ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

تعیین تجربی چقرمگی شکست فولاد پایه و درزجوش مستقیم لوله انتقال گاز با گرید API X65 به روش نرمی باربرداری

 3 و جدد اصغری¹، نقدعلی چو یانی²، مهدی جندفی

1 - دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

*تېريز، سهند، صندوق پستى 1996 - 1935 sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

| ارزیابیهایی که در مورد استحکام خطوط لوله انجام میشوند، نقش مهمی در طراحی و بهرهبرداری ایمن از این سازهها دارند. امروزه خطوط لوله | مقاله پژوهشی کامل |
|--|-----------------------------|
| انتقال گاند. معرف فشارهای داخل زیاد تا 15 MPa در محیطهای با دماهای باین هستند. بدخوردای از استحکام و حقیقگ بالا | دريافت: 27 تير 1395 |
| استان در در سارس مسارسای با سی رید و ۲۰۱۰ در سایت این و مسالی پایین مسلسه، بر جزاری از مسافعه و برای به | پذيرش: 29 مهر 1395 |
| فولادهای مورد استفاده در خطوط لوله امری ضروری است. در این تحقیق، چقرمگی با معیار K _{IC} برای بدنه و درزجوش لوله API X65 که | ارائه در سایت: 18 آبان 1395 |
| | کلید واژگان: |
| چقرمگی با استفاده از نمونههای آزمایش از نوع کششی فشرده با شیارهای جانبی و دارای ترکهای خستگی انجام شدند. این نمونهها با استفاده | خطوط لوله انتقال گاز طبیعی |
| از قطعههای جدا شده از بدنه لوله API X65 ساخته شدند. پس از ساخت نمونههای نهایی، آزمایشهای تجربی تکنمونهای جهت استخراج | فولاد API X65 |
| منحنیهای مقاومت در برابر رشد ترک با استفاده از روش نرمی باربرداری انجام شدند. پس از انجام آزمایشها و محاسبات لازم، مقادیر عددی | چقرمگی شکست |
| یرای بدنه لوله و درزجوش بهترتیب برابر MPam ^{0.5} و 262 MPam ^{0.5} تعیین شدند. این نتایج می توانند به عنوان یک منبع K _{IC} | درزجوش مستقيم |
| | روش نرمی باربرداری |
| اطلاعاتی جهت ارزیابی و مقایسه مقاومت در برابر رشد ترک برای بدنه و درزجوش و نیز تعیین مقادیر بحرانی طول ترک های موجود در خطوط | |
| لوله انتقال گاز بکار روند. | |
| | |

Experimental determination of fracture toughness of base steel and longitudinal seam weld in API X65 gas line-pipe using unloading compliance method

Vahid Asghari, Naghdali Choupani^{*}, Mahdi Hanifi

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran *P.O.B. 51335-1996 Sahand, Tabriz, Iran, choupani@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

ABSTRACT

Original Research Paper Received 17 July 2016 Accepted 20 October 2016 Available Online 08 November 2016

Keywords: Natural Gas Transmission Pipelines API X65 steel Fracture Toughness Longitudinal Seam Weld Unloading Compliance Method

Structural-integrity assessments of pipelines play a key role in the design and safe operation of pipeline systems. Gas pipelines currently experience internal transmission pressures up to 15 MPa in low ambient temperatures. Combination of high strength and good toughness is essential for the steels and welded joints used in pipelines. In this study, the K_{IC} toughness has been determined for base metal and seam weld of a pipe of grade API X65, following the ASTM E1820 standard. The API X65 steel is the most commonly used pipe material in Iran high-pressure gas transportation pipelines. The fracture toughness tests employed side-grooved and fatigue pre-cracked compact tension specimens, extracted from the original pipe, to determine the crack growth resistance curves based on the unloading compliance method using the single specimen technique. From these, $K_{\rm IC}$ values of 302 MPam^{0.5} and 262 MPam^{0.5} were obtained for base metal and seam weld, respectively. These results produce toughness data which serve to evaluate and compare crack growth resistance of base metal and seam weld metal and to determine the critical sizes of acceptable cracks in pipelines.

1- مقدمه

باعث ایجاد ترک خوردگی در خطوط لوله می شوند. ترکها در اثر تنشهای موجود رشد می کنند و منجر به شکست می شوند. بدیهی است لولههای مورد استفاده در خطوط لوله انتقال گاز باید از چقرمگی شکست کافی برخوردار باشند تا بتوانند در برابر رشد ترکها از خود مقاومت لازم را نشان بدهند. تحقيقات براي بررسي شكست خطوط لوله بعد از سال 1950 ميلادي آغاز

انتقال گاز طبیعی از محل تولید به محل مصرف با استفاده از خطوط لوله انجام میشود. عبور گاز با فشار زیاد و عواملی مانند زلزله یا تکانهای زمین موجب ایجاد تنشهای مختلف در این خطوط میشوند. از طرفی عواملی مانند برخورد اجسام مختلف، خوردگی، عیوب موجود در بدنه لوله و جوشها

Please cite this article using: V. Asghari, N. Choupani, M. Hanifi, Experimental determination of fracture toughness of base steel and longitudinal seam weld in API X65 gas line-pipe using unloading compliance method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 284-290, 2016 (in Persian)

