



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

وحید اصغری¹، نقدعلی چوپانی^{2*}، مهدی حنیفی³

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

*تبریز، سهند، صندوق پستی 1395 - 51335 sut.ac.ir@choupani

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 تیر 1395

پذیرش: 29 مهر 1395

ارائه در سایت: 18 آبان 1395

کلید واژگان:

خطوط لوله انتقال گاز طبیعی

فولاد API X65

چقرمگی شکست

درزجوش مستقیم

روش نرمی باربرداری

چکیده

ارزیابی‌هایی که در مورد استحکام خطوط لوله انجام می‌شوند، نقش مهمی در طراحی و بهره‌برداری ایمن از این سازه‌ها دارند. امروزه خطوط لوله انتقال گاز در معرض فشارهای داخلی زیاد تا 15 MPa در محیط‌هایی با دماهای پایین هستند. برخورداری از استحکام و چقرمگی بالا برای 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 رایج‌ترین لوله مورد استفاده در خطوط لوله انتقال گاز ایران است، مطابق استاندارد ASTM E1820 تعیین شده است. آزمایش‌های تعیین چقرمگی با استفاده از نمونه‌های آزمایش از نوع کششی فشرده با شیارهای جانبی و دارای ترک‌های خستگی انجام شدند. این نمونه‌ها با استفاده از قطعه‌های جدا شده از بدنه لوله API X65 ساخته شدند. پس از ساخت نمونه‌های نهایی، آزمایش‌های تجربی تک‌نمونه‌ای جهت استخراج منحنی‌های مقاومت در برابر رشد ترک با استفاده از روش نرمی باربرداری انجام شدند. پس از انجام آزمایش‌ها و محاسبات لازم، مقادیر عددی K_{IC} برای بدنه لوله و درزجوش به ترتیب برابر $302 \text{ MPam}^{0.5}$ و $262 \text{ MPam}^{0.5}$ تعیین شدند. این نتایج می‌توانند به‌عنوان یک منبع اطلاعاتی جهت ارزیابی و مقایسه مقاومت در برابر رشد ترک برای بدنه و درزجوش و نیز تعیین مقادیر بحرانی طول ترک‌های 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

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

ABSTRACT

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_{IC} values of $302 \text{ MPam}^{0.5}$ and $262 \text{ MPam}^{0.5}$ 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 می‌شوند. ترک‌ها در اثر تنش‌های موجود رشد می‌کنند و منجر به شکست می‌شوند. 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. تحقیقات برای بررسی شکست خطوط لوله بعد از سال 1950 میلادی 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 شاریپی برای بررسی چقرمگی خطوط لوله در صنعت نفت و گاز رایج شد [1]. مهمترین مزیت آزمایش شاریپی 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، نمی‌تواند چقرمگی شکست مواد نرم را با دقت کافی پیش‌بینی کند. به همین دلیل معیارهای دیگر چقرمگی مانند K_{IC} مورد توجه قرار گرفتند [2]. با استفاده از مقدار K_{IC} و اندازه‌گیری طول ترک موجود در جسم، می‌توان مقدار تنش قابل تحمل آن را تعیین نمود. بنابراین این معیار چقرمگی امروزه کاربرد وسیعی در طراحی و ارزیابی مقاومت مواد در برابر رشد ترک و شکست پیدا کرده است [3]. برای تعیین K_{IC} مواد دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. روش مستقیم با استفاده از استاندارد ASTM E399 انجام می‌شود. 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 می‌شود. یعنی ابتدا چقرمگی بر اساس یک معیار دیگر مانند J_{IC} را تعیین می‌کنند، سپس با استفاده از رابطه موجود بین J_{IC} و K_{IC} مقدار K_{IC} را محاسبه می‌کنند.

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 می‌شود. این روش ماده اولیه زیاد و هزینه بالایی لازم دارد. به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها و مواد اولیه از روش تک‌نمونه‌ای استفاده می‌شود و فقط با یک نمونه آزمایش، J_{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 می‌شود و با استفاده از نمودار نیرو - جابجایی، مقدار نرمی که بصورت نسبت تغییرات جابجایی در راستای نیرو به تغییرات نیرو تعریف می‌شود، محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از رابطه موجود بین نرمی و طول ترک، مقدار رشد ترک در مراحل مختلف آزمایش محاسبه می‌شود [6].

