



بررسی رفتار مکانیکی جوش لوله فولادی انتقال گاز API X70 با نمونه‌های آزمایشگاهی کشش تک محوری و خمش سه نقطه‌ای

محمد رضا موحدی^{۱*} و سید حجت هاشمی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، شاهرود میدان هفتم تیر دانشگاه صنعتی شاهرود دانشکده مهندسی مکانیک

^۲ استاد، بیرجند انتهای بلوار شهید آوینی دانشگاه بیرجند دانشکده مهندسی

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

چکیده

ناحیه جوش لوله فولادی API X70 به دلیل نواقص ذاتی، می‌تواند منطقه مستعد جهت شروع و رشد ترک و نهایتاً آسیب سازه باشد. در تحقیق حاضر، رفتار مکانیکی درز جوش ماریپیچ لوله API X70 در سه ناحیه (فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش) با استفاده از نمونه‌های آزمون کشش تک‌محوری و خمش سه نقطه‌ای بررسی شد. برای تعیین خواص کششی فولاد سه نمونه تخت ماشین‌کاری شده از هر ناحیه استفاده شد؛ همچنین یک نمونه خمش سه نقطه‌ای با شیار اولیه در هر سه ناحیه آزمایش شد. با ترسیم نمودار نیرو-جابجایی مقادیر ویژه نیرو (تسلیم، حداکثر و شکست) و انرژی متناظر با این مقادیر (انرژی شروع و گسترش ترک)، بررسی و نتایج به لحاظ ارتباط با ریز ساختار هر ناحیه تحلیل شد؛ همچنین با رابطه تحلیلی بر اساس میدان خطوط لغزش، تنش تسلیم ماده با استفاده از نمونه خمش سه نقطه‌ای برای هر سه ناحیه تعیین و با نتایج آزمون کشش تک‌محوری مقایسه شد. از آزمون کشش مقادیر میانگین تنش تسلیم برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب ۵۶۰، ۵۱۴ و ۵۰۷ مگاپاسکال و از آزمون خمش سه نقطه‌ای به ترتیب ۵۸۲، ۶۰۴ و ۵۷۵ مگاپاسکال بدست آمد.

کلمات کلیدی: لوله فولادی انتقال گاز؛ فولاد API X70؛ آزمون خمش سه نقطه‌ای؛ درز جوش ماریپیچ؛ انرژی شکست استاتیکی.

Experimental Study of Mechanical Behavior of Welded API X70 Pipe Steel using Tensile and Three Point Bend Specimens

M. R. Movahedi^{1,*}, S. H. Hashemi²

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran.

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

Abstract

The welded zone of API X70 steel pipe, due to the inherent defects of welding, is a potential area for initiation and propagation of cracks which can eventually lead to damage of the structure. In this research, mechanical behavior of spiral seam weld was evaluated in API X70 pipe steel in three zones (base metal, HAZ and weld metal) using uniaxial tensile and three point bend (3PB) experiments. Three tensile specimens were used in each zone for measurement of mechanical properties. For studying the mechanical behaviour of the pipe, one specimen with 3PB geometry was tested for each zone. Specific values including yield, peak and final load for 3PB specimen were determined from load-displacement plots. The associated energy for each load plus initiation and propagation energies were calculated and the results were analyzed in relation to microstructure in each zone. With an analytical equation based on slip-line field analysis, yield strength was determined with 3PB specimen in each zone and compared with the result of uniaxial tensile experiment. From uniaxial tensile experiment, yield strength levels of 560, 514 and 507 MPa were found for base metal, HAZ and weld metal respectively and from 3PB experiment 604, 582, 575 MPa respectively.

Keywords: Pipe Line Steel; API X70; Three Point Bending Test; Spiral Seam Weld; Static Fracture Energy.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: +۹۸۹۱۳۲۱۹۵۳۴۲؛ فکس: +۹۸۸۵۶۳۲۲۰۲۱۴۰

آدرس پست الکترونیک: m.movahedi@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

لوله فولادی جوشکاری شده API X70 بطور گسترده در صنعت انتقال انرژی (نفت و گاز طبیعی) ایران استفاده می‌شود. این لوله‌های فولادی از فولاد با ریز ساختار فریت-پرلیت به منظور دستیابی به استحکام بالا توام با چقرمگی مناسب ساخته می‌شوند. این فولادها زیر شاخه‌ای، از فولادهای پر استحکام و کم آلیاژ^۱ است که حاوی مقدار کربن (۰/۵-۱ درصد وزنی) و مقادیر ترکیب میکروآلیاژی (کمتر از ۰/۱ درصد وزنی) مثل نیوبوم، وانادیوم، تیتانیوم و مولیبدن است [۱]؛ همچنین فرآیند نورد کنترل شده ترمومکانیکال^۲ به همراه خنک کاری سریع^۳ در ساخت این فولادها استفاده می‌شود. این لوله‌ها با درز جوش مستقیم و مارپیچ بر اساس استاندارد API با قطر خارجی ۵۰۸ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر و با ضخامت جداره ۶ تا ۲۰ میلی‌متر در طول‌های ۸ تا ۱۸ متر تولید می‌شود [۲]. توزیع تنش در لوله‌ها با درز جوش مارپیچ یکنواخت‌تر از لوله‌ها با درز جوش مستقیم است، زیرا در لوله‌های با درز جوش مارپیچ، تنش عمودی وارد بر درز جوش به دو مولفه‌ی طولی و محیطی تجزیه می‌شود [۳]. آزمون خمش سه نقطه‌ای در استاندارد ASTM E1820 برای تعیین چقرمگی شکست (که معیاری از مقاومت ماده در برابر شروع و رشد ترک است) پیشنهاد شده است. [۴]. از این آزمون پارامترهای مهم مکانیک شکست از قبیل، انگرال جی و گشودگی نوک ترک^۴ با استفاده از نمودارهای تجربی نیرو-جابجایی و نیرو-گشودگی دهانه ترک^۵ تعیین می‌شود [۵].

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی برای بررسی رفتار مکانیکی در نواحی مختلف درز جوش لوله‌های فولادهای انتقال گاز شده است. چن و همکارانش [۶ و ۷]، با انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای روی نمونه‌های با شیار در فلز پایه، فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت، چقرمگی شکست را در نواحی مختلف لوله فولادی درز جوش مارپیچ و لوله فولادی درز جوش مستقیم API X80 تعیین و با هم مقایسه کردند.

هاشمی و همکارانش [۸ و ۹]، با ساخت نمونه‌های ضربه شاری و با قرار دادن شیار در فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش، خواص مکانیکی در درز جوش را بر اساس آزمون ضربه شاری برای لوله‌های فولادی API X65 و X70 API مقایسه کردند؛ همچنین آن‌ها انرژی شکست را برای این نواحی تعیین و با هم مقایسه کردند. بر این اساس انرژی شکست در آزمون ضربه شاری برای فلز پایه، بیشتر از ناحیه‌ی متأثر از حرارت و فلز جوش گزارش شد. هرا و همکارانش [۱۰]، با استخراج نمونه‌های استاندارد کشش-فشار و نمونه‌های غیر استاندارد خمش سه نقطه‌ای منحنی شکل از درز جوش لوله فولادی API X52 چقرمگی شکست در درز جوش این لوله‌های فولادی را تعیین کرده‌اند. بلترا و همکارانش [۱۱]، با انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای تحت بارگذاری با دامنه ثابت و متغیر، رشد ترک خستگی در فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش لوله فولادی API X70 را با هم مقایسه کردند.