شد. در آن زمان بیشتر لولههای مورد استفاده ترد و فاقد چقرمگی لازم بودند. پس از مشاهده چندین مورد شکست ترد، انجام آزمایش ضربه شارپی برای بررسی چقرمگی خطوط لوله در صنعت نفت و گاز رایج شد [1]. مهمترین مزیت آزمایش شارپی سادگی ساخت نمونه و انجام آزمایش است. اما نتایج این آزمایش به دلیل عدم وجود ترک در نمونه آزمایش و ناگهانی بودن بار وارد بر آن، نمی تواند چقرمگی شکست مواد نرم را با دقت کافی پیشبینی کند. به همین دلیل معیارهای دیگر چقرمگی مانند $K_{
m IC}$ مورد توجه قرار گرفتند [2]. با استفاده از مقدار $K_{\rm IC}$ و اندازه گیری طول ترک موجود در جسم، مىتوان مقدار تنش قابل تحمل آن را تعيين نمود. بنابراين اين معيار چقرمگی امروزه کاربرد وسیعی در طراحی و ارزیابی مقاومت مواد در برابر رشد ترک و شکست پیدا کرده است [3]. برای تعیین $K_{\rm IC}$ مواد دو روش مستقيم و غيرمستقيم وجود دارد. روش مستقيم با استفاده از استاندارد ASTM E399 انجام می شود. در این روش ضخامت نمونه آزمایش باید به حد کافی زیاد باشد تا شرط برقراری وضعیت کرنش صفحهای موجود در استاندارد برقرار باشد. به دلیل ضخامت محدود لولههای مورد استفاده در انتقال گاز، تعیین مستقیم K_{IC} در آنها ممکن نیست [4]. بنابراین برای تعیین چقرمگی این سازهها از روشهای غیرمستقیم استفاده می شود. یعنی ابتدا چقرمگی بر اساس یک معیار دیگر مانند J_{IC} را تعیین میکنند، سپس با استفاده از رابطه موجود بین $J_{\rm IC}$ و $K_{
m IC}$ مقدار $K_{
m IC}$ را محاسبه می کنند. استاندارد ASTM E1820 [5] برای تعیین مقدار J_{IC} دو روش چندنمونهای و تکنمونهای را پیشنهاد کرده است. در روش چندنمونهای، چندین نمونه آزمایش از ماده مورد بررسی ساخته و آزمایش می شود. این روش ماده اولیه زياد و هزينه بالايي لازم دارد. به منظور صرفهجويي در هزينهها و مواد اوليه از روش تکنمونه ای استفاده می شود و فقط با یک نمونه آزمایش، $J_{
m IC}$ ماده تعیین میشود. در این روش لازم است مقدار رشد طول ترک در حین آزمایش مشخص شود. یکی از پرکاربردترین شیوههای تعیین طول ترک در مراحل مختلف آزمایش، روش نرمی باربرداری¹ است. در این روش در حین آزمایش و در فاصلههای منظمی، مقداری از نیروی اعمالی به نمونه آزمایش کاسته می شود و با استفاده از نمودار نیرو – جابجایی، مقدار نرمی که بصورت نسبت تغییرات جابجایی در راستای نیرو به تغییرات نیرو تعریف می شود، محاسبه می شود. سپس با استفاده از رابطه موجود بین نرمی و طول ترک، مقدار رشد ترک در مراحل مختلف آزمایش محاسبه می شود [6].

ورقهای فولادهای مورد استفاده در ساخت لولههای انتقال گاز از گروه فولادهای کمآلیاژ پراستحکام² هستند. استحکام بالا، قابلیت جوش پذیری مناسب، چقرمگی ضربه بالا و دمای انتقال شکست نرم به ترد پایین از ویژگیهای اصلی این نوع فولادها است. برای ساخت این فولادها از روش نورد کنترل شده ترمومکانیکی³ استفاده میشود. این روش شامل سه مرحله بازگرم، نورد کنترل شده و سرد کردن سریع است. سرد کردن سریع پس از نورد کنترل شده منجر به تولید ریزساختار ریزدانهای با فاز غالب فریت سوزنی⁴ میشود. این نوع ریزساختار نقش مهمی در استحکام و چقرمگی بالای فولاد دارد [7]. برای ساخت لوله با درزجوش مستقیم، ورق فولادی با طولی برابر طول لوله و عرضی برابر محیط لوله تهیه میشود. لبههای ورق در راستای طولی پخ زده میشود و سپس ورق با دستگاههای مخصوص به روش

دستگاه مخصوص اتوماتیک از داخل و خارج لوله جوشکاری می شود. شکل دهی ورق به هندسه استوانه موجب بوجود آمدن کرنش های پلاستیک و تغییر خواص مکانیکی ماده می شود [8].

در تحقیق حاضر، چقرمگی با معیار $K_{\rm IC}$ برای بدنه و درزجوش⁶ لوله فولادی API X65 با درزجوش مستقیم مورد استفاده در انتقال گاز ایران، با روش تکنمونهای و استفاده از شیوه نرمی باربرداری جهت اندازهگیری طول ترک تعیین شده است تا میزان مقاومت این دو قسمت در برابر رشد ترک API X65 مو مقایسه شود. بررسیهای انجام شده نشان می دهند لوله ASI X65 در قسمت بدنه دارای ریزساختاری ریزدانه و متشکل از فریت بینیتی⁶ سوزنی شکل و در قسمت درزجوش بعلت ذوب و انجماد مجدد ماده جوش دارای ریزساختاری درشتدانه با ترکیبی از فریت سوزنی شکل و فریتهای پروتکتوئید⁷ و ویدمناستان⁸ است [9].

2- معرفي مواد

همان طور که در شکل 1 مشاهده می شود، بدنه لوله، درزجوش و جوش محیطی⁹ سه قسمت تشکیل دهنده یک خط لوله هستند. از درزجوش در کارخانه لوله سازی برای شکل دهی ورق به هندسه استوانه و از جوش محیطی در محل ساخت خط لوله جهت اتصال لوله های مجاور به همدیگر استفاده می شود. مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق، بدنه و درزجوش لوله فولادی می شود. کار X65 میلی متر) و ضخامت جداره 22 میلی متر است. دلیل انتخاب این لوله فولادی، کاربرد گسترده آن در ساخت خطوط است. لوله انتقال گاز ایران است. لوله انتقال گاز ایران است. لوله مورد استفاده و ارداتی و ساخت کشور ژاپن است.

در اولین گام با استفاده از برش با شعله هوا – گاز، قطعههایی از بدنه و درزجوش لوله جهت انجام تحقیق جدا شدند. با توجه به تغییر خواص ماده در اثر گرمای ناشی از شعله برش دهنده، لبههای قطعههای جدا شده از لوله با ماشین کاری حدف شدند. در شکل 2 یک قطعه جدا شده از لوله جهت ساخت نمونه درزجوش، نشان داده شده است. در ادامه ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل دهنده و درصد وزنی آنها مطابق جدول شماره 1 با روش کوانتومتری تعیین شد. در این جدول مقادیر بیشینه مجاز عناصر تشکیل دهنده مطابق استاندارد API [8] نیز نشان داده شده است.

