مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۵، ص‌ص ۲۶-۳۲

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر تغییرات طول و عمق ترک سطحی نیم‌بیضوی بر ایمنی لوله فولادی انتقال گاز

سید ایمان شهرآئینی[۱]، سید حجت هاشمی[۲*]

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- استاد، گروه پژوهشی مطالعات لوله و صنایع وابسته، دانشگاه بیرجند، بیرجند

*بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، shhashemi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۱۹ آذر ۱۳۹۲
پذیرش: ۲۱ دی ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۲۴ خرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:
ایمنی خط لوله
لوله فولادی ترمومکانیکال
انتقال گاز
ترک طولی
نمودارهای ارزیابی آسیب

چکیده

وجود ترک در بدنه لوله‌های فولادی انتقال انرژی در شرایطی که ابعاد هندسی ترک از میزان مشخصی بزرگتر شود، می‌تواند خطرناک باشد. جهت بررسی ایمنی این لوله‌ها، از نمودارهای ارزیابی آسیب استفاده می‌شود. این نمودارها دارای سه سطح هستند که در هر سه سطح، ناحیه زیر منحنی ارزیابی آسیب، ناحیه ایمن و ناحیه خارج آن غیرایمن می‌باشند. در این مقاله برای اولین بار در ایران، ایمنی لوله پرفشار انتقال گاز با ترک سطحی (نوع API X65 با قطر خارجی ۴۸ اینچ) تحت فشار داخلی ثابت ۷ مگاپاسکال در دو حالت بررسی شده است. در حالت اول عمق ترک ثابت ۸ میلی‌متر و طول ترک متغیر (۱۰۰، ۱۳۰، ۱۶۰، ۱۹۰، ۲۲۰، و ۲۵۰ میلی‌متر) و در حالت دوم ترک با طول ثابت ۱۵۰ میلی‌متر و عمق ترک متغیر (۳، ۵، ۷، ۸، ۹، و ۱۰ میلی‌متر) درنظر گرفته شده است. با مدل‌سازی کامپیوتری لوله ترک‌دار در نرم‌افزار آباکوس و استفاده از معادلات استاندارد BS7910، موقعیت نقاط در نمودار ارزیابی آسیب مشخص می‌شود. نتایج تحلیل حاضر نشان داد در عمق ترک ثابت ۸ میلی‌متر، طول ترک بحرانی ۲۲۰ میلی‌متر و در طول ترک ثابت ۱۵۰ میلی‌متر، عمق ترک بحرانی ۹ میلی‌متر می‌باشد.

Effects of surface crack length and depth variations on gas transmission pipeline safety

Seyed Iman Shahraini[1], Sayyed Hojjat Hashemi[2]*

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
2- Research Group for Pipeline Studies and Related Industries, University of Birjand, Birjand, Iran
*P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, shhashemi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 December 2013
Accepted 11 January 2014
Available Online 14 June 2014

Keywords:
Pipeline Safety
Thermo-Mechanical Steel Pipe
Natural Gas Transmission Pipe
Axial Crack
Failure Assessment Diagrams (Fad)

ABSTRACT

Steel pipes with different cracks may be unsafe if the geometry of crack is larger than a specific size. The failure assessment diagrams are widely used to investigate the safety of such cracked pipes. These diagrams include three levels, in each of which the area under the failure assessment curve is the safe area, where as the outer area is unsafe. In this study, the API X65 gas transmission pipe with 48 inches outside diameter (commonly used in Iran's energy transmission lines) is investigated under constant internal pressure of 7 MPa for the first time in Iran. In order to analyze the critical crack length, a pipe with fixed crack depth of 8 millimeter and crack lengths of 100, 130, 160, 190, 220 and 250 millimeter is considered. Similarly, for analyzing the critical crack depth, a pipe with fixed crack length of 150 millimeter and crack depths of 3, 5, 7, 8, 9 and 10 millimeter is assumed. Using ABAQUS modeling and standard BS7910 equations, the location of loading points is investigated in failure assessment diagram. The results indicated that, in the case of fixed crack depth (8 millimeter), the critical crack length was 220 millimeter. For the case of fixed crack length (220 milimeter), a critical crack depth of 9 millimeter was obtained.

۱- مقدمه

گاز طبیعی معمولا با استفاده از شبکه‌های طولانی از خطوط لوله‌های قطور و پرفشار فولادی انتقال داده می‌شود. وجود نقص‌های مختلف مانند ترک‌های طولی یا محیطی در لوله‌های انتقال گاز همواره امری اجتناب ناپذیر بوده است. پس از استفاده گسترده از لوله‌های فولادی در انتقال گاز، بررسی این نقص‌ها و ایمنی آن‌ها مورد توجه بیشتری قرار گرفت. در سال‌های اخیر تحقیقات مختلفی در زمینه بررسی ایمنی لوله‌های دارای ترک صورت گرفته است.

در سال ۱۹۷۶ نیومن و همکارانش طی تحقیقی برای ناسا، به بررسی معیارهای شکست برای ترک‌های سطحی و ترک‌های تمام‌عمق در لوله‌های تحت فشار داخلی پرداختند تا نشان‌دهند معیارهای شکست تا چه میزان با اطلاعات تجربی شکست مطابقت دارند[۱]. آزمون‌های تجربی بر روی لوله با جنس‌های آلیاژ آلومینیوم و فولاد با ترک سطحی، و لوله با جنس‌های آلیاژ آلومینیوم، تیتانیوم، فولاد و برنج با ترک تمام‌عمق انجام و نتایج با استفاده از معیارهای شکست تحلیل گردید. در این تحقیق، روابطی برای محاسبه چقرمگی شکست در حالات مختلف ترک در لوله‌ها ارائه شد که برای محاسبه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S.I. Shahraini, S.H. Hashemi, Effects of surface crack length and depth variations on gas transmission pipeline safety, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 26-32, 2014 (In Persian)

موقعیت نقطه در نمودار ارزیابی آسیب[1] مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که معیار شکست برای بازه گسترده‌ای از هر دو ترک سطحی و تمام‌عمق در لوله‌ها، با تقریب ۱۰ ± درصد با اطلاعات شکست همخوانی دارد.

در سال ۱۹۸۲ راجو و همکارانش تحقیقی را برای محاسبه ضریب شدت تنش در بازه گسترده‌ای از ترک‌های سطحی نیم‌بیضوی در داخل و خارج استوانه جدار نازک انجام دادند[۲]. در تحقیق آن‌ها، سطوح ترک تحت چهار توزیع تنش یکنواخت، خطی، درجه دو و درجه سه قرار گرفت. نسبت عمق ترک به طول ترک ۰/۲ تا ۱، نسبت عمق ترک به ضخامت جداره ۰/۲ تا ۰/۸ و نسبت ضخامت جداره به شعاع لوله ۰/۱ تا ۰/۲۵ منظور و تحقیق برای حالات مختلف ترکیب این نسبت‌ها انجام شد. تحقیق راجو، نتایج یکسانی را برای ترک‌های طولی داخلی و خارجی نشان داد که با تقریب ۲ ± درصد نسبت به روابط انتگرالی و تقریب ۱۰ ± درصد نسبت به روش‌های المان محدود همخوانی داشت.