در تحقیق حاضر ابتدا تنش تسلیم فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش لوله API X70 با استفاده از آزمون کشش تک‌محوری تعیین شد. سپس با انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای (تحت بارگذاری در شرایط آزمایشگاهی به صورت شبه استاتیکی با سرعت ۰/۳۳ میلی‌متر بر ثانیه فک متحرک ماشینی)، تنش تسلیم بوسیله یک رابطه تحلیلی (بر مبانی میدان خطوط لغزش) از نمودار نیرو-جابجایی این آزمون برای هر سه ناحیه تعیین شد. نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای با نتایج آزمون کشش تک‌محوری مقایسه و خطای این رابطه تحلیلی برای این فولاد بررسی شد. در ادامه با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای نمودارهای نیرو-جابجایی، نیرو-گشودگی دهانه ترک و انرژی-جابجایی در فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش با هم مقایسه و نتایج به لحاظ ارتباط با ریز ساختار برای هر سه ناحیه بررسی و تحلیل شد؛ همچنین از این آزمون مقادیر ویژه نیرو شامل، نیروی تسلیم، حداکثر و شکست و انرژی متناظر با این مقادیر شامل، انرژی شروع و گسترش ترک برای این فولاد در هر سه ناحیه بررسی و مقایسه شد. در آخر با بررسی سطح شکست نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای میزان رشد ترک نرم در هر سه ناحیه مقایسه شد.

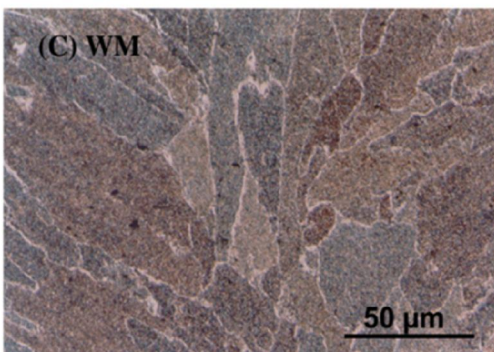
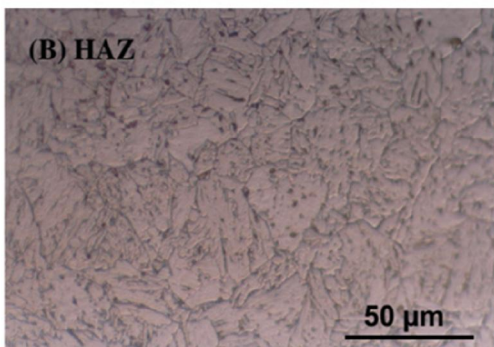
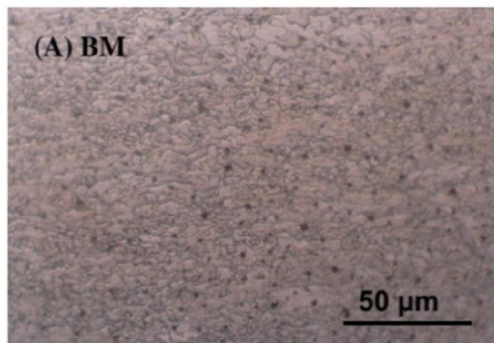
¹ High Strength Low Alloy (HSLA)

² Thermo Mechanical Control Processing (TMCP)

³ Accelerated Cooling

⁴ Crack Tip Opening Displacement (CTOD)

⁵ Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)



شکل ۱- ریزساختار مقطع جوش، (A) فلز پایه، (B) ناحیه متأثر از حرارت، (C) فلز جوش [۱۲]

برای تعیین خواص کششی جوش مارپیچ لوله فولادی API X70، نه نمونه کشش (سه نمونه از هر ناحیه) با ابعادی مطابق شکل ۲ (با ضخامت یک میلی‌متر) بر اساس استاندارد ASTM A370-14 ساخته شد [۱۳]. به این منظور در ابتدا صفحه‌ای از لوله با هوا برش بریده شد و با ماشین‌کاری به بلوکی با ابعاد شکل ۳ تبدیل شد. در نهایت نمونه‌های کششی از فلز پایه تا فلز جوش بوسیله وایرکات از بلوک تهیه شده استخراج شد. شکل ۴ فرآیند تهیه بلوک از صفحه جدا شده

۲- معرفی ماده و تعیین خواص کششی

لوله فولادی مورد استفاده، از نوع API X70 است که مشخصات آن در جدول ۱ داده شده است [۱۲]. جوش این لوله فولادی، از نوع مارپیچ زیرپودری و زاویه درز جوش ۲۲ درجه است. در جدول ۲ جزئیات روش جوشکاری و مشخصات سیم آن آمده است؛ همچنین شکل ۱ ریز ساختار فولاد به کار رفته در تحقیق حاضر در ناحیه درز جوش مارپیچ را نشان می‌دهد [۱۲]. بر اساس این شکل ریز ساختار فولاد در سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب باینیت-فریت سوزنی با دانه‌های ریز، باینیت-فریت سوزنی با دانه‌های درشت و فریت سوزنی با دانه‌های متبلور شده درشت است [۹].

جدول ۱- هندسه و مشخصات طراحی لوله [۱۲]

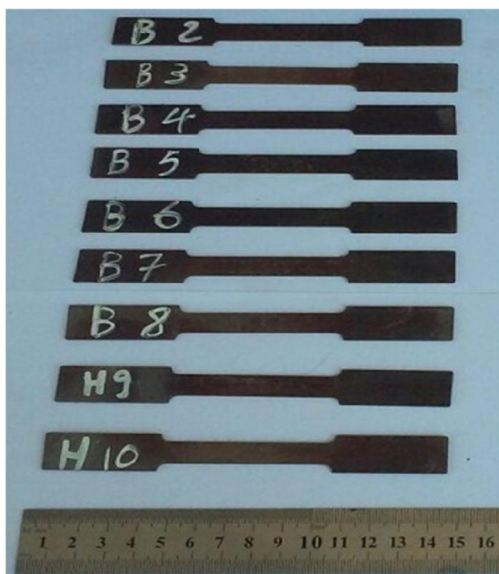
جنس	API X70
فرآیند تولید	TMCP
نوع جوش	مارپیچی (زیرپودری)
زاویه جوش (درجه)	۲۲
قطر خارجی (mm)	۱۴۲۲
ضخامت (mm)	۱۹/۸

جدول ۲- جزئیات روش و سیم جوشکاری

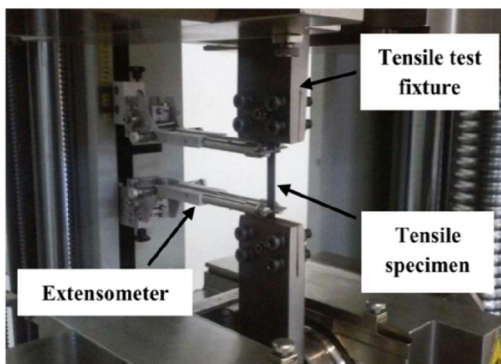
پاس جوش	تعداد سیم	قطر سیم (mm)	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوش (m/min)
پاس داخلی	۱	۳/۲	۷۰۰	۳۱	۱/۲
پاس داخلی	۲	۳/۲	۷۰۰	۳۳	۱/۲
پاس خارجی	۱	۴	۸۰۰	۳۱	۱/۲
پاس خارجی	۲	۳/۲	۸۰۰	۳۳	۱/۲

از لوله را نشان می‌دهد. با توجه به این که ضخامت لوله ۱۹/۸ میلی‌متر است، برای ساخت نمونه‌ها نیاز به ماشین‌کاری صفحه جدا شده از لوله است. در شکل ۵ نمونه‌های نهایی آزمون کشش (تهیه شده بوسیله وایرکات) نشان داده شده است.