3- تعیین خواص مکانیکی ماده مورد مطالعه

نمونههای آزمایش کشش، جهت تعیین استحکام تسلیم و نهایی بدنه لوله و درزجوش مطابق استاندارد ASTM E8 [01] ساخته شدند. در شکل3 مشخصات هندسی این نمونهها و در شکل 4 تصویر دو عدد از نمونههای ساخته شده نشان داده شده است. بر طبق استاندارد، ضخامت نمونه آزمایش کشش باید برابر ضخامت ماده در کاربرد خاص خود (22 میلی متر در تحقیق حاضر) باشد [10]. به همین دلیل جهت رفع انحنای قطعات مورد استفاده برای ساخت نمونه آزمایش کشش، قطعات با پرس تبدیل به نمونههای تخت شدند. مطابق استاندارد JAP [8] تغییر شکل پلاستیک ناشی از پرس در ساخت نمونه آزمایش کشش قابل صرفنظر کردن است. البته با توجه به قطر زیاد و انحنای کم لوله مورد بررسی، میزان تغییر شکل پلاستیک ناشی از پرس در این تحقیق ناچیز است. مطابق استاندارد، ماده جوش در وسط نمونه

¹ Unloading compliance method

² High strength low alloy steels ³ Thermo-mechanical controlled rolling (TMCR)

⁴ Acicular ferrite

⁵ Seam weld

⁶ Bainitic 7 Proeutectoid

⁸ Widmanstatten

⁹ Girth weld

عرضی آزمایش کشش قرار داده می شود و برجستگی سطح جوش با ماشین کاری برداشته می شود به طوریکه سطح نمونه صاف و تخت باشد [10]. پس از ساخت نمونه ها، آزمایش های کشش با نرخ بارگذاری 3 میلی متر بر دقیقه انجام شدند. در جدول 2 نتایج آزمایش های کشش و مقادیر بیشینه و کمینه مجاز تعیین شده توسط استاندارد API 5L برای استحکام تسلیم و نهایی لوله API X65 نشان داده شده است.

4- آزمایش های تعیین K_{IC}

با توجه به ضخامت محدود لوله مورد بررسی و پیشبینی عدم امکان تعیین چقرمگی با روش مستقیم، آزمایشهای چقرمگی با روش غیرمستقیم و مطابق با استاندارد ASTM E1820 [5] انجام شدند. شکل 5 تصویر یکی از نمونههای آزمایش ماشین کاری شده را نشان میدهد. این نوع نمونه آزمایش تعیین چقرمگی بهدلیل کوچک بودن و کششی بودن نیروی وارده بر آن نمونه کششی فشرده¹ نام دارد. نمونهها با ضخامت (*B*) و پهنای (*W*) بهترتیب 20 و 40 میلیمتر ساخته شدند. با توجه به این که تنش حلقوی ناشی از عبور گاز با فشار زیاد، منجر به بارگذاری مد اول (خطرناکترین مد بارگذاری) در ترکهای طولی بدنه و درزجوش میشود و در نتیجه، شکست بدنه لوله و درزجوش در راستای طولی لولهها اتفاق میافتد، باید جهتهای نمونههای آزمایش به گونهای باشد که تنشهای وارد بر آنها در حین انجام آزمایش همراستا با تنش حلقوی خطوط لوله باشند [11، 12].

به همین دلیل جهتهای نمونههای آزمایش کشش و چقرمگی مطابق شکل 6 انتخاب شدند. مطابق این شکل، بارگذاری در راستای عرضی² انجام میشود و ترک در راستای طولی³ لوله رشد میکند. چنین انتخاب جهتی



Fig. 1 Photograph of a gas pipeline شکل 1 تصویری از یک خط لوله انتقال گاز



Fig. 2 Photograph of a seam weld sample cut from API X65 pipe API X65 شكل 2 تصويرى از نمونه درزجوش جدا شده از لوله

¹ Compact tension (CT)

³ Longitudinal direction

جدول 1 ترکیب شیمیایی بدنه و درزجوش و مقادیر بیشینه مجاز برای فولاد X65 مطابق استاندارد API 5L

Table 1 Chemical composition of base metal, seam weld and maximum values (wt%) for X65 steel specified by API 5L $\,$

| بيشينه مجاز | درصد وزنى | درصد وزنى | |
|-------------|-----------|--------------|------------|
| درصد وزنى | در درزجوش | در بدنه لوله | عنصر |
| | 97.872 | 97.764 | آهن |
| 0.12 | 0.084 | 0.102 | كربن |
| 1.6 | 1.38 | 1.6 | منگنز |
| 0.025 | 0.001 | 0.007 | فسفر |
| 0.015 | 0.005 | 0.004 | سولفور |
| 0.45 | 0.259 | 0.279 | سيليكون |
| | 0.013 | 0.027 | تيتانيوم |
| | 0.018 | 0.034 | نيوبيوم |
| | 0.005 | 0.004 | واناديوم |
| | 0.201 | 0.003 | موليبدنيوم |
| | 0.046 | 0.05 | كروم |
| | 0.031 | 0.032 | نيكل |
| | 0.025 | 0.016 | مس |
| | 0.024 | 0.043 | آلومينيم |



Fig. 3 Geometry and dimensions (in mm) of tensile specimens شکل 3 مشخصات هندسی و ابعاد (بر حسب میلیمتر) نمونه آزمایش کشش



Fig. 4 Photograph of tensile test specimens

شکل 4 تصویر نمونههای آزمایش کشش

| مهای استاندارد API 5L برای فولاد | شده و الزاه | مکانیکی اندازہ گیری | ى 2 خواص | جدول |
|----------------------------------|-------------|---------------------|----------|------|
| | | | | X65 |

| Table 2 Measured mechanical | properties and API 5 | L requirements for |
|-----------------------------|----------------------|--------------------|
| X65 steel | | |

| تنش نهایی (MPa) | تنش تسليم (MPa) | API X65 |
|--------------------|--------------------|-------------|
| 595 | 510 | بدنه لوله |
| 615 | 530 | درزجوش |
| 535 | 450 | كمينه مجاز |
| 760 | 600 | بيشينه مجاز |

مطابق استاندارد API 5L بصورت L–T نشان داده می شود. پس از ساخت نمونههای اولیه، ترکی در امتداد شیار موجود در آنها با پدیده خستگی ایجاد شد. برای تمام نمونهها فرکانس بارگذاری و مقادیر کمینه و بیشینه نیروی متناوب اعمالی بترتیب برابر 10 هرتز، 1 کیلونیوتن و 10 کیلونیوتن انتخاب شد. در آخرین مرحله ساخت نمونهها، برای برقراری وضعیت کرنش صفحهای

