



تعیین تجربی چقرمگی شکست در درز جوش ماریپیچ لوله فولادی ترمومکانیکال

علی فرهی^۱ و سید حجت هاشمی^{۲*}

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

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

چکیده

ارزیابی چقرمگی شکست به عنوان مقاومت ماده در برابر شروع ترک ترد در درز جوش لوله های فولادی انتقال گاز برای مهندسين و طراحان خط به دليل شرايط بحراني منطقه جوش بسيار حائز اهميت است. از سوي ديگر آزمون هاي تعيين چقرمگي ماده بر اساس مباني و اصول مکانیک شکست، دشوار، زمان بر و پرهزینه می باشند. هم چنین انجام این آزمون ها بعضا دليل محدودیت در اندازه (خصوصا ضخامت ماده) غير ممکن است. در تحقيق حاضر که برای نخستين بار در داخل کشور صورت گرفته است، آزمون خمش سه نقطه ای بر اساس آزمون چند نمونه ای مطابق استاندارد ASTM (با طراحی خاص نمونه و قيد و بند آزمایشگاهی) انجام می شود. هدف تحقيق تعيين چقرمگی شکست درز جوش ماریپیچ لوله API X65 (به عنوان یکی از پرکاربردترین انواع لوله های فولادی انتقال گاز طبیعی در ایران) می باشد. روش های تجربی استفاده شده در تحقيق حاضر شامل دو روش تعيين چقرمگی مواد نرم است. یک روش بر اساس محاسبه گشودگی بحرانی نوک ترک (CTOD) و روش ديگر محاسبه JIC است. بر اساس روش اول مقدار CTOD برآورد شده ۰/۲۳ میلی متر و مقدار KIC معادل آن 265 MPa√m اندازه گیری شد. همچنین طبق روش دوم JIC برابر 396 kJ/m² و KIC معادل آن 332 MPa√m محاسبه گردید. بمنظور تکمیل موضوع تحقيق، بحث و بررسی در خصوص دلایل تفاوت مقادير KIC از دو روش و مقایسه نتایج با داده های محدود در مقالات مشابه ارائه می شود.

کلمات کلیدی: لوله فولادی؛ انتقال گاز طبیعی؛ درز جوش ماریپیچ؛ چقرمگی شکست؛ آزمون خمش سه نقطه ای؛ شکست نرم.

Experimental evaluation of fracture toughness in spiral seam weld of thermo-mechanical steel

A.Farrahi¹ and S.H. Hashemi^{2*}

¹ M.Sc. Graduated, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

² Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

Abstract

Assessment of fracture toughness in pipe weldment is important for pipeline engineers and designers as welded zone is the most critical site for crack initiation and propagation. Also the measurement of fracture toughness based on the Fracture mechanics tests are difficult, time consuming and expensive. Even in some cases, according to the geometric limits (especially the thickness of material) test fulfillment seems impossible. This research reports the determination of fracture toughness in spiral weld seam of API X65 pipe steel. The pipe has vast usage in Iran's gas transportation projects. To measure fracture toughness, single edge notch bend (SENB) specimens were machined from the pipe. Two techniques of evaluation of fracture toughness based on multi-specimen tests in ASTM E 1820 standard were used. These techniques were based on determination of crack tip opening displacement (CTOD) and JIC. So 0.23 mm determined for CTOD and its equivalent KIC was 265 MPa√m, JIC was also 396 KJ/m² and its KIC measured 332 MPa√m. In addition, the reasons of the difference in KIC values of the two methods are discussed and comparing of the results with limited similar data in the literature is accomplished.

Keywords: Steel pipe; Natural gas transportation; Spiral seam weld; Fracture toughness; Three points bending test; Ductile fracture.

۱- مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون تقاضا برای نفت و گاز طبیعی به منظور مصارف شهری و صنعتی، انتقال کارآمد و موثر انرژی از مناطق تولید به محل مصرف، نیازمند ساز و کاری پیچیده و گسترده است. علاوه بر این در بسیاری موارد، گاز طبیعی تولید شده نیازمند طی مسافت طولانی تا منطقه مصرف می باشد. یکی از مهم ترین تجهیزات برای این منظور، لوله‌های فولادی انتقال گاز می‌باشد. به دلیل اهمیت موضوع، لازم است در طراحی، تولید، نصب و جایگذاری، تامین و نگهداری لوله ها دقت و توجه ویژه‌ای صورت گیرد [۱]. سه دسته اصلی لوله های فولادی در سامانه های گردآوری، انتقال بین شهری و توزیع گاز استفاده می شوند. در این بین، لوله های فولادی با قطر زیاد (حاوی گاز با فشار بالا بین ۱۰ تا ۱۵ مگاپاسکال) جهت سامانه انتقال بین شهری بکار می‌روند. در چنین فشار کاری بالایی باید سازه از جهت ایمنی و بی نقص بودن در شرایط بسیار مطلوبی قرار داشته باشد. بدین منظور شرایط مناسب خواص مکانیکی این دسته از فولادها مانند استحکام و چقرمگی از ملزومات اصلی طراحی و تولید لوله می باشد. لذا در طی چندین دهه طراحی، لوله های انتقال به صورت فولادهایی پر استحکام و کم آلیاژ (HSLA) تولید می شوند. همچنین عملیات حرارتی دقیقی به جهت ارتقای همزمان استحکام و چقرمگی در طی فرایند نورد کنترل شده ترمومکانیکال (TMCR) انجام می‌گیرد [۲ و ۳].