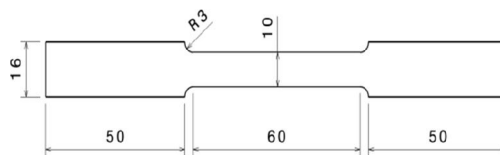
به دلیل ضخامت کم (یک میلی‌متر) نمونه‌های آزمون کشش، فک‌های دستگاه ۶۰۰ کیلو نیوتنی شرکت زونیک قادر به گرفتن آن‌ها نبودند به همین منظور قیدوبندی مطابق با شکل ۶ طراحی و ساخته شد.



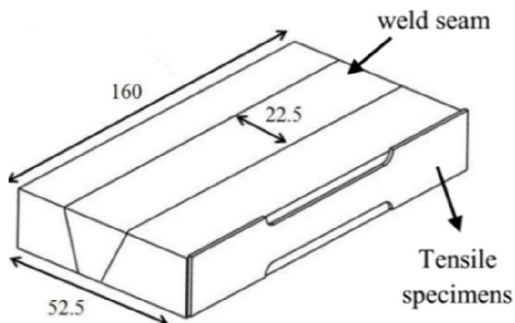
شکل ۵- نمونه‌های آزمون کشش استخراج شده بوسیله وایرکات از فلز پایه تا فلز جوش از بدنه لوله API X70



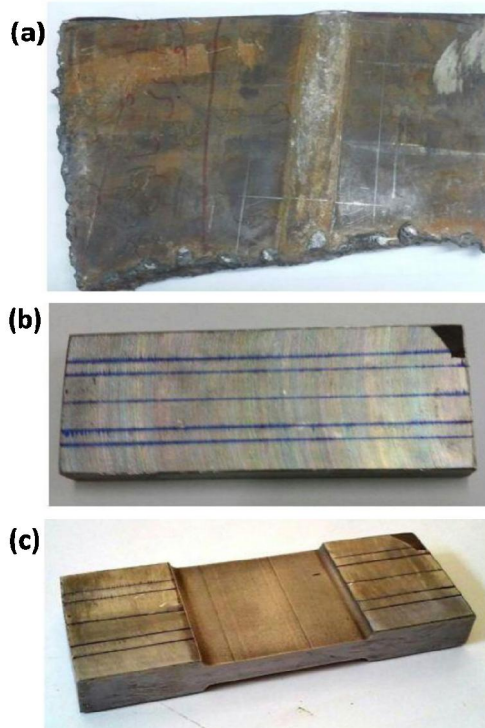
شکل ۶- قیدوبندی ساخته شده برای آزمون کشش تک محوری روی ماشین آزمایشگاهی زونیک



شکل ۲- هندسه نمونه آزمون کشش (کلیه ابعاد به میلی‌متر)

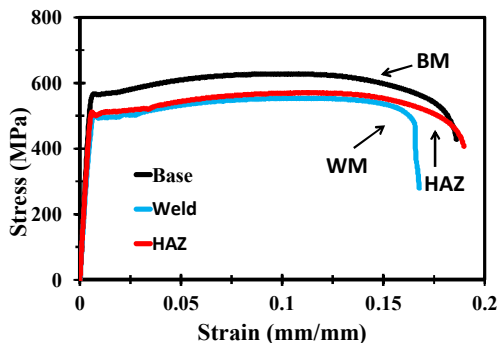


شکل ۳- ابعاد بلوک ماشین‌کاری شده برای تهیه نمونه‌های آزمون کشش (همه ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۴- فرآیند تهیه بلوک (a) صفحه جدا شده از لوله (b) ماشین‌کاری صفحه (c) تهیه شکل نمونه با وایرکات

شده در شکل ۱۰ (با طول، عرض و ضخامت ۱۲۰ و ۲۴ و ۱۲ میلی‌متر و عمق شیار اولیه ۱۵ میلی‌متر) ساخته شد. شکل ۱۱ نمونه‌های نهایی ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمودارهای تنش کرنش برای فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش

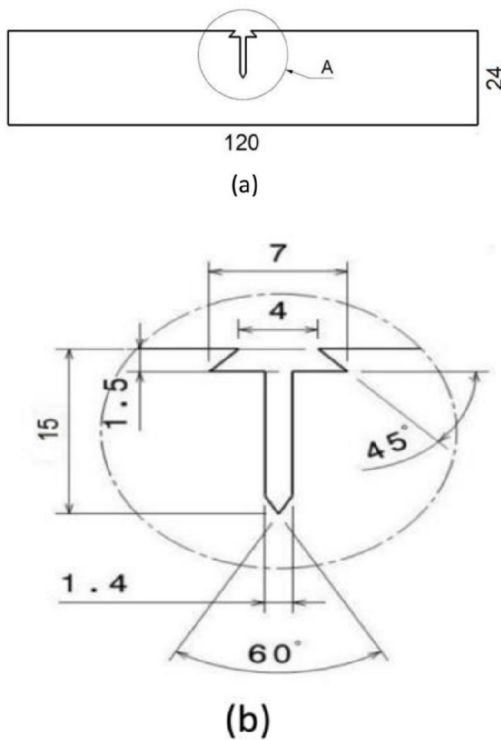
به منظور تعیین خواص کششی درزجوش ماریچ لوله API X70 نه آزمون کشش تک محوری (سه آزمون از فلز پایه، سه آزمون از فلز جوش و سه آزمون از ناحیه متأثر از حرارت) انجام شد. نتایج آزمون کشش برای هر یک از نواحی مقطع لوله در جدول ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۷ میانگین نمودارهای تنش-کرنش برای فلز پایه (نمونه‌ای که دورترین فاصله از درزجوش دارد)، ناحیه متأثر از حرارت (نمونه‌ای که یک میلی‌متر از درزجوش فاصله دارد) و فلز جوش (نمونه‌ای که در مرکز درزجوش قرار دارد) نشان داده شده است.