² Transverse direction

و انتشار ترک در مسیر مستقیم، شیارهای جانبی¹ در راستای رشد ترک ایجاد شدند. ضخامت نمونهها در محل شيار مطابق توصيه استاندارد، 0.8 برابر ضخامت اولیه نمونهها (16 میلیمتر) انتخاب شد. آزمایشهای تعیین K_{IC} با روش تکنمونهای و استفاده از شیوه نرمی باربرداری جهت تخمین طول ترک در مراحل مختلف رشد آن با استفاده از دستگاه سنتام مدل STM – 150 با ظرفیت 15 تن و نرخ بارگذاری 3 میلیمتر بر دقیقه انجام شدند. برای اندازه گیری مقدار جابجایی دهانه ترک²، از یک کلیپ گیج³ با محدوده اندازه گیری 1- الی 4 میلیمتر و دقت 0.001 میلیمتر استفاده شد. در شکل 7 تصویر دستگاه آزمایش، قید و بند ساخته شده و کلیپگیج مشاهده میشود. نمونه آزمایش بدلیل آنکه بطور کامل در داخل قید و بند قرار گرفته است در این شکل بطور واضح دیده نمی شود. در شکل 8 نمودارهای نیرو- جابجایی بدست آمده برای بدنه و درزجوش نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، فرایند بارگذاری - باربرداری برای هر کدام از نمونهها 15 مرتبه تکرار شده و مقدار باربرداری در هر سیکل 24% الی 28% نیروی بیشینه آن سیکل است. بر طبق استاندارد مقدار باربرداری نباید از 50% نیروی بیشینه هر سیکل بیشتر باشد [5].

برای انجام محاسبات لازم جهت تعیین چقرمگی با استفاده از دادههای نمودار نيرو – جابجايي، نياز است ابتدا طول اوليه ترک (a₀) تعيين شود. اين طول برابر مجموع طول شیار ماشین کاری شده (18 میلیمتر در تحقیق حاضر) و طول ناحیه خستگی است. بعد از انجام آزمایش، جهت دسترسی به سطوح شکست بمنظور اندازه گیری طول اولیه ترک، نمونهها پس از نگهداری به مدت زمان کافی در داخل نیتروژن مایع، بلافاصله با اعمال نیروی کافی در دستگاه کشش بصورت ترد شکسته شدند. برای محاسبه طول اولیه ترک از سطوح شکست نمونهها عکس با کیفیت بالا تهیه می شود. عکسهای تهیه شده در یکی از نرمافزارهای تحلیل تصویر بررسی میشوند. بر طبق استاندارد، طول اولیه مربوط به رشد پایدار ترک از انتهای سطح صاف و هموار ایجاد شده در اثر خستگی اندازه گیری می شود. بدین منظور نه نقطه با فاصلههای مساوی در راستای ضخامت نمونه انتخاب می شوند. میانگین طول دو نقطه نزديك به سطوح جانبى نمونه و ميانگين طول هفت نقطه باقى مانده محاسبه می شود. میانگین دو عدد محاسبه شده برابر طول اولیه ترک فرض می شود. مطابق استاندارد، طول ناحیه خستگی باید از مقادیر 1.3 میلیمتر و 0.05B (یک میلیمتر در تحقیق حاضر) بیشتر باشد و طول اولیه ترک باید عددی بين 0.45W و 0.7W (18 و 28 ميلي متر در تحقيق حاضر) باشد [5]. سطح خستگی و شکست یکی از نمونهها در شکل 9 نشان داده شده است.

با بررسی نمونهها پس از انجام آزمایشها اثری از لایه لایه شدن ماده مشاهده نشد. پس از اندازه گیریها و انجام محاسبات، طول ناحیه خستگی و طول اولیه ترک برای نمونه بدنه بهترتیب 1.7 و 19.7 میلیمتر و برای نمونه درزجوش 2.1 و 20.1 میلیمتر محاسبه شدند. در مرحله بعدی مقادیر نرمی برای هر پانزده سیکل بار گذاری – باربرداری با استفاده از رابطه (1) تعیین شدند.

$$C_i = \left(\frac{\Delta V}{\Delta P}\right)_i \tag{1}$$

در رابطه (1)، ΔV و ΔP به ترتیب مقادیر افزایش جابجایی و افزایش نیرو در هر سیکل هستند. به دلیل اینکه راستای نیروی وارد بر نمونه آزمایش از مرکز ثقل آن عبور نمیکند، نمونه در حین آزمایش دوران میکند. این

¹ Side grooves



Fig. 5 Photograph of a machined CT specimen شکل 5 تصویر یک نمونه ماشین کاری شده CT



Seam weld Fig. 6 Orientation of tests specimens in the research شکل 6 جهتهای نمونه های آزمایش تحقیق حاضر



Fig. 7 Photograph of unloading compliance test equipment شکل 7 تصویر تجهیزات آزمایش نرمی باربرداری

دوران باعث بوجود آمدن خطا در مقادیر نرمی محاسبه شده می شود. برای رفع این خطا، مقادیر نرمی محاسبه شده با رابطه (1) را با استفاده از رابطه-های (A2.14) و (A2.15) استاندارد ASTM E1820 [5] اصلاح می کنند. پس از اصلاح مقادیر نرمی، پارامتر _iu با استفاده از رابطه (2) برای هر سیکل تعیین شد.

$$u_i = \frac{1}{\left(\mathcal{B}_e E C c_i\right)^{\frac{1}{2}} + 1} \tag{2}$$

² Crack mouth opening displacement (CMOD)

³ Clip gage

در رابطه (2)، E مدول یانگ برابر GPa Cc_i ، 210 GPa مقدار اصلاح شده نرمی در هر سیکل و B_e ضخامت مؤثر¹ است. ضخامت مؤثر در نمونههای آزمایشی که دارای شیارهای جانبی هستند با استفاده از رابطه (3) محاسبه می شود.

$$B_{\rm e} = B - \frac{(B - B_N)^2}{B} \tag{3}$$

در رابطه (3)، $B_{\rm N}$ و $R_{\rm N}$ به ترتیب ضخامت اولیه و ضخامت کاهش یافته نمونه آزمایش بعد از ایجاد شیارهای جانبی هستند. بعد از جاگذاری مقادیر فوق مقدار ضخامت مؤثر برابر 19.2 میلیمتر تعیین می شود. پس از محاسبه متغیر u_i طول ترک در هر سیکل با استفاده از رابطه (4) تعیین شد.

$$\frac{a_i}{W} = 1.000196 - 4.06319u_i + 11.242u_i^2 - 106.043u_i^3 + 464.335u_i^4 - 650.677u_i^5$$
(4)

در ادامه، مقادیر رشد ترک نسبت به طول اولیه در هر سیکل با رابطه (5) محاسبه شدند.