عموما لوله های فولادی انتقال گاز به دو صورت بدون درز و یا درز دار طراحی می شوند. همچنین لوله‌های درز دار به صورت مستقیم و مارپیچی جوش داده می شوند. دلیل استفاده از لوله های با درز جوش مارپیچی، فرایند ساخت انعطاف پذیر آنها است. بدین معنی که با استفاده از ورق با پهنای ثابت، می‌توان لوله‌هایی با قطرهای متفاوت ساخت. هم چنین می توان با استفاده از ورق‌هایی با پهنای مختلف، لوله‌هایی با قطر یکسان تولید نمود، در حالی که نیازی برای به‌کارگیری ابزارهای شکل‌دهی اضافی وجود ندارد. علاوه براین، با افزایش زاویه مارپیچ، سرعت خروجی تولید لوله بیشتر می‌شود که اثر مهمی در اقتصادی بودن این فرایند دارد [۴]. همزمان با فرم دهی غلتکی لوله ها بصورت مارپیچ، جوشکاری آنها به صورت خودکار انجام می‌شود. پس از تولید لوله‌ها چندین مرحله بازرسی (چشمی، فراصوتی و اشعه

ایکس) جهت اطمینان از بی نقص بودن منطقه جوش صورت می‌پذیرد. بدلیل ماهیت فرایند جوشکاری و تغییر ریز ساختار به صورت نامطلوب، همچنین وجود تنش‌های پسماند کششی و احتمال وجود انواع عیوب دیگر در جوش، این ناحیه منطقه پرخطری به لحاظ وجود ترک های موئین و استعداد گسترش آنها می‌باشد [۵]. علاوه بر این بدلیل خاصیتی که از ماده جوش برای اتصال دو ماده انتظار می‌رود، استحکام ماده جوش باید از فلز پایه بالاتر باشد. به همین دلیل با توجه به رابطه معکوس چقرمگی و استحکام، ماده جوش چقرمگی پایین تر و مقاومت کمتری از خود در برابر رشد ترک نشان خواهد داد [۶].

امروزه یکی از مهم ترین مسائل در صنعت خطوط انتقال، بازرسی کارکرد مناسب (FFS) سازه با وجود نقص‌هایی مانند ترک می‌باشد. یکی از کاربردی ترین روش‌ها برای تخمین شرایط مطلوب سازه در حین انجام کار، استفاده از منحنی ارزیابی آسیب (FAD) سازه است [۷]. یکی از خواص مکانیکی لازم جهت رسم این منحنی، چقرمگی شکست ماده (مقاومت ماده در برابر رشد ترک ترد) است. لذا برآورد چقرمگی شکست ماده جوش در لوله انتقال فولادی گاز با گرید API X65 (به عنوان یکی از پرکاربردترین انواع لوله انتقال گاز در کشور)، به لحاظ بحرانی بودن ناحیه جوش در فولاد و لزوم رسم منحنی‌های ارزیابی آسیب جهت تعیین شرایط کارکرد مناسب خطوط لوله حائز اهمیت می باشد.

در این تحقیق کدهای مختلف استاندارد ASTM به عنوان مرجع کار قرار گرفته است. برای تعیین چقرمگی شکست در حالت کرنش مسطح استاندارد ASTM E399 به عنوان اولین کد معرفی شده است. باید توجه داشت که طبق این استاندارد و مطابق رابطه $(B \geq 2.5(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}})^2)$ حداقل ضخامت لازم برای نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای حدود ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد [۸]. با توجه به اینکه ضخامت لوله مورد آزمایش ۱۴/۳ میلی متر است، لزوماً از روش های تعیین غیر مستقیم چقرمگی شکست مطابق استاندارد ASTM E1820 استفاده شده است. این دستورالعمل در حال حاضر جامع ترین روش تعیین چقرمگی شکست مواد با رفتار نرم می باشد. لذا با تعیین کمیت های J_{IC} به عنوان میزان انرژی جذب شده به منظور شروع رشد ترک و CTOD به عنوان

فرایند ساخت فولاد، فرایند شکل دهی و ساخت لوله، و فرایند جوشکاری مارپیچ لوله) بررسی می شود. شایان ذکر است که در تعداد محدود تحقیقات مشابه انجام شده در خارج کشور [۱، ۵، ۷ و ۱۰]، مشخصات هندسی لوله متمایز بوده و درز جوش بررسی شده از نوع درز جوش مستقیم بوده است. در حالی که درز جوش مارپیچی لوله در تحقیق حاضر دارای زاویه تمایل ۲۲ درجه می باشد و تاکنون در هیچ تحقیقی بررسی نشده است.

به منظور تعیین چقرمگی شکست ماده مورد تحقیق، از روش غیرمستقیم با کمیات واسطه J_{IC} و CTOD استفاده شده و مقایسه‌ای بین این دو روش به لحاظ کارایی هر یک صورت می‌گیرد. همچنین در تحقیقات مشابه روش تک نمونه‌ای بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است، ولی در تحقیق حاضر روش چند نمونه‌ای به دلیل نقص های ذاتی جوش استفاده شده است. در روش تک نمونه ای برآورد حاصله، مقدار کمیات را فقط در نقطه ای خاص از سازه مشخص می‌کند، در حالی که در روش چند نمونه‌ای کمیات برآورد شده با توجه به استخراج هر نمونه با مختصات متفاوتی (با نقص های احتمالی متفاوت در حین عملیات جوشکاری) از سازه، بگونه ای میانگینی از چقرمگی شکست را در کل سازه مشخص می‌کند [۱۱].

۳- معرفی ماده و روش انجام آزمایش

ماده مورد آزمایش در تحقیق حاضر ماده درز جوش لوله فولادی با گرید API X65 می باشد. ترکیب شیمیایی ماده مورد آزمایش مطابق جدول ۱ و خواص مکانیکی آن مطابق جدول ۲ می باشد [۱۲ و ۱۳]. همچنین مشخصات هندسی لوله مطابق جدول ۳ است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی ماده جوش لوله در تحقیق

عنصر	درصد وزنی
C	۰/۰۷۳
P	۰/۰۱۰
Mn	۱/۳۷
S	۰/۰۰۳
Si	۰/۲۴۶

حاضر [۱۲]

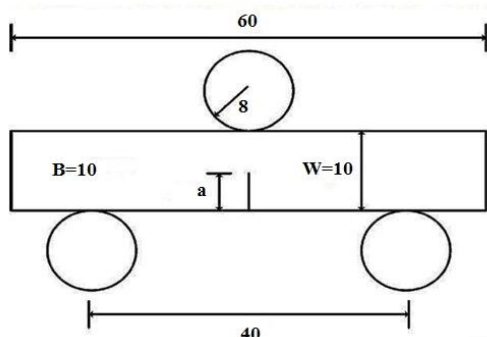
گشودگی بحرانی نوک ترک در شروع رشد ترک، مقدار چقرمگی شکست برآورد شده است.