در سال ۱۹۹۶ لیو و همکارانش مقایسه‌ای را برای ترک‌های طولی داخلی و خارجی در استوانه‌های تحت فشار داخلی انجام دادند[۳]. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد ضریب شدت تنش در استوانه‌های جدار ضخیم برای ترک‌های داخلی بیشتر از ترک‌های خارجی می‌باشد. همچنین مشخص گردید هر چه استوانه به حالت جدار نازک نزدیک‌تر شود، تأثیر داخلی یا خارجی بودن ترک کمتر و در نتیجه میزان خطرناک بودن این دو حالت مشابه یکدیگر می‌شود.

مقدار ضریب شدت تنش طبق رابطه (۱) به‌دست می‌آید[۳]:

$$K = \sigma F \sqrt{\pi a} \qquad (۱)$$

در این رابطه F ضریب شکل می‌باشد که مقادیر آن در تحقیق لیو برای ترک‌های داخلی و خارجی در جداولی مشخص شده است. با مقایسه این مقادیر، میزان خطرناک بودن ترک‌های داخلی و خارجی مشخص می‌شود.

در سال ۲۰۰۴ لی و همکارانش به بررسی ایمنی ترک در فلز پایه و جوش پرداختند[۴]. نمونه آن‌ها، لوله خطوط انتقال گاز از جنس فولادی با درز جوش مستقیم (نوع API X65 با قطر خارجی ۷۶۲ میلی‌متر و ضخامت جداره ۱۷/۵ میلی‌متر، حاوی ترک طولی روی جداره خارجی) بود. تحقیق لی نشان داد لوله با فشار داخلی ۷ مگاپاسکال و با ترک‌های با طول ثابت ۸۰۰ میلی‌متر، تا عمق ۱۳ میلی‌متر ایمن و بیشتر از آن غیرایمن می‌باشد. همچنین در ناحیه جوش، ترک‌های با طول ثابت ۸۰۰ میلی‌متر تا عمق ۱۴ میلی‌متر ایمن و ۱۴/۱ میلی‌متر و بیشتر از آن غیرایمن است. روش پیشنهاد شده و نتایج تحقیق لی و همکارانش مبنای محاسبات و اعتبارسنجی در مقاله حاضر می‌باشد.

در سال ۲۰۰۶ آلوارز و همکارانش مطالعاتی را بر روی لوله‌های دارای ترک طولی که تحت فشار بالای هیدروژن بودند، انجام دادند[۵]. تحلیل المان محدود روی لوله‌ها انجام گرفت و نتایج با نمودار ارزیابی آسیب بررسی شد. عوامل مختلفی در این تحقیق تأثیرگذار بود. مورد اول ترد شدن ماده بر اثر نفوذ هیدروژن بود که نتیجه آن کاهش چقرمگی شکست است. مورد بحرانی دیگر تأثیر ترک بر روند شکست بود، چرا که هندسه‌های مختلف ترک باعث مکانیزم های مختلف شکست می‌شود. طبق نتایج آن‌ها، با افزایش فشار هیدروژن چقرمگی شکست کاهش می‌یافت و در نتیجه ماده تردتر می‌گردید. تحقیق آن‌ها نشان داد، ماده‌ای که سال‌ها در ساخت لوله‌ها به‌کار می‌رفته است، در معرض خطر بالای نفوذ هیدروژنی به‌خصوص در فشارهای بالا قرار داشته است.

1- Failure Assessment Diagram (FAD)

در سال ۲۰۱۲ پلاوینج و همکارانش رفتار شکست مواد را با توجه به دامنه‌های نمودارهای ارزیابی آسیب بررسی کردند[۶]. طبق نمودار فدرسون[2]، قسمت ایمن نمودار ارزیابی آسیب به سه ناحیه تقسیم می‌شود. تحقیق آن‌ها روی لوله‌های از جنس چدن و فولاد API X52 انجام گرفت. لوله چدنی دارای ترک طولی نیم‌بیضوی و لوله فولادی دارای ترک‌های طولی و محیطی از نوع تمام‌عمق، نیم‌بیضوی و نیم‌کروی بود. پس از قرار گرفتن نتایج تحلیل آن‌ها در نمودار ارزیابی آسیب منطقه‌ای[3] (با شرایط یکسان برای لوله‌ها)، مشخص گردید لوله چدنی با ترک طولی نیم‌بیضوی مستعد شکست ترد می‌باشد. همچنین لوله فولادی با سه نوع ترک طولی تمام‌عمق، طولی نیم‌بیضوی و محیطی تمام‌عمق مستعد شکست الاستیک-پلاستیک است. نهایتاً لوله فولادی با سه نوع ترک محیطی نیم‌بیضوی، طولی نیم‌کروی و محیطی نیم-کروی در مستعد فروپاشی پلاستیک می‌باشد. به‌عبارت دیگر، تحقیق آن‌ها نشان داد در شرایط یکسان، هر نوع ترک طولی در لوله (نیم‌بیضوی، نیم‌کروی و تمام‌عمق)، خطرناک‌تر از همان نوع ترک محیطی در لوله می‌باشد.

در تحقیق حاضر، بررسی بر روی لوله فولادی انتقال گاز ایران با گرید API X65 با درزجوش مارپیچ صورت می‌گیرد. لوله حاوی ترک طولی نیم-بیضوی (با طول و عمق‌های متفاوت) در جداره خارجی است. تحلیل توسط نرم‌افزار آباکوس[4] انجام می‌گیرد و نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار، پس از انجام محاسبات لازم و استفاده از استاندارد BS7910، مختصات نقاط مورد نظر در نمودار ارزیابی آسیب را مشخص می‌کند. سپس با مقایسه موقعیت این نقاط نسبت به منحنی ارزیابی آسیب، ایمنی لوله در حالات مختلف (ترک طولی با هندسه متفاوت) مشخص می‌شود.

۲- محاسبه چقرمگی شکست

جهت تعیین مقاومت ماده در برابر رشد ترک از معیار چقرمگی شکست K_{IC} استفاده می‌شود. این پارامتر برای تعیین موقعیت نقاط در نمودار ارزیابی آسیب مورد نیاز می‌باشد. چقرمگی شکست در حالت کرنش مسطح[5] (به‌عنوان معیار شروع ترک) برای فولادهای پراستحکام خطوط انتقال گاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پارامتر نشان‌دهنده استعداد سازه به شکست ترد می‌باشد. تعیین چقرمگی شکست فولاد گرید API X65 اخیراً در تحقیقی توسط کیمیابخش[۷] برای اولین بار در ایران انجام و مقدار آن برابر ۳۰۸ $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ گزارش شده است. این مقدار برای رسم منحنی‌های ارزیابی آسیب و بررسی ایمنی لوله فولادی ترک‌دار در این مقاله استفاده خواهد شد.