(5)
$$(Aa)_i = a_i - a_0$$
 (5) برای محاسبه مقادیر انتگرال J_i در هر سیکل، ابتدا ضریب شدت تنش

(K_i) و قسمت پلاستیک انتگرال *J (J_{pli}) ب*ا استفاده از روابط (7,6) تعیین شدند.

$$K_{i} = \frac{P_{i}}{(BB_{N}W)^{\frac{1}{2}}} f\left(\frac{a_{i}}{W}\right)$$
(6)

$$J_{pli} = \left[J_{pl(i-1)} + \frac{\eta_{i-1}}{B_{N}b_{i-1}} A_{pl}^{i-1,i} \right] \left(1 - \frac{\gamma_{i-1}}{b_{i-1}} \left(a_{i} - a_{i-1} \right) \right)$$
(7)

در رابطههای (7,6) و $P_l^{i-1,r}$ به ترتیب مقدار نیروی بیشینه هر سیکل و مقدار افزایش مساحت ناحیه پلاستیک در زیر نمودار نیرو-جابجایی بین مرحلههای 1– i و i هستند. $\left(\frac{a_p}{w}\right)$ ، $f\left(\frac{a_p}{w}\right)$ مرحلههای 1– i



شکل 8 منحنی تغییرات نیرو – جابجایی در راستای نیرو



Fig. 9 Fatigue and fracture surface of CT specimen شکل 9 سطح خستگی و شکست نمونه آزمایش CT

هستند که مقادیر آنها با استفاده از رابطههای (A2.3) و (A2.4) در استاندارد (A2.3 آنها با استاندارد مقدار انتگرال استاندارد مقدار انتگرال *J* برای هر سیکل تعیین می شوند. مقدار انتگرال *J* برای هر سیکل از رابطه (8) محاسبه می شود.

$$J_{i} = \frac{K_{i}^{2}}{E} \left(1 - v^{2}\right) + J_{pli}$$
(8)

در رابطه (8)، v ضریب پواسون و برابر 0.3 است. در جدول های 3 و 4 مقادیر محاسبه شده نرمی اصلاح شده، رشد ترک، ضریب شدت تنش، قسمت پلاستیک انتگرال I و مقدار کل انتگرال J برای بدنه و درزجوش لوله نشان داده شده است.

برای رسم نمودار $J-\Delta a$ همانdو که در شکلهای 10 و 11 دیده می شود، ابتدا خطی گذرنده از مبدا مختصات با معادله $J = 2\sigma_{
m Y}\,\Delta a$ و با نام خط احداث 2 رسم می شود. در این معادله، $\sigma_{
m Y}$ استحکام تسلیم مؤثر $^{
m c}$ نام دارد و مقدار آن برابر میانگین استحکامهای تسلیم و نهایی است. با استفاده از دادههای جدول 2 مقدار $\sigma_{
m Y}$ برای بدنه لوله 552.5 مگاپاسکال و برای درزجوش 572.5 مگایاسکال محاسبه می شود. در ادامه، دو خط موازی با خط احداث از نقاط 0.15 و 1.5 روى محور افقى رسم مىشوند. اين دو خط، خطوط منع⁴ نام دارند. سپس نقاطی که با استفاده از رابطههای (8,5) برای مقادیر رشد ترک و انتگرال J محاسبه شدهاند، در صفحه مختصات وارد مى شوند. مطابق استاندارد فقط نقاطى كه بين خطوط منع قرار دارند، نقاط معتبر محسوب می شوند. این نقاط در شکل های 10 و 11 بصورت تویر نشان داده شدهاند. با استفاده از نقاط توپر یک منحنی توانی برازش میشود. معادله منحنی برازش شده در این تحقیق برای بدنه لوله، $J = 497.7 \; (\Delta a)^{0.394}$ و 0.2 برای درزجوش $J = 420.6 (\Delta a)^{0.444}$ است. در آخرین مرحله، از نقطه J = 420.6روی محور افقی خطی موازی با خط احداث با نام خط آفست 0.2 میلیمتر⁵ رسم می شود. مقدار J نقطه برخورد این خط با منحنی برازش شده برابر چقرمگی مشروط $(J_{
m Q})$ است. $J_{
m Q}$ در این تحقیق برای بدنه لوله $^{-2}$ 395 kJm و برای درزجوش $298~{
m kJm^{-2}}$ محاسبه شده است. اگر نامساوی رابطه (9) برقرار باشد، $J_{
m Q}$ برابر $J_{
m IC}$ فرض خواهد شد. رابطه (9) شرط برقراری کرنش $J_{
m C}$ صفحهای در استاندارد ASTM E1820 است. L

$$B > 10 \frac{\sigma_Q}{\sigma_V}$$

ضخامت نمونه آزمایش (B) در این تحقیق 20 میلیمتر است. طرف راست نامساوی نیز با جاگذاری مقادیر عددی بدست آمده برای بدنه لوله 7.149 میلیمتر و برای درزجوش 5.205 میلی متر محاسبه میشود. بنابراین نامساوی رابطه (P) برای بدنه و درزجوش برقرار است و مقادیر $J_{\rm C}$ را میتوان برابر $J_{\rm IC}$ در نظر گرفت. برای تعیین $K_{\rm IC}$ از رابطه (10) استفاده میشود. نتایچ بدست آمده برای مقادیر چقرمگی در جدول 5 نشان داده شده است.

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{J_{IC} E}{\left(1 - v^2\right)}} \tag{10}$$

5- بحث و نتیجه گیری

(9)

عملیات انجام شده درمراحل مختلف ساخت لوله موجب میشود خواص مکانیکی لوله از خواص مکانیکی ورق مورد استفاده برای ساخت آن متفاوت باشد. به همین دلیل در تحقیقات انجام شده برای بررسی چقرمگی لولهها نمونههای آزمایشها با برش دادن قسمتی از بدنه لوله تهیه میشوند. به

¹ Effective thickness

² Construction line

³ Effective yield strength ⁴ Exclusion lines

⁵ 0.2 mm offset line



شکل 11 داده های تجربی J– Δa برای درزجوش

جدول 5 مقادیر تعیین شده برای چقرمگی بدنه و درزجوش لوله API X65 Table 5 Determined fracture toughness values for base metal and seam of API X65 pipe

| $K_{\rm IC}$ (MPam ^{0.5}) | $J_{\rm IC}$ (kJm ⁻²) | مادہ |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 302 | 395 | بدنه لوله |
| 262 | 298 | درزجوش |

منظور تهیه نمونه آزمایش چقرمگی تخت از قطعه انحنادار جدا شده از بدنه لوله، لازم است با عملیات ماشینکاری قسمتی از ضخامت اولیه حذف شود. در نتیجه نمونههای آزمایشهای چقرمگی از ضخامت کمتری نسبت به ضخامت واقعی لولهها برخوردار هستند. میزان این اختلاف بستگی به مقدار قطر لوله و نوع و ابعاد نمونه آزمایش دارد. در تحقیق حاضر به دلیل قطر بزرگ و در نتیجه انحنای کم لوله مورد بررسی و کوچک بودن نمونههای آزمایش، فقط با دو میلی متر کفتراشی، از قطعههای انحنادار جدا شده از بدنه لوله با ضخامت 22 میلی متر، نمونههای آزمایش تخت با ضخامت 20 میلی متر ساخته شدند.