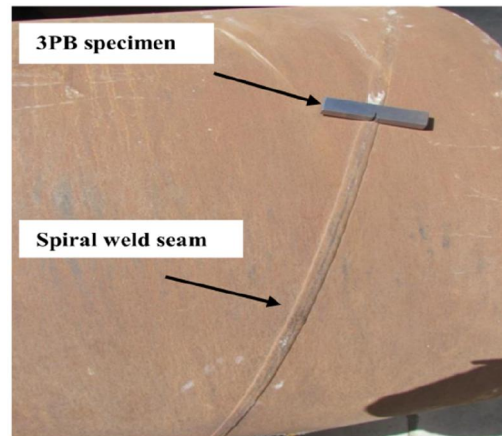
برای ساخت نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای در ابتدا صفحه‌ای از بدنه لوله API X70 جدا شد. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب تصویر بدنه لوله API X70 و موقعیت نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای در هر ناحیه (فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش) را نشان می‌دهد. سپس بر اساس استاندارد ASTM E1820 در هر ناحیه یک نمونه با ابعاد نشان داده

جدول ۳- خواص کششی اندازه‌گیری شده برای سه ناحیه در مقطع جوش

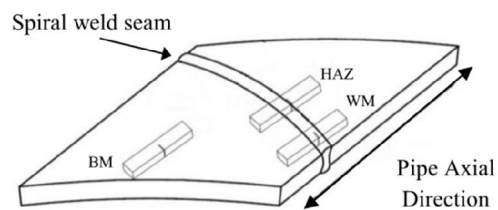
ماده	ردیف	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کشامد (%)	مدول یانگ (MPa)
	۱	۵۶۷	۶۲۸	۱۸	۱۹۸
فلز پایه	۲	۵۶۰	۵۹۸	۲۰	۱۹۹
	۳	۵۵۴	۵۹۲	۱۷	۱۹۰
میانگین		۵۶۰	۶۰۶	۱۸	۱۹۶
	۴	۵۲۵	۵۴۹	۲۰	۲۱۵
ناحیه متأثر از حرارت	۵	۵۱۸	۵۴۳	۱۹	۲۲۲
	۶	۵۰۱	۵۵۱	۱۹	۲۱۳
میانگین		۵۱۴	۵۴۷	۱۹	۲۱۷
	۷	۵۱۵	۵۴۰	۱۶	۱۹۷
فلز جوش	۸	۴۹۹	۵۳۷	۱۵	۱۹۸
	۹	۵۰۹	۵۳۳	۱۷	۲۰۰
میانگین		۵۰۷	۵۳۶	۱۶	۱۹۸



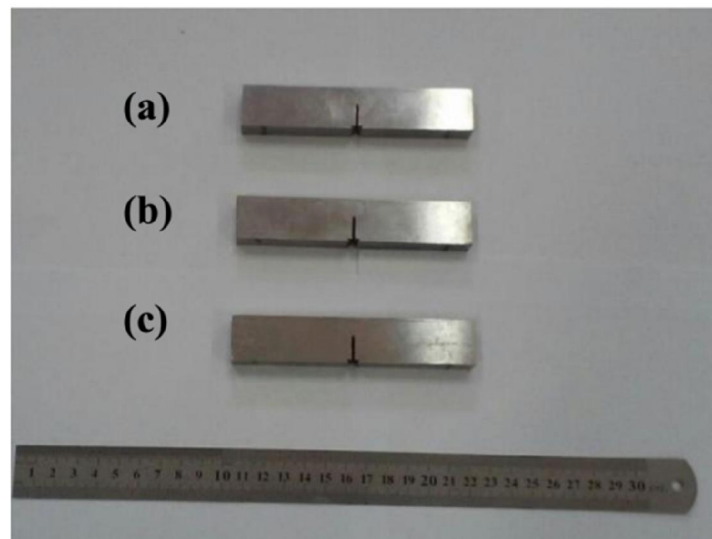
شکل ۱۰- (a) ابعاد نمونه خمش سه نقطه‌ای (b) جزئیات شیار نمونه (همه ابعاد به میلی‌متر)



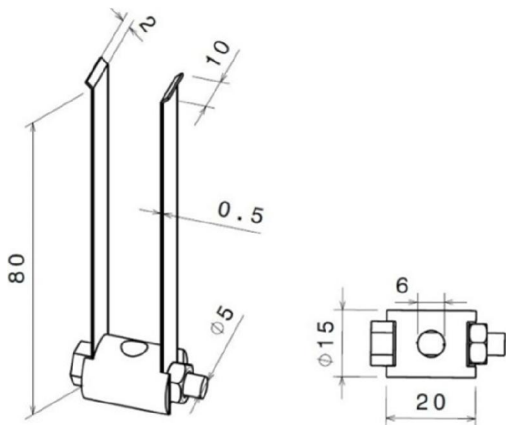
شکل ۸- لوله API X70 با درز جوش مارپیچ به همراه نمونه استاندارد خمش سه نقطه‌ای



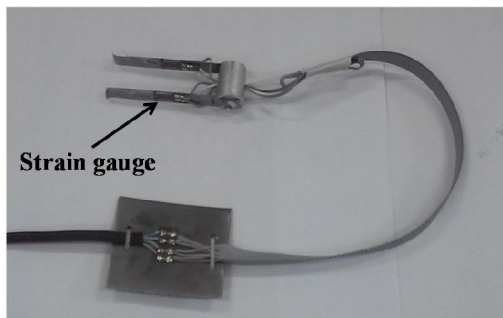
شکل ۹- نمایش شماتیک مکان شیار نمونه‌ها در لوله API X70



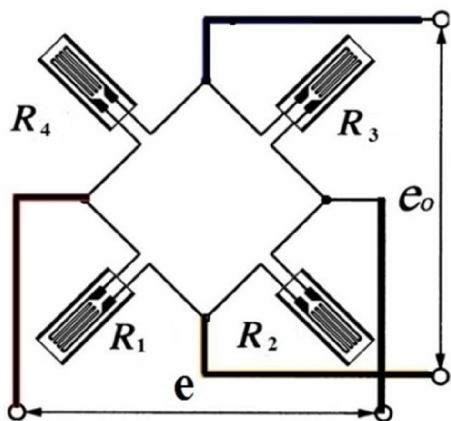
شکل ۱۱- تصویر نمونه‌های استاندارد آزمون خمش سه نقطه‌ای، (a) شیار در فلز پایه (b) شیار در فلز جوش (c) شیار در ناحیه متأثر از حرارت



شکل ۱۲- نقشه ابزار اندازه‌گیری گشودگی دهانه ترک (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۱۳- ابزار اندازه‌گیری گشودگی دهانه ترک به همراه کرنش‌سنج‌های متصل شده به آن



شکل ۱۴- مدار الکتریکی پل واتسون استفاده شده در تحقیق حاضر

برای تعیین گشودگی نوک ترک ابزار اندازه‌گیری گشودگی دهانه ترک مطابق با استاندارد ASTM E1820 طراحی و ساخته شد که شامل دو تیغه موازی و هم‌اندازه (از جنس فولاد انعطاف پذیر - به این منظور از فیبر تنظیم دهانه شمع خودرو با فولاد فنری مرغوب استفاده شده است) و بدنه (قطعه‌ای که تیغه‌ها بوسیله پیچ و مهره به آن متصل شده‌اند) است (شکل ۱۲). در حین آزمون خمش سه نقطه‌ای با باز شدن ترک، تیغه‌های که در شیار دهانه ترک قرار گرفته، از هم باز می‌شوند. میزان گشودگی تیغه‌های ابزار از یکدیگر، بوسیله کرنش‌سنج‌های تعیین می‌شود که در وجوه تیغه‌های ابزار چسبیده شده است (شکل ۱۳). برای اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها توسط کرنش‌سنج‌ها، از مدار الکتریکی پل واتسون استفاده شد (شکل ۱۴). مدار واتسون استفاده شده در این تحقیق شامل، چهار مقاومت (کرنش‌سنج) است که به دو طرفه تیغه‌های ابزار چسبانده شده است. کرنش‌سنج‌های متصل شده به تیغه‌های ابزار، با باز شدن تیغه‌ها، در هر لحظه مقاومت الکتریکی آن‌ها تغییر می‌کند. برای تعیین تغییرات مقاومت‌های که ناشی از باز شدن تیغه‌های ابزار است، مدار واتسون باید تحت ولتاژ تحریک قرار بگیرد (e) و تغییرات ولتاژ خروجی (e₀) ثبت شود. ایجاد ولتاژ تحریک و ثبت ولتاژ خروجی مدار بوسیله دیتا لاگر انجام شد. در نهایت برای تعیین رابطه بین ولتاژ خروجی مدار و میزان گشودگی تیغه‌ها (گشودگی دهانه ترک)، کالیبراسیون ابزار به صورت استاتیکی با قرار دادن تیغه‌ها در فواصل معین و اندازه‌گیری ولتاژ انجام شد (شکل ۱۵).

