



Investigation of Seam Weld and Steel Base Metal Fracture Energy of API X65 Pipe Using Three-Point Bending Experimental

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hashemi H.¹ MSc,
Hashemi S.H.*¹ PhD

How to cite this article

Hashemi H, Hashemi S.H. Investigation of Seam Weld and Steel Base Metal Fracture Energy of API X65 Pipe Using Three-Point Bending Experimental. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(9):2377-2388.

ABSTRACT

Because of the inherent structure of welded pipelines, the seam weld can be a potential source for initiation and propagation of crack that can eventually lead to failure of the structure. Due to the critical conditions in the welding region, the investigation of failure energy in gas transportation pipeline is very important for engineers and line designers. In this paper, the three-point bending test (according to the standard specimen of drop-weight tear test) was performed quasi-statically on the seam weld pipe and base metal of spiral seam weld pipe of API X65 steel from which force diagrams were extracted. The presence of sudden load drops in the force-displacement diagram of the specimen in the weld indicated the inhomogeneous structure of the weld. The diagrams of force-displacement, yield and ultimate force, amount of steady crack growth and fracture energy of the metal and seam weld specimens including initiation and propagation energy of crack were investigated and compared. Also, the ratio of the force drop to the ultimate force at the same displacement rate was investigated. The results showed that in seam weld compared to the base metal specimen, the yield force was higher and the ultimate force, the amount of steady crack, initiation and propagation energy of crack were lower. In addition, the lower ratio of force to ultimate force (at the same displacement) in the base metal also indicated a high resistance of the base to the crack propagation.

Keywords Gas Transportation Pipeline; API X65 Steel; Three-Point Bending Test; Seam Weld; Fracture Energy

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

*Correspondence

Address: University of Birjand, Birjand, Iran. Post Box: 97175/615
Phone: +98 (56) 32391222
Fax: +98 (56) 12502142
shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: February 9, 2020

Accepted: July 15, 2020

ePublished: September 20, 2020

CITATION LINKS

[1] Large diameter X100 gas linepipes: fracture propagation evaluation by full-scale burst test [2] Mechanical microstructure and texture characterization of API X65 steel [3] A Comparison between fracture toughness at different locations of longitudinal submerged arc welded and spiral submerged arc welded joints of API X80 pipeline steels [4] Investigation of weldability in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe [5] Welding Handbook [6] Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel [7] Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of API X65 steel using three-point bending test [8] Study of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel [9] Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel [10] CVN-KJC correlation model for API X65 gas pipeline [11] The role of Ti carbonitride precipitates on fusion zone strength-toughness in submerged arc welded linepipe joints [12] Characterizing dynamic fracture toughness of linepipe steels using the pressed-notch drop-weight-tear test specimen [13] Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline steel from DWTT specimens [14] Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the drop-weight tear test [15] Experimental evaluation of fracture toughness in spiral weld of thermomechanical steel pipe [16] API RP 5L3: Recommended practice for conducting drop-weight tear tests on line pipe [17] API specification 5L/ISO 3183 (Modified), specification for line pipe [18] Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test [19] Ductile fracture of advanced pipeline steels: study of stress states and energies in dynamic impact specimens - CVN and DWTT [20] Effects of notch shape and specimen thickness on drop-weight tear test properties of API X70 and X80 line-pipe steels [21] Experimental investigation of CTOA in linepipe steels

بررسی انرژی شکست در درزجوش و فولاد پایه لوله API X65 با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای

حمید هاشمی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سیدحجت هاشمی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

در لوله‌های فولادی جوش‌کاری‌شده انتقال گاز، ناحیه جوش به دلیل نواقص ذاتی ساختاری می‌تواند منطقه مستعد جهت شروع و رشد ترک و نهایتاً آسیب سازه باشد. به دلیل شرایط خاص منطقه جوش، بررسی انرژی شکست در درزجوش لوله‌های فولادی برای مهندسیین و طراحان خط دارای اهمیت است. در این مقاله آزمایش خمش سه نقطه‌ای (مطابق هندسه نمونه استاندارد آزمایش ضربه سقوطی) به صورت شبه‌استاتیکی بر روی درزجوش مارپیچ و فلز پایه لوله فولادی نوع API 65 انجام و نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی استخراج شده است. وجود آفت‌های ناگهانی نیرو در نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه درزجوش نشان‌دهنده ساختار نامتجانس جوش است. با ترسیم نمودار نیرو- جابه‌جایی، نیروی تسلیم و حداکثر، مقدار رشد ترک پایدار و انرژی شکست نمونه‌های فلز پایه و درزجوش شامل انرژی شروع و رشد ترک بررسی و مقایسه شد. همچنین نسبت آفت نیرو به نیروی نهایی در میزان جابه‌جایی یکسان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده بالاتر بودن نیروی تسلیم و پایین‌تر بودن نیروی حداکثر، مقدار رشد ترک پایدار و انرژی شکست نمونه درزجوش نسبت به نمونه فلز پایه است. همچنین پایین‌تر بودن نسبت آفت نیرو به نیروی نهایی (در یک جابه‌جایی یکسان) در فلز پایه، مقاومت بالای فلز پایه در برابر گسترش ترک را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: لوله انتقال گاز، فولاد API 65، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، درزجوش، انرژی شکست

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

*نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

مقدمه

طی چند دهه گذشته، در صنعت گاز به منظور استفاده از ظرفیت‌های بالاتر در انتقال انرژی از سامانه‌های انتقال پرفشار با کارایی بیشتر استفاده شده است. لازمه این کار استفاده از خط لوله‌های فولادی با قطر خارجی بزرگ‌تر و دیواره نازک‌تر برای حداقل کردن هزینه و وزن در هر متر از خط لوله است [1]. بالا بردن تنش تسلیم بدون کاهش چقرمگی و شکل‌پذیری ماده دارای اهمیت است. موسسه نفت ایالات متحده برای فولادهای خطوط لوله حداکثر نسبت تنش تسلیم به استحکام نهایی تعیین کرده است که این مقدار برای فولادهای مدرن باید کمتر از ۹۳٪ باشد [2]. لوله درزجوش مارپیچ به لحاظ دارابودن خواص مکانیکی مناسب مواد اولیه، چقرمگی بالا، جهت و امتداد نورد ورق و

درزجوش نسبت به جهت تنش‌های اصلی، در مقایسه با لوله‌های دیگر از استحکام و اطمینان بیشتری در مقابل رشد ترک و شکست برخوردار است [3].

اکنون بیش از ۸۰٪ اتصالات به وسیله جوش انجام می‌شود [4]. اتصال جوش را می‌توان به چهار ناحیه متفاوت تقسیم کرد که شامل فلز جوش (Weld Metal; WM)، خط اتصال جوش (Fusion Line; FL)، ناحیه متأثر از حرارت (Heat Affected Zone; HAZ) و ناحیه فلز پایه (Base Metal; BM) است که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [5].

اطمینان از یکپارچگی اتصالات جوشی در صنعت انتقال گاز طبیعی به وسیله لوله‌های قطور فولادی مستلزم تعیین تجربی خصوصیات فولاد پایه و ویژگی‌های درزجوش به وسیله آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب است [4]. در دهه‌های اخیر بررسی خصوصیات سطح شکست و مقایسه انرژی شکست نواحی مختلف اتصال جوش با استفاده از آزمایش‌های مکانیکی مورد توجه محققین قرار گرفته است [6-8]. عموماً برای محاسبه انرژی شکست دینامیکی مواد از آزمایش ضربه شاریپی استفاده می‌شود.