استفاده از نمونههای آزمایش با انواع یا ضخامتهای متفاوت، نرخهای بارگذاری نامساوی و نیز روشهای متفاوت تخمین طول ترک در حین آزمایش عواملی هستند که می وانند موجب اختلاف در نتایج تحقیقات مربوط به چقرمگی مواد شوند. یک ویژگی تحقیق حاضر استفاده از روش واحد و نمونههای آزمایش مشابه از نظر نوع و ابعاد نمونه برای تعیین چقرمگی بدنه و درزجوش لوله API X65 است. این موضوع سبب می شود مقاومت این دو قسمت در برابر رشد ترک و شکست مورد ارزیابی و مقایسه دقیق قرار گیرد. بر این اساس، مقادیر $K_{\rm IC}$ برای بدنه لوله ^{0.5} MPam و عالم فال توجه، اختلاف نسبتا برای درزجوش گین دو قسمت است. درزجوش در کارخانه لوله سازی با برای درزجوش این دو قسمت است. درزجوش در کارخانه اوله سازی با برای درزجوش دو تحت کنترل کیفیت و بازرسیهای سختگیرانه انجام می شود و سعی می شود از نظر خواص مکانیکی تا حد ممکن نزدیک به بدنه لوله باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، مشخص می شود که چقرمگی ماده درزجوش فقط 13% کمتر از چقرمگی بدنه لوله است.

ویژگی دیگر تحقیق حاضر، استفاده از روش نرمی باربرداری برای تخمین طول ترک در حین انجام آزمایش و اعمال نیرو به نمونه آزمایش است. روش نرمی باربرداری به دلیل مزیتهایی که نسبت به سایر روشهای تخمین طول ترک دارد، در متن استاندارد ASTM E1820 [5] به عنوان روش اصلی اندازه گیری طول ترک معرفی شده است. به دلیل دشواریهای انجام این روش، تاکنون تحقیقات اندکی در ایران از آن استفاده کردهاند. در تحقیق

