

تعیین تجربی چقرمگی شکست جوش محیطی در خطوط لوله انتقال گاز با روش نرمی باربرداری

وحید اصغری

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، سهند، ایران

نقدعلی چوپانی*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، سهند، ایران

مهدی حنیفی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، سهند، ایران

چکیده

ارزیابی‌هایی که در مورد استحکام خطوط لوله انجام می‌شوند، نقش مهمی در طراحی و بهره برداری ایمن از این سازه‌ها دارند. خطوط لوله گاهی در معرض تغییر شکل‌های خمشی و کششی قرار می‌گیرند و این تغییر شکل‌ها جوش محیطی آنها را که می‌تواند عیب‌ها و ترک‌های ریزی در درون خود داشته باشند، تحت کشش قرار می‌دهد. بنابراین ارزیابی میزان مقاومت جوش محیطی در برابر رشد ترک‌ها و شکست از اهمیت خاصی برخوردار است. در این تحقیق، چقرمگی با معیار K_{IC} برای ماده جوش محیطی خطوط لوله انتقال گاز ایران مطابق استاندارد ASTM E1820 تعیین شده است. برای این کار آزمایش‌های تک نمونه‌ای با استفاده از نمونه‌های آزمایش از نوع کششی فشرده با شیارهای جانبی و دارای ترک‌های خستگی جهت تعیین منحنی مقاومت در برابر رشد ترک با استفاده از روش نرمی باربرداری انجام شده است. جهت ساخت نمونه‌های آزمایش، قطعاتی از بدنه لوله API X65 جدا و مطابق جوشکاری محیطی که در ساخت خطوط لوله انتقال گاز ایران انجام می‌شود، به همدیگر جوش داده شدند. سپس نمونه‌های نهایی با استفاده از قطعات جوشکاری شده ساخته شدند. پس از انجام آزمایش‌ها و محاسبات لازم، مقدار عددی K_{IC} برای ماده جوش محیطی $166 \text{ MPam}^{1/2}$ محاسبه شد. **واژه‌های کلیدی:** خطوط لوله انتقال گاز طبیعی، جوش محیطی، چقرمگی شکست، روش نرمی باربرداری.

Experimental Determination of Fracture Toughness of Girth Weld in Gas Pipelines using Unloading Compliance Method

V. Asghari

Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran

N. A. Choupani

Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran

M. Hanifi

Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran

Abstract

Structural-integrity assessments of pipelines play a key role in the design and safe operation of these structures. Pipelines are sometimes subjected to bending and tensile deformations, which places the girth welds in tension. Girth welds may contain weld imperfections and small flaws. Therefore, assessment of girth weld resistance against crack propagation and fracture is very important. In this study, the K_{IC} toughness has been determined for girth weld metal of API X65 gas pipeline, following the ASTM E1820 standard. The fracture toughness tests employed side-grooved and fatigue pre-cracked compact tension specimens, which were made by plates extracted from the original pipe and welded to each other under the same welding condition as that employed for girth welding during construction of main natural gas transmission pipeline in Iran, to determine the crack growth resistance curves based upon the unloading compliance method using the single specimen technique. From these, K_{IC} value of $166 \text{ MPam}^{1/2}$ was obtained for girth weld metal.

Keywords: Natural Gas Transmission Pipelines, Girth Weld, Fracture Toughness, Unloading Compliance Method.

۱- مقدمه

فشار پایینی صورت می‌گرفت. با جوش دادن لوله‌ها به همدیگر بوسیله قوس الکتریکی، استفاده از لوله‌های با قطر زیاد و برقراری جریان سیال با فشارهای بالا ممکن شد [۱]. امروزه در ایران جوشکاری لوله‌های انتقال گاز با قوس الکتریکی و استفاده از الکتروود روش‌دار انجام می‌شود. در خیلی از کشورها استفاده از الکتروود فلزی تحت پوشش گاز محافظ برای این کار رواج دارد. در بعضی کشورها نیز، جوشکاری پاس ریشه با استفاده از الکتروود تنگستنی تحت پوشش گاز محافظ و پاس‌های بعدی با استفاده از الکتروود روش‌دار انجام می‌شود [۲]. ترک‌هایی که در جوش محیطی بوجود می‌آیند، تحت تاثیر تنش‌های طولی موجود در خطوط لوله رشد می‌کنند و موجب شکست آنها می‌شوند. در واقع تنش‌های طولی چون عمود بر جوش محیطی هستند، موجب بارگذاری مد اول در آن می‌شوند. مد اول بارگذاری خطرناک‌ترین مد بارگذاری و عامل اصلی بسیاری از شکست‌های بوجود آمده در کاربردهای مختلف صنعتی است. عوامل مختلفی می‌توانند

امروزه کشورهای زیادی از خطوط لوله جهت انتقال نفت و گاز طبیعی استفاده می‌کنند. در ساخت این سازه‌ها، لوله‌ها را که معمولاً به طول استاندارد ۱۲ متر تولید می‌شوند، کنار هم قرار می‌دهند و با جوشکاری به همدیگر متصل می‌کنند. این جوش چون در راستای محیط لوله‌ها انجام می‌شود به جوش محیطی معروف است. جوشکاری محیطی در زمان‌های قدیم توسط آهن‌گران و با گداختن و چکش‌کاری انتهای لوله‌ها انجام می‌شد. این روش اتصال فلزات به همدیگر، جوشکاری آهن‌گری نامیده می‌شد. استفاده از فرایند جوشکاری با قوس الکتریکی جهت اتصال لوله‌ها از حدود سال ۱۹۲۰ میلادی آغاز شد. قبل از رایج شدن این روش، لوله‌های مورد استفاده قطر کوچکی داشتند و جریان سیال از درون لوله‌ها بدلیل امکان نشستی از اتصالات با

* Girth weld

مقدار جابجایی بارشدگی نوک ترک^۲ با روش تک‌نمونه‌ای محاسبه شده و سپس برای تعیین K_{IC} از رابطه ریاضی موجود بین دو معیار فوق استفاده شده است. از بین مراجع داخلی، هاشمی و کیمیابخش [۸] مقدار K_{IC} بدنه لوله API X65 را $308 \text{ MPam}^{1/2}$ تعیین کرده‌اند. در تحقیقی دیگر، مقدار K_{IC} درزجوش این لوله توسط فرهی و هاشمی [۹]، $265 \text{ MPam}^{1/2}$ محاسبه شده است. محققان داخلی یاد شده در تحقیق خود از روش چندنمونه‌ای و نمونه آزمایش خمشی با شیار واحد در لبه استفاده کرده‌اند.