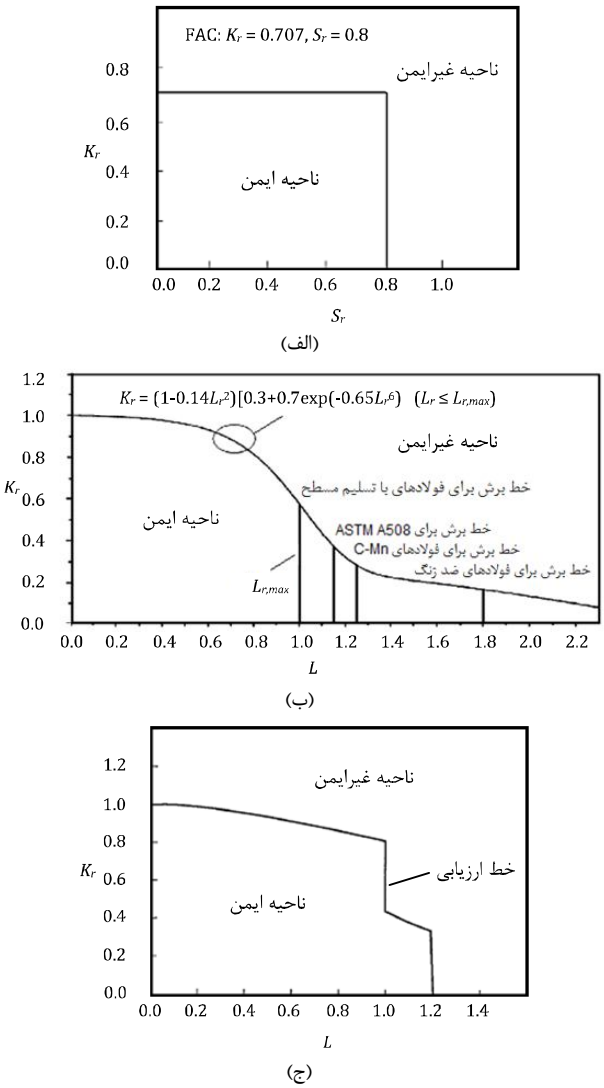
۳- نمودارهای ارزیابی آسیب

نمودارهای ارزیابی آسیب یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی نقص‌های شبه ترک در سازه‌های صنعتی هستند[۸،۹]. این نمودارها که در استانداردهای رایجی مانند API 579، BS7910 و R-6[۱۰-۱۲] توصیف می‌شوند، می‌توانند همه حالات مختلف از شکست خطی الاستیک (ترد) تا فروپاشی پلاستیک را پوشش دهند و بنابراین به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان روش ارزیابی لوله‌های گاز طبیعی با نقص‌های شبه ترک مورد قبول قرار گرفته‌اند[۴].

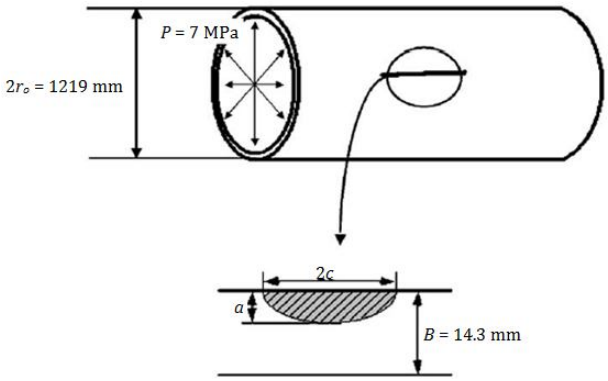
نمودارهای ارزیابی آسیب عموماً به سه دسته تقسیم می‌شوند. سطح بالاتر این نمودارها، داده‌های پیچیده‌تری نیاز دارد و محافظه‌کاری آن کمتر است. سطح 1 (شکل۱-الف)، نمودار ارزیابی آسیب بر پایه روش منحنی جابه‌جایی نوک ترک را، نشان می‌دهد که پایه ارزیابی روند شکست الاستیک-پلاستیک در

2- Feddersen
3- Domain Failure Assessment Diagram (DFAD)
4- Abaqus
5- Plain strain

BS7910 است. سطح 2a (شکل۱-ب) حالت دیگری از نمودار ارزیابی آسیب است که بر پایه مرز پایینی تعداد زیادی منحنی به‌دست آمده از داده‌های تجربی روی فولاد آستنیتی است[۴]. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می شود، هر دو سطح 1 و 2a شامل منحنی‌های ارزیابی آسیب عمومی هستند که مستقل از خصوصیات ماده‌اند، هر چند سطح 2b (شکل ۱-ج) به خصوصیات ماده بستگی دارد. سطح 3 این نمودارها دارای سه سطح است و داده‌های پیچیده‌تری نیاز دارد و همان‌طور که اشاره شد محافظه‌کاری آن کمتر است.



شکل ۱ نمودارهای ارزیابی آسیب، الف) سطح 1، ب) سطح 2a، ج) سطح 2b[۱۱]



شکل ۲ هندسه لوله انتقال گاز با ترک طولی در تحقیق حاضر

جدول ۱ خواص مکانیکی لوله فولادی API X65 (اندازه‌گیری شده در جهت محیطی) [۱۳]

مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم به تنش نهایی
۲۱۰	۵۰۵	۶۱۱	۰/۸۳

جدول ۲ خواص پلاستیک لوله فولادی API X65 (اندازه‌گیری شده در جهت محیطی) [۱۳]

شماره	تنش تسلیم (MPa)	کرنش پلاستیک	شماره	تنش تسلیم (MPa)	کرنش پلاستیک
۱	۵۰۵	۰	۱۱	۷۱۹	۰/۱۸
۲	۵۴۹	۰/۰۱	۱۲	۷۲۲	۰/۱۹
۳	۵۹۹	۰/۰۳	۱۳	۷۵۵	۰/۳۰
۴	۶۳۱	۰/۰۵	۱۴	۷۹۴	۰/۴۰
۵	۶۵۲	۰/۰۶	۱۵	۸۲۱	۰/۷۰
۶	۶۶۷	۰/۰۸	۱۶	۸۳۲	۰/۸۰
۷	۶۸۱	۰/۱۰	۱۷	۸۴۱	۰/۹۰
۸	۶۹۳	۰/۱۲	۱۸	۸۵۰	۱/۰۰
۹	۷۰۳	۰/۱۴	۱۹	۸۵۸	۱/۱۰
۱۰	۷۱۲	۰/۱۶	۲۰	۸۶۶	۱/۲۰