هاشمی، توسط آزمایش شاریپی، انرژی جذب‌شده در سه ناحیه مختلف اتصال جوش لوله با درزجوش مارپیچ از جنس فولاد API X65 (تولیدشده با جوش‌کاری زیرپودری) را بررسی کرده است [9]. در این تحقیق سه نوع نمونه استاندارد آزمایش شاریپی از سه ناحیه مختلف اتصال جوش استخراج شده و در هر ناحیه، چهار نمونه آزمایش شده است. مقدار انرژی جذب‌شده برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز جوش به ترتیب برابر با ۲۷۱، ۱۹۹ و ۱۶۳ ژول به دست آمده است. در همین راستا/صغری و همکاران با آزمایش‌های مکانیکی کشش، انرژی شاریپی و نمونه آزمایش کشش با ترک مرکزی به بررسی متغیرهایی از قبیل مقاومت کششی و انرژی شکست پرداختند [10]. نمونه‌ها از لوله فولاد API X65 که با روش جوش‌کاری زیرپودری تولید شده، استخراج شده است. انرژی شاریپی در نمونه‌های فلز پایه و درزجوش به ترتیب برابر با ۲۶۶ و ۱۵۹ ژول به دست آمده است. در تحقیق آکوت و همکاران [11]، انرژی سه ناحیه فلز جوش، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه استخراج‌شده از لوله با جنس فولاد API X65 (تولیدشده با فرآیند جوش‌کاری زیرپودری) به ترتیب برابر با ۲۲۳، ۲۹۰ و ۳۶۲ ژول گزارش شده است. نتایج آزمایش‌های شاریپی انجام‌شده بر روی نواحی مختلف اتصال جوش، نشان‌دهنده پایین‌تر بودن انرژی شکست ناحیه جوش نسبت به سایر نواحی اتصال جوش است. پایین‌تر بودن انرژی ضربه شاریپی ناحیه جوش را می‌توان به ساختار ریخته‌گری و وجود فازهای مرزانه‌ای در ریزساختار این ناحیه نسبت داد [9].

با وجود اینکه برای تعیین انرژی شکست عموماً از آزمایش ضربه شاریپی استفاده می‌شود، انرژی به دست آمده از آزمایش شاریپی کاملاً نیروی پیشران ترک (Crack Driving Force) و مقاومت در برابر رشد ترک را در دیواره لوله‌ها نمایان نمی‌سازد. از آنجایی که

است، که در شکل ۴ نمایش داده شده است. مطابق استاندارد API-5L [17]، نمونه‌های درزجوش عمود بر درزجوش لوله مارپیچ و نمونه‌های فلز پایه در جهت محیطی لوله که در شکل ۵ مشخص است، استخراج شده و با عملیات پرس‌کاری صاف شد.

علی‌رغم ایجاد تنش‌های پسماند ناشی از عملیات غلتک‌کاری و شکل‌دهی لوله، همچنین برآیند مسطح کردن مطابق استاندارد API 5L [16]، این تنش‌ها نادیده گرفته می‌شود. به دلیل انحنای و قطر زیاد (۴۸ اینچ) لوله، مقدار این تنش‌های پسماند ناچیز است. با توجه به مزایای شیار ماشین‌کاری شده نسبت به شیار پرس‌کاری از جمله ابعاد دقیق‌تر شیار، عدم ایجاد کارسختی زیر شیار، تیزبودن شیار و افزایش ضریب تمرکز تنش، کاهش انرژی شروع ترک و تسریع در شکست [18-20]، در مرکز نمونه‌ها شیار ماشین‌کاری شده توسط دستگاه وایرکات زده شد. نمونه‌ها با عمق شیارهای ۵/۱، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر تهیه و آزمایش بر روی همه نمونه‌ها انجام شد. تنها نمونه‌های فلز پایه و درزجوش با شیار استاندارد ۵/۱ میلی‌متر بررسی می‌شود.

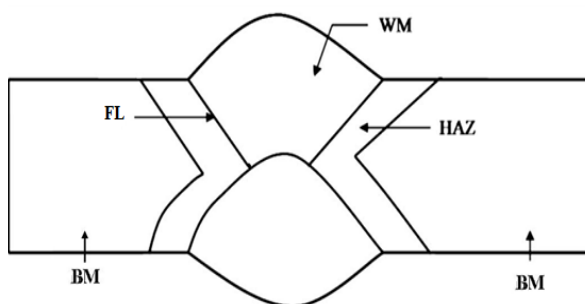


شکل ۲) لوله درز جوش مارپیچ فولادی جهت استخراج نمونه‌های آزمایشگاهی

جدول ۱) خواص مکانیکی فولاد API X65 در جهت محیطی و درزجوش [6, 15]

نوع فولاد		پارامتر
درزجوش	فلز پایه	
-	۰/۳	نسبت پواسون
۵۴۸	۵۳۸	تنش تسلیم (MPa)
۶۲۴	۶۲۴	استحکام نهایی (MPa)
۰/۸۷	۰/۸۶	نسبت تنش تسلیم به استحکام نهایی
۱۷	۲۱	درصد کشامد در ۲ اینچ
۲۳۵	۲۲۱	سختی
۱۶۳	۲۷۱	انرژی شاری (J)

در آزمایش ضربه سقوطی نمونه آزمایش با ابعاد بزرگ‌تر و با ضخامت لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد، آزمایش ضربه سقوطی نسبت به آزمایش شاری در پیش‌بینی حالت شکست پایدار با ضخامت لوله، پاسخ نسبتاً دقیق‌تری می‌دهد [12, 13]. از طرفی دیگر چنانچه نیرو به آرامی و تحت شرایط بارگذاری با نرخ کرنش کم اعمال شود (شرایط شبه‌استاتیکی)، مطالعه دقیق‌تری بر روی شروع و رشد ترک در نمونه آزمایش انجام می‌شود. از این‌رو در این مقاله، مشابه تحقیق سیمپا و همکاران [14]، آزمایش خمش سه نقطه‌ای در شرایط شبه‌استاتیکی بر روی نمونه‌های استاندارد آزمایش ضربه سقوطی انجام شد. در تحقیق سیمپا و همکاران [14]، آزمایش بر روی فلز پایه استخراج‌شده از لوله API X70 انجام شده است. در این تحقیق انجام آزمایش شبه‌استاتیکی خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های استاندارد آزمایش ضربه سقوطی استخراجی از فلز پایه فولاد API X65 و همچنین از ناحیه درزجوش و مقایسه نتایج به دست آمده با نمونه‌های فلز پایه برای اولین بار انجام شده است.



شکل ۱) نواحی مختلف اتصال جوش [5] WM: فلز جوش، HAZ: ناحیه متأثر از حرارات، FL: خط جوش، BM: فلز پایه

معرفی هندسه و خواص نمونه آزمایشگاهی

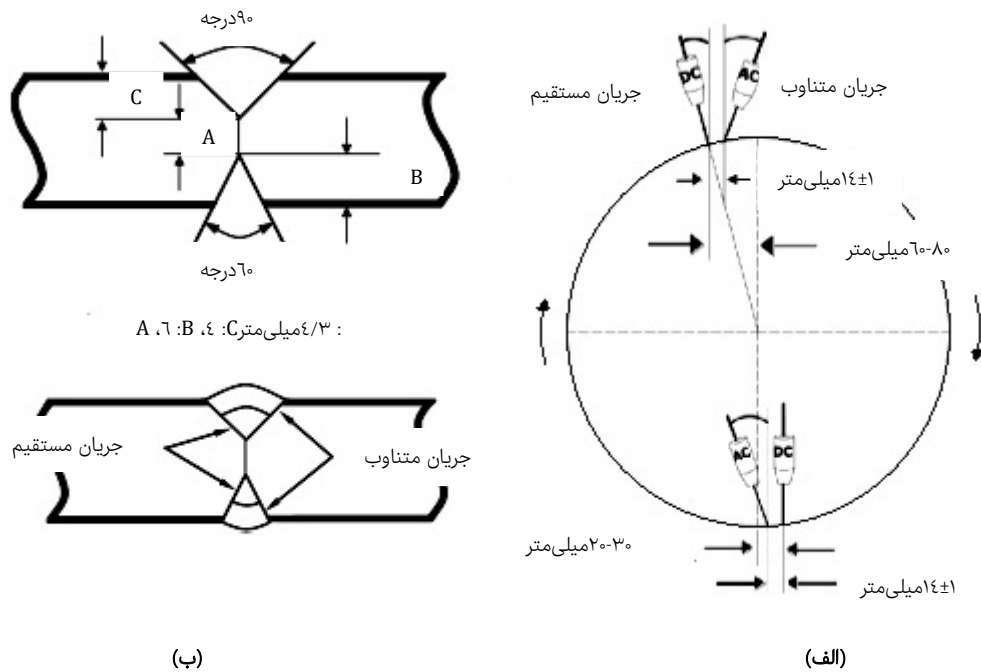
معرفی مشخصات لوله فولادی

لوله فولادی استفاده‌شده، از نوع لوله با درزجوش مارپیچ و قطر خارجی ۱۲۱۹ و ضخامت اسمی ۱۴/۳ میلی‌متر (شکل ۲) و از جنس فولاد API X65 است. خواص مکانیکی فولاد در جدول ۱ گزارش شده است [6, 15].