در تحقیق حاضر برای اولین بار چقرمگی (K_{IC}) ماده جوش محیطی خطوط لوله انتقال گاز ایران با استفاده از لوله فولادی API X65 به قطر ۴۸ اینچ (۱۲۱۹ میلی متر) و ضخامت جداره ۲۲ میلی-متر که یکی از پرکاربردترین لوله‌ها در صنعت انتقال گاز ایران است، تعیین شده است.

۲- معرفی مواد

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بدنه لوله، درزجوش^۳ و جوش محیطی سه قسمت تشکیل دهنده یک خط لوله هستند. از درزجوش در کارخانه لوله‌سازی جهت شکل استوانه‌ای دادن به ورق‌های فولادی و از جوش محیطی در محل ساخت خط لوله جهت اتصال لوله‌های مجاور به‌همدیگر استفاده می‌شود. بدلیل کاربرد گسترده لوله API X65 در کشورهای مختلف، تحقیقات زیادی درباره خواص مکانیکی این لوله انجام شده و چقرمگی بدنه و درزجوش آن مورد بررسی قرار گرفته است. اما مقدار عددی چقرمگی (K_{IC}) ماده جوش محیطی خطوط لوله انتقال گاز ایران تاکنون در هیچ تحقیقی تعیین نشده است. با توجه به این موضوع، ماده مورد بررسی در تحقیق حاضر، ماده جوش محیطی انتخاب شده است.

برای ساخت نمونه‌های آزمایش، ابتدا با استفاده از برش هوا-گاز قطعاتی از بدنه لوله API X65 جدا و جهت جوشکاری به همدیگر آماده شدند. پس از پخشنی سطوح با زاویه ۳۰ درجه، جوشکاری با همان روشی که در ساخت خطوط لوله انتقال گاز ایران صورت می‌گیرد، انجام شد. بدین منظور، علاوه بر کنترل یکسان بودن تمام متغیرهای مربوطه، جهت انجام فرآیند جوشکاری از یک جوشکار فعال در ساخت خطوط لوله انتقال گاز استفاده شد. جوشکاری با استفاده از قوس الکتریکی و الکتروود روکش‌دار در چهار پاس ریشه، گرم، پرکن و سطح انجام شد. برای پاس ریشه از الکتروود ۶۰۱۰ و برای سه پاس دیگر از الکتروود ۷۰۱۸ استفاده شد. شکل هندسی جوش نیز به صورت لب به لب V شکل انتخاب شد. مقادیر بیشینه و کمینه پهنای ماده جوش بترتیب برابر ۲۸ و ۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شدند. سایر مشخصات جوشکاری در جدول ۱ نشان داده شده است. در شکل ۲ نیز صفحات جوشکاری شده مشاهده می‌شوند. پس از اتمام عملیات جوشکاری، آزمون نفوذ مایع^۴ جهت کسب از کیفیت جوش کاری انجام شد و ایراد خاصی مشاهده نشد.

سبب ایجاد تنش‌های طولی در خطوط لوله شوند. یک عامل، انبساط حلقوی لوله در اثر تنش حلقوی است. تنش حلقوی، تنش ناشی از عبور گاز با فشار بالا از درون خطوط لوله است. تنش طولی همچنین ممکن است در اثر تغییرات دمایی بوجود آید. اگر دمای محیط از دمای محیط در هنگام جوشکاری لوله‌ها به مقدار قابل توجهی تغییر کند، تنش طولی در خط لوله بوجود خواهد آمد. در مواردی خطوط لوله به دلایل گوناگون دچار خمش می‌شوند و تنش‌های طولی در اثر این خمش‌ها ایجاد می‌شوند. بعنوان مثال، خطوط لوله ممکن است تحت تاثیر عواملی مانند زلزله یا تکان‌های زمین قرار گیرند. این نیروها در ترکیب با وزن لوله‌ها موجب ایجاد تنش‌های خمشی در آنها می‌شوند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند انجام حفاری و گودبرداری بمنظور ساخت کانال یا ساختمان و یا عملیات مربوط به ساخت معدن در مجاورت خطوط لوله، از عوامل دیگری هستند که می‌توانند موجب ایجاد تنش‌های خمشی در این خطوط شوند. گاهی ممکن است جریانی از آب، مانند آب باران یا سیلاب به زیر لوله‌ها نفوذ کند و مقداری از خاک موجود را با خود به مکانی دیگر انتقال دهد. در چنین وضعیتی نیروی تکیه‌گاهی اعمالی از خاک به لوله در نقطه مورد نظر کاهش می‌یابد و لوله در آن نقطه دچار خمش خواهد شد. در اثر تنش‌های خمشی مورد اشاره، معمولاً قسمت بالایی لوله (موقعیت ساعت ۱۲) تحت تنش فشاری و قسمت پایینی (موقعیت ساعت ۶) تحت کشش قرار می‌گیرند. به همین دلیل بیشتر ترک‌ها در خطوط لوله در قسمت پایینی (موقعیت ساعت ۶) رشد می‌کنند [۳ و ۴]. بدیهی است ماده جوش محیطی خطوط لوله باید از چقرمگی کافی برخوردار باشد تا بتواند در برابر رشد ترک‌ها از خود مقاومت لازم نشان بدهد.

تحقیقات جهت بررسی شکست خطوط لوله بعد از سال ۱۹۵۰ میلادی آغاز شد. در آن زمان بیشتر لوله‌های مورد استفاده، ترد و فاقد چقرمگی لازم بودند. پس از مشاهده چندین مورد شکست ترد، انجام آزمایش ضربه شاریبی برای بررسی چقرمگی خطوط لوله در صنعت نفت و گاز رایج شد [۳]. مهمترین مزیت آزمایش شاریبی 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 معیار-های دیگر چقرمگی مانند K_{IC} مورد توجه قرار گرفتند [۲]. به دلیل اینکه با معلوم بودن طول ترک موجود در یک جسم با استفاده از مقدار K_{IC} ماده، می‌توان مقدار تنش قابل تحمل آن را تعیین نمود، این معیار چقرمگی امروزه کاربرد وسیعی در طراحی و ارزیابی مقاومت مواد در برابر رشد ترک و شکست پیدا کرده است [۵]. از بین مطالعاتی که جهت تعیین مقادیر K_{IC} در خطوط لوله انتقال گاز انجام گرفته می‌توان به تحقیق لی و همکاران [۶] اشاره نمود. آن‌ها مقادیر K_{IC} بدنه و درزجوش لوله API X65 را به ترتیب $300 \text{ MPam}^{1/2}$ و $267 \text{ MPam}^{1/2}$ تعیین کرده‌اند. مقادیر K_{IC} محاسبه شده توسط یانگ و همکاران [۷] نیز برای بدنه و درزجوش همان لوله، به ترتیب $282 \text{ MPam}^{1/2}$ و $250 \text{ MPam}^{1/2}$ می‌باشند. در هر دو تحقیق یاد شده، نمونه آزمایش مورد استفاده از نوع خمشی با شیار واحد در لبه^۱ بوده و بجای محاسبه مستقیم K_{IC} یک معیار دیگر چقرمگی یعنی