جدول ۳ مقایسه نتایج مدل‌سازی در تحقیق حاضر و مرجع [۴]

نقطه	عمق ترک (میلی‌متر)	تحقیق لی [۴] x	تحقیق لی [۴] y	تحقیق حاضر L_r	تحقیق حاضر K_r	درصد خطا برای K_r
۱	۱۰	۰/۶۵۰	۰/۳۱۰	۰/۶۵۰	۰/۲۸۱	٪۹
۲	۱۲	۰/۷۹۱	۰/۵۲۳	۰/۷۹۱	۰/۵۴۹	٪۴
۳	۱۳	۰/۸۹۱	۰/۶۴۴	۰/۸۹۱	۰/۶۵۵	٪۲
۴	۱۴	۰/۹۶۲	۰/۷۳۵	۰/۹۶۲	۰/۷۷۹	٪۶

بررسی موقعیت یک نقطه در نمودار ارزیابی آسیب نه تنها ایمنی آن را مشخص می‌کند، بلکه تمایل آن ماده را به شکست ترد یا فروپاشی پلاستیک نشان می‌دهد. قرار گرفتن یک نقطه در سمت راست و پایین نمودار ارزیابی آسیب نشان دهنده استعداد آن ماده به فروپاشی پلاستیک می‌باشد. همچنین چنانچه نقطه ارزیابی در سمت چپ و بالای نمودار ارزیابی آسیب قرار گیرد، ماده مورد نظر به شکست ترد تمایل بیشتری دارد[۶]. در این تحقیق با توجه به مستقل بودن سطح 2a نمودارهای ارزیابی آسیب از خواص ماده، پیچیدگی کمتر نسبت به سطح 3 و کاربرد گسترده آن در تحقیقات، از این سطح برای ارزیابی ایمنی لوله در حالات مختلف استفاده می‌شود.

۴- شرایط مساله

لوله مورد تحقیق از جنس فولاد API X65 با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت جداره ۱۴/۳ میلی‌متر است (شکل ۲) که یک ترک طولی نیم‌بیضوی روی سطح خارجی آن قرار دارد. در بررسی اول عمق ترک برابر با مقدار ثابت ۸ میلی‌متر و طول آن ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۶۰،۱۹۰، ۲۲۰ و ۲۵۰ میلی‌متر درنظر گرفته می‌شود. در حالت دوم طول ترک برابر با مقدار ثابت ۱۵۰ میلی‌متر و عمق آن نیز ۳، ۵، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ میلی‌متر درنظر گرفته می‌شود. فشار داخلی ۷ مگاپاسکال و چقرمگی شکست ۳۰۸ MPa $\sqrt{m}$ می‌باشد[۷].

خواص کششی فولاد مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است[۱۳].

جدول ۲ خواص پلاستیک لوله فولادی API X65 را نشان می‌دهد[۱۳].

۵- اعتبارسنجی

صحت این مدل‌سازی با نتایج بدست آمده از مقاله لی و همکارانش[۴] بررسی شد. بدین منظور قبل از انجام مدل‌سازی این تحقیق، شرایط حاکم بر

تحقیق لی در مدل‌سازی اعمال و نتایج مقایسه شدند. طول ترک در تحقیق لی ۸۰۰ میلی‌متر درنظر گرفته شد. فشار داخلی لوله ۷ مگاپاسکال، قطر خارجی لوله ۷۶۲ میلی‌متر و ضخامت آن ۱۷/۵ میلی‌متر بود. بررسی بر روی ترک با عمق‌های مختلف ۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ میلی‌متر انجام شد. جدول ۳ نتایج اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

مولفه L_r و K_r مربوط به تحقیق لی در جدول ۳ به‌ترتیب با x و y نشان داده شده‌اند. از آنجا که L_r و x از روابط استاندارد به‌دست آمده‌اند، مقادیر آن‌ها برابر است. اما مقادیر K_r و y مقداری اختلاف دارند که به دلیل خطای نرم‌افزارهای المان محدود می‌باشد. مقایسه K_r و y نشان‌دهنده درصد خطای کم و نزدیکی این مقادیر است که صحت مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

۶- مدل‌سازی کامپیوتری

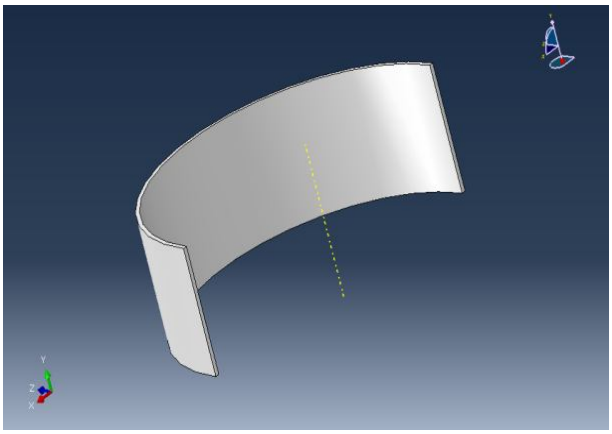
برای محاسبه ضریب شدت تنش از مدل‌سازی کامپیوتری توسط نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. بدین منظور با توجه به شرایط متقارن لوله، یک چهارم هندسه (نصف ترک) مدل می‌شود. بنابراین در بخش‌های متقارن (جداره لوله در جهت طولی و محیطی)، شرایط مرزی به صورت متقارن انتخاب می‌شوند (شکل ۳). پس از مدل‌سازی مقدار انتگرال J توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود. همچنین منحنی (سطح دو) نمودار ارزیابی آسیب با وارد کردن معادله آن در برنامه متلب ترسیم می شود. در نهایت می‌توان با وارد کردن نقاط به‌دست آمده در نمودار، ایمنی ترک‌هایی با عمق و طول مختلف را بررسی کرد.

۶-۱- بارگذاری و شرایط مرزی

بارگذاری این مساله از نوع فشار داخلی و مقدار آن در تمام مراحل حل ۷ مگاپاسکال (ثابت) می‌باشد. همچنین نحوه توزیع بار، به‌صورت یکنواخت انتخاب می‌شود. شکل ۴ توزیع یکنواخت فشار در سطح داخلی لوله را نشان می‌دهد.