2- معرفی مواد

همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، بدنه لوله، درزجوش و جوش محیطی⁹ سه قسمت تشکیل دهنده یک خط لوله هستند. از درزجوش در کارخانه لوله‌سازی برای شکل دهی ورق به هندسه استوانه و از جوش محیطی در محل ساخت خط لوله جهت اتصال لوله‌های مجاور به همدیگر استفاده می‌شود. مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق، بدنه و درزجوش لوله فولادی API X65 به قطر 48 اینچ (1219 میلی متر) و ضخامت جداره 22 میلی‌متر است. دلیل انتخاب این لوله فولادی، کاربرد گسترده آن در ساخت خطوط لوله انتقال گاز ایران است. لوله مورد استفاده وارداتی 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، لوله‌های جدا شده از لوله با ماشین‌کاری حذف 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 5L [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 [10] ساخته شدند. در شکل 3 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 API 5L [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

ورق‌های فولادهای مورد استفاده در ساخت لوله‌های انتقال گاز از گروه فولادهای کم‌آلیاژ پراستحکام² هستند. استحکام بالا، قابلیت جوش‌پذیری 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. لوله‌های ورق در راستای طولی پیخ زده می‌شود و سپس ورق با دستگاه‌های مخصوص به روش خمکاری پرس می‌شود. در نهایت، درز لوله‌ها با

⁵ Seam weld

⁶ Bainitic

⁷ Proeutectoid

⁸ Widmanstätten

⁹ Girth weld

¹ Unloading compliance method

² High strength low alloy steels

³ Thermo-mechanical controlled rolling (TMCR)

⁴ Acicular ferrite

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

| عنصر | درصد وزنی در بدنه لوله | درصد وزنی در درزجوش | بیشینه مجاز درصد وزنی |
|------------|------------------------|---------------------|-----------------------|
| آهن | 97.764 | 97.872 | --- |
| کربن | 0.102 | 0.084 | 0.12 |
| منگنز | 1.6 | 1.38 | 1.6 |
| فسفر | 0.007 | 0.001 | 0.025 |
| سولفور | 0.004 | 0.005 | 0.015 |
| سیلیکون | 0.279 | 0.259 | 0.45 |
| تیتانیوم | 0.027 | 0.013 | --- |
| نیوبیوم | 0.034 | 0.018 | --- |
| وانادیوم | 0.004 | 0.005 | --- |
| مولیبدنیوم | 0.003 | 0.201 | --- |
| کروم | 0.05 | 0.046 | --- |
| نیکل | 0.032 | 0.031 | --- |
| مس | 0.016 | 0.025 | --- |
| آلومینیوم | 0.043 | 0.024 | --- |

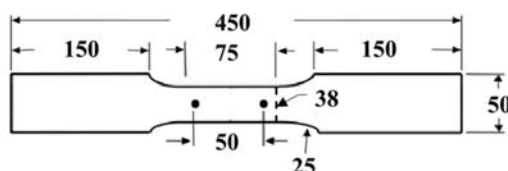


Fig. 3 Geometry and dimensions (in mm) of tensile specimens

شکل 3 مشخصات هندسی و ابعاد (بر حسب میلی متر) نمونه آزمایش کشش



Fig. 4 Photograph of tensile test specimens

شکل 4 تصویر نمونه‌های آزمایش کشش

جدول 2 خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده و الزام‌های استاندارد API 5L برای فولاد X65

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

| تنش نهایی (MPa) | تنش تسلیم (MPa) | API X65 |
|-----------------|-----------------|-------------|
| 595 | 510 | بدنه لوله |
| 615 | 530 | درزجوش |
| 535 | 450 | کمینه مجاز |
| 760 | 600 | بیشینه مجاز |

مطابق استاندارد API 5L بصورت T-L نشان داده می‌شود. 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 کیلو نیوتن و 10 کیلو نیوتن انتخاب شد. در آخرین مرحله ساخت نمونه‌ها، برای برقراری وضعیت کرنش صفحه‌ای