^۲ Crack tip opening displacement (CTOD)

^۳ Seam weld

^۴ Penetration test (PT)

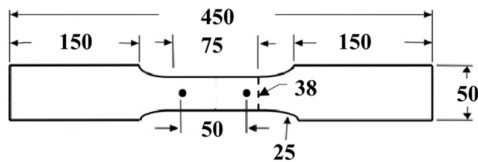
^۱ Single edge – notched bend (SENB)

جدول ۱- مشخصات جوشکاری انجام شده در تحقیق

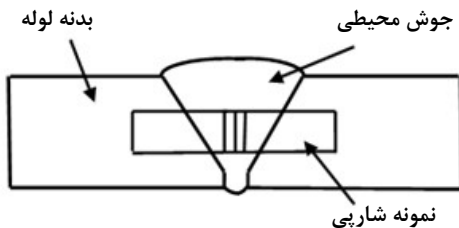
واحد	مقدار	کمیت
V	۲۲ الی ۲۵	ولتاژ جریان
A	۸۰ الی ۱۲۰	شدت جریان
mm/min	۱۳۰ الی ۱۸۰	سرعت جوشکاری
°C	۱۰۰	دمای پیشگرم
°C	۲۵۰ الی ۱۰۰	دمای بین پاسی
kJ/cm	۲۰ الی ۱۰	نرخ گرمای ورودی



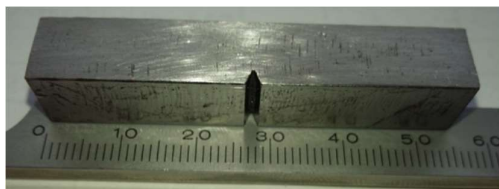
شکل ۲- تصویر صفحه‌های جوشکاری شده



شکل ۳- مشخصات هندسی و ابعاد بر حسب میلی‌متر نمونه آزمایش کشش



شکل ۴- موقعیت نسبی جوش محیطی و نمونه آزمایش شاریبی



شکل ۵- تصویر یک نمونه شاریبی ساخته شده

۳- تعیین خواص مکانیکی ماده مورد مطالعه

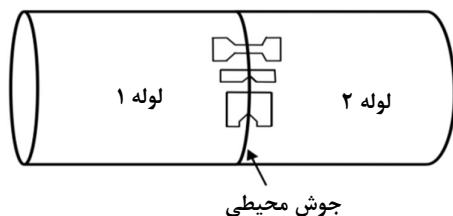
آزمایش‌های کشش، برای تعیین مقادیر استحکام تسلیم و استحکام نهایی مطابق استاندارد ASTM E8 [۱۰] و شاریبی جهت تعیین مقدار انرژی ضربه ماده جوش محیطی مطابق استاندارد ASTM E23 [۱۱] انجام شدند. در شکل ۳ مشخصات هندسی نمونه ساخته شده برای آزمایش کشش نشان داده شده است. مطابق استاندارد، ضخامت نمونه آزمایش کشش باید برابر ضخامت ماده در کاربرد خاص خود (۲۲ میلی‌متر در تحقیق حاضر) باشد [۱۰]. بنابراین جهت رفع انحنای قطعات مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های آزمایش کشش، از ماشین‌کاری صرفنظر شد و قطعات با پرس تبدیل به نمونه‌های تخت شدند. بر طبق استاندارد API 5L [۱۲] 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 این تغییر شکل در تحقیق حاضر ناچیز می‌باشد. مطابق استاندارد، ماده جوش باید در وسط نمونه عرضی آزمایش کشش قرار داده شود و برجستگی سطح جوش با ماشین‌کاری برداشته شود، بطوریکه سطح نمونه صاف و تخت باشد [۱۲]. پس از ساخت نمونه‌ها، آزمایش‌های کشش با نرخ بارگذاری ۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام شدند. انرژی لازم برای شکست ترد ماده، یکی دیگر از خواص مکانیکی آن است. روش رایج برای اندازه‌گیری این انرژی، آزمون ضربه شاریبی است. در این آزمایش، نمونه تهیه شده در اثر سقوط چکشی از ارتفاع معین می‌شکند و انرژی لازم برای این شکست در نشانگر دستگاه ثبت می‌شود. نمونه استاندارد آزمایش شاریبی، مکعب مستطیلی با طول ۵۵ میلی‌متر و پهنا و ضخامت ۱۰ میلی‌متر است که شیار در یک وجه آن با زاویه ۴۵ درجه ایجاد شده است [۱۱]. این نمونه بصورت تیری در حالت افقی روی تکیه‌گاه دستگاه قرار می‌گیرد و بار بصورت ضربه به پشت شیار وارد می‌شود. در شکل ۴ موقعیت نسبی جوش محیطی و نمونه آزمایش شاریبی و در شکل ۵ یکی از نمونه‌های ساخته شده آزمون شاریبی در تحقیق حاضر نشان داده شده است. مقادیر عددی تعیین شده برای خواص مکانیکی ماده جوش محیطی در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

آسانی نسبی انجام آزمایش‌های کشش و شاریبی و دشواری آزمایش‌های تعیین چقرمگی موجب شده است تعدادی از محققین سعی نمایند با استفاده از نتایج مطالعات تجربی به



شکل ۱- تصویری از یک خط لوله انتقال گاز

با توجه به اینکه تنش‌های طولی خطوط لوله موجب بارگذاری مد اول در جوش محیطی می‌شوند، باید جهت نمونه‌های آزمایش ماده جوش محیطی به گونه‌ای باشد که تنش وارده بر آن در حین انجام آزمایش همراستا با تنش طولی خطوط لوله باشد. به همین دلیل جهت‌های نمونه‌های آزمایش‌ها در تحقیق حاضر مطابق شکل ۷ انتخاب شدند.