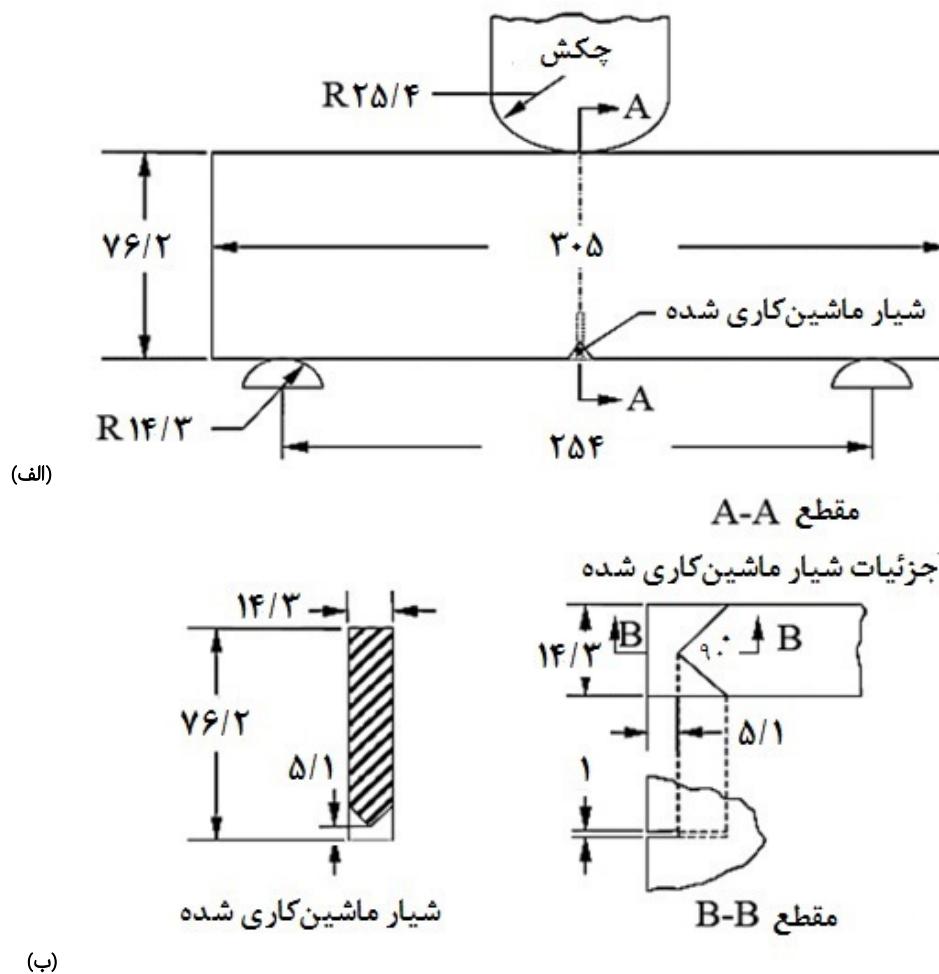
نوع اتصال V شکل دوطرفه است که به روش جوش‌کاری زیرپودری دوطرفه انجام می‌شود. جوش‌کاری لوله از داخل و خارج در دو عبور انجام می‌شود. اتصال جوش و چیدمان الکترودهای جوش‌کاری برای جوش‌کاری درزجوش مارپیچ به ترتیب در شکل‌های ۳- الف و ۳- ب نشان داده شده است [6].

هندسه نمونه آزمایش

ابعاد نمونه‌های آزمایش با مشخصات هندسی مطابق استاندارد API [16] با عرض، ضخامت و طول ۷۶/۲، ۱۴/۳ و ۳۰۵ میلی‌متر



شکل ۳ (الف) پیکربندی شیار جوش و جریان جوش کاری در لوله API X65، (ب) چیدمان الکترودهای داخل و خارج جوش کاری برای جوش کاری درز جوش مارپیچ^[۶]



شکل ۴ (الف) ابعاد هندسی نمونه خمش سه نقطه‌ای (مطابق استاندارد نمونه ضربه سقوطی) به همراه ابعاد چکش و سندان‌ها، (ب) ابعاد شیار شورون (کلیه ابعاد به میلی‌متر)^[۱۶]

روش تحقیق

نصب قید و بند آزمایشگاهی

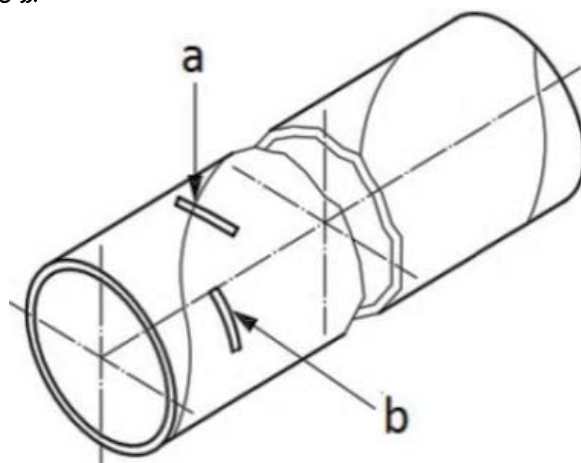
جهت اعمال نیرو می‌بایست از چکش با شرایط استاندارد آزمایش ضربه سقوطی استفاده شود، از این رو قیدوبند و چکش ویژه‌ای جهت نصب بر روی دستگاه آزمایشگاهی استاندارد کشش- فشار زوئیک طراحی و ساخته شد که در شکل ۶ قابل مشاهده است.

پس از طراحی، ساخت و نصب قیدوبند و چکش مخصوص مطابق استاندارد API RP5L3 [20]، نمونه آماده‌شده بر روی قیدوبند نصب‌شده بر دستگاه ۶۰۰ کیلو نیوتنی زوئیک مطابق شکل ۷، قرار گرفت. به منظور حذف خروج از مرکز احتمالی بین نمونه و نیروی اعمال‌شده از طرف دستگاه، از تراز لیزری استفاده شد. همچنین دو قید در هر طرف نمونه جهت جلوگیری از پیچش احتمالی نمونه در هنگام بارگذاری مطابق شکل ۸، قرار گرفت.

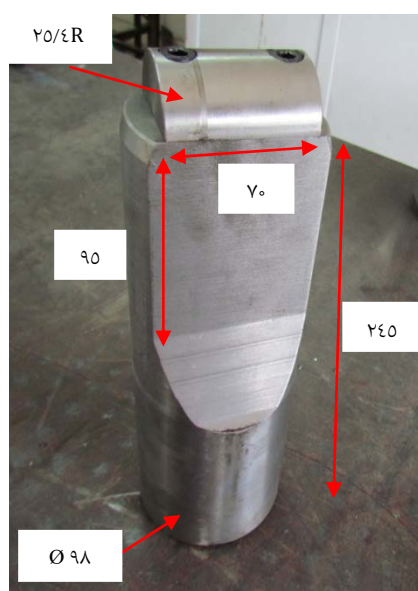
انجام آزمایش

بارگذاری با سرعت پایین فک (۱/۰ میلی‌متر بر ثانیه) در شرایط آزمایشگاهی به صورت شبه‌استاتیکی به طور جداگانه بر روی هر یک از نمونه‌ها انجام شد. با اعمال بارگذاری، ترک از زیر شیار شروع شد و گسترش پیدا کرد و در نهایت منجر به شکست نمونه شد. شکل‌های ۹- الف و ۹- ب به ترتیب شکست دو نمونه فلز پایه و درزجوش را نشان می‌دهد.

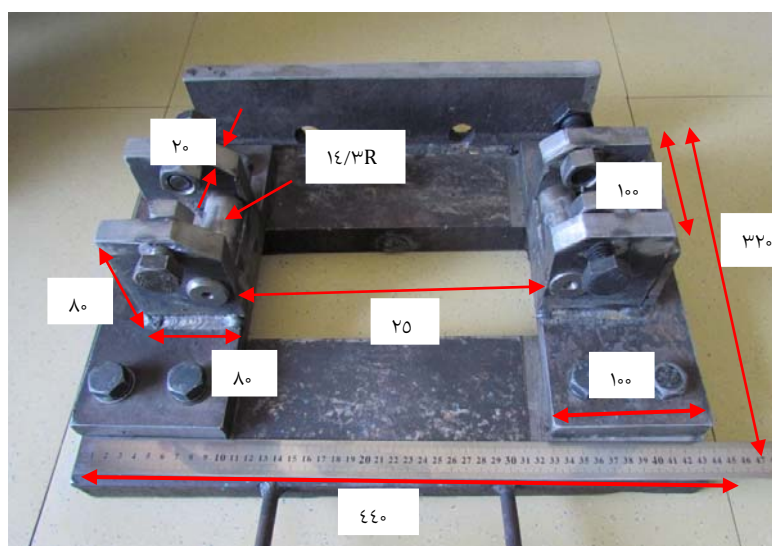
دستگاه آزمایش مجهز به نرم‌افزار تست- اکسپرت (Test-Xpert) جهت ذخیره داده‌های آزمایشگاهی شامل نیرو، زمان و جابه‌جایی است. ترسیم منحنی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به طور پیوسته از تماس چکش با نمونه (شروع زمان بارگذاری) آغاز شد و تا شکست نمونه آزمایش ادامه یافت.