رابطه بین ولتاژ خروجی مدار (بر حسب ولت) با میزان گشودگی تیغه‌ها (بر حسب میلی‌متر) به صورت رابطه (۱) بدست آمد.

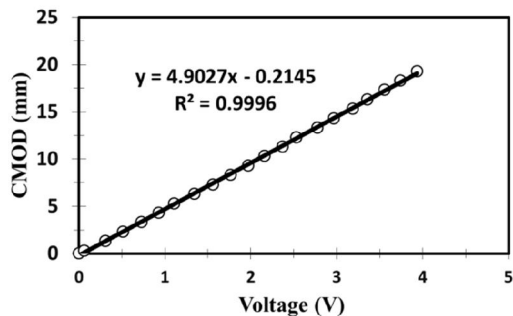
$$\delta = 4.9027V - 0.2145 \quad (1)$$

در این رابطه V ولتاژ خروجی مدار بر حسب ولت و δ جابه‌جایی بر حسب میلی‌متر است.

برای انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای قیدوبندی مطابق شکل ۱۶ برای ماشین استاندارد آزمون کشش ۶۰۰ کیلو نیوتنی شرکت زونیک طراحی و ساخته شد. در شکل ۱۶ آزمون خمش سه نقطه‌ای به همراه ابزار اندازه‌گیری گشودگی دهانه ترک نشان داده شده است.

ترتیب برابر ۵۶۰، ۵۱۴ و ۵۰۷ مگاپاسکال و مقادیر میانگین تنش نهایی به ترتیب ۶۰۶، ۵۴۷ و ۵۳۶ مگاپاسکال است؛ همچنین مقادیر میانگین کشامد برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب برابر ۱۸، ۱۹ و ۱۶ درصد است. دیده می‌شود که فلز پایه بیشترین تنش تسلیم (۵۶۰ مگاپاسکال) و فلز جوش، کمترین درصد کشامد (۱۶) را دارد که دلیل آن تفاوت در ریز ساختار خاص ریختگی و سختی بالای ناحیه جوش (۲۴۰ در مقیاس سختی ویکرز) است [۱۲ و ۱۴].

به منظور بررسی رفتار مکانیکی درز جوش مارپیچ لوله فولادی API X70 آزمون خمش سه نقطه‌ای به صورت شبه استاتیکی با نرخ کرنش بسیار کم و در حالت کنترل جابجایی با اعمال جابجایی یکسان (۲۰ میلی‌متر) روی سه نمونه با شیار در فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش انجام شد. داده‌های تجربی نیرو-جابجایی، نیرو-گشودگی دهانه ترک و انرژی جذب شده بر حسب جابجایی باهم مقایسه شد.

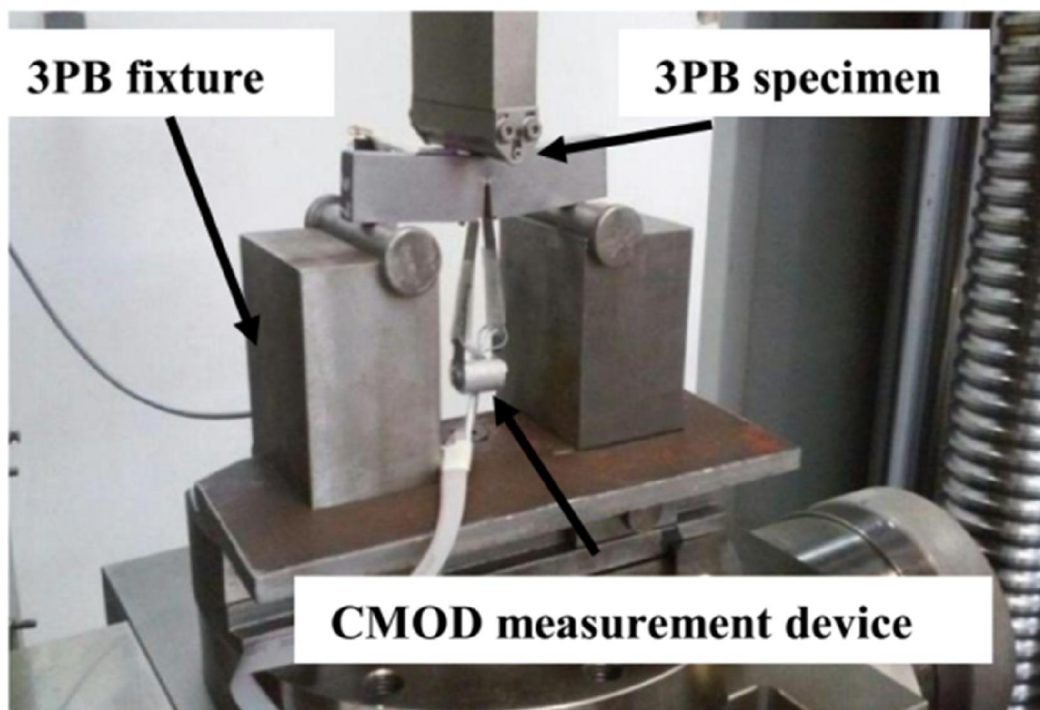


شکل ۱۵- نمودار کالیبره کردن ابزار اندازه‌گیری گشودگی دهانه ترک

۳- نتایج و بحث

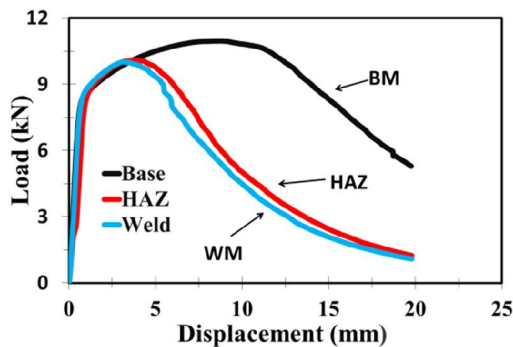
۳-۱- آزمون کشش تک‌محوری

در این تحقیق آزمون کشش تک‌محوری با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی تخت با ضخامت یک میلی‌متر انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده مقادیر میانگین تنش تسلیم برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به

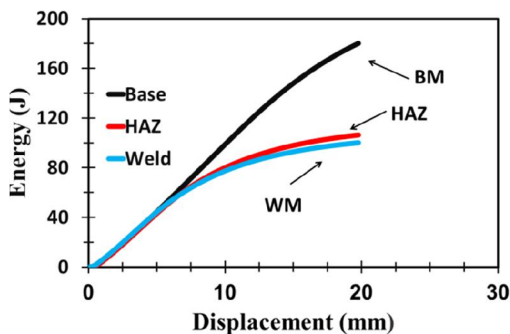


شکل ۱۶- آزمون خمش سه نقطه‌ای به همراه قیدوبند و ابزار اندازه‌گیری گشودگی دهانه ترک