شکل ۷- جهت‌های نمونه‌های آزمایش‌ها

پس از ساخت نمونه‌های اولیه آزمایش چقرمگی، ترکی در امتداد شیار موجود در آنها با پدیده خستگی ایجاد شد. فرکانس بارگذاری و مقادیر کمینه و بیشینه نیروی متناوب اعمالی جهت ایجاد ترک خستگی، بترتیب برابر ۱۰ هرتز، ۱ کیلونیوتن و ۱۰ کیلونیوتن انتخاب شد. در شکل ۸ ترک خستگی به وجود آمده روی یکی از نمونه‌ها نشان داده شده است. در آخرین مرحله ساخت نمونه‌ها، شیارهای جانبی در راستای رشد ترک به منظور برقراری وضعیت کرنش صفحه‌ای و انتشار ترک در مسیر مستقیم ایجاد شدند. ضخامت نمونه‌ها در محل شیار مطابق توصیه استاندارد، ۰٫۸ برابر ضخامت اولیه (۱۶ میلی متر) انتخاب شد. آزمایش‌های تعیین K_{IC} بصورت تک نمونه‌ای و استفاده از شیوه نرمی باربرداری جهت تخمین طول ترک در مراحل مختلف رشد آن، با دستگاه سنناتام مدل STM-150 به ظرفیت ۱۵ تن و با نرخ بارگذاری ۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام شدند. برای سنجش جابجایی دهانه ترک^۲ از یک کلیپ گیج^۳ با محدوده اندازه‌گیری ۱-۴ میلی-متر و دقت ۰٫۰۱ میلی‌متر استفاده شد. در شکل ۹ نمودار نیرو - جابجایی بدست آمده نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، فرایند بارگذاری- باربرداری ۱۵ مرتبه تکرار شده و از این تعداد، ۸ سیکل قبل از رسیدن نیرو به مقدار بیشینه خود انجام شده است. مقدار کاهش نیرو در هر سیکل نیز ۲۴٪ الی ۲۸٪ نیروی بیشینه آن سیکل است.

بر طبق استاندارد، کمترین تعداد سیکل‌های بارگذاری - باربرداری تکرار شده قبل از رسیدن نیرو به مقدار بیشینه، باید ۸ مرتبه باشد. همچنین مقدار کاهش نیرو در هر سیکل نباید از ۵۰٪ نیروی بیشینه آن سیکل بیشتر باشد [۱۷]. برای انجام محاسبات لازم جهت تعیین چقرمگی با استفاده از اطلاعات موجود در نمودار نیرو- جابجایی، نیاز است ابتدا طول اولیه ترک (a_0) تعیین شود. این طول برابر مجموع طول شیار ماشین‌کاری شده (۱۸ میلی متر در تحقیق حاضر) و طول ناحیه خستگی می‌باشد. 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 در

جدول ۲- خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده ماده جوش محیطی

ماده	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	انرژی ضربه (J)
جوش محیطی	۵۹۶	۶۸۴	۷۱

برقراری روابط مختلف بین کمیت‌های فوق اقدام نمایند. با استفاده از این روابط، چقرمگی (K_{IC}) با معلوم بودن مقدار انرژی شاری و استحکام تسلیم ماده تعیین می‌شود. معروف‌ترین رابطه در این زمینه، رابطه (۱) است که به رابطه رولف- نواک- بارسوم معروف است [۱۴].

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}}\right)^2 = 0.64 \left(\frac{CVN}{\sigma_{YS}} - 0.01\right) \quad (1)$$

یک رابطه دیگر رابطه (۲) است که توسط رابرتز و نیوتن پیشنهاد شده است [۱۵].

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}}\right)^2 = 0.52 \left(\frac{CVN}{\sigma_{YS}} - 0.02\right) \quad (2)$$

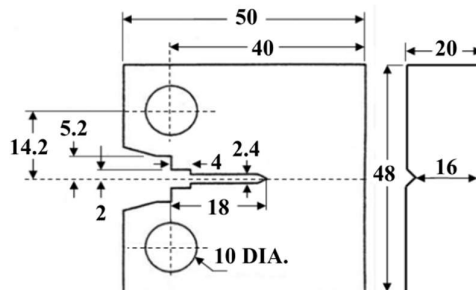
در رابطه های (۱) و (۲)، CVN انرژی ضربه شاری بر حسب ژول، σ_{YS} استحکام تسلیم برحسب مگاپاسکال و K_{IC} چقرمگی ماده بر-حسب $MPam^{1/2}$ می‌باشند.

۴- آزمایش‌های تعیین K_{IC}

برای اینکه بتوان چقرمگی ماده‌ای را با روش مستقیم و مطابق استاندارد ASTM E399 تعیین نمود، لازم است نامساوی رابطه (۳) برقرار باشد [۱۶].

$$B > 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{YS}}\right)^2 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، B ضخامت نمونه آزمایش، σ_{YS} استحکام تسلیم ماده مورد بررسی و K_{IC} چقرمگی آن می‌باشد. رابطه (۳)، شرط لازم برقراری وضعیت کرنش صفحه‌ای مطابق استاندارد ASTM E399 است. با توجه به ضخامت محدود لوله مورد استفاده و پیش‌بینی عدم برقراری نامساوی ۳، آزمایش‌های تعیین چقرمگی مطابق با استاندارد ASTM E1820 [۱۷] انجام شدند. شکل ۶ هندسه و ابعاد نمونه‌های آزمایش مورد استفاده برای تعیین چقرمگی را نشان می‌دهد. این نوع نمونه آزمایش چقرمگی، بدلیل کوچک بودن و کششی بودن نیروی وارده بر آن، نمونه کششی فشرده نام دارد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نمونه‌ها با ضخامت (B) و پهنای (W) بترتیب برابر ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر ساخته شدند.