شکل ۵) موقعیت و جهت نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای: (a) درزجوش، (b) فلز پایه در لوله واقعی با درزجوش مارپیچ [17]

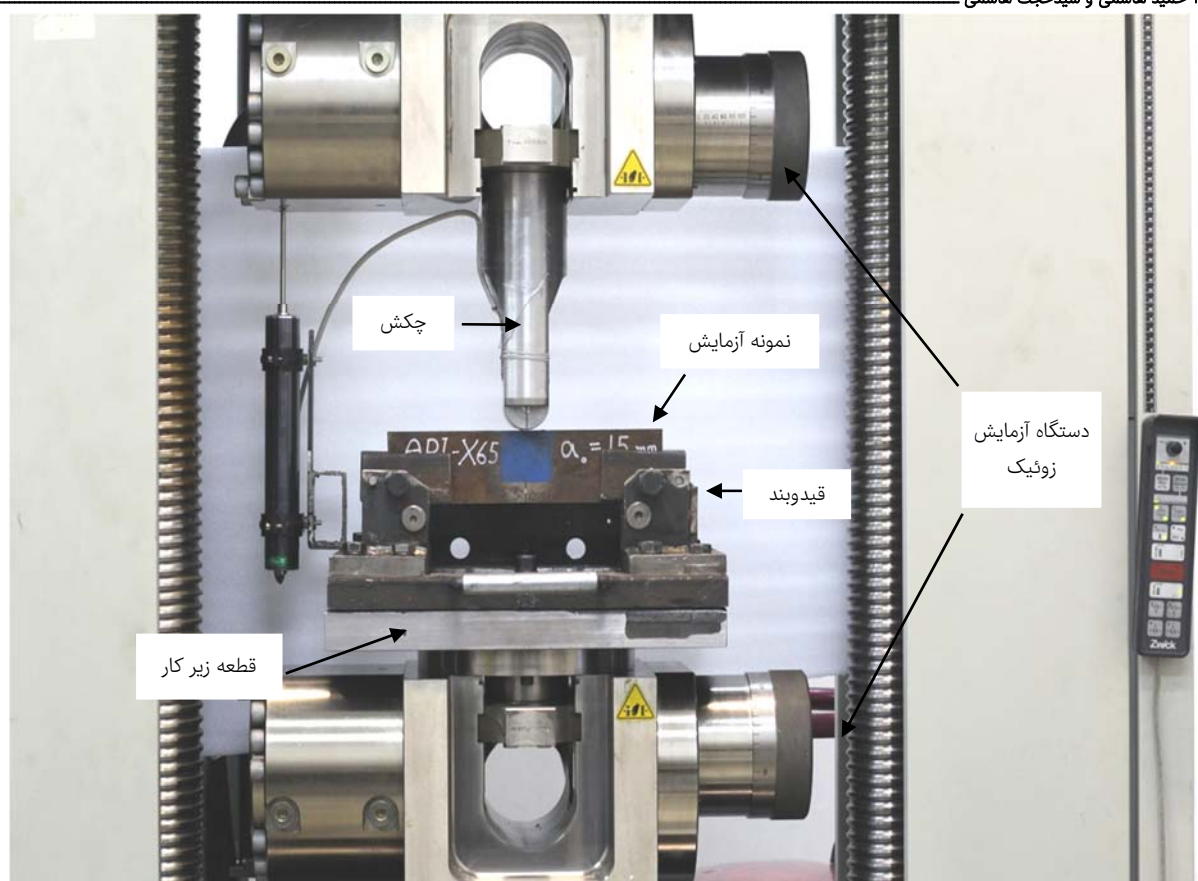


(ب)

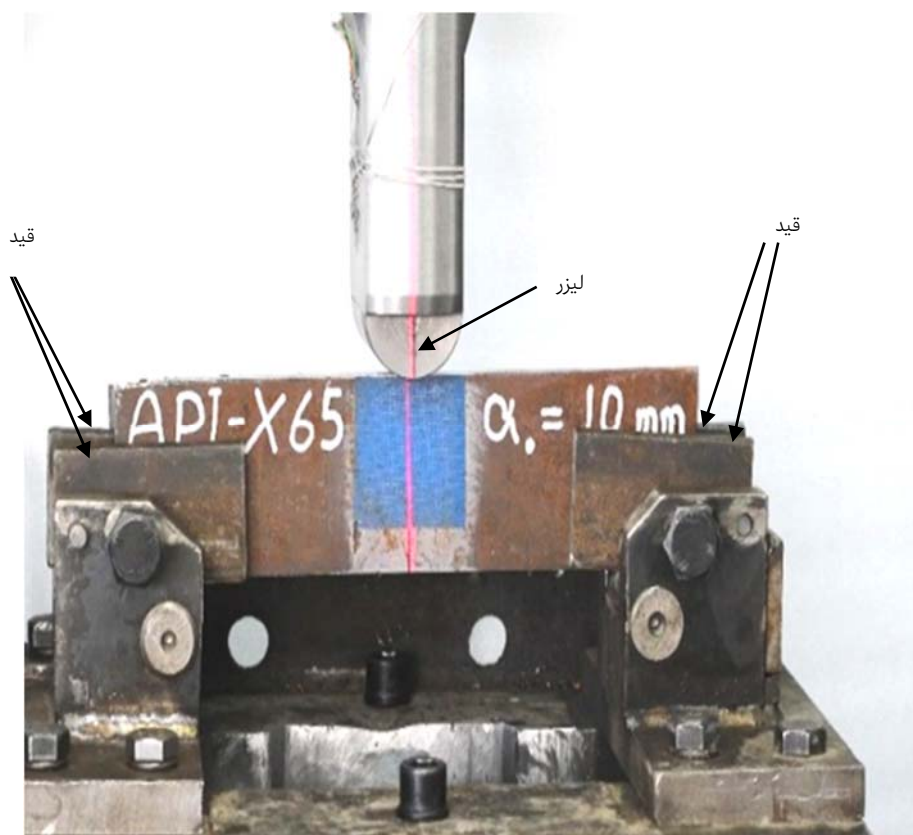


(الف)

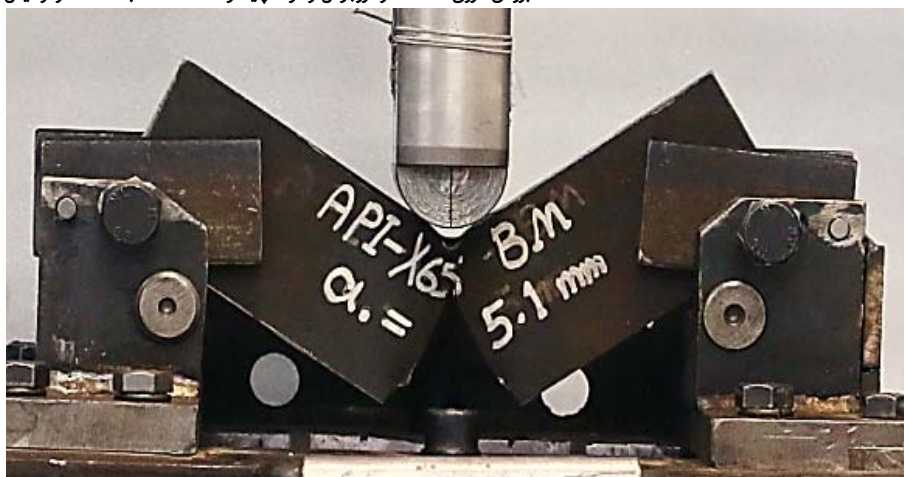
شکل ۶) هندسه و ساخت: (الف) قیدوبند، (ب) چکش برای انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای روی ماشین استاندارد آزمایشگاهی کشش زوئیک (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۷) نمایشی از چکش و قیدوبند روی دستگاه زوئیک ۶۰۰ کیلو نیوتنی



شکل ۸) استفاده از لیزر به منظور تنظیم دقیق نمونه و چکش قبل از انجام آزمایش



(الف)



(ب)

شکل ۹) رشد ترک و شکست در نمونه استاندارد با عمق شیار ۵/۱ میلی‌متر؛ (الف) فلز پایه، (ب) درزجوش

نتایج

نمودار نیرو- جابه‌جایی

منحنی نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های فلز پایه و درزجوش، در نمودار ۱ نشان داده شده است. ناحیه اول دو نمودار، بخش الاستیک بوده که نیرو به صورت خطی افزایش می‌یابد و بارگذاری به صورت الاستیک بر روی نمونه اعمال می‌شود. با مقایسه این دو نمودار مشاهده می‌شود که در منطقه الاستیک دو نمودار بر هم منطبق بوده و این نشان‌دهنده خاصیت ارتجاعی مشابه منطقه جوش و فلز پایه در ناحیه الاستیک است.