عرضی آزمایش کشش قرار داده می‌شود و برجستگی سطح جوش با ماشین کاری برداشته می‌شود به طوری که سطح نمونه صاف و تخت باشد [10]. پس از ساخت نمونه‌ها، آزمایش‌های کشش با نرخ بارگذاری 3 میلی متر بر دقیقه انجام شدند. در جدول 2 نتایج آزمایش‌های 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- آزمایش‌های 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 به دلیل کوچک بودن و کششی بودن نیروی وارده بر آن نمونه کششی فشرده¹ نام دارد. نمونه‌ها با ضخامت (B) و پهنا (W) به ترتیب 20 و 40 میلی متر 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

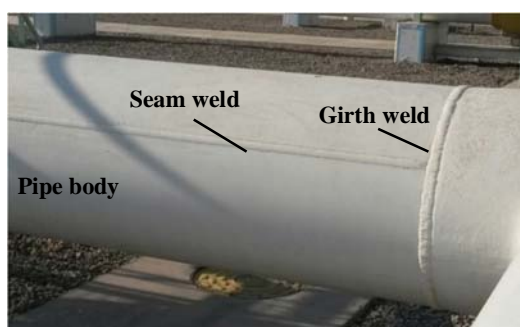


Fig. 1 Photograph of a gas pipeline

شکل 1 تصویری از یک خط لوله انتقال گاز



Fig. 2 Photograph of a seam weld sample cut from API X65 pipe

شکل 2 تصویری از نمونه درزجوش جدا شده از لوله API X65

¹ Compact tension (CT)

² Transverse direction

³ Longitudinal direction



Fig. 5 Photograph of a machined CT specimen

شکل 5 تصویر یک نمونه ماشین کاری شده CT

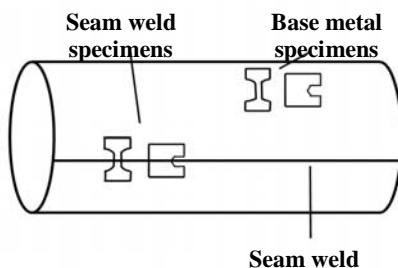


Fig. 6 Orientation of tests specimens in the research

شکل 6 جهت‌های نمونه‌های 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 می‌شود. برای رفع این خطا، مقادیر نرمی محاسبه شده با رابطه (1) را با استفاده از رابطه‌های (A2.14) و (A2.15) استاندارد ASTM E1820 [5] اصلاح می‌کنند. پس از اصلاح مقادیر نرمی، پارامتر u_i با استفاده از رابطه (2) برای هر سیکل تعیین شد.

$$u_i = \frac{1}{(B_e E C_i)^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (2)$$

و انتشار ترک در مسیر مستقیم، شیارهای جانبی¹ در راستای رشد ترک ایجاد شدند. ضخامت نمونه‌ها در محل شیار مطابق توصیه 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 سنناتام مدل STM-150 با ظرفیت 15 تن و نرخ بارگذاری 3 میلی‌متر بر دقیقه انجام شدند. برای اندازه‌گیری 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 کلیپ گیج مشاهده می‌شود. نمونه آزمایش بدلیل آنکه بطور کامل در داخل قید و بند قرار گرفته است در این شکل بطور واضح دیده نمی‌شود. در شکل 8 نمودارهای نیرو-جابجایی بدست آمده برای بدنه و درزجوش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، 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 نیرو - جابجایی، نیاز است ابتدا طول اولیه ترک (a_0) تعیین شود. این طول برابر مجموع طول شیار ماشین‌کاری شده (18 میلی‌متر در تحقیق حاضر) و طول ناحیه خستگی است. بعد از انجام آزمایش، جهت دسترسی به سطوح شکست بمنظور اندازه‌گیری 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 می‌شود. 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 اندازه‌گیری می‌شود. بدین منظور نه نقطه با فاصله‌های مساوی در راستای ضخامت نمونه انتخاب می‌شوند. میانگین طول دو نقطه نزدیک به سطوح جانبی نمونه و میانگین طول هفت نقطه باقی مانده محاسبه می‌شود. میانگین دو عدد محاسبه شده برابر طول اولیه ترک فرض می‌شود. 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 بین $0.45W$ و $0.7W$ (18 و 28 میلی‌متر در تحقیق 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 اندازه‌گیری‌ها و انجام محاسبات، طول ناحیه خستگی و طول اولیه ترک برای نمونه بدنه به ترتیب 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 بارگذاری - باربرداری با استفاده از رابطه (1) تعیین شدند.