شکل ۶- هندسه و ابعاد (برحسب میلی متر) نمونه‌های آزمایش CT

² Crack mouth opening displacement (CMOD)

³ Clip gage

¹ Compact tension (CT)

در رابطه ۶، E مدول یانگ برابر 210 GPa، Cc_i مقدار اصلاح شده نرمی در هر سیکل و B_e ضخامت موثر است. ضخامت موثر در نمونه های آزمایشی که دارای شیارهای جانبی هستند با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می شود.

$$B_e = B - \frac{(B - B_N)^2}{B} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، B و B_N به ترتیب ضخامت اولیه و ضخامت کاهش یافته نمونه آزمایش بعد از ایجاد شیارهای جانبی (بترتیب ۲۰ و ۱۶ میلی متر در تحقیق حاضر) می باشند. بعد از جاگذاری مقادیر فوق، مقدار ضخامت موثر برابر ۱۹٫۲ میلی متر محاسبه می شود. پس از تعیین متغیر u_i مقادیر طول ترک در هر سیکل با استفاده از رابطه (۸) تعیین شد. مقدار رشد ترک در هر سیکل از تفاضل طول ترک در آن سیکل با طول اولیه ترک معلوم می شود.

$$\frac{a_i}{W} = 1.000196 - 4.06319 u_i + 11.242 u_i^2 - 106.043 u_i^3 \quad (8)$$

برای محاسبه مقادیر انتگرال J در هر سیکل ابتدا ضریب شدت تنش (K) و قسمت پلاستیک انتگرال J (J_{PL}) با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) تعیین شدند.

$$K_i = \frac{P_i}{(BB_N W)^{1/2}} f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad (9)$$

$$J_{PLi} = \left[J_{pl(i-1)} + \frac{\eta_{i-1}}{B_N b_{i-1}} A_{pl}^{i-1,i} \right] \left(1 - \frac{\gamma_{i-1}}{b_{i-1}} (a_i - a_{i-1}) \right) \quad (10)$$

در رابطه های (۹) و (۱۰)، P_i و A_{pl}^{i-1,i} به ترتیب مقادیر نیروی بیشینه هر سیکل و افزایش مساحت ناحیه پلاستیک در زیر نمودار نیرو - جابجایی بین مرحله های i-1 و i هستند. f_i، η_{i-1} و γ_{i-1} ضرایب هندسی بی بعدی هستند که مقادیر آنها با استفاده از رابطه های (A2.3) و (A2.8) استاندارد ASTM E1820 [۱۷] برای هر سیکل تعیین می شوند. مقدار انتگرال J برای هر سیکل از رابطه (۱۱) محاسبه می شود.

$$J_i = \frac{K_i^2}{E} (1 - \nu^2) + J_{PLi} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، ν ضریب پواسون و برابر ۰٫۳ است. در جدول ۳ مقادیر محاسبه شده برای نرمی اصلاح شده، رشد ترک، ضریب شدت تنش، قسمت پلاستیک انتگرال J و مقدار کل انتگرال نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می شود J_{PL} سهم عمده ای از مقدار کل J را به خود اختصاص داده است و هر چه طول ترک بیشتر می شود، این سهم نیز افزایش می یابد. بنابراین رفتار ماده به وضوح از مکانیک شکست الاستیک - پلاستیک تبعیت می کند.

دستگاه کشش قرار داده شدند و با اعمال نیروی لازم بصورت ترد شکسته شدند. تصویر یک نمونه آزمایش پس از شکست ترد در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای محاسبه طول اولیه ترک از سطح شکست نمونه ها، عکس با کیفیت بالا گرفته می شود. عکس های تهیه شده در یکی از نرم افزارهای تحلیل تصویر بررسی می شوند. بر طبق استاندارد، طول اولیه مربوط به رشد ترک از انتهای سطح صاف و هموار ایجاد شده در اثر خستگی اندازه گیری می شود. بدین منظور نه نقطه با فاصله های مساوی در راستای ضخامت نمونه انتخاب می شود. میانگین طول دو نقطه نزدیک به سطوح جانبی نمونه و میانگین طول هفت نقطه باقی مانده محاسبه می شود. میانگین دو عدد محاسبه شده برابر طول اولیه ترک فرض می شود. مطابق استاندارد، طول ناحیه خستگی باید از مقادیر ۱٫۳ میلی متر و ۰٫۰۵ برابر ضخامت نمونه آزمایش (یک میلی متر در تحقیق حاضر) بیشتر باشد و طول اولیه ترک باید عددی بین ۰٫۴۵ برابر الی ۰٫۷ برابر پهنای نمونه آزمایش (۱۸ و ۲۸ میلی متر در این تحقیق) باشد [۱۷]. سطح خستگی و شکست یکی از نمونه های آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. پس از اندازه گیری ها و انجام محاسبات لازم، طول ناحیه خستگی و طول اولیه ترک بترتیب برابر ۲٫۳ و ۲۰٫۳ میلی متر محاسبه شدند. پس از معلوم شدن طول اولیه ترک، مقدار کمیت b₀ با استفاده از رابطه ۴ برابر ۱۹٫۷ میلی متر محاسبه شد.

$$b_0 = W - a_0 \quad (4)$$

در آزمایش هایی که هدف اصلی آنها تعیین مقدار J_{IC} است و رسم کامل منحنی تغییرات انتگرال J نسبت به رشد ترک در اولویت بعدی قرار دارد، سیکل های بارگذاری - باربرداری را در مراحل اولیه آزمایش با فاصله کمی تکرار می کنند و سپس فاصله سیکل ها را به تدریج افزایش می دهند. این کار موجب می شود J_{IC} با دقت بیشتری محاسبه شود. مطابق استاندارد، فاصله بین سیکل ها نباید از ۰٫۰۱b₀ (۰٫۱۹۷ میلی متر در تحقیق حاضر) بیشتر باشد و میانگین فاصله ها باید نزدیک به ۰٫۰۵b₀ (۰٫۹۸۵ میلی متر در تحقیق حاضر) باشد [۱۷]. در این تحقیق فاصله بین سیکل ها از عدد ۰٫۰۶۵ میلی متر آغاز شد و بتدریج افزایش یافت، بطوریکه بیشینه این فاصله در آخرین سیکل به عدد ۰٫۱۴۶ میلی متر رسید. میانگین فاصله ها در ۱۵ سیکل انجام شده برابر ۰٫۰۹۶ میلی متر محاسبه شد. در مرحله بعدی، مقادیر نرمی که برابر نسبت تغییرات جابجایی به تغییرات نیرو در هر سیکل است، با استفاده از رابطه ۵ برای هر پانزده سیکل بارگذاری - باربرداری محاسبه شدند.

$$C_i = \left(\frac{\Delta V}{\Delta P} \right)_i \quad (5)$$

در رابطه ۵، ΔV و ΔP به ترتیب مقدار افزایش جابجایی و افزایش نیرو در هر سیکل هستند. به دلیل اینکه راستای نیروی وارد بر نمونه آزمایش از مرکز ثقل آن عبور نمی کند، نمونه در حین آزمایش دوران می کند. این دوران باعث بوجود آمدن خطا در مقادیر نرمی محاسبه شده می شود. برای رفع این خطا، نرمی محاسبه شده با رابطه ۵ را با استفاده از رابطه های (A2.14) و (A2.15) استاندارد ASTM E1820 [۱۷] اصلاح می کنند. پس از اصلاح مقادیر نرمی، پارامتر u_i با استفاده از رابطه (۶) برای هر سیکل تعیین شد.