نیروی تسلیم فلز پایه برابر با ۱۰۷ کیلونیوتن و در فلز جوش برابر با ۱۳۲ کیلونیوتن است که به ترتیب در جابه‌جایی‌های ۲/۲ و ۲/۹ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. بالاتر بودن نیروی تسلیم فلزجوش نسبت به فلز پایه نشان می‌دهد که فلز جوش از استحکام تسلیم بالاتری نسبت به فلز پایه برخوردار است. به طور مشابه /صغری و همکاران مقدار تنش تسلیم در فلز پایه و درزجوش فولاد API X65 با اتصال جوش زیرپودری را به ترتیب برابر با ۵۱۰ و ۵۳۰ مگاپاسکال گزارش داده‌اند که بیانگر بالاتر بودن تنش تسلیم

درزجوش نسبت به فلز پایه است [10].

با عبور از ناحیه الاستیک، دو نمودار وارد ناحیه پلاستیک شده و کارسختی انجام شده و سپس نیرو به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این زمان نیرو به بالاترین میزان خود رسیده که به آن نقطه حداکثر نیرو گفته می‌شود. عموماً، شروع ترک در مکانی بین نقاط تسلیم و نیروی حداکثر اتفاق می‌افتد. به منظور سهولت در انجام محاسبات به طور رایج گسترش ترک مواد شکل‌پذیر را به طور کلی از نقطه بار حداکثر در نظر می‌گیرند [9]. نیروی حداکثر فلز پایه برابر با ۲۰۶ کیلونیوتن و در فلز جوش برابر با ۱۹۶ کیلونیوتن است که این مقادیر به ترتیب در جابه‌جایی‌های ۱۲/۶ و ۸/۹ میلی‌متر ایجاد می‌شوند. مقایسه دو نمودار نشان‌دهنده پایین‌تر بودن نیروی حداکثر ناحیه جوش نسبت به فلز پایه است. این بدان معنی است که در فلزجوش کارسختی در ناحیه جوش کمتر اتفاق افتاده و در هنگام رشد ترک ناحیه پلاستیک در اطراف نوک ترک نسبت به فلز پایه کمتر ایجاد می‌شود. در نمودار فلز درزجوش، نیرو در قسمت‌هایی از نمودار کاهش ناگهانی داشته که این نشان‌دهنده از هم گسیختگی ناگهانی در هنگام رشد ترک (به دلیل

نامتجانس بودن ساختار فلزجوش) است. نتایج حاصل از نمودار نیرو- جابه‌جایی بین درزجوش و فلز پایه در جدول ۲ مقایسه شده است.

پس از عبور از نیروی حداکثر، نمودار نیرو- جابه‌جایی به‌صورت غیرخطی ادامه پیدا کرده تا اینکه این رابطه به‌صورت خطی با شیب تقریباً ثابت برقرار می‌شود. برقراری این وضعیت گسترش ترک پایدار و شروع این رابطه خطی نقطه آغاز گسترش ترک پایدار را نشان می‌دهد [21]. با مقایسه دو نمودار مشاهده می‌شود که رشد ترک پایدار در نمونه فلز پایه به‌صورت پیوسته بوده اما در نمونه درزجوش به‌صورت ناپیوسته اتفاق می‌افتد. جدول ۳ شروع و پایان رابطه خطی نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های فلزپایه و درزجوش را نشان می‌دهد. مقدار جابه‌جایی خطی در فلز پایه برابر با ۱۳/۴ میلی‌متر و در فلز جوش در مجموع برابر با ۱۰/۴ میلی‌متر است و این نشان می‌دهد که ناحیه گسترش ترک پایدار در فلز پایه نسبت به فلز جوش بیشتر است.

بررسی نسبت کاهش نیرو

مقدار نیرو در اختلاف جابه‌جایی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر با نقطه شروع از جابه‌جایی در نیروی حداکثر هر یک از نمونه‌های فلز پایه و درزجوش محاسبه می‌شود. جدول ۴ مقدار نیرو- جابه‌جایی در سه جابه‌جایی و مقایسه درصد کاهش نیرو دو نمونه فلز پایه و درزجوش را نشان می‌دهد. مقدار نیرو در فلز پایه به‌ترتیب در جابه‌جایی‌های ذکر شده برابر با ۹۹، ۵۹ و ۴۰ کیلونیوتن بوده که مقدار کاهش نیرو به‌ترتیب برابر با ۱۰۷، ۱۴۷ و ۱۶۶ کیلونیوتن است. با توجه به مقدار حداکثر نیروی فلز پایه (۲۰۶ کیلونیوتن) نیرو به ترتیب به مقدار ۵۲، ۷۱ و ۸۱٪ کاهش داشته است. مقدار نیرو در فلز درزجوش در سه جابه‌جایی عنوان شده به‌ترتیب برابر با ۶۲، ۲۸ و ۱۵ کیلونیوتن بوده که کاهش نیرویی به اندازه ۱۳۴، ۱۶۸ و ۱۸۱ کیلونیوتن را دارد. با توجه به مقدار حداکثر نیروی فلز درزجوش (۱۹۶ کیلونیوتن) میزان کاهش نیرو نسبت به نیروی حداکثر به‌ترتیب برابر با ۶۸، ۸۶ و ۹۲٪ است.

مقایسه درصد کاهش نیرو نسبت به نیروی حداکثر در سه اختلاف جابه‌جایی ثابت، نشان‌دهنده بالاتر بودن درصد کاهش نیرو در فلز درزجوش نسبت به فلز پایه است. بالاتر بودن درصد کاهش نیرو نسبت به نیروی نهایی در یک میزان جابه‌جایی یکسان، بیانگر این خواهد بود که در یک مقدار جابه‌جایی برابر، گسیختگی در نمونه درزجوش سریع‌تر اتفاق افتاده و بنابراین ترک با سرعت بیشتری رشد پیدا کرده که به دنبال آن نیرو با نسبت بیشتری اُفت پیدا می‌کند. بنابراین مقاومت پایین‌تر فلز در برابر گسترش ترک موجب بیشتر شدن درصد کاهش نیرو نسبت به نیروی حداکثر در میزان جابه‌جایی برابر چکش می‌شود.

انرژی شکست

مساحت پایین نمودار نیرو- جابه‌جایی نمودار ۱، انرژی شکست نمونه را نشان می‌دهد. انرژی کل شکست مجموع انرژی شروع و

رشد ترک است. از روش ذوزنقه‌ای جهت محاسبه سطح زیر منحنی استفاده شده است. نمودار ۲ منحنی انرژی شکست برحسب جابه‌جایی چکش در نمونه‌های درزجوش و فلزپایه را نشان می‌دهد.

