مقیاس کوچکتر هستند، با اطمینان مناسبی از روش شبیه سازی استفاده نمود.

[1]- زمانیان، ر، خوردگی و روش‌های کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران، 1370.

[2] - Kitsunay, Y., Tanaka, M., Yoshihisa, E., "Influence of residual stresses and loading frequencies on corrosion fatigue crack growth behavior of weldments", Metallurgical and materials transactions, 1998.

[3] - Anto, P.F., "Pitting corrosion on weld joints offshore structure jackets", Institute of Engineering & Ocean technology, 1999.

[4] – Lassen, T., Naman Recho,p., Fatigue life analyses of welded structures, British Library Cataloguing-in-Publication Data, TA492.W4L38 2006.

[5] – Kitsunay, Y., Tanaka, M., and Yoshihisa, E., "Influence of residual stresses and loading frequencies on corrosion fatigue crack growth behavior of weldments", Metallurgical and materials transactions A, 1998.

[6] – Gandhi, P., Ramachandra Murthy ,D.S., Raghava, G., Madhava Rao, A.G. "Fatigue crack growth in stiffened steel tubular joints in seawater environment" , Structural Engineering Research Centre, CSIR Campus, Taramani, Chennai 600 113, India, 2000.

[7] – Anderson, T.L., Fracture mechanics, fundamental and application, Second edition, Department of mechanical engineering texas a&m university,1994.

[8] - Det norske Veritas (DnV), Rules for the design, construction and installation of ffshore structures. Det norske Veritas, Norway,1977.

[9] –Huacan,F., Shouping,D. and Zhenxin,C.,"A study on some problems in the calculations of corrosion fatigue life of structural members of an offshore platforms", Soctely of PetroleumEngineers, 1986.

[10] – King, P N.,"A review of fatigue crack growth rates in air and seawater", Health snd Safety Executive,1998.

[11] - مرتضی خالصی، حسن خسروی، علی متوسلانی، عبدالرضا محبی با مشاورت دکتر علی اکبر آقا کوچک، حفاظت سازه‌های فولادی دریایی در برابر خوردگی، مرکز تحقیقات و آموزش راه و ترابری، 1376 .