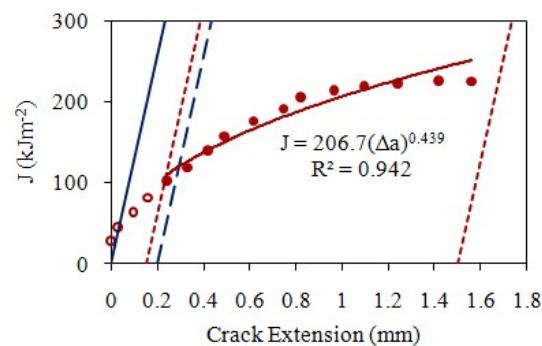
$$u_i = \frac{1}{(B_e E C c_i)^{1/2} + 1} \quad (6)$$

برای رسم نمودار $J-\Delta a$ همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، ابتدا خطی گذرنده از مبدا مختصات با نام خط احداث^۱ و با معادله $J = 2\sigma_Y \Delta a$ رسم می‌شود. در این معادله σ_Y استحکام تسلیم موثر نام دارد و مقدار آن برابر میانگین مقادیر استحکام‌های تسلیم و نهایی است. با استفاده از داده‌های جدول ۲ مقدار σ_Y برابر ۶۴۰ مگاپاسکال تعیین می‌شود. در ادامه، دو خط موازی با خط احداث از نقاط ۰/۱۵ و ۱/۵ روی محور افقی رسم می‌شوند. این دو خط خطوط منع^۲ نام دارند. سپس نقاطی که برای مقادیر رشد ترک و انتگرال آمحاسبه شده‌اند، در صفحه مختصات وارد می‌شوند. بر طبق استاندارد، فقط نقاطی که بین خطوط منع قرار دارند، نقاط معتبر محسوب می‌شوند. این نقاط در شکل ۱۲ بصورت توپر نشان داده شده‌اند. با استفاده از نقاط توپر، یک منحنی توانی برازش می‌شود. معادله منحنی برازش شده در تحقیق حاضر، $J = 206.7 (\Delta a)^{0.439}$ است. در آخرین مرحله، از نقطه ۰/۲ روی محور افقی خطی موازی با خط احداث با نام خط آفست ۰/۲ میلی‌متر رسم می‌شود. مقدار J مربوط به محل برخورد این خط با منحنی برازش شده برابر مقدار چقرمگی مشروط (J_Q) است. J_Q در این تحقیق برابر 120 kJm^{-2} تعیین شده است. اگر رابطه (۱۲) برقرار باشد، J_Q برابر J_{IC} خواهد بود. رابطه ۱۲ شرط برقراری وضعیت کرنش صفحه‌ای در استاندارد ASTM E1820 است.

$$B > 10 \frac{J_Q}{\sigma_Y} \quad (12)$$

ضخامت نمونه آزمایش (B) برابر ۲۰ میلی‌متر است. طرف راست نامسایو نیز پس از جاگذاری مقادیر عددی تعیین شده، برابر ۱۸۷۵ میلی‌متر محاسبه می‌شود. بنابراین رابطه (۱۲) برقرار است و مقدار J_Q محاسبه شده برابر J_{IC} است. در نهایت مقدار K_{IC} با استفاده از رابطه (۱۳) برابر $166 \text{ MPam}^{1/2}$ تعیین می‌شود.

$$K_{IC} = \sqrt{J_{IC} E / (1 - \nu^2)} \quad (13)$$



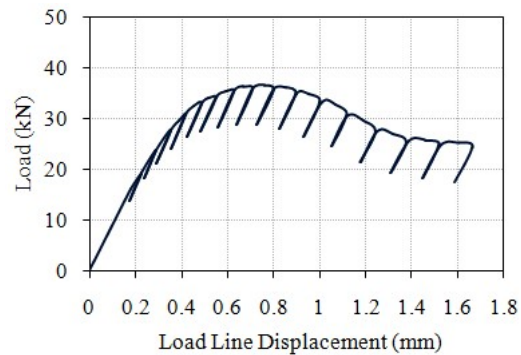
شکل ۱۲- داده های تجربی $J-\Delta a$ برای ماده جوش محیطی

۵- بحث و نتیجه گیری

برای تعیین چقرمگی (K_{IC}) مواد دو روش مستقیم و غیر مستقیم وجود دارد. روش مستقیم با استفاده از استاندارد ASTM E399 انجام می‌شود. در این روش، ضخامت نمونه آزمایش باید به حد کافی



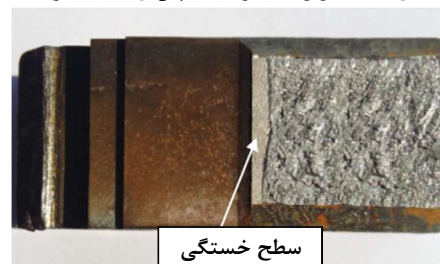
شکل ۸- تصویر یک نمونه CT با ترک خستگی



شکل ۹- منحنی تغییرات نیرو بر حسب جابجایی در راستای نیرو



شکل ۱۰- تصویر یک نمونه CT پس از شکست ترد



شکل ۱۱- سطح خستگی و شکست نمونه آزمایش CT

¹ Construction line

² Exclusion lines

کنترل شده ترمومکانیکی 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 سوزنی می‌شود. این نوع ریزساختار نقش مهمی در استحکام و چقرمگی بالای فولاد دارد. همچنین بعنوان یک الزام و جهت تولید محصولی با خواص مکانیکی همگون سعی می‌شود درزجوش این لوله‌ها نیز از نظر خواص مکانیکی تا حد ممکن شبیه بدنه لوله باشد.