۲- پیشینه تحقیق

کمیت‌هایی همچون J_{IC} و CTOD طی سال های متمادی بر اساس کاربرد روز افزون در صنعت و مقدار ماده محدود سازه های صنعتی به لحاظ تامین ابعاد نمونه آزمایشگاهی، تعریف و بسط داده شده اند. هم اکنون در بعضی مراجع به تعیین کمیات مذکور جهت مشخص کردن خاصیت چقرمگی ماده بسنده می‌شود [۹]. بعنوان مثال در سال ۲۰۰۳ تحقیقاتی به منظور اندازه گیری تنش پسماند در ماده جوش فولاد API X65 توسط جو و همکارانش انجام گرفت [۵]. در این تحقیق مقدار CTOD برابر ۰/۲۴ میلی متر در درز جوش اندازه گیری شده است. همچنین نشان داده شد با انجام عملیات حرارتی بر روی ماده جوش مقدار CTOD به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در سال ۲۰۰۴ نیز تحقیقاتی توسط لی و همکارانش بر روی فولاد مشابه جهت تعیین منحنی ارزیابی آسیب انجام گرفته است [۷]. در این تحقیق برای ماده جوش این فولاد مقادیر ۰/۲۶ و ۰/۲۷ میلی متر برای CTOD و به طور متناظر $242 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ و $267 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ برای چقرمگی شکست گزارش شده است. یانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ تحقیقات گسترده ای جهت تعیین خصوصیات مختلف مکانیکی فولاد مشابه انجام داده اند [۱]. در این تحقیق برای گشودگی نوک ترک مقدار ۰/۲۸ میلی متر گزارش شده است. در سال ۲۰۱۱ نیز زو جهت تعیین تاثیر عامل طول شیار در نمونه های خمش سه نقطه ای منحنی های J-R و δ -R فولاد مشابه را در طول شیار های مختلف مورد ارزیابی قرار داد [۱۰]. او در این تحقیق به عنوان نتیجه ای اعلام می دارد، با شیار بی حد کافی عمیق (با نسبت طول شیار به ضخامت بدون شیار نمونه بیشتر از ۰/۵۱) تاثیر قید شیار بر روی نمونه آزمایشگاهی از بین می رود. وی در این حالت مقدار گشودگی نوک ترک را ۰/۲۱ میلی متر برآورد کرده است.

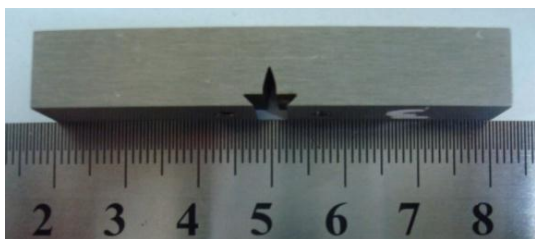
در تحقیق حاضر چقرمگی شکست برای درز جوش لوله انتقال گاز با گرید API X65 تعیین می شود. در این تحقیق که برای نخستین بار در ایران انجام شده است، لوله ای خاص با مشخصات هندسی متمایز (ضخامت دیواره، قطر خارجی،

ایجاد شیار در نمونه، جهت آن مطابق استاندارد ASTM 1820 [۱۵] به صورت TL می باشد [۱۶].



شکل ۲- ابعاد هندسی نمونه استخراجی از جداره لوله API X65 (ابعاد بر حسب میلی متر است) [۱۶]

در شکل ۳ نمونه ماشین کاری شده از ماده آزمایش جهت انجام آزمون خمش سه نقطه ای نشان داده شده است. همچنین با توجه به اینکه لوله به صورت ماریچج جوشکاری شده است، به منظور تعیین دقیق محل شیار و گسترش ترک متناظر در ماده جوش بر روی نمونه ماکرو اچ مطابق شکل ۴ انجام گرفته است.



شکل ۳- تصویر نمونه استاندارد آزمون خمش سه نقطه ای



شکل ۴- موقعیت شیار در ناحیه جوش در نمونه آزمون خمش سه نقطه ای (بعد از انجام ماکرو اچ) [۱۷]

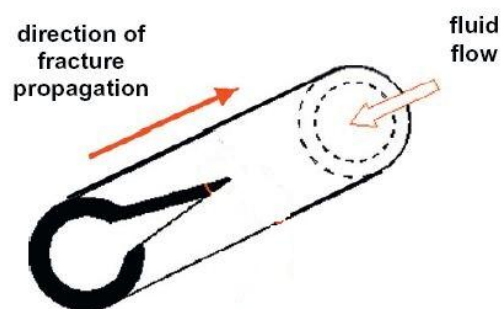
جدول ۲- خواص مکانیکی ماده جوش لوله در تحقیق حاضر [۱۲ و ۱۳]

مقدار	خواص مکانیکی
۲۵۳	Young's modulus (GPa)
۵۴۸	Yield strength (MPa)
۶۲۴	Tensile strength (MPa)
۱۶۰	Charpy fracture energy (J)
۸۶۱	K
۰/۰۹۴	n
۱۷	(%) Elongation

جدول ۳- مشخصات هندسی لوله API X65 در تحقیق حاضر

مقدار	خواص مکانیکی
۱۲۱۹	قطر خارجی (mm)
۱۴/۳	ضخامت (mm)
X	شکل شیار جوش
ماریچجی	نوع جوش
۲۲	زاویه تمایل درز جوش (°)

لوله‌های انتقال گاز از نوع لوله های جدار نازک می باشند. در این نوع لوله ها، تنش در جهت محیطی دارای بیشترین مقدار نسبت به دیگر جهات است [۶]. لذا مطابق شکل ۱ رشد ترک عمود بر امتداد تنش حداکثر، در جهت محوری لوله اتفاق می افتد [۱۴].