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

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 grooves² Crack mouth opening displacement (CMOD)³ Clip gage

هستند که مقادیر آنها با استفاده از رابطه‌های (A2.3) و (A2.8) در استاندارد ASTM E1820 [5] برای هر سیکل تعیین می‌شوند. مقدار انتگرال J برای هر سیکل از رابطه (8) محاسبه می‌شود.

$$J_i = \frac{K_i^2}{E} (1 - \nu^2) + J_{pli} \quad (8)$$

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

برای رسم نمودار $J-\Delta a$ همان‌طور که در شکل‌های 10 و 11 دیده می‌شود، ابتدا خطی گذرنده از مبدا مختصات با معادله $J = 2\sigma_Y \Delta a$ و با نام خط احداث² رسم می‌شود. در این معادله، σ_Y استحکام تسلیم مؤثر³ نام دارد و مقدار آن برابر میانگین استحکام‌های تسلیم و نهایی است. با استفاده از داده‌های جدول 2 مقدار σ_Y برای بدنه لوله 552.5 مگاپاسکال و برای درزجوش 572.5 مگاپاسکال محاسبه می‌شود. در ادامه، دو خط موازی با خط احداث از نقاط 0.15 و 1.5 روی محور افقی رسم می‌شوند. این 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 می‌شوند. مطابق استاندارد فقط نقاطی که بین خطوط منع قرار دارند، نقاط معتبر محسوب می‌شوند. این نقاط در شکل‌های 10 و 11 بصورت توپر 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 برای درزجوش $J = 420.6 (\Delta a)^{0.444}$ است. در آخرین مرحله، از نقطه 0.2 روی محور افقی خطی موازی با خط احداث با نام خط آفست 0.2 میلی‌متر⁵ رسم می‌شود. مقدار J نقطه برخورد این خط با منحنی برازش شده برابر چقرمگی مشروط (J_Q) است. J_Q در این تحقیق برای بدنه لوله 395 kJm^{-2} و برای درزجوش 298 kJm^{-2} محاسبه شده است. اگر نامساوی رابطه (9) برقرار باشد، J_Q برابر J_{IC} فرض خواهد شد. رابطه (9) شرط برقراری کرنش صفحه‌ای در استاندارد ASTM E1820 است.

$$B > 10 \frac{J_Q}{\sigma_Y} \quad (9)$$

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 میلی‌متر محاسبه می‌شود. بنابراین نامساوی رابطه (9) برای بدنه و درزجوش برقرار است و مقادیر J_Q را می‌توان برابر J_{IC} در نظر گرفت. برای تعیین K_{IC} ، از رابطه (10) استفاده می‌شود. نتایج بدست آمده برای مقادیر چقرمگی در جدول 5 نشان داده شده است.

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{J_{IC} E}{(1 - \nu^2)}} \quad (10)$$

5- بحث و نتیجه‌گیری

عملیات انجام شده در مراحل 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

در رابطه (2)، E مدول یانگ برابر 210 GPa، Cc_i 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 می‌شود.

$$B_e = B - \frac{(B - B_N)^2}{B} \quad (3)$$

در رابطه (3)، B و B_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 می‌شود. پس از محاسبه متغیر u_i طول ترک در هر سیکل با استفاده از رابطه (4) تعیین شد.

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

در ادامه، مقادیر رشد ترک نسبت به طول اولیه در هر سیکل با رابطه

$$(5) \text{ محاسبه شدند.}$$

$$(\Delta a)_i = a_i - a_0 \quad (5)$$

برای محاسبه مقادیر انتگرال J_i در هر سیکل، ابتدا ضریب شدت تنش (K_i) و قسمت پلاستیک انتگرال J (J_{pli}) با استفاده از روابط (7,6) تعیین شدند.

$$K_i = \frac{P_i}{(BB_N W)^{\frac{1}{2}}} f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (6)$$

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

در رابطه‌های (7,6)، P_i و $A_{pl}^{i-1,i}$ به ترتیب مقدار نیروی بیشینه هر سیکل و مقدار افزایش مساحت ناحیه پلاستیک در زیر نمودار نیرو-جابجایی بین مرحله‌های $i-1$ و i هستند. $f\left(\frac{a_i}{W}\right)$ ، η_{i-1} و γ_{i-1} ضرایب هندسی بی‌بعدی