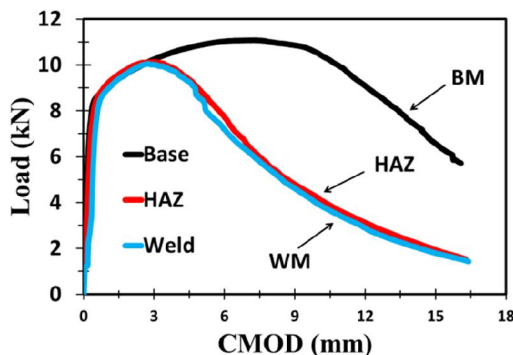
بیشتری در تسلیم نسبت به ناحیه متأثر از حرارت (۳/۸) درصد بیشتر) و فلز جوش (۵/۱ درصد بیشتر) نشان می‌دهد که دلیل آن ریز ساختار خاص فریت سوزنی درهم تنیده در



شکل ۱۷- مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی ماشین برای سه ناحیه در نمونه خمش سه نقطه‌ای



شکل ۱۸- مقایسه نمودار انرژی-تغییر مکان حاصل از نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای برای سه ناحیه



شکل ۱۹- نمودار نیرو-گشودگی دهانه ترک در نمونه خمش سه نقطه‌ای برای سه ناحیه

به علاوه مقادیر ویژه نیرو (نیروی تسلیم، حداکثر و شکست) و انرژی متناظر با این مقادیر شامل، انرژی شروع و گسترش ترک بررسی و مقایسه شد. شکل ۱۷ مقایسه نمودارهای نیرو-جاب‌جایی در درز جوش فولاد لوله API X70 را نشان می‌دهد. به دلیل ریز ساختار فریت سوزنی با دانه‌های ریز در فلز پایه، حداکثر نیرو در این ناحیه دیده می‌شود که استحکام و چقرمگی بالایی برای فلز پایه ایجاد می‌کند. بر اساس شکل ۱ با نزدیک شدن از فلز پایه به ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش، اندازه دانه‌ها در اثر حرارت ورودی فرآیند جوش‌کاری، درشت می‌شود؛ در نتیجه استحکام و چقرمگی ماده کاهش می‌یابد.

شکل ۱۸ نمودار انرژی جذب شده نسبت به جابجایی برای سه ناحیه را نشان می‌دهد. انرژی جذب شده در پایان آزمون به ازای جابجایی یکسان ۲۰ میلی‌متر برای فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب ۱۸۰، ۱۰۶ و ۱۰۰ ژول بدست آمده است. علت جذب انرژی بالا در فلز پایه، بر اساس شکل ۱۸ ریز ساختار فریت سوزنی با دانه‌های ریز است که استحکام و چقرمگی بالا، در این ناحیه بوجود می‌آورد.

شکل ۱۹ نمودار نیرو برحسب گشودگی دهانه ترک در هر سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار حداکثر گشودگی دهانه ترک به ازای تغییر مکان یکسان (۲۰ میلی‌متر) برای نمونه با شیار در فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب ۱۶/۱، ۱۶/۳ و ۱۷ میلی‌متر است. در فلز جوش به دلیل حرارت ورودی فرآیند جوش‌کاری دانه‌بندی درشت شده (شکل ۱C) و استحکام و چقرمگی ماده کاهش پیدا می‌کند؛ در نتیجه حداکثر میزان گشودگی دهانه ترک در فلز جوش بیشتر از فلز پایه است.

در جدول ۴ نیروی تسلیم، نیروی حداکثر و نیروی نهایی همراه با جابجایی و انرژی متناظر با این مقادیر برای نواحی مختلف مقطع جوش لوله فولادی API X70 ارائه شده است.

با توجه به جدول ۴ مقدار نیروی تسلیم در آزمون خمش سه نقطه‌ای برای فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب برابر ۸/۲، ۷/۹ و ۷/۸ کیلو نیوتن بدست آمد. مشاهده می‌شود، در بارگذاری خمشی فلز پایه مقاومت

جدول ۴- مقادیر ویژه نمودار نیرو-جابجایی و انرژی متناظر با این مقادیر در آزمون خمش سه نقطه‌ای برای سه ناحیه

موقعیت	کمیت	فلز پایه	ناحیه متأثر از حرارت	فلز جوش
نیرو (kN)	۸/۲	۷/۹	۷/۸	۷/۸
جابجایی (mm)	۰/۷	۰/۹	۰/۷	۰/۷
انرژی (J)	۳/۲	۳/۰	۲/۷	۲/۷
نیرو (kN)	۱۱/۰	۱۰/۱	۱۰/۰	۱۰/۰
جابجایی (mm)	۸/۴	۳/۹	۳/۱	۳/۱
انرژی (J)	۸۱/۴	۳۱/۹	۲۵/۸	۲۵/۸
نیرو (kN)	۵/۳	۱/۳	۱/۱	۱/۱
جابجایی (mm)	۱۹/۸	۱۹/۸	۱۹/۸	۱۹/۸
انرژی (J)	۱۸۰/۰	۱۰۶/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰

نمونه خمش سه نقطه‌ای، L فاصله تکیه‌گاه‌ها (براساس استاندارد ASTM E1820 چهار برابر عرض نمونه است) در آزمون خمش سه نقطه‌ای، a طول شیار نمونه و k_v ثابت بی بعد است. در تحقیق حاضر با توجه به مرجع [۱۵] k_v برابر ۱/۳۴ در نظر گرفته شد.

بوسیله رابطه (۲) تنش تسلیم بر اساس نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای در جدول ۵ برای هر سه ناحیه تعیین شده و با نتایج آزمون کشش تک محوری مقایسه شده است.

جدول ۵- مقایسه تنش تسلیم بدست آمده از آزمون خمش سه نقطه‌ای با آزمون کشش تک محوری برای سه ناحیه لوله API X70

کمیت	ناحیه	آزمون	
		خمش سه نقطه‌ای	کشش تک محوری
فلز پایه	۶۰۴	۵۶۰	۷/۸
ناحیه متأثر از حرارت	۵۸۲	۵۱۴	۱۳/۲
فلز جوش	۵۷۵	۵۰۷	۱۳/۴

با توجه به جدول ۵ مقادیر بدست آمده برای تنش تسلیم از آزمون خمش سه نقطه‌ای بوسیله رابطه (۲) بیشتر از مقادیر واقعی حاصل از آزمون کشش تخمین زده شده است. دلیل آن احتمالاً تفاوت در شیار اولیه‌ی نمونه استفاده شده در تحقیق حاضر (شکل ۱۰) و نیاز به استفاده مقادیر دقیق‌تر k_0 است.

۳-۳- بررسی سطح شکست نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای

بعد از انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای برای بررسی سطح شکست و تعیین میزان رشد ترک نرم، نمونه‌ها در نیتروژن مایع شکسته شدند. شکل ۲۰ نمونه سالم، بعد از بارگذاری و بعد از شکستن در نیتروژن مایع (برای نمونه با شیار در فلز پایه) را نشان می‌دهد.