شکل ۱- راستای رشد ترک در لوله های انتقال گاز [۱۴]

با توجه به اینکه نمونه آزمایش از ماده جوش جداره لوله استخراج می گردد، لذا ابعاد نمونه با محدودیت های جداره به صورت شکل ۲ می باشد (مقطع مربعی ۱۰ میلی متر در ۱۰ میلی متر با طول کلی ۶۰ میلی متر). همچنین برای

یکسان تحت بارگذاری با جابجایی متفاوت قرار می‌گیرند. جدول ۴ جابجایی اعمال شده بر نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی را مشخص می‌کند و شکل ۶ نمونه‌های آزمایشگاهی مختلف را پس از انجام آزمون نشان می‌دهد.

جدول ۴- جابجایی اعمالی بر نمونه‌های آزمایش

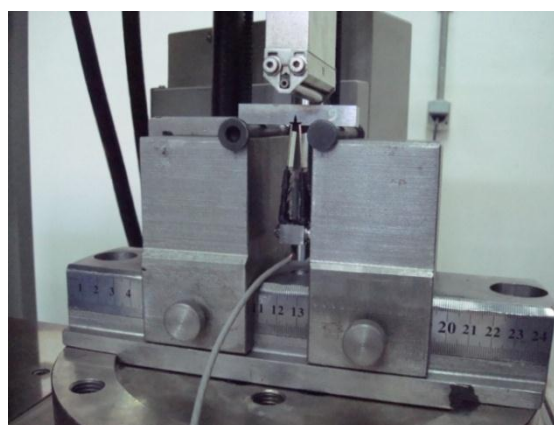
شماره نمونه	جابجایی (mm)
۱	۲/۲۰
۲	۵/۷۳
۳	۲/۹۰
۴	۱/۴۱
۵	۲/۰۲
۶	۲/۷۲
۷	۴/۹۳



شکل ۶- نمونه‌های آزمایش شده با اعمال جابجایی متفاوت

بر اساس استاندارد [۱۵] برای تعیین مقدار رشد ترک در روش چند نمونه‌ای آزمون چقرمگی شکست، پهنای باقیمانده نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش به صورت ترد شکسته می‌شوند. به این منظور نمونه‌ها در نیتروژن مایع سرد و به دو نیم تفکیک می‌شوند. برای محاسبه رشد ترک از نمونه‌های شکسته شده با کیفیت بالا در حالت ماکرو عکس گرفته می‌شود، سپس عکس‌ها در نرم افزارهای تحلیل تصویر (مانند PloComp و Paint) بررسی می‌شوند. شکل ۷ سطح شکست یکی از نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد.

در تحقیق حاضر برای تعیین چقرمگی شکست ماده مورد آزمایش از آزمون خمش سه نقطه‌ای به روش چند نمونه‌ای مطابق استاندارد [۱۵] استفاده شده است. دستگاه مورد استفاده در آزمایشگاه، دستگاه ۶۰۰ کیلو نیوتنی Zwick ساخت کشور آلمان می‌باشد. نمونه آزمایشگاهی و قید و بند طراحی شده [۱۷] در دستگاه آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای و قید و بند طراحی شده [۱۷] (قبل از شروع آزمون)

در تحقیق حاضر چقرمگی شکست به روش غیر مستقیم از طریق محاسبه J_{IC} و $CTOD$ محاسبه می‌گردد. برای بدست آوردن مقدار $CTOD$ مطابق شکل ۵ از ابزار اندازه‌گیری گشودگی نوک ترک (Clip Gage) ساخت شرکت TML ژاپن استفاده شده است. برای محاسبه چقرمگی شکست ماده مطابق استاندارد [۱۵] دو روش تک نمونه‌ای و چند نمونه‌ای وجود دارد. با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود از روش چند نمونه‌ای استفاده شده است. مطابق استاندارد [۱۵]، تعیین کمیت‌های J_{IC} و $CTOD$ به ترتیب با استفاده از منحنی‌های $J-R$ و $\delta-R$ بر اساس داده‌های آزمایشگاهی انجام و پس از آن چقرمگی شکست محاسبه می‌شود.

۴- انجام آزمون و محاسبه چقرمگی

در روش چند نمونه‌ای آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد [۱۵]، حداقل پنج نمونه آزمایشگاهی با ابعاد هندسی و طول ترک اولیه یکسان نیاز است. نمونه‌های

جدول ۶- میانگین میزان رشد ترک در نمونه های مختلف

آزمایشگاهی با جابجایی متفاوت	
جایجایی (mm)	رشد ترک (mm)
۲/۲۰	۰/۵۴
۵/۷۳	۲/۱۲
۲/۹۰	۰/۷۲
۱/۴۱	۰/۳۷
۲/۰۲	۰/۲۹
۲/۷۲	۰/۸۸
۴/۹۳	۱/۶۵

مطابق استاندارد، محاسبه چقرمگی برای مواد با رفتار نرم به روش غیر مستقیم از طریق محاسبه کمیت های J_{IC} و CTOD صورت می گیرد. در تحقیق حاضر چقرمگی از طریق محاسبه هر دو کمیت برآورد می گردد.