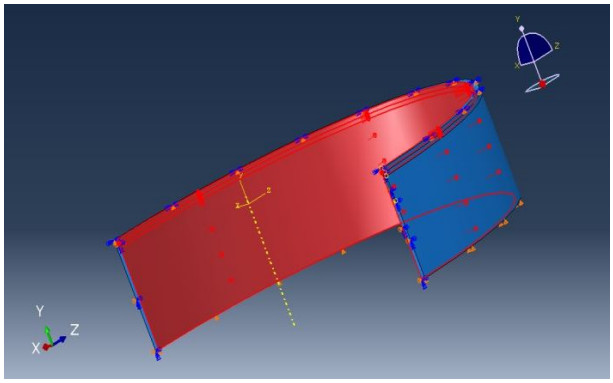
با توجه به امتداد لوله در راستای محوری، دو انتهای مدل در جهت محوری مقید می‌شوند. سطح مربوط به صفحه ترک در جداره لوله نیز، در جهت عمود بر صفحه آن، به‌صورت متقارن مقید می‌شود. با توجه به این که دو سطح ترک به یکدیگر متصل نیستند، در اعمال شرط مرزی مربوط به آن، ناحیه اطراف ترک انتخاب می‌شوند. شکل ۵ ناحیه مربوط به این شرط مرزی را نشان می‌دهد.

پارتیشن‌های[1] مشخص شده در شکل ۵ به‌منظور هدایت صحیح مش‌ها ایجاد شده‌اند.

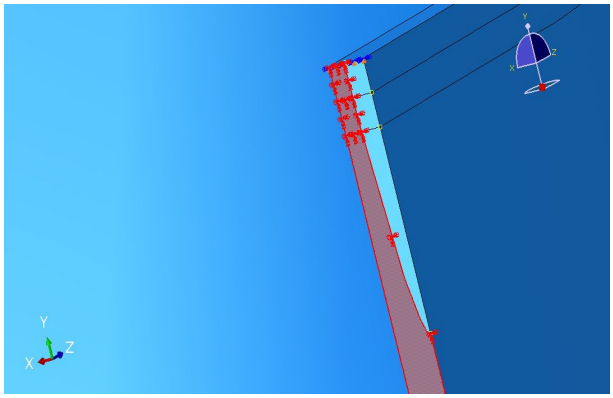


شکل ۳ نمایش مدل‌سازی کامپیوتری (مدل یک چهارم لوله)

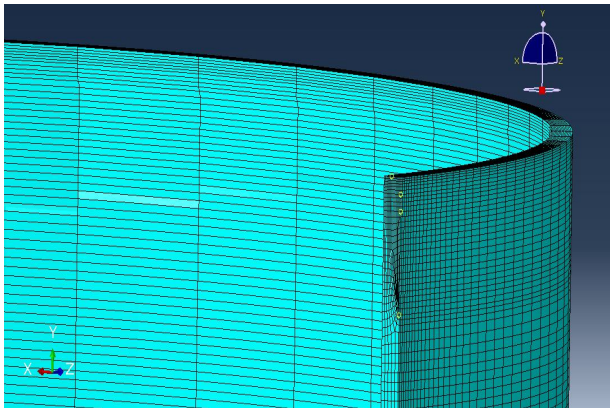
1- Partition



شکل ۴ توزیع فشار ۷ مگاپاسکال در سطح داخلی لوله



شکل ۵ ناحیه مربوط به شرط مرزی جداره لوله



شکل ۶ نمایش تراکم بالای مش در مجاورت نوک ترک

۶-۲- مش‌بندی

برای دقت بیشتر و زمان حل کمتر، مش‌بندی به صورتی انجام می‌گیرد که تراکم مش‌ها در نزدیکی نوک ترک، در همه جهات افزایش یابد. با توجه به شرایط مساله، مش‌بندی این مدل‌سازی سوئیپ[2] و الگوریتم آن مدیال اکسیس[3] می‌باشد. شکل ۶ مدل مش‌بندی شده و تراکم بالای مش اطراف ترک را نشان می‌دهد.

۶-۳- انتخاب مقدار صحیح انتگرال J

یکی از موارد مهم در این مساله انتخاب مقدار صحیح انتگرال J در تحلیل هر ترک می‌باشد. در تحلیل ترک‌ها، کلیه نقاط لبه ترک مورد تحلیل قرار می‌گیرند. طبق تعریفی که برای کانتورهای[4] انتگرال انجام گرفته است، برای هر

2- Sweep
3- Medial Axis
4- Contour

نقطه ۹ مقدار انتگرال J مشخص می‌شود. بنابراین با توجه به مش‌بندی انجام شده، برای هر ترک حدود پانصد مقدار انتگرال J گزارش می‌شود که تنها یکی از آن‌ها مقدار صحیح و مطلوب این مساله است[۱۴]. هدف از این بخش، پیدا کردن محل رشد ترک است که هر کجا مقدار ضریب شدت تنش (به عبارتی مقدار انتگرال J) بزرگتر باشد، ترک از همان قسمت شروع به رشد خواهد کرد. به عبارتی با بررسی مقادیر انتگرال J و مقایسه آن‌ها در بخش‌های مختلف ترک، می‌توان ملاحظه کرد که ترک از قسمت میانی (که به‌صورت متقارن مدل شده است)، شروع به رشد می‌کند.

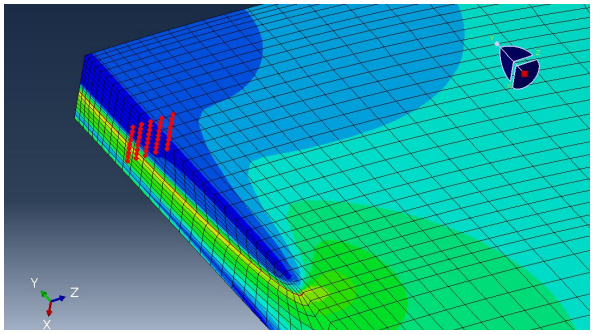
در نرم‌افزار آباکوس، مقادیر انتگرال J از طریق نقاطی که در اطراف ترک و از یک سطح آن تا سطح دیگر قرار دارند، محاسبه می‌گردد. شکل ۷ مجموعه نقاط استفاده شده برای یکی از کانتورهای انتگرال J را نشان می‌دهد. البته با توجه به تقارن لوله در این قسمت، معادل همین نقاط در بخش متقارن هم وجود دارند که در شکل نشان داده نمی‌شود.

پس از مشخص شدن محلی از ترک که مقادیر انتگرال J از آن قسمت انتخاب می‌شوند، نوبت به انتخاب کانتور صحیح می‌باشد. با بررسی نمودار مقادیر انتگرال J در بخش‌های مختلف ترک مشخص می‌شود که تقریباً در تمامی آن‌ها مقادیر انتگرال J پس از چند کانتور، به سمت عدد معینی همگرا می‌شوند. این عدد به‌عنوان مقدار انتگرال J در آن قسمت گزارش می‌شود. جدول ۴ این همگرایی را در یکی از ترک‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.