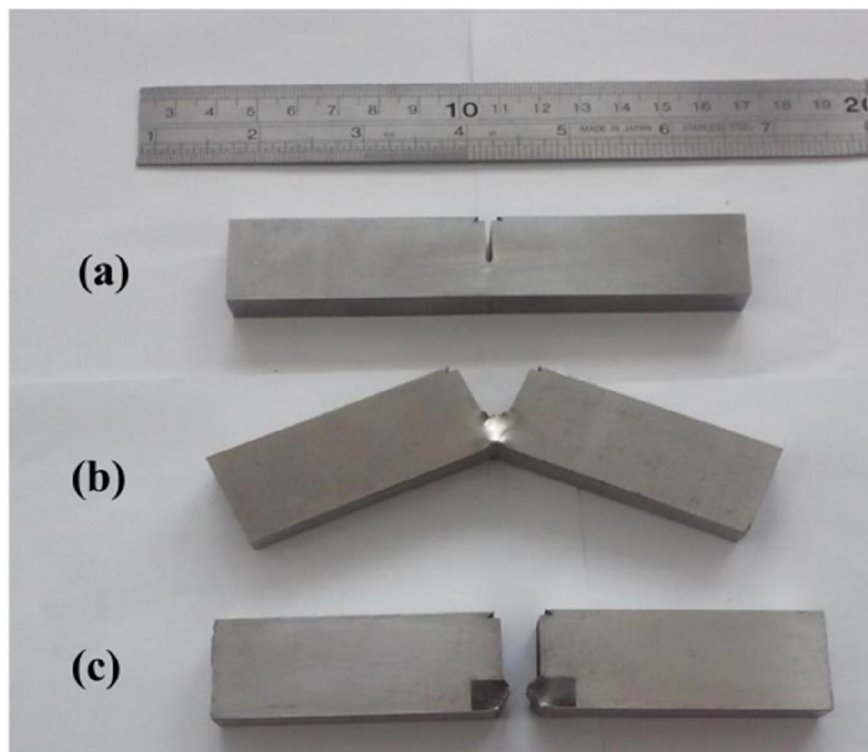
این ناحیه است. به طور مشابه مقدار نیروی حداکثر برای فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب ۱۱/۰ (در جابجایی ۸/۴)، ۱۰/۱ (در جابجایی ۳/۹) و ۱۰/۰ (در جابجایی ۳/۱) کیلونیوتن بدست آمد. مقدار نیروی شکست در انتهای آزمون برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب برابر ۵/۳، ۱/۳ و ۱/۱ کیلونیوتن بدست آمده است. دیده می‌شود، فلز پایه حتی در انتهای آزمون نیز مقدار قابل توجهی نیرو (۵/۳ کیلونیوتن) تحمل می‌کند.

۲-۳- تعیین تنش تسلیم از آزمون خمش سه نقطه‌ای و مقایسه نتایج

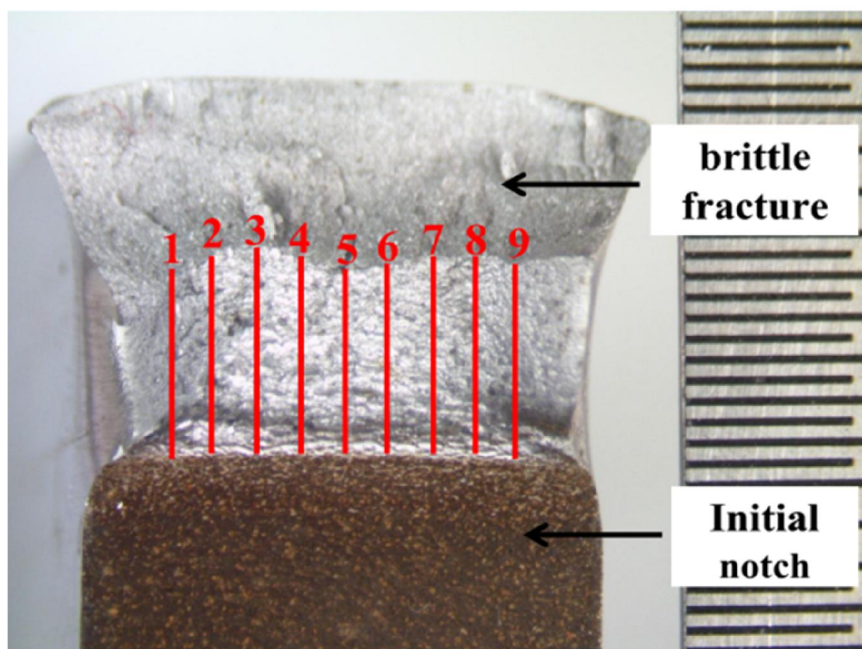
با استفاده از تحلیل میدان خطوط لغزش، رابطه تنش تسلیم و نیروی تسلیم در نمونه خمش سه نقطه‌ای با شیار V شکل به صورت رابطه (۲) است [۱۵ و ۱۶]:

$$\sigma_y = \frac{P_y L}{B(W-a)^2 k_0} \quad (2)$$

در رابطه (۲) σ_y تنش تسلیم ماده، P_y نیروی تسلیم در آزمون خمش سه نقطه‌ای، B و W به ترتیب ضخامت و عرض



شکل ۲۰- نمونه خمش سه نقطه‌ای (a) قبل از بارگذاری (b) بعد از بارگذاری (c) بعد از شکست ترد در نیتروژن مایع



شکل ۲۱- سطح شکست نمونه با شیار در فلز پایه به همراه میزان رشد ترک نرم

ریختگی (فریت سوزنی با دانه‌های متبلور شده درشت) و سختی بالای ناحیه جوش (۲۴۰) در مقیاس سختی ویکرز) است.

۵- مقدار نیروی تسلیم در آزمون خمش سه نقطه‌ای برای فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب برابر $۸/۲$ ، $۷/۹$ و $۷/۸$ کیلونیوتن بدست آمد. مشاهده می‌شود، در بارگذاری خمشی فلز پایه مقاومت بیشتری در تسلیم نسبت به ناحیه متأثر از حرارت (۳/۸ درصد بیشتر) و فلز جوش (۵/۱ درصد بیشتر) نشان می‌دهد که دلیل آن ریز ساختار خاص فریت سوزنی درهم تنیده در این ناحیه است.

۶- با ترسیم نمودار نیرو-کشودگی دهانه ترک در آزمون خمش سه نقطه‌ای برای سه ناحیه در انتهای آزمون به ازای تغییر مکان برابر (۲۰ میلی‌متر)، حداکثر کشودگی دهانه ترک برای فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب $۱۶/۳$ ، $۱۶/۱$ و ۱۷ میلی‌متر تعیین شد.

۷- مقدار تنش تسلیم بدست آمده از آزمون خمش سه نقطه‌ای (بوسیله رابطه تحلیلی) برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب ۶۰۴ ، ۵۸۲ و ۵۷۵ مگاپاسکال و خطای این مقادیر (براساس آزمون کشش تک محوری) به ترتیب $۷/۸$ ، $۱۳/۲$ و $۱۳/۴$ درصد تعیین شد. دلیل این خطا می‌تواند تفاوت در شیار اولیه نمونه استفاده شده در تحقیق حاضر و نیاز به استفاده مقادیر دقیق‌تر k_1 باشد.