۴-۱- محاسبه J_{IC}

مقدار انتگرال J همانند رابطه (۱) از دو بخش الاستیک و پلاستیک تشکیل شده است [۱۵]:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (۱)$$

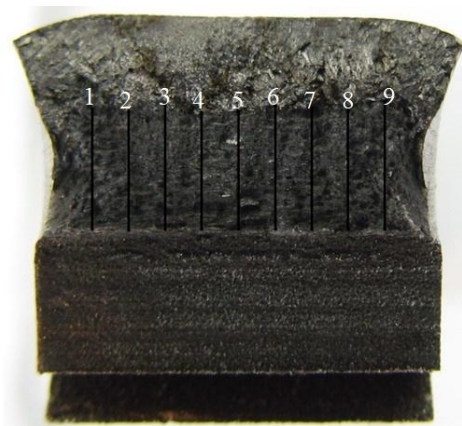
بخش الاستیک طبق رابطه (۲) بدست می آید [۱۴]:

$$J_{el} = K^2(1 - \nu^2)/E \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، E مدول یانگ، ν ضریب پواسون و K ضریب شدت تنش می باشد که طبق رابطه (۳) محاسبه می گردد [۱۵]:

$$K_Q = \left(\frac{P.S}{BW^{\frac{3}{2}}} \right) \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (۳)$$

در رابطه (۳)، B ، W ، S به ترتیب ضخامت نمونه، پهنای آن و فاصله بین مراکز تکیه گاه ها (بر حسب میلی متر) می باشند. P نیروی نهایی در نمودار حاصل از آزمون خمش سه نقطه ای است. مقدار $f(a/W)$ با توجه به نسبت $a_0/W=0.505$ برای نمونه ها از جداول مربوطه در استاندارد [۱۵] بدست می آید. شکل ۸ نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه ای با اعمال جابجایی ۵/۷۳ میلی متر (برای نمونه شماره ۲) را نشان می دهد.



شکل ۷- سطح شکست نمونه و نقاط تعیین شده جهت محاسبه رشد ترک

اندازه گیری رشد ترک در نه نقطه با فاصله برابر در امتداد رشد ترک انجام می گیرد. میانگین دو نقطه ۱ و ۹ با بقیه نقاط معدل گرفته می شود و به عنوان میزان رشد ترک محاسبه می گردد [۱۵]. جدول ۵ میزان رشد ترک (در نقاط نشان داده شده در شکل ۷ و میانگین آنها) را نشان می دهد. بدین ترتیب مطابق جدول ۶ رشد ترک در نمونه های با جابجایی متفاوت مشخص می گردد.

جدول ۵- رشد ترک در سطح شکسته شده نمونه

آزمایشگاهی با جابجایی ۵/۷۳ میلی متر (محاسبه شده به

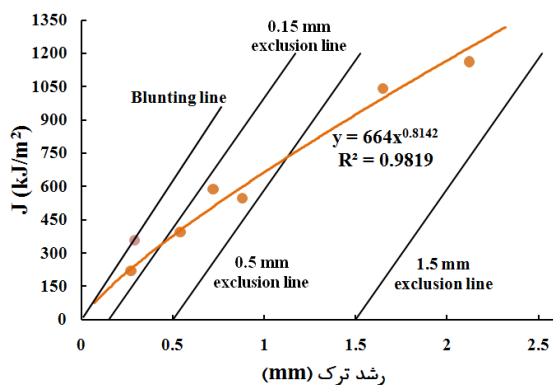
کمک نرم افزار)

موقعیت	رشد ترک (mm)
۱	۲/۱۱
۲	۲/۰۶
۳	۲/۲۲
۴	۲/۰۲
۵	۲/۰۶
۶	۲/۲۰
۷	۲/۱۵
۸	۲/۰۶
۹	۲/۳۱
میانگین	۲/۱۲

جدول ۷- مقادیر J محاسبه شده بر حسب رشد ترک جهت

رسم نمودار J-R	
J (kJ/m ²)	a (mm) Δ
۳۹۶/۲۵	۰/۵۴
۱۱۶۲/۴۷	۲/۱۲
۵۸۷/۰۵	۰/۷۲
۲۲۱/۰۶	۰/۲۷
۳۵۸/۰۵	۰/۲۹
۵۴۸/۰۱	۰/۸۸
۱۰۴۱/۷۱	۱/۶۵

مطابق داده های جدول ۷، منحنی J-R برای ماده مورد آزمایش مطابق شکل ۹ رسم می گردد.

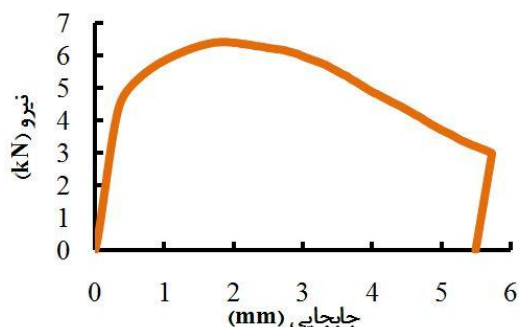


شکل ۹- منحنی چقرمگی شکست بر حسب تغییرات طول ترک

مطابق استاندارد [۱۵] برای استخراج J_{IC} ، باید خطی به موازات خط کند شوندگی با شیبی معادل دو برابر تنش استحکام موثر (σ_T) روی محور افقی با فاصله ۰/۲ میلی متر با منحنی توانی برازش شده قطع داده شود. نقطه حاصل از این تقاطع مقدار $J_{IC} = 396 \text{ kJ/m}^2$ را بدست خواهد داد. با استفاده از رابطه (۹) مقدار چقرمگی شکست بر حسب J_{IC} بدست می آید [۱۴]:

$$J_{IC} = K_{IC}^2 \times \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \right) \quad (9)$$

از رابطه (۹) مقدار چقرمگی شکست برای ماده مورد آزمایش برابر $K_{IC} = 332 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ خواهد بود.