جدول 3 نتایج آزمایش تعیین چقرمگی شکست بدنه لوله

| J_i (kJm ⁻²) J_{pii} (kJm ⁻²) K_i (MPam ^{0.5}) $(\Delta \alpha)_i$ (mm) $C_{Cl} \times 10^{-8}$ (mN ⁻¹) $m_{2} \times 10^{-8}$ (mN)111.361.9106.80.060.8887left152.786.6123.50.120.8959oeg197.6114.7138.30.190.9034oeg246.9145.6152.90.260.9123oeg297.5182.8162.70.360.9230oeg340.5218.6167.70.440.9321oeg382.1254.8171.40.540.9449oeg422.9288.9175.90.680.9066oeg $\omega \omega \alpha$ 320.8178.80.770.9734oeg $\omega \omega \alpha$ 348.6182.70.950.9966oeg $\omega \omega \alpha$ 373.8186.21.091.0124oeg $\omega \omega \omega$ $\omega \omega$ 1.301.0412oegoeg $\omega \omega \omega$ $\omega \omega$ 1.311.421.0581oeg $\omega \omega \omega$ $\omega \omega$ 1.93.11.611.0843oeg $\omega \omega \omega$ $\omega \omega$ 1.011.024oegoeg $\omega \omega \omega$ $\omega \omega$ 1.011.024oegoeg $\omega \omega \omega$ $\omega \omega \omega$ 1.301.0412oegoeg $\omega \omega \omega$ $\omega \omega \omega$ 1.321.0581oegoeg $\omega \omega \omega$ $\omega \omega \omega \omega$ 1.611.0843oegoeg $\omega \omega \omega$ $\omega \omega \omega \omega$ 1.611.024oegoeg </th <th colspan="6">Table 3 Fracture toughness test results for base metal</th> | Table 3 Fracture toughness test results for base metal | | | | | |
|--|---|--|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 111.361.9106.80.060.8887اول152.786.6123.50.120.8959موء197.6114.7138.30.190.9034موء246.9145.6152.90.260.9123موء297.5182.8162.70.360.9230موء340.5218.6167.70.440.9321مشم382.1254.8171.40.540.9449موء422.9288.9175.90.680.9606موء459.4320.8178.80.770.9734موء493.2348.6182.70.950.9966موء524.0373.8186.21.091.0124موازدهم545.9394.1190.31.301.0412موازدهم589.9430.6197.11.611.0843موازدهم589.9430.6197.11.611.0843موازدهم517.5442.4201.01.821.1129موازدهم | سيكل | $C_{Ci} \times 10^{-8}$ (mN ⁻¹) | $(\Delta a)_i$ (mm) | K_i (MPam ^{0.5}) | J_{pli} (kJm ⁻²) | J_i (kJm ⁻²) |
| 152.786.6123.50.120.8959دوم197.6114.7138.30.190.9034سوم246.9145.6152.90.260.9123مارام297.5182.8162.70.360.9230منجم340.5218.6167.70.440.9321مشم382.1254.8171.40.540.9449مارام422.9288.9175.90.680.9606مارام459.4320.8178.80.770.9734مورام524.0373.8186.21.091.0124مارام550.9394.1190.31.301.0412مارام574.5413.0193.11.421.0581مارام589.9430.6197.11.611.0843مهاردهم617.5442.4201.01.821.1129مارام50.9394.1105.11.611.0843مارام | اول | 0.8887 | 0.06 | 106.8 | 61.9 | 111.3 |
| 197.6114.7138.30.190.9034سوم246.9145.6152.90.260.9123چهارم297.5182.8162.70.360.9230پنجم340.5218.6167.70.440.9321شش382.1254.8171.40.540.9449پنجم422.9288.9175.90.680.9606پنجم459.4320.8178.80.770.9734پنجم524.0373.8186.21.091.0124پیازدهم550.9394.1190.31.301.0412پیازدهم574.5413.0193.11.421.0581پیازدهم589.9430.6197.11.611.0843پیازدهم617.5442.4201.01.821.1129پیازدهم | دوم | 0.8959 | 0.12 | 123.5 | 86.6 | 152.7 |
| 246.9145.6152.90.260.9123چهارم297.5182.8162.70.360.9230پنجم340.5218.6167.70.440.9321ششم382.1254.8171.40.540.9449هفتم422.9288.9175.90.680.9606هنتم459.4320.8178.80.770.9734هوذ493.2348.6182.70.950.9966همار524.0373.8186.21.091.0124همازهم550.9394.1190.31.301.0412سيزدهم574.5413.0193.11.421.0581مهرزهم589.9430.6197.11.611.0843چهاردهم617.5442.4201.01.821.1129پالزدهم | سوم | 0.9034 | 0.19 | 138.3 | 114.7 | 197.6 |
| 297.5182.8162.70.360.9230پنجم340.5218.6167.70.440.9321شش382.1254.8171.40.540.9449هفتم422.9288.9175.90.680.9606هثة459.4320.8178.80.770.9734هؤتم493.2348.6182.70.950.9966هه524.0373.8186.21.091.0124هازدهم550.9394.1190.31.301.0412هازدهم574.5413.0193.11.421.0581هازدهم589.9430.6197.11.611.0843چهاردهم617.5442.4201.01.821.1129هازده | چهارم | 0.9123 | 0.26 | 152.9 | 145.6 | 246.9 |
| 340.5218.6167.70.440.9321ششم382.1254.8171.40.540.9449مغتم422.9288.9175.90.680.9606هشتم459.4320.8178.80.770.9734هغ493.2348.6182.70.950.9966يادهم524.0373.8186.21.091.0124معاد المحاد550.9394.1190.31.301.0412ميزدهم574.5413.0193.11.421.0581ميزدهم589.9430.6197.11.611.0843پالزدهم617.5442.4201.01.821.1129پالزدهم | پنجم | 0.9230 | 0.36 | 162.7 | 182.8 | 297.5 |
| 382.1 254.8 171.4 0.54 0.9449 مفتم 422.9 288.9 175.9 0.68 0.9606 نهم 459.4 320.8 178.8 0.77 0.9734 نهم 493.2 348.6 182.7 0.95 0.9966 معمر 524.0 373.8 186.2 1.09 1.0124 مهاردهم 550.9 394.1 190.3 1.30 1.0412 معاردهم 574.5 413.0 193.1 1.42 1.0581 معاردهم 589.9 430.6 197.1 1.61 1.0843 مهاردهم 517.5 442.4 201.0 1.82 1.1129 مالزدهم | ششم | 0.9321 | 0.44 | 167.7 | 218.6 | 340.5 |
| 422.9288.9175.90.680.9606هشتم459.4320.8178.80.770.9734نهم493.2348.6182.70.950.9966دهم524.0373.8186.21.091.0124دوازدهم550.9394.1190.31.301.0412دوازدهم574.5413.0193.11.421.0581دوازدهم589.9430.6197.11.611.0843يانزدهم617.5442.4201.01.821.1129ياند | هفتم | 0.9449 | 0.54 | 171.4 | 254.8 | 382.1 |
| 459.4320.8178.80.770.9734نهم493.2348.6182.70.950.9966دهم524.0373.8186.21.091.0124مازدهم550.9394.1190.31.301.0412مازدهم574.5413.0193.11.421.0581ميزدهم589.9430.6197.11.611.0843چهاردهم617.5442.4201.01.821.1129يازدهم | هشتم | 0.9606 | 0.68 | 175.9 | 288.9 | 422.9 |
| 493.2348.6182.70.950.9966دهم524.0373.8186.21.091.0124مازدهم550.9394.1190.31.301.0412مازدهم574.5413.0193.11.421.0581ميزدهم589.9430.6197.11.611.0843چهاردهم617.5442.4201.01.821.1129مازلار ماریخ | مهن | 0.9734 | 0.77 | 178.8 | 320.8 | 459.4 |
| 524.0373.8186.21.091.0124يازدهم550.9394.1190.31.301.0412يازدهم574.5413.0193.11.421.0581يازدهم589.9430.6197.11.611.0843يازدهم617.5442.4201.01.821.1129يازدهم | دهم | 0.9966 | 0.95 | 182.7 | 348.6 | 493.2 |
| 550.9 394.1 190.3 1,30 1.0412 دوازدهم 574.5 413.0 193.1 1.42 1.0581 سيزدهم 589.9 430.6 197.1 1.61 1.0843 چهاردهم 617.5 442.4 201.0 1.82 1.1129 جهاردهم | يازدهم | 1.0124 | 1.09 | 186.2 | 373.8 | 524.0 |
| سيزدهم 193.1 1.42 1.0581 سيزدهم 589.9 430.6 197.1 1.61 1.0843 چهاردهم نازدهم 11.5 442.4 201.0 1.82 1.1129 | دوازدهم | 1.0412 | 1.30 | 190.3 | 394.1 | 550.9 |
| 589.9 430.6 197.1 1.61 1.0843 617.5 442.4 201.0 1.82 1.1129 | سيزدهم | 1.0581 | 1.42 | 193.1 | 413.0 | 574.5 |
| ىل <i>ى</i> انزدھم 617.5 442.4 201.0 1.82 1.1129 | چهاردهم | 1.0843 | 1.61 | 197.1 | 430.6 | 589.9 |
| | پانزدهم | 1.1129 | 1.82 | 201.0 | 442.4 | 617.5 |