۸- با عکس برداری از سطح شکست نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای میزان رشد ترک نرم بر اساس روش استاندارد میانگین‌گیری نه نقطه برای نواحی مختلف لوله API X70 گزارش شد. حداکثر رشد ترک برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش در انتهای آزمون به ازای تغییر مکان برابر (۲۰ میلی‌متر) به ترتیب $۵/۲$ ، ۷ و $۷/۷$ میلی‌متر تعیین شد. رشد ترک نرم بیشتر در فلز جوش در شرایط تغییر مکان برابر به دلیل سخت و شکننده بودن این ناحیه است. در فلز پایه به دلیل

میزان رشد ترک نرم برای هر نمونه با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به دوربین، عکس‌برداری و تحلیل تصاویر سطح شکست بر اساس روش استاندارد میانگین نه نقطه (استاندارد BS 7448-4)، مطابق شکل ۲۱ اندازه‌گیری شد [۱۷].

میزان رشد ترک نرم بر اساس روش استاندارد میانگین ۹ نقطه برای فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب $۵/۲$ و ۷ و $۷/۷$ میلی‌متر بدست آمد. دیده می‌شود، میزان رشد ترک در فلز جوش به دلیل سخت و شکننده بودن آن بیشتر است؛ همچنین در فلز پایه به دلیل جذب انرژی و چقرمگی زیاد (ناشی از ریز ساختار فریت سوزنی درهم تنیده) میزان رشد ترک نرم کمتر است.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر آزمون کشش تک‌محوری روی نه نمونه استخراج شده از فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش از بدنه لوله فولادی API X70 به منظور تعیین تجربی خواص کششی فولاد انجام شد. به علاوه آزمون خمش سه نقطه‌ای روی سه نمونه استخراج شده از فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به منظور بررسی و مقایسه رفتار مکانیکی در سه ناحیه صورت گرفت؛ همچنین تنش تسلیم بوسیله یک رابطه تحلیلی بر مبنای میدان خطوط لغزش، از آزمون خمش سه نقطه‌ای تعیین و با نتایج آزمون کشش تک‌محوری مقایسه شد. خلاصه نتایج بدست آمده عبارت است از:

- ۱- مقادیر میانگین تنش تسلیم برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب برابر ۵۶۰ ، ۵۱۴ و ۵۰۷ مگاپاسکال است.
- ۲- مقادیر میانگین تنش نهایی برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب برابر ۶۰۶ ، ۵۸۷ و ۶۰۲ مگاپاسکال است.
- ۳- مقادیر میانگین کشامد برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب برابر ۱۹ ، ۱۶ و ۱۸ درصد است.
- ۴- دیده می‌شود که فلز پایه بیشترین تنش تسلیم (۵۶۰ مگاپاسکال) و فلز جوش کمترین درصد کشامد (۱۶) را دارد که دلیل آن ریز ساختار خاص

۷- مراجع

- [1] Rosado DB, Waele WD, Vanderschueren D, Hertelé S (2013) Latest developments in mechanical properties and metallurgical features of high strength line pipe steels. 5th Conf on sustainable construction and design 4(1): 10-22.
- [2] API Specifications 5L (2008) Specification for Line Pipe. 44th edn. In: American petroleum institute.
- [3] 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.
- [4] ASTM standard E1820 (2002) Standard test method for measurement of fracture toughness. In: Annual book of ASTM standards.
- [5] Farrahi A, Hashemi SH (2013) Experimental evaluation of fracture toughness in spiral seam weld of thermomechanical steel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 2(4): 25-35. (In Persian)
- [6] Chen X, Lu H, Chen G, Wang X (2015) A comparison between fracture toughness at different locations of longitudinal submerged arc welded and spiral submerged arc welded joints of API X80 pipeline steels. Eng Fract Mech 148: 110-121.
- [7] Yang Y, Shi L, Xu Z, Lu H, Chen X, Wang X (2015) Fracture toughness of the materials in welded joint of X80 pipeline steel. Eng Fract Mech 148: 337-349.
- [8] Hashemi SH (2008) Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel. Int J Pres Ves Piping 85(12): 879-884.
- [9] Hashemi SH, Mohammadyani D, Pouranvari M, Mousavizadeh SM (2009) On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70. Fatigue Fract Eng Mater Struct 32(1): 33-40.
- [10] Herrera DA, Hernández AA, Meléndez RC, Velázquez JL (2014) Fracture toughness in the circumferential-longitudinal and circumferential-radial directions of longitudinal weld API 5L X52 pipeline using standard C(T) and nonstandard curved SE(B) specimens. Int J Fract 188(2): 251-256.
- [11] Neves Beltrão MA, Castrodeza E, Bastian FL (2010) Fatigue crack propagation in API 5L X-70 pipeline steel longitudinal welded joints under constant and variable amplitudes. Fatigue Fract Eng Mater Struct 34(5): 321-328.
- [12] Hashemi SH, Sedghi S, Soleymani V, Mohammadyani D (2012) CTOA levels of welded joint in API X70 pipe steel. Eng Fract Mech 82: 46-59.
- [13] ASTM standard A370-14 (2014) Standard test methods and definitions for mechanical testing of

جذب انرژی و چقرمگی زیاد (ناشی از ریز ساختار فریت سوزنی درهم تنیده) میزان رشد ترک نرم کمتر است.

۵- تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید (تهران) به لحاظ در اختیار قرار دادن لوله فولادی API X70 و همکاری در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی قدردانی می‌شود؛ همچنین از آقای مهندس صادقی (کارگاه مکانیک دانشگاه بیرجند) به لحاظ همکاری در ساخت قید و بند آزمایشگاهی، آقای دکتر سریر (دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند) به لحاظ همکاری در تهیه نیتروژن مایع و شکست ترد نمونه‌ها و آقای دکتر خزاعی (دانشکده علوم دانشگاه بیرجند) به لحاظ همکاری در تهیه عکس‌های میکروسکوپ نوری صمیمانه قدردانی می‌شود.

۶- فهرست علائم

a	طول شیار اولیه، mm
B	ضخامت نمونه، mm
e	ولتاژ تحریک، V
E	مدول الاستیسیته، N/m^2
k_v	ثابت بی‌بعد
L	فاصله تکیه‌گاه‌ها، mm
P_y	نیرو تسلیم، kN
R	مقاومت کرنش‌سنج، Ω
V	ولتاژ، V
W	عرض نمونه، mm
σ_y	تنش تسلیم، MPa
δ	جابجایی تیغه‌ها، mm

- [16] Sreenivasan PR, Ray SK, Samuel KG, Mannan SL (1992) An empirical relation between yield stress and general yield load for a charpy U-notch specimen. *Eng Fract Mech* 42(6): 1047-1049.
- [17] British standard BS 7448-4 (1997) Fracture mechanics toughness tests—method for determination of fracture resistance curves and initiation values for stable crack extension in metallic materials.
- steel products. In: Annual book of ASTM standards.
- [14] Hashemi SH, Sabokrouh M, Farahani MR (2013) Investigation of weldability in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe. *Modares Mechanical Engineering* 13: 60-73. (In Persian)
- [15] Server WL (1978) General Yielding of Charpy V-Notch and Precracked Charpy Specimens. *J Eng Mater Tech* 100(2): 183-188.