شکل ۸- نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از اعمال جابجایی ۵/۷۳ میلی متر

بر اساس شکل ۸، نیروی نهایی ۲/۹۹ کیلو نیوتن خواهد بود. ضریب شدت تنش نیز مطابق رابطه (۴) و بخش الاستیک انتگرال J مطابق رابطه (۵) بدست می آیند:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 2.7 \rightarrow K = 32.28 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (4)$$

$$J_{el} = \frac{32.28^2 \times (1 - 0.3^2)}{253.37} = 3.74 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (5)$$

بخش پلاستیک انتگرال J مطابق رابطه (۶) بدست می آید [۱۵]:

$$J_{pl} = \frac{2A_{pl}}{B(W - a_0)} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، a_0 طول ترک اولیه در نمونه و A_{pl} قسمت پلاستیک مساحت زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی می باشد. برای محاسبه A_{pl} نیاز است ابتدا از نقطه انتهایی نمودار نیرو بر حسب جابجایی خطی با شیب قسمت الاستیک (شکل ۸) رسم گردد. سپس از روش نمودار ذوزنقه ای، مساحت قسمت پلاستیک محاسبه گردد. مطابق رابطه (۷) بخش پلاستیک انتگرال J و مقدار کلی آن طبق رابطه (۸) بدست می آید.

$$A_{pl} = 28.68 \text{ KN} \rightarrow J_{pl} = 1158.73 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (7)$$

$$J = 3.74 + 1158.73 = 1162.47 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (8)$$

سایر نمونه های آزمایش شده به همین صورت تحلیل می شوند و داده های منحنی J-R مطابق جدول ۷ بدست می آیند.

مطابق رابطه (۱۱) مقدار δ برای نمونه با جابجایی ۵/۷۳

میلی متر بدست می‌آید:

$$\delta = \frac{32.28^2 \times (1 - 0.3^2)}{2 \times 548 \times 253} + \frac{[0.44 \times (10 - 5.03) + 2.12] \times 2.25}{[0.44 \times (10 - 5.03) + 5.03 + 0]} \quad (11)$$

مطابق جدول ۸، مقدار δ تمامی نمونه‌ها براساس روابط

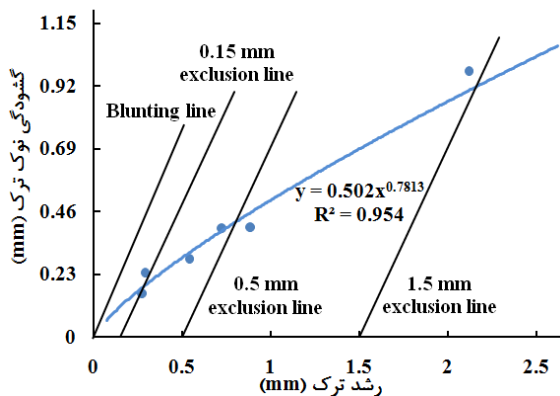
۱۰ و ۱۱ بدست می‌آید.

جدول ۸: گشودگی نوک ترک در نمونه‌های مختلف

آزمایشگاهی	
δ (mm)	Δa (mm)
۰/۲۷۴	۰/۵۴
۰/۹۷۲	۲/۱۲
۰/۳۹۹	۰/۷۲
۰/۱۶۱	۰/۲۷
۰/۲۳۶	۰/۲۹
۰/۴۰۳	۰/۸۸

از داده‌های جدول ۸ برای رسم منحنی δ -R مطابق

شکل ۱۱ استفاده می‌شود.



شکل ۱۱: منحنی گشودگی نوک ترک بر حسب تغییرات طول ترک

مطابق استاندارد [۱۵] برای تعیین CTOD، باید خطی

به موازات خط کند شونده با شیب $d\delta/da = 1/4$ روی محور

افقی با فاصله ۰/۲ میلی متر با منحنی توانی برازش شده قطع

داده شود. نقطه حاصل از این تقاطع مقدار ۰/۲۳ میلی متر

برای CTOD خواهد بود. در نهایت با استفاده از رابطه (۱۲)،

۴-۲- محاسبه CTOD

جهت تعیین چقرمگی شکست از طریق CTOD باید

گشودگی دهانه ترک (CMOD) در حین انجام آزمایش

بوسیله ابزار اندازه‌گیری گشودگی نوک ترک (که به نمونه

آزمایش متصل می‌گردد)، اندازه‌گیری شود. این ابزار از دو

تیغه تشکیل شده و بر روی هر کدام دو کرنش‌سنج نصب

شده است. به منظور ثبت داده‌های ابزار اندازه‌گیری

گشودگی نوک ترک، نیاز به دستگاه اندازه‌گیری کرنش می

باشد. در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری و ثبت داده‌های

حاصل از ابزار اندازه‌گیری گشودگی نوک ترک از دستگاه P3

ساخت شرکت Vishay استفاده شده است.

مطابق استاندارد [۱۵] مقدار CTOD یا δ از رابطه (۱۰)

محاسبه می‌گردد:

$$\delta = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{2\sigma_{YS}E} + \frac{[r_p(W - a) + \Delta a]V_{pl}}{[r_p(W - a) + a + z]} \quad (10)$$

در این رابطه، K ضریب شدت تنش، σ_{YS} تنش تسلیم،

Δa مقدار رشد ترک، z ارتفاع تیغه اتصال ابزار اندازه‌گیری

گشودگی نوک ترک (اگر تیغه در خود نمونه باشد، صفر

است)، r_p ضریبی که از هندسه نمونه مشخص می‌شود (برای

نمونه خمش سه نقطه‌ای ۰/۴۴ است) و V_{pl} مساحت قسمت

پلاستیک زیر نمودار نیرو بر حسب CMOD است [۱۵].

جهت محاسبه V_{pl} باید نمودار نیرو بر حسب CMOD

نمونه آزمایش رسم و از نقطه انتهایی آزمایش خطی به

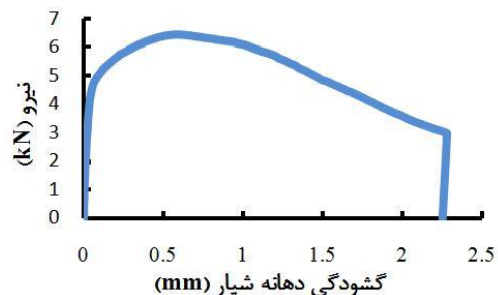
موازات شیب قسمت الاستیک ترسیم گردد. محل تقاطع این

خط با محور افقی به عنوان V_{pl} معرفی می‌گردد. مطابق

شکل ۱۰ بر اساس نمودار نیرو بر حسب گشودگی دهانه ترک

نمونه با جابجایی ۵/۷۳ میلی متر، مقدار ۲/۲۵ میلی متر برای

V_{pl} بدست می‌آید.