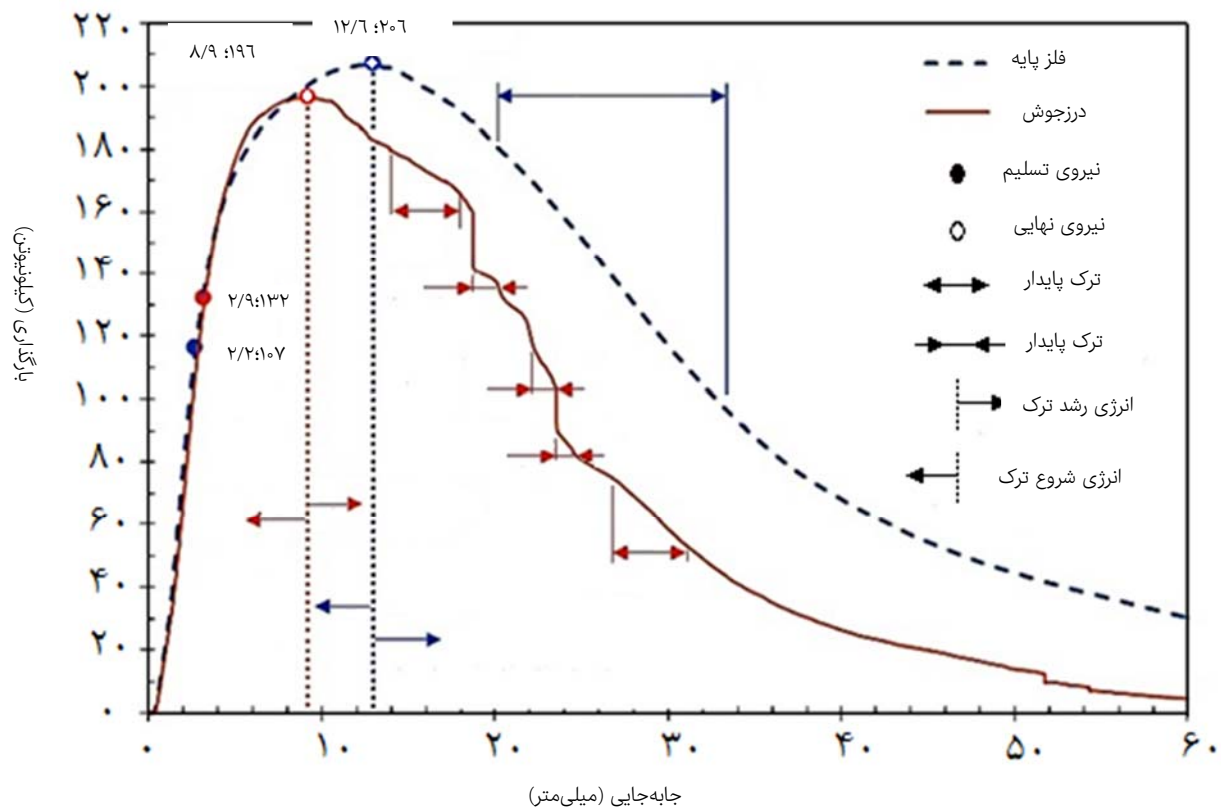
انرژی کل شکست نمونه‌های فلز پایه و درزجوش به‌ترتیب برابر با ۷۲۶۴ و ۴۷۶۸ ژول و در جابه‌جایی‌های ۱۰۰ و ۷۰ میلی‌متر به‌دست آمده است. انرژی شروع ترک در فلز پایه برابر با ۲۰۳۶ ژول (در جابه‌جایی ۱۲/۶ میلی‌متر) و در فلزجوش برابر با ۲۷۷ ژول (در جابه‌جایی ۸/۹ میلی‌متر) است. مقدار انرژی گسترش ترک در فلز پایه و درزجوش نیز به‌ترتیب برابر با ۵۲۲۸ و ۳۴۹۱ ژول محاسبه شده است. نتایج نشان‌دهنده پایین‌تر بودن انرژی کل شکست، شروع و گسترش ترک ناحیه جوش نسبت به فلز پایه بوده به‌گونه‌ای که انرژی کل شکست نمونه درزجوش ۶۶٪ نمونه فلزپایه است.

نسبت انرژی شروع و گسترش ترک به انرژی کل شکست در فلز پایه برابر با ۲۸ و ۷۲٪ و در درزجوش به‌ترتیب برابر با ۲۷ و ۷۳٪ است که نشان می‌دهد علی‌رغم اختلاف مقدار انرژی شروع و رشد ترک نمونه‌های فلز پایه و درزجوش، نسبت این دو انرژی به انرژی کل شکست در هر نمونه برابر است. جدول ۵ میزان انرژی لازم برای شکست نمونه، انرژی شروع و رشد ترک و سایر پارامترهای فوق نمونه‌های فلز پایه و درزجوش را نشان می‌دهد.

همچنین با بررسی رابطه نمودار انرژی- جابه‌جایی نمودار ۲ مشاهده می‌شود رابطه انرژی- جابه‌جایی (با صرف نظر از رابطه غیرخطی اولیه نمودار) تا شروع گسترش ترک پایدار خطی بوده و پس از این نقطه رابطه غیرخطی برقرار می‌شود. بنابراین می‌توان از لحظه شروع رابطه غیرخطی نمودار انرژی- جابه‌جایی، شروع گسترش ترک پایدار را تخمین زد.

مقایسه نتایج انرژی‌های شکست

همان گونه که در بخش مقدمه عنوان شد، محاسبه انرژی به‌دست‌آمده با استفاده از آزمایش شبه‌استاتیکی خمش سه‌نقطه‌ای بر روی نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی برای اولین بار انجام شده است. با توجه به اینکه مقدار انرژی شکست به‌دست‌آمده در نواحی فلز پایه و درزجوش آزمایش شکست شارپی متفاوت است، جهت راستی‌آزمایی نتایج انرژی شکست، به مقایسه نسبت نتایج انرژی شارپی شکست به‌دست‌آمده در ناحیه درزجوش به انرژی شکست ناحیه فلزپایه فولاد API X65 (که با روش جوش‌کاری زیرپودری جوش داده شده)، پرداخته شده است. جدول ۶ نتایج انرژی شکست سایر تحقیقات انجام‌شده در نواحی فلزپایه و درزجوش و مقایسه نسبت انرژی شکست ناحیه جوش به انرژی شکست ناحیه فلز پایه با نتیجه به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. مقدار اختلاف اندک نتایج سایر مراجع با نتیجه به‌دست‌آمده، بیانگر درستی نتایج به‌دست‌آمده در محاسبه انرژی شکست نواحی فلزپایه و درزجوش است.



نمودار (۱) منحنی نیرو- جابه‌جایی دو نمونه فلز پایه و درزجوش

جدول (۲) مقایسه نتایج حاصل از نمودار نیرو- جابه‌جایی دو نمونه فلز پایه و درزجوش

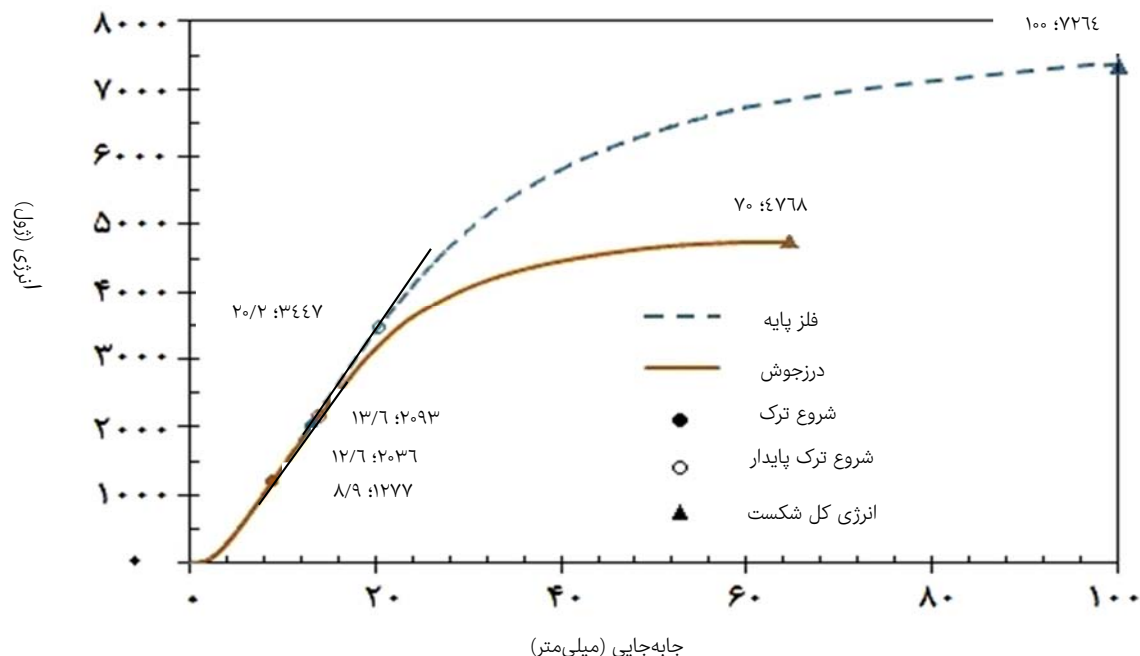
پارامتر	فلز پایه	درزجوش
نیروی تسلیم (kN)	۱۰۷	۱۳۲
جابه‌جایی نیروی تسلیم (mm)	۲/۲	۲/۹
نیروی حداکثر (kN)	۲۰۶	۱۹۶
جابه‌جایی نیروی حداکثر (mm)	۱۲/۶	۸/۹
نسبت نیروی تسلیم به نیروی نهایی	۵۲/۰	۶۷/۰