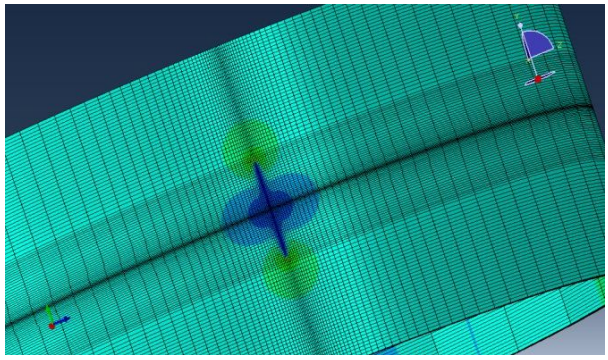
همان‌طور که در ابتدای این بخش گفته شد، ۹ کانتور برای محاسبه انتگرال J درنظر گرفته شده است که این مقدار با آزمون و خطا به‌دست آمده است.

جدول ۴ همگرایی مقادیر انتگرال J برحسب شماره کانتورها

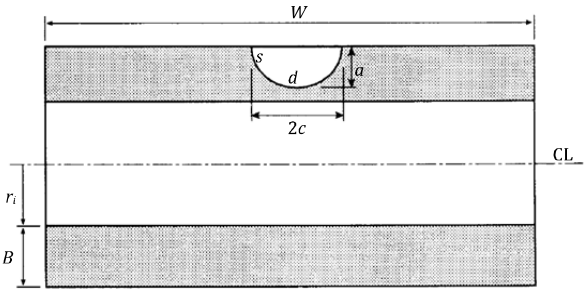
شماره کانتور	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
J(kJ/m²)	۳۰/۵	۳۲/۵	۳۴	۳۵/۵	۳۷	۳۸	۳۸/۵	۳۸/۷	۳۸/۸
ΔJ (kJ/m²)	۲	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱	۰/۵	۰/۲	۰/۱	–



شکل ۷ مجموعه نقاط استفاده شده برای محاسبه انتگرال J



شکل ۸ نمای کامل لوله ترک‌دار پس از حل المان محدود



شکل ۹ نمایش مقطع لوله با ترک طولی خارجی[۱۱]

در حالات کمتر از ۹ کانتور (مانند ۷ یا ۸ کانتور)، در بعضی از ترک‌ها همگرایی کمتری در انتگرال J دیده می‌شود و در حالاتی که تعداد کانتورها خیلی کمتر از ۹ کانتور انتخاب شده باشد (مانند ۴ یا ۵ کانتور)، در بسیاری از ترک‌ها هیچ همگرایی دیده نمی‌شود. شکل ۸ نمای کامل لوله را پس از حل به همراه کانتورهای تنش نشان می‌دهد. در این شکل علاوه‌بر کانتورهای تنش، تراکم بالای مش در نزدیکی ترک مشاهده می‌شود.

۷- محاسبه ضرایب شدت تنش

با توجه به شرایط الاستیک- لاستیک حاکم بر مساله مقدار ضریب شدت تنش را نمی‌توان مستقیما از نرم‌افزار به‌دست آورد. بنابراین با استفاده از رابطه (۲) و مقدار انتگرال J که توسط نرم‌افزار محاسبه شده است، مقدار ضریب شدت تنش برای هر نقطه به‌دست می‌آید[۱۵]:

$$K=\sqrt{J\times E} \qquad (۲)$$

این مقدار به‌دست آمده پس از تقسیم بر چقرمگی شکست، مولفه عمودی نقطه مربوط به هر ترک را در نمودار ارزیابی آسیب نشان می‌دهد. مولفه افقی نقاط در نمودار ارزیابی آسیب نیز از تقسیم تنش مرجع بر تنش تسلیم مشخص می‌شود.

۸- محاسبه تنش مرجع

تنش مرجع با توجه به هندسه لوله و فشار داخلی آن توسط استاندارد BS7910 بر اساس رابطه (۳) و شکل ۹ به‌دست می‌آیند[۱۱]:

$$\sigma_{ref}=1.2M_S P_m+\frac{2P_b}{3\left(1-a''\right)^2}$$

$$M_S=\frac{1-\{\frac{a}{\left(BM_T\right)}\}}{1-(\frac{a}{B})}$$

$$M_T=\sqrt{1+1.6\left(\frac{c^2}{r_i B}\right)}$$

$$a''=\frac{\left(\frac{a}{B}\right)}{\left\{1+\left(\frac{B}{c}\right)\right\}} \qquad w\geq 2\left(c+B\right)$$

$$a''=2\left(\frac{a}{B}\right)\left(\frac{c}{\pi r_i}\right) \qquad w<2\left(c+B\right) \qquad (۳)$$

در این روابط σ_{ref} تنش مرجع، P_m تنش محیطی برابر با PR/t، P_b تنش خمشی (در این مساله برابر با صفر)، B ضخامت لوله برابر با ۱۴/۳ میلی‌متر، w طول لوله (با توجه به شرایط مساله نامتناهی)، c نصف طول ترک،

a عمق ترک و r_i شعاع داخلی لوله برابر با ۵۹۵/۲ میلی‌متر می‌باشند. M_S، M_T و a'' پارامترهای بی‌بعد می‌باشند که مقدار آن‌ها در روابط مشخص شده است.

پس از مشخص شدن کلیه پارامترهای مربوط به نمودار ارزیابی آسیب، موقعیت نقاط مربوط به ترک‌ها، قابل بررسی می‌باشند. شکل ۱۰ ناحیه اطراف ترک را پس از مدل‌سازی نشان می‌دهد.

۹- نتایج

۹-۱- بررسی اثر تغییرات طول ترک بر ایمنی لوله

طبق آنچه گفته شد مقادیر L_r (مولفه افقی نمودار ارزیابی آسیب) و K_r (مولفه عمودی نمودار ارزیابی آسیب) برای ترک‌های با عمق ثابت ۸ میلی‌متر و طول ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۶۰، ۱۹۰، ۲۲۰ و ۲۵۰ میلی‌متر مطابق جدول ۵ به‌دست می‌آیند.

با توجه به مقادیر به‌دست آمده و شکل ۱۱ مشاهده می شود ترک‌های با عمق مساوی ۸ میلی‌متر و طول ۱۹۰، ۱۶۰، ۱۳۰، ۱۰۰ میلی‌متر و کمتر از آن در ناحیه قابل قبول یا ایمن قرار دارند. ترک با طول ۲۲۰ میلی‌متر بسیار نزدیک به خط ارزیابی آسیب (تقریباً روی خط) قرار دارد و این بدان معناست که این ترک در ناحیه بحرانی قرار دارد. نهایتاً ترک با طول ۲۵۰ میلی‌متر و بیشتر از آن در ناحیه غیر قابل قبول (غیرایمن) قرار دارند.

۹-۲- بررسی اثر تغییرات عمق ترک بر ایمنی لوله

مقادیر مربوط به ترک‌های با طول ثابت ۱۵۰ میلی‌متر و عمق ۳، ۵، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ میلی‌متر مطابق جدول ۶ به‌دست می‌آیند. با توجه به این مقادیر و قرار دادن آن‌ها در نمودارهای ارزیابی آسیب، موقعیت نقاط نسبت به خط ارزیابی آسیب مشخص می‌شود و ایمنی نقاط تعیین می‌شود.