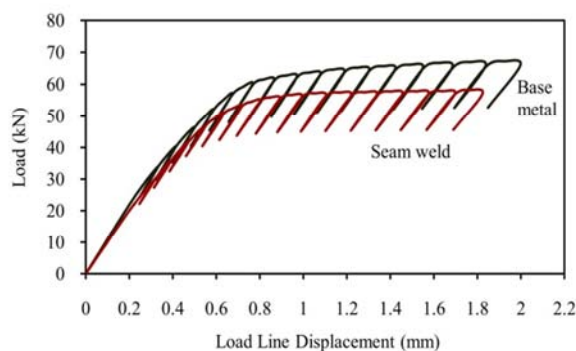


Fig. 8 Load versus load – line displacement curve

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

¹ Effective thickness

² Construction line

³ Effective yield strength

⁴ Exclusion lines

⁵ 0.2 mm offset line

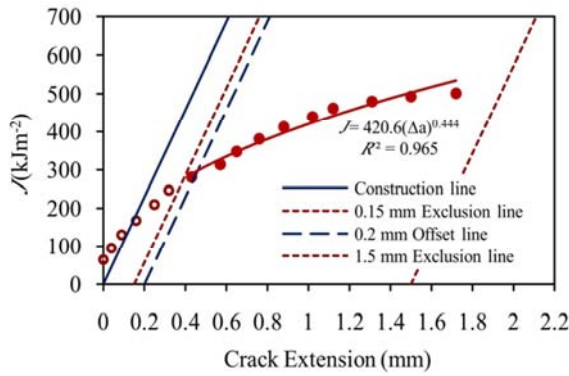


Fig. 11 Experimental $J-\Delta a$ data for seam weld

شکل 11 داده های تجربی $J-\Delta a$ 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_{IC} (MPam ^{0.5}) | J_{IC} (kJm ⁻²) | ماده |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------|
| 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 ماشین کاری 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 میلی‌متر کف تراشی، از قطعه‌های انحنادار جدا شده از بدنه لوله با ضخامت 22 میلی‌متر، نمونه‌های آزمایش تخت با ضخامت 20 میلی‌متر 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 می‌توانند 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 می‌شود مقاومت این دو قسمت در برابر رشد ترک و شکست مورد ارزیابی و مقایسه دقیق قرار گیرد. بر این اساس، مقادیر K_{IC} برای بدنه لوله 302 MPam^{0.5} و برای درزجوش 262 MPam^{0.5} تعیین شدند. نکته قابل توجه، اختلاف نسبتا کم چقرمگی این دو قسمت است. درزجوش در کارخانه لوله‌سازی با روش‌های اتوماتیک و تحت کنترل کیفیت و بازرسی‌های سخت‌گیرانه انجام می‌شود و سعی می‌شود از نظر خواص مکانیکی تا حد ممکن نزدیک به بدنه لوله باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، مشخص می‌شود 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

Table 3 Fracture toughness test results for base metal

| J_i (kJm ⁻²) | J_{pi} (kJm ⁻²) | K_i (MPam ^{0.5}) | $(\Delta a)_i$ (mm) | $C_{CT} \times 10^{-8}$ (mN ⁻¹) | سیکل |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------|---|---------|
| 111.3 | 61.9 | 106.8 | 0.06 | 0.8887 | اول |
| 152.7 | 86.6 | 123.5 | 0.12 | 0.8959 | دوم |
| 197.6 | 114.7 | 138.3 | 0.19 | 0.9034 | سوم |
| 246.9 | 145.6 | 152.9 | 0.26 | 0.9123 | چهارم |
| 297.5 | 182.8 | 162.7 | 0.36 | 0.9230 | پنجم |
| 340.5 | 218.6 | 167.7 | 0.44 | 0.9321 | ششم |
| 382.1 | 254.8 | 171.4 | 0.54 | 0.9449 | هفتم |
| 422.9 | 288.9 | 175.9 | 0.68 | 0.9606 | هشتم |
| 459.4 | 320.8 | 178.8 | 0.77 | 0.9734 | نهم |
| 493.2 | 348.6 | 182.7 | 0.95 | 0.9966 | دهم |
| 524.0 | 373.8 | 186.2 | 1.09 | 1.0124 | یازدهم |
| 550.9 | 394.1 | 190.3 | 1.30 | 1.0412 | دوازدهم |
| 574.5 | 413.0 | 193.1 | 1.42 | 1.0581 | سیزدهم |
| 589.9 | 430.6 | 197.1 | 1.61 | 1.0843 | چهاردهم |
| 617.5 | 442.4 | 201.0 | 1.82 | 1.1129 | پانزدهم |