شکل ۱۰- نمودار نیرو بر حسب گشودگی دهانه ترک نمونه با

جابجایی ۵/۷۳ میلی متر جهت تعیین V_{pl}

توجه به مقدار چقرمگی شکست فولاد بدنه لوله که مطابق مرجع [۱۶] برابر $308 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ برآورد شده است، مقدار دقیقی برای چقرمگی شکست ماده جوش نخواهد بود.

جدول ۱۰- مقایسه استحکام نهایی و چقرمگی ماده بدنه و

درز جوش فولاد مشابه در مراجع مختلف

مرجع	Tensile strength (MPa) بدنه	Tensile strength (MPa) درز جوش	CTOD (mm) بدنه	CTOD (mm) درز جوش
[۱]	۶۱۷	۶۴۳	۰/۳۷	۰/۲۸
[۷]	۶۲۵	۶۸۱	۰/۴	۰/۲۷
[۱۰]	۵۶۸	۶۵۰	-	۰/۲۱
تحقیق حاضر	۶۱۱ [۱۲]	۶۲۴ [۱۲]	۰/۳۸ [۱۶]	۰/۲۳

همچنین در جدول ۱۱ مقایسه ای بین K_{IC} و CTOD محاسبه شده برای ماده مشابه در مراجع مختلف انجام گرفته است.

جدول ۱۱- مقایسه مقادیر CTOD و K_{IC} ماده جوش فولاد API X65 بر اساس مشخصات هندسی و مکانیکی مراجع مختلف

مرجع	[۱]	[۵]	[۷]	[۷] ترک طولی	[۱۰] تحقیق حاضر
قطر خارجی (mm)	۵۰۸	۴۱۶	۷۶۲	۷۶۲	۱۲۱۹
ضخامت (mm)	۱۴/۳	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۴/۳
درز جوش Tensile strength (MPa)	۶۴۳	-	۶۸۱	۶۸۱	۶۲۴
CTOD (mm)	۰/۲۸	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۳
K_{IC} (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	-	-	۲۶۷	۲۴۲	۲۶۵

۶- بحث و نتیجه گیری

بدلیل جدار نازک بودن لوله فولادی API X65 مورد استفاده در تحقیق حاضر، ابعاد نمونه آزمایشگاهی شرایط کرنش صفحه ای جهت ایجاد شکست ترد مطابق استاندارد [۸] را ارضا نمی کند. لذا از روش های غیر مستقیم تعیین چقرمگی

مقدار چقرمگی شکست با معلوم بودن مقدار CTOD بحرانی بدست می آید:

$$K_{IC} = \sqrt{m(CTOD)E'\sigma_{YS}} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، m و E' بر اساس شرایط مسئله تعیین می گردند. با توجه به اینکه حالت کرنش صفحه ای، شرایط غالب در نمونه آزمایش می باشد، لذا $E' = E/(1-\nu^2)$ و $m=2$ می باشند [۷ و ۱۸]. با قرار دادن مقادیر ذکر شده در رابطه (۱۲)، مقدار چقرمگی شکست برای ماده مورد آزمایش $K_{IC} = 265 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ برآورد می گردد.

۵- مقایسه نتایج

در جدول ۹ مقادیر برآورد شده K_{IC} از دو روش متفاوت، مقایسه شده است.

جدول ۹- مقدار K_{IC} محاسبه شده در تحقیق حاضر از دو روش غیر مستقیم تجربی

روش	K_{IC} (MPa $\sqrt{\text{m}}$)
δ -R curve	۲۶۵
J-R curve	۳۳۲

در مرجع [۱۹] آزمون خمش سه نقطه ای بر روی نمونه های با ابعاد مشابه در لوله API X65 انجام گرفته است. در این مرجع فقط اطلاعات نیرو بر حسب گشودگی دهانه ترک ذکر شده است. دلیل آن نیز عدم امکان تعیین منحنی J با توجه به کوچک بودن ضخامت نمونه ذکر شده است. لذا مقدار K_{IC} برآورد شده از طریق محاسبه CTOD بیشتر قابل اطمینان می باشد.

همانطور که اشاره شد با توجه به مرجع [۶] رابطه معکوسی بین استحکام و چقرمگی وجود دارد. در جدول ۱۰ مقایسه ای بین استحکام و CTOD (معیاری از چقرمگی) در مراجع مختلف انجام شده است. مطابق این جدول مقدار چقرمگی حاصل از CTOD در تحقیق حاضر، مقدار درستی را به عنوان چقرمگی ماده جوش API X65 ارائه می دهد. زیرا با توجه به بیشتر بودن استحکام ماده جوش، مقدار CTOD کمتر از ماده بدنه می باشد (لذا مقدار چقرمگی حاصل از CTOD ماده جوش نیز کمتر از ماده بدنه است). همچنین مقدار چقرمگی شکست حاصل از J_{IC} ($332 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) با

جوش، چقرمگی حاصل از گشودگی نوک ترک ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) $K_{IC} = 265$ و مقایسه آن با مقدار چقرمگی ماده بدنه، بعنوان حد پایین این کمیت جهت طراحی شرایط کاری لوله قابل اطمینان خواهد بود.

۷- تقدیر و تشکر

از شرکت لوله و تجهیزات سدید جهت در اختیار قرار دادن فولاد API X65 تشکر و قدردانی می‌گردد. این تحقیق با استفاده از امکانات سخت افزاری و نرم افزاری دانشگاه بیرجند در گروه پژوهشی مطالعات لوله و صنایع وابسته انجام گردیده است.