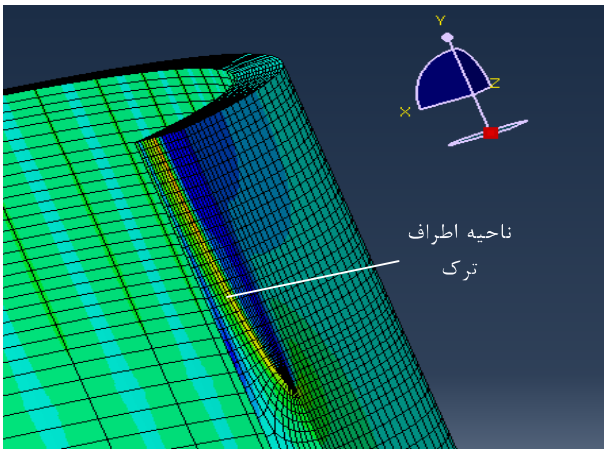
همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است ترک‌های با طول مساوی ۱۵۰ میلی‌متر و عمق ۸، ۷، ۵، ۳ میلی‌متر و کمتر از آن در ناحیه قابل قبول یا ایمن قرار دارند. ترک با عمق ۹ میلی‌متر نزدیک به خط ارزیابی آسیب قرار دارد و در ناحیه بحرانی قرار دارد. نهایتاً ترک با عمق ۱۰ میلی‌متر و بیشتر از آن در ناحیه غیر قابل قبول (غیرایمن) قرار دارد.

جدول ۵ مقادیر محاسبه شده برای طول‌های متفاوت ترک به‌ازای فشار داخلی ۷ مگاپاسکال و عمق ترک ثابت ۸ میلی‌متر

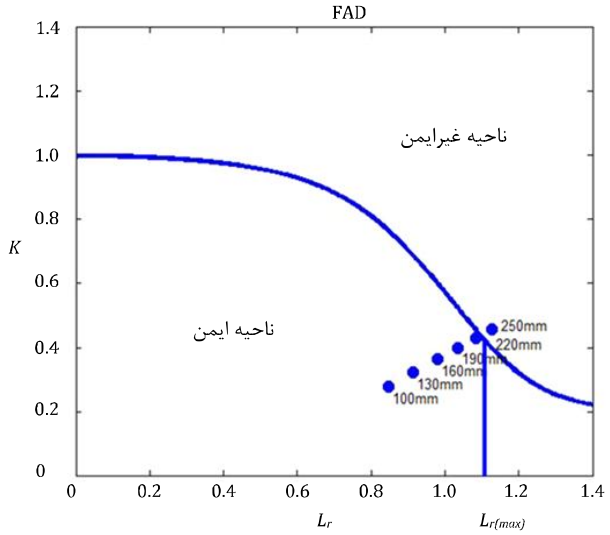
نقطه	2c (mm)	σ_{ref} (MPa)	J (kJ/m²)	K (MPa $\sqrt{m}$)	L_r	K_r
۱	۱۰۰	۴۲۷	۳۵	۸۶	۰/۸۵	۰/۲۸
۲	۱۳۰	۴۶۲	۴۷	۹۹	۰/۹۱	۰/۳۲
۳	۱۶۰	۴۹۴	۶۰	۱۱۲	۰/۹۸	۰/۳۶
۴	۱۹۰	۵۲۳	۷۲	۱۲۳	۱/۰۴	۰/۴۰
۵	۲۲۰	۵۴۸	۸۴	۱۳۳	۱/۰۹	۰/۴۳
۶	۲۵۰	۵۷۰	۹۵	۱۴۱	۱/۱۳	۰/۴۶

جدول ۶ مقادیر محاسبه شده برای عمق‌های متفاوت ترک به ازای فشار داخلی ۷ مگاپاسکال و طول ترک ثابت ۱۵۰ میلی‌متر

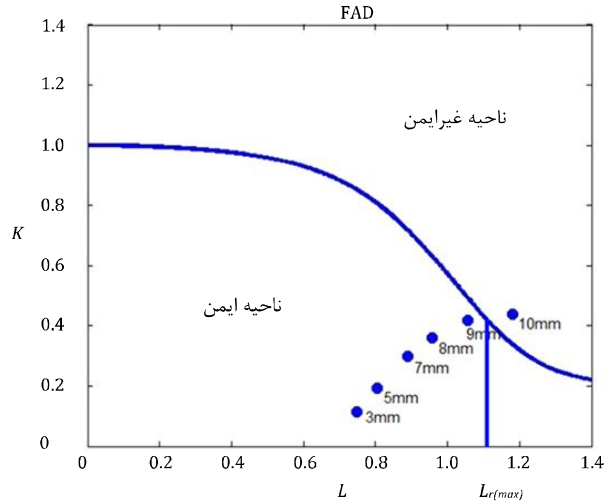
نقطه	a (mm)	σ_{ref} (MPa)	J(kJ/m²)	K (MPa $\sqrt{m}$)	L_r	K_r
۱	۳	۳۸۲	۱۰	۴۶	۰/۷۵	۰/۱۵
۲	۵	۴۱۱	۲۵	۷۲	۰/۸۱	۰/۲۳
۳	۷	۴۵۵	۵۸	۱۱۰	۰/۹	۰/۳۶
۴	۸	۴۸۲	۸۲	۱۳۱	۰/۹۵	۰/۴۲
۵	۹	۵۳۵	۱۰۶	۱۴۹	۱/۰۶	۰/۴۸
۶	۱۰	۶۰۰	۱۲۵	۱۶۲	۱/۱۸	۰/۵۲



شکل ۱۰ ناحیه اطراف ترک پس از مدل‌سازی کامپیوتری



شکل ۱۱ ارزیابی ترک با طول متفاوت در بدنه لوله فولادی (عمق ترک ثابت a = ۸ میلی‌متر، فشار داخلی ثابت P = ۷ مگاپاسکال)



شکل ۱۲ ارزیابی ترک با عمق متفاوت در بدنه لوله فولادی (طول ترک ثابت $2c$ = ۱۵۰ میلی‌متر، فشار داخلی ثابت P = ۷ مگاپاسکال)

همچنین شکل ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهند ساز و کار آسیب لوله از محور عمودی (شکست ترد) دور بوده و در ناحیه پایینی در نزدیکی سمت راست محور افقی قرار دارد که به‌دلیل چقرمگی بالای فولاد مورد آزمایش است. در

این ناحیه احتمال آسیب از نوع فروپاشی پلاستیک بیشتر می‌باشد.