جدول 4 نتایج آزمایش تعیین چقرمگی شکست درزجوش

Table 4 Fracture toughness test results for seam weld

| J_i (kJm ⁻²) | J_{pi} (kJm ⁻²) | K_i (MPam ^{0.5}) | $(\Delta a)_i$ (mm) | $C_{CT} \times 10^{-8}$ (mN ⁻¹) | سیکل |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------|---|---------|
| 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 | یازدهم |
| 462.1 | 338.8 | 168.7 | 1.12 | 1.0702 | دوازدهم |
| 480.4 | 352.5 | 171.8 | 1.31 | 1.0986 | سیزدهم |
| 493.2 | 360.7 | 174.9 | 1.50 | 1.1276 | چهاردهم |
| 501.6 | 363.3 | 178.6 | 1.72 | 1.1598 | پانزدهم |

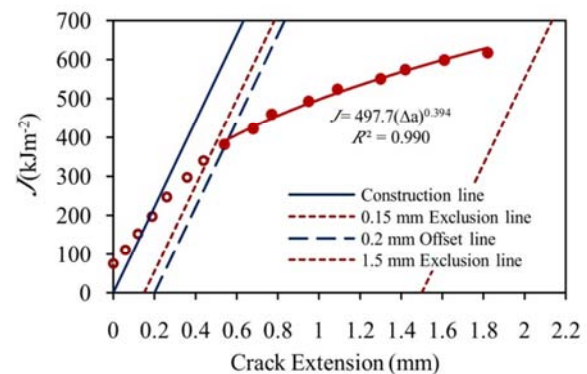


Fig. 10 Experimental $J-\Delta a$ data for base metal

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.
- [2] J. B. Ju, W. S. Kim, J. I. Jang, Variations in DBTT and CTOD within weld 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 standard: 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 Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 133-140, 2015. (in Persian فارسی)
- [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 welded 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 Persian فارسی)
- [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 فارسی)

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_{IC} را برای بدنه و درزجوش لوله API X65 به ترتیب برابر $300 \text{ MPam}^{0.5}$ و $267 \text{ MPam}^{0.5}$ تعیین کرده است. مقادیر K_{IC} محاسبه شده توسط مرجع [12] نیز برای بدنه و درزجوش همان لوله، به ترتیب $282 \text{ MPam}^{0.5}$ و $250 \text{ MPam}^{0.5}$ می باشند. مراجع [11] و [12] در تحقیق خود مانند تحقیق حاضر از روش تک نمونه ای برای تعیین K_{IC} استفاده کرده اند. تفاوت موجود بین تحقیق آنها و تحقیق حاضر در این است که آنها بجای J_{IC} یک معیار دیگر چقرمگی یعنی مقدار جابجایی بازشدگی نوک ترک¹ را محاسبه کرده اند و سپس برای تعیین K_{IC} از رابطه ریاضی موجود بین دو معیار فوق استفاده نموده اند. همچنین نمونه آزمایش مورد استفاده در بررسی های 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 $308 \text{ MPam}^{0.5}$ تعیین کرده است. در تحقیقی دیگر، مقدار K_{IC} درزجوش این لوله توسط مرجع [14] برابر $265 \text{ MPam}^{0.5}$ محاسبه شده است. مراجع [13] و [14] در تحقیق خود برخلاف تحقیق حاضر از روش چند نمونه ای و نمونه آزمایش خمشی با شیار واحد در لبه استفاده کرده اند. با وجود این تفاوت ها، اختلاف در نتایج حاصله آنها با نتایج تحقیق حاضر نسبتاً کم است.

6- تقدیر و تشکر

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

¹ Crack tip opening displacement (CTOD)

² Single edge - notched bend (SENB)