جدول (۳) میزان رشد ترک پایدار در دو نمونه فلز پایه و درزجوش (اعداد برحسب میلی‌متر هستند)

نمونه	فلز پایه	درزجوش
شروع رشد ترک پایدار	۲۰/۲	۱۳/۶
		۱۸/۴
		۲۲/۶
		۲۳/۲
		۲۶/۸
پایان رشد ترک پایدار	۳۳/۶	۱۷/۲
		۱۹/۶
		۲۳
		۲۴/۲
		۳۱
میزان رشد ترک پایدار	۱۳/۴	۳/۶
		۱/۲
		۰/۴
		۱
		۴/۲

جدول (۴) مقایسه نیرو- جابه‌جایی و درصد کاهش نیرو برای دو نمونه فلز پایه و درزجوش

پارامتر	درزجوش						فلز پایه
میزان جابه‌جایی (mm)	۴۸/۹	۳۸/۹	۲۸/۹	۵۲/۶	۴۲/۶	۳۲/۶	
اختلاف جابه‌جایی با جابه‌جایی در نیروی حداکثر (mm)	۴۰	۳۰	۲۰	۴۰	۳۰	۲۰	
مقدار نیرو (kN)	۱۵	۲۸	۶۲	۱۶۶	۵۹	۹۹	
مقدار اختلاف نیرو با نیروی حداکثر (kN)	۱۸۱	۱۶۸	۱۳۴	۱۶۶	۱۴۷	۱۰۷	
نسبت افت نیرو به نیروی نهایی (%)	۹۲	۸۶	۶۸	۸۱	۷۱	۵۲	



نمودار (۲) منحنی انرژی شکست- جابه‌جایی دو نمونه فلز پایه و درزجوش

جدول (۵) انرژی شکست دو نمونه فلز پایه و درزجوش

نمونه	فلز پایه	درزجوش
انرژی شروع ترک (J)	۲۰۳۶	۱۲۷۷
انرژی گسترش ترک (J)	۵۲۲۸	۳۴۹۱
نقطه شروع گسترش ترک (mm)	۱۲/۶	۸/۹
انرژی شکست نمونه (J)	۷۲۶۴	۴۷۶۸
نسبت انرژی شروع ترک به انرژی شکست (%)	۲۸	۲۷
نسبت انرژی رشد ترک به انرژی شکست (%)	۷۲	۷۳

جدول (۶) مقایسه نسبت انرژی شکست درزجوش به انرژی شکست فلز پایه برای فولادهای ترمومکانیکال

پارامتر	پژوهش‌های پیشین			
	هاشمی و محمدیانی ^[۶]	هاشمی ^[۹]	اصغری و همکاران ^[۱۰]	آکوت و همکاران ^[۱۱]
نوع آزمایش	شارپی	شارپی	شارپی	شارپی
قطر خارجی لوله آزمایش (mm)	۱۲۱۹	۱۲۱۹	۱۲۱۹	۴۵۷/۲
ضخامت لوله آزمایش (mm)	۱۴/۳	۱۴/۳	۲۲	۲۵/۴
درزجوش لوله آزمایش	مارپیچ	مارپیچ	مستقیم	مستقیم
انرژی شکست ناحیه جوش (J)	۱۶۰	۱۶۳	۱۵۹	۲۲۳
انرژی شکست ناحیه فلز پایه (J)	۲۶۴	۲۷۱	۲۶۶	۳۶۲
نسبت انرژی شکست ناحیه جوش به انرژی شکست ناحیه فلز پایه (%)	۶۰	۶۰	۶۰	۶۲
نسبت انرژی‌های شکست ناحیه جوش به فلز پایه تحقیق حاضر (%)	۶۶	۶۶	۶۶	۶۶
اختلاف نسبت انرژی شکست ناحیه جوش به فلز پایه تحقیق حاضر با سایر مراجع (%)	۶	۶	۶	۴

از آنجایی که در آزمایش ضربه سقوطی، نمونه آزمایش با ابعاد بزرگ‌تر و دارای ضخامت یکسان با لوله فولادی است، پیش‌بینی حالت شکست پایدار با ضخامت لوله و همچنین مقاومت در برابر رشد ترک در دیواره لوله‌ها، پاسخ نسبتاً نزدیک‌تری را به آزمایش‌هایی با ابعاد واقعی لوله خواهد داد. با توجه به اینکه در آزمایش خمش سه نقطه‌ای بارگذاری به آرامی صورت می‌گیرد، از این‌رو مطالعه دقیق‌تری بر روی شروع و رشد ترک در نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای نسبت به آزمایش‌های ضربه سقوطی، انجام می‌شود. آزمایش خمش سه نقطه‌ای شبه‌استاتیکی با سرعت کم (۱/۰ میلی‌متر بر ثانیه)، بر روی نمونه‌های درزجوش و فلز پایه استخراج شده از لوله ماریچ فولاد API X65 (به عنوان یکی از پرکاربردترین انواع لوله انتقال گاز در ایران)، به ابعاد استاندارد آزمایش ضربه سقوطی با شیار استاندارد ۵/۱ میلی‌متر در مرکز، صورت گرفته است. نمودار نیرو- جابه‌جایی از دستگاه ثبت شده و خلاصه نتایج به دست آمده به صورت زیر است:

۱- نمودار نیرو- جابه‌جایی در نمونه‌های فلز پایه و درزجوش رفتاری مشابه داشته و با شروع بارگذاری، نیرو به صورت خطی در ناحیه الاستیک افزایش پیدا کرده و پس از عبور از ناحیه الاستیک وارد ناحیه پلاستیک شده و با عبور از نقطه نهایی، نیرو اُفت و تا شکست کامل نمونه ادامه پیدا می‌کند. ترسیم نمودار نیرو- جابه‌جایی دو نمونه استاندارد فلز پایه و درزجوش در یک نمودار، انطباق ناحیه الاستیک دو نمونه را نشان می‌دهد و این بیانگر خاصیت ارتجاعی مشابه نمونه‌های درزجوش و فلز پایه است.

۲- نیروی تسلیم و نهایی درزجوش به ترتیب برابر با ۱۳۲ و ۱۹۶ کیلونیوتن و در جابه‌جایی‌های چکش ۲/۹ و ۸/۹ میلی‌متر و نیروی تسلیم و نهایی فلز پایه به ترتیب برابر با ۱۰۷ و ۲۰۶ کیلونیوتن و در جابه‌جایی‌های چکش ۲/۲ و ۱۲/۶ میلی‌متر اتفاق افتاده است. بالاتر بودن نیروی تسلیم فلز درزجوش نسبت به فلز پایه، نشان‌دهنده استحکام تسلیم بالاتر فلز درزجوش است. از طرفی دیگر پایین‌تر بودن نیروی حداکثر فلزجوش نسبت به فلز پایه بیانگر این است که کارسختی در ناحیه جوش کمتر اتفاق افتاده و در هنگام رشد ترک ناحیه پلاستیک کوچک‌تری در اطراف نوک ترک ایجاد شده است.

۳- پس از نیروی حداکثر نیرو در نمودارهای نیرو- جابه‌جایی فلز پایه نیرو کاملاً به هم پیوستگی داشته و هیچ گونه اُفت ناگهانی نیرو دیده نشده است که بیانگر ساختار یکپارچه نمونه فلز پایه است؛ در صورتی که در نمودار نمونه فلز درزجوش نیرو در دو نقطه کاهش ناگهانی داشته و با رشد ترک مقدار آن کاهش پیدا کرده است. با توجه به متخلخل بودن ساختار فلزجوش، هر چه قدر مقدار تنش اعمال شده در نوک ترک بیشتر باشد امکان رشد حفره‌ها و به هم پیوستن آنها و ایجاد ترک ناگهانی (شکست ترد) بیشتر بوده و به دنبال آن نیرو اُفت ناگهانی بیشتری را به همراه خواهد داشت. با گسترش ترک، مقدار تنش در نوک ترک کاسته شده و

سبب می‌شود حفره‌ها کمتر رشد پیدا کرده و ترک‌های ناگهانی نیز کمتر اتفاق می‌افتد. از این‌رو با گسترش ترک مقدار اُفت ناگهانی نیرو نیز کاهش می‌یابد.