۸- مراجع

- [1] Yang ZZ, Tian W, Ma QR, Li YL, Li JK, Gao JZ, Zhang HB (2008) Mechanical properties of longitudinal submerged arc welded steel pipes used for gas pipeline of offshore oil. *Acta Metall Sin* (21): 85-93.
- [2] Ju JB, Lee JS, Jang J (2007) Fracture toughness anisotropy in a API steel line-pipe. *Mat Let* (61): 5178-5180.
- [3] Hashemi SH (2011) Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel, *Mater Sci Engng A* (528): 1648-1655.
- [4] Kennedy JL (1993) Oil and gas pipeline fundamentals. 2nd edn. Pennwell Publ, Oklahoma.
- [5] Ju J, Lee J, Jang J, Kim W, Kwona D (2003) Determination of welding residual stress distribution in API X65 pipeline using a modified magnetic Barkhausen noise method, *Int J Pres Ves Piping* (80): 641-646.
- [6] دالینگ ن، جاهد مطلق ح ر، غفوری ر، کاظمی ب (مترجمین) (۱۳۸۵) رفتار مکانیکی مواد. ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، تهران.
- [7] Lee JS, Ju JB, Jang J, Kim WS, Kwon D (2004) Weld crack assessment in API X65 pipeline: Failure assessment diagram with variation in representative mechanical properties. *Mater Sci Engng A* (373): 122-130.
- [8] ASTM standard E399 (1997) Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. In: *Annual book of ASTM standards*.
- [9] Zhu X, Joyce J (2012) Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engng Fract Mech* (85): 1-46.

شکست بوسیله کمیت های واسطه استفاده شد. این کمیات J_{IC} و گشودگی نوک ترک (CTOD) هستند که به عنوان معیاری برای تعیین چقرمگی شکست در آستانه رشد ترک استفاده می‌شوند.

جدول ۵ نشان دهنده دقت محاسبه طول ترک تا دو رقم اعشار بوسیله عکس برداری در حالت ماکرو و بررسی دقیق در نرم افزارهای تحلیل تصویر (Paint و PloComp) می‌باشد. این میزان دقت با اندازه گیری چشمی (توسط کولیس یا میکرو متر به صورت دستی) قابل دستیابی نمی‌باشد.

بر اساس شکل های ۹ و ۱۱ مشاهده می‌شود در هر دو نمودار تعداد لازم نقاط در محدوده مجاز استاندارد [۱۵] قرار دارد، لذا برازش منحنی توانی برای داده های آزمایشگاهی حاصل از داده های جداول ۷ و ۸ بدرستی انجام گرفته است. در این تحقیق علاوه بر محاسبه K_{IC} از طریق J_{IC} ، این کمیت بوسیله محاسبه CTOD با تشکیل منحنی مقاومت δ نیز محاسبه شده است. ثبت داده‌های گشودگی دهانه ترک بوسیله ابزار اندازه گیری گشودگی نوک ترک انجام شد. نتایج حاصل از منحنی‌های مقاومت J و δ در جدول ۹ نشان داده شده است. بر این اساس چقرمگی تخمین زده شده از طریق گشودگی نوک ترک ($K_{IC} = 265 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) مقدار کمتری را نسبت به معادل J_{IC} آن ($K_{IC} = 332 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)، نشان می‌دهد. این مطلب با توجه به ابعاد کوچک نمونه آزمایشگاهی (و مطابق مرجع [۱۹]) که بیان می‌دارد فقط منحنی مقاومت δ برای نمونه های کوچک قابل استخراج است)، درست به نظر می‌رسد.

همانطور که اشاره شد تعیین چقرمگی شکست برای بدست آوردن منحنی ارزیابی آسیب الزامی است. بدلیل تشکیل لوله مورد تحقیق از دو ماده فولاد بدنه و جوش، تعیین و مقایسه هر دو ماده باید صورت گیرد. مقدار چقرمگی شکست فولاد بدنه لوله مطابق مرجع [۱۶] برابر $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ۳۰۸ برآورد شده است. کمتر بودن نسبی مقدار چقرمگی در درز جوش نسبت به فولاد بدنه لوله قابل پیش بینی است (با توجه به بیشتر بودن استحکام جوش و مد نظر قرار دادن رابطه معکوس استحکام و چقرمگی بر اساس مرجع [۶]). در نهایت مطابق جدول ۱۰ با توجه به مقادیر استحکام نهایی و CTOD (به عنوان معیاری از چقرمگی) در ماده بدنه و درز

- [15] ASTM standard E1820 (2002) Standard test method for measurement of fracture toughness. In: Annual book of ASTM standards.
- [۱۶] کیمیابخش م (۱۳۹۰) تعیین تجربی و عددی چقرمگی شکست در لوله‌های انتقال گاز ایران با گرید API X65. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند.
- [۱۷] فرهی ع (۱۳۹۱) تعیین تجربی چقرمگی شکست درز جوش فولاد ترمومکانیکال API X65. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند.
- [18] Min H, Fuguo L (2010) Modified transformation formulae between fracture toughness and CTOD of ductile metals considering pre-deformation effects. *Engng Fract Mech* (77): 2763–2771.
- [19] Oh CK, Kim YJ, Beak YP, Kim W (2007) A phenomenological model of ductile fracture for API X65 steel. *Int J Mech Sci* (49): 1399–1412.
- [10] Zhou DW (2011) Measurement and modelling of R-curves for low-constraint specimens. *Engng Fract Mech* (78): 605–622.
- [11] Maropoulos S, Ridley N, Kechagias J, Karagiannis S (2004) Fracture toughness evaluation of a H.S.L.A. steel. *Engng Fract Mech* (71): 1695–1704.
- [۱۲] رضایی یکتا م (۱۳۸۹) شبیه سازی کامپیوتری آزمایش کشش نمونه شیار دار فولادی API X65 با مدل گرسون. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند.
- [13] Hashemi SH, Mohammadyani D (2012) Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *Int J Pres Ves Piping* (98): 8–15.
- [14] Hashemi SH, Sedghi S, Soleymani V, Mohammadyani D (2012) CTOA levels of welded joint in API X70 pipe steel. *Engng Fract Mech* (82): 46–59.