جدول 4 نتایج آزمایش تعیین چقرمگی شکست درزجون

|] | Table 4 Fracture toughness test results for seam weld | | | | | | |
|---|---|-----------------------------------|-----------------------|---------------------|---|---------|--|
| | J_i (kJm ⁻²) | J_{pli} (kJm ⁻²) | $(\text{MPam}^{0.5})$ | $(\Delta a)_i$ (mm) | $C_{Ci} 	imes 10^{-8} \ ({ m mN}^{-1})$ | سيكل | |
| | 94.3 | 52.5 | 98.2 | 0.04 | 0.9321 | اول | |
| | 129.8 | 73.3 | 114.2 | 0.09 | 0.9389 | دوم | |
| | 167.8 | 96.7 | 128.1 | 0.16 | 0.9464 | سوم | |
| | 209.2 | 123.7 | 140.4 | 0.25 | 0.9576 | چهارم | |
| | 246.4 | 151.5 | 148.1 | 0.32 | 0.9661 | پنجم | |
| | 281.4 | 178.9 | 153.8 | 0.43 | 0.9815 | ششم | |
| | 314.1 | 206.1 | 157.9 | 0.57 | 0.9968 | هفتم | |
| | 348.0 | 236.1 | 160.7 | 0.65 | 1.0078 | هشتم | |
| | 381.1 | 266.1 | 162.9 | 0.76 | 1.0219 | نهم | |
| | 412.7 | 294.5 | 165.1 | 0.88 | 1.0368 | دهم | |
| | 440.0 | 318.7 | 167.3 | 1.02 | 1.0581 | يازدهم | |
| | 462.1 | 338.8 | 168.7 | 1.12 | 1.0702 | دوازدهم | |
| | 480.4 | 352.5 | 171.8 | 1.31 | 1.0986 | سيزدهم | |
| | 493.2 | 360.7 | 174.9 | 1.50 | 1.1276 | چهاردهم | |
| | 501.6 | 363.3 | 178.6 | 1.72 | 1.1598 | پانزدهم | |



شکل 10 داده های تجربی $J - \Delta a$ برای بدنه لوله

7- مراجع

- [1] M. A. Carbal, M. J. Kimber, Pipeline fracture experiences in Australia and
- north America, Pipeline fracture experience, version 3, pp. 1-21, 1997. J. B. Ju, W. S. Kim, J. I. Jang, Variations in DBTT and CTOD within weld [2] heat-affected zone of API X65 pipeline steel, Material Science and Engineering A, Vol. 546, No.1, pp. 258-262, 2012.
- [3] S. F. Medina, L. Rancel, M. Gomez, J. M. Amo, Prediction of K_{IC} in a high strength bainitic steel, Engineering Failure Analysis, Vol. 35, No.1, pp. 524-532, 2013.
- [4] A. A. Baron, The generalized diagram of fracture toughness for pipeline steels, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 98, No.1, pp. 26-29, 2012.
- [5] ASTM standaed: E1820-13, Standard test method for measurement of fracture toughness, American Society for Testing and Materials, 2013
- [6] X. Zhu, J. A. Joys, Review of fracture toughness (G, K ,J, CTOD, CTOA) testing and standardization, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 85, No. 1, pp. 1-46, 2012.
- [7] M. Nakhaei, S. H. Hashemi, Investigation of continuous cooling transformation behavior of API X70 gas and oil pipeline steel, *Modares* فارسى Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 133-140, 2015. (in Persian
- [8] API standard: 5L-44, Specifications for line pipe, American Petroleum Institute, 2012.
- [9] S. H. Hashemi, D. Mohammadyani, Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 98, No.1, pp. 8-15, 2012.
- [10] ASTM standard: E8/E8M-11, Standard test methods for tension testing of metallic materials, American Society for Testing and Materials, 2011.
- [11]J. S. Lee, J. B. Ju, J. I. Jang, W. S. Kim, D. Kwon, Weld crack assessment in API X65 pipeline: failure assessment diagrams with variations in representative mechanical properties, Materials Science and Engineering A, Vol. 373, No. 1, pp. 122-130, 2004.
- [12] Z. Z. Yang, W. Tian, Q. R. Ma, Y. L. Li, J. K. Li, J. Z. Gao, H. B. Zhang, Mechanical properties of longitudinal submerged arc weded steel pipes used for gas pipeline of offshore oil, Acta Metallurgica Sinica, Vol. 21, No. 2, pp. 85-93, 2008.
- [13] S. H. Hashemi, M. Kymyabakhsh, Experimental and numerical determination of fracture toughness in gas pipeline steel of grade API X65, Amirkabir University of Technology, Vol. 45, No. 2, pp. 1-9, 2013. (in (فارسی Persian
- [14] A. Farrahi, S. H. Hashemi, Experimental evaluation of fracture toughness in spiral seam weld of thermomechanical steel. Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 2, No. 4, pp. 25-35, 2012. (in Persian فارسى)

حاضر از این روش برای اولین بار در کشور در بررسی چقرمگی خطوط لوله انتقال گاز استفاده شده است.

نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر انطباق خوبی با نتایج تحقیقات مرتبط دارند. به عنوان نمونه، مرجع [11] مقادیر $K_{
m IC}$ را برای بدنه و درزجوش لوله API X65 بهترتيب برابر 300 MPam^{0.5} و API X65 تعيين كرده است. مقادیر $K_{\rm IC}$ محاسبه شده توسط مرجع [12] نیز برای بدنه و درزجوش همان لوله، بهترتيب 282 MPam^{0.5} و 250 MPam^{0.5} مىباشند. مراجع [11] و [12] در تحقیق خود مانند تحقیق حاضر از روش تکنمونهای برای تعیین $K_{
m IC}$ استفاده کردهاند. تفاوت موجود بین تحقیق آنها و تحقیق حاضر $K_{
m IC}$ در این است که آنها بجای $J_{\rm IC}$ یک معیار دیگر چقرمگی یعنی مقدار جابجایی بازشدگی نوک ترک 1 را محاسبه کردهاند و سیس برای تعیین $K_{\rm IC}$ از رابطه ریاضی موجود بین دو معیار فوق استفاده نمودهاند. همچنین نمونه آزمایش مورد استفاده در بررسیهای دو مرجع مورد اشاره، متفاوت از نمونه آزمایش تحقیق حاضر و از نوع خمشی با شیار واحد در لبه² بوده است. از بین مراجع داخلی، مرجع [13] مقدار *K*_{IC} بدنه لوله API X65 را برابر [13] 308 MPam تعیین کرده است. در تحقیقی دیگر، مقدار $K_{\rm IC}$ درزجوش این لوله توسط مرجع [14] برابر 265 MPam^{0.5} محاسبه شده است. مراجع [13] و [14] در تحقیق خود برخلاف تحقیق حاضر از روش چندنمونه ی و نمونه آزمایش خمشی با شیار واحد در لبه استفاده کردهاند. با وجود این تفاوتها، اختلاف در نتایج حاصله آنها با نتایج تحقیق حاضر نسبتا" کم است.

6- تقدير و تشكر

از منطقه هشت عملیات انتقال گاز شرکت ملی گاز ایران جهت در اخ گذاشتن لوله فولادی API X65 تشکر و قدردانی می شود.

¹ Crack tip opening displacement (CTOD) ² Single edge – notched bend (SENB)