۴- برقراری رابطه خطی پس از نیروی حداکثر گسترش ترک پایدار را نشان می‌دهد. با مقایسه دو نمودار مشاهده می‌شود که رشد ترک پایدار در نمونه فلز پایه به صورت به هم پیوسته بوده و میزان جابه‌جایی برابر با ۱۳/۴ میلی‌متر است، اما رابطه خطی در نمونه درزجوش به صورت ناپیوسته و در مجموع به میزان جابه‌جایی ۱۰/۴ میلی‌متر ایجاد شده است. مقایسه ترک پایدار در نمودارهای فلز پایه و درزجوش بیانگر به هم پیوسته بودن رشد ترک پایدار در فلز پایه بوده و مقدار آن نیز نسبت به نمونه‌های درزجوش بیشتر است و این به دلیل ساختار یکپارچه نمونه‌های فلز پایه نسبت به نمونه‌های درزجوش است.

۵- در اختلاف جابه‌جایی‌های برابر (۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر) با نقطه شروع از جابه‌جایی نیروی حداکثر در هر یک از نمونه‌های فلز پایه و درزجوش، مقدار نیرو به ترتیب در فلز پایه به اندازه ۵۲، ۷۱ و ۸۱٪ و در فلزجوش به اندازه ۶۸، ۸۶ و ۹۲٪ اُفت داشته است. بالاتر بودن نسبت کاهش نیرو به نیرو نهایی در یک میزان جابه‌جایی یکسان، نشان‌دهنده بالاتر بودن سرعت گسترش ترک در نمونه آزمایش است. نتایج نشان‌دهنده بیشتر بودن مقدار نسبت کاهش نیرو به نیروی نهایی در نمونه درزجوش است که نشان می‌دهد فلز پایه به دلیل داشتن ساختار یکپارچه مقاومت بالاتری در برابر گسترش ترک داشته و فلز درزجوش به دلیل ساختار متخلخل در برابر گسترش ترک مقاومت پایین‌تری نشان داده است.

۶- انرژی کل شکست به دو نوع انرژی شکست شروع و رشد ترک تقسیم می‌شود. انرژی کل شکست در نمونه فلز پایه برابر با ۷۲۶۴ ژول بوده که ۲۸٪ انرژی شکست نمونه فلز پایه جهت شروع ترک و ۷۲٪ جهت رشد ترک آن است. در نمونه درزجوش انرژی کل شکست برابر با ۴۷۶۸ ژول به دست آمده که انرژی شروع و گسترش ترک به ترتیب ۲۷ و ۷۳٪ انرژی کل شکست است. نتایج پایین‌تر بودن انرژی شکست، شروع و گسترش ترک ناحیه درزجوش نسبت به فلز پایه را نشان می‌دهد و انرژی کل شکست نمونه درزجوش ۶۶٪ نمونه فلز پایه به دست آمده است. با وجود این، نتایج نشان‌دهنده برابری میزان نسبت انرژی شروع و گسترش ترک به انرژی کل شکست در هر نمونه است (اختلاف پایین نسبت انرژی شکست ناحیه درزجوش به انرژی شکست ناحیه فلز پایه با نتایج سایر مراجع بیانگر معتبر بودن نتایج به دست آمده است). شروع رابطه غیرخطی در نمودار انرژی- جابه‌جایی نمونه‌ها (با صرف نظر از رابطه غیرخطی اولیه نمودار) شروع گسترش ترک پایدار را نشان می‌دهد که از آن می‌توان به عنوان تخمینی برای شروع گسترش ترک پایدار استفاده کرد.

تشکر و قدردانی: از شرکت لوله و تجهیزات سدید (تهران) به لحاظ در اختیار قراردادن لوله فولادی API X65، از آقای دکتر / شرفی در

- 8- Majidi-Jirandehi AA, Hashemi SH. Study of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(11):219-228. [Persian]
- 9- Hashemi SH. Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2009;86(8):533-540.
- 10- Asghari V, Choupani N, Hanifi M. CVN-KJC correlation model for API X65 gas pipeline. *Engineering Failure Analysis*. 2017;79:51-63.
- 11- Aucott L, Wen SW, Dong H. The role of Ti carbonitride precipitates on fusion zone strength-toughness in submerged arc welded linepipe joints. *Materials Science & Engineering: A*. 2015;622:194-203.
- 12- Rudland DL, Wang YY, Wilkowski G, Horsley DJ. Characterizing dynamic fracture toughness of linepipe steels using the pressed-notch drop-weight-tear test specimen. *Engineering Fracture Mechanics*. 2004;71(16-17):2533-2549.
- 13- Fang J, Zhang J, Wang L. Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline steel from DWTT specimens. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014;124-125:18-29.
- 14- Simha CHM, Xu S, Tyson WR. Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the drop-weight tear test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014;118:62-88.
- 15- Farrahi A. Experimental evaluation of fracture toughness in spiral weld of thermomechanical steel pipe. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2013;2(4):25-35. [Persian]
- 16- American petroleum institute. API RP 5L3: Recommended practice for conducting drop-weight tear tests on line pipe [Internet]. Washington: API; 2014 [Cited 2014 1 8] Available From: https://www.techstreet.com/standards/api-rp5l3?product_id=1881831.
- 17- American petroleum institute. API specification 5L/ISO 3183 (Modified), specification for line pipe. Washington: API; 2007. Unknown Cited and Cite.
- 18- Majidi Jirandehi AA, Hashemi SH. Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test. *Materials Research Express*. 2019;6(1):016552.
- 19- Pereira LDS, Moco RF, Bolognesi Donatoa GH. Ductile fracture of advanced pipeline steels: study of stress states and energies in dynamic impact specimens - CVN and DWTT. *Procedia Structural Integrity*. 2018; 13:1985-1992.
- 20- Shin S, Hwang B, Lee S, Kang KB. Effects of notch shape and specimen thickness on drop-weight tear test properties of API X70 and X80 line-pipe steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2007;38(3):537-551.
- 21- Rudland DL, Wilkowski GM, Feng Z, Wang YY, Horsley D, Glover A. Experimental investigation of CTOA in linepipe steels. *Engineering Fracture Mechanics*. 2003;70(3-4):567-577.

دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند به لحاظ همکاری در انجام آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای و از آقای مهندس صادقی (کارگاه مکانیک دانشگاه بیرجند) که در ساخت قیدوبند و چکش آزمایشگاهی همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی و ادبی حاصل از فعالیت نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن بر عهده آنها است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافع بین اشخاص و سازمان‌ها وجود ندارد.

سهم نویسندگان: حمید هاشمی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ سیدجنت هاشمی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۵۰٪).

منابع مالی: حمایت مالی از طرف دانشگاه بیرجند بوده است.

فهرست علائم

E_t	انرژی رشد ترک (J)
E_p	انرژی گسترش ترک (J)
E_t	انرژی کل شکست (J)
F_y	نیروی تسلیم (kN)
F_u	نیروی حداکثر (kN)
σ_y	تنش تسلیم (MPa)
σ_u	استحکام نهایی (MPa)
v	نسبت پواسون

منابع

- 1- Demofonti G, Mannicci G, Spinelli CM, Barsanti L, Hillenbrand HG. Large diameter X100 gas linepipes: fracture propagation evaluation by full-scale burst test. *Pipeline Technology*. 2000;1:509-520.
- 2- El-Danaf E, Baig M, Almajid A, Alshalfan W, Al-Mojil M, Al-Shahrani S. Mechanical microstructure and texture characterization of API X65 steel. *Materials and Design*. 2013;47:529-538.
- 3- Chen X, Lu H, Chen G, Wang X. A Comparison between fracture toughness at different locations of longitudinal submerged arc welded and spiral submerged arc welded joints of API X80 pipeline steels. *Engineering Fracture Mechanics*. 2015;148:110-121.
- 4- Hashemi SH, Sabokrouh M, Farahani MR. Investigation of weldability in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe. *Modares Mechanical Engineering*. 2013;13(4):60-73. [Persian]
- 5- Jenney C, Brien A. *Welding Handbook*. Miami: American Welding Society; 1987.
- 6- Hashemi SH, Mohammadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012;98:8-15.
- 7- Hashemi H, Hashemi SH. Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of API X65 steel using three-point bending test. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19(7):1591-1600. [Persian]