۱۰- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق بررسی ایمنی لوله انتقال گاز ایران با گرید API X65 (حاوی ترک طولی از نوع سطحی نیم‌بیضوی بر روی جداره خارجی) انجام شد. ابتدا مدل‌سازی لوله ترک‌دار با نرم‌افزار آباکوس براساس شرایط مرجع [۴] انجام و اعتبارسنجی مدل تایید شد. سپس مدل‌سازی لوله ترک‌دار برای فشار داخلی ثابت ۷ مگاپاسکال در دوحالت انجام گرفت. در حالت اول طول ترک متغیر (و عمق ترک برابر مقدار ثابت ۸ میلی‌متر) و در حالت دوم عمق ترک متغیر (و طول ترک برابر با مقدار ثابت ۱۵۰ میلی‌متر) درنظر گرفته شد. با توجه به نتایج مدل‌سازی و محاسبه تنش مرجع، موقعیت نقاط در نمودار ارزیابی آسیب تعیین و ایمنی لوله در حالات مختلف مشخص گردید. در هر دو حالت بررسی شده (طول ترک ثابت و عمق ترک متغیر، عمق ترک ثابت و طول ترک متغیر) K بسیار کمتر از K_{IC} (چقرمگی این فولاد بسیار بالا است) و لذا K_r کوچک است. همچنین در هر دو حالت σ_{ref} با σ_y قابل مقایسه و لذا L_r بزرگ است. تمایل در هر دو حالت به سمت خرابی پلاستیک در سمت راست نمودار است که به‌دلیل K_r کوچک و L_r بزرگ می‌باشد. علاوه‌بر این مشخص شد در محدوده فشار لوله‌های انتقال گاز ایران (حدود ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع معادل ۷ مگاپاسکال که فشار متوسطی می‌باشد) لوله با ترک طولی تا حداکثر طول ترک ۱۹۰ میلی‌متر (با عمق ترک ثابت ۸ میلی‌متر) ایمن می‌باشد. همچنین همین لوله با عمق ترک تا حداکثر ۹ میلی‌متر (با طول ترک ثابت ۱۵۰ میلی‌متر) ایمن خواهد بود. بدیهی است درصورت استفاده از گریدهای بالاتر فولادهای API مانند X80 و X100 می‌توان فشار داخلی خط لوله را افزایش داد و ایمنی لوله ترک‌دار را به همین روش بررسی کرد. با تکمیل این تحقیق در آینده و استفاده از طول و عمق ترک‌های متفاوت می‌توان مجموعه کاملی از ترک ها را (در بخش های مختلف لوله مثل فلز پایه، درز جوش و ناحیه متأثر از حرارت) ارزیابی کرد. سپس با آزمایش (انفجار واقعی طول مشخصی از لوله حاوی ترک با هندسه معلوم) و یا مشخص کردن طول ترک با آزمون غیرمخرب (التراسونیک) و مقایسه نتایج با اطلاعات حاصل از این تحقیق، می‌توان احتمال ایمن بودن یا غیرایمن بودن آن را، پیش از استفاده تشخیص داد.

۱۱- فهرست علائم

a	عمق ترک، (mm)
a''	ضریب بی‌بعد
B	ضخامت لوله، (mm)
c	نصف طول ترک، (mm)
E	مدول الاستیسیته، (MPa)
F	ضریب شکل
J	انتگرال جی، (kJ/m^2)
K	ضریب شدت تنش، ($MPa\sqrt{m}$)
K_{IC}	چقرمگی شکست، ($MPa\sqrt{m}$)
K_r	عدد بی‌بعد (مربوط به محور عمودی نمودار ارزیابی آسیب)
l	طول ترک، (mm)
L_r	عدد بی‌بعد (مربوط به محور افقی نمودار ارزیابی آسیب)
M_S	ضریب بی‌بعد
M_T	ضریب بی‌بعد
P	فشار داخلی، (MPa)
P_b	تنش خمشی متقاطع با ترک، (MPa)
P_m	تنش محیطی، (MPa)
r_i	شعاع داخلی لوله، (mm)
r_o	شعاع خارجی لوله، (mm)
w	طول لوله، (mm)

علائم یونانی

σ_{ref}	تنش مرجع، (MPa)
σ_y	تنش تسلیم، (MPa)

۱۲- تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار گذاشتن لوله فولادی API X65 قدردانی می‌شود.

۱۳- مراجع

[1] J. C. Newman, Fracture analysis of surface and through cracks in cylindrical pressure vessels, *National Aeronautics and Space Administration*, NASA TN D-8325, 1976.

[2] I. S. Raju and J. G. Newman, Stress-intensity factors for internal and external surface cracks in cylindrical vessels, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 104, No. 4, pp. 293-298, 1982.

[3] A. Liu, *ASM Handbook Fatigue and Fracture,* Rockwell International Science Center, Vol. 19, pp. 980-1000, 1996.

[4] S. L. Lee, J. B. Ju, W. S. Kim, D. Kwon, Weld crack assessments in API X65 pipeline: failure assessment diagrams with variations in representative mechanical properties, *Materials Science and Engineering*, Vol. 373, No. 1, pp. 122–130, 2004.

[5] J. A. Alvarez, F. G. Solana, R. Lacalle, S. Cicero, Enviromental effects on Pipeline Steels: A Fitness for Service Perspective, *ETS Ingenieros de Caminos*, spain. 2006.

[6] G. Pluvinage, J. Capelle, C. Schmitt, and M. Mouwakeh, Domain failure assessment diagrams for defect assessment of gas pipes, *19th European Conference on Fracture*, Kazan, Russia, 2012.

[7] M. Kymyabakhsh, *Experimental and Numerical Determination of Fracture Toughness in Iran Gas Transportation Pipeline of Grade APIX65*, M.Sc Dissertation, Departement of Mechanical Engineering, University of Birjand, 2011. (In Persian)

[8] R. A. Ainsworth, The assessment of defects in structures of strain hardening material, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, No. 4, pp. 633–642, 1984.

[9] T. L. Anderson, D. A. Osage, Press, API 579: a comprehensive fitness-for-service guide, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 77, No. 14, pp. 953–963, 2000.

[10] API 579, *Recommended Practice for Fitness for Service*, American Petroleum Institute, 2000.

[11] BS7910, *Guide and Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures,* British Standards Institution, 1999.

[12] R-6, *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects,* British Energy, R/H/R-6 Revision 3, 1998.

[13] M. Rezaeeyekta, *Computer Simulation of Notched API X65 Steel Specimen Using Gurson's Theory*, M.Sc Dissertation, Departement of Mechanical Engineering, University of Birjand, 2010. (In Persian)

[14] S. I. Shahraini, *Study of Safety of Gas Transmission Steel Pipe with Axial Crack based on Failure Assessment Diagrams*, MSc. Dissertation, Departement of Mechanical Engineering, University of Birjand, 2013, (In Persian).

[15] BS EN ISO 7448, *Metallic Materials Determination of Plan-Strain Fracture Toughness,* British Standard Institution, 1999.