جدول ۳- نتایج آزمایش تعیین چقرمگی شکست ماده جوش محیطی

سیکل	$C_c \times 10^{-8}$ (mN ⁻¹)	Δa (mm)	K (MPam ^{1/2})	J_{PI} (kJm ⁻²)	J (kJm ⁻²)
اول	۰٫۹۵۷۱	۰٫۰۳	۶۵٫۷	۲۵٫۹	۴۴٫۶
دوم	۰٫۹۶۲۲	۰٫۰۹	۷۷٫۰	۳۷٫۷	۶۳٫۴
سوم	۰٫۹۷۱۵	۰٫۱۶	۸۵٫۹	۵۰٫۹	۸۲٫۹
چهارم	۰٫۹۸۱۵	۰٫۲۴	۹۳٫۰	۶۵٫۰	۱۰۲٫۵
پنجم	۰٫۹۹۳۱	۰٫۳۳	۹۷٫۰	۷۹٫۳	۱۲۰٫۰
ششم	۱٫۰۰۵۱	۰٫۴۲	۱۰۱٫۰	۹۵٫۳	۱۳۹٫۵
هفتم	۱٫۰۱۲۴	۰٫۴۹	۱۰۳٫۱	۱۱۳٫۱	۱۵۹٫۲
هشتم	۱٫۰۲۹۴	۰٫۶۱	۱۰۳٫۸	۱۳۱٫۰	۱۷۷٫۷
نهم	۱٫۰۴۵۹	۰٫۷۴	۱۰۲٫۳	۱۴۸٫۰	۱۹۳٫۳
دهم	۱٫۰۵۸۱	۰٫۸۲	۹۷٫۶	۱۶۴٫۲	۲۰۵٫۵
یازدهم	۱٫۰۷۵۵	۰٫۹۶	۹۱٫۰	۱۷۸٫۳	۲۱۴٫۳
دوازدهم	۱٫۰۹۵۹	۱٫۰۹	۸۲٫۶	۱۸۹٫۲	۲۱۹٫۰
سیزدهم	۱٫۱۱۵۹	۱٫۲۴	۷۷٫۶	۱۹۶٫۵	۲۲۲٫۶
چهاردهم	۱٫۱۴۳۹	۱٫۴۲	۷۶٫۶	۲۰۰٫۱	۲۲۵٫۵
پانزدهم	۱٫۱۶۵۱	۱٫۵۶	۷۶٫۳	۲۰۱٫۳	۲۲۶٫۶

بدین منظور ضمن استفاده از جوشکاری اتوماتیک با دستگاه‌های پیشرفته و روش زیرپودری از الکترودهایی با خواص مکانیکی بسیار خوب برای درزجوش استفاده می‌شود چرا که وقتی قرار است لوله‌ای از مرتبه مثلاً "API X65" باشد لازم است هم بدنه و هم درزجوش لوله از نظر نوع و درصد وزنی آلیاژهای تشکیل دهنده و خواص مکانیکی الزامات استاندارد API را برای لوله X65 تامین نمایند. اما هیچکدام از موارد فوق برای جوشکاری محیطی صادق نیستند. این نوع جوشکاری در ایران به صورت دستی و با استفاده از الکترودهای پوشش-دار انجام می‌شود. بنابراین اختلاف قابل توجه مقدار چقرمگی ماده جوش محیطی با چقرمگی بدنه و درزجوش نمی‌تواند موضوع غیرمنتظره‌ای باشد.

با توجه به اختلاف زیاد چقرمگی بدنه و درزجوش با چقرمگی جوش محیطی می‌توان گفت در خطوط لوله انتقال گاز که با استفاده از لوله API X65 ساخته شده‌اند، جوش محیطی در مقایسه با بدنه لوله و درزجوش از مقاومت کمتری در برابر رشد ترک برخوردار است. به همین دلیل بیشترین شکست‌ها در خطوط لوله انتقال گاز ایران در ماده جوش محیطی اتفاق می‌افتند. با توجه به این موضوع لازم است در گام اول در بهره برداری از خطوط لوله موجود، به مقاومت کمتر جوش محیطی در برابر رشد ترک نسبت به بدنه و درزجوش توجه داشت. مراقبت‌ها و بازدیدهای مربوط به این جوش با حساسیت و دقت بیش از پیش انجام شوند و ترک‌های موجود در آن در اولویت اول انجام تعمیرات مربوطه قرار گیرند. در گام دوم لازم است سایر روش‌های

بزرگ باشد تا شرط برقراری وضعیت کرنش صفحه‌ای (نامساوی رابطه ۳) برقرار باشد. برقراری نامساوی (۳) برای بیشتر مواد با دشواری امکان‌پذیر می‌شود. بعنوان مثال چنانچه خواسته شود چقرمگی فولاد ساختمانی با استحکام تسلیم ۳۵۰ MPa و چقرمگی $MPam^{1/2}$ ۲۰۰ با روش مستقیم بدست آید، نیاز به ساخت نمونه آزمایشی با ضخامت ۸۱۶ میلی متر خواهد بود [۱۸]. تهیه نمونه آزمایش با این ابعاد و آزمایش شکست آن بسیار دشوار و پرهزینه خواهد بود. در بعضی موارد بدلیل ضخامت محدود یک سازه، برقراری نامساوی (۳) امکان‌پذیر نیست. بعنوان نمونه ضخامت لازم برای ماده جوش محیطی مورد مطالعه در تحقیق حاضر با توجه به مقادیر محاسبه شده برای استحکام تسلیم و چقرمگی آن، ۱۹۴ میلی متر است. این در حالی است که ضخامت لوله مورد استفاده در تحقیق حاضر ۲۲ میلی متر است. بنابراین این ملاحظه می‌شود که تعیین چقرمگی ماده جوش محیطی با روش مستقیم امکان‌پذیر نیست. در چنین مواقعی از روش‌های غیرمستقیم تعیین K_{IC} استفاده می‌کنند. یعنی چقرمگی بر اساس یک معیار دیگر مانند J_{IC} را با استاندارد ASTM E1820 تعیین می‌کنند و سپس با استفاده از رابطه موجود بین این دو معیار، مقدار K_{IC} را محاسبه می‌کنند. این روشی است که در تحقیق حاضر از آن استفاده شده است. بطور کلی تعیین مستقیم چقرمگی (K_{IC}) بدنه و جوش‌های خطوط لوله انتقال گاز به دلیل جدار نازک بودن آنها و عدم امکان برقراری نامساوی رابطه (۳) در دماهای عادی امکان‌پذیر نیست [۱۹].

در تحقیق حاضر، چقرمگی (K_{IC}) ماده جوش محیطی خطوط لوله انتقال گاز ایران برابر $MPam^{1/2}$ ۱۶۶ تعیین شد. بدلیل اینکه چقرمگی این ماده برای اولین بار محاسبه می‌شود و جوشکاری محیطی انجام شده در کشورهای دیگر نیز از لحاظ روش جوشکاری و متغیرهای مرتبط، متفاوت با جوشکاری انجام شده در کشور ایران می‌باشند، امکان مقایسه نتیجه تحقیق حاضر با تحقیق دیگری وجود ندارد. با توجه به این موضوع برای اینکه بتوان نتیجه بدست آمده را ارزیابی نمود، مقادیر بدست آمده برای استحکام تسلیم و انرژی شاری جوش محیطی از جدول ۲ در رابطه‌های (۱) و (۲) قرار داده می‌شود. مقدار K_{IC} با استفاده از رابطه ۱ برابر $MPam^{1/2}$ ۱۵۸ و با استفاده از رابطه (۲) برابر $MPam^{1/2}$ ۱۳۵ محاسبه می‌شود. اختلاف کم موجود بین مقادیر فوق با مقدار عددی تعیین شده در این بررسی می‌تواند دلیلی برای درستی نتیجه بدست آمده در پژوهش حاضر باشد.

همانطور که در قسمت مقدمه اشاره شد مقادیر چقرمگی محاسبه شده برای بدنه لوله API X65 توسط مراجع [۶]، [۷] و [۸] بترتیب $MPam^{1/2}$ ۳۰۰، $MPam^{1/2}$ ۲۸۲ و $MPam^{1/2}$ ۳۰۸ می‌باشد. این مقادیر برای درزجوش لوله توسط مراجع [۶]، [۷] و [۹] بترتیب $MPam^{1/2}$ ۲۶۷، $MPam^{1/2}$ ۲۵۰ و $MPam^{1/2}$ ۲۶۵ محاسبه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر فوق اختلاف زیادی با چقرمگی محاسبه شده برای جوش محیطی در تحقیق حاضر ($MPam^{1/2}$ ۱۶۶) دارند. بدنه و درزجوش لوله‌های انتقال گاز در کارخانه‌های لوله‌سازی تحت نظارت و استانداردهای سخت‌گیرانه تولید می‌شوند. ورق‌های مورد استفاده در ساخت این لوله‌ها از گروه فولادهای کم‌آلیاژ پراستحکام 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

- [17] American Society for Testing and Materials, ASTM E1820: Standard test method for measurement of fracture toughness, 2013.
- [18] Anderson T. L., Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 3rd Edition, CRC Press, New York, 2005.
- [19] Baron A. A., The generalized diagram of fracture toughness for pipeline steels, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 98, pp. 26-29, 2012.

جوشکاری محیطی که در کشورهای دیگر انجام می‌شوند، مورد بررسی و امکان سنجی قرار گیرند و خواص مکانیکی بویژه چقرمگی ماده جوش آنها با چقرمگی ماده جوش محیطی ایران در تحقیقات آینده مقایسه شوند. در صورت کسب نتایج لازم از این بررسی‌ها و با در نظر گرفتن سایر عوامل تاثیرگذار مانند هزینه تمام شده و سرعت انجام پروژه‌ها، می‌توان در ساخت خطوط لوله جدید از روش‌های بهتر جوشکاری محیطی استفاده نمود.

۶- تقدیر و تشکر

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

۷- مراجع

- [1] Hopkins P. H., The Structural Integrity of Oil and Gas Transmission Pipelines, Elsevier publishers, Vol.1, pp. 1-62, 2002.
- [2] Ju J.B., Kim W. S., and Jang J. I., Variations in DBTT and CTOD within weld heat-affected zone of API X65 pipeline steel, Material Science and Engineering A, Vol. 546, pp. 258-262, 2012.
- [3] Carbal M. A., and Kimber M. J., Pipeline fracture experiences in Australia and north America, Pipeline Fracture Experience, Vol. 3, pp. 1-21, 1997.
- [4] Satoshi I., Ryuji M., and Katsumi M., Safety and Integrity Assessment Technology for Linepipe, JFE Technical Report No.18, pp. 36-42, 2013.
- [5] Medina S. F., Rancel L., Gomez M., and Amo J. M., Prediction of K_{IC} in a high strength bainitic steel, Engineering Failure Analysis, Vol. 35, pp. 524-532, 2013.
- [6] Lee J. S., Ju J. B., Jang J. I., Kim W. S., and Kwon D., 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.
- [7] Yang Z. Z., Tian W., Ma Q. R., Li Y. L., Li J. K., Gao J. Z., and Zhang H. B., 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.
- [8] هاشمی سیدحجت، کیمیابخش مسعود، تعیین تجربی و عددی چقرمگی شکست فولاد لوله‌های انتقال گاز با گروه API X65، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، سال ۴۵، شماره ۲، صفحه ۹-۱، زمستان ۱۳۹۲.
- [9] فرهی علی، هاشمی سیدحجت، تعیین تجربی چقرمگی شکست در درز جوش مارپیچ لوله فولادی ترمومکانیکال، مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، سال ۲، شماره ۴، صفحه ۲۵-۳۵، ۱۳۹۲.
- [10] American Society for Testing and Materials, ASTM E8/E8M: "Standard test methods for tension testing of metallic material", 2011.
- [11] American Society for Testing and Materials, ASTM E23: "Standard test method for notched bar impact testing of metallic material", 2007.
- [12] American Petroleum Institute, API specifications 5L: "Specifications for line pipe", 2010.
- [13] Rolf S. T., and Novak S. T., "Impact testing of metal", ASTM STP 463, American Society for Testing and Materials, pp. 124-159, 1970.
- [14] Barsom J.M., and Rolf S.T., Impact testing of metals, ASTM STP 466, American Society for Testing and Materials, pp. 281-302, 1970.
- [15] Roberts R., and Newton C., Interpretive report on small scale test correlations with K_{IC} data, Welding Research Council Bulletin, Vol. 265, pp. 1-18, 1981.
- [16] American Society for Testing and Materials, ASTM E399: Standard test method for linear – elastic plain strain fracture toughness K_{IC} of metallic materials, 2011.